# CIÊNCIA & TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

REVISTA DA SOCIEDADE PORTUGUESA DE MATERIAIS | 2025 | VOL.37 | Nº1



# SHAPING THE FUTURE OF AUTOMOTIVE COMPONENTS

SPM SOCIEDADE PORTUGUESA de MATERIAIS




# FICHA TÉCNICA

DIRETOR
**Jorge Lino**

DIRETOR ADJUNTO
**Vitor Francisco**

CONSELHO EDITORIAL
**Manuela Oliveira**
**Joana Sousa**

EDITORES CONVIDADOS
**Ana Reis** (DEMec, FEUP)
**Sónia Simões** (DEMec, FEUP)
**Tiago Silva** (INEGI/LAETA/FEUP)

COMITÉ LOCAL
ORGANIZADOR DO EVENTO
**Cláudia Tavares** (Mobinov)
**Inês Santos** (Palbit)
**Rui Amaral** (INEGI/FEUP)
**Francisco Matos** (INEGI)
**Vitor Sousa** (FEUP, INEGI, MIT Portugal)

COMITÉ CIENTÍFICO
**Ana Reis** (DEMec, FEUP)
**Abílio de Jesus** (DEMec, FEUP)
**Sónia Simões** (DEMec, FEUP)
**Tiago Silva** (INEGI/LAETA/FEUP)
**Bruno Guimarães** (Palbit S.A.)
**Cristina Fernandes** (Palbit S.A.)
**Filipe Oliveira** (Universidade de Aveiro)
**Luís Rocha** (INESC)

PROPRIEDADE E REDAÇÃO
**Sociedade Portuguesa de Materiais**
Apartado 4538 EC
Carnide 1511-970 Lisboa

PAGINAÇÃO
**Lemos design**

DEPÓSITO LEGAL
**nº 103503/96**
ISSN
**2183-0398**

# A SOCIEDADE PORTUGUESA DE MATERIAIS

É MEMBRO DA...

## EUROPEAN FEDERATION OF CORROSION (EFC)

IMPORTANTES BENEFÍCIOS DISPONÍVEIS PARA AS SOCIEDADES MEMBROS DA EFC (EUROPEIAS E INTERNACIONAIS) INCLUEM A OPORTUNIDADE DE:

- Nomear membros para os grupos de trabalho do EFC;
- Nomear candidatos para os comitês do EFC (Conselho de Administradores e Comité Consultivo de Ciência e Tecnologia);
- Nomear um representante para a Assembleia Geral anual do EFC (com direitos de voto);
- Nomear candidatos para os prémios da EFC;
- Organizar eventos e cursos com patrocínio e logotipo do EFC; com promoção especial no "Calendário de Eventos"do EFC, publicado no website da EFC e nas newsletters EFC;
- Obter descontos em conferências anuais da EUROCORR se desejar participar como expositor;
- Promoção gratuita dos eventos e atividades relacionados com a Divisão Técnica de Corrosão da SPM nos boletins da EFC;
- Disponibilidade de Afiliação Geral da Organização Mundial da Corrosão (WCO) sem custo adicional sujeito a solicitação formal e aprovação do Conselho de Administradores da WCO e da Assembleia Geral da WCO;
- Além disso, todos os que pertencem a uma Sociedade Membro do EFC usufruem de uma redução na inscrição em conferências anuais da EUROCORR; redução do registro em todos os eventos patrocinados pela EFC, se aplicável (com número de evento atribuído); acesso à área restrita contendo conferências anteriores da EUROCORR; preços com desconto em todas as publicações da EFC;
- Sociedades membros europeias também são elegíveis para apresentar propostas de organização de conferências EUROCORR.

## FEDERATION OF EUROPEAN MATERIALS SOCIETIES (FEMS)

IMPORTANTES BENEFÍCIOS DISPONÍVEIS PARA OS SÓCIOS DA SPM:

- Redução da Inscrição na conferência EUROMAT (15%);
- Uma voz mais forte na Europa como parte de uma organização de grande escala e que aglomera grandes sociedades europeias;
- Divulgação dos eventos e atividades da sociedades da SPM;
- Capacidade de contribuir para a agenda europeia de materiais;
- Envolvimento direto em eventos organizados pela FEMS;
- Nas conferências da EUROMAT, os membros das sociedades nacionais serão identificados nos seus crachás como membros da sua sociedade - oportunidade para uma rede mais extensa entre os seus membros;
- Nomear membros para prémios FEMS e medalhas;
- A FEMS desenvolveu valiosas ligações à Comissão Europeia e a importantes Plataformas Tecnológicas Europeias, sendo membro da Alliance for Materials (A4M).

A SPM É TAMBÊM MEMBRO DA...

## EUROPEAN POLYMER FEDERATION (EPF)

SPM SOCIEDADE PORTUGUESA de MATERIAIS


**MATERIAIS E PROCESSOS**

07 POLIMENTO AUTOMATIZADO DE MOLDES ÓTICOS: RESULTADOS PRELIMINARES
11 REVESTIMENTOS HÍBRIDOS DEPOSITADOS POR CVD+HIPIMS PARA MAQUINAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS
17 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CERÂMICOS À BASE DE NITRETO DE SILÍCIO
23 MAQUINAGEM DE VITROCERÂMICOS COM FERRAMENTA REVESTIDA A DIAMANTE HF-CVD
31 MAQUINAGEM E PEÇAS DO SETOR AUTOMÓVEL COM A REPLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES PRESENTES NA INDÚSTRIA
37 INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO NA DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS POR HIPIMS
43 FERRAMENTAS CERÂMICAS DE SiAlON PARA FRESAGEM DE INCONEL 718
49 INFLUÊNCIA DO MODO DE FRESAGEM NAS FORÇAS DE CORTE E DESGASTE GERADO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE SiAlON NA MAQUINAGEM DE INCONEL 718
55 OTIMIZAÇÃO DE GRÂNULOS DE WC-25CO PARA APLICAÇÃO EM DEPOSIÇÃO DIRETA DE ENERGIA
61 OTIMIZAÇÃO DE LIGAÇÕES DO TIPO FLOW DRILLING SCREW PARA APLICAÇÕES AUTOMÓVEL: AVANÇOS NA COMPREENSÃO E MODELAÇÃO DO PROCESSO
71 NOVAS SOLUÇÕES DE FERRAMENTAS PARA A FURAÇÃO DE MULTI-MATERIAIS CFRP/METAL
77 FERRAMENTAS DE CORTE AFIADAS A LASER PARA FRESAGEM DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO
83 FORMAÇÃO DE ILHAS DE SILICATO EM TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE ZINCO-NÍQUEL
89 ESTRATÉGIAS DE MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA MELHORIA DA ADESÃO METAL-POLÍMERO

**DIGITALIZAÇÃO**

95 SISTEMA DE CONTROLO DE ÁGUAS DO PROCESSO DE INJECÇÃO
99 DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA MEDIÇÃO DE CURVATURA EM BACK LIGHTS DE ECRÃS
103 SISTEMA AUTOMÁTICO DE INSPEÇÃO DA QUALIDADE DE PEÇAS DE ALUMÍNIO FUNDIDO
107 LIMITATIONS AND PROSPECTS OF WIRELESS VIBRATION MONITORING FOR AUTOMATIC CHATTERING DETECTION
113 SMART FACTORY - PLATAFORMA IOT COM FERRAMENTAS DE IA INTEGRADAS
117 A EVOLUÇÃO PARA A MOBILIDADE ELÉTRICA: UM BENCHMARKING DE HIPERCARROS ELÉTRICOS & O DESIGN E DIMENSIONAMENTO DE UM CONTENTOR DE BATERIA EM COMPÓSITO
123 GESTÃO DE STOCKS DE FERRAMENTAS DE STOCK COM DEEP Q-LEARNING
129 SENSORIZAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE SOLDADURA BASEADA EM IA
135 INTERAÇÃO E COMUNICAÇÃO DE AGV PARA HUMANO

**TESTEMULHOS JOVENS INVESTIGADORES HI-REV**

139 BEATRIZ RODRIGUES
140 BEATRIZ SOUSA MONTEIRO
141 RÚBEN COSTA
142 RUI NASCIMENTO
143 MÓNICA FARIA
144 VITOR SOUSA

**OPINIÃO DE...**

145 PROCESSAMENTO DE MATERIAIS E IA: FUSÃO INUSITADA OU LIGAÇÃO PERFEITA?
POR CRISTINA FERNANDES E DANIEL FIGUEIREDO
148 HI.REV: ONDE A INOVAÇÃO E A COMPETITIVIDADE SE CRUZAM
POR MIGUEL ARAÚJO
149 A-MOVER: TECNOLOGIA, CIÊNCIA E INDÚSTRIA A ACELERAR A MOBILIDADE DO FUTURO
POR MIGUEL PINTO

**ENTREVISTA**

150 DANIEL FIGUEIREDO - PALBIT, ADMINISTRADOR EXECUTIVO RESPONSÁVEL I&D

**REPORTAGEM**

153 CONFERÊNCIA HI-REV 2024 - SHAPING THE FUTURE OF AUTOMOTIVE COMPONENTS 5 DEZEMBRO 2024

# EDIÇÃO ESPECIAL AGENDA HI-REV



**ANA REIS**
DEMec, FEUP


**SÓNIA SIMÕES**
DEMec_FEUP


**TIAGO SILVA**
INEGI



***A indústria de componentes automóvel é um dos pilares estruturantes da economia portuguesa. Em 2024, representava cerca de 4,9% do PIB e assegurava diretamente mais de 64 mil postos de trabalho. Os números impressionam, mas é sobretudo a sua relevância estratégica - enquanto setor exportador, altamente tecnológico e fortemente integrado nas cadeias de valor globais - que justifica uma atenção redobrada neste momento de transição.***

***Nos últimos anos, o setor enfrentou desafios sem precedentes. A disrupção provocada pela pandemia de COVID-19, a instabilidade geopolítica, a crise energética e a transformação profunda da mobilidade na Europa - com novas exigências ambientais, tecnológicas e industriais - vieram expor vulnerabilidades e testar a resiliência do tecido empresarial. A quebra nas exportações e a estagnação do setor em 2024 refletem esta conjuntura.***

***Paralelamente, assistimos a alterações estruturais nas motorizações, materiais e processos, com impacto direto na produção e na cadeia de fornecimento. Os novos veículos integram cerca de 80% menos componentes móveis do que os motores de combustão interna, exigindo respostas inovadoras por parte dos fornecedores tradicionais. Ganha protagonismo um novo ecossistema de produção, liderado por fabricantes de baterias, chips, inversores e sistemas de carregamento, colocando a inovação tecnológica no centro da competitividade industrial.***


A transformação é também impulsionada por três grandes vetores: eletrificação, digitalização e sustentabilidade. Estas tendências conduziram à adoção de novos materiais - como ligas avançadas de alumínio, aços de ultra-alta resistência, compósitos de fibra de carbono e estruturas multimateriais - que permitem reduzir o peso, melhorar a eficiência, segurança e conforto, e promover um impacto ambiental positivo. A substituição progressiva do aço convencional por soluções mais leves e sustentáveis reflete uma nova lógica funcional, onde os materiais são otimizados para desempenho e circularidade.

A par destes desafios transversais, alguns subsetores enfrentam pressões acrescidas. É o caso do setor da fundição, historicamente relevante na cadeia de valor automóvel, mas atualmente sob forte pressão devido à redução da procura por componentes para motores de combustão, à elevada intensidade energética dos processos e à concorrência crescente dos mercados asiáticos. Também o setor dos moldes atravessa constrangimentos estruturais, com destaque para a reduzida flexibilidade produtiva e a dificuldade em adaptar-se a ciclos de inovação cada vez mais curtos.

A resposta a estas dinâmicas passa, inevitavelmente, por um reforço da digitalização, da sustentabilidade e da inovação colaborativa - pilares centrais da Agenda Hi-rEV. No projeto tem sido implementado um verdadeiro modelo de investigação e inovação em rede. Em vez de inovarem isoladamente, as empresas têm construído redes colaborativas com universidades, startups, centros de I&D e associações do setor, para acelerar resultados, reduzir riscos e partilhar conhecimento. Esta abordagem tem permitido combinar investigação científica, inovação aplicada e desenvolvimento conjunto de produtos, processos e modelos de negócio.

Foi neste contexto de incerteza, mas também de oportunidade, que nasceu a Agenda Mobilizadora Hi-rEV. Apoiada pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), esta iniciativa agregou um consórcio ambicioso, com empresas líderes do setor automóvel, institutos de investigação e universidades, com um propósito comum: posicionar o país como referência europeia na produção de componentes tecnológicos de nova geração.

A Agenda Hi-rEV apresenta já uma execução avançada, demonstrando uma implementação sólida e equilibrada das atividades contratualizadas. O desempenho técnico acompanha esta trajetória, refletindo o compromisso dos parceiros com a criação de valor industrial e tecnológico para o setor automóvel.

Este número especial da Revista da SPM reúne contributos técnico-científicos que ilustram bem o alcance e a profundidade desta Agenda. Inclui artigos dedicados a novos processos, materiais e metodologias digitais, entrevistas com os protagonistas da transformação industrial - como Daniel Figueiredo, da Palbit, entidade líder da Hi-rEV - e testemunhos dos jovens investigadores de mestrado e doutoramento que dão corpo à componente científica e tecnológica do projeto. Destacamos também o artigo de opinião de Miguel Pinto, Presidente do Cluster Automóvel, que reflete sobre o posicionamento estratégico da indústria nacional no atual xadrez da mobilidade global.

Este número é mais do que um retrato técnico da Agenda Hi-rEV. É, acima de tudo, um testemunho do papel decisivo que a engenharia, a ciência dos materiais e a tecnologia de processos desempenham na transformação da indústria. É também uma demonstração do compromisso da comunidade científica e tecnológica nacional com a construção de um futuro mais sustentável, competitivo e inovador.


Aproveitamos ainda para agradecer o apoio do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), que viabiliza esta Agenda, bem como o acompanhamento exigente e colaborativo da Estrutura de Missão "Recuperar Portugal" e do IAPMEI - Agência para a Competitividade e Inovação.

MICROPLASTICOS



QUEM SOMOS

# SOMOS ESPECIALIZADOS NA PRODUÇÃO DE COMPONENTES PLÁSTICOS DE ALTA PRECISÃO E ELEVADO RIGOR DIMENSIONAL

O know-how, de mais de 38 anos, aliado ao rigor e qualidade que nos caracteriza faz com que a Microplásticos seja uma das referências do setor para alguns dos maiores fabricantes mundiais. Sendo que os setores em que a empresa está mais presente são o da mobilidade e das building technologies.

| +600 | 85 | +60 | +150M |
|---|---|---|---|
| MOLDES EM PRODUÇÃO | MÁQUINAS DE INJEÇÃO | PROJETOS POR ANO | PEÇAS POR ANO |

Portugal ● ● Polónia

## DE PORTUGAL E POLÓNIA PARA O MUNDO!

- Africa 1
- Europe 14
- America 3
- Asia 4

UNIDADE 1 - SEDE

Cova de Serpe  Quiaios
3080-512 Figueira da Foz

UNIDADE 2 - GALA

Rua das Tílias, nº 98
Parque Industrial e Empresarial
da Figueira da Foz
S. Pedro  Zona Industrial da Gala
3090-380 Figueira da Foz

MICROPLASTICOS POLSKA

Gustave Eiffel Street, nº 13
44-109 Gliwice, Polónia

# POLIMENTO AUTOMATIZADO DE MOLDES ÓTICOS: RESULTADOS PRELIMINARES

**M. Isidoro**[(1)], **F. Matos**[(2)], **T.E.F. Silva**[(2)]
**1** MD Group, S.A., 2400-016 Barosa, Leiria, Portugal. Email: marianaisidoro@mdgroup-global.com
**2** INEGI, Campus da FEUP, R. Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal. Email: tesilva@inegi.up.pt

***O presente trabalho investiga a aplicação de ferramentas de retificação adaptativa à forma em máquinas CNC, com o objetivo de reduzir a dependência de polimento manual no acabamento de moldes. O estudo utilizou ferramentas compostas por um núcleo de borracha, uma camada de adesivo e elementos abrasivos, testadas em duas peças de aço 1.2343 ESR. A peça 1 consistia em um provete plano, enquanto a peça 2 era um postiço ótico para lentes espessas. Resultados demonstraram uma significativa redução na rugosidade superficial para a peça 1, alcançando até 0.002 µm. Para a peça 2, a rugosidade final foi de 0.0054 µm, embora a ferramenta tenha apresentado limitações em superfícies micro-estruturas e raios de ajustamento. Este estudo indica o potencial destas ferramentas de polimento como alternativa para processos manuais, com ressalvas a melhorias futuras.***

*Polishing optical moulds is an essential stage in the manufacture of high-precision components. Currently, this task is largely carried out manually, which results in high costs and variability in results. This paper presents a study on the use of Shape Adaptive Grinding tools on CNC machines, evaluating their ability to automate polishing and achieve finishes with adequate roughness (0.05 µm to 0.01 µm) for optical moulds. Tests were carried out on two pieces of 1.2343 ESR steel, highlighting the achievement of a roughness of 0.002 µm for flat surfaces and 0.0054 µm for an optical mould for thick lenses. Despite the limitations in polishing radii and micro-structures surfaces, the results are promising and warrant further study.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
POLIMENTO; RETIFICAÇÃO ADAPTATIVA À FORMA; MÁQUINA CNC, RUGOSIDADE.
*Polishing; shape adaptive grinding; CNC machine, roughness*

## INTRODUÇÃO

O crescente nível de exigência dos moldes de alta precisão, especialmente em aplicações óticas, exige superfícies com níveis de rugosidade extremamente baixos. Tradicionalmente, o acabamento final desses moldes é realizado manualmente, um processo que requer tempo, habilidade especializada e elevado custo.

As ferramentas de retificação adaptativa à forma surgem como uma solução inovadora para a automatização desse processo. Compostas por um núcleo elástico, uma camada adesiva e abrasivos, estas ferramentas são projetadas para operar em máquinas CNC, permitindo um maior controlo sobre os parâmetros de polimento. A elasticidade do núcleo garante uma pressão uniforme sobre a superfície, reduzindo o risco de irregularidades e melhorando a consistência do acabamento.

Este estudo analisa a eficácia destas ferramentas em duas aplicações: uniformização de superfícies planas e acabamento de postiços óticos. Os resultados obtidos são discutidos em termos de rugosidade, qualidade do acabamento e limitações observadas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As ferramentas utilizadas possuem três componentes principais exemplificado na Figura 1, um núcleo elástico de borracha responsável pela adaptação às irregularidades da superfície e pela manutenção de uma pressão constante, uma camada adesiva, e os elementos abrasivos materiais diamantados com variados graus de granulação.

Para os dois testes foram utilizadas 2 peças em aço 1.2343 ESR (Figura 2), a Peça 1, um provete plano e a Peça 2, um postiço ótico para lentes espessas.

Os testes foram realizados numa máquina CNC, utilizando diversas ferramentas que variavam em raio e grau de granulação. No 1.º teste foi medida

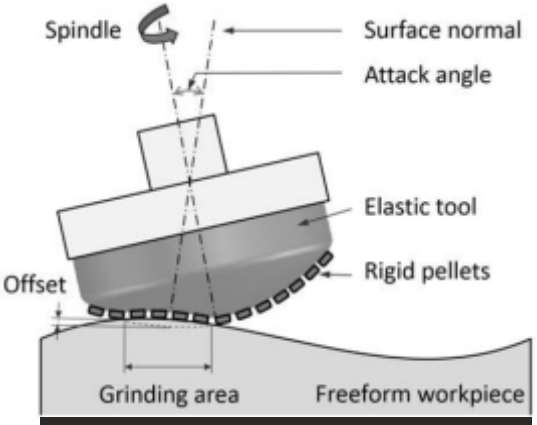



**FIGURA 1**
*Princípio das ferramentas de retificação adaptativa à forma [1].*

*(a)*



*(b)*

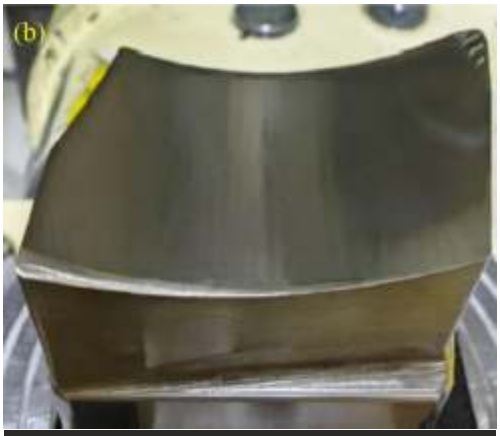



**FIGURA 2**
*Peças antes dos testes realizados. (a) Peça 1 - Provete plano, (b) Peça 2 - Postiço ótico.*

a rugosidade superficial após cada passagem e no 2.º teste foi medida a rugosidade final.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

**Teste 1: Uniformização de Superfícies (Peça 1)**

A Peça 1 foi submetida a uma sequência de passagens com diferentes ferramentas variando entre raio e grau de granulação, traduzindo-se numa redução progressiva da rugosidade superficial. A rugosidade inicial de 0.302 µm foi reduzida para 0.002 µm após o uso da ferramenta R10 3 RBD, como demonstrado na Tabela 1.

Na Figura 3, podem ser observados os resultados obtidos na peça, consegue-se verificar visualmente a diferença entre rugosidades sendo o (a) correspondente à passagem da ferramenta 1, o (b) à passagem das ferramentas 1 e 2, o (c) à passagem das ferramentas 1,2 e 3 e o (d) à passagem de todas as ferramentas em teste (1 a 4).



**LEGENDA**
*(a) Passagem Ferramenta 1*
*(b) Passagem Ferramentas 1 e 2*
*(c) Passagem Ferramentas 1 a 3*
*(d) Passagem Ferramentas 1 a 4*

**FIGURA 3**
*Peça 1 após teste.*

Os resultados confirmam a eficácia das ferramentas na obtenção de superfícies com acabamento próximo aos requisitos para moldes óticos (0.05 µm a 0.01 µm). A redução significativa na rugosidade após cada passagem destaca o potencial dessas ferramentas para substituir processos manuais.

Neste teste, cada zona retangular na peça testada demoraria aproximadamente 2 horas para ser polida manualmente, enquanto o processo automatizado conseguiu concluir toda a operação em apenas 37 minutos (inclui os tempos da passagem em todos os retângulos). Isso representa uma redução de tempo superior a 75%, além de oferecer um acabamento final de 0.002 µm de rugosidade, altamente consistente. A redução no tempo de processamento não só torna o polimento mais eficiente, mas também elimina a variabilidade inerente ao trabalho manual, garantindo resultados uniformes em toda a superfície.

**Teste 2: Acabamento de Postiço Ótico (Peça 2)**

A Peça 2 foi submetida a um processo de polimento, utilizando ferramentas com diferentes configurações na Tabela 2 encontram-se os parâmetros utilizados. Após o teste (Figura 5), a rugosidade final foi de 0.0054 µm, encontrando-se dentro dos parâmetros desejados. Porém sendo este um postiço que necessita de ser ajustado no molde, um ajustamento onde é fundamental o uso de quinas vivas para manter estanquicidade do material plástico, o facto de estas ferramentas bolearem as quinas implica que não pode ser passada na totalidade da peça tendo de se deixar uma distância, ainda por apurar, das quinas da peça obrigando a que essas zonas mantenham um polimento exclusivamente manual, sendo uma limitação significativa para aplicações complexas. Devido a este fator teve de ser "limpa" a microestrutura que se encontrava

**TABELA 1**
*Parâmetros utilizados e resultados obtidos após o teste 1.*

| Ferramenta | Referência | Offset [mm] | Federate [mm/min] | Operation Mode | Track Spacing [mm] | Spindle Speed [rpm] | Precess Angle [Deg] | Cycle Time | Final Roughness [µm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | R10 40 NBD | 0.1 | 1200 | 4-Axis | 0.24 | 6000 | 15 | 00:11:44 | 0.302 |
| 2 | R10 9 NBD | 0.1 | 1200 | 4-Axis | 0.24 | 6000 | 15 | 00:11:42 | 0.11 |
| 3 | R10 9 RBD | 0.1 | 1200 | 4-Axis | 0.24 | 6000 | 15 | 00:06:17 | 0.0177 |
| 4 | R10 3 RBD | 0.1 | 800 | 4-Axis | 0.24 | 6000 | 15 | 00:07:02 | 0.0021 |

**TABELA 2**
*Parâmetros utilizados para o teste 2.*

| Ferramenta | Referência | Offset [mm] | Federate [mm/min] | Operation Mode | Track Spacing [mm] | Spindle Speed [rpm] | Precess Angle [Deg] | Cycle Time |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | R10 80 NBD | 0.3 | 800 | 3-Axis | 0.24 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 2 | R10 80 NBD | 0.3 | 800 | 3-Axis | 0.24 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 3 | R10 40 NBD | 0.3 | 800 | 3-Axis | 0.24 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 4 | R10 40 NBD | 0.2 | 800 | 3-Axis | 0.24 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 5 | R10 9 NBD | 0.3 | 800 | 3-Axis | 0.24 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 6 | R10 9 NBD | 0.2 | 800 | 3-Axis | 0.23 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 7 | R10 9 RBD | 0.3 | 800 | 3-Axis | 0.24 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 8 | R10 9 RBD | 0.2 | 800 | 3-Axis | 0.23 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 9 | R10 3 RBD | 0.3 | 800 | 3-Axis | 0.24 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 10 | R10 3 RBD | 0.2 | 800 | 3-Axis | 0.23 | 6000 | 0 | 00:07:22 |
| 11 | R10 3 RBD | 0.2 | 800 | 3-Axis | 0.24 | 6000 | 0 | 00:07:22 |



**FIGURA 4**
*Superfície da peça 2 após teste.*



**FIGURA 5**
*Visualização ao microscópio das marcas deixadas na peça 2 após o teste.*

maquinada no postiço, no entanto acreditamos haver possibilidade de polir as microestruturas alterando a estratégia CAM em testes futuros. Ainda assim, a análise microscópica revelou marcas residuais da ferramenta (Figura 5), indicando a necessidade de uma leve limpeza manual para otimizar o acabamento.

Neste teste, o impacto da automação foi ainda mais evidente. Enquanto o polimento manual da peça levaria entre 5 a 6 horas para atingir os mesmos resultados, o polimento a CNC concluiu o trabalho em apenas 1 hora e 21 minutos. Esta redução drástica no tempo reflete a eficiência do processo automatizado, especialmente em superfícies complexas como as utilizadas em moldes óticos para lentes espessas. Apesar da necessidade de pequenos ajustes manuais na superfície devido a marcas residuais, o uso destas ferramentas mostrou-se significativamente mais rápido e eficaz, reforçando o potencial para substituir processos manuais em aplicações industriais de alta precisão.

## DISCUSSÃO GERAL

Os testes demonstraram que as ferramentas de retificação adaptativa à forma são altamente eficientes para superfícies planas, reduzindo significativamente o tempo de processamento e a variabilidade associada ao polimento manual. Porém, a incapacidade de polir raios e microestruturas representa um desafio. Potenciais soluções incluem o uso de um software CAM

mais adequado, visto que o utilizado para estes testes não era o mais indicado, ou ajustes nos parâmetros operacionais.

## CONCLUSÃO

A utilização de ferramentas de retificação adaptativa à forma em máquinas CNC mostrou-se promissora como uma alternativa para a automatização do polimento de moldes óticos, atualmente realizado de forma manual. Os resultados obtidos nos testes confirmam a capacidade destas ferramentas de alcançar níveis de rugosidade compatíveis com os requisitos rigorosos de superfícies óticas, especialmente em superfícies planas, onde foi possível atingir 0.002 µm de rugosidade. Além disso, a elasticidade do núcleo das ferramentas permitiu uma aplicação uniforme da pressão sobre as superfícies, garantindo um acabamento consistente e reduzindo o risco de irregularidades.

Apesar das vantagens observadas, o estudo revelou limitações importantes no polimento de áreas com raios e microestruturas, o que evidencia a necessidade de desenvolver ferramentas específicas ou adaptar estratégias operacionais para geometrias complexas. Adicionalmente, pequenas marcas residuais detetadas ao microscópio indicam que ajustes no processo podem ser necessários para eliminar a necessidade de limpeza manual.

Ainda assim, o potencial de redução de custos e do tempo de processamento, aliado à melhoria na consistência dos resultados, posiciona as ferramentas de polimento como uma solução viável e inovadora. O avanço nesta tecnologia pode revolucionar o setor, elevando a eficiência na produção de moldes óticos de alta precisão.


## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002), cofinanado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa através do programa Next Generation EU.


## REFERÊNCIAS


**[1]** Beaucamp, Anthony & Namba, Yoshiharu & Charlton, Phillip & Jain, Samyak. (2015). *Shape Adaptive Grinding of Silicon Carbide Aspheric Optic.* FM1G.2. 10.1364/FIO.2015.FM1G.2

# REVESTIMENTOS HÍBRIDOS DEPOSITADOS POR CVD+HIPIMS PARA MAQUINAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS

**J. Ferreira[1], F.J. Oliveira[1], A.V. Girão[1], C.M. Fernandes[2], D. Figueiredo[2], B. Guimarães[2], M. Macedo[2]**

**1** CICECO & Department of Materials and Ceramic Engineering, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal
**2** Palbit S.A., Palhal - Rua das Tílias, 3850-582, Branca, Albergaria-a-Velha, Portugal

***O desempenho das ferramentas de corte é uma preocupação crescente devido ao desenvolvimento de novos materiais mais difíceis de maquinar e às alterações no fabrico de novos produtos, que exigem elevada precisão, redução de custos sem redução da qualidade e a integração de novas tecnologias sustentáveis.***

***Pretende-se com este trabalho desenvolver de um novo revestimento cerâmico híbrido multicamada (CVD + PVD (HiPIMS)) para superar os revestimentos já existentes no mercado na maquinação de aços inoxidáveis. Para o efeito, depositou-se uma camada de AlCrN por PVD (HiPIMS) sobre uma multicamada depositada por CVD (TiCN - Al2O3 - TiN) com a presença de alumina texturizada e avaliou-se o crescimento e a adesão da camada exterior de AlCrN. Além disso, foi ainda avaliada a adição de outra camada ZrN, depositada por HiPIMS sobre a camada de AlCrN.***

***A avaliação da rugosidade da superfície dos revestimentos após CVD e HiPIMS, indicou um valor médio de rugosidade superficial (Sa) de 0,23 µm e 0,15 µm, para o revestimento superficial de TiN e AlCrN, respetivamente. Os ensaios de maquinagem de aços inoxidáveis, revelaram que os revestimentos depositados por PVD (HiPIMS) melhoram efetivamente a vida útil das pastilhas de corte.***

*The performance of cutting tools is a growing concern due to the development of new materials and changes in manufacturing of new products, which require high precision, cost reduction without reducing quality and the integration of new sustainable technologies.*

*The aim of this work was to develop a new hybrid multilayer ceramic coating (CVD + PVD (HiPIMS)) to outperform the coatings already on the market for machining stainless steels. To this end, an AlCrN layer was deposited by PVD (HiPIMS) on a CVD-deposited multilayer (TiCN - Al2O3 - TiN) in the presence of textured alumina and the growth and adhesion of the outer AlCrN layer was evaluated. The addition of another ZrN layer, deposited by HiPIMS on top of the AlCrN layer, was also evaluated.*

*Evaluation of the surface roughness of the coatings after CVD and HiPIMS indicated an average surface roughness value (Sa) of 0.23 µm and 0.15 µm for the TiN and AlCrN surface coatings, respectively. Finally, the machining tests on stainless steels revealed that the coatings deposited by PVD (HiPIMS) effectively improve the service life of the cutting inserts.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**

PVD, HiPIMS, CVD, AlCrN, FERRAMENTAS DE CORTE; AÇO INOXIDÁVEL

*PVD, HiPIMS, CVD, AlCrN,Cutting tools, stainless steels*

## INTRODUÇÃO

No setor da mobilidade, é necessário criar produtos leves e resistentes para reduzir o consumo de energia e emissões, o que exige ferramentas de maquinagem mais precisas e eficientes. A utilização de revestimentos otimizados na superfície das pastilhas de corte é uma solução viável, pois aumenta a resistência ao desgaste a alta temperatura, prolongando a vida útil das ferramentas. A Deposição Química de Vapor (CVD) [1] é eficaz para aplicar multicamadas de materiais como TiN, TiCN, Al2O3 e TiN, aumentado a durabilidade face às pastilhas de metal duro não revestido. A utilização de alumina texturizada reduz o atrito e o desgaste, aumentando a vida útil das pastilhas revestidas [2]. Outra tecnologia que também é utilizada para revestimentos é uma variante da Deposição Física de Vapor (PVD), a técnica de pulverização

catódica por magnetrão de impulso de alta potência (HiPIMS). Esta utiliza impulsos de alta tensão para criar um plasma denso com um elevado grau de ionização. Através de um controlo preciso dos parâmetros de deposição, como a duração do impulso e o ciclo de trabalho consegue-se definir com precisão a taxa de deposição e a energia das partículas, otimizando propriedades do revestimento, como a sua densidade e a rugosidade. Neste trabalho, o revestimento de AlCrN produzido por esta técnica, foi selecionado, por apresentar várias vantagens, como a resistência à oxidação a altas temperaturas [3], baixo coeficiente de atrito, boa resistência mecânica [4] e maior capacidade de remoção de aparas, tornando-o mais adequado para aplicações de corte interrompido [5].

A combinação das técnicas CVD e PVD, é designada por deposição híbrida, que permite ultrapassar algumas das limitações individuais de cada técnica. A convergência destas tecnologias (CVD/PVD) é impulsionada pela procura de técnicas que possam alcançar revestimentos mais avançados e eficientes (desempenho, controlo da deposição e qualidade da superfície), de modo que as vantagens de ambas as tecnologias possam convergir [1]. Neste contexto, o presente trabalho consiste no desenvolvimento de um revestimento cerâmico multicamada TiN/TiCN/Al2O3/TiN com texturização da camada de alumina e camada final de AlCrN, combinando as técnicas de deposição CVD e HiPIMS. O desempenho deste revestimento híbrido foi avaliado de acordo com as especificações exigidas às ferramentas de corte revestidas na maquinagem de aços especiais de alta resistência (HSS ou HS) utilizados na indústria automóvel, mostrando ganhos significativos face à alternativa baseada apenas em revestimentos multicamada CVD.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As pastilhas de corte de metal duro com a geometria CNMG 120408-GS foram processadas pela Palbit S.A. através do processo pulverometalúrgico (moagem, prensagem, sinterização e retificação), sendo a última fase a deposição dos revestimentos através de CVD e PVD. A composição utilizada para as pastilhas de corte pertence à classe submicrométrica (tamanho médio de grão FSSS~0,8  m) com WC+7%ppCo, dureza de 1730±50 HV10, KIC de 10,5 MPa.m1/2 e resistência à flexão (norma ISO 3327, provetes tipo A) de 2850 MPa. As pastilhas foram revestidas pelo processo CVD e posteriormente algumas foram revestidas por HiPIMS. A Tabela 1 apresenta as camadas de revestimento presentes em cada amostra, a tecnologia utilizada, a temperatura necessária, os gases e os alvos utilizados para depositar estas camadas e o tempo de deposição.
Foram processadas e analisadas quatro conjuntos de amostras designadas como CVD1, CVD2, CVD3 e CVD4 (Tabela 1), cada uma com diferentes revestimentos, como se pode observar na Figura 1. De realçar que a diferença entre o revestimento CVD1 e CVD2 está na texturização da alumina no plano 006, no caso do revestimento CVD2, como se confirma com os dados da Tabela 2.

A morfologia dos revestimentos foi caraterizada por microscopia eletrónica de varrimento (SEM Hitachi SU70) e a composição química por espetroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX), utilizando o detetor *Bruker Quantax* 400 acoplado ao equipamento SEM. A estrutura cristalina dos revestimentos foi caracterizada por difração de raios X (difratómetro *Panaltytical X'Pert Pro3*), tendo sido realizado um varrimento de 2q (20º - 140º), com um tamanho de passo de 0,026 (2q) e um tempo de integração de um segundo. A textura das camadas de $Al_2O_3$ foi avaliada utilizando os coeficientes de textura, TC, calculados através da seguinte equação:

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)} \left\{ \frac{1}{n} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)} \right\}^{-1} \quad (1)$$

**TABELA 1**
*Presumo da decomposição dos revestimentos*

| *Revestimento* | *Composição* | *Processo/ Temperatura* | *Gases (CVD)* | *Alvos (HiPIMS)* | *Tempo/hrs* |
|---|---|---|---|---|---|
| CVD1 | $TiCN/Al_2O_3/TiCN$ | CVD/1100 ºC | $CO_2$, CO, $N_2$, $CH_4$, $TiCl_4$, $H_2$, $H_2S$, Al | - | 13h50 |
| CVD2 | $TiCN/Al_2O_3/TiN$ | | | | 13h30 |
| CVD3 | $TiCN/Al_2O_3/TiN$ | | | | 20 |
| | AlcRN | PVD/700 ºC | $N_2$ | Cr, Al, Ti | |
| CVD4 | $TiCN/Al_2O_3/TiN$ | CVD/1100 ºC | $CO_2$, CO, $N_2$, $CH_4$, $TiCl_4$, $H_2$, $H_2S$, Al | - | 21 |
| | AlcRN/ZrN | PVD/700 ºC | $N_2$ | Cr, Al, Ti, Zr | |

onde I(hkl) representa a intensidade das medidas de reflexão, I0 as intensidades de difração do pó de acordo com a ficha JCPDS nº 46-1212 e o símbolo *n* representa o número de reflexões utilizadas no cálculo [6]. A rugosidade da superfície das amostras foi determinada através da técnica de perfilometria ótica 3D (*Sensofar S Neox*) com objetiva de 10x em modo de Interferometria de Varrimento que garante resolução vertical de 1 nm.

O desgaste de flanco de cada amostra foi avaliado em ensaios de torneamento, seguindo a diretrizes norma ISO 3685:1993, utilizando um centro de maquinagem *Mazak Integrex i-200ST* da Palbit S.A. O material de teste foi aço inoxidável AISI 316 (1.4401) sob a forma de um varão com 100 mm de comprimento e 150 mm de diâmetro, produzido pela IMS. A velocidade de corte ($V_c$) foi de 200 m/min, com um avanço ($f_n$) de 0,25 mm/rotação e uma profundidade de corte ($a_p$) de 2 em regime lubrificado. Os ensaios duraram 30 minutos, com interrupções a cada 5 minutos para avaliação do desgaste no flanco, utilizando um microscópio digital *ASH INSPEX 4K*, com 70x de ampliação.

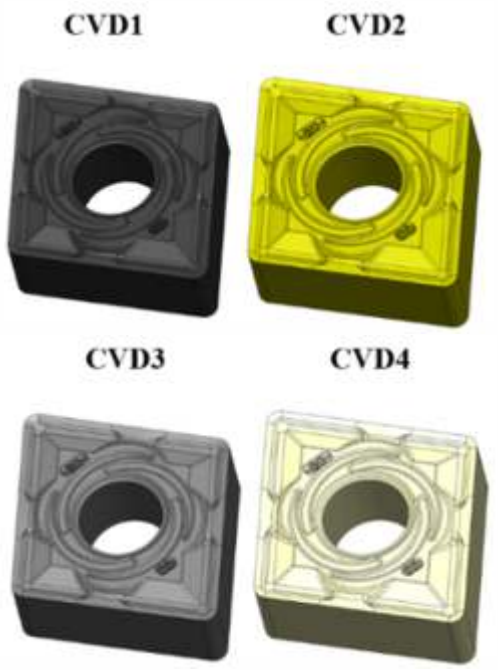



**FIGURA 1**
*Pastilhas de corte CNMG120408-GS*

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os revestimentos multicamada das 4 pastilhas foram analisados em secção de modo a avaliar a composição e espessura das diferentes camadas. Na figura 2, está representado a morfologia das superfícies e a distribuição da composição química de cada camada depositada em todas as amostras e as suas respetivas espessuras medidas com recurso ao software *Image J*.

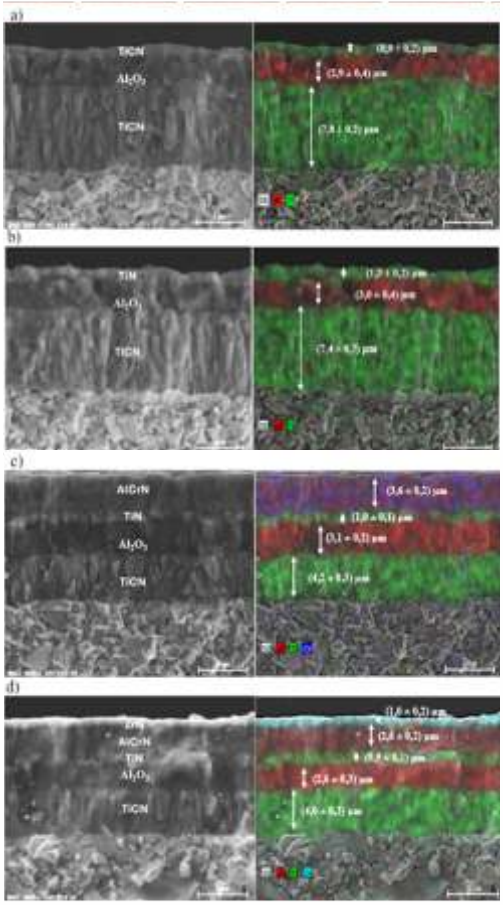



**FIGURA 2**
*Imagens SEM e SEM-EDS do revestimento multicanada (corte trabnsversal) das amostras CVD1 (a), CVD2 (b), CVD3 © e CVD4 (d).*

Pela análise das superfícies de fratura transversal da Figura 2 é possível verificar que não existem poros nas diferentes camadas de revestimento, não se observa delaminação ou destacamento do revestimento do metal duro ou entre camadas do revestimento. Para os revestimentos depositados por CVD, é possível observar que estes apresentam crescimento colunar, enquanto os depositados por PVD (HiPIMS) não apresentam direção de crescimento preferencial, como já verificado por outros autores [7]. O desenvolvimento de estruturas cristalinas colunares deve-se principalmente à taxa de ionização do material alvo e pela dinâmica de difusão nas superfícies dos cristais já depositados. As amostras CVD1 e CVD2 apresentam espessuras de multicamadas semelhantes. Já as amostras CVD3 e CVD4 possuem a mesma multicamada depositada por CVD, mas diferem nas camadas adicionadas por HiPIMS: a CVD3 apenas apresenta uma camada (AlCrN), enquanto a CVD4 apresenta duas (AlCRN e ZrN). Na amostra CVD3, a camada de AlCrN é a camada de topo e na amostra CVD4, está localizada entre as camadas de TiN e ZrN. Em resumo, os revestimentos depositados por PVD (HIPIMS) e CVD têm espessuras habituais para aplicação em operações de maquinagem [8], nas

quais as espessuras típicas depositadas por CVD são de cerca de 10-20 µm, enquanto os revestimentos por PVD podem atingir até 7 µm.

As fases presentes em cada uma das amostras foram identificadas com análise de DRX realizada no topo dos revestimentos (Figura 3). A Figura 3 mostra que as reflexões identificadas para as amostras são coincidentes, variando ligeiramente a intensidade das mesmas. Esta variação da intensidade dos picos pode estar relacionada com diferenças na orientação dos cristais, diferenças no tamanho, e também diferenças na razão de aspeto dos mesmos.

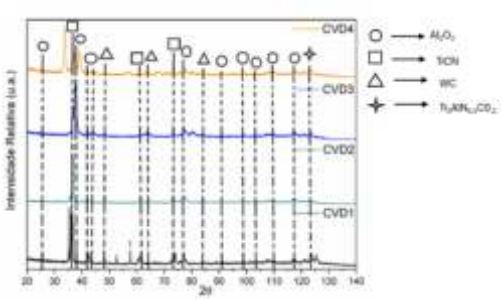



**FIGURA 3**
*Difratogramas de raios X das amostras*

Os valores calculados através da equação 1 para o coeficiente de texturização (TC) para a fase de Al2O3 estão apresentados na Tabela 2.

A Tabela 2, mostra que a orientação do crescimento é preferencialmente na direção cristalográfica (006) para a fase de $Al_2O_3$. A texturização da alumina é substancialmente menor nas amostras CVD3 e CVD4 relativamente à amostra CVD2, uma vez que, a deposição de um revestimento sobre a camada de alumina reduz a intensidade dos picos, afetando o cálculo do coeficiente de texturização. A amostra CVD1 foi produzida sem o objetivo de se obter alumina texturizada, mas calculou-se um TC de 5,7, o que se deverá às condições de deposição utilizadas que favorecem alguma a esta texturização. R. M'Saoubi *et al.* [9] obtiveram revestimentos com orientação de crescimento preferencial na direção (006), com um coeficiente de texturização de 6,6, o que resultou numa melhor resistência mecânica. Em comparação, a amostra CVD2 tem um coeficiente de texturização de 6,1 para o mesmo plano de crescimento da alumina.

As rugosidades médias ($S_a$) das superfícies das amostras CVD2 e CVD3 foram determinadas pela técnica de perfilometria ótica, obtendo-se imagens com informação 3D, Figura 4.

Através destes dados XYZ das imagens da Figura 4, determinou-se as rugosidades médias das superfícies ($S_a$) das amostras CVD2 e CVD3. A amostra CVD2 apresenta uma rugosidade de média de 0,23 µm e a amostra CVD3, com a camada depositada por HiPIMS, valores que rondam os 0,15 µm. Evando Paese *et. al* [10] referem que as amostras de metal duro revestidas com TiAlN e TiCN por PVD, obtiveram melhor qualidade superficial, uma vez que apresentavam menor rugosidade média de cerca de 0,10 µm. Os valores obtidos por Evandro Paese *et.al* [10] para as amostras revestidas por PVD são semelhantes ao valor obtido pela rugosidade média da superfície da amostra CVD3. Com estes resultados é possível afirmar que os revestimentos depositados por PVD (HiPIMS) apresentam menor rugosidade, relativamente às pastilhas revestidas por processos de CVD, pois o acabamento superficial de partida das pastilhas de metal duro era o mesmo.

A evolução do desgaste ao longo do tempo de maquinagem (figura 5 i) e as imagens da face de ataque após 30 minutos (figura 5 ii), mostram que as pastilhas com revestimentos HiPIMS, CVD3 e CVD4 têm menor desgaste de flanco. No entanto, todas as amostras apresentaram um rápido aumento de desgaste nos primeiros 5 minutos de ensaio, até se atingir a estabilização dinâmica da aresta de corte no contacto com a

**TABELA 2**
*Cálculos de texturização para todos os revestimentos para a fase de A12O3*

| Amostras | | CVD1 | CVD2 | CVD3 | CVD4 |
|---|---|---|---|---|---|
| Reflexões Plano (hkl) | 2Q | | | TC | |
| **(012)** | **25,6** | **0,3** | **0,2** | **0,2** | **0,2** |
| **(104)** | **35,2** | **0,3** | **0,1** | **0,1** | **0,1** |
| **(110)** | **37,8** | **0,4** | **0,4** | **2,4** | **1,7** |
| **(006)** | **41,7** | **5,7** | **6,1** | **4** | **4,3** |
| **(113)** | **43,4** | **0,1** | **0,1** | **0,1** | **0,1** |
| **(116)** | **57,5** | **0,1** | **0,1** | **0,1** | **0,1** |
| **(300)** | **68,2** | **0,1** | **0,1** | **0,1** | **0,4** |

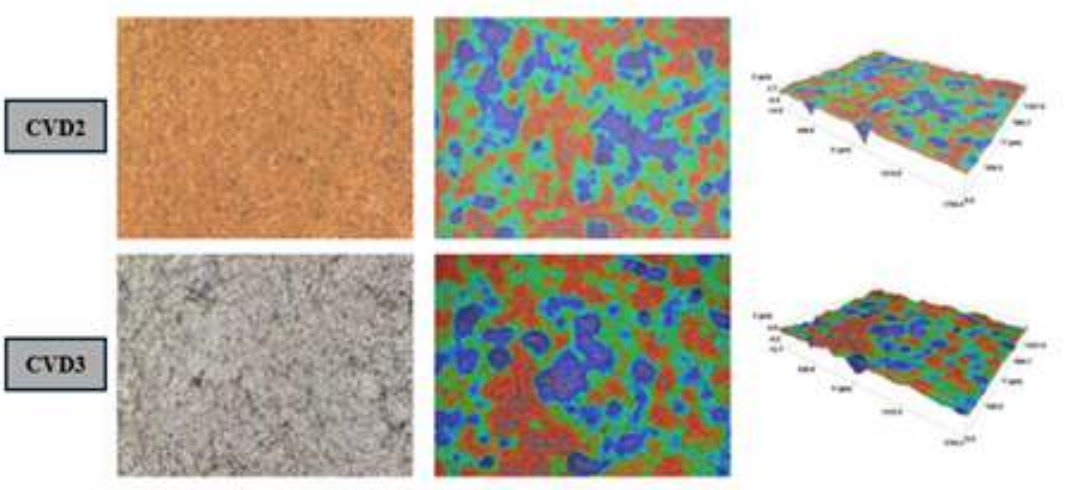



**FIGURA 4**
*Imagens de perfilometria ótica das amostras CVD2 e CVD3*

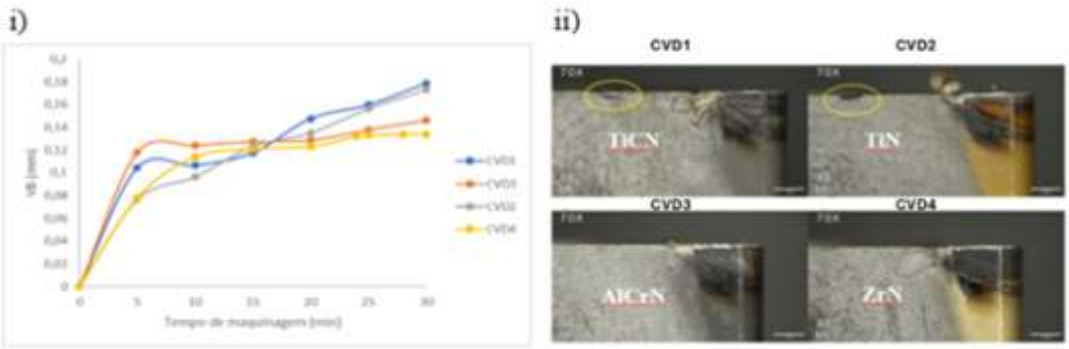



**FIGURA 5**
*i) Desgaste do flanco em função do tempo de maquinagem $v_B$ ; ii) Imagens capturdas com microscópio ótico das amostras após maquinagem de 30 minutos.*

peça a maquinar (Figura 5i). Nos minutos seguintes, as taxas de desgaste tendem a estabilizar, mas de forma diferente dependendo da última camada de revestimento. A CVD1 apresentou maior desgaste de flanco (0,18 mm), seguida de CVD2 (0,17 mm), CVD3 (0,15 mm) e CVD4 (0,13 mm) que apresentou menor desgas-te de flanco. As duas amostras com camadas depositadas por HiPIMS apresentaram maior resistências ao desgaste, especialmente a CVD4 (ZrN).

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidos novos revestimentos multicamada de TiN/TiCN/Al2O3/TiN com uma camada de alumina texturizada e finalizados com uma ou duas camadas de AlCrN e ZrN. Todas as pastilhas apresentaram revestimentos bem definidos ao longo das arestas, sem sinais de delaminação ou porosidade que comprometessem a integridade e o funcionamento dos revestimentos.

As camadas depositadas por CVD e por PVD demonstraram espessuras típicas, consistentes com os valores encontrados na literatura de 10 a 20 µm para CVD e entre 1 e 7 µm para PVD/HiPIMS, tendo estes últimos apresentado menor rugosidade.

A análise por difração de raios-X revelou que as amostras CVD1 e CVD2 apresentam valores de TC a rondar 6,1 para a direção de crescimento do filme de (006). As amostras CVD3 e CVD4, com camadas finais de AlCrN e AlCrN+ZrN depositadas por HiPIMS, mostraram menor texturização devido à interferência dessas camadas na determinação da orientação da alumina através dos difratogramas.

Os ensaios de maquinagem evidenciaram que a presença das camadas obtidas por HiPIMS correlacionam-se com a redução do desgaste do flanco, aumentando a vida útil das pastilhas.

Em suma, a deposição PVD (HiPIMS) aplicada sobre a multicamada depositada por CVD, permitiu obter revestimentos mais finos e mais resistentes mecanicamente às altas temperaturas que a superfície da ferramenta atinge.

**AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi financiado pelo PRR-Plano de Recuperação e Resiliência e pelos fundos Next GenerationEU na Universidade de Aveiro, no âmbito do Projeto Mobilizador das Agendas Verdes para a Inovação "Hi-rEV- Recuperação do Setor de Componentes Automóveis" (Projeto nº 64 com número de candidatura C644864375-00000002). Este trabalho teve também o apoio do projeto CICECO-Instituto de Materiais de Aveiro, UIDB/50011/2020 (DOI 10.54499/UIDB/50011/2020), UIDP/50011/2020 (DOI 10.54499/UIDP/50011/2020) & LA/P/0006/2020 (DOI 10.54499/LA/P/0006/2020), financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC)

**REFERÊNCIAS**

**[1]** H. O. Pierson, Handbook of Chemical Vapor Deposition: Principles, Technology, and Applications, Noyes Publications/William Andrew Publishing, 1999.

**[2]** S. Shoja, S. Norgren, H.-O. Andrén, O. Bäcke e M. Halvarsson, "On the influence of varying the crystallographic texture of alumina CVD coatings on cutting performance in steel turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 176, p. 103885, 2022.

**[3]** L. A. Dobrza?ski e J. Miku?a, "Structure and properties of PVD and CVD coated Al2O3+TiC mixed oxide tool ceramics for dry on high speed cutting processes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164-165, p. 822-831, May 2005.

**[4]** Y. Birol e D. Isler, "Abrasive wear performance of AlCrN-coated hot work tool steel at elevated temperatures under three-body regime," *Wear*, vol. 270, p. 281-286, January 2011.

**[5]** L. Aihua, D. Jianxin, C. Haibing, C. Yangyang e Z. Jun, "Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 31, p. 82-88, March 2012.

**[6]** S. Ruppi, "Enhanced performance of a-Al2O3 coatings by control of crystal orientation," *Surface and Coatings Technology,* vol. 202, p. 4257-4269, May 2008.

**[7]** G. H. L. Greczynski, "Time and energy resolved ion mass spectroscopy studies of the ion flux during high power pulsed magnetron sputtering of Cr in Ar and Ar/N-2 atmospheres," Vacuum, 2010, pp. 1159-1170.

**[8]** Korvustech. [Online]. Available: https://korvustech.com/pvd-vs-cvd/. [Acedido em 23 6 2024].

**[9]** R. M'Saoubi, O. Alm, J. M. Andersson, H. Engström, T. Larsson, M. P. Johansson-Jõesaar e M. Schwind, "Microstructure and wear mechanisms of texture-controlled CVD ?-Al2O3 coatings," Wear, vol. 376-377, p. 1766-1778, April 2017.

**[10]** E. Paese, M. Geier, F. R. Rodrigues, T. Mikolajczyk e M. Mia, "Assessment of CVD- and PVD-Coated Carbides and PVD-Coated Cermet Inserts in the Optimization of Surface Roughness in Turning of AISI 1045 Steel," *Materials*, vol. 13, p. 5231, November 2020.

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CERÂMICO À BASE DE NITRETO DE SILÍCIO

**M.S. Faria[1], B. Guimarães[2], C.M. Fernandes[2], D. Figueiredo[2], S.M. Olhero[1], F.J. Oliveira[1]**

**1** CICECO - Instituto de Materiais Aveiro, Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal.
**2** Palbit, S.A., P.O. Box 4, 3854-908 Branca, Albergaria-a-Velha, Portugal

***O nitreto de silício ($Si_3N_4$) é um material cerâmico com propriedades excecionais, tais como uma combinação notável de dureza, resistência ao desgaste e estabilidade térmica, que o tornam um excelente candidato para a indústria de ferramentas de corte que operam em condições extremas [1].. A sua capacidade de suportar cargas até altas temperaturas sem comprometer a integridade estrutural, faz dele uma escolha ideal para aplicações de maquinação de peças duras [1-3].***

***Usualmente, o método de sinterização deste material envolve a aplicação de pressão, durante o aquecimento, permitindo uma maior compactação e consequente densificação das peças. A sinterização sem pressão [4] é uma alternativa que implica a utilização de maiores quantidades de aditivos de sinterização, como o óxido de alumínio e o óxido de ítrio com eventual redução da dureza do material [5].***

***A utilização industrial de $Si_3N_4$ enfrenta desafios significativos, incluindo a necessidade de controle preciso dos parâmetros de sinterização e a minimização da formação de fases indesejadas que possam comprometer o desempenho da ferramenta. Estes desafios requerem investigação contínua para melhorar os métodos de processamento e expandir a aplicação do nitreto de silício na indústria de ferramentas de corte.***

***Neste trabalho, partiu-se de uma composição já conhecida à base de nitreto de silício (Matriz A: 89.3 wt.% $Si_3N_4$ , 7 wt.% Y O and 3.7 wt.% $Al_2O_3$ [5]) para comparar o seu desempenho mecânico com peças comerciais , visando desenvolver novas composições e testá-las de modo a promover o desenvolvimento e melhoria das suas propriedades para utilização como novas ferramentas de corte mais resistentes ao desgaste.***

*Silicon nitride ($Si_3N_4$) is a ceramic material with exceptional properties such as a remarkable combination of hardness, wear resistance, and thermal stability, making it an excellent candidate for the cutting tool industry operating under extreme conditions [1]. Its ability to withstand loads at high temperatures without compromising structural integrity makes it an ideal choice for machining hard workpieces [1-3].*

*Typically, the sintering method of this material involves the application of pressure during heating, allowing for greater consolidation and subsequent densification of the parts. Pressureless sintering [4] is an alternative that involves the use of larger amounts of sintering additives such as aluminum oxide and yttrium oxide, with a possible reduction in the material's hardness [5].*

*The industrial use of $Si_3N_4$ faces significant challenges, including the need for precise control of sintering parameters and the minimization of the formation of undesired phases that may compromise tool performance. These challenges require continuous research to improve processing methods and expand the application of silicon nitride in the cutting tool industry.*

*In this work, we started from a known silicon nitride-based composition (Matrix A: 89.3 wt.% $Si_3N_4$, 7 wt.% $Y_2O_3$ and 3.7 wt.% $Al_2O_3$ [5]) to compare its mechanical performance with commercial pieces, aiming to establish new compositions and test them in order to promote the development and improvement of their properties for use as more wear-resistant cutting tools.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**

NITRETO DE SILÍCIO, FERRAMENTAS DE CORTE, RESISTÊNCIA MECÂNICA.

*Silicon nitride, cutting tools, mechanical strenght.*

## INTRODUÇÃO

O nitreto de silício (Si3N4), descoberto nas décadas de 1950 e 1960, emergiu como um material estratégico devido à sua combinação única de dureza, resistência ao desgaste, alta resistência térmica e estabilidade química. A utilização deste material para ferramentas de corte e

componentes resistentes começou a ser explorada nas décadas de 1960 e 1970, quando os avanços na tecnologia de cerâmicas técnicas permitiram a produção de nitretos de silício com maior pureza e maior controle sobre as suas fases cristalinas [6]. Desde então, o $Si_3N_4$ tem sido utilizado de forma crescente em diversas indústrias, desta-cando-se particularmente no processamento de materiais duros e refratários. Ao longo dos anos, o seu uso tem-se expandido para áreas como componentes de motores a jato, rolamentos e ferramentas de corte de elevado desempenho, em especial para a indústria metalúrgica, aerospacial e de processamento de materiais duros.

O $Si_3N_4$ apresenta uma estrutura cristalina que pode existir em diferentes formas polimórficas, das quais aS mais importantes são a fase alfa (a-$Si_3N_4$) e a fase beta (b-$Si_3N_4$). A fase a, que é a forma mais estável à temperatura ambiente, apresenta uma dureza elevada e boa resistência ao desgaste, sendo, por isso, muito apreciada em componentes para aplicações de corte. A fase b, por sua vez, tem uma maior resistência ao choque térmico e é mais estável a altas temperaturas [6, 7]. A resistência térmica e a estabilidade do $Si_3N_4$.

são propriedades fundamentais para que este material opere sob condições de elevadas tensões mecânicase térmicas (acima de 1.400 °C, onde outros materiais cerâmicos não resistiriam) [11]. Além disso, o $Si_3N_4$ apresenta uma excelente resistência à oxidação e à corrosão, o que é crucial para garantir a longevidade das ferra-mentas de corte em processos de alta temperatura e em contato com materiais de elevado desempenho[7].

A fabricação de nitreto de silício geralmente envolve um processo de sinterização a altas temperaturas, usualmente entre 1700-1900 ºC [6, 7]. A sinterização do $Si_3N_4$ é um desafio técnico devido à alta energia de ativação associada ao processo de sinterização, o que requer o uso de aditivos para melhorar a densificação e as propriedades finais do material. Entre os aditivos mais comuns, destacam-se a ítria ($Y_2O_3$) e a alumina ($Al_2O_3$), que ajudam a promover a formação de fases líquidas durante a sinterização com a sílica que envolve os grãos de $Si_3N_4$ que contribuem para a melhoria da densificação, além de influenciare a estabilidade das fases a e b do $Si_3N_4$ [8, 9].

Além disso, em função dos aditivos, durante a sinterização pode haver substituição parcial de átomos de silício por átomos de alumínio na estrutura do $Si_3N_4$ promovendo a formação de SiAlONs como o caso de $Si_{6-z}Al_zO_zN_z$ [10]. Os SiAlONs combinam as características do $Si_3N_4$, como alta dureza, resistência ao desgaste e resistência a altas temperaturas, com a maior tenacidade e resistência à fratura conferidas pela presença do alumínio. O desafio reside na obtenção de peças homogéneas, por métodos de sinterização sem pressão, que sejam resistentes ao desgaste e tenham maior tempo de vida útil.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram preparadas várias amostras à base de nitreto de silício seguindo o esquema da Figura 1. Começou por se misturar, numa cuba com bolas de moagem de nitreto de silício, os diferentes pós, de acordo com as composições apresentadas na Tabela 1. A mistura dos diferentes componentes foi efetuada em isopropanol num moinho planetário durante 8h a 200 rpm.

Após moagem, a mistura foi seca, numa estufa, a 100 °C, durante 12h e posteriormente desaglomerada no moinho planetário a 150 rpm por 90 s.

Com os pós obtidos, prepararam-se várias amostras cilíndricas com 20 mm de diâmetro por prensagem uniaxial (1 min com 2 ton). Estas amostras foram submetidas a pressão isostática por 15 min, a 250 Mpa. Após o processo de conformação as amostras foram sinterizadas num forno de grafite a 1700 e a 1750 ºC, por 2h, com uma taxa de aquecimento e arrefecimento de 10 ºC/min. A atmosfera utilizada neste tratamento térmico foi de $N_2$. As amostras densas foram caracterizadas quanto à sua densidade,




**FIGURA 1**
*Fluxograma do procedimento realizado para a obtenção e caracterização de peças à base de $Si_3N_4$.*

dureza e tenacidade à fratura segundo a equação 1 (Pakmqvist, $K_{IC}$ em $MPa.m^{1/2}$).

$$K_{IC} = A \times (HV)^{0.5} \times (W_G)^{0.5}$$

Com A com um valor constante de 0.0028; HV a dureza Vickers HV30; $W_G$ a carga aplicada dividida pelasoma do tamanho da fenda.

Algumas amostras foram analisadas quanto às suas fases por DRX (PANalyticalX'pert pro, Holanda) utilizando radiação Cu-Kα (l = 1,5406 Å), na faixa 2ϑ de 20° a 70°, passo angular de 0,01° e tempo de contagem de 100 s).

As amostras com melhores propriedades foram contrastadas com um plasma de CF4 durante 4min e examinadas por microscopia eletrónica de varrimento (SEM) na UA (*Hitachi*, SU70) e na empresa Palbit. Posteriormente, as amostras foram maquinadas e retificadas na empresa. As pastilhas resultantes foram avaliadas quanto à sua resistência mecânica e térmica em testes de fresagem Inconel 718.
Os testes de avaliação de desempenho dos insertos foram realizados na CNC Mazak Integrex i-200ST. Estes testes iniciais foram realizados com o objetivo compreender o efeito dos parâmetros de corte, principalmente da velocidade de corte no desgaste de flanco e modos de falha destas ferramentas. Durante os testes de corte, um microscópio digital foi utilizado com ampliação de 30x e 50x, sendo as recomendações padrão ISO seguidas. Estes testes foram realizados utilizando a mesma estratégia de maquinagem dos testes iniciais numa barra de Inconel 718 com uma dureza HRC de 45 (confirmada através de testes de medição Rockwell C em 3 secções radiais).

O desgaste de flanco foi avaliado a cada 4 passagens, recorrendo a um microscópio digital com uma ampliação de x25, o que corresponde a 2 mm de comprimento de material removido. A velocidade de corte usada foi de 800 e 1000 m/min, com uma profundidade de corte axial de 0.5 mm. O avanço de corte axial de 4 mm, um avanço de 0.05 mm/dente. O número efetivo de dentes foi de 4 e com um diâmetro de barra de 33-34 mm.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades das amostras sinterizadas estão apresentadas na Tabela 2. Apresenta-se também, a título de comparação as propriedades de uma amostra comercial (SX9).

Analisando a Tabela 2, é possível verificar que a amostra que tem melhores características relativamente ao desempenho mecânico (dureza e

**TABELA 1**
*Composição à base de nitreto de silício testadas e respetivas quantidades dos diferentes componentes.*

| Designação | Composição (wt.%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $Si_3N_4$ | $Y_2O_3$ | $Al_2O_3$ | TiN | AlN |
| Matriz A | 89.3 | 7 | 3.7 | - | - |
| Matriz A-15% ligante | 90.9 | 5.95 | 3.15 | - | - |
| Matriz A+15% ligante | 87.69 | 8.05 | 4.26 | - | - |
| Matriz A+30TiN | 62.72 | 4.92 | 2.598 | 46.125 | - |
| SiAlON | 77.6 | 6.5 | 11.3 | - | 4.5 |

**TABELA 2**
*Caracterização das amostras sintetizadas com diferentes composições.*

| Amostra | Temp.(°C)/ tempo (h) | p ($g/cm^3$) | Dureza HV2 | HV30 | $K_{IC}$ ($MPa.m^{1/2}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Matriz A | 1 700(2h) | 3.21 | 1423±38 | 1443 | 7.24 |
| | 1 750 (2h) | 3.27 | 1478±31 | 1474 | 8.08 |
| Matriz A-30%vol. TiN | 1 700(2h) | 3.73 | - | 1293 | 7.42 |
| | 1 750 (2h) | 3.83 | 1386±52,7 | 1436 | 9.12 |
| | 1 750 (2h) | 3.84 | 1439±55 | 1440 | |
| Matriz A-15% ligante | 1 750 (2h) | 3.23 | 1430±55 | 1448 | 7.50 |
| | 1 700 | 3.20 | | - | |
| Matriz A+15% ligante | 1 700(2h) | 3.26 | 1499±14,5 | 1497 | 7.51 |
| | 1 750 (2h) | 3.26 | 1492±55,6 | 1500 | 7.35 |
| SIALON (AlN) | 1 700(2h) | 3.23 | 1550±31 | 1538±45 | 5.16 |
| | 1 750 (2h) 2ºlote | 3.21 | 1450±32,7 | 1454 | 5.40 |
| SX9 comercial | - | 3.26 | 1743±30 | - | 8.56 |

**TABELA 3**
*Fases obtidas por DRX das amostras sintetizadas a 1750 °C por 2 h.*

| Amostras | Fases |
|---|---|
| **Matriz A** | **b+$Si_3N_4$ (94.3%) e Y2($SiAlO_5N$) (5.7%)** |
| **Matriz A + 15% *ligante*** | **b+$Si_3N_4$ (82%); $Y_3AlSi_2O_7N_2$; $YAl_{0.5}Si_{0.5}N0.5O_2$** |
| **SiAlON** | **$Y_{0.5}(Si_{9.3}Al_{2.7})(N_{15.1}O_{0.})$ (81%); $Al_2O_{2.67}$(12%); $Y_2Si_3O_3$(4%); $SiO_2$(2%); $Y_2O_3$ (1%)** |
| **Sx9** | **b+$Si_3N_4$ (68.6%); -$Si_3N_4$ (24.7%) e $Y_2(Si_3O_3N_4)$ (6.7%)** |

tenacidade à fratura) é a amostra SX9 comercial. As amostras de Matriz A apresentam uma densidade, dureza e tena-cidade à fratura semelhantes a valores reportados na literatura de trabalhos anteriores [4, 5, 12, 13]. Aumentando a quantidade de aditivos de sinterização ($Al_2O_3$ e $Y_2O_3$) foi possível obter uma ligeira melhoria destes valores, como se verifica na Tabela 2 que são ainda assim inferiores aos da amostra comercial.

As amostras que contêm TiN demonstraram um desempenho inferior às restantes, e por outro lado, o SiAlON com AlN aparenta ter melhores propriedades mecânicas. No entanto, ainda não foi possível obter em laboratório amostras com características semelhantes às da amostra comercial (SX9).

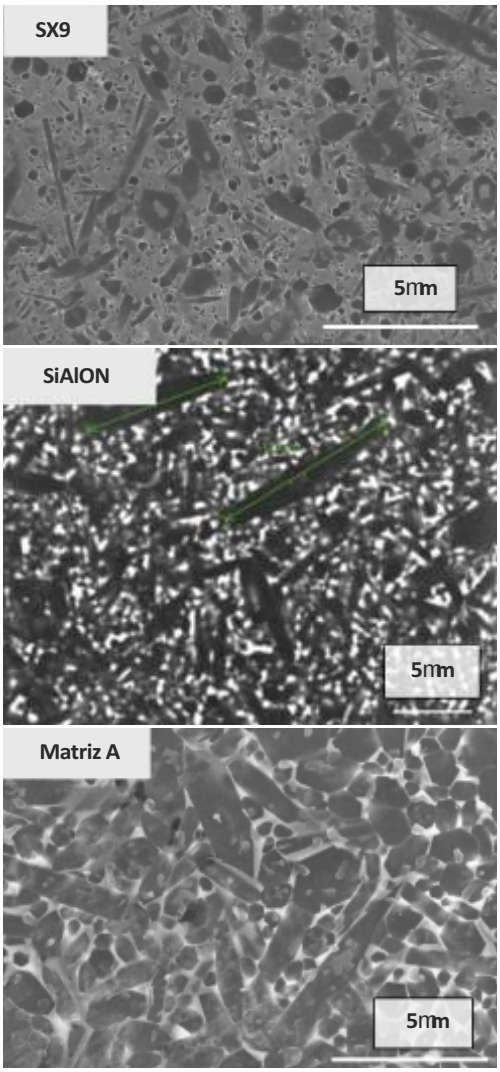



**FIGURA 2**
*Micrografias das amostras SX9, SiAlON e Matriz A.*

A Tabela 3 apresenta o resultado da identificação de fases das amostras Matriz A, Matriz A+ 15% de ligantes, SiAlON e SX9 (comercial).

É possível verificar, através da análise de fases da Tabela 3 e das propriedades apresentadas na Tabela 2 que a amostra SX9, possivelmente consegue um desempenho mecânico superior pela presença de maior quantidade de fase a que confere uma dureza superior à amostra. Além disso, todas as amostras tiveram a forma-ção de fase vítrea e b-$Si_3N_4$, sendo a última estável a altas temperaturas. Apresenta-se na Figura 2 as micrografias obtidas por SEM para as amostras SX9, SiAlON e Matriz A.

Analisando as micrografias da Figura 2 é possível observar a formação dos grãos b-$Si_3N_4$ identificados como as estruturas hexagonais alongadas. A amostra comercial, apresenta grãos mais pequenos, distribuidos por toda a matriz, comparando com as amostras processadas em laboratório (SiAlON e Matriz A). No caso das amostras desenvolvidas neste trabalho, a designada como SiAlON possui grãos mais finos do que a amostra com Matriz A, bem como uma fase vítrea mais abundante, podendo ser um dos motivos que lhe confere uma dureza superior.

A Figura 3 apresenta a tabela de resultados obtidos com os testes de maquinação efetuados na empresa Palbit. Durante os testes de corte, o desgaste foi avaliado a cada 8 passagens, correspondendo a 8 mm de comprimento do material removido.

As pastilhas de corte testadas mostraram capacidade de remover volume de material, sendo a referência de mercado SX9 a que apresenta o melhor comportamento. O desempenho das amostras desenvolvidas ainda é consideravelmente menor comparativamente às referências de mercado, sendo por isso necessário otimizar a composição e processamento das novas soluções.

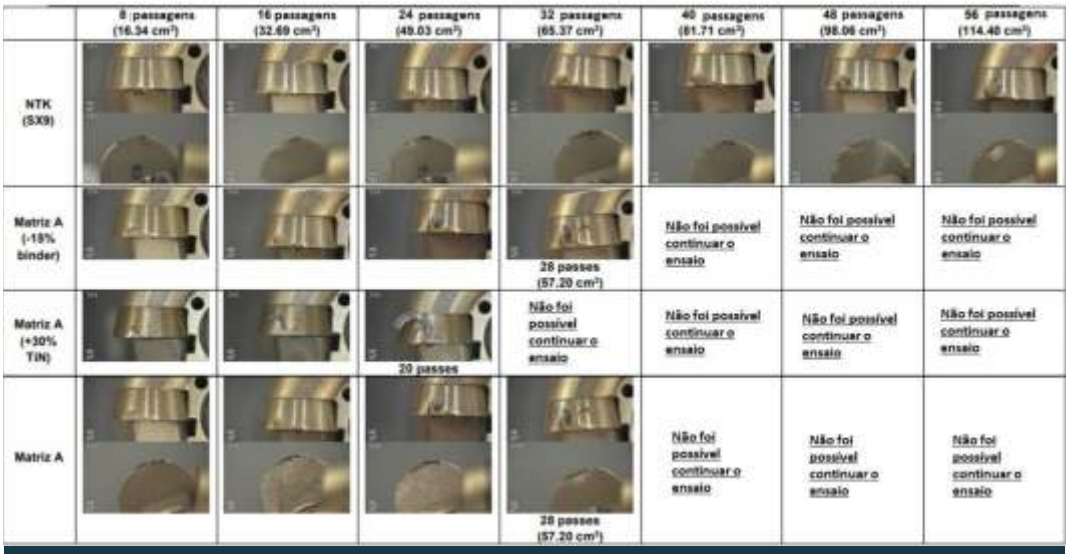



**FIGURA 3**
*Avaliação do desempenho das pastilhas em teste de fresagem de Inconel 718.*

## CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu avaliar o desempenho de diferentes amostras à base de nitreto de silício de modo a promover uma melhoria das propriedades mecânicas de futuras ferramentas de corte.

Ainda não foi possível criar peças que correspondam às expectativas das já existentes no mercado, no entanto, é possível concluir que para aumentar a dureza e tenacidade das amostras à base de nitreto de silício é garantir um processo de sinterização controlado para obter amostras 100% densas. Isto aparenta poder ser possível com a adição de pressão durante a sinterização e/ou alteração da composição, nomeadamente com a introdução de aditivos de sinterização como o caso do AlN.


## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto CICECO-Instituto de Materiais de Aveiro, UIDB/50011/2020, UIDP/50011/2020 & LA/P/0006/2020, financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). RFoi também financiado pelo PRR - Plano de Recuperação e Resiliência e pelos fundos NextGenerationEU da Universidade de Aveiro, no âmbito do Projeto Mobilizador das Agendas Verdes de Inovação "Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis" (Projeto nº 64 com o número do pedido C644864375-00000002). Mónica S.Faria agradece à FCT pela bolsa de investigação 2023.04490.BDANA.


## REFERÊNCIAS


**[1]** *Tailoring of Mechanical Properties of Si N Ceramics O AS I Serie s*.

**[2]** Y. Tajima and K. Urashima, "Improvement of Strength and Toughness of Silicon Nitride Ceramics," *Tailoring of Mechanical Properties of Si3N4 Ceramics*, pp. 101-109, 1994, doi: 10.1007/978-94-011-0992-5_7.

**[3]** Z. Krstic and V. D. Krstic, "Silicon nitride: The engineering material of the future," *J Mater Sci*, vol. 47, no. 2, pp. 535-552, 2012, doi: 10.1007/s10853-011-5942-5.

**[4]** X. Xu, M. I. L. L. Oliveira, and J. M. F. Ferreira, "α-SiAlON ceramics obtained by slip casting and pressureless sintering," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 86, no. 2, pp. 366-368, 2003, doi: 10.1111/j.1151-2916.2003.tb00027.x.

**[5]** M. S. Faria *et al*., "Influence of ink rheology and post processing in the structural performance of silicon nitride-based ceramics fabricated by robocasting," *Ceram Int*, vol. 49, pp. 20968-20979, 2023, doi: 10.1016 /j.cermint. 2023.03.231.

**[6]** Raymond C.Sangster, *Formation of Silicon Nitride- From the 19th to the 21st Century*. Uetikon-Zuerich, 2005. [Online]. Available: https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf

**[7]** T. S. Yen, "High Performance Silicon Nitride Composite Ceramics through Grain Boundary and Microstructural Tailoring," *Tailoring of Mechanical Properties of Si3N4 Ceramics*, pp. 137-148, 1994, doi: 10.1007/978-94-011-0992-5_10.

**[8]** F. J. Oliveira, R. F. Silva, and J. M. Vieira, "Densification and microstructural evolution in a reactive silicon nitride alumina platelet system," *Cmmc 96 - Proceedings of the First International Conference on Ceramic and Metal Matrix Composites, Pts 1 and 2*, vol. 127-3, pp. 377-384, 1997,
doi: DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.127-131.377.

**[9]** J. Yang, F. J. Oliveira, R. F. Silva, and J. M. F. Ferreira, "Pressureless sinterability of slip cast silicon nitride bodies prepared from coprecipitation-coated powders," *J Eur Ceram Soc,* vol. 19, no. 4, pp. 433-439, 1999, doi: 10.1016 / s0955-2219(98)00222-2.

**[10]** V. A. Izhevskiy, L. A. Genova, J. C. Bressiani, and F. Aldinger, "Progress in SiAlON ceramics," *J Eur Ceram Soc*, vol. 20, no. 13, pp. 2275-2295, 2000, doi: 10.1016/S0955-2219(00)00039-X.

**[11]** P. Popper, *Sintering of silicon nitride, a Review.* Dordrecht: Springer Netherlands, 1983.

**[12]** J. Carrapichano, A. Taillaire, F. Oliveira, and R. Silva, "Complete Densification of Si3N4 - SiC Ceramic Matrix Composites (CMC's) by a Pressureless Sintering Route," *Materials Science Forum* - MATER SCI FORUM, vol. 455-456, pp. 225-229, May 2004, doi: 10.4028 / www.scientific.net/MSF.455-456.225.

**[13]** F. Çaliskan, Z. Tatli, A. Genson, and S. Hampshire, "Pressureless sintering of ?-SiAlON ceramic compositions using fluorine and oxide additive system," *J Eur Ceram Soc*, vol. 32, no. 7, pp. 1337- 1342, 2012, doi: 10.1016 / j.jeurceramsoc.2011.05.016.

RETSACOAT
Tratamentos de Superfície

# ESPECIALISTAS EM TRATAMENTOS TÉRMICOS E DE SUPERFÍCIE

## GEOMET 500 / 321
## GEOMET + PLUS
L / VL / ML / M / VLh
## GEOBLACK
## ZINTEK

## ZINCO NÍQUEL
Transparente / Negro
## ZINCADOS
Amarelo / Azul (Transparente) / Iridiscente / Negro
## SELANTES / LUBRIFICANTES
TNT 11 / TNT 15 / GLEITMO

## PASSIVAÇÃO DE ALUMINIO
SurTec 650 chromitAl TCP
## NIQUELADO
## GRANALHADO

---

## TEMPERA E REVENIDO
## CEMENTAÇÃO E CARBONITRURAÇÃO
## RECOZIDO





SOMOS A SUA
**MELHOR OPÇÃO**

CERTIFIED AUTOMOTIVE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
IATF 16949 & ISO 9001

Management System ISO 14001:2015
TÜVRheinland CERTIFIED

ZinKlad

GEOMET®
GLOBAL LICENSEE NETWORK

NOF METAL COATINGS EUROPE

**RETSACOAT**
Apartado 3156
Raso de Paredes
3754-901 Águeda - **Portugal**

Tel:+351 234 612 950
Fax:+351 234 612 951
retsacoat@retsacoat.pt
**www.retsacoat.pt**

Siga-nos
no linkedin
**@retsacoat**

# MAQUINAGEM DE VITROCERÂMICOS COM FERRAMENTA REVESTIDA A DIAMANTE HF-CVD

**Diogo Ferreira[1*], Daniel Figueiredo[1,2*], Manuel F.R.P. Alves[3], Bruno Guimarães[2], Nuno Leitão[2], F.J. Oliveira[3], Cristina M. Fernandes[2], J. Paulo Davim[1]**

**1** Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro, Campus Santiago, Aveiro, 3810-193, Portugal
**2** R&D Department, Palbit S.A., Rua das Tílias, Branca, 3850-582, Aveiro, Portugal
**3** CICECO - Aveiro Institute of Materials, Department of Materials & Ceramic Engineering, University of Aveiro, 3810-193, Aveiro, Portugal
** Corresponding author(s). E-mail(s): diogofcferreira@ua.pt; daniel.af@ua.pt; https://orcid.org/0000-0002-5697-4344*

***As operações de micromaquinagem têm-se revelado essenciais no fabrico de componentes miniaturizados, em diversos setores industriais e são selecionadas frequentemente devido à elevada precisão dimensional e integridade superficial, incluindo baixa rugosidade e menor propensão à formação de fissuras e defeitos superficiais nos componentes maquinados. O vidro e os vitrocerâmicos são materiais com propriedades químicas, físicas e mecânicas muito importantes nas aplicações de alta tecnologia, no entanto são conhecidos como materiais difíceis de maquinar devido à sua elevada dureza e fragilidade. A microfresagem apresenta-se como uma tecnologia capaz de controlar o regime de corte e garantir a remoção de material em regime dúctil. Este estudo investigou a aplicabilidade da tecnologia de microfresagem no processamento de vidro, metassilicato de lítio e dissilicato de lítio. Os resultados experimentais mostraram que é possível obter superfícies maquinadas lisas, sem danos frágeis e com baixa rugosidade, em regimes de corte controlados. Ficou demostrado o grande impacto da inclinação entre a ferramenta e a peça de trabalho, pois as superfícies maquinadas a 0º apresentaram regimes de corte frágeis, enquanto o corte a 45° permitiu obter superfícies, maioritariamente, lisas, livres de fraturas e com bom acabamento superficial. Nos compósitos vitrocerâmicos de $SiO_2$-$P_2O_5$-$L_{i2}O$-$K_2O$-$Al_2O_3$-$ZrO_2$, o dissilicato de lítio apresentou o menor valor de rugosidade média das superfícies maquinadas e a menor percentagem média de área frágil. Por outro lado, o vidro foi o material que refletiu uma maior fragilidade, uma maior rugosidade média e uma percentagem média de área frágil com o valor mais elevado.***

*Micromachining operations have proved essential in the manufacture of miniaturized components in various industrial sectors and are frequently selected due to their high dimensional accuracy and surface integrity, including low roughness and less propensity to the formation of cracks and surface defects in machined components. Glass and glass ceramics are materials with very important chemical, physical and mechanical properties in high-tech applications, yet they are known as difficult materials to machine due to their high hardness and brittleness. Micromilling is a technology capable of controlling the cutting regime and guaranteeing the removal of material in a ductile regime. This study investigated the applicability of micromilling technology in the processing of glass, lithium metasilicate and lithium disilicate. The experimental results showed that it is possible to obtain smooth machined surfaces, without brittle damage and with low roughness, in controlled cutting regimes. The significant impact of the inclination between the tool and the workpiece was demonstrated, as the surfaces machined at 0º showed brittle cutting conditions, while cutting at 45° produced surfaces that were mostly smooth, free of fractures and with a good surface finish. In the $SiO_2$-$P_2O_5$-$Li_2O$-$K_2O$-$Al_2O_3$-$ZrO_2$ glass ceramic composites, lithium disilicate had the lowest average roughness of the machined surfaces and the lowest average percentage of brittle area. On the other hand, glass was the material that reflected the greatest fragility, the greatest average roughness and the highest average percentage of brittle area.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
MICROFRESAGEM; REGIME DÚCTIL-FRÁGIL; VIDRO; VITROCERÂMICO; EFEITO DE ESCALA; ESPESSURA DA APARA.
*Micromilling; ductile-brittle transition; glass; glass ceramic; scale effect; chip thickness.*

## INTRODUÇÃO

O vidro, composto maioritariamente por sílica, é dotado de uma série de propriedades que o tornam bastante atrativo numa ampla variedade de aplicações em áreas de alta tecnologia, como ótica, biomédica, automóvel, eletrónica e aeroespacial. Destacam-se a alta dureza, a resistência térmica, a resistência à corrosão e o baixo coeficiente de expansão térmica [1]. Relativamente aos vitrocerâmicos, as excelentes características como a resistência à corrosão, à oxidação e a

elevadas temperaturas, as ótimas propriedades de isolamento térmico, a inércia química, entre outros, fazem com que estes materiais tenham recebido uma atenção crescente nos últimos anos em variadas aplicações industriais, como eletrónica, automóvel, aeroespacial, médica e dentária [2]. No entanto, ambos os materiais são difíceis de maquinar, uma vez que durante o corte podem formar-se fissuras que, sob carregamento contínuo, podem atingir o valor crítico no qual ocorre a fratura. Este valor crítico é normalmente pequeno, devido à baixa tenacidade à fratura do vidro e dos vitrocerâmicos. Aliada à baixa tenacidade está a elevada dureza, duas características que tornam a microfresagem destes materiais desafiante [3]. Desta forma, é importante contornar estas características inerentes a estes materiais que passa por garantir que o processo ocorre em regime dúctil, para assim evitar a formação e propagação de fraturas nas superfícies maquinadas, obter um acabamento superficial superior e manter a integridade da superfície.

A microfresagem é uma tecnologia que permite produzir peças tridimensionais de geometria complexa com alta precisão em diferentes materiais. A cinemática deste processo é idêntica à convencional, no entanto apresenta alguns aspetos que têm de ser devidamente estudados pelo facto de não se tratar apenas de uma redução de escala [4]. Um destes aspetos, talvez o mais importante na transição macro-micro, diz respeito ao efeito de escala. Este efeito tem uma maior influência quando se trata de um processo à microescala, uma vez que a dimensão do raio da aresta de corte da ferramenta se aproxima da escala de material a remover, ao contrário de que acontece no processo à macroescala [5,6]. De forma resumida, o efeito de escala está relacionado com o mecanismo de remoção de material e com a formação das aparas, no entanto, a sua caracterização é ainda motivo de discussão entre vários investigadores, uma vez que muitos fatores podem influenciar indiretamente estes comportamentos. Na fresagem convencional o mecanismo de corte responsável pela formação da apara é predominante, mas com a redução à microescala os efeitos de escala tornam-se mais significativos podendo promover o efeito "ploughing" (aração/lavragem) na superfície, o aumento das forças de corte e, consequentemente, o aumento da rugosidade [7].

A espessura da apara está diretamente relacionada com o mecanismo de corte e com a formação da apara e engloba dois parâmetros que se relacionam entre si, a espessura da apara não deformada, h, e a espessura mínima da apara, hmín. No processo à microescala, a espessura da apara não deformada é, geralmente, da mesma ordem de grandeza do raio da aresta de corte, o que faz com que estes parâmetros tenham um maior impacto no processo micro, comparativamente ao processo convencional. A espessura mínima da apara é o valor que limita a espessura mínima de material a partir da qual a apara começa a ser formada [8]. Segundo Chae et al. [9] a espessura mínima da apara depende principalmente do material da peça de trabalho e do raio da aresta de corte. Outros autores acrescentam também a estes fatores, a microestrutura da peça a maquinar e o material da ferramenta [7,10,11]. A relação entre estes dois parâmetros dita qual o regime de corte, isto é, quando h < hmin, a ferramenta pressiona o material e este recupera elasticamente, ou seja, o material é apenas comprimido em vez de ser removido, pelo que não há formação da apara (deformação elástica). Este comportamento resulta numa pior qualidade superficial e está associado ao início do fenómeno de "ploughing". Quando h < hmin, a apara começa a formar-se, no entanto, nesta fase o efeito de "ploughing" é predominante, contribuindo para o aumento das forças de corte e da rugosidade da superfície (deformação elastoplástica). Por fim, quando h > hmin, a deformação plástica permite a formação contínua da apara, ou seja, existe corte efetivo de material em regime dúctil. Ainda assim, há algum material que recupera elasticamente, mas neste caso a recuperação é menor do que na situação inicial. Na mesma operação podem acontecer os três casos referidos, visto que a espessura da apara não deformada varia com a rotação da ferramenta [8,12]. O facto da espessura da apara não deformada ser menor que o raio da aresta de corte da ferramenta resulta num ângulo de ataque efetivo negativo, em vez do ângulo de ataque nominal. O ângulo de ataque efetivo depende, portanto, da relação entre a espessura da apara não deformada e o raio de aresta de corte, tornando-se mais negativo para relações menores [13]. Assim, a microfresagem ocorre, geralmente, com ângulos de ataque altamente negativos, o que é benéfico para desenvolver uma tensão compressiva hidrostática na zona de formação da apara que ajuda a suprimir a formação /propagação de fraturas e a promover uma remoção de material em regime dúctil [14].

Para além dos dois valores de espessura da apara discutidos anteriormente (h e hmín), existe um outro parâmetro muito importante neste processo, a espessura máxima da apara (hmáx). Trata-se do valor crítico que caracteriza a transição dúctil-frágil, ou seja, durante a rotação da ferramenta, se a espessura da apara não deformada se mantiver abaixo deste valor crítico, então o corte ocorrerá em regime dúctil, caso contrário podem desenvolver-se fraturas na superfície que resultam num regime de corte frágil [15,16]. Este valor crítico da espessura máxima da apara, também designado por profundidade crítica de corte (dc), foi investigado por vários autores em diversos materiais. Bifano

et al. [17] definiram um modelo para materiais frágeis, a partir do critério de propagação da fratura de Griffith e da medida efetiva da fragilidade na indentação, que permite calcular o valor crítico no qual ocorre a transição dúctil-frágil no regime de remoção de material [18]. O comportamento da espessura da apara neste trabalho corresponde ao corte em sentido descendente, ou seja, a espessura da apara diminui desde o valor máximo até zero com a rotação da ferramenta. Portanto, os danos frágeis são mais prováveis de acontecer logo no início do corte, uma vez que, é no início do corte que a espessura da apara não deformada está no seu valor máximo (hm). Ainda assim, este valor de espessura da apara pode não ser superior ao valor crítico (hmáx) e, nesse caso, podem não surgir fraturas na superfície [19]. Em sentido contrário, na zona próxima do fim do contacto entre a ferramenta e a peça de trabalho, como a espessura da apara é muito pequena, a aresta de corte pode não conseguir remover material, comprimindo-o apenas até que o valor mínimo de espessura da apara seja atingido. Assim, de um modo geral, o regime dúctil é conseguido se $h_{mín} < h < h_{máx}$. Segundo Alao [20], o regime dúctil ocorre, em materiais frágeis, quando a espessura mínima da apara é ultrapassada, o que pode variar entre 5 e 38% do raio da aresta de corte da ferramenta.

O ângulo de inclinação entre a ferramenta e a peça de trabalho é um aspeto importante na microfresagem de ponta esférica, uma vez que a velocidade de corte na ponta da ferramenta (eixo neutro) é zero, ou seja, quando o eixo da ferramenta está perpendicular à superfície a maquinar, a ferramenta não remove material, podendo promover o fenómeno de "ploughing" ou até mesmo induzir danos frágeis na superfície final maquinada, o que acaba por comprometer a qualidade e a integridade superficial [6,15,21]. Foy et al. [22] confirmaram estes fenómenos e relatam também que a inclinação da ferramenta contribui para desenvolver uma tensão hidrostática compressiva na zona de corte promovendo a remoção de material em regime dúctil. Portanto, a utilização de um ângulo de inclinação entre a ferramenta e a peça de trabalho é benéfico para suprimir os danos frágeis nas superfícies maquinadas e conseguir obter uma qualidade superficial superior.

Os objetivos do presente trabalho passam por avaliar o impacto das condições de corte na rugosidade média, Ra, das superfícies micro fresadas, com uma ferramenta esférica revestida a diamante, em três materiais frágeis (vidro, metassilicato de lítio e dissilicato de lítio). As superfícies foram também caracterizadas ao nível do mecanismo de remoção de material, do impacto da inclinação entre a ferramenta e a peça de trabalho (0° e 45°) e do cálculo da percentagem de área frágil nas ranhuras maquinadas. Para complementar esta investigação foram recolhidas e analisadas algumas aparas para avaliar a correlação entre a sua morfologia e o regime de corte.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foi utilizada uma ferramenta de topo esférico com 3 mm de diâmetro, de metal duro WC-5wt%Co com tamanho médio de grão WC de 1,5 µm, dureza 1780 HV10 e revestimento multicamada de diamante nano e microcristalino, totalmente fabricada pela Palbit. O revestimento da ferramenta foi obtido através da deposição química de vapor por filamento quente (HF-CVD) e é composto por duas camadas de diamante nanocristalino (NCD) e uma camada intermédia de diamante microcristalino (MCD). Os parâmetros geométricos da ferramenta de corte são apresentados na Tabela 1. Na Figura 1 é apresentada a distribuição das camadas de revestimento e a geometria da ferramenta.

Este trabalho foi dividido em dois grupos de ensaios. No primeiro grupo (ensaios preliminares) os ensaios foram realizados sem inclinação entre a ferramenta e a superfície da peça de trabalho (0°) e sem lubrificação. Neste grupo os parâmetros de corte foram definidos com base em ensaios realizados anteriormente, pela Palbit, em materiais semelhantes. A partir dos resultados destes ensaios, o impacto do ângulo de inclinação entre a ferramenta e a peça de trabalho foi identificado como uma condição de corte com grande impacto neste processo de microfresagem. Portanto, no segundo grupo (ensaios finais) os ensaios foram realizados com uma inclinação

**TABELA 1**
*Parâmetros geométricos da ferramenta.*

| Parâmetros Geometricos | Fresa topo esférico |
|---|---|
| Diâmetro | 3 mm |
| Número de arestas | 2 |
| Comprim. máx. da aresta | 2 mm |
| Ângulo de ataque | -1° |
| Ângulo de alívio | 12° |
| Ângulo de hélice | 5° |
| Raio da aresta de corte | 16 µm |

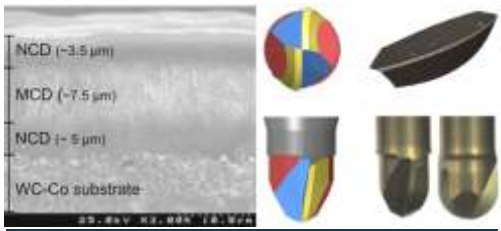



**FIGURA 1**
*Revestimento e geometria da ferramenta.*

**TABELA 2**
*Parâmetros de corte.*

| Ensaios | Parâmetros de corte | Níveis |
|---|---|---|
| 0° inclinação Sem lubrificação | Velocidade de corte, vc (m/min) | 100 |
| | Avanço por dente, fz (µm/z) | 2; 5 |
| | Profundidade de corte, ap (µm) | 2; 5 |
| 45° inclinação Com lubrificação | Velocidade de corte, vc (m/min) | 180; 270; 405 |
| | Avanço por dente, fz (µm/z) | 0,8; 1,3; 2,1 |
| | Profundidade de corte, ap (µm) | 2; 3,2; 5,1 |



**FIGURA 2**
*Representação da montagem experimental.*

de 45º, com lubrificação e com uma pequena alteração nos parâmetros de corte, e tiveram como objetivo estudar esta variável e comparar os resultados das duas inclinações testadas. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de corte para os dois grupos de ensaios. Para cada condição foram realizados três repe-ições para tentar garantir a repetibilidade das variáveis controladas e a precisão dos resultados obtidos. Na Figura 2 é possível observar a representação da montagem experimental, do fenómeno de velocidade nula na ponta da ferramenta e da espessura da apara a diminuir durante a rotação da ferramenta (fresagem des-cendente).

As amostras estudadas neste trabalho foram preparadas partir de uma mistura de precursores utilizados para o fabrico do vidro. Na preparação das amostras, a proporção relativa em massa entre os formadores ($SiO_2$ e $P_2O_5$) foi de 73-76%, intermediários ($Al_2O_3$ e $ZrO_2$) 17-19%, modificadores ($Li_2O$ e $K_2O$) 7-9% e corantes 1-2%. Esta mistura, preparada no DEMaC-UA, foi homogeneizada num moinho de rolos (30 rpm-12h). O pó obtido foi calcinado (850°C-2h) para a eliminação de voláteis e, posteriormente, colocado num forno de indução (1500°C-2h) para a sua fusão. Este material fundido foi submetido a uma segunda fusão, nas mesmas condições, para garantir uma melhor homogeneização do material. Para dar a forma pretendida às amostras, a massa fundida foi vertida em moldes de latão de perfil tetragonal e submetidas a um recozimento térmico a 400°C para o alívio de tensões. Deste processo resultaram as amostras de vidro. Os dois outros grupos de amostras foram obtidos a partir do vidro através de tratamentos térmicos posteriores, a diferentes temperaturas. A formação das amostras de metassilicato de lítio consistiu na nucleação (560°C-1h), aquecimento desde a temperatura ambiente até 680°C (5°C/min) e permanência a esta temperatura durante 40 minutos para o crescimento dos cristais de metassilicato de lítio. Para a formação do dissilicato de lítio, as amostras previamente tratadas para a formação da fase anterior foram aquecidas da temperatura ambiente até 850°C (10°C/min) e depois permaneceram durante 20 minutos a esta temperatura para a conversão dos cristais de metassilicato de lítio em dissilicato de lítio. A caracterização destas amostras, disponibilizada pela equipa do DEMaC-UA, é apresentada na Tabela 3.

A avaliação da rugosidade foi realizada com base no levantamento de forma das ranhuras maquinadas, a partir de um perfilómetro ótico 3D (Sensofar S Neox), disponibilizado pelo DEMaC. O cálculo da área frágil também foi realizado através deste levantamento topográfico da superfície fresada, com recurso ao software ImageJ. Primeiramente, foram recolhidas as imagens das várias ranhuras maquinadas e foi definida a área alvo de estudo, ou seja, a zona central de cada ranhura. Em seguida foi aplicado um filtro *threshold* nas imagens, o que permitiu, a partir das diferentes intensidades luminosas, transformar as imagens originais em imagens de pixéis pretos e brancos. Por fim, a relação entre a quantidade de pixéis permitiu o quantificar a área frágil de cada ranhura. A observação e caracterização das superfícies maquinadas foi realizada por microscopia eletrónica de varrimento (SEM), a partir de um microscópio eletrónico de varrimento (Phenom Pro Generation 5), disponibilizado pela Palbit. Para os

**TABELA 3**
*Propriedades mecânicas dos três materiais*

| Propriedades mecânicas | Vidro | Metassilicato de lítio | Dissilicato de lítio |
|---|---|---|---|
| Dureza [HV]* | 566,9 | 679,3 | 592,1 |
| Dureza [GPa] | 5,6 | 6,7 | 5,8 |
| Tenacidade à fratura [MPa.m1/2]** | 1,71 | 1,74 | 2,23 |
| Módulo de elasticidade [Gpa] | 70 | 97,5 | 95 |

**cargas de indentação: 0,2; 0,5; 1 e 2 kgf ; **método de indentação de Vickers: $K_{ic}$=0,0726(P/c^(3/2))* **[23]**

ensaios de microfresagem ao longo do trabalho foi utilizado um centro de maquinagem Makino iQ500.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho os três materiais foram maquinados a partir da variação da velocidade de corte, avanço por dente, profundidade axial de corte e inclinação entre a ferramenta e a superfície da peça de trabalho. A avaliação e caracterização do processo de microfresagem por variação destes parâmetros foram realizadas a partir da rugosidade média Ra (ISO 4287), do cálculo da percentagem de área frágil, da observação e análise das superfícies e, por fim, da recolha e análise das aparas. Os parâmetros de corte do segundo grupo de ensaios foram agrupados numa matriz de Taguchi simplificada de três níveis com três fatores, da qual resultaram um total de nove combinações de parâmetros, tal como é visível na Tabela 4. Na Figura 3 é apresentado um exemplo do levantamento de forma das ranhuras maquinadas e da seleção da área alvo de estudo.

Os valores de rugosidade média Ra medidos permitem concluir que a melhor qualidade superficial foi conseguida para a amostra de dissilicato de lítio (DL), com um valor médio de rugosidade de 0,036 μm. Neste material, o parâmetro com maior impacto na medição da rugosidade foi a profundidade de corte e, à medida que este parâmetro aumentou, a rugosidade da superfície diminuiu. De notar que, em sentido contrário, o avanço por dente não teve um impacto significativo nos valores medidos. A amostra de metassilicato de lítio (ML) apresentou valores de rugosidade ligeiramente superiores, com um valor médio de 0,045 μm. Neste vitro-cerâmico o parâmetro com maior impacto foi a velocidade de corte e o seu aumento traduziu-se num aumento dos valores de rugosidade. A amostra de vidro (V), tal como esperado, apresentou valores de rugosidade 10 vezes superiores, aproximadamente. Neste material, a rugosidade média foi de 0,47 micrometros e a velocidade de corte foi novamente o parâmetro com maior impacto nos valores medido mas com um comportamento contrário, isto porque o aumento deste parâmetro resultou numa menor rugosidade e, consequentemente, melhor qualidade superficial. Na Figura 4 são apresentados os resultados da avaliação da rugosidade, onde é possível analisar a influência de cada parâmetro na qualidade superficial.

O cálculo da percentagem de área frágil apresentou melhores resultados na amostra de dissilicato de lítio. Para este vitrocerâmico, apenas 7,5%, em média, da área maquinada correspondeu ao regime frágil de remoção de material. O parâmetro com mais influência nos resultados foi a velocidade de corte e o seu aumento refletiu-se num aumento da área frágil. No vitrocerâmico de metassilicato de lítio, os resultados são muito idênticos, isto porque apenas 8%, em média, da área maquinada foi governada pelo mecanismo frágil de remoção de material. Neste material, o parâmetro mais preponderante foi a profundidade de corte e o seu aumento até ao valor intermédio testado permitiu diminuir a área frágil, mas a partir desse valor a área frágil aumentou

**TABELA 4**
*Matriz de Taguchi para os ensaios.*

| Ensaio | vc (m/min) | fz (mm/z) | ap (mm) | hm (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 180 | 0,8 | 2 | 0,59 |
| 2 | 180 | 1,3 | 3,2 | 0,97 |
| 3 | 180 | 2,1 | 5,1 | 1,58 |
| 4 | 270 | 0,8 | 3,2 | 0,60 |
| 5 | 270 | 1,3 | 5,1 | 0,98 |
| 6 | 270 | 2,1 | 2 | 1,55 |
| 7 | 405 | 0,8 | 5,1 | 0,60 |
| 8 | 405 | 1,3 | 2 | 0,96 |
| 9 | 405 | 2,1 | 3,2 | 1,56 |

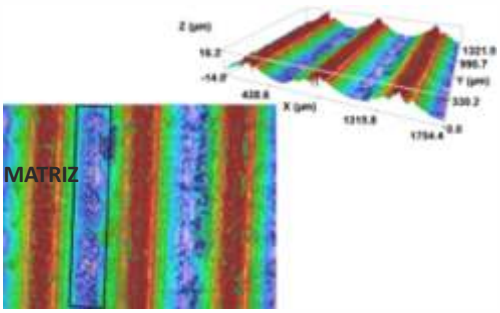



**FIGURA 3**
*Levantamento de forma da ranhura.*

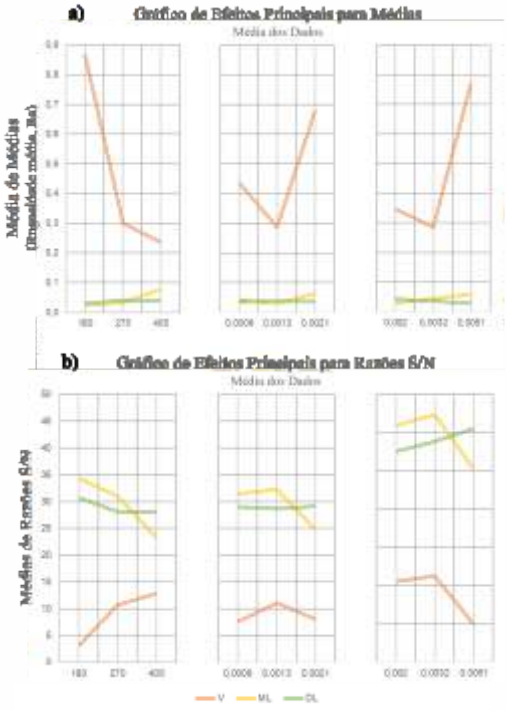



**FIGURA 4**
*Rugosidade média Ra, análise Taguchi com a) gráfico de efeitos principais para médias, b) gráfico de efeitos principais para razões S/N.*

com o aumento da profundidade. Na amostra de vidro, 38%, em média, da área maquinada correspondeu ao regime frágil de remoção de material. O vidro foi o material que apresentou mais área frágil, o que comprova a maior fragilidade deste material face aos restantes. A velocidade de corte foi o parâmetro com maior impacto neste medição e o seu aumento resultou numa menor área frágil. Na Figura 5 são apresentados os resultados do cálculo da área frágil.

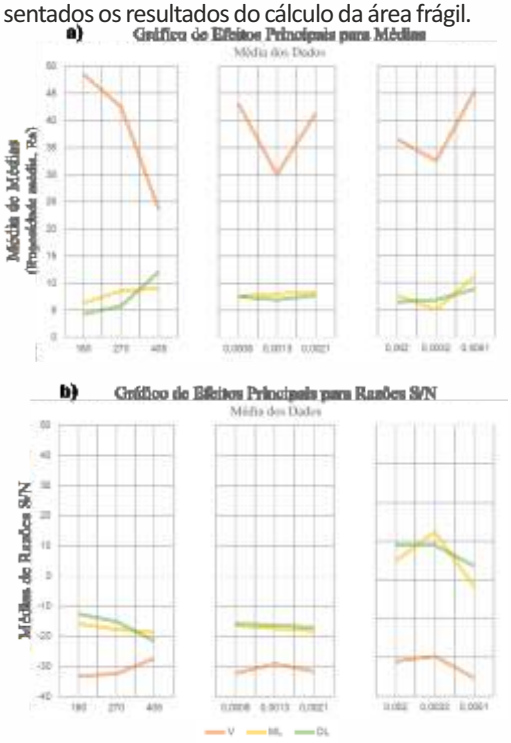



**FIGURA 5**
*Cálculo % área frágil, análise Taguchi com a) gráfico de efeitos principais para médias, b) gráfico de efeitos principais para razões S/N.*

A observação das superfícies maquinadas a partir da microscopia eletrónica de varrimento confirmou que a inclinação nula entre a ferramenta e a peça de trabalho é uma condição de corte com muito impacto no processo. Com inclinação nula (0°) as ranhuras apresentaram danos frágeis evidentes ao longo de todo o comprimento de corte, tal como é visível na Figura 6, ao contrário da inclinação a 45° que permitiu suprimir este problema e obter, maioritariamente, superfícies lisas e livres de fraturas. Nas ranhuras maquinadas nos ensaios finais são observadas algumas fraturas, principalmente na amostra de vidro, zonas onde prevalece o efeito "ploughing" e, principalmente, zonas de remoção de material em regime totalmente dúctil na maioria das ranhuras maquinadas, tal como pode ser observado na Figura 7. De notar que nestes ensaios, apesar do valor de hm, calculado a partir da simulação no *SolidWorks*, ser superior ao valor de $h_{máx}$ (0,179 mm para o vidro, 0,150 mm para o metassilicato de lítio e 0,362 mm para o dissilicato de lítio), calculado com base na teoria de Bifano

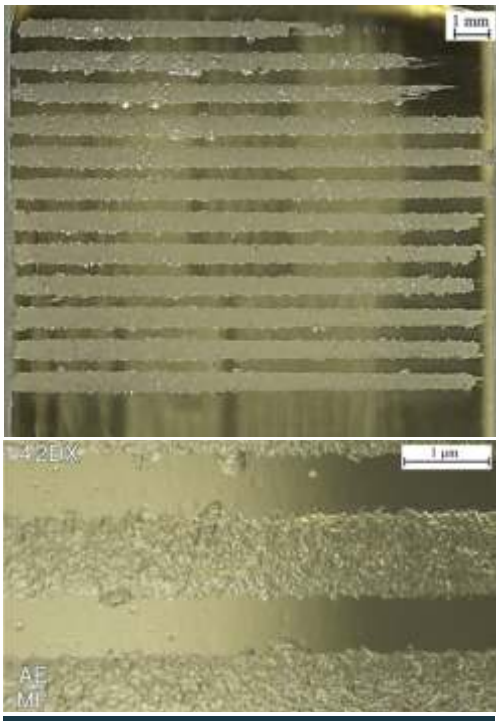



**FIGURA 6**
*Ranhuras maquinadas na condição de inclinação nula (0°), no vidro.*

*(dc=y (E/H)($K_{ic}$ /H)^2)* [17], os resultados mostram que a remoção de material em regime dúctil foi conseguida, principalmente nos dois meterias vitrocerâmicos. No entanto, esta relação $h_m > h_{máx}$ indicaria, à partida, a ocorrência de regime frágil, o que pode sugerir que a equação usada pode necessitar de um ajuste para este grupo de materiais.

A análise das aparas permitiu constatar que as aparas do vitrocerâmico de dissilicato de lítio apresentaram dimensões ligeiramente superiores comparativamente às aparas de metassilicato de lítio, uma vez que na amostra de dissilicato de lítio a presença do regime dúctil foi ligeiramente superior. Por sua vez, a amostra de vidro apresentou dimensões da apara menores face a estes dois vitrocerâmicos, em resultado da maior presença do regime frágil de remoção de material durante o corte, que resultou em aparas mais fragmentadas. Na Figura 8 são apresentados os resultados da análise à morfologia das aparas recolhidas.

## CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu estudar a microfresagem do vidro e dos vitrocerâmicos com uma ferramenta revestida em diamante. Estes materiais são utilizados em muitas aplicações de alta tecnologia em diversos setores industriais, devido às ótimas propriedades mecânicas e óticas que apresentam. Ficou confirmado nesta investigação que a elevada dureza e fragilidade associada a estes materiais torna-os realmente difíceis de maquinar com uma qualidade superficial elevada e requisitos geométricos e dimensionais rigoro-

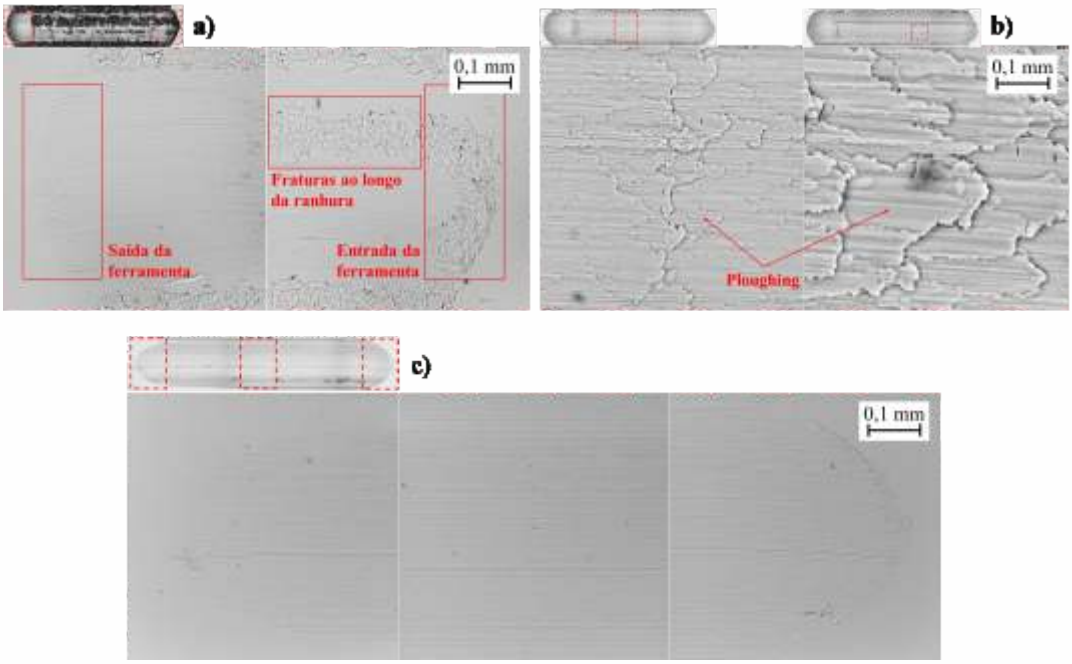



**FIGURA 7**
*Imagens de SEM das superfícies micro fresadas a 45°: a) fraturas no vidro (ensaio nº4: vc=270 m/min; fz=0,8 mm/z; ap=3,2mm), b) efeito "ploughing" no dissilicato de lítio (ensaio nº5 à esquerda: vc=270 m/min; fz=1,3 mm/z; ap=5,1 mm e ensaio nº7 à direita: vc=405 m/min; fz=0,8 mm/z; ap=5,1 mm) e c) regime dúctil no metassilicato de lítio (ensaio nº2: vc=180 m/min; fz=1,3 mm/z; ap=3,2mm).*

sos. No entanto, apesar deste desafio reconhecido na maquinagem destes materiais, neste trabalho foi possível identificar os regimes de remoção de material e garantir a remoção de material em regime dúctil na maioria das ranhuras maquinadas, sendo possível retirar as seguintes conclusões:

- Para as condições de corte testadas ficou demonstrado o grande impacto da inclinação entre a ferramenta e a peça de trabalho, uma vez que as superfícies fresadas a 0° apresentaram regimes de corte totalmente frágeis, enquanto o corte a 45º permitiu obter superfícies em regime dúctil, principalmente nos dois materiais vitrocerâmicos, o que pode estar relacionado com a velocidade de corte nula na zona central da micro ferramenta esférica;
- A rugosidade média das ranhuras micro fresadas no vidro foi de 0,47 mm, sendo a velocidade de corte foi o parâmetro de corte com mais impacto e o seu aumento resultou numa menor rugosidade;
- No metassilicato de lítio a rugosidade média foi de 0,045 mm, o parâmetro mais influente foi a velocidade de corte e o seu aumento traduziu-se num aumento da rugosidade;
- No dissilicato de lítio o valor médio da rugosidade foi de 0,036 mm, a profundidade de corte foi o parâmetro mais relevante e o seu aumento refletiu-se numa diminuição da rugosidade;
- De notar que, apesar da avaliação de acordo com a equação de Bifano et al. indicar que os valores de $h_m$ são superiores aos valores críticos de $h_{máx}$, os resultados nos vitrocerâmicos indicam a remoção de material em regime dúctil. Por outro lado, no vidro, os resultados já corroboram parcialmente a avaliação do valor crítico para a transição dúctil-frágil, uma vez que neste material ocorreu regime frágil em determinadas zonas do corte;
- O cálculo da percentagem de área frágil comprova os resultados da microfresagem em

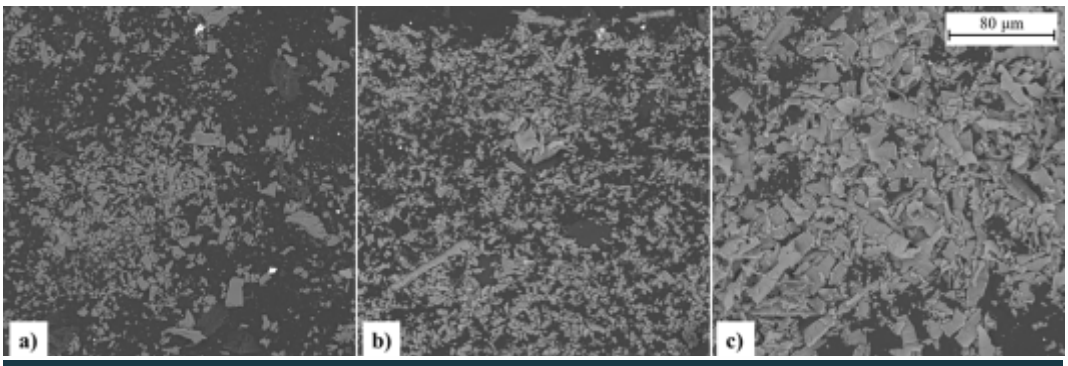



**FIGURA 8**
*Morfologia das aparas recolhidas: a) vidro, b) metassilicato de lítio, c) dissilicato de lítio.*

regime dúctil, uma vez que no dissilicato de lítio e no metassilicato de lítio a área frágil medida foi de apenas 7,5% e 8%, respetivamente, enquanto no vidro, de forma oposta e com corte em regime frágil foi de 38%;

- Para além das tendências dos fatores apresentados nas médias, a análise "small is better" das razões S/N confirma a relação com o desvio dos resultados em relação ao objetivo e mostra que os vitrocerâmicos apresentam melhor acabamento nos parâmetros testados;
- As aparas recolhidas também apoiam os resultados do regime de corte, pois na amostra de vidro as aparas são menores e mais fragmentadas em resultado do regime frágil e, por outro lado, nos vitrocerâmicos o regime dúctil refletiu-se em aparas ligeiramente maiores.

Medir as forças de corte e relacionar os valores obtidos com o regime de corte, testar diferentes valores de inclinação e testar a inclinação na direção de avanço, utilizar ferramentas com diferentes condições geometrias para avaliar e comparar a influência no mecanismo de corte, analisar a propagação das fissuras e fraturas induzidas durante o corte na estrutura do material e testar peças de trabalho com geometrias mais complexas são investigações que podem complementar os resultados apresentados.


## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do PRR - Plano de Recuperação e Resiliência e dos fundos NestGenerationEU da Universidade de Aveiro, no âmbito do Projeto Mobilizador das Agendas Verdes de Inovação "Hi-ver - Recuperação do setor de Componentes Automóveis" (Projeto nº 64 com o número de candidatura C644864375-00000002).


## REFERÊNCIAS


**[1]** A. Sharma, A. Babbar, Y. Tian, B. P. Pathri, M. Gupta, and R. Singh, "Machining of ceramic materials: a state-of-the-art review," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 17, no. 6, pp. 2891-2911, Dec. 2023, doi: 10.1007/s12008-022-01016-7.

**[2]** M. R. Moola, A. Gorin, and K. A. Hossein, "Optimization of various cutting parameters on the surface roughness of the machinable glass ceramic with two flute square end mills of micro grain solid carbide," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 9, pp. 1549-1554, 2012, doi: 10.1007/s12541-012-0204-2.

**[3]** M. Arif, M. Rahman, and W. Y. San, "Ultraprecision ductile mode machining of glass by micromilling process," *J Manuf Process*, vol. 13, no. 1, pp. 50-59, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.jmapro.2010.10.004.

**[4]** J. O'Hara and F. Fang, "Advances in micro cutting tool design and fabrication," *International Journal of Extreme Manufacturing*, vol. 1, no. 3, p. 032003, Sep. 2019, doi: 10.1088/2631-7990/ab3e7f.

**[5]** F. B. de Oliveira, A. R. Rodrigues, R. T. Coelho, and A. F. de Souza, "Size effect and minimum chip thickness in micromilling," *Int J Mach Tools Manuf,* vol. 89, pp. 39-54, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001.

**[6]** A. Mamedov, "Machining of brittle materials: micro milling of glass," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 35, no. 9, pp. 4143-4148, Sep. 2021, doi: 10.1007/s12206-021-0826-3.

**[7]** L. O'Toole, C.-W. Kang, and F.-Z. Fang, "Precision micro-milling process: state of the art,"*Adv Manuf,* vol. 9, no. 2, pp. 173-205, Jun. 2021, doi: 10.1007/s40436-020-00323-0.

**[8]** B. Z. Balázs, N. Geier, M. Takács, and J. P. Davim, "A review on micro-milling: recent advances and future trends," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 3-4, pp. 655-684, Jan. 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06445-w.

**[9]** J. Chae, S. S. Park, and T. Freiheit, "Investigation of micro-cutting operations,"*Int J Mach Tools Manuf*, vol. 46, no. 3-4, pp. 313-332, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015.

**[10]** M. W. Fu and J. L. Wang, "Size effects in multi-scale materials processing and manufacturing," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 167, p. 103755, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2021.103755.

**[11]** H. Ji, Q. Song, and Z. Liu, "Micro-milling machinability prediction for crystalline materials via numerical-analytical hybrid modelling and strain rate-dependent grain-scale simulation,"*J Manuf Process*, vol. 124, pp. 972-984, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.06.063.

**[12]** A. Sharma, A. Babbar, Y. Tian, B. P. Pathri, M. Gupta, and R. Singh, "Machining of ceramic materials: a state-of-the-art review, "*International Journal on Interactive Design and Manufacturing* (IJIDeM), vol. 17, no. 6, pp. 2891-2911, Dec. 2023, doi: 10.1007/s12008-022-01016-7.

**[13]** X. Wu et al., "Experimental Study on the Minimum Undeformed Chip Thickness Based on Effective Rake Angle in Micro Milling, "*Micromachines (Basel)*, vol. 11, no. 10, p. 924, Oct. 2020, doi: 10.3390/mi11100924.

**[14]** R. Bian, E. Ferraris, Y. Ynag, and J. Qian, "Experimental Investigation on Ductile Mode Micro-Milling of ZrO2 Ceramics with Diamond-Coated End Mills," *Micromachines (Basel)*, vol. 9, no. 3, p. 127, Mar. 2018, doi: 10.3390/mi9030127.

**[15]** T. Matsumura and T. Ono, "Cutting process of glass with inclined ball end mill," *J Mater Process Technol*, vol. 200, no. 1-3, pp. 356-363, May 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.067.

**[16]** D. Figueiredo, B. Guimarães, T. E.F. Silva, C. M. Fernandes, and J. P. Davim, "Control Of Ductile Mode Machining During Micro-Milling Of Cemented Carbide," in *Euro PM2024 Proceedings*, EPMA, Oct. 2024. doi: 10.59499/EP246281747.

**[17]** T. G. Bifano, T. A. Dow, and R. O. Scattergood, "Ductile-Regime Grinding: A New Technology for Machining Brittle Materials, "*Journal of Engineering for Industry,* vol. 113, no. 2, pp. 184-189, May 1991, doi: 10.1115/1.2899676.

**[18]** E. K. Antwi, K. Liu, and H. Wang, "A review on ductile mode cutting of brittle materials, "*Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 251-263, Jun. 2018, doi: 10.1007/s11465-018-0504-z.

**[19]** M. Arif, M. Rahman, and W. Y. San, "An experimental investigation into micro ball end-milling of silicon, "*J Manuf Process*, vol. 14, no. 1, pp. 52-61, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.jmapro.2011.09.004.

**[20]** A.-R. Alao, "Review of ductile machining and ductile-brittle transition characterization mechanisms in precision/ultraprecision turning, milling and grinding of brittle materials, "*Precis Eng*, vol. 88, pp. 279-299, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.precisioneng.2024.02.012.

**[21]** D. Figueiredo, J. Silva, T. E. F. Silva, A. M. P. de Jesus, C. M. Fernandes, and J. P. Davim, "Investigation on micro-milling of cemented carbide with ball nose and corner radius diamond-coated end mills, "*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 131, no. 3-4, pp. 1347-1360, Mar. 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13013-z.

**[22]** K. Foy, Z. Wei, T. Matsumura, and Y. Huang, "Effect of tilt angle on cutting regime transition in glass micromilling, "*Int J Mach Tools Manuf*, vol. 49, no. 3-4, pp. 315-324, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.10.007.

**[23]** S. Baumgartner, R. Gmeiner, J. A. Schönherr, and J. Stampfl, "Stereolithography-based additive manufacturing of lithium disilicate glass ceramic for dental applications, "*Materials Science and Engineering: C*, vol. 116, p. 111180, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.msec.2020.111180.

# MAQUINAGEM E PEÇAS DO SETOR AUTOMÓVEL COM A REPLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES PRESENTES NA INDÚSTRIA

**Tiago Babo[1*], Daniel Figueiredo[1,2*], Bruno Guimarães[2], Pedro Costa[2]**
**F.J. Oliveira[3], Cristina M. Fernandes[2], J. Paulo Davim[1]**

**1** Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro, Campus Santiago, Aveiro, 3810-193, Portugal
**2** R&D Department, Palbit S.A., Rua das Tílias, Branca, 3850-582, Aveiro, Portugal
**3** CICECO - Aveiro Institute of Materials, Department of Materials & Ceramic Engineering, University of Aveiro, 3810-193, Aveiro, Portugal

**Corresponding author(s). E-mail(s): babotiago@ua.pt; daniel.af@ua.pt; https://orcid.org/0000-0002-5697-4344*

***A indústria automóvel, com o desenvolvimento da mobilidade elétrica, tem sido desafiada a adotar materiais mais leves para reduzir o peso e ampliar a autonomia. Neste contexto, as ligas de alumínio como AlSi10MnMg e as tecnologias de fundição sob pressão surgem como soluções viáveis para fabricar peças leves e com geometrias complexas. Contudo, nas zonas de rigor geométrico, é necessário realizar operação de maquinagem de modo a cumprir os requisitos de funcionamento. A maquinagem dessas ligas, nomeadamente em peças com geometrias complexas e paredes finas, enfrenta desafios devido às vibrações e ao alto teor de silício, afetando a qualidade final das peças e a produtividade dos processos. Para mitigar esses problemas, a otimização das ferramentas de corte é fundamental. ferramentas PCD com geometrias inovadoras, canais internos de lubrificação e superfícies funcionais otimizadas têm sido as estratégias adotadas pelos fabricantes para melhorar a produtividade e a eficiência de operações de maquinagem na indústria automóvel.***

***Este estudo inicial exploratório visa a responder aos desafios da maquinagem no setor automóvel, analisando o desempenho de ferramentas de fresagem em três ligas de alumínio de fundição: AlSi10MnMg (primária), AlMg4Fe2 (secundária) e AlSi9Cu3 (convencional). O estudo compara a ferramenta inovadora PCD, obtida por fabrico aditivo com canais de lubrificação interna (ferramenta AM) com uma ferramenta convencional (ferramenta CV). Dos ensaios realizados, percebeu-se que a ferramenta AM originou pior acabamento superficial, apesar de garantir o dobro da produtividade. A liga secundária AlMg4Fe2 apresentou a melhor rugosidade, mas a liga convencional AlSi9Cu3 teve o desempenho mais favorável na formação de rebarbas.***

*With the development of electric mobility, the automotive industry has been challenged to adopt lighter materials to reduce weight and extend autonomy. In this context, aluminium alloys such as AlSi10MnMg and die-casting technologies have emerged as viable solutions for manufacturing lightweight parts with complex geometries. However, in areas of geometric rigour, machining operations must be carried out in order to meet operating requirements. Machining these alloys, particularly on parts with complex geometries and thin walls, faces challenges due to vibrations and the high silicon content, affecting the final quality of the parts and the productivity of the processes. PCD tools with innovative geometries, internal lubrication channels and optimised functional surfaces have been the strategies adopted by manufacturers to improve the productivity and efficiency of machining operations in the automotive industry.*

*This initial exploratory study aims to address the challenges of machining in the automotive sector by analysing the performance of milling tools in three cast aluminium alloys: AlSi10MnMg (primary), AlMg4Fe2 (secondary) and AlSi9Cu3 (conventional). The study compares the innovative PCD tool, obtained by additive manufacturing with internal lubrication channels (AM tool) with a conventional tool (CV tool). From the tests carried out, it was realised that the AM tool produced a worse surface finish, despite guaranteeing twice the productivity. The AlMg4Fe2 secondary alloy showed the best roughness, but the conventional AlSi9Cu3 alloy had the most favourable performance in burr formation.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
LIGAS DE ALUMÍNIO DE FUNDIÇÃO, FRESAGEM, FERRAMENTAS PCD, VEÍCULOS ELÉTRICOS.
*Aluminium casting alloys, Milling, PCD tools, Electric vehicles.*

## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a indústria automóvel tem enfrentado desafios crescentes, impulsionados pela necessidade de reduzir o impacto ambiental e aumentar a eficiência energética, [1], [2]. Um dos caminhos para responder a essas exigências é o uso de materiais leves, como ligas de alumínio, que oferecem uma excelente relação resistência/peso, permitindo reduzir o peso do veículo e, assim, reduzir o consumo de energia e ampliar a autonomia dos veículos elétricos, [3]. Além da relação resistência/peso, as ligas de alumínio são amplamente aplicadas devido às suas características mecânicas e à versatilidade de processos de fabrico, como fundição e maquinagem.

A produção híbrida de componentes para veículos elétricos é uma solução particularmente eficaz, combinando processos de fundição sob pressão de ligas de alumínio com operações de maquinagem nas áreas que exigem maior precisão geométrica. Esta abordagem permite o fabrico de peças complexas e leves, ideais para reduzir o peso. Entre as ligas de alumínio utilizadas, as ligas de alumínio-silício (Al-Si) são particularmente vantajosas, pois oferecem uma excelente relação resistência/peso, boa condutividade térmica, resistência à corrosão e boa capacidade de fundição. Com teores de silício variando de hipoeutéticos a hipereutéticos (até 30%), estas ligas oferecem ótima fluidez e bom preenchimento de moldes em peças complexas e de paredes finas. No entanto, teores mais altos de silício aumentam a dureza e reduzem a ductilidade, dificultando a maquina-gem e a obtenção de precisão geométrica, [4], [5], [6].

Na presença de grãos de silício nas ligas de alumínio a maquinar, o desafio é acrescido no que se refere à durabilidade das ferramentas e resultados obtidos. A escolha é quase unânime na industria automóvel, optando-se por ferramentas de diamante policristalino PCD ou ferramentas com revestimento de diamante obtido por técnicas de CVD pois resistem mais ao desgaste, minimizam a formação de aresta postiça e apresentam baixa adesão de alumínio [7]. A revisão apresentada por Mativenga et al., enfatiza não haver uma solução única na escolha das ferramentas, que garanta elevado desempenho em todos os materiais e condições de maquinagem. Os autores abordam inovações e direções futuras para as ferramentas de corte, destacando quatro áreas principais: (i) a relação entre materiais, microestrutura e propriedades das ferramentas; (ii) o impacto dos revestimentos no desempenho das ferramentas; (iii) a preparação das arestas de corte e superfícies funcionais e como influenciam o desempenho; e (iv) a geometria das ferramentas para garantir uma maquinagem de alto desempenho e estabilidade, considerando o tempo de operação, sustentabilidade e acabamentos [8].

Na indústria automóvel, têm sido implementadas novas ferramentas de corte que com geometrias eficientes que permitem a elaboração de várias operações com a mesma ferramenta, respondem assim às necessidades que as peças desta indústria exigem. O desenvolvimento destas ferramentas exige uma abordagem diferente das convencionais, com estruturas otimizadas em treliça, superfícies funcionais que melhoram o fluxo de material durante o corte e canais de lubrificação interna estrategicamente posicionados para atuar nas áreas de maior desgaste. A produção destas ferramentas só se torna possível com utilização de fabrico aditivo para obtenção do corpo da ferramenta [9], [10], [11].

Para abordar estes desafios, este estudo analisa uma ferramenta inovadora de PCD, desenvolvida pela Palbit S.A., obtida por fabrico aditivo com canais internos de lubrificação, com 12 dentes de corte em 40 mm de diâmetro.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### PEÇAS MAQUINADAS

As peças em estudo foram fabricadas em ligas de alumínio por fundição sob pressão, com geometrias complexas e características semelhantes às do setor automóvel, Figura 1. As ligas utilizadas para o estudo foram a AlSi10MnMg (liga primária), a AlMg4Fe2 (liga secundária) e a AlSi9Cu3 (liga convencional), tendo sido escolhidas pela sua aplicabilidade na indústria automóvel e pelas suas propriedades mecânicas, como alta resistência e leveza, que as tornam ideias para componentes com geometrias complexas que exigem alto desempenho e durabilidade [12].

A liga AlSi10MnMg (primária) e a AlSi9Cu3 (convencional) são ricas em silício, garantindo boas propriedades de fundição, maquinabilidade e estabilidade estrutural. A AlSi10MnMg destaca-se pela maior ductilidade, graças ao manganês e magnésio, enquanto a AlSi9Cu3 possui boa resistência mecânica devido ao teor de cobre. Já a liga AlMg4Fe2 (secundária) é altamente dúctil pela alta presença de magnésio, mas tem resistência mecânica ligeiramente inferior, devido à ausência de silício [6], [12]. Na Tabela 1 apresentam-se as propriedades mecânicas nominais das três ligas. Em cada liga, foram observadas e documentadas várias regiões da amostra para analisar a microestrutura e compreender a organização dos

elementos de liga. Esta análise possibilitou a identificação de fases típicas e áreas de concentração de elementos. Na Figura 2 estão apresentadas imagens com a microestrutura das três ligas, obtidas no SEM e com ampliação de 1000x.

**TABELA 1**
*Propriedades mecânicas das ligas ensaiadas* [12], [13].

| Propriedades mecânicas | AlSi9Cu3 | AlSi10MnMg | AlMg4Fe2 |
|---|---|---|---|
| Resistência à tração [Mpa] | >240 | 250-290 | 245-265 |
| Tensão de cedência [Mpa] | >140 | 120-150 | 125-135 |
| Extensão após rotura [%] | <1 | 5-11 | 11-15 |
| Densidade [kg/dm3] | 2.75 | 2.64 | 2.67 |
| Dureza mínima [HBW] | 80 | 75-95 | 65-75 |



**FIGURA 1**
*Representação das peças em estudo.*

## FERRAMENTAS

No estudo foram utilizadas duas fresas de 40 mm de diâmetro com pastilhas PCD, desenvolvidas pela Palbit S.A., cada uma com configurações específicas: uma com seis dentes (ferramenta CV), obtida por tecnologia convencional (Figura 3(b)), e outra com doze dentes e canais internos de lubrificação (ferramenta AM), fabricada por processo aditivo (Figura 3(a)). A ferramenta AM foi projetada para otimizar a eficiência na maquinagem de alumínio, combinando PCD, maior número de dentes e lubrificação interna, o que aumenta a durabilidade e a produtividade. A ferramenta CV, com um design mais tradicional, serviu como base de comparação para avaliar as melhorias oferecidas pela AM em termos de produtividade e qualidade do corte. Na Tabela 2 estão presentes os parâmetros geométricos das duas ferramentas.

**TABELA 2**
*Definições geométricas das ferramentas.*

| Parâmetros Geométricos | Ferramenta AM | Ferramenta CV |
|---|---|---|
| Diâmetro de corte - Dc [mm] | 40 | 40 |
| Nº Dentes - Z | 12 | 6 |
| Ângulo de saída axial - ggp [° ] | +6 | +6 |
| Ângulo de saída radial - gf [° ] | 0 | 0 |
| Ângulo da aresta de corte - kr [° ] | 90 | 90 |
| Profundidade de corte máxima - ap [mm] | 8 | 5 |
| Raio da aresta de corte - re [mm] | 0.5 | 0.8 |

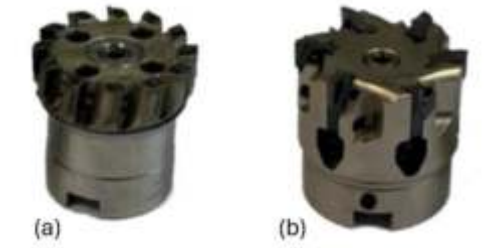



**FIGURA 3**
*Fresas usadas nos ensaios. (a) Ferramenta AM; (b) Ferramenta CV.*

Em operações de facejamento, o batimento axial (axial run-out) tem um impacto significativo na qualidade da superfície maquinada e no desgaste das ferramentas. No estudo, a ferramenta CV, que permite a troca e ajuste de pastilhas, foi preparada utilizando o equipamen-

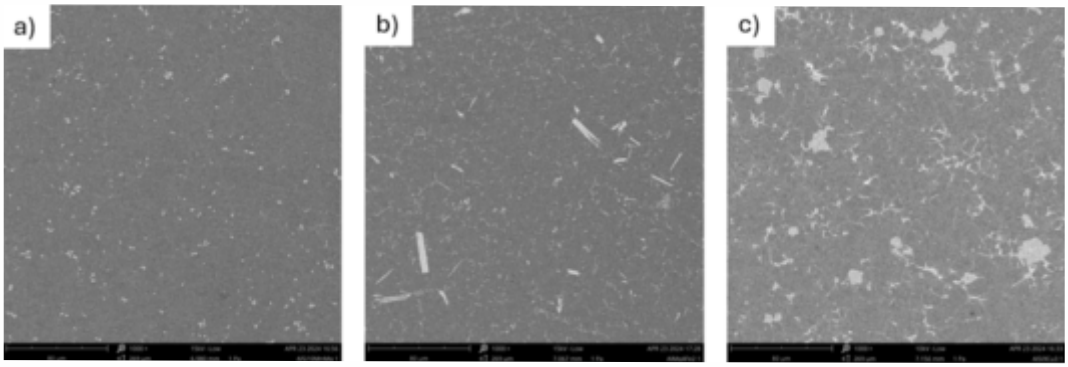



**FIGURA 2**
*Microestrutura das amostras: a) AlSi10MnMg; b) AlMg4Fe2; c) AlSi9Cu3.*

to Zoller Venturion 450, alcançando um batimento axial de 2 mm. Em contraste, a ferramenta AM, que não permite ajustes, apresentou um batimento axial de 25 mm. Este valor, superior ao desejado, condiciona parcialmente os resultados obtidos com esta ferramenta.

### PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte são essenciais para a qualidade do facejamento, afetando o desgaste da ferramenta, a precisão do acabamento e a produtividade do processo. Neste estudo, ambas as ferramentas partilharam os mesmos parâmetros de corte, exceto a velocidade de avanço linear, que foi o dobro para a ferramenta de fabrico aditivo devido ao dobro do número de dentes, pois manteve-se o avanço por dente (fz) para ambas. Para garantir condições de corte consistentes e reduzir o desgaste das ferramentas, todos os ensaios foram realizados com lubrificação abundante. A Tabela 3 apresenta um resumo dos parâmetros completos utilizados para cada ferramenta.

**TABELA 3**
*Condições de corte utilizadas nos ensaios.*

| Parâmetros de Corte | Ferramenta CV | Ferramenta AM |
|---|---|---|
| Velocidade corte VC [m/min] | 1000 | 1000 |
| Velocidade rotação n [rpm] | 7958 | 7958 |
| Avanço por dente fz [mm/dente] | 0.05 | 0.05 |
| Número de dentes de corte - Zn | 6 | 12 |
| Velocidade de avanço Vf [mm/min] | 2387 | 4775 |
| Profundidade radial de corte - ae [%] | 75 | 75 |

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As operações de maquinagem foram realizadas no centro de maquinagem 5 eixos Mazak CV5-500. O procedimento experimental começou com a escolha da melhor estratégia para fixar as peças na mesa do centro de maquinagem. Utilizou-se as orelhas das peças e três parafusos ISO 4762 CHC M5x20, além de dois calços laterais, foi garantida uma fixação estável, facilitando trocas rápidas sem necessidade de redefinir o ponto zero. Após assegurar a fixação, foi definida a estratégia de maquinagem, considerando as áreas mais adequadas para o facejamento das peças. Dado o empeno nas das ligas AlSi10MnMg e AlMg4Fe2, optou-se por facejar inicialmente as paredes de contorno, seguindo para duas passagens de um milímetro nas extremidades da base da peça, Figura 4. Esta abordagem procurou replicar as condições encontradas no setor automóvel, onde a complexidade das peças e a presença de paredes finas criam instabilidade no corte. Para os ensaios, foram utilizadas dez peças de cada material, com cinco ensaios realizados para cada liga e ferramenta.

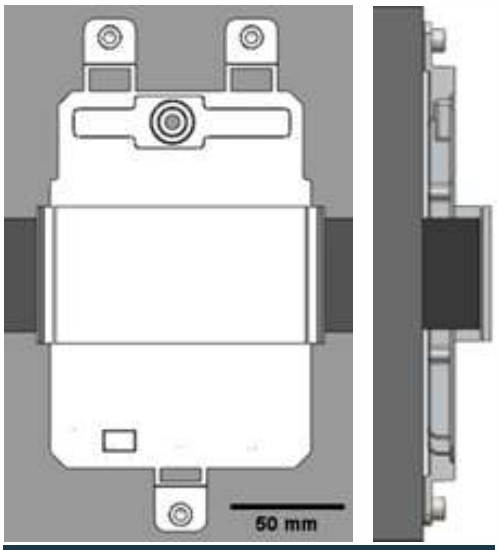



**FIGURA 4**
*Vista superior e lateral da peça depois da operação de facejamento.*

Nos ensaios realizados foi avaliada a rugosidade da superfície gerada com sistema ótico Bruker Alicona® Infinite Focus SL e avaliados os defeitos nas peças (rebarbas) com recurso a uma lupa digital ASH Inspex 4k.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### ACABAMENTO SUPERFICIAL

A análise do acabamento superficial evidenciou que a rugosidade (Ra e Sa) foi influenciada quer pela escolha das ferramentas na superfície maquinada, quer pela liga. A ferramenta CV apresentou um desempenho superior, com menores valores de rugosidade na superfície maquinada, enquanto a ferramenta AM, resultou numa rugosidade medida mais alta, o que se deve ao batimento axial da ferramenta AM, provocado pela dificuldade de controlo dimensional das aresta e não existência de um ajuste mecânico axial, que gerou marcas na superfície das peças. Os valores de rugosidade 2D e 3D medidos podem ser visualizados nos gráficos da Figura 5.

Entre as ligas testadas, a AlMg4Fe demonstrou o melhor desempenho em acabamento, com menores valores de rugosidade, devido à sua maior ductilidade e menor teor de silício, que minimizam o desgaste abrasivo e facilitam o corte uniforme. Pelo contrário, as ligas AlSi10MnMg e AlSi9Cu3 apresentaram maior rugosidade, sendo que a primeira teve um desempenho ligeiramente inferior provavelmente devido ao seu maior teor de silício e à sua maior dureza, características que dificultam um corte uniforme e podem resultar em superfícies mais rugosas.

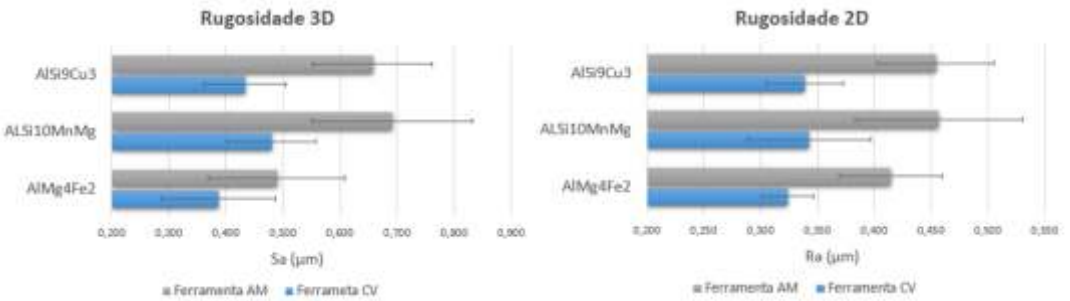



**FIGURA 5**
*Rugosidade bidimensional e tridimensional medida nas superfícies maquinidadas.*

## FORMAÇÃO DE REBARBA

A formação de rebarba nas peças maquinadas foi avaliada considerando o tipo de ferramenta e a composição das ligas de alumínio. A análise foi realizada sempre na mesma zona das peças e encontra-se visível na Tabela 4. Observou-se que a liga convencional AlSi9Cu3 quase não teve formação de rebarba com ambas as ferramentas, o que pode ser atribuído à sua alta dureza e resistência, limitando a deformação plástica nas arestas das superfícies maquinadas. Na liga primária AlSi10MnMg, para a ferramenta AM observa-se uma aresta ligeiramente quebrada e com rebarba negativa, enquanto na ferramenta CV há rebarba pequena e do tipo secundária. Esse comportamento é resultado do elevado teor de silício e manganês na liga, que aumentam a dureza mas também promovem a formação de rebarbas nas arestas Por fim a liga secundária AlMg4Fe2 apresenta grande formação de rebarba do tipo ondulada, devido à sua grande ductilidade e baixo teor de silicio.

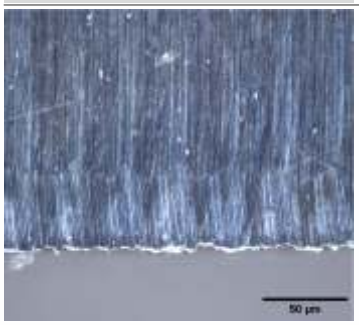
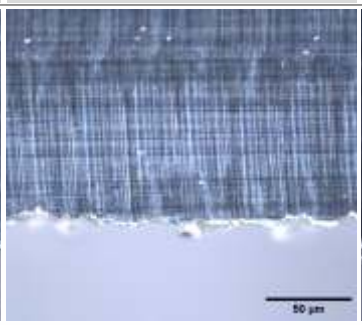
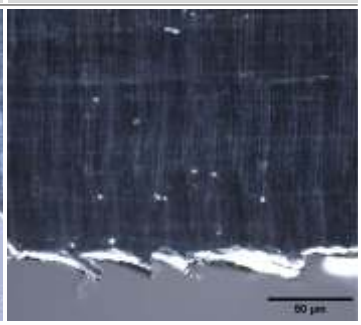
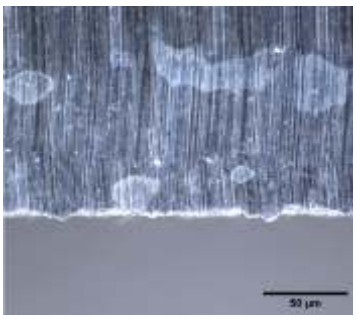
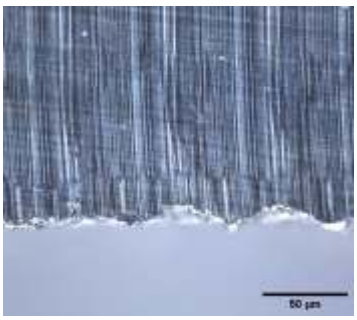
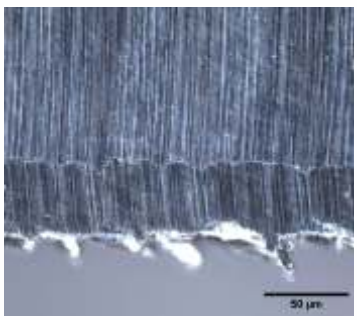
## CONCLUSÕES

Com este estudo analisou-se o desempenho de duas fresas de facejamento na maquinagem de peças semelhantes às do setor automóvel, fabricadas em três ligas de alumínio de fundição nomeadamente a liga primária AlSi10MnMg, a liga convencional AlSi9Cu3 e a liga secundária AlMg4Fe2. As fresas com pastilhas de PCD são ambas de 40 mm, uma delas fabricada por tecnologia convencional com 6 dentes de corte (ferramenta CV) e outra obtida por fabrico aditivo com 12 dentes de corte e canais de lubrificação interna (ferramenta AM). As variáveis analisadas foi a rugosidade, formação de rebarbas nas arestas.

Este estudo sobre a análise das superfícies maquinadas em condições semelhantes às da indústria automóvel, permitiu elencar as seguintes conclusões:

- A ferramenta CV proporcionou melhores valores de rugosidade superficial em todas as ligas, devido ao menor batimento, apesar de a ferra-

**TABELA 4**
*Avaliação da formação de rebarba na aresta.*

| | AlSi9Cu3 | AlSi10MnMg | AlMg4Fe2 |
|---|---|---|---|
| FERRAMENTA AM |  |  |  |
| FERRAMENTA CV |  |  |  |

menta AM ter demonstrado uma produtividade duas vezes maior para fz constante pois tem o dobro do número de dentes;

- A liga secundária AlMg4Fe2 destacou-se com os menores valores de rugosidade média linear (Ra=0,324 ṁm)) e tridimensional (Sa=0,387 ṁm), enquanto a liga primária AlSi10MnMg teve o pior desempenho;
- Na formação de rebarba a liga convencional AlSi9Cu3 teve o melhor desempenho, com pouca formação de rebarba para ambas as ferramentas. Já liga AlMg4Fe2 apresentou maior formação de rebarbas onduladas com ambas as ferramentas, devido à sua alta ductilidade;
- Não houve sinais de desgaste em ambas as ferramentas, à exceção de um dente da ferramenta AM que sofreu delaminação devido ao batimento axial.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento do Projeto Hi-rEV-Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002), cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), através da NextGeneration EU

## REFERÊNCIAS

**[1]** C. Author, "ORIGINAL ARTICLES Magnesium and Aluminum Alloys in Automotive Industry," 2012. [Online]. Available: http://www.worldaluminium.org,

**[2]** J. Hirsch, "Recent development in aluminium for automotive applications, "*Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, no. 7, pp. 1995-2002, Jul. 2014, doi: 10.1016/S1003-6326(14)63305-7.

**[3]** F. Czerwinski, "Current Trends in Automotive Lightweighting Strategies and Materials," *Materials 2021*, Vol. 14, Page 6631, vol. 14, no. 21, p. 6631, Nov. 2021, doi: 10.3390/MA14216631.

**[4]** L. F. Gomes, B. L. Silva, P. S. da Silva, A. Garcia, and J. E. Spinelli, "Ag-containing aluminum-silicon alloys as an alternative for as-cast components of electric vehicles, "*Mater Res Express*, vol. 8, no. 1, p. 016527, Jan. 2021, doi: 10.1088/2053-1591/ABDABE.

**[5]** F. J. Feikus, P. Bernsteiner, R. F. Gutiérrez, and M. Luszczak, "Further Development of Electric Motor Housings, "*MTZ worldwide 2020 81:3*, vol. 81, no. 3, pp. 38-43, Feb. 2020, doi: 10.1007/S38313-019-0176-Z.

**[6]** Kaufman, John Gilbert and Rooy, and Elwin L, "Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications. "Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=JM0u1vwrS5UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=%5BKaufman+and+Rooy+2004%5D+J+Gilbert+Kaufman+and+Elwin+L+Rooy.+Aluminum+alloy+castings.+Properties,+Processes+and+Applications.+ASM+International,+10,+2004.&ots=VBPt5EdFWn&sig=GEJJaIcCuluK-jfV1w9fdzE48N8&redir_esc=y#v=onepage&q=%5BKaufman%20and%20Rooy%202004%5D%20J%20Gilbert%20Kaufman%20and%20Elwin%20L%20Rooy.%20Aluminum%20alloy%20castings.%20Properties%2C%20Processes%20and%20Applications.%20ASM%20International%2C%2010%2C%202004.&f=false

**[7]** Y. Kobaru, R. Nagaoka, K. Shimana, S. Yoshimitsu, and E. Kondo, "Tool wear characteristics in machining of hypereutectic Al-Si alloys by cemented carbide tool, "*Journal of Machine Engineering*, vol. Vol. 20, No. 2, no. 2, pp. 94-103, 2020, doi: 10.36897/JME/117775.

**[8]** P. Mativenga et al., "Engineered design of cutting tool material, geometry, and coating for optimal performance and customized applications: A review, "*CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 52, pp. 212-228, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.CIRPJ.2024.06.001.

**[9]** A. S. S S and M. B, "Review on 3D printing techniques for cutting tools with cooling channels., "*Heliyon,* vol. 9, no. 12, pp. e22557-e22557, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.HELIYON.2023.E22557.

**[10]** G. Soares et al., "Desenvolvimento de Tratamentos Térmicos para Peças Estruturais Injetadas em Ligas de Alumínio, "*Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 28, no. 2, pp. 73-88, Oct. 2024, doi: 10.5944/RIBIM.28.2.43148.

**[11]** F. Matos et al., "Additively manufactured milling tools for enhanced efficiency in cutting applications, "*Procedia Structural Integrity,* vol. 53, pp. 270-277, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.PROSTR.2024.01.033.

**[12]** Rheinfelden, "Primary Aluminium Alloys for Pressure die Casting," 2016.

**[13]** CEN, "EN 1706:2020 - Aluminium and aluminium alloys - Castings - Chemical composition and mechanical properties, "2020. Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Available: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/44ffb47e-5c29-49ec-ab81-6acea6027fc8/en-1706-2020?srsltid=AfmBOopM96H0FGNh3zTQ04UjLshOw63bklQnUuTClEiLtBG7e0PIjhI5

# INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO NA DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS POR HIPIMS

**B. S. Monteiro[1,2], A. Reis[1,2], C. M. Fernandes[3], S. Simões[1,2]**

**1** Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
**2** LAETA/INEGI-Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
**3** Palbit S.A., P.O. Box 4, 3854-908 Branca, Albergaria-a-Velha, Portugal

***Este estudo contempla a investigação da influência da rugosidade do substrato na deposição de filmes finos multicamada por PVD-HiPIMS em substratos cerâmicos de Al2O3 + SiC, visando a otimização da resistência ao desgaste das ferramentas de corte para a maquinagem de superligas resistentes ao calor (HRSA). As multicamadas foram caracterizadas por microscopia digital (DM), microscopia eletrónica de varrimento (SEM) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS). Os resultados obtidos mostraram que o estado da superfície afeta significativamente a rugosidade superficial dos filmes, o que, por sua vez, influencia a uniformidade dos revestimentos na secção transversal.***

*This study investigates the influence of substrate roughness on the deposition of multilayer thin films by PVD-HiPIMS on Al2O3 + SiC ceramic substrates, aiming to optimize the wear resistance of cutting tools for machining heat resistance superalloys (HRSA). The multilayers were characterized using digital microscopy (DM), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results showed that the surface condition significantly affects the films' surface roughness, which in turn influences the cross-sectional uniformity of the coatings.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
HIPIMS; MAQUINAGEM; FERRAMENTAS DE CORTE; CERÂMICOS; ALUMINA.
*HiPIMS; machining; cutting tools; ceramics; alumina*

## INTRODUÇÃO

Atualmente, o setor da mobilidade enfrenta exigências sucessivamente mais rigorosas para cumprir as metas ambientais propostas pela União Europeia. Com o principal objetivo de atingir a melhoria da eficiência energética e, com isso, a redução das emissões de gases com efeito de estufa, as ligas leves e os materiais compósitos têm vindo a ganhar destaque nesta indústria, resultando em novos desafios na maquinagem destes materiais considerados difíceis de maquinar (hard-to-cut). Neste contexto, as ferramentas de corte tradicionais tornam-se ineficientes, apresentando desgaste prematuro e, desta forma, uma redução significativa da sua vida útil em serviço [1, 2].

De modo a ultrapassar estes desafios, as ferramentas de corte cerâmicas destacam-se como uma solução promissora, combinando propriedades mecânicas como elevada dureza, resistência ao desgaste e excelente estabilidade térmica, características que as tornam particularmente adequadas para esta aplicação. Adicionalmente, a superfície destas ferramentas de corte pode ser reforçada através da deposição de filmes finos, o que permite minimizar o desgaste das ferramentas, prolongar a sua vida útil e assegurar um desempenho superior na maquinagem de superligas resistentes ao calor (HRSA) [3, 4].

A técnica avançada de deposição física em fase de vapor (PVD) designada High Power Impulse Magnetron Sputtering (HiPIMS) tem-se destacado em relação às técnicas convencionais de sputtering, uma vez que esta tecnologia assegura a deposição de filmes finos com maior adesão, densidade superior e posteriormente maior dureza e resistência ao desgaste. Adicionalmente, esta técnica oferece um controlo mais rigoroso sobre a microestrutura dos revestimentos, tornando-a altamente adequada para aplicações com esforços mecânicos e térmicos extremos. Desta forma, existem diversos

parâmetros que afetam o desempenho dos filmes depositados por HiPIMS, incluindo a condição da superfície do substrato que pode influenciar significativamente a adesão, uniformidade e durabilidade dos revestimentos [4-8].

Neste estudo, diferentes sistemas de multicamadas foram depositados por HiPIMS em substratos à base de alumina (Al2O3) polidos e retificados, de modo a investigar a influência do tratamento superficial do substrato nas propriedades topográficas e estruturais dos revestimentos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, os revestimentos multicamadas foram depositados utilizando a técnica HiPIMS em substratos de alumina reforçados com whiskers de SiC (Al2O3 + SiC (w)). Estes substratos foram preparados em dois estados de superfície distintos, polido e retificado. Para estudar a influência do estado superficial na deposição dos revestimentos, foram estudados três sistemas multicamadas distintos: AlTiN+TiSiN+TiN, AlTiN+TiSiN+ZrN e AlCrN+ZrN, com espessuras totais compreendidas entre 1,5 e 2,5 m. As condições de deposição das multicamadas do revestimento estão detalhadas na Tabela 1.

Previamente à caracterização dos revestimentos, as amostras foram submetidas a limpeza por ultrassons em banho de etanol. A macroanálise da rugosidade superficial das diferentes amostras foi realizada com recurso a um microscópio digital (DM) Leica, modelo LEICA DVM6 acoplado com o software LasLeica e Mountains 8. Adicionalmente, a microscopia eletrónica de varrimento (SEM), recorrendo aos equipamentos FEI Quanta 400 FEG ESEM e ThermoFisher Phenom XL G2 Desktop SEM, foi utilizada para estudar a topografia e morfologia superficial das amostras, que foram fraturadas para permitir a análise da sua secção transversal. A estrutura interna dos revestimentos foi examinada por SEM, enquanto a sua composição química foi avaliada recorrendo a espectroscopia de energia dispersiva (EDS), utilizando o detetor EDAX Genesis X4M.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A superfície dos substratos cerâmicos antes e após revestimento foi analisada com recurso a mapas topográficos obtidos por microscopia digital (Figura 1), no estado polido e retificado.

Através destes mapas, observa-se que o substrato polido apresenta uma superfície mais regular e homogénea, enquanto o substrato retificado apresenta uma topografia marcada por riscos alinhados, resultantes do estado superficial inicial. Na mesma Figura 1, estão também incluídas imagens SEM dos substratos revestidos com o sistema AlTiN+TiSiN+TiN, nas condições polida e retificada (Figura 1c) e d)). Nestas imagens, são visíveis defeitos típicos do processo de deposição por HiPIMS, como droplets ou lumps, identificados a preto, e vazios ou poros, marcados a vermelho, onde se observa a ausência das camadas exteriores dos revestimentos ou a exposição completa do substrato, o que pode comprometer significativamente o desempenho da ferramenta em corte. Para além disto, é possível observar a presença de riscos alinhados no revestimento depositado sobre o substrato retificado, identificados a branco, evidenciando que o revestimento reflete a topografia inicial do substrato. Observou-se, ainda, que os defeitos mencionados são comuns aos três sistemas de revestimentos.

Na Figura 2, estão representadas imagens SEM de alta ampliação da morfologia superficial dos três sistemas de revestimentos, cujos valores de rugosidade superficial se encontram na Figura 3.

A análise das imagens da Figura 2 revela que, em ampliações elevadas, as diferenças entre as superfícies polidas e retificadas não são particularmente significativas, indicando que o estado inicial da superfície não apresenta uma influência direta sobre a estrutura fina das amostras. No entanto, observam-se diferenças significativas na morfologia superficial dos diferentes sistemas de multicamadas, nomeadamente no que diz respeito ao tamanho de cristalite do revestimento. Neste contexto, o

**TABELA 1**
*Parâmetros de deposição das multicamadas por HiPIMS.*

| Camadas | Pressão Total (Pa) | Pressão $N_2$ (Pa) | HiPIMS/DC | | Voltagem (V) | Tempo (min) | Potência (KW) | Alvos |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Frequency (Hz) | Pulswidth (m) | | | | |
| AlTiN | 0,470 | 0,600 | 400 | 70 | - | 25 | 12,0 | TiAL-60 |
| TiSiN | 0,470 | 0,600 | 400 | 70 | - | 122 | - | TiSi34 |
| TiN | 0,629 | 0,670 | - | - | 105 | 44,3 | 8,0 | Ti |
| AlCrN | 0,350 | 0,590 | - | - | 100 | 164 | 1,0 | AlCr60/40 (at.%) |
| ZrN | 0,629 | 0,685 | - | - | 105 | 53 | 4,0 | 99,8% P |

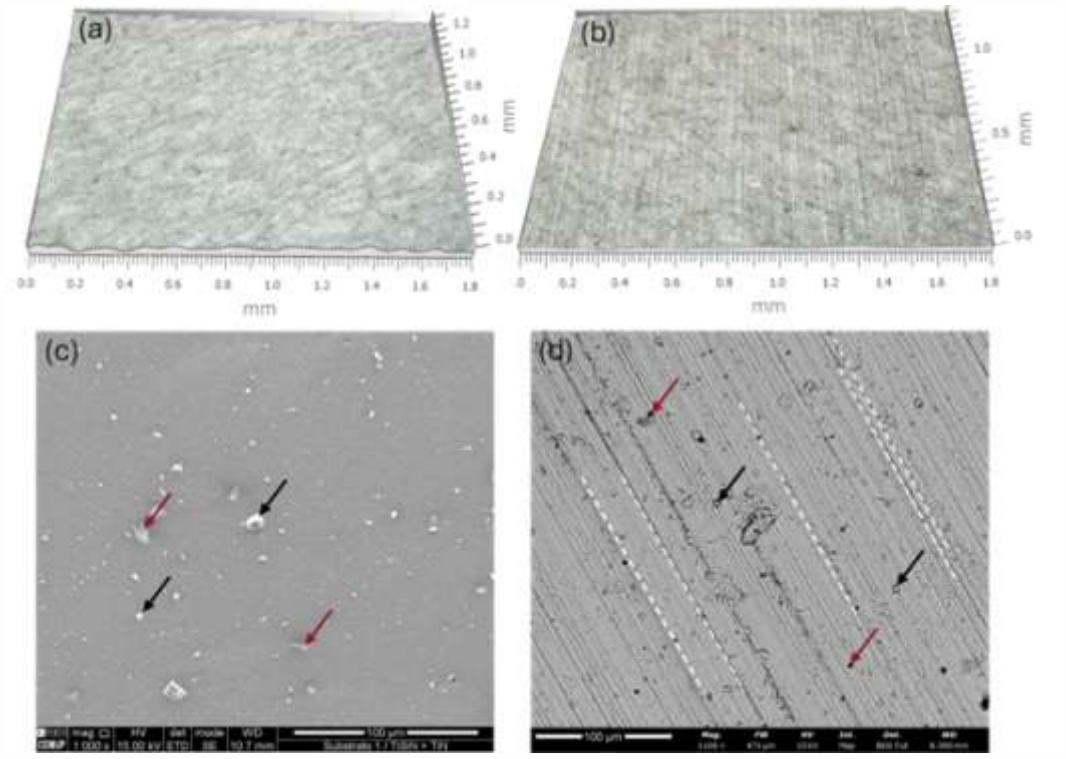



**FIGURA 1**
*Mapa topográfico da superfície do substrato sem revestimento (a) polido e (b) retificado; imagens SEM da topografia do revestimento AlTiN+TiSiN+TiN depositado num substrato (c) polido e (d) retificado.*

revestimento cuja camada exterior é TiN apresenta cristalites mais finas, rondando, em média, 0,212 ± 0,19 mm, enquanto os revestimentos terminados em ZrN exibem cristalites significativamente mais grosseiras, de, aproximadamente, 0,372 ± 0,081 mm. Estas diferenças podem ser atribuídas à composição química dos revestimentos, que pode favorecer a formação de estruturas com tamanhos de cristalite superiores, ou às condições específicas de deposição por HiPIMS, sugerindo que pode ser necessário adaptar os parâmetros de deposição. Este estudo é de extrema importância, uma vez que o tamanho de cristalite pode afetar significativamente o desempenho das ferramentas durante o corte, uma vez que tamanhos de cristalite

**FIGURA 2**
*Imagens SEM da morfologia superficial dos diferentes sistemas multicamadas.*

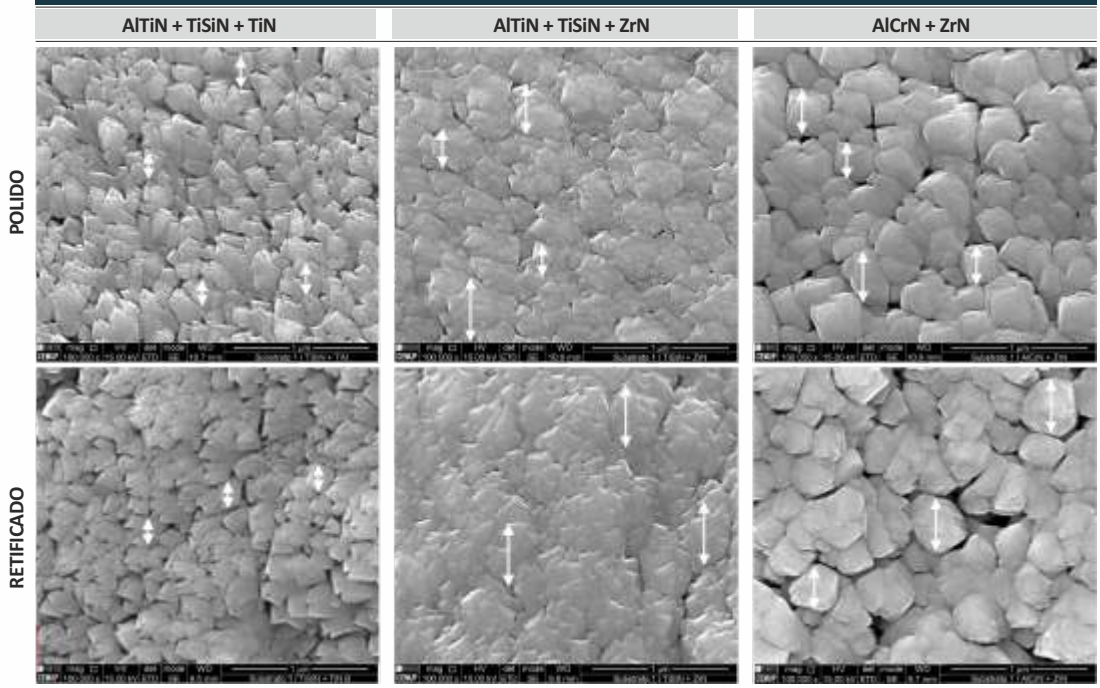
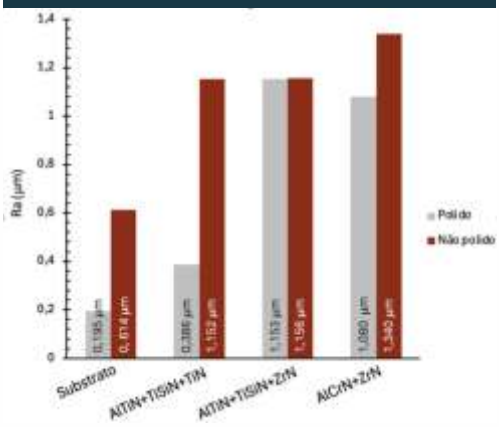


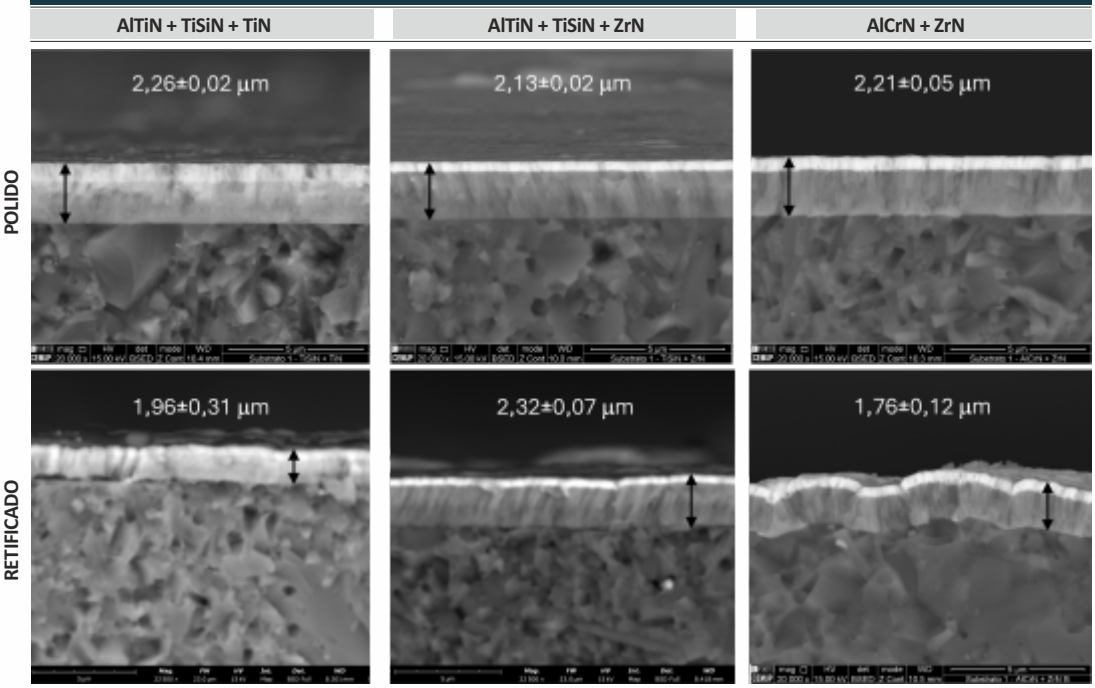
**FIGURA 3**
*Rugosidade superficial das amostras no estado polido e retificado, obtido por microscopia digital.*




superiores estão associados a valores de dureza inferiores. Através da análise da rugosidade, percebe-se que as amostras dos substratos sem revestimento apresentam valores de rugosidade inferiores, uma vez que as amostras revestidas apresentam rugosidade acumulada das camadas depositadas. Para além disto, observa-se que, de uma forma geral, os substratos polidos apresentam menores valores de rugosidade superficial quando comparados com os substratos retificados. Conclui-se, no entanto, que a rugosidade superficial dos revestimentos não é influenciada apenas pelo tratamento prévio dos substratos, mas também pela sua composição química. Os revestimentos cuja camada exterior é composta por ZrN apresentam valores de rugosidade superficial superiores em comparação com aquele com camada externa de TiN. Este aumento na rugosidade pode ser atribuído à topografia dos revestimentos de ZrN, caracterizada pela presença de cristalites mais grosseiras, conforme relatado na literatura [9].

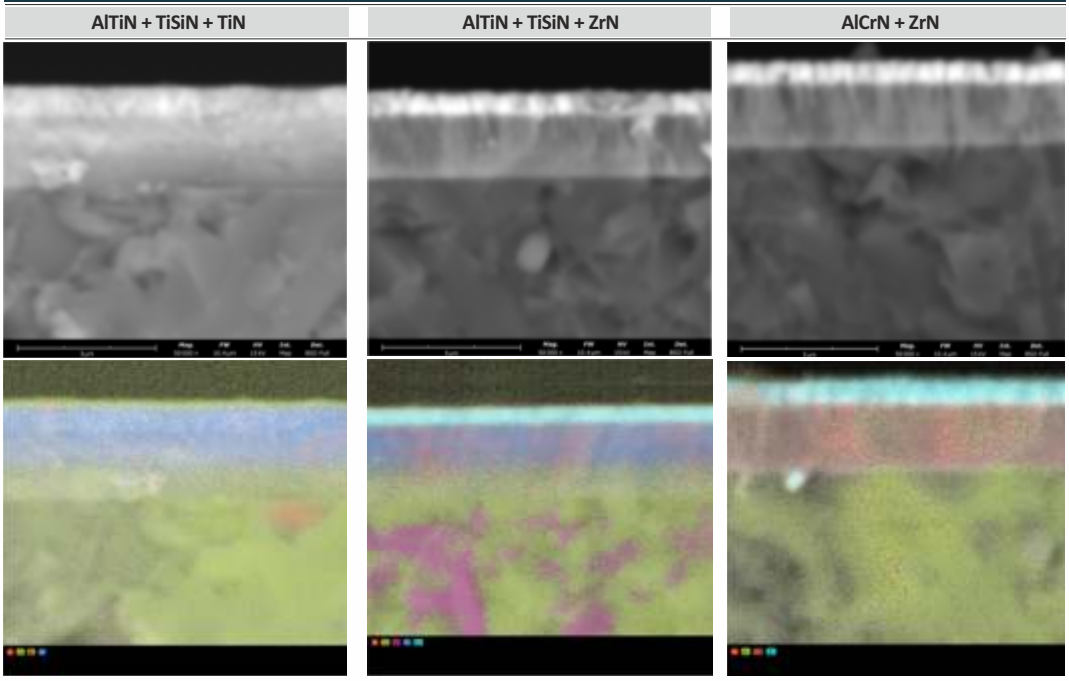
As imagens SEM das secções transversais dos revestimentos depositados em substratos polidos e retificados, apresentadas na Figura 4, revelam diferenças significativas na uniformidade dos revestimentos em função do estado da superfície. Embora a continuidade entre as camadas não aparente ser diretamente influenciada pelo tratamento superficial, a uniformidade do revestimento é claramente afetada. Nos substratos retificados, observa-se um desvio padrão consideravelmente mais elevado na espessura das camadas, resultante de uma deposição menos uniforme (Figura 4). Isto deve-se à topografia irregular dos substratos retificados, que induz heterogeneidades na distribuição das camadas do revestimento, e, com isso, variações significativas na espessura do revestimento, que acompanha a topografia do substrato. Por outro lado, nos substratos polidos, o revestimento apresenta uma distribuição muito mais homogénea e regular, uma vez que a superfície polida e uniforme facilita a deposição consistente das diferentes de camadas, que mantém a consistência nos valores da espessura (Figura 4). Adicionalmente, estas camadas são claramente distinguíveis devido aos diferentes contrastes da composição, com a exceção das camadas de AlTiN e TiSiN, nos sistemas AlTiN+TiSiN+TiN e AlTiN+TiSiN+ZrN. que

**FIGURA 4**
*Imagens SEM da secção transversal dos diferentes sistemas de revestimento no estado polido e retificado.*




*Fonte: Elaboração própria*

**FIGURA 5**
*Imagens SEM e mapas de distribuição elementar EDS das secções transversais dos três sistemas de revestimento.*




*Fonte: Elaboração própria*

apresentam contrastes semelhantes, dificultando a sua distinção. A continuidade entre as diferentes camadas e a sua uniformidade pode ter um impacto direto no desempenho final das ferramentas de corte, nomeadamente no que diz respeito à sua resistência ao desgaste e durabilidade.

Na Figura 5, são apresentados os mapas de distribuição elementar por EDS e imagens SEM das secções transversais dos três sistemas de revestimentos, onde se distinguem camadas com diferentes composições químicas de elementos, i.e. Ti, Al, Si, Zr, Cr, N. Relativamente ao sistema AlTiN+TiSiN+TiN, distinguem-se três camadas bem definidas. Nesta amostra (Figura 5), observa-se uma distribuição uniforme de Ti, a azul, e de N, a vermelho, ao longo do revestimento. Perto do substrato, denota-se uma primeira camada rica em Al, a amarelo, correspondente à camada AlTiN, seguida de uma camada onde se deteta a presença de Si, a laranja, constituindo a camada TiSiN. A camada exterior apresenta uma composição predominantemente de Ti e N, correspondendo à camada exterior de TiN.

Em relação ao revestimento AlTiN+TiSiN+ZrN, também se observa a presença de três camadas distintas. Em semelhança ao sistema anterior, denota-se que a camada adjacente ao substrato é constituída por AlTiN e uma camada posterior correspondente a TiSiN. No entanto, a camada exterior deteta a presença de Zr, a azul-claro, que, juntamente com N, constitui a camada de ZrN.

Por fim, o revestimento AlCrN+ZrN, exibe duas camadas bem definidas, ao longo das quais se observa uma distribuição uniforme de N. A primeira camada é rica em N, Al, a amarelo, e Cr, a castanho, correspondendo à camada AlCrN. A camada exterior é rica em Zr, a azul-claro, e N, constituindo a camada de ZrN.

## CONCLUSÃO

Através deste estudo, foi possível analisar o impacto da rugosidade dos substratos na deposição de revestimentos multicamadas por HiPIMS. Com base nos resultados, concluiu-se que:

1. O estado superficial dos substratos (polido e retificado) tem um impacto direto na topografia e rugosidade dos revestimentos depositados, sendo superior para os substratos retificados;

2. A morfologia granular dos revestimentos é influenciada pela composição química dos revestimentos: a camada de TiN promove a presença de cristalites mais finas (0,212 ± 0,19 m), enquanto a camada de ZrN resulta em cristalites mais grosseiras (0,372 ± 0,081 m);

3. Os revestimentos depositados em substratos polidos apresentam maior uniformidade e espessuras mais consistentes;

4. Os sistemas multicamadas exibem boa continuidade entre camadas, sem descontinuidades visíveis na interface, independentemente do estado da superfície do substrato;

**5.** O estado da superfície, a rugosidade do substrato e a composição dos revestimentos influenciam as suas propriedades topográficas e estruturais, o que pode afetar diretamente o desempenho e durabilidade da ferramenta de corte durante o processo de maquinagem.

**AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o financiamento do Projeto Hi-rEV-Recuperacão do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002), cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa, através do programa NextGeneration EU.

**REFERÊNCIAS**

**[1]** G.V. Research, High Performance Alloys Market Size, Share & Trend Analysis Report by Product (Nonferrous, Platinum group, Refractory, Super alloys), By Material, By Application, And Segment Forecasts, 2018 - 2024, in, 2018, pp. 80.

**[2]** M. Kuttolamadom, J. Jones, L. Mears, T. Kurfess, A. Choragudi, Investigation of the Machining of Titanium Components for Lightweight Vehicles, in, SAE International, 2010.

**[3]** Vitor F.C. Sousa, Francisco J.G. Silva. Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools-A Comprehensive Review. Metals 2020, 10(2), 170; Doi: 10.3390/met10020170

**[4]** M. Kathrein, C. Michotte, M. Penoy, P. Polcik, C. Mitterer. Multifunctional multi-component PVD coatings for cutting tools. Surface and Coatings Technology Volume 200, Issues 5-6, 21 November 2005, Pages 1867-1871. Doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.105

**[5]** Paul H. Mayrhofer, Christian Mitterer, Lars Hultman, Helmut Clemens. Microstructural design of hard coatings. Progress in Materials Science Volume 51, Issue 8, November 2006, Pages 1032-1114. Doi: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.002

**[6]** Vitor F.C. Sousa, Francisco J.G. Silva. Recent Advances on Coated Milling Tool Technology-A Comprehensive Review. Coatings 2020, 10, 235 Doi:10.3390/coatings10030235

**[7]** Nina Schalk, Michael Tkadletz, Christian Mitterer. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. Surface and Coatings Technology, Volume 429, 15 January 2022, 127949. Doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127949

**[8]** A. Singh, S. Ghosh, and S. Aravindan, "Flank wear and rake wear studies for arc enhanced HiPIMS coated AlTiN tools during high speed machining of nickel-based superalloy," Surf Coat Technol, vol. 381, p. 125190, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.125190.

**[9]** Y. Purandare, A. Ehiasarian, A. Santana, and P. Hovsepian, "ZrN coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering and cathodic arc techniques," Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, vol. 32, no. 3, May 2014, doi: 10.1116/1.4869975.

# FERRAMENTAS CERÂMICAS DE SiAlON PARA FRESAGEM DE INCONEL 718

**Beatriz G. Rodrigues[1], Sónia Simões[1,2], Ana Reis[1,2], Tiago Silva[2], Bruno Guimarães[3], Tomás Aires[3], Daniel Figueiredo[3]**

**1** Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
**2** LAETA/INEGI-Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
**3** Palbit S.A., P.O. Box 4, 3854-908 Branca, Albergaria-a-Velha, Portugal

***Com o desenvolvimento atual na indústria aeroespacial o uso de materiais mais resistentes e leves, tais como o Inconel 718, tem vindo a ser alvo de estudo e consequente desenvolvimento. Assim sendo, novas ferramentas para a maquinagem destes materiais têm vindo a ser desenvolvidas, de forma a aumentar a produtividade e eficiência nestas operações. Assim, efetuaram-se testes de fresagem em diversas ferramentas de corte cerâmicas de SiAlON, devido à capacidade de serem utlizadas a velocidade de corte muito elevadas durante a maquinagem deste tipo de materiais, com duas geometrias distintas, com e sem revestimento e com parâmetros de corte diferentes, de forma a perceber a influência de todos estes fatores no desgaste e tempo de vida útil destas ferramentas. Por fim, foi possível concluir que as velocidades de corte que permitem maximizar a taxa de remoção de material assim como o tempo de vida da ferramenta são 900 m/min para a geometria RNGN 120700, enquanto para a geometria RPGN 090300 é 800 m/min. o caso da primeira geometria o uso de revestimento não parece influenciar o desempenho da ferramenta, enquanto na segunda geometria este tende a ter um efeito benéfico aumentando o seu tempo de vida. Relativamente aos mecanismos de desgaste, para além do desgaste de flanco, salientam-se a abrasão e adesão para ambas as geometrias.***

*With current developments in the aerospace industry, stronger and lighter materials, such as Inconel 718, have been the subject of study and consequent development. Therefore, new tools for machining these materials have been developed in order to increase productivity and efficiency in these operations. Therefore, milling tests were carried out on several SiAlON ceramic cutting tools, due to their ability to be used at very high cutting speeds when machining this type of material, with two different geometries, with and without coating and with different cutting parameters, in order to understand the influence of all these factors on the wear and service life of these tools. Finally, it was possible to conclude that the cutting speeds that maximise the material removal rate and tool life are 900 m/min for the RNGN 120700 geometry, while for the RPGN 090300 geometry, it is 800 m/min. In the case of the first geometry, the use of coating does not seem to influence tool performance, while in the second geometry it tends to have a beneficial effect by increasing tool life. Regarding wear mechanisms, in addition to flank wear, abrasion and adhesion stand out for both geometries.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
FRESAGEM; INCONEL 718; MAQUINAGEM; SiAlON.
*Machining; Milling; Inconel 718; SiAlON.*

## INTRODUÇÃO

Considerando o paradigma atual, em termos de mobilidade é essencial acompanhar esta tendência com a inovação. Assim sendo, e considerando não só a mobilidade terrestre, mas também a aérea, mais especificamente na área aerospacial, novas soluções têm vindo a surgir de forma a responder aos desafios propostos em termos de sustentabilidade, assim como eficiência e desempenho.

Esta evolução levou ao desenvolvimento e utilização de diferentes materiais nestas áreas, de forma a ir ao encontro às propriedades necessárias tais como baixa densidade, por exemplo, através do uso de fibras de carbono, mas também materiais com propriedades mecânicas excelentes que consigam aguentar condições extremas tais como meios altamente corrosivos ou temperaturas elevadas [1, 2].

Exposto isto, materiais como as superligas de níquel, principalmente o Inconel 718, tem vindo a ser alvo de estudo devido à sua elevada resistência a altas temperaturas, o que é procurado neste tipo de aplicações [1, 2, 3]. Um exemplo da sua aplicação é no motor Trent 800, em que diversos componentes tanto na turbina como no combustor são em ligas de níquel [4]. Para além da investigação em novos materiais, processos tecnológicos também têm vindo a ser aperfeiçoados de forma a superar as adversidades que advém do processamento destes materiais.

Um dos exemplos é sem dúvida a maquinagem destas superligas, uma vez que devido ao seu custo elevado e características, novas condições devem ser utilizadas tais como, a fresagem a alta velocidade [5]. Assim, as ferramentas utilizadas na maquinagem destes materiais difíceis de maquinar devem ser capazes de aguentar as exigentes condições de maquinagem, assim como permitir uma elevada taxa de remoção de material, contribuindo para um aumento da produtividade do processo [4, 5, 6].

Face a estes desafios surge o uso de ferramentas cerâmicas, mais especificamente de SiAlON, que tem sido alvo de estudo devido à sua alta resistência à temperatura, elevada dureza e boa resistência ao desgaste [7, 8].

O estudo realizado por Yin et al. [9] demonstrou que face ao uso de ferramentas convencionais de metal duro, o uso de SiAlON permitiu alcançar uma taxa de remoção de material 5 vezes superior, o que está diretamente relacionado com o uso de velocidades de corte elevadas, tal como 1000 m/min, sendo estes resultados também observados por Sun et al. [10] e Zhao [11]. Relativamente a ferramentas deste tipo, muitos estudos já conseguiram comprovar que o uso de revestimento num modo geral tem efetivamente uma influência positiva, podendo aumentar o tempo de vida e reduzir as forças de corte durante as operações de maquinagem [12, 13, 14] .

É então nestes pilares que este estudo assenta, na avaliação do comportamento do uso de pastilhas em SiAlON com ou sem revestimento para operações de fresagem de Inconel 718. Além disso, procura-se ainda encontrar a gama de valores adequada para cada geometria em termos de parâmetros de corte, visando aumentar o tempo de vida da ferramenta assim como o seu desempenho.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizadas ferramentas de corte cerâmicas em SiAlON com uma composição de 61% de fase b, 31% de fase a e 8% de Y2Al5O12. Um bom compromisso entre a fase a e b permite que se atinja as propriedades desejadas em termos de tenacidade à fratura e dureza, permitindo assim um bom desempenho em operações de fresagem. Estas ferramentas tem uma densidade de 3,3 g/cm³, uma dureza de 1800 HV30 e registam ainda uma tenacidade à fratura de 7,0 MPa/m².

Ainda relativamente às pastilhas utilizadas, algumas foram sujeitas a um revestimento de forma a estudar a sua influência e perceber se este aumentaria o seu tempo de vida. O revestimento utilizado foi TiAlN/TiSiN/TiN com uma espessura que varia entre 1,5 e 2,5 µm tendo sido aplicado por PVD-HiPIMS (High-Power Impulse Magnetron Sputtering).

Quanto ao Inconel 718, a sua composição química é apresentada na Tabela 1, podendo ainda ser referido que este possuía uma dureza de 20 HRC e não apresentava tratamento térmico.

Para este estudo foram realizados ensaios num centro computorizado de maquinagem MAZAK Integrex i-200ST (Figura 1) com uma potência de spindle de 22kW e um spindle máximo de maquinagem de 12000 RPM.



**FIGURA 1**
*Configuração do ensaio realizado.*

Relativamente às ferramentas utilizadas foram testadas duas geometrias diferentes, RNGN 120700 e RPGN 090300. Quanto à geometria

**TABELA 1**
*Composição química Inconel 718*

| Elemento | Ni | Fe | Cr | Nb | Mo | Ti | Al | W | Si | Co |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| %wt | 53,20 | 18,58 | 18,39 | 4,67 | 3,00 | 1,03 | 0,52 | 0,10 | 0,09 | 0,20 |



**FIGURA 2**
*Ferramentas utilizadas nos ensaios, mais especificamente a) RNGN 120700 e em b) RPGN 090300.*

RNGN 120700 foram utilizadas 4 pastilhas inseridas numa fresa com um diâmetro de 50 mm (Figura 2 a). Por outro lado, para a geometria RPGN 090300 foram utilizadas 3 pastilhas numa fresa com um diâmetro de 25 mm, representada pela Figura 2 b).

Relativamente às análises realizadas foram utilizados diferentes métodos, tais como a medição do desgaste no flanco com recurso ao software ImageJ e a imagens retiradas com o microscópio digital ASH INSPEX 4K. Para a análise do desgaste foi também utilizado SEM e EDS para ter informação quantitativa e qualitativa relativamente aos elementos encontrados na amostra, utilizando o equipamento Thermo Scientific Phenom XL.

Para este estudo foram utilizadas diferentes condições de ensaio, variando entre pastilhas revestidas e não revestidas, assim como a velocidade de corte para o caso das pastilhas revestidas, de modo a avaliar a sua influência, como podem ser observadas na Tabela 2.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### GEOMETRIA RNGN 120700

Os resultados obtidos para a geometria RNGN 120700, ou seja, da amostra A1000, A900 e B1000 (Tabela 2), indicam que a pastilha sem revestimento nesta situação teve um melhor desempenho, apresentando um menor desgaste face às pastilhas revestidas para o mesmo volume de material removido tal como apresentado na Figura 3. Conclui-se então que a pastilha sem revestimento acabará por conse-guir remover um maior volume de material antes do final do seu tempo de vida.

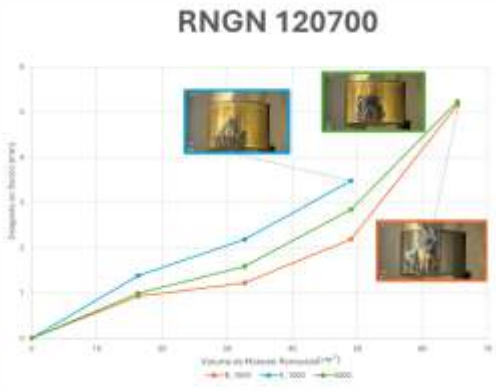



**FIGURA 3**
*Desgaste no flanco VS Volume de Material Removido para geometria RNGN 120700.*

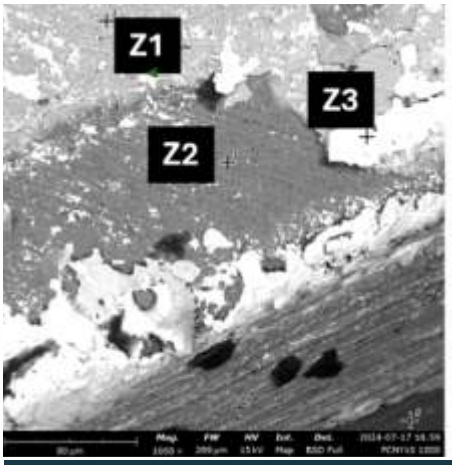
Quanto ao tempo de vida das pastilhas, a amostra A900 regista um tempo de vida superior, aproximadamente 4 minutos. No entanto, quando analisada a influência do revestimento, neste caso as pastilhas sem revestimento acabam por ter um desempenho superior, assim como um tempo de vida também ele superior, em aproximadamente 1 minuto, o que representa um aumento de 40% no tempo de vida da ferramenta. Relativamente à taxa de remoção de material esta foi superior nas amostras A1000 e B1000, registando 17,41 $cm^3$/min face aos 16,56 $cm^3$/min registados para a A900.

Pela análise destas amostras é ainda possível comprovar a adesão de Inconel 718 à superfície da pastilha, levando até à criação de uma aresta postiça de corte que pode levar à falha da ferramenta. Esta adesão, foi também comprovada pela análise SEM e EDS, em que se registou a presença do elemento Ni (da composição da liga de Inconel 718) em diversas partes da amostra como demonstrada pela Figura 4 referente à amostra A1000.

**TABELA 2**
*Configuração de resultados realizados.*

| Designação | Geometria | Revestimento | Parâmetros de corte | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $V_c$ (m/min) | $a_p$ (mm) | $a_e$ (mm) | $f_z$ (mm/rev) | Z |
| A1000 | RNGN 120700 | Sim | 1000 | 1 | 25 | 0,1 | 4 |
| B1000 | RNGN 120700 | Não | 1000 | 1 | 25 | 0,1 | 4 |
| A900 | RNGN 120700 | Sim | 900 | 1 | 25 | 0,1 | 4 |
| C800 | RPGN 090300 | Sim | 800 | 0,5 | 12,5 | 0,1 | 3 |
| D800 | RPGN 090300 | Não | 800 | 0,1 | 12,5 | 0,1 | 3 |
| C700 | RPGN 090300 | Sim | 700 | 0,5 | 12,5 | 0,1 | 3 |

a)




b)

| Element Number | Element Symbol | Weight Conc. (%) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Z1 | Z2 | Z3 |
| 14 | Si | 1,6 | 46,3 | 2,4 |
| 7 | N | - | 25,8 | - |
| 13 | Al | - | 9,8 | 1,1 |
| 8 | O | 11,3 | 9,1 | |
| 22 | Ti | 83,0 | 4,9 | 71,8 |
| 28 | Ni | 3,3 | 3,4 | 12,6 |
| 6 | C | - | 0,7 | 0,6 |
| 24 | Cr | - | - | 5,3 |
| 26 | Fe | - | - | 4,4 |
| 41 | Nb | - | - | 1,8 |

**FIGURA 4**
*Análise amostra A 1000 representando em a) a imagem SEM e em b) Análise EDS.*

**GEOMETRIA RPGN 090300**

Relativamente aos resultados obtidos para os ensaios realizados nas amostras C800, C700 e D800 referentes à geometria RPGN 090300, verificou-se que a amostra C800 apresentou um volume de material removido superior às outras amostras e que a diminuição da velocidade de corte, pastilha C700, leva a uma diminuição considerável do tempo de vida, e consequentemente do volume de material removido.

Especificando os mecanismos de desgaste nas pastilhas, estes foram semelhantes aos encontrados para a geometria anterior, destacando-se adesão e abrasão.

Relativamente à análise de desempenho das diferentes amostras, representado pela avaliação do desgaste de flanco e volume de material removido, conforme observado na Figura 5, é possível salientar que efetivamente a amostra C700 teve um desgaste de flanco mais acelerado, considerando o baixo volume de material removido, o que leva a concluir que uma velocidade de corte de 700 m/min não é adequado para esta geometria, devendo velocidades de corte superiores ser utilizadas. Relativamente à comparação entre ferramentas revestidas e não revestidas, sem dúvida que neste caso a amostra C800 se destacou, levando a concluir que para esta geometria e condições de corte o revestimento altera a superfície da pastilha através do aumento da dureza e da resistência ao desgaste, permitindo assim um melhor desempenho.

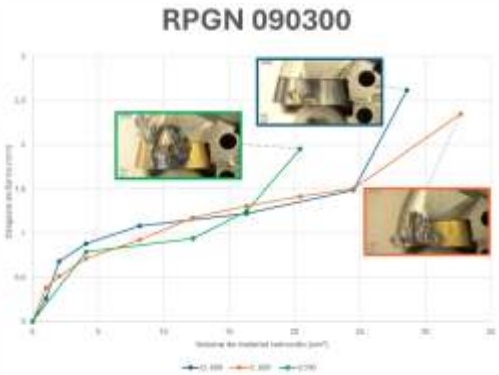



**FIGURA 5**
*Desgaste no flanco VS Volume de Material Removido da geometria RPGN 090300.*

Por fim, quanto ao tempo de vida destas ferramentas em estudo concluiu-se que a amostra C800 é aquela que se destaca, registando um tempo de vida de 3 minutos e 40 segundos com uma taxa de remoção de material de 8,75 $cm^3$/min, enquanto a amostra C700, regista o menor tempo de vida, de 2 minutos e 40 segundos com uma taxa de remoção de material também menor (7,66 $cm^3$/min).

## CONCLUSÃO

As pastilhas cerâmicas de SiAlON surgem como uma solução que cumpre os requisitos iniciais para este tipo de aplicação, sendo esse o foco deste estudo, podendo-se retirar as seguintes conclusões:

- Para a geometria RNGN 120700, mais especificamente para as pastilhas revestidas, os parâmetros de corte que maximizam o seu tempo de vida e taxa de remoção de material encontram-se na faixa de vc=900 m/min, ap=1 mm, ae=25 mm e fz=0.1 mm/rev;
- Por outro lado, para a geometria RPGN 090300 os parâmetros encontram-se na faixa de vc= 800 m/min, ap=0.5 mm, ae=12.5 mm e fz=0.1 mm/rev, mencionando ainda que uma velocidade de corte mais baixa tem um efeito negativo;
- Para a geometria RNGN 120700 o uso de revestimento parece não trazer vantagens para a maquinagem, pelo que a amostra sem revestimento teve um melhor desempenho, por outro lado para a geometria RPGN 090300 a

amostra com revestimento registou um melhor desempenho;

- Os mecanismos de desgaste registados foram semelhantes para ambas as geometrias, salientando-se o desgaste acelerado no flanco, a adesão e abrasão;
- Por fim, estas ferramentas de corte cerâmicas permitem a sua utilização a velocidades de corte muito elevadas, possibilitando assim a maquinagem destas superligas difíceis de maquinar com uma elevada produtividade.


## AGRADECIMENTOS

O autor agradece o financiamento do Projeto HirEV-Recuperacão do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002), cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa, através do programa NextGeneration EU.


## REFERÊNCIAS


**[1]** A. P. Mouritz, Ed., "12 - Superalloys for gas turbine engines," *in Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing, 2012, pp. 251-267. doi: https://doi.org/10.1533/ 9780857095152.251.

**[2]** A. P. Mouritz, Ed., "2 - Aerospace materials: past, present and future," *in Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing, 2012, pp. 15-38. doi: https://doi.org/10.1533/9780857095152.15.

**[3]** J. H. Weber and M. K. Banerjee, "Nickel-Based Superalloys: Alloying," i*n Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2016. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02573-X.

**[4]** R. C. Reed, *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.

**[5]** F. Molaiekiya, P. Stolf, J. M. Paiva, and others, "Influence of process parameters on the cutting performance of SiAlON ceramic tools during high-speed dry face milling of hardened Inconel 718," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 1083-1098, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04210-2.

**[6]** F. Guo, Z. Yin, D. Hong, and others, "Cutting performance of a new spark plasma sintered SiAlON ceramic tool for high-speed milling of Inconel 718," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 119, pp. 7327-7338, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08702-6.

**[7]** F. Molaiekiya, A. Aliakbari Khoei, M. Aramesh, and others, "Machined surface integrity of inconel 718 in high-speed dry milling using SiAlON ceramic tools," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, pp. 1941-1950, 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06471-8.

**[8]** Z. B. YU and D. P. THOMPSON, "18 - Sialons," *in Ceramic-Matrix Composites*, I. M. Low, Ed., Woodhead Publishing, 2006, pp. 491-513. doi: https://doi.org/10.1533/9781845691066.5.491.

**[9]** Z. Yin, X. Hao, H. Peng, and others, "A new ?-SiAlON ceramic tool prepared by microwave sintering and its cutting performance in high-speed dry machining Inconel718," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 118, pp. 3105-3117, 2022, doi: 10.1007/s00170-021-08170-4.

**[10]** J. Sun, S. Huang, H. Ding, and W. Chen, "Cutting performance and wear mechanism of Sialon ceramic tools in high speed face milling Gh4099," *Ceram Int*, vol. 46, no. 2, pp. 1621-1630, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.134.

**[11]** J. Zhao, "22 - The use of ceramic matrix composites for metal cutting applications," *in Advances in Ceramic Matrix Composites*, I. M. Low, Ed., Woodhead Publishing, 2014, pp. 537-569. doi: https://doi.org/10.1533/ 9780857098825.3.537.

**[12]** Y. L. Su, T. H. Liu, C. T. Su, J. P. Yur, W. H. Kao, and S. H. Yao, "Tribological characteristics and cutting performance of Crx%C-coated carbide tools," *J Mater Process Technol*, vol. 153-154, pp. 699-706, 2004, doi: https://doi.org/10.1016/ j.jmatprotec.2004.04.093.

**[13]** S. K. Mishra, D. Talwar, K. Singh, A. Chopra, S. Ghosh, and S. Aravindan, "Micromechanical characterization and dynamic wear study of DC-Arc coated cemented carbide cutting tools for dry titanium turning," *Ceram Int*, vol. 47, no. 22, pp. 31798-31810, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.061.

**[14]** R. Raghav and R. S. Mulik, "Comparative analysis over microstructural, mechanical properties and cutting performance of TiN, TiVN coatings deposited by magnetron sputtering on SiAlON ceramic tool insert," *Surf Coat Technol*, vol. 480, p. 130570, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130570.

# PECOL
Automotive



**95**
Máquinas de Estampagem a Frio

**M33**
Diâmetro Máximo

**4**
Localizações Mundiais

**100%**
**PROCESS IN-HOUSE**

Comprimento até **325** mm

R&D
**250**
Novos Projetos Por Ano

**135**
Milhões de Peças Produzidas Por Mês

## GLOBAL FASTENERS SOLUTIONS


Raso de Paredes
3754 – 901, Águeda - **Portugal**
Tel.: +351 234 612 970
Email: info@pecolautomotive.com
www.pecolautomotive.com | Follow us


TÜVRheinland CERTIFIED
Management System ISO 14001:2015
www.tuv.com ID 9108650215

IATF 16949
BUREAUVERITAS Certification
BUREAU VERITAS 1828

# INFLUÊNCIA DO MODO DE FRESAGEM NAS FORÇAS DE CORTE E DESGASTE GERADO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE SiAlON NA MAQUINAGEM DE INCONEL 718

**Filipa Moreira[1], Vitor F. C Sousa[2], Tiago E. F. Silva[2], Abílio M. P. de Jesus[1,2], Francisco J. G. Silva[2,3]**

**1** FEUP, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal;
**2** Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal;
**3** Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto, Rua Dr. António Bernardino de Almeida, Porto, 4249-015, Portugal

***A maquinagem de Inconel 718 requer a utilização de parâmetros de corte bastante conservadores, bem como o uso de refrigeração abundante, tornando o processo pouco sustentável e produtivo. Isto deve-se ao facto de as ferramentas de corte sofrerem um desgaste considerável mesmo após maquinarem poucos minutos. Para mitigar estes problemas de desgaste e sustentabilidade, podem ser utilizadas ferramentas cerâmicas, como SiAlON, para maquinar este material, uma vez que estas permitem o uso de parâmetros de maquinagem mais produtivos, sem necessidade de utilizar refrigeração. Assim, a correta utilização e a otimização dos processos de maquinagem com este tipo de ferramentas são cruciais para a melhoria geral do processo. No presente trabalho, foi avaliado o comportamento ao desgaste de fresas integrais de SiAlON em dois modos diferentes de fresagem: fresagem discordante e fresagem concordante. As forças de corte geradas durante o processo foram registadas e comparadas para ambos os modos de fresagem, assim como o desgaste sofrido pelas ferramentas. Relativamente à avaliação do desgaste das ferramentas, foram realizadas medições do desgaste no flanco das ferramentas, de forma a caracterizar a progressão do desgaste ao longo do tempo para os dois modos de fresagem. Além disso, os mecanismos de desgaste apresentados pelas ferramentas foram avaliados e caracterizados, visto que estes fornecem informações úteis sobre o comportamento de corte das ferramentas. Verificou-se que, ao utilizar fresas de SiAlON, a fresagem concordante é mais favorável, resultando em forças de corte mais baixas e menor desgaste.***

*The processing of Inconel 718 requires the use of conservative machining parameters as well as the use of flood cooling, making the process unsustainable and quite unproductive. This is due to cutting tools sustaining considerable amounts of wear over low machining distances. To mitigate these problems, ceramic tools, such as SiAlON can be used to machine this material, as these enable the use of more productive machining parameters as well as not requiring any cooling method, making the process more sustainable. As such, the correct use and optimization of the machining processes using these types of tools is crucial for overall process improvement. In the present work, the behavior of solid SiAlON end-mills is evaluated for two different milling modes, up and down-milling. The developed cutting forces were registered and compared for both modes, as well as the sustained tool wear. Regarding tool wear assessment, flank wear measurements were performed, to characterize wear progression over time for up and down milling. Furthermore, the sustained wear mechanisms were evaluated and characterized, as these provide useful information regarding the tools' cutting behavior. It was noted that, when using solid SiAlON tools, down-milling is more favorable, leading to lower cutting forces as well as lower sustained wear.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
FRESAGEM; INCONEL 718; FRESAGEM CONCORDANTE; FRESAGEM DISCORDANTE; FORÇAS DE CORTE; DESGASTE.
*Milling; Inconel 718; Down-milling; Up-milling; Cutting forces; Tool wear.*

## INTRODUÇÃO

Ligas à base de Ni, tal como o Inconel 718 são utilizadas em vários setores da indústria, tal como o aeronáutico, energético e automóvel [1], [2], devido às suas excelentes propriedades mecânicas, resistência à corrosão e capacidade de manter estas propriedades a altas temperaturas. De uma forma geral, os componentes de Inconel 718 são produzidos através do processo de maquinagem, no entanto, devido às suas propriedades, baixa capacidade térmica e tendência para sofrer encruamento, o Inconel 718 é bastante difícil de processar. As ferramentas de maquinagem, quando utilizadas na maquinagem desta liga, sofrem elevados níveis de desgaste após uma curta distância de maquinagem. O Inconel 718 tem tendência a aderir à superfície e aos gumes de corte das ferramentas, devido a altas temperaturas de corte (750º) [3] o que usualmente provoca desgaste adesivo nestas zonas, adicionalmente, esta liga é bastante dura (cerca de 45 HRC), o que causa abrasão das ferramentas, principalmente ferramentas de carboneto tungsténio (WC-Co).

De forma a mitigar os problemas associados com o processamento do Inconel 718, são realizados vários estudos que avaliam vários fatores, deste otimização de parâmetros de corte, à utilização de novas ferramentas (ou materiais de ferramentas) ou até utilização de novas estratégias de refrigeração. Relativamente aos diferentes tipos de ferramentas utilizados no processamento desta liga, geralmente as ferramentas de WC-Co revestidas são utilizadas, no entanto os problemas enunciados acima continuam presentes. Existem outras alternativas de material de ferramenta, tais como as ferramentas cerâmicas, que apresentam um elevado nível de dureza e conseguem ser utilizadas em condições de elevada produtividade. Adicionalmente, estas ferramentas são geralmente utilizadas em operações de maquinagem a seco, o que torna o processo mais sustentável. Apesar de existirem vários estudos acerca da influência dos parâmetros de maquinagem no desgaste das ferramentas e na qualidade da peça produzida para o caso das ferramentas de WC-Co revestido [4], este não é o caso para as ferramentas cerâmicas [5]. Existe ainda uma necessidade de caracterizar as operações de corte com este tipo de ferramentas, principalmente quanto à influência dos parâmetros de corte no processo, isto é, nas forças de corte geradas, temperatura de maquinagem, desgaste das ferramentas (e vida-útil da ferramenta), bem como a integridade superficial maquinada.

As ferramentas cerâmicas apresentam um grande potencial na maquinagem de ligas metálicas, principalmente de um ponto de vista de produtividade, visto que podem ser utilizadas a valores de velocidade de corte dez vezes superiores àqueles utilizados em operações de maquinagem com ferramentas WC-Co. Estas ferramentas também apresentam uma elevada resistência ao desgaste, Çelic et al. [6] utilizaram fresas de SiAlON em operações de maquinagem a seco de uma liga de Inconel 718, a uma velocidade de corte de 585 m/min durante 38 minutos. Estes valores são bastante elevados, principalmente quando comparados com ferramentas de carboneto de tungsténio revestidas, que, para operações de maquinagem desta liga, são utilizadas a velocidades de corte à volta dos 40 m/min [7]. Zheng *et al*. [8] realizaram ensaios de fresagem de Inconel 718 com ferramentas de SiAlON, testando vários valores de velocidade de corte. Os autores concluíram que, devido às altas temperaturas de corte (geradas pelo uso destes altos valores de velocidade), ocorre um amaciamento do material a ser maquinado, o que promove uma diminuição das forças de corte geradas durante o processo. As ferramentas apresentaram um valor mínimo de desgaste para os testes realizados a 900 m/min de velocidade de corte. Quanto aos mecanismos de desgaste que foram identificados, estes foram principalmente destacamento do substrato (*chipping*), adesão de material, propagação de fissuras e abrasão. Apesar destas altas temperaturas promoverem um amaciamento do material, isto nem sempre é benéfico, podendo levar a níveis mais altos de desgaste [9]. Um outro fator a mencionar é o modo de fresagem, este também tem uma influência no desgaste e qualidade de produção, no caso das ferramentas cerâmicas é preferível minimizar o impacto inicial da ferramenta na peça (entrada), deste modo, a fresagem discordante poderá ser mais indicada. No entanto, este nem sempre é o caso, com alguns estudos a reportar fenómenos de desgaste mais intensos em ensaios de fresagem concordante [10]. Todavia, isto poderá ser avaliado com mais detalhe, visto que existe alguma contradição neste aspeto, com estudos a reportarem menor vida-útil da ferramenta quando usada em modo discordante [11].

Neste estudo, é feita uma comparação de dois modos de fresagem, concordante e discordante, utilizando fresas integrais de SiAlON numa liga de Inconel 718, realizando ensaios de maquinagem lineares a seco. A influência dos diferentes modos de fresagem nas forças de corte geradas durante o processo bem como no desgaste sofrido pelas ferramentas foi avaliada. Relativamente ao desgaste, a evolução do desgaste de flanco das ferramentas ao longo da distância

**TABELA 1**
*Composição química (wt%) da liga de Inconel 718*

| | Ni | Cr | Fe | Nb | Mo | Ti | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| wt% | 53,83 | 17.94 | 17.67 | 5.33 | 2.90 | 1.00 | 0.52 |

maquinada foi averiguada, bem como a caracterização dos diferentes mecanismos de desgaste apresentados pelas ferramentas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A influência dos dois modos de fresagem foi testada através da realização de ensaios de maquinagem (fresagem de topo) em Inconel 718, usando ferramentas de SiAlON. A liga metálica apresentava uma dureza aproximadamente igual a 44 HRC, a composição química da liga está apresentada na Tabela 1. A composição foi medida através de espetroscopia por emissão de faísca, mostrando-se dentro dos limites impostos pela norma *ASTM B637.*

Relativamente às ferramentas utilizadas, estas são fabricadas de um material cerâmico, mais concretamente SiAlON, sendo compostas principalmente por duas fases, a (31%) e b (61%), bem como por uma fase composta principalmente por Y (8%). Quanto à sua geometria, as ferramentas possuem 6 gumes de corte, 8 mm de diâmetro, um ângulo de ataque de -3º, um ângulo de folga de 7° e um ângulo de hélice de 42°. Estas ferramentas podem ser observadas na Figura 1.

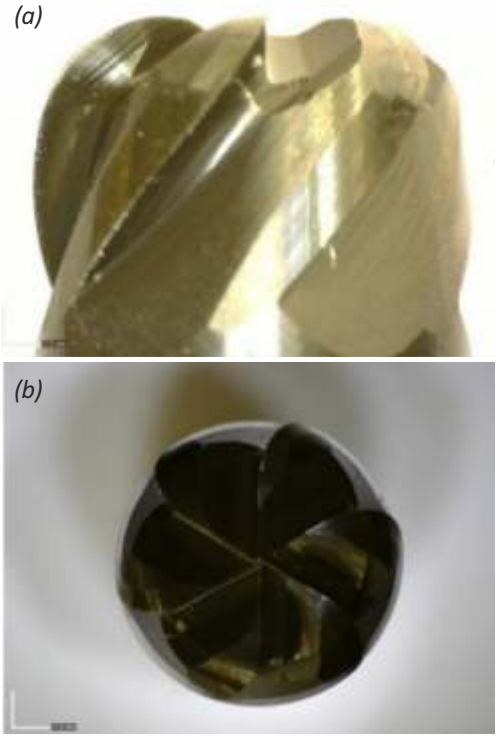



**FIGURA 1**
*Vista lateral de uma ferramenta de SiAlON a); Vista de topo da ferramenta.*

Ensaios de maquinagem linear foram realizados a seco, utilizando um centro de maquinagem *DMG eVo 60 linear.* A superfície linear maquinada tinha 158 mm. Relativamente aos parâmetros de corte, foi utilizada uma profundidade axial de corte ($a_p$) de 0.5 mm, uma profundidade de corte radial ($a_e$) de 1.5 mm e o avanço por dente (*fz*) foi de 0.08 mm/dente. A velocidade de corte testada (*Vc*) foi de 400 m/min (devido às limitações do centro de maquinagem, que tem uma velocidade de rotação máxima 16000 rpm). Foram realizadas medições de esforços de corte através da utilização de um dinamómetro rotativo piezoelétrico (*Kistler 9170A*), que foi montado na árvore do centro de maquinagem, este está ligado a um condicionador de sinal (*Kistler 5238B*), que comunica com o sistema de aquisição (*Kistler 5697*), o *setup* experimental pode ser observado na Figura 2. Para a análise dos resultados obtidos das forças de corte foi utilizado o *software Dynoware*, analisando as componentes de força $F_c$, $F_z$ e $F_{cn}$, bem como os momentos de corte gerados, $M_z$. Com os resultados das forças, foi possível calcular a força ativa de corte, $F_a$.




**FIGURA 2**
*Setup experimental utilizado, mostrando a célula de carga e peça montada na prensa de aperto.*

Fotos do desgaste das ferramentas após maquinagem foram adquiridas através de microscopia digital, usando um microscópio Dino-Lite. As medições de desgaste de flanco (VB) foram realizadas através do *software* ImageJ™ e de acordo com a norma *ISO 8988-2*. Os mecanismos de desgaste apresentados pelas ferramentas foram avaliados através de análises de microscopia eletrónica de varrimento (MEV), usando um microscópio *FEI QUANTA 400 FEG*, equipado com um equipamento de espetroscopia por raios-X, *EDAX Genesys Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy microanalysis system.*

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção irão ser apresentados os resultados obtidos relativos à influência do modo de

fresagem nas forças de corte e desgaste gerados. Quanto às forças de corte registadas durante os ensaios, pode ser vista uma clara influência do modo de fresagem, com o modo discordante a ser o que produz valores de força de corte mais elevados, tal como mostrado na Figura 3.

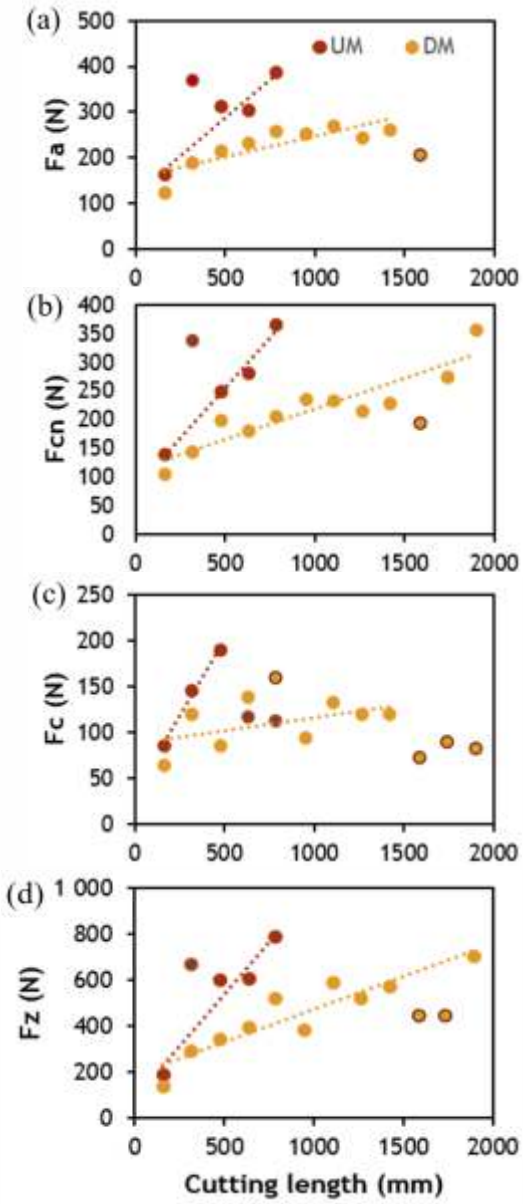



**FIGURA 3**
*Forças de corte registadas para o modo de fresagem discordante (UM) e concordante (DM) para as diferentes componentes: Fa (a); Fc (b); Fcn (c) e Fz (d).*

Apesar do modo de fresagem concordante implicar uma entrada da ferramenta mais agressiva no material, um fenómeno a ser evitado quando ferramentas cerâmicas são utilizadas devido à sua baixa resistência ao impacto [12], [13], os resultados das forças de corte indicam que este modo de fresagem é mais benéfico do que o discordante. No modo discordante, a ferramenta corta o material começando pela menor secção da apara, o que causa atrito e maior abrasão do flanco da ferramenta. Este maior atrito causa um aumento na temperatura de corte, o que irá causar um amaciamento do material e uma maior tendência para este aderir nesta área. Estes fenómenos irão conduzir a um desgaste mais acelerado da ferramenta de corte, que irá alterar a geometria desta, causando um aumento nas forças de corte geradas.

Relativamente às medições de desgaste realizadas após a maquinagem, também pode ver vista aqui uma clara influência do modo de fresagem no desgaste de flanco (VB), mostrada no gráfico da evolução do desgaste ao longo da distância maquinada na Figura 4.

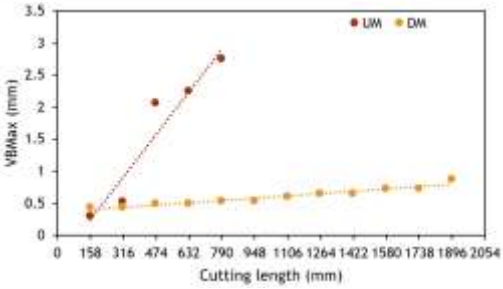



**FIGURA 4**
*Desgaste de flanco (VB) medido nas ferramentas após maquinagem, ao longo da distância maquinada.*

Analisando a Figura 4 pode ser observado que a evolução do desgaste é mais gradual para o modo de fresagem concordante. Quando utilizadas em operações de fresagem discordante, as ferramentas apresentam elevados níveis de desgaste mesmo após pequenas distâncias, neste caso aos 790 mm de distância maquinada as ferramentas apresentavam um valor de VB máximo próximo dos 3 mm.

Os mecanismos de desgaste também foram analisados, o principal sendo a adesão de material maquinado na superfície da ferramenta. Tal como mencionado anteriormente, no modo discordante, existe maior atrito na zona do flanco da ferramenta, o que irá causar adesão excessiva nesta zona, Figura 5 (a). Apesar deste mecanismo de desgaste ser mais proeminente

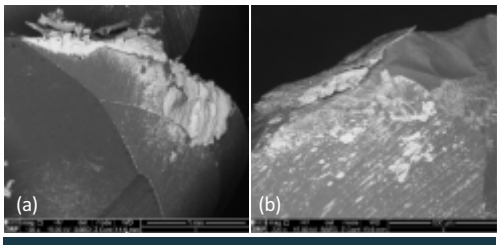



**FIGURA 5**
*Mecanismos de desgaste observados nas ferramentas testadas: adesão de material no flanco gume de corte (a); destacamento do substrato (cratera) e adesão de material à superfície da ferramenta (b).*

nas ferramentas testadas em modo discordante, também foi encontrado em ferramentas testadas em modo concordante. Destacamento do substrato (crateras) também foi observado com frequência nas ferramentas testadas, para ambos os modos de fresagem, Figura 5 (b). Este destacamento ocorre devido à acumulação de Inconel 718 aderido durante a maquinagem, que, mais tarde irá ser destacada durante o processo, levando o substrato consigo.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho foi averiguada a influência dos modos de fresagem concordante e discordante nas forças de corte e desgaste gerados em ferramentas de SiAlON, utilizadas na maquinagem de Inconel 718.

- Os resultados mostram que, apesar de ser aconselhada uma estratégia com menor impacto quando ferramentas cerâmicas são utilizadas em operações de maquinagem, a fresagem concordante provou ser mais benéfica do que a discordante no caso do Inconel 718 (para uma estratégia linear), gerando forças de corte menores e sofrendo menos desgaste ao longo do tempo.
- Relativamente às forças de corte, os ensaios que foram realizados em modo discordante produziram forças de corte mais elevadas, isto é, devido ao desgaste sofrido por estas ferramentas ser mais acentuado do que as que foram testadas em modo concordante, visto que existe alteração da geometria de corte ao longo do ensaio.
- Quanto ao desgaste, a diferença entre os modos de fresagem é mais evidente, as fresas que foram testadas em modo discordante sofrem um desgaste de flanco bastante mais acentuado do que no modo concordante, tendo atingido fim de vida útil aos 790 mm de comprimento de corte. As fresas testadas em modo concordante maquinaram um total de 1896 mm de comprimento de corte, tendo atingido um valor máximo de VB de cerca de 0.9 mm. Em contrapartida, as fresas testadas em modo discordante atingiram um valor máximo de 3 mm (foram testadas para além do limite imposto pela norma de desgaste *ISO 8988-2*.
- Relativamente aos mecanismos de desgaste, estes foram comuns a ambos os modos de fresagem testados, no entanto, estes foram mais intensos para as ferramentas testadas em modo discordante. Os mecanismos de desgaste principais são adesão de material à superfície e gume das ferramentas, formação de crateras, destacamento do substrato (*chipping*) e desgaste adesivo.


## AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem o financiamento do Projeto Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002) cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa através do NextGeneration EU.


## REFERÊNCIAS


[1] A. F. V. Pedroso *et al*., "A Review of INCONEL® Alloy's Non-conventional Machining Processes," 2024, pp. 773-783. doi: 10.1007/978-3-031-38241-3_86.

[2] V. F. C. Sousa, F. Fernandes, F. J. G. Silva, R. D. F. S. Costa, N. Sebbe, and R. C. M. Sales-Contini, "Wear Behavior Phenomena of TiN/TiAlN HiPIMS PVD-Coated Tools on Milling Inconel 718," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 4, p. 684, Mar. 2023, doi: 10.3390/met13040684.

[3] A. De Bartolomeis, S. T. Newman, I. S. Jawahir, D. Biermann, and A. Shokrani, "Future research directions in the machining of Inconel 718," *J Mater Process Technol*, vol. 297, p. 117260, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117260.

[4] B. Toubhans, G. Fromentin, F. Viprey, H. Karaouni, and T. Dorlin, "Machinability of inconel 718 during turning: Cutting force model considering tool wear, influence on surface integrity," *J Mater Process Technol*, vol. 285, p. 116809, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116809.

[5] F. Molaiekiya, A. Aliakbari Khoei, M. Aramesh, and S. C. Veldhuis, "Machined surface integrity of inconel 718 in high-speed dry milling using SiAlON ceramic tools,"*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 7-8, pp. 1941-1950, Feb. 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06471-8.

[6] A. Çelik, M. Sert Ala?aç, S. Turan, A. Kara, and F. Kara, "Wear behavior of solid SiAlON milling tools during high speed milling of Inconel 718," *Wear*, vol. 378-379, pp. 58-67, May 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.02.025.

[7] R. Zimmermann, D. Welling, T. Venek, P. Ganser, and T. Bergs, "Tool wear progression of SiAlON ceramic end mills in five-axis high-feed rough machining of an Inconel 718 BLISK,"*Procedia CIRP*, vol. 101, pp. 13-16, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.02.003.

[8] G. Zheng, J. Zhao, X. Cheng, R. Xu, and G. Zhao, "Experimental Investigation on Sialon Ceramic Inserts for Ultra-high-speed Milling of Inconel 718,"*Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 5, pp. 633-640, Apr. 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1019090.

[9] R. Zimmermann, N. Michel-Angeli, D. Welling, P. Ganser, and T. Bergs, "Surface integrity in high-feed roughing of Inconel 718 with SiAlON end mills,"*Procedia CIRP*, vol. 108, pp. 595-600, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.03.094.

[10] X. Tian, J. Zhao, J. Zhao, Z. Gong, and Y. Dong, "Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 69, no. 9-12, pp. 2669-2678, Dec. 2013, doi: 10.1007/s00170-013-5206-4.

[11] S. Roy, R. Kumar, Anurag, A. Panda, and R. K. Das, "A Brief Review on Machining of Inconel 718," *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 9, pp. 18664-18673, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.212.

[12] J. Holmberg, A. Wretland, J. Berglund, and T. Beno, "Selection of milling strategy based on surface integrity investigations of highly deformed Alloy 718 after ceramic and cemented carbide milling," *J Manuf Process*, vol. 58, pp. 193-207, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.08.010.

[13] M. A. Hadi, J. A. Ghani, C. H. C. Haron, and M. S. Kasim, "Comparison between Up-milling and Down-milling Operations on Tool Wear in Milling Inconel 718," *Procedia Eng*, vol. 68, pp. 647-653, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.234.

# MD ENGINEERING.

SOLUTIONS PROVIDER



MD MOLDES.

MD PLASTICS.

# OTIMIZAÇÃO DE GRÂNULOS DE WC-25CO PARA APLICAÇÃO EM DEPOSIÇÃO DIRETA DE ENERGIA

**José Nhanga[1,2*], Luís Regueiras[2], Hélder Nunes[1,2], Ana Reis[1,2], Manuel Vieira[1,2,] Bruno Guimarães[3], Daniel Figueiredo[3], Cristina Fernandes[3], Omid Emadinia[2]**

**1** FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, R. Dr. Roberto Frias, Porto, 4200-465, Portugal
**2** LAETA-INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Industrial, R. Dr. Roberto Frias 400, Porto, 4200-465, Portugal
**3** R&D Departamento, PALBIT S.A., Rua das Tílias, Aveiro, Branca, 3850-582, Portugal

***Os materiais de carboneto cementado são utilizados principalmente em ferramentas de corte, uma vez que possuem alta dureza e resistência ao desgaste aliada a uma boa tenacidade. Estas propriedades tornam estes materiais adequados para aplicações em revestimentos duros permitindo alterar as caraterísticas da superfície dos substratos. Este trabalho visa estudar a aplicabilidade de um pó convencional de WC-Co, originalmente preparado para ready-to-press, num processo de fabrico aditivo por Deposição Direta de Energia por Laser (DED). Para permitir uma nova aplicabilidade do pó convencional, constituído por grânulos obtidos através de um processo de spray drying, foi necessário recorrer a um tratamento térmico de forma a criar uma ligação metalúrgica entre as partículas finas de WC e de Co, evitando a aglomeração dos grânulos. Posteriormente, o pó de WC-Co tratado termicamente foi utilizado na produção de revestimentos através do processo DED. O processo de otimização dos parâmetros de impressão foi realizado com base no método de Taguchi, com foco nos seguintes parâmetros: potência do laser, velocidade de impressão e taxa de alimentação de pó. No entanto, a temperatura do substrato e a estratégia de impressão também foram consideradas. Este processo é crucial, uma vez que a densidade de energia deve ser adequada para fundir a matéria-prima em pó em conjunto com uma parte do substrato assegurando adequada ligação metalúrgica e diluição, para além disso, uma boa geometria do cordão sem defeitos, como porosidade, fissuras, salpicos e queimaduras. A caraterização envolveu abordagens físicas, químicas e microestruturais utilizando Microscopia Ótica e Eletrónica de Varrimento aplicando o modo eletrões retrodifundidos para observar distribuição das fases durante solidificação. Os resultados preliminares revelaram a presença de alguns defeitos na camada de WC-Co impressa, que podem ser atribuídos à formação de macroporos. A estratégia de fusão-refusão foi aplicada para eliminar porosidades e fissuras superficiais.***

*Cemented carbide materials are mainly used in cutting tools, as they have high hardness and wear resistance combined with good toughness. These properties make these materials suitable for hard coating applications, allowing the surface characteristics of substrates to be altered. This work aims to study the applicability of a conventional WC-Co powder, originally prepared for ready-to-press, in an additive manufacturing process by Direct Energy Deposition by Laser (DED). To allow a new applicability of the conventional powder, made up of granules obtained through a spray drying process, it was necessary to resort to a heat treatment to create a metallurgical bond between the fine WC and Co particles, avoiding agglomeration of the granules. The heat-treated WC-Co powder was then used to produce coatings using the DED process. The printing parameters were optimized using the Taguchi method, focusing on the following parameters: laser power, printing speed and powder feed rate. However, substrate temperature and printing strategy were also considered. This process is crucial, since the energy density must be adequate to melt the powdered raw material together with a part of the substrate ensuring adequate metallurgical bonding and dilution, in addition to good bead geometry without defects such as porosity, cracks, spatters and burns. The characterization involved physical, chemical and microstructural approaches using Optical and Scanning Electron Microscopy, applying the backscattered electron mode to observe the distribution of phases during solidification. Preliminary results revealed the presence of some defects in the printed WC-Co layer, which can be attributed to the formation of macropores. The fusion-refusion strategy was applied to eliminate porosity and surface cracks.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
PÓ WC-CO; REVESTIMENTOS DUROS; DEPOSIÇÃO DIRETA DE ENERGIA POR LASER; OTIMIZAÇÃO; MICROESTRUTURA
*WC-Co powder; hard coatings; Direct Laser Deposition; optimisation; microstructure*

## INTRODUÇÃO

Os materiais à base de carboneto de tungsténio (WC, também conhecido como carboneto cementado) são amplamente utilizados em diversos setores industriais, especialmente em aplicações que exigem alta resistência à abrasão e ao desgaste, além de oferecerem uma elevada tenacidade em componentes de ferramentas de corte. Devido a essas propriedades, esses materiais também podem ser utilizados como revestimentos em superfícies para aumentar a sua resistência ao desgaste [1-4].

Combinando esforços, a PALBIT, a FEUP e o INEGI assumiram o desafio de otimizar o pó de WC-Co para o processo de fabrico aditivo por Deposição Direta de Energia (DED). No entanto, conseguir um produto adequado pelo processamento deste pó por fabrico aditivo por DED apresenta-se como um desafio exigente. O processo DED utilizado no INEGI é um método de fabrico aditivo baseado em laser amplamente utilizado para reparação e reconstrução de componentes metálicos, além da produção de revestimentos (que se conhece como Cladding). Essa técnica utiliza um feixe de laser como fonte de energia para fundir pós metálicos, que são depositados/impressos, camada após camada com o movimento de um robô e um controlo programado [5-7]. Estudos nesta área têm evidenciado que os revestimentos de WC-Co por DED podem apresentar defeitos típicos, como porosidade, fissuras e fases frágeis, comprometendo as propriedades mecânicas [8]. Para reduzir a incidência de fissuras, são realizados tratamentos térmicos de pré-aquecimento nos pós de WC-Co ou no substrato onde estes são depositados. Para contornar essas limitações, diversos estudos têm se dedicado à otimização dos parâmetros de processo, como potência do laser, velocidade de impressão, taxa de alimentação de pó, temperatura do substrato e pó e a quantidade de gás no ambiente [9-11].

O presente trabalho visa a investigação da aplicabilidade do pó com composição WC-25Co (fornecido pela empresa PALBIT S.A.) numa técnica de fabrico aditivo por DED, de modo a avaliar a viabilidade de aplicação de pós, produzidos por spray drying neste processo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O pó inicial (ready-to-press) é composto por 75% de WC e 25% de Co; a este pó foi adicionado 2% de parafina (percentagens ponderais). As características do pó WC-25Co com 2% de parafina, fornecido pela PALBIT S.A., são apresentadas na tabela 1. O pó é composto por grânulos com uma granulometria média de aproximadamente 126  m como se ilustra na figura 1, mas que se desfazem durante o processo de alimentação por DED no estado virgem. Assim, foi necessário submeter este pó a um processo de tratamento térmico, no qual foram avaliadas diferentes temperaturas (1000, 1100 e 1200ºC) e tempos (1 e 3 h) utilizando a técnica de calorimetria diferencial de varrimento (DSC) em conjunto com análise termogravimétrica (TGA) sob atmosfera controlada de árgon. O substrato utilizado foi um aço estrutural DIN-Ck45.

**TABELA 1**
*Análise dos grânulos iniciais do pó WC-25ºC com 2% de parafina.*

| Fluxo Hall (s/25 cm³) | Densidade Aparente (g/cm³) | D50 (m) | D90 (m) | Humidade (%) |
|---|---|---|---|---|
| 43 | 2.89 | 126 | 221 | 0,95 |

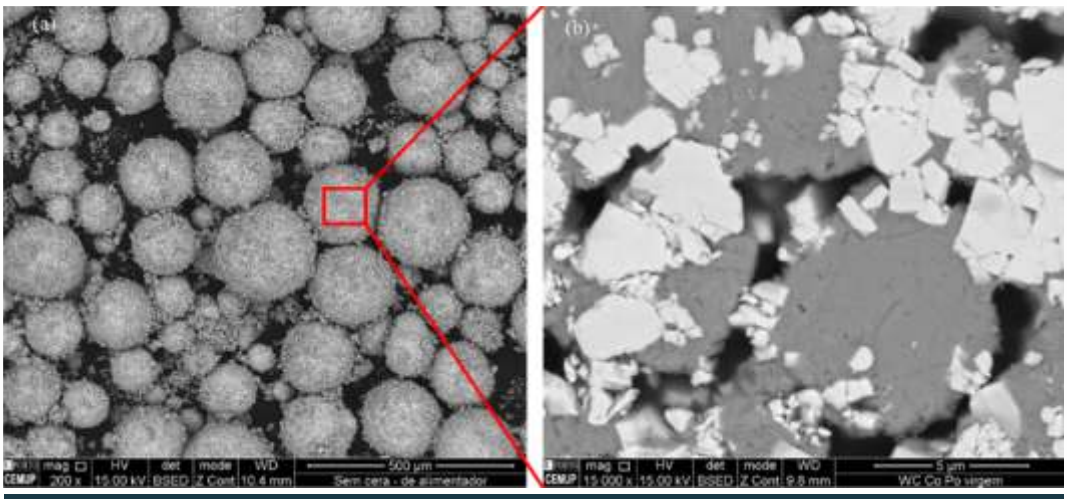


**FIGURA 1**
*Morfologia dos grânulos: a) pó virgem (a imagem da lupa) e b) secção polida do pó termicamente tratado na 1200 ºC/1h.*

O sistema DED nas instalações do INEGI é composto por um robô de 6 eixos (KUKA, Augsburg, Alemanha), equipado com uma cabeça de bocal do conjunto COAX12V6 (Fraunhofer IWS, Dresden, Alemanha), com uma capacidade de arrefecimento em funcionamento contínuo até 6000 W, um divisor de pó Fraunhofer IWS, e dois alimentadores de pó independentes Medicoat AG Disk (Magenwil, Suíça). A fonte laser é composta por um laser de fibra da marca Coherent Highlight FL3000 (Coherent, Santa Clare, SA, EUA) que apresenta uma distribuição gaussiana com um comprimento de onda de 1070 nm ± 10 nm, gerando uma potência máxima de 3000 W em modo de onda contínua (CW), utilizando o spot do laser 2,1 mm.

Os parâmetros de impressão por DED foram otimizados utilizando a metodologia Taguchi começando por imprimir uma única linha. Assim, para otimização do processo foram consideradas a potência do laser, a velocidade de impressão, a taxa de alimentação de pó, a temperatura do substrato e a estratégia de impressão. A otimização do processo é fundamental, uma vez que a densidade volumétrica de energia deve ser adequada para fundir o pó, garantindo dessa forma boa ligação e boa geometria do cordão sem qualquer defeito, como porosidades, fissuras, salpicos ou queimaduras. A avaliação foi baseada em observações visuais e microscópicas através de Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM) também tirando as imagens de eletrões retro-difundidos com o objetivo de avaliar a distribui-ção das fases feitas durante solidificação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### SINTERIZAÇÃO DOS GRÂNULOS PRIMÁRIOS DE WC-25CO

A análise DSC/TGA foi realizada para otimizar o processo de tratamento térmico, ou seja, encontrar a melhor relação entre temperatura e tempo de modo que a ligação entre as partículas acontecesse sem aglomeração dos grânulos. A figura 2 mostra as curvas de perda de massa (TGA) das quais foram extraídos os valores que se vêm na tabela 2. Observa-se que o aumento da temperatura, resulta em perde de cobalto que é demasiado à 1200 °C durante 3h.

**TABELA 2**
*Variação mássica (em %) das amostras em função dos diferentes ciclos térmicos.*

| | |
|---|---|
| **1000 °C/1h** | **3** |
| **1000 °C/3h** | **3** |
| **1100 °C/1h** | **3** |
| **1100 °C/3h** | **4** |
| **1200 °C/1h** | **4** |
| **1200 °C/3h** | **6** |

Na figura 3, são apresentados os resultados da evolução de ligação das partículas de WC com Co com a temperatura e tempo. Como pode observar-se os grânulos submetidos a um tratamento térmico de 1200 ºC durante 1h apresentaram a melhor densificação, com reduzido número de poros. Para além disso, confirma-se que os grânulos não se aglomeraram e saíram facilmente do cadinho de DSC/TGA. Para esta temperatura, mas triplican-

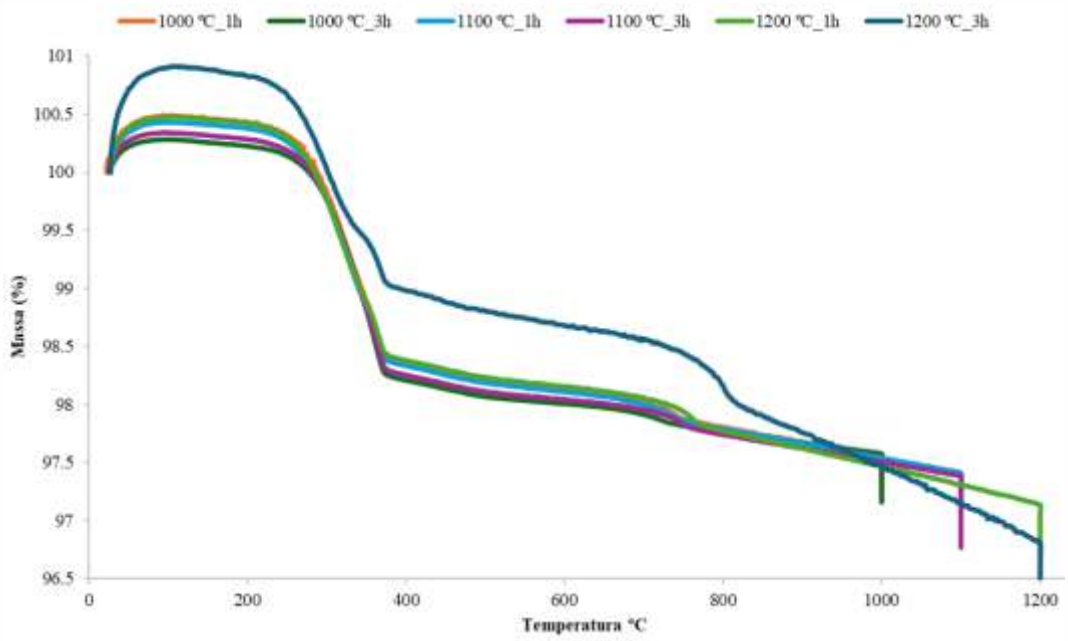



**FIGURA 2**
*Curvas de variação mássica para diferentes condições de ciclos térmicos.*

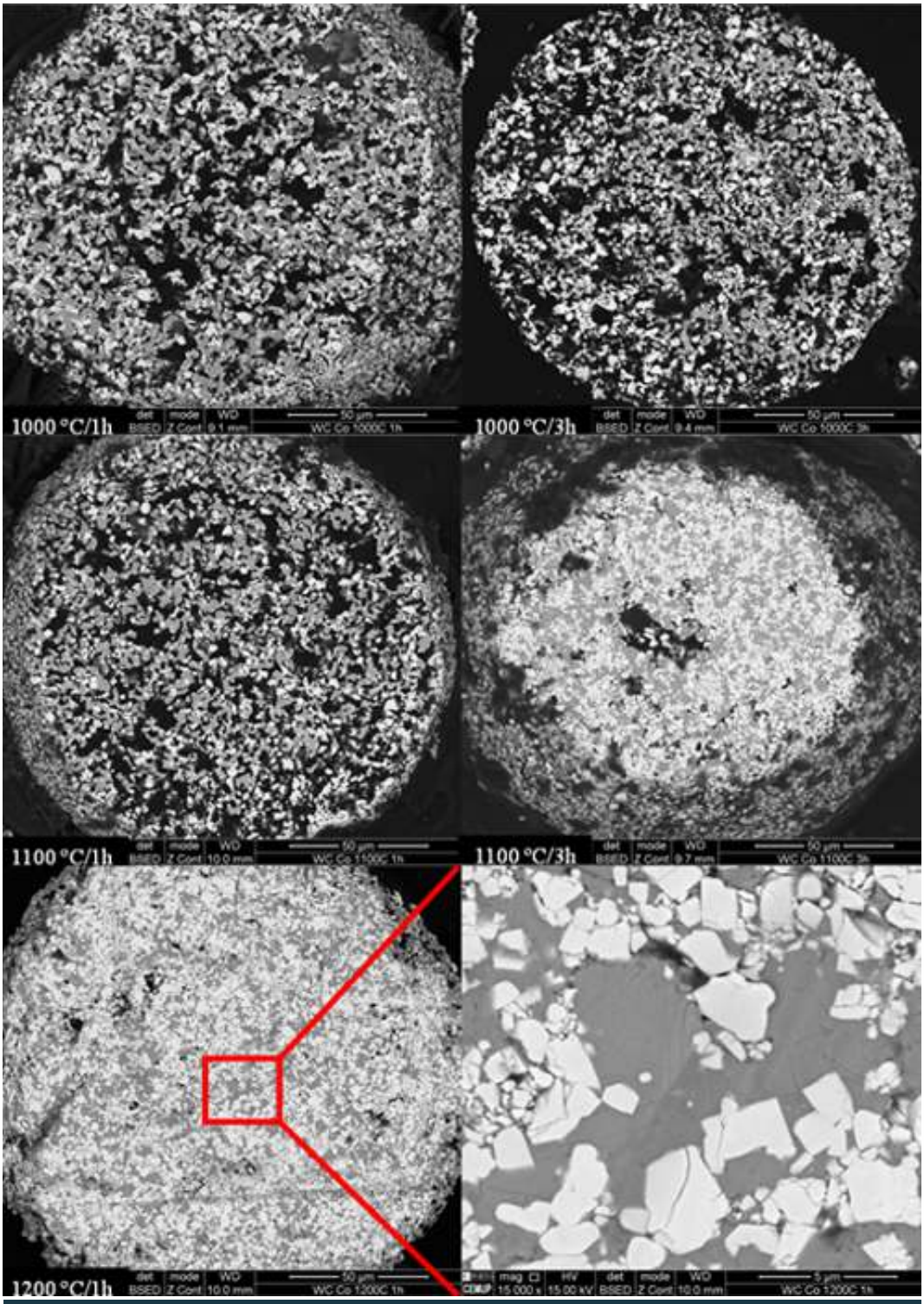



**FIGURA 3**
*Observação feita por SEM nas secções transversais dos grânulos que ilustram a densificação do pó a diferentes temperaturas/tempos.*

**TABELA 3**
*Análise dos grânulos do pó WC-25 Co com 2% de parafina sintetizada a 1200°C e 1h.*

| Fluxo Hall (s/25 cm³) | Densidade Aparente (g/cm³) | D50 (m) | D90 (m) | Humidade (%) |
|---|---|---|---|---|
| 44 | 2.85 | 114 | 212 | 0,5 |

do o tempo de tratamento térmico (3h) os grânulos de WC-25Co aglomeraram e posterior adesão ao cadinho. Isto justifica-se por uma volatilização do cobalto como se confirma nos resultados de TGA apresentado na tabela 2. Sendo por isso, este estágio excluído para este desenvolvimento. Tabela 3 mostra as análises físicas dos grânulos sinterizados a 1200 °C/1h

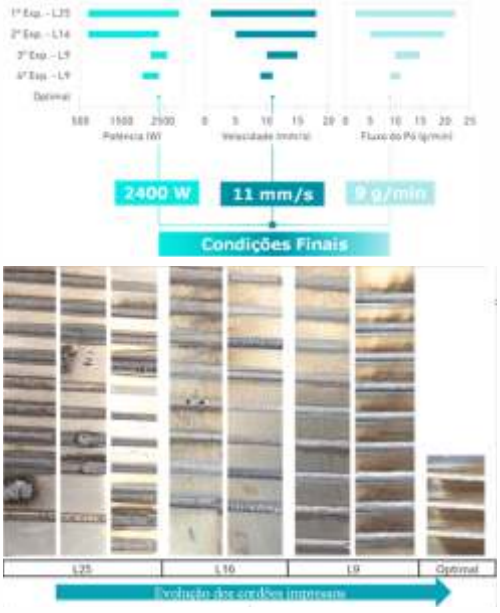



**FIGURA 4**
*Plano experimental para escolher o melhor parâmetro DED.*

em atmosfera H2 e vácuo. Comparando estes valores com os mencionados na tabela 1, confirma-se a densificação das partículas, reduzindo o D50 em quase 10%, i.e., 126 m inicial para 114 m e a humidade por 50%.

## OTIMIZAÇÃO DA IMPRESSÃO POR DED

A otimização do processo foi feita por meio de sucessivas impressões de linhas singulares, seguindo um plano experimental (DoE) com parâmetros definidos utilizando a metodologia Taguchi. A posterior análise visual permitiu determinar os melhores parâmetros de impressão para o pó de WC-25Co. Assim, foram realizados quatro séries de experiências, reduzindo após cada série o número das linhas impressas e

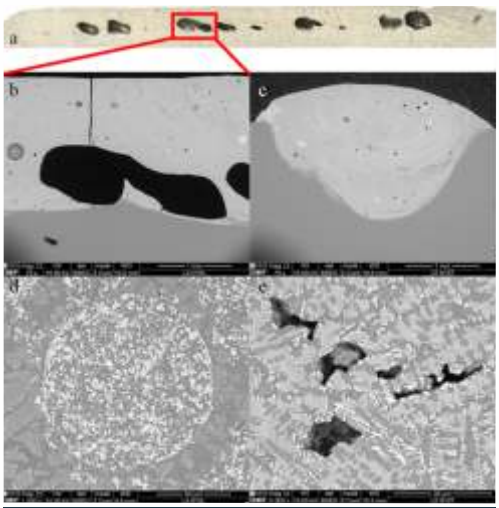



**FIGURA 5**
*Observação de defeitos das secções longitudinais e transversais da linha impressa com 2400 W, 11 mm/s e 9 g/min.*

melhorando o aspeto visual das mesmas. A figura 4 mostra a evolução deste processo, que permitiu levar à conclusão de que 2400 W, 11 mm/s e 9 g/min aparentam ser os parâmetros otimizados para impressão. A primeira série foi feita utilizando um substrato à temperatura ambiente e as restantes foram realizadas em substratos pré-aquecidos a cerca de 200 °C.

No entanto, continuou a observar-se fissuras transversais nas superfícies dos cordões que poderão ser relacionados com as tensões térmicas criadas durante a solidificação. Assim uma das possíveis soluções poderá ser aumentar a temperatura de substrato. Entretanto, a análise metalográfica e observações SEM evidenciaram a presença de porosidades nos cordões com fissuras localizadas em cima destas descontinuidades (Figura 5-a e 5-b). Além disso, observam-se poros esféricos na secção transversal (Figura 5-c) que são atribuídos ao aprisionamento de gás Árgon ou à remoção de grânulos de WC-Co durante a preparação metalográfica uma vez que têm um tamanho semelhante ao diâmetro médio dos grânulos. Também, se observam partículas não fundidas/dissolvidas (figura 5-d) e rechupes (figura 5-e). De um modo geral, a microestrutura é composta por dendrites que são características de material impresso por DED, sendo o resultado de taxa de arrefecimento e gradiente de temperatura na fronteira de fusão-solidificação, ou seja, de um sobrearrefecimento constitucional e ao crescimento preferencial dos cristais no sentido do escoamento de calor.

Nesta produção de revestimento WC-Co por

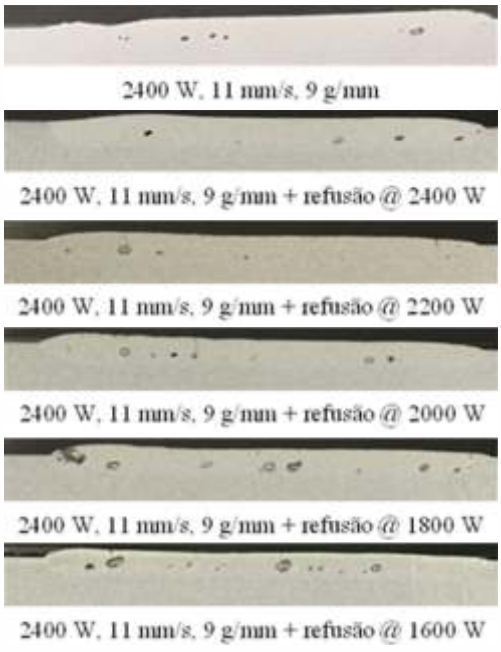



**FIGURA 6**
*Evolução das porosidades em função da potência do laser na refusão.*

laser, a energia poderá não ser suficiente para criar uma fusão completa do WC, devido à sua elevada temperatura de fusão. Por conseguinte, a zona de fusão é constituída por partículas não dissolvidas de WC e metal líquido. O metal líquido, tem boa fluidez e parece fluir preferencialmente para a cavidade formada pelo colapso das bolhas de gás onde em seguida solidifica.

### EFEITOS DA REFUSÃO DE LINHAS

Considerando os parâmetros definidos, 2400 W, 11 mm/s e 9 g/mm, e com um substrato pré-aquecido a 200 °C, procedeu-se a uma nova impressão aumentando a temperatura de substrato até 350 °C, mas as fissuras e as porosidades continuam a ser observadas. Assim, foi aplicada a abordagem de refusão dos cordões impressos, ou seja, criar uma oportunidade para que as porosidades possam ser fechadas. A Figura 6 mostra a evolução do material fundido nas secções longitudinal para refusões com potência de laser a variar entre 1600 e 2400 W.

Assim, a refusão a 2400 W resultou num cordão mais uniforme e com menor porosidade. Por conseguinte, os próximos passos serão a impressão de um conjunto de linhas aplicando a estratégia de refusão em conjunto com uma otimização considerando a velocidade de refusão. Além disso, será executada outra abordagem que envolve a fusão do substrato por laser seguida por impressão.

## CONCLUSÃO

A densificação dos pós a 1200 °C durante 1h mostrou-se altamente eficaz para assegurar a resistência do pó *ready-to-press* para o processo de impressão. Visualmente, as linhas impressas a 2400 W, 11 mm/s e 9 g/min apresentaram boa qualidade geométrica e aspeto metálico. Também, a refusão do cordão impresso melhorou o seu aspeto e pode ser eficaz em eliminar as descontinuidades.


### AGRADECIMENTOS

Projeto Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002) cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa através do NextGeneration EU. Os autores também gostariam de agradecer ao CEMUP (Centro de Materiais da Universidade do Porto) pela assistência com as análises microestruturais.


### REFERÊNCIAS


**[1]** A. Aramian, N. Razavi, Z. Sadeghian, and F. Berto, "A review of additive manufacturing of cermets," May 01, 2020, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.addma.2020.101130.

**[2]** Y. Yang, C. Zhang, D. Wang, L. Nie, D. Wellmann, and Y. Tian, "Additive manufacturing of WC-Co hardmetals: a review," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 108, no. 5-6, pp. 1653-1673, May 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05389-5.

**[3]** M. Al-Thamir, D. G. McCartney, M. Simonelli, R. Hague, and A. Clare, "Processability of atypical WC-Co composite feedstock by laser powder-bed fusion," *Materials*, vol. 13, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13010050.

**[4]** E. Liverani, A. Ascari, and A. Fortunato, "Multilayered WC-Co coatings by Direct Energy Deposition-based cladding: Effect of laser remelting on interface defects," *Surf Coat Technol*, vol. 464, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129556.

**[5]** T. Yamaguchi, K. Tanaka, and T. Suyama, "In-situ observation of CO gas bubble behavior in molten pool during direct laser deposition of WC-Co cermet material," *Opt Laser Technol*, vol. 180, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.optlastec.2024.111561.

**[6]** M. Erfanmanesh, H. Abdollah-Pour, H. Mohammadian-Semnani, and R. Shoja-Razavi, "Kinetics and oxidation behavior of laser clad WC-Co and Ni/WC-Co coatings," *Ceram Int*, vol. 44, no. 11, pp. 12805-12814, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.04.087.

**[7]** M. Al-Thamir, D. G. McCartney, M. Simonelli, R. Hague, and A. Clare, "Processability of atypical WC-Co composite feedstock by laser powder-bed fusion," Materials, vol. 13, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13010050.

**[8]** M. Li, K. Huang, and X. Yi, "Crack Formation Mechanisms and Control Methods of Laser Cladding Coatings: A Review," Jun. 01, 2023, MDPI. doi: 10.3390/coatings13061117.

**[9]** T. Yamaguchi, K. Tanaka, and H. Hagino, "Porosity reduction in WC-12Co laser cladding by aluminum addition," *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 110, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2022.106020.

**[10]** G. Kim et al., "Microstructural Evolution, Hardness and Wear Resistance of WC-Co-Ni Composite Coatings Fabricated by Laser Cladding," *Materials*, vol. 17, no. 9, May 2024, doi: 10.3390/ma17092116.

**[11]** S. Zanzarin, S. Bengtsson, and A. Molinari, "Study of carbide dissolution into the matrix during laser cladding

# OTIMIZAÇÃO DE LIGAÇÕES DO TIPO FLOW DRILLING SCREW PARA APLICAÇÕES AUTOMÓVEL: AVANÇOS NA COMPREENSÃO E MODELAÇÃO DO PROCESSO

**António Martins[1], Gabriel Soares[1], Rui Pedro Silva[2], Roya Darabi[1], Rui L. Amaral[2], Pedro Rodrigues[3], João Ferreira[3], Ana Reis[1,2]**

1 FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, Porto, 4200-465, Portugal
2 INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, Campus da FEUP, Rua Dr. Roberto Frias . 400, Porto, 4200-465, Portugal
3 PECOL Automotive, S.A., Raso de Paredes, Águeda, 3754-901, Portugal

***A pesquisa efetuada neste trabalho explora a interação dos parâmetros do processo durante a operação de flow drilling screw na ligação de materiais dissimilares, como o aço DP600 e a liga de alumínio AW6082-T6, ambos amplamente utilizados na indústria automóvel. Reconhecendo a complexidade do processo de união e os desafios associados à convergência da simulação numérica, a abordagem de modelação por elementos finitos (FE) para a ligação por flow drilling screw (FDS) foi meticulosamente desenvolvida utilizando o método Lagrangiano, implementado no DEFORM 3D/Implícito. Este m´etodo considera o comportamento termomecânico, incluindo elasto-plasticidade, dependente da temperatura. Para representar com precisão as condições reais do processo, a técnica de remeshing foi aplicada para capturar diferentes fases, como a penetração, formação de rosca e aperto final.***

***Os resultados numéricos foram validados por meio de caracterização experimental das juntas aparafusadas. Por fim, os elementos de ligação do tipo FDS foram extensivamente caracterizados. A investigação realizada abrange a totalidade do processo de ligação, desde a perfuração até à formação de rosca e aperto do parafuso, incluindo a validação por métodos numéricos e experimentis.***

***Através desta abordagem holística e rigorosa, o nosso objetivo é aumentar a compreensão destes processos fundamentais e contribuir para a evolução contínua das práticas modernas de conceção e fabrico de componentes para automóveis, particularmente na união de materiais metálicos dissimilares em aplicações "body in white".***

**PALAVRAS CHAVE**
PARAFUSO AUTO PERFURANTE, PARAFUSARIA AUTOMÓVEL, LIGAÇÃO DE METAIS DISSIMILARES, MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS, REGENERAÇÃO DA MALHA

## INTRODUÇÃO

Com o rápido desenvolvimento dos veículos elétricos a bateria (BEVs), a redução do peso dos automóveis tornou-se cada vez mais urgente e necessária, considerando os benefícios que proporciona para uma maior autonomia de condução. O design leve tornou-se um dos principais motores de desenvolvimento na indústria automóvel, especialmente na construção de estruturas perfiladas. Devido à excelente relação resistência/peso e à elevada resistência à corrosão, os perfis extrudidos em ligas de alumínio têm sido amplamente utilizadas nas estruturas *Body-In-White* (BiW), como a longarina do piso, a travessa do piso e o pilar A. Para além disso, estes perfis também têm sido aplicados na caixa da bateria para aumentar a densidade de energia das baterias dos veículos elétricos. A utilização de perfis de alumínio permite reduzir eficazmente o peso dos veículos sem comprometer o desempenho estrutural. No entanto, isto também traz grandes desafios para as técnicas de ligção. Devid à estrutura fechada das extrusões

de alumínio, técnicas de ligação de dois lados, como a rebitagem auto-perfurante (SPR) e o *clinching*, deixam de ser aplicáveis Li et al. (2017); Zha et al. (2022); Zhang et al. (2020). Além disso, as técnicas de ligação de acesso bilateral requerem, frequentemente, uma grande estrutura em C para suportar o punção e a matriz, o que pode ser inviável quando há limitações de espaço. Assim, torna-se urgente desenvolver técnicas de ligação de acesso unilateral na indústria automóvel Ivanjko and Meschut (2019). Nos últimos 30 anos, foram desenvolvidas várias técnicas de ligação de acesso unilateral, como a tecnologia RIVTAC® Zhou et al. (2023), o parafuso "Flow Drill Screw" (FDS) Lathabai et al. (2011) e a rebitagem cega por frição (FSBR) Claus and Weitzel (2014). Entre estas, o FDS é a técnica mais popular na indústria automóvel devido à sua capacidade para a realização de ligações entre materiais dissimilares, pelo facto de não levar à fusão dos materiais e, portando, evitar a formação intermetálicos frágeis na ligação, permitindo uma ligação de alta resistência entre, por exemplo, aços e ligas de alumínio Li et al. (2017); Zhao et al. (2022).

A técnica FDS tem sido amplamente utilizada na montagem de estruturas Body-In-White (BiW) por fabricantes de automóveis como a Ford, BMW, Audi, Porsche, Mercedes-Benz e Jaguar Land Rover. Por exemplo, o BMW Série 7 utiliza cerca de 180 parafusos FDS, enquanto o Audi A8 recorre a aproximadamente 885 parafusos. Para além das estruturas BiW, o flow drilling screw é também uma solução com potencial na montagem de packs de baterias de veículos elétricos, devido à sua excelente estanquicidade, facilidade de desmontagem e possibilidade de acesso por um só lado. O tempo de ciclo de Preprint submitted to Elsevier November 2, 2024 aplicação de cada flow drill screw varia, normalmente, entre 1.5 s e 4.0 s, dependendo da espessura da chapa, do material, do design do parafuso e dos parâmetros de ligação.

Atualmente, há já diversas marcas que apresentam soluções FDS com diversas geometrias de parafusos e de juntas, com e sem pré-furação do componente superior ou central (no caso de ligação de três componentes). As marcas mais conhecidas são a EJOT e a Arnorld Umformtechnik GmbH. Ambas as marcas apresentam valores limite de espessuras dos componentes, em função da aplicação em causa, ou seja, dependendo dos materiais que se pretende unir (número de componentes e se são ou não dissimilares) e também das características do parafuso que realiza a ligação Sakiyama et al. (2013); Skovron et al. (2015). No caso de ligações entre materiais dissimilares como aços de alta resistência e ligas de alumínio, é aconselhado que o componente de menor espessura fique na parte superior da junta de ligação. As formas mais comuns de avaliar a resistência de ligações mecânicas são o estudo das forças de resistência nas direções axial e de corte. A EJOT apresenta uma comparação entre as resistências de ligações mecânicas por FDS e por outros métodos, nomeadamente, o processo de cravação (clinching), ligação com rebites auto-perfurantes (self piercing riveting) e soldadura por pontos. Nesta comparção conclui-se que o processo FDS é aquele que apresenta os melhores resultados em termos de resistência na direção axial, atingindo cerca de 3kN. Relativamente à resistência na direção de corte, o processo FDS tem capacidade de aguentar quase 5 kN, ficando apenas atrás do processo de soldadura por pontos, o que verifica que, dentro dos diferentes processos de ligação mecânica, o FDS é aquele que sobressai, pelas melhores caracteísticas da ligação Skovron et al. (2015).

**O PROCESSO FDS**

O parafuso FDS, essencialmente, atua como ferramenta e elemento de ligação e é constituído por três zonas distintas: uma zona para realização da perfuração (ponta), uma secção que permite a formação inicial da rosca (esta zona normalmente apresenta uma secção poligonal de forma a facilitar o processo) e uma secção para formação de roscas standard ISO (zona onde se gera a carga e que permite a fixação dos componentes) E. A. A. (EAA) (2013). Este processo combina três operações consecutivas: perfuração (a), formação de rosca (b) e aperto (c). Numa primeira fase, o elemento de ligação (parafuso com extremidade pontiaguda) é rodado a alta velocidade (3000 rpm) contra a superfície superior do componente e, devido à fricção e à força axial aplicada no material, é provocado um aumento de temperatura, geralmente entre 150 e 250 °C, dependendo do material e da espessura do componente E. A. A. (EAA) (2013). O calor gerado faz com que o material da chapa diminua a sua resistência e se deforme plasticamente, começando a fluir, permitindo que o parafuso penetre o material. Quando o parafuso penetra o material, este é extrudido para cima e para baixo ao longo do parafuso, formando saliências correspondentes ao fluxo de material. Na segunda fase, à medida que o parafuso vai penetrando a chapa, vai-se formando uma rosca interna através da deformação do material. Na fase final, a cabeça do parafuso aproxima-se do componente superior (geralmente chapa) e há um aumento do torque de forma a realizar o aperto final do parafuso ao material, assegurando uma ligação permanente EJOT GmbH Co. KG Industrial Fasteners Division

(2020); Liu et al. (2020). Um aspeto importante que deve ser definido quando se pretende realizar uma ligação por FDS é a realização ou não de pré-furo no componente superior. Esta decisão está dependente de vários fatores. As principais razões para a necessidade de realização de um pré-furo são o facto de: (a) o componente apresentar elevada espessura; (b) no final do processo a cabeça do parafuso não consegue ficar em contacto com o componente devido à subida do material que ocorre quando o parafuso perfura o material; (c) a força axial necessária para a realização da ligação é demasiado elevada. Quando não se realizar um pré-furo, o parafuso tem de penetrar os dois materiais. Assim, o material do componente superior, na zona de fixação, flui na direção de avanço, enquanto o do componente inferior flui da direção contrária, provocado muitas vezes a formação de uma folga entre os materiais. Desta forma, é necessário um controlo rígido dos parâmetros do processo, nomeadamente, a força de fixação dos componentes, a força axial de ligação e o torque de aperto Sakiyama et al. (2013). No início do processo, de forma a ser possível a realização do furo, a velocidade de rotação do parafuso aumenta consideravelmente, diminuindo apenas quando o parafuso já se encontra a realizar a rosca e a entrar completamente no material. Relativamente ao torque, este atinge um pico quando a rosca começa a ser feita e o seu valor máximo ocorre apenas no final, quando se dá o aperto final do parafuso. No que se refere à força axial que é aplicada no parafuso, esta apresenta o seu valor máximo na primeira fase em que que ocorre a penetração do material. O crescente interesse na técnica FDS, vem acompanhado de uma forte necessidade de compreender o mecanismo de formação das ligações, bem como de desenvolver estratégias para controlar e otimizar a qualidade e a resistência mecânica das mesmas. Apesar de a técnica FDS ser amplamente utilizada na indústria automóvel, ainda falta uma compreensão abrangente e aprofundada sobre o seu funcionamento. São necessários mais esforços para facilitar o desenvolvimento de novas ligações e parafusos FDS, alargar a sua gama de aplicações e propor métodos inovadores de otimização para melhorar a qualidade das ligações.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### MATERIAIS BASE

Os materiais base foram escolhidos tendo em consideração o objetivo principal do presente estudo: analisar a aplicação da técnica flow drilling screw na ligação entre componentes fabricados em ligas de alumínio (perfis, chapa conformada ou peças injetadas) e chapas estampadas produzidas em aços de alta resistência, para aplicação na carroçaria dos automóveis. Deste modo, foi utilizada uma liga de alumínio da série 6000, AW6082-T6, e um aço DP600, representativos das ligas aplicadas no setor automóvel. Estes materiais foram utilizados tanto no procedimento experimental, como na modelação numérica do processo de ligação. As tabelas 1 e 2 apresentam a composição química de cada um destes materiais (% mássica). Esta composição foi determinada por espectrometria de emissão ótica, sendo comparada com a composição química standard esperada para cada liga.

**TABELA 1**
*Composição quimica da liga AW6082-T6 (%mássica).*

| Elemento | Composição Determinada/Standard* |
|---|---|
| Si | 0.81 / 0.37-1.3 |
| Fe | 0.34 / £ 0.5 |
| Cu | 0.066 / £ 0.1 |
| Mn | 0.51 / 0.4-1.0 |
| Mg | 1.04 / 0.6-1.2 |
| Cr | 0.019 / £ 0.25 |
| Zn | 0.053 / £ 0.2 |
| Ti | 0.020 / £ 0.1 |
| Al | 97.1 / Resto |

**Segundo EN 573-3:2019: Aluminium and alu,inium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 3: Chemical composition and form of products,*

**TABELA 2**
*Composição quimica do aço Dp600 (%mássica).*

| Elemento | Composição Determinada/Standard* |
|---|---|
| C | 0.10 / £ 0.15 |
| Si | 0.18 / £ 0.75 |
| Mn | 0.81 / £ 2.50 |
| P | 0.014 / £ 0.04 |
| S | 0.0034 / £ 0.015 |
| Al | 0.048 / 0.015-1.50 |
| Cr+Mo | 0.039 / 1.40 |
| Nb+Ti | 0.036 / £ 0.15 |
| V | 0.013 / £ 0.20 |
| B | 0.0022 / £ 0.0050 |
| Fe | 98.6 / Resto |

**Segundo EN 10338:2015: Hot rolled and cold rolled non-coated products of multiphase steels for cold forming - Technical delivery consitions.*

### ELEMENTO DE LIGAÇÃO

O elemento de fixação utilizado na união dos materiais dissimilares foi um flow drilling screw M5x18 produzido pela EJOT®. A Figura 1 apresenta uma representac¸ ˜ao deste elemento de fixação e a Figura 2 a sua vista em corte.

Na Tabela 3 estão exibidas algumas das condições geométricas do flow drilling screw aplicado. Por sua vez, a Tabela A.4 expõe a composição química (% mássica) determinada para o



**FIGURA 1**
*Representação do flow drilling screw utilizado.*

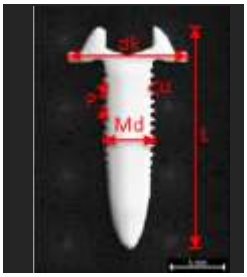



**FIGURA 2**
*Vista de corte do flow drilling screw utilizado.*

elemento de fixação do tipo FDS. Pela composição química alcançada, o material utilizado é compatível com um aço ao carbono com baixo teor de carbono.A presença de boro na composição, ainda que em pequenas quantidades, promove a temperabilidade do aço.

**TABELA 3**
*Parâmetros geométricos do flow drilling screw utilizado.*

| Parâmetros | Símbolo | Valor |
|---|---|---|
| **Diâmetro nominal** | $M_d$ | **5 mm** |
| **Passo** | *P* | **0,8 mm** |
| **Ângulo de rosca** | a | **60°** |
| **Diâmetro da cabeça** | $d_k$ | **12 mm** |
| **Comprimento** | *L* | **18 mm** |
| **Profundidade da reentrância** | - | **0,3 mm** |
| **Largura da reentrância** | - | **1 mm** |

## PARÂMETROS DE PROCESSO E ENSAIOS DE APLICAÇÃO

Os parâmetros de processo adequados à união do aço DP600 (espessura 0.8 mm) à liga de alumínio AW6082-T6 (espessura 2.0 mm) encontram-se descritos de seguida. Deste modo, promoveu-se a realização do processo de fixação mecânica sem necessidade de recorrer a um pré-furo na chapa superior. De modo a conseguir-se um processo de ligação eficiente, a carga axial exercida pelo aplicador deverá ser aproximadamente constante durante todo o processo (1800 N). Por sua vez, a velocidade de rotação deverá ser adequada a cada uma das principais etapas do processo: perfuração (3000 rpm), formação de rosca (1500 rpm) e aperto final (150 rpm). Por fim, o torque de aperto deverá rondar os 8.50 Nm, com o intuito de promover uma ligação mecânica robusta, sem que haja danificação do elemento de fixação ou dos materiais base.

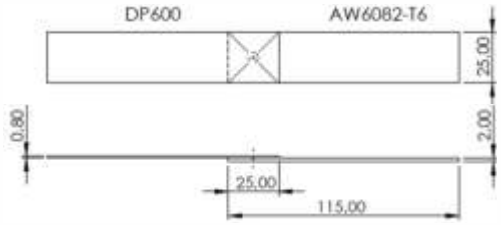



**FIGURA 3**
*Geometria e dimensões da juntas aparafusadas.*

A Figura 3 exibe a geometria e as dimensões das juntas executada nos ensaios de aplicação dos elementos de fixação do tipo flow drilling screw. Como tal, para cada junta, a chapa de aço DP600, de espessura inferior, foi posicionada na parte superior da chapa da liga AW6082-T6. De modo a avaliar a robustez da ligação, foram produzidos três provetes com a geometria referida, sendo posteriormente submetidos a ensaios de corte (shearing tests).

## MODELAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO

### MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO MATERIAL

Durante a aplicação do método dos elementos finitos, a seleção de um modelo constitutivo adequado é importante para a definição precisa das propriedades mecânicas do material, especialmente em simulações que envolvem grandes deformações. No processo flow drilling screw, a chapa é amolecida, resultando numa elevada deformação plástica. O atrito gerado pelo parafuso a altas velocidades leva à geração de calor aquecendo o material em contacto. Deste modo, o modelo de Johnson-Cook, que considera a variação da temperatura ao longo do processo, apresenta ser a hipótese mais viável dado que a curva de tensão do material deve ser descrita através de um modelo constitutivo que inclua efeitos térmicos. O modelo de Johnson-Cook combina os efeitos de endurecimento por deformação, sensibilidade à taxa de deformação e amolecimento térmico para descrever o comportamento de materiais sob grandes deformações, altas taxas de deformação e variações de temperatura. A forma geral da equação de Johnson-Cook é dada por:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{n})\left(1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right)\left(1 - \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^{m} \quad (1)$$

Onde $\sigma$ é a tensão equivalente de von Mises, $\varepsilon$ é a deformação plástica equivalente, $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação plástica, $\dot{\varepsilon}_0$ é a taxa de deformação de referência, T é a temperatura do material, $T_{room}$ é a temperatura ambiente, e $T_{elt}$ é a temperatura de fusão do material.

Os parâmetros do material são os seguintes: o parâmetro A corresponde à tensão de cedência inicial do material em taxa de deformação quase-estática. Os parâmetros *B* e *n* representam o comportamento de encruamento do material, refletindo a tensão de escoamento nessa condição. O parâmetro *C* está relacionado ao efeito da taxa de deformação, enquanto o parâmetro *m* descreve o efeito de amolecimento térmico.

No processo FDS, dadas as altas velocidades de

rotação a que o parafuso é sujeito, a geração de calor é uma característica muito importante a ter em conta, com influência no comportamento plástico das chapas. O balanço energético no sistema é caracterizado pela seguinte equação Liu *et al*. (2020)

$$-\rho c\dot{T} = k\nabla^2 T + Q \qquad (2)$$

O lado direito da equação descreve a condução de calor. O termo $k\tilde{N}^2T$ refere-se à difusão do calor através do material devido a gradientes de temperatura, em que $k$ e $D^2T$ representam, respetivamente, a condutividade térmica e o Laplaciano da tempe-ratura. O termo $Q$ representa a taxa de geração ou absorção de calor no material por unidade de volume.

No lado esquerdo da equação, r cT representa a variação da energia térmica (calor) dentro do material ao longo do tempo, onde r , c e T são, respetivamente, a densidade, a capacidade calorífica e a taxa de variação de temperatura. A geração de calor inclui apenas as condições de fricção na interface parafuso-chapa e a deformação plástica. Portanto, dentro da chapa Liu et al. (2020):

$$Q = K\sigma_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij} \qquad (3)$$

Onde K é a fração de energia mecânica convertida em calor, com valor típico de 0.9, $s_{ij}$ é o tensor de tensões, e $e_{ij}$ é o tensor da taxa de deformação. A energia de deformação plástica (1 - K), armazenada no corpo da chapa, causará mudanças nas fronteiras de grãos, densidade de discordâncias, etc. Uma forma variada desse balanço de energia é escrita como Liu et al. (2020):

$$\int_V \rho c\dot{T}\delta T\, dV + \int_V k\nabla^2 T\delta\nabla T\, dV - \int_\Gamma k\nabla^2 T\, d\Gamma - \int_V K\sigma_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}\nabla T\, dV = 0$$

Para realizar o balanço de energia mencionado na simulação por elementos finitos, o campo de temperatura deve atender às condições de contorno prescritas e à equação anterior para perturbação arbitrária dT. A formulação da análise de temperatura é a seguinte Liu et al. (2020):

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \qquad (4)$$

Na técnica implícita, a aproximação por diferenças finitas é frequentemente utilizada para encontrar a nova temperatura Liu et al. (2020):

$$T_{(t+dt)} = T_t + dt\left((1-\alpha)\dot{T}_t + \alpha\dot{T}_{(t+dt)}\right) \qquad (5)$$

Onde (a) é o parâmetro de convergência do esquema de avanço no tempo. Para garantir estabilidade incondicional, (a) é geralmente definido como 0.75 [14].

**CRITÉRIO DE FRATURA**

No processo de FDS, o comportamento de fratura da chapa quando é perfurada pelo parafuso está relacionado com a deformação global da própria chapa. Em geral, o corte e fratura dos metais, como as ligas de alumínio e o aço, conforme estudado neste trabalho, são consideradas fraturas dúcteis em vez de fraturas frágeis. Neste trabalho, foi utilizado o critério de Cockcroft e Latham Cockcroft and Latham (1968), critério de fratura dúctil, no qual o comportamento de fratura é iniciado quando o trabalho de deformação plástica, calculado pela tensão máxima de tração, integrada ao longo do da deformação plástica, atinge um valor crítico. Oh et al. [16] efetuaram uma normalização do critário Cockcroft e Latham, considerando o efeito da tensão equivalente na evolução do dano do material, e propuseram o critério de fratura CL normalizado Liu et al. (2020):

$$\int_0^{\varepsilon_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\varepsilon = C_0 \qquad (6)$$

Onde s é a tensão efetiva, s* é a tensão máxima de tração, e é a deformação efetiva, $e_f$ é a deformação efetiva de fratura, e $C_0$ é o valor crítico de dano quando o comportamento de fratura começa a ocorrer. Os valores de C0 para o aço e para as ligas de alumínio são 0.354 e 0.247, respetivamente. Neste estudo, o critério de fratura C&L normalizado foi utilizado para a simulação FDS, de modo que o comportamento de fratura da chapa esteja relacionado com a forma final, tornando-a maispróxima da realidade.

**MODELAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO FDS**

Neste estudo, o software DEFORM 3D foi utilizado para simulações do processo Flow Drilling Screw, que inclui a definição de limites de corte, remeshing de elementos fora de fronteira e distorcidos e armazenamento das variáveis de estado. A simulação é uma simulação termomecânica. Na simulação de FDS, o parafuso foi definido como um corpo rígido. Tal como realizado experimentalmente, no modelo numérico a chapa superior é de aço DP600 com 0.8 mm de espessura e a chapa inferior é de AW6082-T6 com 2.0 mm de espessura. A sobreposição das chapas é de 25 x 25 mm. Ambas as chapas foram definidas como corpos com deformação plástica. Os elementos de faces contrárias das chapas são fixos para simular as condições experimentais e permitir fenómenos de flexão. Foram usados dois modelos de atrito. O modelo de Coulomb foi usado entre as duas chapas com

um coeficiente de 0.15. Relativamente à interação entre o parafuso e as chapas foi definido um coeficiente de corte de 0.9. Foi definido um coeficiente de transferência de calor de 11 N/s/mm/°C. Para além disso, os coeficientes de emissividade e de convecção foram definidos em 0.7 e 0.02 Liu et al. (2020). A execução da malha nas chapas é um processo mais complexo que no parafuso FDS. Necessita de passar por um processo de remeshing, em reduzidos intervalos de tempo. As chapas necessitam de uma malha muito mais fina do que a do parafuso. Propriedades como deformação e tensão têm gradientes elevados, sendo necessário, de modo a aproximar estes gradientes de uma forma correta, uma malha muito fina. Assim, a geração de malha (remeshing) é balanceada para gerar mais elementos onde ocorre altas deformações, altas temperaturas e altas taxas de deformação. Assim, nas simulações efetuadas, o processo de remeshing foi balanceado para altas deformações (50%), altas taxas de deformação (30%) e a janela de maior refinamento da malha (20%) Gardner and Dornfeld (2006). Foram realizados dois modelos de elementos finitos baseados no processo de remeshing, com tamanhos de malha localizadas de 0.5 mm e 0.1 mm. O modelo é Lagrangiano com uma abordagem implícita. Na Figura 3, é possível ver a definição do modelo no DEFORM 3D.

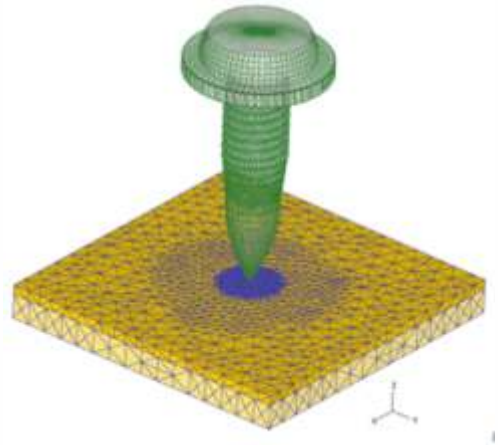


**FIGURA 3**
*Modelo do FDS construido pelo método dos elementos finitos recorrendo as software DEFORM 3D.*

Durante o processo FDS, a operação é dividida em três fases distintas, cada uma com parâme-tros específicos. Na fase de penetração, o para-fuso gira a 3000 rpm com uma velocidade de avanço de 35 mm/s para penetrar eficientemente o material. Na fase de formação de rosca, a velocidade de rotação é reduzida para 1500 rpm e a velocidade de avanço para 20 mm/s, permitindo a formação de rosca métrica. Por fim, na fase de torque, o parafuso gira a 150 rpm aplicando uma força axial de 1800 N, garantindo o aperto adequado e a fixação da junta. Esses parâmetros são cruciais para assegurar a qualidade do processo FDS, assim como para garantir a resistência da junta. Na Figura 4 é mostrado como se encontram as chapas após a penetração.

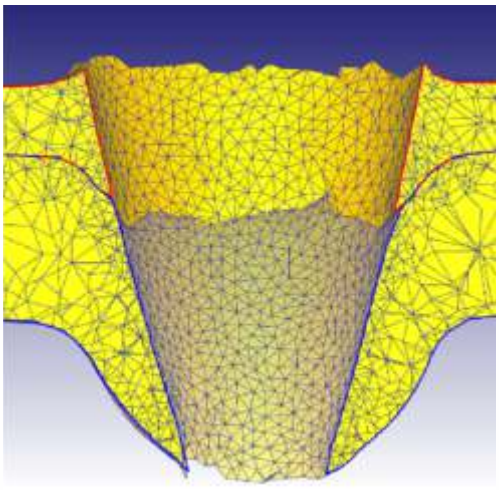


**FIGURA 4**
*Modelação das cha+as após penetração.*

A definição da geometria do furo só é possível devido ao uso do remeshing. Este processo de redefinição da malha ao longo dos incrementos de tempo otimiza a eficiência computacional, aumentando os graus de liberdade (DOF) em regiões críticas e refinando a estrutura da malha.

Outra questão relacionada com o remeshing dos elementos da malha é a perda de volume. A minimização deste problema pode ser alcançada com o ajuste da relação entre o passo de incremento de tempo e o tamanho médio do elemento Liu et al. (2020).

$$\delta t = \sqrt{v_f^2 + \left(\frac{v_r \pi d}{60}\right)^2} \leq \frac{1}{3} L_s \qquad (7)$$

onde dt é o passo de incremento de tempo, $v_r$ e $v_f$ são, respetivamente, as velocidades de rotação e avanço do parafuso, $d$ é o diâmetro do parafuso e $L_e$ é o tamanho médio do elemento. Na fase de remeshing dos elementos distorcidos, as posições dos nós e dos pontos de integra-ção são alteradas. Portanto, o mapeamento das variáveis de estado da malha antiga para a nova tem de ser realizado pelo programa antes que os novos cálculos numéricos do seguinte incremento de tempo comecem. Na simulação do processo de FDS, foi usado um algoritmo de interpolação integrado do DEFORM 3D para mapearvariáveis de estado com base em nós, como temperatura, velocidade e deslocamento e garantir a transição destas variáveis e de variáveis de estado para a seguinte malha.

## DISCUSSÃO/RESULTADOS

### CARACTERIZAÇÃO DO ELEMENTO DE FIXAÇÃO

Numa primeira fase, procedeu-se à caracterização do elemento de fixação do tipo flow drilling screw, com o intuito de identificar possíveis revestimentos e tratamentos superficiais que pu-dessem impactar tanto o processo prático de aplicação, como o modelo numérico desenvolvido.

### ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise microestrutural foi efetuada recorrendo a um microscópio ótico Leica. A partir da visualização da Figura5, é possível constatar a presença de uma microestrutura mais refinada junto à superfície do elemento de fixação, tendo este sido submetido a um tratamento térmico superficial (ex: cementação ou carbonitruração).

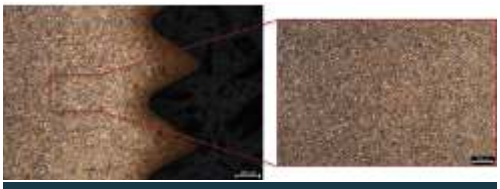


**FIGURA 5**
*Análise microestrutural do flow drill screw M5x18.*

### MEDIÇÃO DA MICRODUREZA

A medicão da microdureza foi realizada ao longo de toda a secção transversal do flow drill screw (carga 0.05 kgf). Esta medição foi efetuada em três amostras distintas. Os resultados alcançados, patentes na Figura 6, confirmam a presença de uma camada superficial endurecida nos elementos de fixação (case hardening). Deste modo, verificou-se uma dureza média no núcleo de 337 HV0.05 e uma dureza m´edia na superfície de 529 HV0.05. A espessura média da camada superficial endurecida é de aproximadamente 0.5 mm.

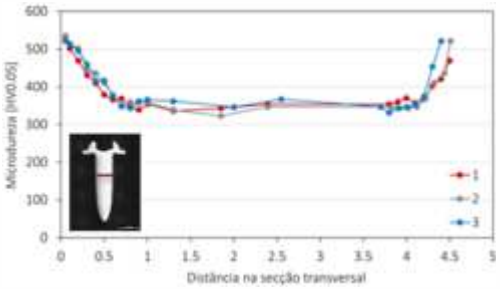



**FIGURA 6**
*Medição da microdureza (HV0.05) ao longo da secção transversal do flow drill screw.*

### ANÁLISE SEM-EDS

Os elementos de fixação do tipo flow drill screw foram também submetidos a microscopia eletrónica de varriment com microanálise por raios X, com o propósito de identificar a presença de revestimentos superficiais. Os resultados da análise SEM-EDS demonstram a presença de um revestimento superficial, ainda que com baixa uniformidade na sua espessura (Figura 7). Não obstante, a espessura m´edia do revestimento observado é de 4 a 6 mm, sendo constituído por Zinco e Níquel (Figura 8), de forma a promover a resistência à corrosão do elemento de fixação.

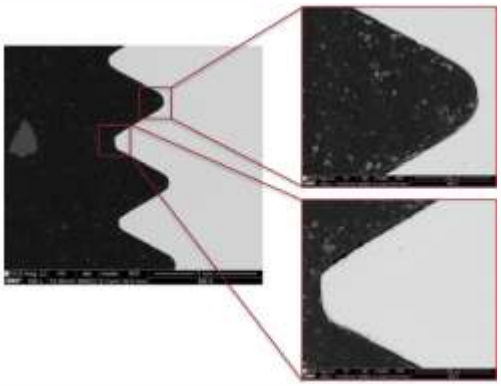


**FIGURA 7**
*Análise SEM-EDS realizada à superfície do flow drill screw: Imagem SEM - presença de revestimento.*

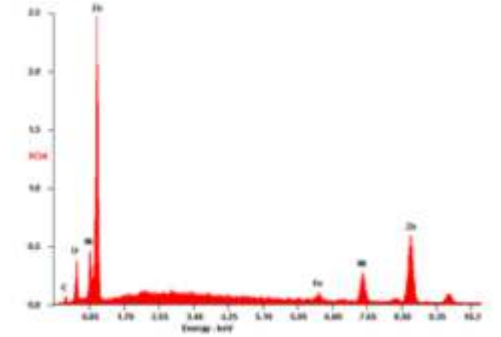


**FIGURA 8**
*Análise SEM-EDS realizada à superfície do flow drill screw: espectro EDS na zona de revestimento.*

### RESULTADOS DOS ENSAIOS DE APLICAÇÃO

A Figura 9 exibe uma das três ligações efetua-das aquando dos ensaios de aplicação dos elementos de fixação do tipo flow drilling screw, validando experimentalmente os parâmetros de processo adotados e aplicados posteriormente no modelo numérico desenvolvido.



**FIGURA 9**
*Junta aparafusada executada nos ensaios de aplicação dos elementos do tipo FDS.*

Tal como mencionado anteriormente, as juntas produzidas foram submetidas a ensaios de tração (shearing tests), com as seguintes condições: velocidade de ensaio 5 mm/min, taxa de aquisição 20 Hz, célula de carga 100 kN e pré-carga 250 N. Os resultados dos ensaios de shearing encontram-se apresentados nas Figuras 10 e 11.




**FIGURA 10**
*Resultados dos ensaios de tração (shearing tests): gráfico Força-Deslocamento.*



**FIGURA 11**
*Resultados dos ensaios de tração (shearing tests): comportamento típico da ligação.*

Deste modo, os resultados obtidos demonstram a repetibilidade dos ensaios efetuados, tendo sido alcançadas forças máximas da ordem dos 5.97 kN, o que demonstra a robustez da ligação mecânica. Durante a realização dos ensaios de tração, observou-se a deformação do furo roscado de alojamento do flow drill screw na chapa de alumínio, começando esta a deslizar sobre o parafuso (Figura 11).

## RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

### FORMAÇÃO DE ROSCA - INFLUÊNCIA DO TAMANHO INICIAL DA MALHA

Nas Figura 12 e 13, é possível observar a influência do tamanho inicial dos elementos no processo de remeshing para a obtenção da rosca. O refinamento da malha inicial desempenha um papel crucial na precisão da formação da rosca, afetando diretamente a qualidade e a definição do perfil final. Elementos de tamanho inicial mais fino resultam num perfil mais preciso, enquanto elementos de tamanho mais grosseiro levam a um perfil mais rugoso após a conformação, embora reduzam o tempo computacional.

Outra prova da influência do processo de remeshing, é visível através da formação da rosca ao longo dos intervalos de tempo na simulação DEFORM - Figura 14.

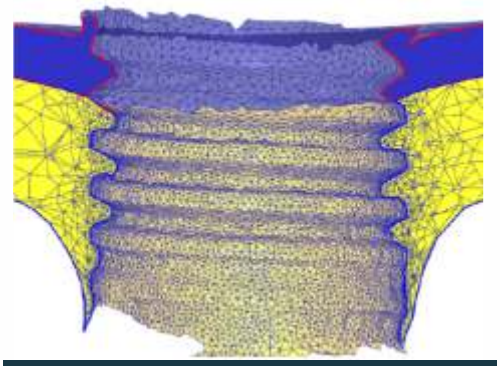


**FIGURA 12**
*Influência do tamanho inicial dos elementos de malha no processo de remeshing: rosca formada - malha inicial 0.1 mm.*

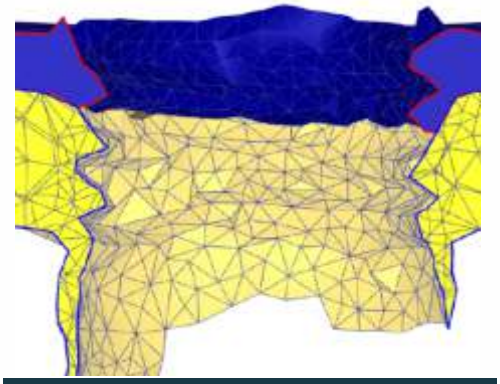


**FIGURA 13**
*Influência do tamanho inicial dos elementos de malha no processo de remeshing: rosca formada - malha inicial 0.5 mm.*

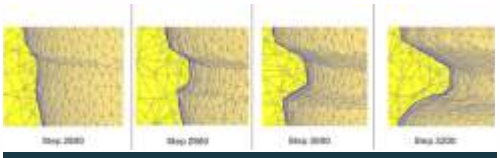


**FIGURA 14**
*Formação da rosca ao longo dos intervalos de tempo - software DEFORM.*

### CURVA FORÇA AXIAL VS TEMPO

O gráfico da evolução da força axial ao longo do tempo - Figura B.16 mostra que, no modelo desenvolvido, existe um pico de força axial de 1700 N na fase de penetração. Após a rutura das chapas, a fase de formação de rosca exige menos força. A fase de penetração ocorre entre 0 e 0.2 segundos, seguida da fase de formação de rosca entre 0.2 e 0.3 segundos, que envolve a formação do perfil de rosca padrão, sendo observado um patamar de força axial. Na etapa seguinte, o processo passa para a criação do perfil de rosca nos materiais base, onde ocorre a formação de aparas (superior e inferior). O pico de força axial observado perto dos 1.0 segundos deve-se ao efeito decorrido do binário de aperto do parafuso. Este comportamento da força axial ao longo do tempo deve-se à imposição de diferentes velocidades de avanço ao longo das

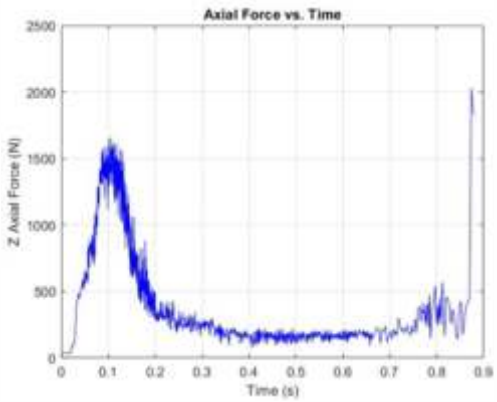



**FIGURA 15**
*Evolução da força axial no processo de flow drilling screw ao longo do tempo.*

## CONCLUSÕES

Com o crescente uso de flow drill screws (FDS) devido às suas vantagens na união de materiais dissimilares para aplicação na carroçaria dos automóveis, existe uma necessidade crescente de desenvolvimento de técnicas de modelação confiáveis, representativas das condições reais do processo de aplicação. Um modelo numérico foi desenvolvido para entender melhor o processo de flow drilling screw, focando na interação dos parâmetros do processo com as forças de reação resultantes. Deste modo, o modelo de-senvolvido permite aumentar a compreensão acerca do impacto dos parâmetros de processo adotados na qualidade da ligação gerada, nomeadamente na formação de aparas superio-res e inferiores, o que altera significativamente a durabilidade e o desempenho da junta sobre solicitações como tensão, compressão ou modo misto. Uma vez que se obtenha uma compreensão mais profunda destes fatores, será possível otimizar o design da rosca do parafuso para minimizar as forças e melhorar a formação das aparas superior e inferior, na área deformada plasticamente. Como resultado, diretrizes para diferentes espessuras e combinações de materi-ais serão desenvolvidas para aprimorar o de-sempenho das juntas produzidas por flow dril-ling screw. Neste estudo, foi desenvolvido um modelo de método de elementos finitos (FEM) no DEFORM 3D usando uma abordagem implí-cita e a técnica de remeshing foi aplicada para capturar com precisão o processo de formação de rosca. O modelo foi validado experimentalmente através da execução de uma ligação dissimilar "aço DP600 (espessura: 0.8 mm) - liga de alumínio Aw6082- T6 (espessura: 2.0 mm)", sendo alcançada uma união robusta entre os dois materiais. A resistência mecânica da ligação foi verificada através de ensaios de shearing (forças máximas alcançadas da ordem dos 5.97 kN). Os ensaios experimentais e numéricos demonstraram que é necessária uma força significativa durante a fase de penetração, enquanto as fases de formação de rosca e aper-to exigem consideravelmente menos força. Na modelação numérica verificou-se, ainda, que o tamanho inicial da malha influencia tanto a forma final da rosca, como a força requerida ao longo do processo de aplicação do flow drill screw. A caracterização realizada ao elemento de fixação permitiu constatar a presença de um tratamento térmico superficial (ex: cementação ou carbonitruração), tendo este uma dureza mé-dia na superfície de 529 HV0.05. A espessura média da camada endurecida é de aproximadamente 0.5 mm. Ademais, o elemento de fixação possui um revestimento superficial composto por Zn e Ni, com uma espessura média de 4 a 6 mm.

### TRABALHOS FUTUROS

No que diz respeito aos ensaios experimentais de aplicação dos elementos de fixação do tipo flow drill screw, as próximas etapas passam pela caracterização metalográfica das juntas alcançadas na união do aço DP600 à liga de alumínio AW6082-T6. Adicionalmente, será continuada a caracterização mecânica deste tipo de ligação, recorrendo a testes de *peeling* e a ensaios de fadiga para caracterização dinâmica das juntas concretizadas. Ademais, espera-se repetir os ensaios de aplicação e consecutivos métodos de caracterização, na união de um aço com superior resistência mecânica a uma liga de alumínio como, por exemplo, na ligação do aço DP780 à liga AW6082-T6. Relativamente aos ensaios de simulação numérica, a simulação no software DEFORM encontra-se já numa fase bastante avançada com eficácia na representação das fases de penetração e formação de rosca. No entanto, o modelo concebido poderá ser calibrado através de ensaios experimentais, recorrendo à aplicação de flow drilling screws com diferentes combinações de parâmetros de processo. A instrumentação da junta com sensores de temperatura, permitirá confirmar as propriedades dos materiais assumidas no modelo desenvolvido. O próximo passo de pesquisa será explorar a implementação do mesmo modelo no Abaqus usando uma abordagem Lagrangiana explícita, o que possibilita uma simulação mais precisa do comportamento das chapas para grandes deformações. Isso ajudará a gerir o remeshing de maneira mais eficiente e reduzir os custos computacionais. O processo será repetido tendo em conta os vários parâmetros, a fim de otimizar a formação das aparas, minimizar os espaços entre as chapas e examinar a temperatura para melhor controlar a morfologia dos grãos. Após a correta implementação da simulação do proces-so, torna-se essencial simular o comportamento do parafuso sob diferentes modos de carga:

tração, corte e modo misto. O passo final consiste na otimização da geometria do parafuso, o que implica compreender o design conjunto da ponta e da rosca progressiva. Esta otimização permitirá melhorar tanto a força e energia necessárias ao processo, assim como a formação de rebarba e da rosca interior para alojamento do flow drilling screw nos materiais base.

**AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o financiamento do projeto Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002), cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), atrav´es do apoio financeiro da República Portuguesa e do NextGeneration EU da União Europeia.

**REFERENCES**

Claus, L., Weitzel, S., 2014. Self-tapping fasteners for lightweight designs.Technical Report. SAE Technical Paper.

Cockcroft, M.G., Latham, D.J., 1968. Ductility and the workability of metals.Journal of the Institute of Metals 96, 33-39.

E. A. A. (EAA), 2013. The Aluminium Automotive Manual: Applications-Car Body-Crash Management Systems. European Aluminium Association.

EJOT GmbH Co. KG Industrial Fasteners Division, 2020. FDS® The Flow-Drill Screw for High-Strength Sheet Joints. 57319 Bad Berleburg, Germany.

Gardner, J.D., Dornfeld, D., 2006. Finite Element Modeling of Drilling Using DEFORM. Technical Report. UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Retrieved from https://escholarship.org/uc/item/9xg0g32g.

Ivanjko, M., Meschut, G., 2019. Innovative joining technology for multimaterial applications with high manganese steels in lightweight car body structures. Welding in the World 63, 97-106.

Lathabai, S., Tyagi, V., Ritchie, D., Kearney, T., Finnin, B., Christian, S., Sansome, A., White, G., 2011. Friction stir blind riveting: a novel joining process for automotive light alloys. SAE International Journal of Materials and Manufacturing 4, 589-601.

Li, D., Chrysanthou, A., Patel, I., Williams, G., 2017. Self-piercing riveting-a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 92, 1777-1824.

Liu, W., Zhu, X., Zhou, Q., He, H., Liu, J., Xu, C., Li, L., 2020. Modeling and simulation of the flow drill screw process of a dp590/al6061-t6 multimaterial joint used for vehicle body. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 110, 1-13. doi:10.1007/s00170-020-05909-3.

Sakiyama, T., Naito, Y., Yasunobu, M., Nose, T., Murayama, G., Saita, K., Oikawa, H., 2013. Dissimilar metal joining technologies for steel sheet and aluminum alloy sheet in auto body. Nippon Steel Technical Report , 91-98.

Skovron, J., Prasad, R., Ulutan, D., Mears, L., Detwiler, D., Paolini, D., Baeumler, B., Claus, L., 2015. Effect of thermal assistance on the joint quality of al6063-t5a during flow drill screwdriving. Journal of Manufacturing Science and Engineering 137.

Zhang, X., He, X., Xing, B., Wei, W., Lu, J., 2020. Pre-holed self-piercing riveting of carbon fibre reinforced polymer laminates and commercially pure titanium sheets. Journal of Materials Processing Technology 279, 116550.

Zhao, Y.G., Huang, Z.C., Jiang, Y.Q., 2022. Effect of low-velocity impact on mechanical property and fatigue life of dp590/aa6061 self-piercing riveted joints. Materials Research Express 9, 026514.

Zhou, Q., Yao, Z., Xu, C., Zhou, D., Liu, W., Li, L., 2023. Shared mechanism between flow drill screw and friction stir welding and its impact on failure prediction of steel-aluminum joints. Journal of Materials Processing Technology 311, 117796.

# NOVAS SOLUÇÕES DE FERRAMENTAS PARA A FURAÇÃO DE MULTI-MATERIAIS CFRP/METAL

**Rúben D. F. S. Costa[1,2*], Tiago E. F. Silva[2], Abílio M. P. de Jesus[1], Francisco J. G. Silva[2,3], Marcelo F. S. F. de Moura[1], Daniel A. Figueiredo[4]**

**1** DEMec, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal.
**2** INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Industrial, Rua Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal.
**3** CIDEM, ISEP, Politécnico do Porto, Rua Dr. Bernardino de Almeida 431, 4200-072 Porto, Portugal.
**4** Palbit S.A., Departamento de Desenvolvimento de Produto, P.O. Box 4, 3854-908 Branca, Portugal.

***Os multi-materiais, para além de possuírem um elevado rácio resistência/peso, apresentam ainda elevada rigidez e resistência à corrosão, impacto, fratura e fadiga, sendo por isso cada vez mais usados na indústria automóvel. Apesar de serem fabricados na forma quase final, o processo de furação continua a ser necessário para a montagem de componentes, no entanto este traz desafios significativos devido à elevada abrasão das fibras do material compósito e à necessidade de as ferramentas terem de cortar materiais dissimilares em simultâneo. Estes fatores contribuem para o surgimento de defeitos nos furos e para um desgaste mais rápido das ferramentas, prejudicando a eficiência do processo de maquinagem. Neste artigo, placas de multi-material formadas por camadas de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) e de alumínio (Al2024-T3) em duas configurações distintas foram furadas com ferramentas WC-Co revestidas a diamante CVD, de modo a inferir acerca da combinação de parâmetros (avanço e velocidade de corte) e condições necessárias para melhorar o processo e mitigar a delaminação. Verificou-se que valores mais elevados de avanço resultam em maior delaminação, enquanto o incremento da velocidade de corte reduz este dano. Foram também realizados ensaios de caracterização à fratura, através do ensaio Double Cantilever Beam (DCB), para determinar a força máxima no início da delaminação através da tenacidade à fratura do compósito, para evitar danos no furo e na superfície. Para tal, foi identificado um modelo de peel-up da mecânica da fratura e efetuada a sua validação numérico-experimental com sucesso. No futuro, o envelope de fratura completo será usado (em vez de apenas o modo I puro), para maior proximidade com as condições reais.***

*Multi-materials, besides possessing a high strength-to-weight ratio, present a high stiffness, and corrosion, impact, fracture and fatigue resistance, which is why they are increasingly used in the automotive industry. In spite being manufactured in near-net shapes, the drilling process remains necessary for component assemblies; however, it poses significant challenges due to the high abrasiveness of composite fibres and the requirement for tools to cut through different materials simultaneously. These factors contribute to hole damage and faster tool wear, hindering the efficiency of the machining process. In this paper, multi-material stacks composed of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) and aluminium (Al2024-T3) layers in two distinct configurations were drilled with CVD diamond coated WC-Co tools to infer on parameter combination (feed and cutting speed) and conditions required to improve the process and mitigate delamination. It was found that higher feed values result in greater delamination, whereas the increment in cutting speed reduces this damage. Fracture characterization tests were performed, through the double cantilever beam (DCB) tests, to determine the maximum force on the onset of delamination through the composite's fracture toughness, to prevent hole and surface damage. For that, the identification of a fracture mechanics peel-up model and its numerical-experimental validation has been successfully performed. In the future, the complete fracture envelope will be used (instead of just pure mode I), to be closer to the real conditions.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
MULTI-MATERIAIS; FURAÇÃO; FERRAMENTAS REVESTIDAS POR CVD; MODELAÇÃO; MECÂNICA DA FRATURA.
*Multi-material stacks; drilling; CVD coated tools; modelling; fracture mechanics.*

## INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos foram introduzidos no setor industrial para solucionar problemas decorrentes do uso de metais, nomeadamente na redução do peso, com vista à poupança de combustível nas indústrias de transportes, como é o caso do automóvel [1]. Apesar disto, estes materiais também carecem de algumas propriedades essenciais, como integridade estrutural, tolerância ao dano e condutividade térmica, razão pela qual uma solução diferente tinha de ser desenvolvida. Os multi-materiais, como é o caso dos laminados reforçados com fibra de carbono e alumínio (CFRP/Al), também conhecidos como CARALL, constituem uma melhoria neste setor, sendo cada vez mais importante devido à combinação das propriedades de ambos os materiais. A maior resistência e rigidez dos metais aliada à leveza, resistência à corrosão, impacto, fratura e fadiga dos compósitos, entre outras características, levou ao desenvolvimento de soluções de multi-materiais [2,3].

A furação é uma operação essencial para a montagem de componentes de multi-material para a indústria automóvel, dado que estes requerem processos de furação para permitir a utilização de fixações mecânicos através do uso de rebites ou parafusos [4]. Estas operações constituem um desafio acrescido devido à natureza abrasiva e anisotrópica das fibras do material compósito, gerando defeitos no material, como a delaminação das fibras compósitas [5], arrancadas durante o processo de furação pela ação rotativa da ferramenta, ou a rebarba do alumínio, uma acumulação deste metal ao redor do furo [6]. Para além disto, a necessidade de a broca ter de cortar dois materiais diferentes em simultâneo, resulta ainda num desgaste elevado da mesma principalmente na zona de interface, sendo os dois tipos mais comuns o desgaste abrasivo, causado pela ação das fibras compósitas, e a aresta postiça, devido à adesão do alumínio à ferramenta [7-9]. Por este motivo, geralmente são adotados revestimentos nas ferramentas, para aumentar a sua vida útil e assim aumentar a viabilidade económica do processo. De acordo com a literatura, os revestimentos de diamante possuem bons resultados na melhoria do desempenho das ferramentas na furação de multi-materiais [10,11]. Assim, obter furos livres de defeitos e manter a sua integridade estrutural são aspetos críticos, razão pela qual o estudo deste processo é fundamental para a sua otimização [12].

Dois mecanismos de delaminação geralmente ocorrem durante a furação são o "peel-up" na entrada e o "push-out" na saída do furo. Vários modelos podem ser encontrados na literatura que correlacionam a força crítica para o início da delaminação com a tenacidade à fratura do material de acordo com a mecânica da fratura linear elástica (LEFM). Durante o processo de furação, apesar de uma combinação de três modos de carregamento ocorrer, nomeadamente o modo I (abertura) e modo III (corte por rasgamento) para o peel-up e o modo I e modo II (corte por deslizamento) para o push-out, o modo I é o predominante, razão pela qual só o $G^{ic}$, tenacidade à fratura em modo puro I, é geralmente considerada nos modelos apresentados e respetivas aplicações [13].

## MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta os materiais e equipamentos usados nos ensaios de furação. Duas configurações de multi-materiais de dimensões 200x200x4,5 mm foram usadas, cada uma composta por três camadas alternadas de compósito reforçado com fibra de carbono (CFRP) e alumínio da liga 2024 com o tratamento térmico T3 (Al2024-T3) de igual espessura, 1,5 mm. O primeiro tipo de placa possuía o compósito nas extremidades e o alumínio no interior (CFRP/Al/CFRP), designada por tipo I (Figura 1a), e a segunda configuração de placa, tipo II (Figura 1b), tinha a geometria oposta, isto é, com o alumínio nas extremidades e o compósito no interior. As camadas de CFRP

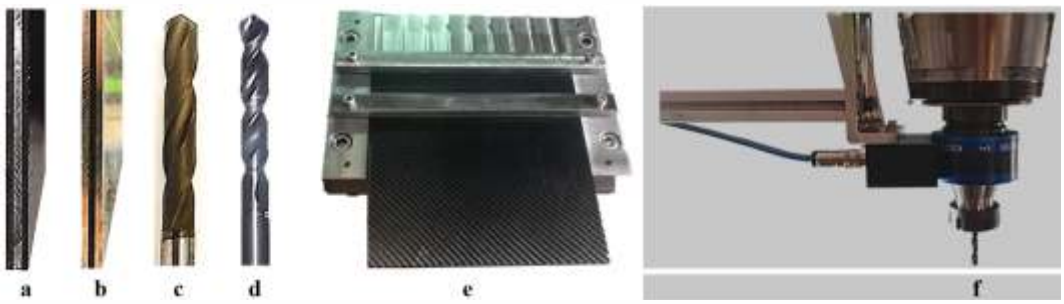



**FIGURA 1**
*(a) Multi-material tipo I e (b) tipo II, (c) broca tipo N, (d) broca tipo W, (e) sistema de fixação do multi-material com uma placa de tipo I, (f) setup da broca com o dinamómetro Kistler.*

eram caracterizadas por uma orientação de fibras de tecido 0/90° e uma resina termoendurecível epoxy foi usada para a sua impregnação com um volume de fibras resultante de 79%. Cada camada de CFRP era constituída por 7 folhas de 0.22 mm de espessura. As ferramentas de corte usadas eram duas brocas de carboneto de tungsténio (WC-Co) com revestimento de diamante por deposição química de vapor de filamento quente (HF-CVD). Estas possuíam geometrias diferentes, a primeira do tipo N (Figura 1c), com um diâmetro de 6 mm, ângulo de ponta de 120º e ângulo de hélice de 30º, e a segunda do tipo W (Figura 1d), com um diâmetro de 6,4 mm, ângulo de ponta de 140º e ângulo de hélice de 37º.

Um centro de maquinagem universal (DMG Mori DMU 60 eVo) foi utilizado em todos os ensaios de furação, juntamente com um sistema de fixação fixo à mesa do centro de maquinagem para um suporte adequado ao multi-material durante os ensaios (Figura 1e). As forças de corte e binários foram medidos com recurso a um dinamómetro rotativo Kistler tipo 9170A montado no fuso (Figura 1f) e de um sistema de aquisição de dados. O dinamómetro é acoplado a um condicionador de sinal Kistler tipo 5238B, que por sua vez está ligado a um sistema de aquisição de dados Kistler tipo 5697, permitindo a ligação com o software Kistler DynoWare para análise dos resultados. Relativamente à análise dos furos, para avaliação dos danos por delaminação, a superfície dos furos foi examinada através de um microscópio digital USB DinoLite AM-4031MZTL, ligado ao software DinoCapture 2.0, para recolha e visualização de imagens, que também foi utilizado para a análise do desgaste das ferramentas.

A Tabela 1 contém os diferentes parâmetros usados nos ensaios de furação. Estes iniciaram-se com o multi-material tipo I e várias combinações diferentes foram testadas, com o objetivo de avaliar a influência que cada parâmetro tinha nas forças resultantes e também na delaminação registada nos furos. Os ensaios efetuados com a broca de tipo N tinham por objetivo analisar os defeitos no multi-material, enquanto para a broca de tipo W foi produzido um número muito superior de furos, de modo a avaliar o desgaste da ferramenta. No multi-material tipo II foram feitos muito menos ensaios, dado que a quantidade de defeitos gerados foi bastante inferior à do tipo I, para além de serem pouco significativos, portanto não constituíam um desafio tão relevante para resolver.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 representa um gráfico com a progressão das forças de corte e dos binários de acordo com as combinações de parâmetros apresentadas na Tabela 1. Pela sua observação, é possível constatar que tanto as forças como os binários seguiram a mesma tendência, tendo sido mais baixas para os mesmos avanços quando a velocidade de corte aumenta (combinação de parâmetros C para a D, ou E para a F). Por outro lado, quando a velocidade de corte se mantém e o avanço aumenta, tanto as forças como os binários aumentam significativamente, resultando num maior consumo de energia (combinação de parâmetros C para E, ou D para F).




**FIGURA 2**
*Valores máximos de força de corte e binário obtido durante os ensaios de furação.*

A Figura 3 apresenta alguns tipos de problemas gerados durante o processo de furação. Na Figura 3a está representado um caso de delaminação no multi-material tipo I, o defeito mais severo deste processo, devido ao arrancamento das fibras do compósito que compromete a sua integridade estrutural. Na Figura 3b encontra-se o defeito presente no multi-material tipo II, as rebarbas metálicas que ficam presentes em redor do furo, devido à acumulação de alumínio

**TABELA 1**
*Parâmetros de corte testados nos ensaios de furação.*

| Placa | Tipo I | | | | | | | | | Tipo II | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Geometria da broca | Tipo N | | | | | | | Tipo W | | Tipo N | Tipo W |
| Combinação de parâmetros | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
| Avanço [mm/rev] | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,05 | 0,3 | 0,05 | 0,05 | 0,2 |
| Velocidade de corte [m/min] | 50 | 100 | 150 | 300 | 150 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 150 |
| Número de furos | 3 | 3 | 44 | 10 | 10 | 10 | 45 | 15 | 360 | 45 | 360 |




**FIGURA 3**
*(a) Furo E com delaminação crítica do CFRP no multi-material tipo I, (b) rebarba do alumínio no multi-material tipo II, (c) apara resultante com os dois materiais aderidos, e desgaste abrasivo (d) e apara postiça (e) registado nas brocas.*

nesta zona. A Figura 3c demonstra uma apara resultante da furação, realçando a boa adesão entre o CFRP e o alumínio. As Figuras 3d e 3e representam, respetivamente, os dois mecanismos de desgaste ocorridos no processo de furação, nomeadamente o desgaste abrasivo para o multi-material tipo I, devido à abrasão excessiva das fibras compósitas, e a apara postiça para o multi-material tipo II, devido à adesão do alumínio às arestas de corte primárias da broca.

De modo a poder aplicar um modelo de fratura e relacioná-lo com os ensaios de furação realizados no multi-material tipo I, onde ocorreu delaminação, o modelo de Ho-Cheng e Dharan [14] (equação 1) foi usado, dado ser um dos poucos modelos que se aplica ao "peel-up", isto é, à delaminação das fibras à entrada do furo, que foi o caso ocorrido nos ensaios em estudo, ao contrário do "push-out", a delaminação à saída, presente na maioria dos casos na literatura. Este considera o $k^{p}$, o fator de arrancamento, sendo este calculado através do rácio da força de corte horizontal e da força crítica de arrancamento. Também usa as propriedades mecânicas do material, entre as quais o Módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (v). Sendo um arrancamento de fibras na face de entrada, é assumido que a ocorrência de delaminação depende da espessura de furo cortado, que é o resultado da espessura total do furo à qual é retirada a espessura por cortar (H-h). Finalmente, o fator mais importante é a tenacidade à fratura em modo I ($G^{Ic}$), que foi calculada através de ensaios DCB (Double Cantilever Beam).

$$F_{crit} = k_p \pi \left[ \frac{8 G_{Ic} E (H-h)^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad \text{(Equação 1)}$$

A Figura 4 dispõe 3 furos com diferentes níveis de delaminação designados através dos códigos das combinações de parâmetros apresentadas anteriormente para a aplicação deste modelo: furo G com ausência de delaminação, furo B com início de delaminação e furo E com delaminação crítica, tendo esta uma profundidade de 0,217 mm.

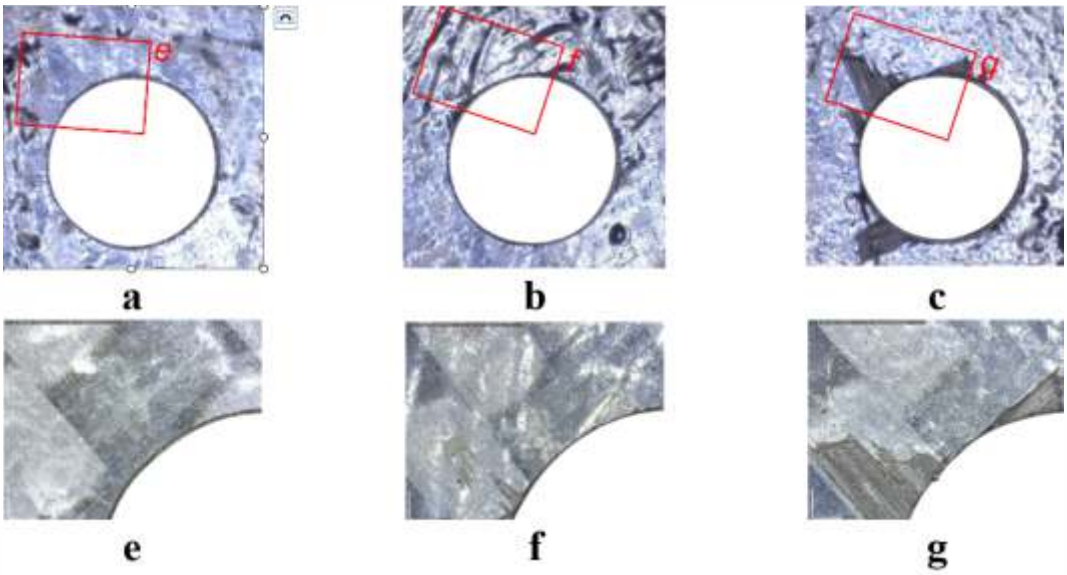



**FIGURA 4**
*Nível de delaminação das combinações de parâmetros testadas: (a), (e) furo G - f_z = 0,05 mm/rev e v_c = 300 m/min com ausência de delaminação; (b), (f) furo B - f_z = 0,1 mm/rev e v_c = 100 m/min com início de delaminação; (c), (g) furo E - f_z = 0,3 mm/rev e v_c = 150 m/min com delaminação crítica; (d) imagem raio-x do furo E com ausência de intradelaminação; (h) vista seccionada do furo E com a profundidade de delaminação.*

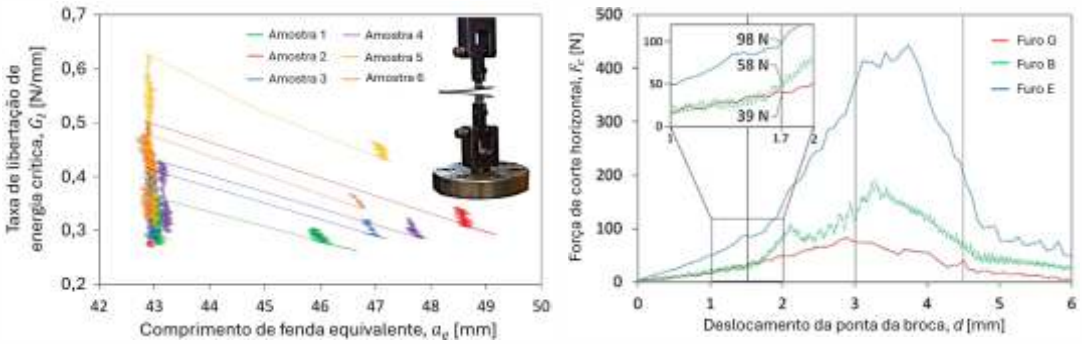



**FIGURA 5**
*(a) Curvas de resistência dos ensaios de fratura DCB com o setup do ensaio; (b) evolução da força de corte horizontal para os furos considerados.*

Na Figura 5 constam dois gráficos com resultados importantes para o cálculo da força crítica no modelo apresentado na equação 1. A Figura 5a apresenta o setup do ensaio DCB e respetivos resultados, tendo um valor de $G^{Ic}$ contido no intervalo de 0.283 a 0.434 N/mm. Já a Figura 5b mostra os valores da força de corte horizontal nos 3 furos considerados no ponto no qual o diâmetro total da broca começa a cortar o material. Os valores de E e v do multi-material foram calculados com base numa proporção entre as mesmas propriedades de cada um dos materiais constituintes. No caso do $k_p$, é um rácio entre a pressão específica de corte horizontal e vertical onde as forças axiais são superiores às verticais, sendo igual a 0.46 para efeitos de modelação.

Aplicando os conceitos e valores apresentados anteriormente, obtiveram-se os intervalos de força crítica presentes na Tabela 2. Daqui, pode-se claramente constatar que a força de corte horizontal apenas excedeu este intervalo na primeira folha, tendo ocorrido só nos furos B e E, resultado de acordo com o observado nas imagens de microscópio presentes na Figura 4. Ainda assim, o furo B excedeu ligeiramente o valor máximo do intervalo, o que explica a sua delaminação numa fase inicial, mas o furo E excedeu em mais do dobro desse valor, justificando a delaminação severa observada no mesmo. Nas outras folhas, todas as forças encontram-se abaixo do limite máximo do intervalo de força crítica, portanto não se deu delaminação nestes casos, como o espectável.

## CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto dos diferentes parâmetros de corte nas forças obtidas e na qualidade dos furos durante a furação de multi-materiais CFRP/Al com o uso de brocas helicoidais convencionais com revestimento de diamante por CVD. Através dos ensaios, verificou-se que tanto as forças como a delaminação nos furos aumentou com o aumento do avanço, o fator com maior impacto nos resultados. Por outro lado, o aumento da velocidade de corte levou a uma redução das forças obtidas, bem como a menor delaminação. Em termos de resultados nos materiais, foram geradas aparas de alumínio com fragmentos de CFRP aderidos, demonstrando uma boa adesão entre os dois materiais dos multi-materiais. Quanto ao desgaste das ferramentas, ao fim de 345 furos foi registado desgaste abrasivo na broca que furou as placas de tipo I, por ter maior quantidade de material compósito e, por conseguinte, fibras, que causaram maior abrasão. Já na broca das placas de tipo II, observou-se uma apara postiça nas arestas de corte principal, devido à maior quantidade de alumínio no multi-material. Foi ainda usada uma abordagem com base na mecânica da fratura, onde se usou um modelo de fratura para previsão de delaminação peel-up a partir da tenacidade à fratura do CFRP em modo I, obtida

**TABELA 2**
*Forças de corte horizontal críticas estimadas para o modelo de peel-up.*

| Número da folha | Posição, *h* | E | *v* | Intervalo $F_{crit}$ | $F_c$ no furo | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | G | B | E |
| - | [mm] | [MPa] | - | [N] | | [N] | |
| 1 | 0,22 | 67014 | 0,19 | 34 to 43 | 39 | 58 | 98 |
| 2 | 0,44 | 67617 | 0,20 | 98 to 123 | 46 | 69 | 120 |
| 3 | 0,66 | 68333 | 0,22 | 182 to 225 | 54 | 99 | 179 |

através de ensaios DCB. Com este modelo, a força máxima admissível pelo material foi determinada e comparada com as forças atingidas durante o ensaio de furação, tendo identificado com sucesso a ocorrência de delaminação exclusivamente na primeira folha do CFRP nos furos realizados com um avanço de 0,3 mm/rev e uma velocidade de corte de 150 m/min e, por conseguinte, a sua ausência nos furos com avanço de 0,1 mm/rev e velocidade de corte de 100 m/min.


## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento do Projeto Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002) cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), Rep. Portuguesa através da Next-Gen EU.


## REFERÊNCIAS


**[1]** A. Muhammad, M. R. Rahman, R. Baini, and M. K. Bin Bakri, "Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry," *Advances in Sustainable Polymer Composites*, pp. 185-207, 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-820338-5.00008-4.

**[2]** R. D. F. S. Costa, R. C. M. Sales-Contini, F. J. G. Silva, N. Sebbe, and A. M. P. Jesus, "A Critical Review on Fiber Metal Laminates (FML): From Manufacturing to Sustainable Processing," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 4, 2023, doi: 10.3390/met13040638.

**[3]** K. Lakshmi Kala and K. Prahlada Rao, "Synthesis and characterization of fabricated fiber metal laminates for aerospace applications," *Mater Today Proc*, vol. 64, pp. 37-43, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.488.

**[4]** L. Zhang, Z. Liu, W. Tian, and W. Liao, "Experimental studies on the performance of different structure tools in drilling CFRP/Al alloy stacks," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 81, no. 1-4, pp. 241-251, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6955-z.

**[5]** J. Xu, C. Li, S. Mi, Q. An, and M. Chen, "Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria," *Compos Struct*, vol. 201, pp. 1076-1087, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.051.

**[6]** C. Devitte, G. S. C. Souza, A. J. Souza, and V. Tita, "Optimization for drilling process of metal-composite aeronautical structures," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 264-275, 2021, doi: 10.1515/secm-2021-0027.

**[7]** B. Zhong, F. Zou, Q. An, M. Chen, H. Zhang, and C. Xie, "Experimental study on drilling process of a newly developed CFRP/Al/CFRP co-cured material," *J Manuf Process*, vol. 75, pp. 476-484, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.12.062.

**[8]** A. D'Orazio, M. El Mehtedi, A. Forcellese, A. Nardinocchi, and M. Simoncini, "Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools," *J Manuf Process*, vol. 30, pp. 582-592, 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.10.019.

**[9]** X. Wang, P. Y. Kwon, C. Sturtevant, D. D. W. Kim, and J. Lantrip, "Tool wear of coated drills in drilling CFRP," *J Manuf Process*, vol. 15, no. 1, pp. 127-135, 2013, doi: 10.1016/j.jmapro.2012.09.019.

**[10]** C. Kuo, Z. Li, and C. Wang, "Multi-objective optimisation in vibration-assisted drilling of CFRP/Al stacks," *Compos Struct*, vol. 173, pp. 196-209, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.04.026.

**[11]** S. L. Soo, A. M. Abdelhafeez, M. Li, R. Hood, and C. M. Lim, "The drilling of carbon fibre composite-aluminium stacks and its effect on hole quality and integrity," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 233, no. 4, pp. 1323-1331, 2019, doi: 10.1177/0954405417728312.

**[12]** R. D. F. S. Costa, J. N. S. Duro, V. F. C. Sousa, T. E. F. Silva, D. A. Figueiredo, and A. M. P. Jesus, "Drilling of CFRP/Al multi-material stacks using WC-Co CVD diamond coated tools," *Procedia Structural Integrity*, vol. 53, no. 2023, pp. 376-385, 2024, doi: 10.1016/j.prostr.2024.01.044.

**[13]** F. Marques, F. G. A. Silva, T. E. F. Silva, P. A. R. Rosa, A. T. Marques, and A. M. P. de Jesus, "Delamination of Fibre Metal Laminates Due to Drilling: Experimental Study and Fracture Mechanics-Based Modelling," *Metals (Basel),* vol. 12, no. 8, pp. 1-15, 2022, doi: 10.3390/met12081262.

**[14]** H. Ho-Cheng and C. K. H. Dharan, "Delamination During Drilling in Composite Laminates," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 112, no. 3, pp. 236-239, Aug. 1990, doi: 10.1115/1.289958

# FERRAMENTAS DE CORTE AFIADAS A LASER PARA FRESAGEM DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO

**Francisco Matos[1], Tiago E.F. Silva [1,2], Bruno Guimaraes [3], Ruben D.F.S Costa[1,2], Daniel Figueiredo[3], Carlos Saraiva[4], Abílio M.P. de Jesus[1,2], Ana R. Reis[1],**

**1** INEGI, R. Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal
**2** DEMec, Dep. de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, R. Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal
**3** Palbit S.A., P.O. Box 4, 3854-908 Branca, Portugal
**4** MCG, Rua Manuel Conceição Graça, Carregado, 2580-462, Portugal

***O uso de polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) conquistou o seu lugar em aplicações que envolvem a produção em massa de componentes com características específicas, especialmente nas indústrias aeroespacial e automóvel. Apesar de serem fabricados em formatos próximos ao desejado (near-net shape), a maquinagem de componentes CFRP é frequentemente necessária para garantir tolerâncias dimensionais. A necessidade de melhorar a capacidade de processamento e o custo de produção tem aumentado, especialmente considerando os desafios associados às operações de corte em CFRP, como a delaminação, o baixo acabamento superficial e o desgaste acelerado das ferramentas.***

***Na fresagem de CFRP são utilizadas ferramentas de diamante policristalino (PCD), no entanto, estas têm um elevado custo, o que limita a sua viabilidade económica, para além do inerente enfraquecimento da geometria (devido à baixa tenacidade do PCD e arestas extremamente afiadas), o que reduz a longevidade da ferramenta. As ferramentas de metal duro (WC-Co) revestido com diamante e arestas afiadas por laser representam uma alternativa relativamente económica face às ferramentas de PCD. Este estudo apresenta uma solução que faz uso de ferramentas de metal duro com arestas afiadas por laser e revestidas por uma espessa camada de diamante através de deposição química em fase de vapor por filamento quente (HF-CVD). Foram realizadas operações de fresagem de contorno instrumentadas (acabamento de arestas), tendo sido atingido um aumento no desempenho de corte, superfícies com bom acabamento, e um desgaste negligenciável da aresta de corte revestida. Futuramente pretende-se comparar estas novas ferramentas com ferramentas direcionadas para operações de maquinagem de materiais abrasivos, de forma a avaliar as suas vantagens relativas durante testes extensivos de desgaste de ferramentas.***

*The use of carbon fibre reinforced polymers (CFRP) has transitioned towards applications with large-scale manufacturing with specific desired material characteristics, such as in the aerospace and automotive industries. Despite being manufactured in a near-net shape, machining of CFRP is often necessary to meet dimensional tolerances. The requirement to improve both the processing capability and production cost is heightening given the challenging cutting operations of CFRP, with common issues arising such as machining-induced delamination, poor surface finish and increased tool wear. Sharp polycrystalline diamond (PCD) tools are often employed during CFRP milling, however these are not economically practical due to their high cost, geometric construction limitation and inherent weakening of their geometry (due to relative low toughness and very sharp edges), leading to decreased tool longevity. Sharp diamond-coated carbide tools represent a cost-effective alternative to PCD tools. A novel approach is presented utilizing a high-thickness HF-CVD (Hot-Filament Chemical Vapor Deposition) diamond coated carbide milling tool, with laser sharpened edges, which was used for investigating the effect of coating on cutting force and surface quality of fibre reinforced composites. Instrumented experimental tests in contour milling operations demonstrated the increased cutting performance for achieving well-finished surfaces, with negligible rounding of the coated cutting edge. Future studies will compare these tools with standard PCD coated tools without laser sharpened edges to evaluate their relative advantages in machining applications during extensive tool wear tests, when machining abrasive materials, such as CFRP.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
FRESAGEM CONTORNOS, LASER; PRODUTIVIDADE, REVESTIMENTO DE DIAMANTE;
*Edge trimming, Laser sharpened; High productivity diamond-coated carbide tools;*

## INTRODUÇÃO

As indústrias automóveis e aeroespaciais têm sido confrontadas com a difícil tarefa de reduzir o peso dos veículos de forma a minimizarem o consumo de energia e reduzirem as emissões de poluentes. Tal permitiu que os materiais compósitos ganhassem um lugar permanente em componentes que procuram ser otimizados em termos de estrutura e peso. A crescente prevalência do uso de polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRPs) em várias áreas da engenharia é devida às suas propriedades mecânicas/físicas superiores, bem como às suas excelentes funções estruturais [1]. A fibra de carbono é um material anisotrópico conhecido pela sua baixa densidade, baixa condutividade, resistência à fadiga, elevado módulo de elasticidade, bom comportamento à fluência e moderada resistência a efeitos químicos [2]. Apesar da maioria dos componentes serem fabricados near-net shape, grande parte destes requer operações de maquinagem secundárias, como a fresagem de contornos e furação. Além disso, à medida que as tolerâncias dimensionais em aplicações exigentes se tornam mais rigorosas, há uma necessidade crescente de operações de corte precisas, que continuam a ser o principal método de pós-processamento. Os mecanismos de corte presentes durante a maquinagem de compósitos CFRP são complexos devido à natureza heterogénea do material, que consiste em simultaneamente em fibras de carbono duras e numa matriz polimérica relativamente mais macia. O corte da fibra de carbono é caracterizado primariamente pela fratura e arrancamento de fibras devido a forças de corte e compressão. A maquinagem de CFRP continua a ser um desafio, devido à integridade superficial inconsistente, delaminações, formação de rebarba e à vida curta da ferramenta de corte, devido ao efeito abrasivo das fibras de carbono na mesma. As propriedades físicas dependentes da orientação das fibras e da sequência de empilhamento representam um desafio significativo na maquinagem de CFRP, e abrem um vasto leque de possibilidades para investigação. Estudos anteriores indicam que a formação de aparas é altamente dependente do ângulo de corte da fibra: para um ângulo de corte de 0º, a formação de aparas é do tipo delaminação-flexão; para um ângulo de corte de 45º, é do tipo corte; para 90º, a formação de aparas é devida à encurvadura e ao corte por banda cinética; para 120º a formação da apara pode ser devido à encurvadura ou à flexão (sendo esta dominante) [3]. O aumento da velocidade de corte permitiu obter melhor qualidade na maquinagem e causou menores forças de corte durante o corte de arestas [4]. Para além disso, os ângulos ataque positivos (0°< l 0 < 20°) mostram ser benéficos para qualidade da superfície fresada, assim como o aumento do ângulo de saída, reduzindo assim a área de contacto entre a ferramenta e o material [5]. Um ângulo de ataque negativo altera o tipo de mecanismo de formação de apara: neste caso, as aparas são normalmente mais segmentadas, e, ao mesmo tempo, a força passiva também aumenta devido ao aparecimento do modo de fratura II (corte no plano) e ao corte entre camadas. As caraterísticas da microestrutura influenciam significativamente o afiamento do gume da ferramenta [6]. Recentemente foi demostrada a forte influência dos tratamentos da aresta de corte através da ablação a laser, após o revestimento, nas forças do processo de corte e no comportamento de desgaste da ferramenta. As ferramentas com superfícies texturizadas conseguem produzir aparas sob a forma de segmentos menores ao alterarem a forma de flexão das fibras, no entanto não foi observada uma diminuição na rugosidade da peça de CFRP maquinada [7]. Várias pesquisas sobre o desgaste de ferramentas incidiram sobre as fresas de topo de metal duro não revestido, tendo sido obtida uma vida útil relativamente baixa com parâmetros de corte suaves [8], [9], [10]. Em contraste com as ferramentas de metal duro sem revestimento, as ferramentas revestidas com diamante policristalino parecem oferecer uma vida útil significativamente maior em aplicações de corte de alto avanço e alta velocidade [11], [12].

A fresagem de contorno é usada para remover material residual resultante do processo de manufatura dos compósitos e para obter a propriedades geométricas desejadas. Várias publicações analisaram e discutiram meticulosamente os desafios, as tecnologias e as soluções associadas à furação de CFRP. No entanto, há ainda espaço para a investigação na área da fresagem de contornos, em que as rebarbas e a delaminação induzidas pela maquinagem não só afetam a resistência do componente, mas também o início e a velocidade de propagação de falhas [13], [14]. Além disso, as questões sobre o impacto dos parâmetros de corte no desgaste da ferramenta, forças do processo e qualidade da peça permanecem em aberto. Por isso, foi efetuado um estudo preliminar sobre o desempenho de ferramentas de metal duro, com revestimento de diamante de alta espessura (HF-CVD), afiadas a laser em operações de contorno.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### MATERIAIS, FERRAMENTAS E APARATO EXPERIMENTAL

O material consistiu em laminados CFRP, unidirecionais (UD) e com camadas cruzadas (0°/90°), fabricados com fibra de carbono T700, e com uma dimensão de 200 mm × 200 mm × 3 mm. Os laminados foram preparados manualmente, sendo constituídos por 14 camadas com

uma espessura de 0,22 mm. A Tabela 1 resume as propriedades gerais do compósito CFRP utilizado nos testes experimentais.

**TABELA 1**
*Propriedades gerais do compósito testado.*

| | |
|---|---|
| Volume de fibra de carbono [%] | 65 |
| Espessura da camada [mm] | 0.22 |
| Número de camadas | 14 |
| Fibra | T300 |
| Matriz | Epoxy (Sicomin UN 3082) |
| E [GPa] | 100 (UD) / 60 (cross-ply) |

Foram utilizas fresas helicoidais de 3 mm de diâmetro, com 3 gumes e 5° de angulo de hélice. Estas possuem um revestimento de diamante e arestas de corte afiadas por laser, tendo sido obtida uma aresta de corte com um raio de 0.006 mm. As ferramentas de corte são compostas por um substrato de WC-5Co com um tamanho médio de grão de WC de 1,5 µm e uma dureza de 1780 HV10, totalmente fabricadas pela Palbit S.A. O seu revestimento foi efetuado através do método de deposição química de vapor por filamento quente (HF-CVD) utilizando camadas de diamante nano e microcristalino, com uma espessura média do revestimento de 16 µm.

Os ensaios experimentais foram realizados num centro de maquinagem (DMG Mori DMU 60 eVo). Os esforços e momento de corte foram medidos através de um dinamómetro rotativo (Kistler 9170A) montado na árvore da máquina. O estator é ligado a um condicionador de sinal Kistler 5238B, por sua vez ligado a um sistema de aquisição de dados Kistler 5697. O aparato experimental é mostrado na Figura 1. A medição da rugosidade da superfície maquinada foi realizada com um rugosimetro portátil (Mitutoyo Surftest SJ-210R). A sonda foi colocada em contacto com a superfície fresada em cinco regiões




**FIGURA 1**
*Aparato experimental usado nos ensaios instrumentados de fresagem.*

diferentes, sendo a medição efetuada na direção do avanço.

### MÉTODOS

Os testes experimentais conduzidos tiveram como objetivo investigar o desempenho da ferramenta e o efeito da orientação das fibras e da velocidade de avanço durante o corte de placas de CFRP. Os parâmetros de maquinagem, listados na Tabela 1, incluíram três níveis de avanço e três direções de corte das placas de CFRP. Estes têm como objetivo representar a utilização industrial típica. Cada ferramenta de corte foi sujeita a aproximadamente 10 metros de corte, tendo esta sido inspecionada e a rugosidade superficial medida, a cada 1 metro de comprimento de corte, durante a campanha experimental.

**TABELA 2**
*Parâmetros de corte.*

| | |
|---|---|
| Cutting speed, [m/min] | 160 |
| Espessura da camada [mm] | 1500, 3000, 4500 |
| Número de camadas | 3 |
| Profundidade radial de corte | 15% |
| Orientação das placas | 0, 90,0/90 |

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### ESFORÇOS DE CORTE

A força de corte é uma opção natural para identificar se o processo de se o processo de fresagem é estável, uma vez que comunica diretamente não só a frequência de passagem do dente e os harmónicos, mas também com as frequências vibração para condições instáveis. Para o processo de fresagem, o espetro e os valores de pico são dominados principalmente pela frequência do fuso (SF=n/60 Hz), a frequência de passagem do dente (TPF=z*SF Hz), e os seus harmónicos superiores. Os resultados da Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal do momento do fuso, visíveis na Figura 2, indicam um corte sem vibrações. A força de corte e a força ativa são apresentadas em função do avanço na Figura 3.

Quando o ângulo de corte corresponde a 0º, ou seja, nas placas com em que a direção do avanço e as fibras são colineares, o mecanismo primário de formação de aparas é a delaminação, arrancamento e a fratura das fibras induzida pela flexão das mesmas. Isto resulta em iterações mínimas entre as fibras e a aresta de corte, já que a separação entre as fibras e o material ocorre normalmente com o crescimento de fendas na matriz do CFRP, o que origina uma diminuição na força ativa e de corte quando comparada com a direção de avanço perpendicular às fibras (placa 90º). Em contraste, para a placa com ângulo de corte de 90º a direção de corte é perpendicular à direção das fibras, o que provoca um maior número de interações entre

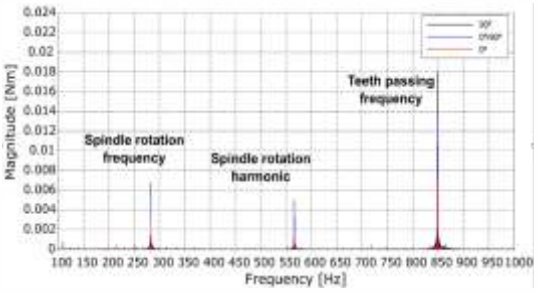



**FIGURA 2**
*FFT do sinal do momento Mz.*

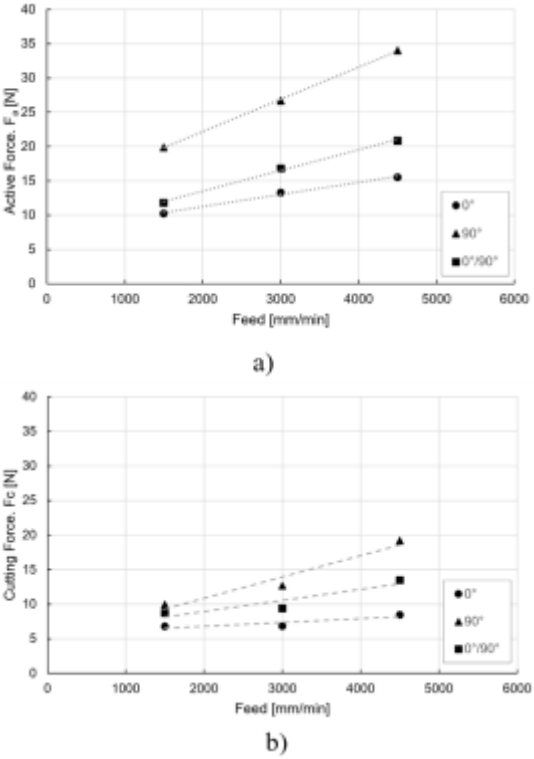



**FIGURA 3**
*Força ativa (a) e força de corte (b) em função do avanço para as três orientações de corte de fibra testadas.*

as fibras e a aresta de corte. O impacto do aumento da velocidade de avanço sobre a força de corte e a força ativa é considerável, em particular na placa de 90º. Os valores da força de corte para a placa cruzada 0º/90º foram intermédios entre os registados para as placas de 0º e 90º. Curiosamente, os valores de força ativa destacam-se para a placa 90º, indicando um aumento da força normal de corte. Considerando que o ângulo de entrada e o ângulo de saída do dente durante o corte são respetivamente 0º e 32º, é provável que as fibras de 90º estejam submetidas a cargas de tração, justificando o aumento notável da força ativa.

A morfologia da apara correlacionou-se com estudos anteriores relacionados com a fresagem de CFRP.

O corte das placas de 90° gerou maioritariamente aparas descontínuas, na forma de pó, devido à fratura frágil das fibras, mostrada na Figura 4. Estas podem ser consideradas aparas do tipo IV. Para a placa de 0º graus, as aparas de tipo I (apara tipo delaminação) foram predominantes. As aparas resultantes da placa cruzada consistiram numa mistura de aparas do tipo I e IV, embora com menor tendência à ocorrência de delaminações devido à natureza compressiva gerada pelo laminado cruzado [15]. Apesar de ter sido apenas variada a velocidade de avanço, acredita-se o tipo de aparas formado é influenciado principalmente pela orientação das fibras e não pela variação dos parâmetros de corte.

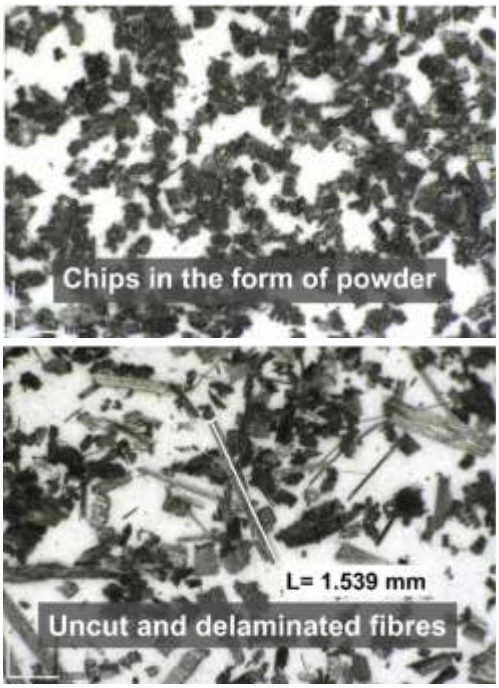



**FIGURA 4**
*Aparas típicas provenientes do corte: a) placa 90º, fr=4500 mm/min; b) placa 90º, fr=3000 mm/min*

A rugosidade média superficial medida nas superfícies maquinadas das placas de 0ºe 90º é equivalente, no entanto o perfil destas apresenta diferenças significativas. Apesar de ter uma rugosidade superficial semelhante, quando comparado com a placa de 90º, a placa de 0º é mais propensa à ocorrência do arrancamento de fibras, que originaram vazios aleatórios na superfície. Os valores de médios de rugosidade medidos para cada placa e avanço, ao longo dos 10 metros de corte, são mostrados na Figura 5. Adicionalmente, a figura ilustra a rugosidade média da superfície documentada por outros investigadores em condições semelhantes de velocidade de avanço linear durante a maquinagem de contornos [16], [17]. Os valores da rugosidade superficial obtidos parecem ser razoavelmente inferiores aos valores registados. Ao longo dos ensaios, as tendências de desgaste foram normais, dado que o comprimento de maquinação promovido não foi suficiente para permitir uma análise completa nesta área.

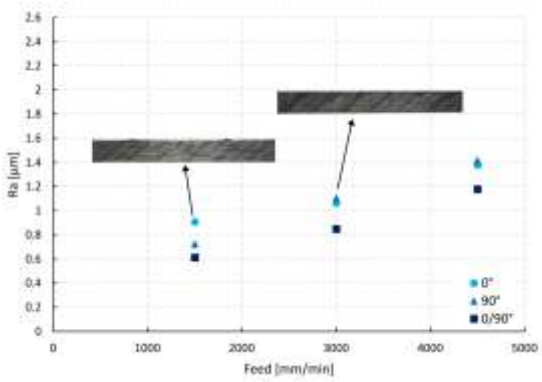



**FIGURA 5**
*Rugosidade média em função do avanço e ângulo de corte das fibras.*

## CONCLUSÕES

Neste estudo, a força de corte, a formação de aparas e a rugosidade da superfície maquinada foram analisadas em função da velocidade de avanço e da direção de corte das fibras na fresagem de CFRP. O uso de ferramentas afiadas a laser em operações de contorno foi considerado eficaz na obtenção de superfícies com bom acabamento. As ferramentas não evidenciaram tendências de desgaste, no entanto é necessária a promoção de maiores comprimentos de corte para uma avaliação completa neste domínio. A placa com camadas cruzadas (0º/90º) revelou uma rugosidade consistentemente mais baixa, o que pode ser explicado pela resistência à delaminação dada pelas fibras interlaçadas. Como uma exploração inicial de ferramentas afiadas a laser para maquinagem de CFRP, este estudo abriu múltiplas oportunidades de investigação. O trabalho futuro poderá centrar-se na avaliação do desempenho da ferramenta (ou seja, integridade da aresta de corte) durante um período de corte prolongado e na sua influência na qualidade e integridade da superfície do CFRP. Além disso, pretende-se efetuar estudos comparativos de desempenho com ferramentas não afiadas.


### AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem o financiamento do Projeto Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002) cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa através do NextGeneration EU.


### REFERÊNCIAS


**[1]** Y. Atescan-Yuksek, A. Mills, D. Ayre, K. Koziol, and K. Salonitis, "Comparative life cycle assessment of aluminium and CFRP composites: the case of aerospace manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 131, no. 7, pp. 4345-4357, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13241-3.

**[2]** J. P. Davim, *Machining Composites Materials*. in ISTE. Wiley, 2013. [Online]. Available: https://books.google.pt/books?id=HVvSAQAAQBAJ

**[3]** Y. Su, Z. Jia, B. Niu, and G. Bi, "Size effect of depth of cut on chip formation mechanism in machining of CFRP," *Compos Struct*, vol. 164, pp. 316-327, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.044.

**[4]** M. Kim, M. Lee, G. Cho, and S.-K. Lee, "Effect of the Fiber Orientation and the Radial Depth of Cut on the Flank Wear in End Milling of CFRP," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 21, no. 7, pp. 1187-1199, 2020, doi: 10.1007/s12541-020-00340-w.

**[5]** R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, and K. Wegener, "Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 18, pp. 75-91, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002.

**[6]** N. Geier, J. Xu, D. I. Poór, J. H. Dege, and J. P. Davim, "A review on advanced cutting tools and technologies for edge trimming of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites," *Compos B Eng*, vol. 266, p. 111037, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111037.

**[7]** Y. Chen, X. Guo, K. Zhang, D. Guo, C. Zhou, and L. Gai, "Study on the surface quality of CFRP machined by micro-textured milling tools," *J Manuf Process*, vol. 37, pp. 114-123, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.021.

**[8]** M. K. N. Khairusshima and I. S. S. Sharifah, "Study on Tool Wear during Milling CFRP under Dry and Chilled Air Machining," *Procedia Eng*, vol. 184, pp. 506-517, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.121.

**[9]** D. Nguyen, M. S. Bin Abdullah, R. Khawarizmi, D. Kim, and P. Kwon, "The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates," *Wear,* vol. 450-451, p. 203213, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203213.

**[10]** P. and H. A. and M. D. and B. T. and L. F. and K. M. and K. V. and S. G. Gaugel Simon and Sripathy, "A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)," *Compos Struct*, vol. 155, pp. 173-183, Nov. 2016, [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316314179

**[11]** C. Kuo, J. Liu, T. Chang, and S. Ko, "The effects of cutting conditions and tool geometry on mechanics, tool wear and machined surface integrity when routing CFRP composites," *J Manuf Process*, vol. 64, pp. 113-129, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.011.

**[12]** E. Uhlmann, S. Richarz, F. Sammler, and R. Hufschmied, "High Speed Cutting of Carbon Fibre Reinforced Plastics," *Procedia Manuf,* vol. 6, pp. 113-123, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.11.015.

**[13]** N. Geier, J. Xu, D. I. Poór, J. H. Dege, and J. P. Davim, "A review on advanced cutting tools and technologies for edge trimming of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites," *Compos B Eng*, vol. 266, p. 111037, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111037.

**[14]** M. Ramulu, "Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites," *Sadhana*, vol. 22, no. 3, pp. 449-472, 1997, doi: 10.1007/BF02744483.

**[15]** J. Ahmad, *Machining of Polymer Composites*. Springer US, 2008. [Online]. Available: https://books.google.pt/books?id=CITjnQAACAAJ

**[16]** A. Mustafa, A. Suhaimi, N. Shahruddin, and N. F. H. Abd Halim, "An Experimental Investigation on Surface Quality of CFRP after Milling in Cutting Fluid Environment," *J Phys Conf Ser*, vol. 2051, p. 12053, Nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2051/1/012053.

**[17]** R. Prakash, V. Krishnaraj, R. Zitoune, and J. Sheikh-Ahmad, "High-Speed Edge Trimming of CFRP and Online Monitoring of Performance of Router Tools Using Acoustic Emission," *Materials*, vol. 9, no. 10, 2016, doi: 10.3390/ma9100798.



Product Development & Engineering

Mould Manufacturing

Project Management

## DA IDEIA AO PRODUTO

Serial Production

Assembly

Wet Painting

# TECNOLOGIA QUE TRANSFORMA

## Plásticos com ciência e precisão.

Visite-nos
drt-group.com

DRT GROUP

# FORMAÇÃO DE ILHAS DE SILICATO EM TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE ZINCO-NÍQUEL

**Gonçalo Soares[1], Rui Madureira[1], Nuno Ferreira[2], Carlos Saraiva[2], Vitor Pereira[2], Ana Reis[3]**

**1** INEGI, Rua Dr. Roberto Frias 400, 4200-465, Porto, Portugal. Email: gsoares@inegi.up.pt
**2** MCG, Rua Manuel da Conceição Graça 5, 2580-462, Carregado, Portugal. Email: nuno.ferreira@mcg.pt
**3** FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal. Email: arlr@fe.up.pt

***Os componentes para a indústria automóvel têm que cumprir cada vez mais requisitos, nomeadamente, a nível mecânico e de durabilidade. O braço de suspensão frontal inferior é um componente de segurança de alto desempenho e com conceito de design de baixo peso. Sendo um componente de alta segurança e exposto a um ambiente corrosivo, é necessário que esteja protegido da corrosão. O revestimento mais comum é Zinco-Níquel. Neste trabalho foram detetados defeitos aquando da realização do tratamento de superfície. Para estudar a origem destes defeitos foram realizadas análises visuais às peças para detetar um possível padrão no aparecimento dos defeitos, depois estas zonas foram analisadas através de microscopia ótica e SEM-EDS, e, por fim foram identificadas as principais causas e possíveis hipóteses para a mitigação destes defeitos. As causas relacionadas com o material base, o material de adição e possíveis contaminações foram descartadas, pois os defeitos apareciam sempre nas mesmas zonas das peças e estas não apresentavam qualquer tipo de sujidade e/ou contaminantes. A diminuição da percentagem de 18% para 15% de CO2 no gás de proteção trouxe melhorias significativas, contudo não foi suficiente para eliminar as ilhas de silicato. Para eliminar completamente os defeitos, os parâmetros de soldadura tiveram que ser modificados para que houvesse uma redução da entrega térmica que levou à redução da gap existente entre cascas.***

*Components for the automotive industry have to fulfil more and more requirements, particularly in terms of mechanical properties and durability. The lower front suspension arm is a high-performance safety component with a lightweight design concept. As a high-safety component exposed to a corrosive environment, it needs to be protected from corrosion. The most common coating is Zn-Ni. In this work, defects were detected when the surface treatment was carried out. To study the origin of these defects, visual analyses were carried out on the parts to detect a possible pattern in the appearance of the defects, then these areas were analysed using optical microscopy and SEM-EDS, and finally the main causes and possible hypotheses for mitigating these defects were identified. Causes related to the base material, the filler material and possible contamination were ruled out, as the defects always appeared in the same areas of the parts and these did not show any type of dirt and/or contaminants. Reducing the percentage of CO2 in the shielding gas from 18% to 15% brought significant improvements, but was not enough to eliminate the silicate islands. In order to completely eliminate the defects, the welding parameters had to be modified so that there was a reduction in thermal delivery which led to a reduction in the gap between shells.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
ILHAS DE SILICATO; TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE; ZN-NI; MAG
*Silicate islands; Surface treatments; Zn-Ni; MAG.*

## INTRODUÇÃO

Na indústria do setor automóvel existem atualmente duas grandes preocupações, por um lado a produção de peças de ultra alta segurança: a redução de peso dos componentes para que a autonomia dos veículos a combustão, híbridos e elétricos aumente e a durabilidade e as exigências mecânicas para que seja garantida uma vida de ciclo longa [1-3].

O surgimento de novos aços de ultra alta resistência apresentam um potencial enorme ao nível da substituição de componentes (até mesmo anteriormente produzidos em alumínio) de segurança por elementos mais leves. De forma, a garantir um custo de produção controlado, cadências e volumes de produção elevados, redução do peso, boa performance e

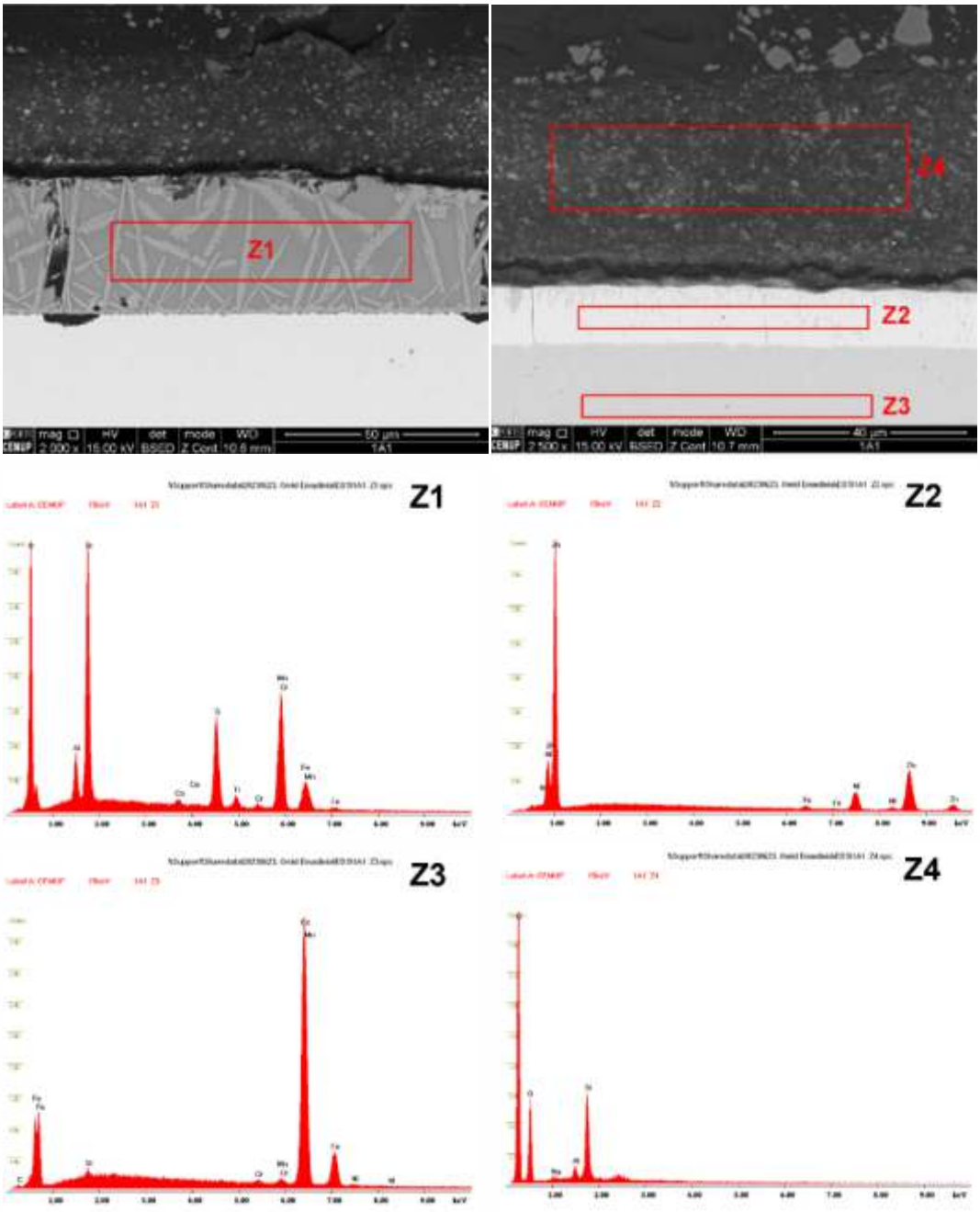



**FIGURA 6**
*Análise dos elementos químicos presentes na amostra 1A-I.*

apenas se puderam alterar os parâmetros de soldadura e a percentagem de CO2 no gás de proteção.

Como primeira abordagem foi testada uma redução da percentagem de CO2 no gás de proteção de 18% para 15%, onde se notou uma melhoria significativa. Outros testes realizados posteriormente com quantidades ainda menores de CO2, não trouxeram mais melhorias e levaram a uma degradação da penetração, por consequência da diminuição da condutividade do gás. Como as melhorias não foram suficientes para eliminar completamente as ilhas de silicato foi necessário avançar para o ajuste dos parâmetros de soldadura numa tentativa de eliminar completamente a formação destes óxidos que comprometiam o processo de tratamento de superfície.

A tentativa de redução da entrega térmica revelou que o gap definido para a soldadura seria excessivo e que estaria a obrigar a demasiada deposição de fio de soldadura. O processo de redução dos gaps comportava vários riscos, nomeadamente, a possibilidade de em algumas zonas passar a existir colisão entre as cascas, o que levaria a um deslocamento relativo entre as duas, alterando completamente a precisão dimensional. Assim, houve necessidade de se adotar um controlo dimensional mais rigoroso no gap, o que permitiu uma uniformização e

estabilização do processo, permitindo ainda uma maior redução do *gap,* tendo como consequências obvias um impacto muito significativo na redução das emissões, mas também na redução da formação de óxidos superficiais na zona da soldadura levando à eliminação das ilhas de silicato.

## CONCLUSÃO

As principais conclusões a serem retiradas após a realização deste trabalho são:

- Nas peças do mesmo lado, as ilhas de silicatos aparecem em zonas idênticas.
- Existem mais zonas com defeitos nas peças do lado direito do que nas peças do lado esquerdo.
- As ilhas de silicato impedem a deposição correta do revestimento (ZnNi e KTL).
- A ligação defeito-revestimento é uma ligação frágil.
- Nas zonas onde não existem defeitos, a espessura dos revestimentos encontra-se dentro dos intervalos especificados.
- O material base, o material de adição e a contaminação da superfície onde vai ser realizada a soldadura foram descartados como causas para o aparecimento das ilhas de silicato, pois estas apareciam tipicamente em zonas especificas do conjunto soldado.
- A redução da percentagem de CO2 no gás de proteção de 18% para 15% trouxe melhorias significativas. Maiores reduções na percentagem de CO2 não produziram mais melhorias na redução de defeitos e levaram a uma degradação da penetração, por consequência da diminuição da condutividade do gás.
- Para eliminar completamente as ilhas de silicato teve que existir uma redução da entrega térmica no processo de soldadura, o que implicou uma redução da gap existente entre as duas cascas.


### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento do Projeto HirEV-Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002), cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), através da NextGeneration EU.


### REFERÊNCIAS


**[1]** Morawiec, M. and A. Grajcar, *Metallurgical Aspects of Weldability of Multiphase Steels for Automotive Industry*. Applied Engineering Letters, 2017. 2(1): p. 38 - 42.

**[2]** Kuziak, R., R. Kawalla, and S. Waengler, *Advanced high strength steels for automotive industry*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008. 8(2): p. 103-117. https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60197-6.

**[3]** Viná̌s, J. and Ľ.Kaščák. *Analysis of weldability of dual-phase steel used in automotive industry*. 2016.

**[4]** Derrien, R., et al., *Silicate Island Formation in Gas Metal Arc Welding*. Welding Journal, 2021. 100: p. 13-s. 10.29391/2021.100.002.

**[5]** Brothers, H. *Silicon Control Technology Helps Reduce Post-Weld Cleanup*. Acedido a 15 de Novembro de 2024; Disponível em: https://www.hobartbrothers.com/resources/technical-articles/silicon-control-technology-helps-reduce-post-weld-cleanup/.

# MCG AUTOMOTIVE

## PRODUCT DEVELOPMENT

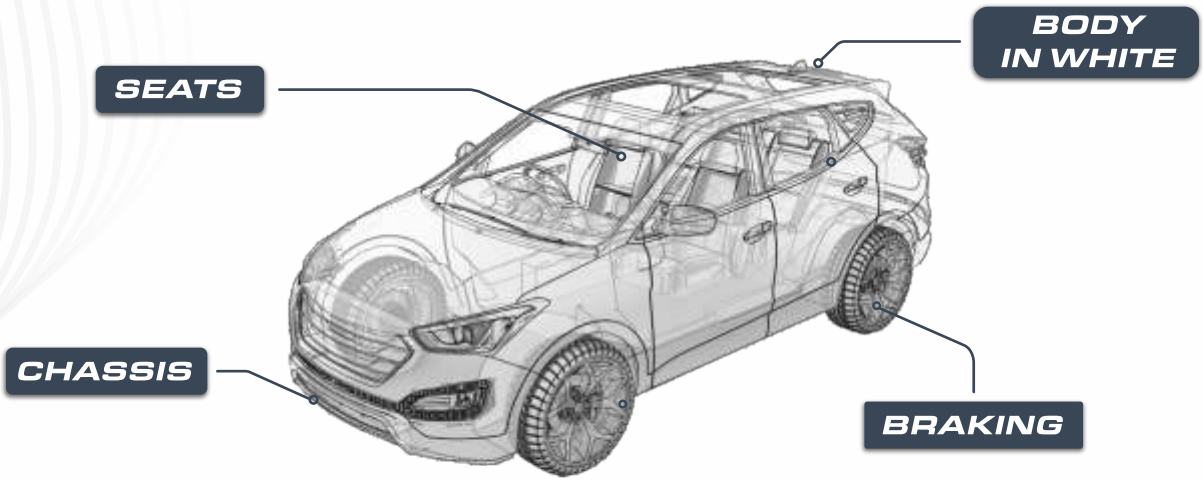
- ENGINEERING TEAM DEDICATED
- TECHNICAL DESIGN MANAGEMENT
- PRODUCT FEASIBILITY ANALYSIS
- CERTIFIED PROJECT MANAGEMENT
- PRODUCT VALIDATION



## OUR EXPERTISE INCLUDES

- STAMPING SIMULATIONS
- 2D DRAWING FEASIBILITY ANALYSIS
- ADVANCED PROCUREMENT EXPERTISE
- ASSEMBLY & COATING PROCESSES DESIGN
- PACKAGING ENGINEERING & SIMULATIONS
- TRANSPORT COSTS OPTIMIZATION
- ROBUST TECHNICAL REVIEWS
- MIG-MAG AND SPOT WELDING






PRODUCT DESIGN · PRODUCT DEVELOPMENT · PROTOTYPING & TESTING · PUNCHING AND LASER CUTTING · STAMPING AND BENDING · MILLING AND MACHINING · MANUAL WELDING

ROBOTIZED WELDING · BONDING & ASSEMBLY · COATINGS · ASSEMBLY PROCESSES · QUALITY ASSURANCE · PACKAGING AND LOGISTICS

**MCG AUTOMOTIVE**

**MCG TRANSPORTATION**

**MCG INDUSTRY**

PRESENTATION DOWNLOAD

WWW.MCG.PT/PRODUCTPORTFOLIO

# ESTRATÉGIAS DE MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA MELHORIA DA ADESÃO METAL-POLÍMERO

**Francisco Matos[1], João Figueiredo[2], Tiago Silva[1], Luís Pereira[2]**

**1** INEGI, R. Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal
**2** MicroPlásticos, Cova de Serpe, 3080-512 Figueira da Foz

***O uso de componentes híbridos multimaterial no sector automóvel, caracterizado pela sua elevada competitividade, permite integrar as vantagens de diferentes materiais. A conjugação de diferentes materiais na solução construtiva apresenta-se como um desafio. A resistência mecânica dos metais e a capacidade de adaptabilidade e conformabilidade dos materiais compósitos de fibra suportam o desenvolvimento dos componentes híbridos para automóveis. Neste trabalho, os insertos metálicos foram submetidos a diferentes estratégias de modificação superficial e posteriormente sobremoldados com sulfureto de polifenileno (PPS) reforçado com 30% de fibra de carbono. O efeito de diferentes tratamentos na modificação da superfície metálica foi caracterizado através de análise microscópica, rugosidade superficial e força de adesão. A adesão entre o polímero e metal foi analisada através de ensaios de tração. O jato de areia, especialmente quando associado a tratamento que promovem a oxidação da superfície, melhora substancialmente a adesão. No entanto estes comprometem as propriedades da superfície, como a resistência à corrosão e precisão dimensional. Os tratamentos com silanos oferecem vantagens fundamentais: proteção contra a corrosão do substrato metálico, tornando-os uma alternativa viável para preservar a integridade da superfície. A variabilidade dos tratamentos com várias etapas foi identificada como uma dificuldade que pode afetar a repetibilidade e a convergência dos resultados.***

*The use of multimaterial hybrid components in the automotive sector, characterized by its high competitiveness, makes it possible to integrate the advantages of different materials. Combining different materials in a construction solution is a challenge. The mechanical strength of metals and the adaptability and formability of fibre composite materials support the development of hybrid components for automobiles. In this work, metal inserts were subjected to different surface modification strategies and subsequently overmoulded with polyphenylene sulphide (PPS) reinforced with 30% fibres. The effect of different treatments on the modification of the metal surface was characterised through microscopic analysis, surface roughness and adhesion strength. The adhesion between the polymer and metal was analysed using tensile tests. Sandblasting, especially when combined with treatments that promote surface oxidation, substantially improves adhesion. However, these treatments compromise surface properties such as corrosion resistance and dimensional accuracy. Silane treatments offer fundamental advantages: protection against corrosion of the metal substrate, making them a viable alternative for preserving surface integrity. The variability of multi-stage treatments has been identified as a difficulty that can affect the repeatability and convergence of results.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**

COMPÓSITOS CFRP; SOBRE MOLDAGEM; INTERFACE, SILANO.
*Fiber composite; Insert molding, Interface, Silane.*

## INTRODUÇÃO

A incorporação de compósitos na indústria automóvel, em parte devido à sua excecional resistência específica, permite reduzir o peso dos veículos, poupar energia e consequentemente reduzir as emissões, num dos setores mais pressionados para adotar alternativas mais verdes em toda a sua cadeia de valor. Os compósitos de matriz polimérica (PMC) combinam fibras de elevada resistência (por exemplo, vidro, carbono ou aramida) com uma matriz polimérica termoplástica ou termoendurecida. No que diz respeito à indústria automóvel, a maioria das peças de PMC contém fibras descontinuas aleatoriamente orientadas, e são produzidas através de injeção ou compressão, caso o polímero seja um termoplástico ou um termoendurecido, respetivamente [1]. A introdução da abordagem híbrida polímero-metal (PMH), em que um polímero é moldado sobre um componente metálico, permite desenvolver novas

peças com funcionalidades acrescidas e representar uma alternativa à incorporação de componentes de ferro fundido e de aço [2], [3]. A adesão entre peças metálicas e poliméricas é centrada em três métodos de união: sobremoldagem de polímero por injeção, sobremoldagem de metal e ligação adesiva. No entanto, estes métodos continuam a apresentar lacunas, como a utilização de rebites, que requerem a pré furação para a colocação de rebites de encravamento, ou a utilização de camadas de adesivo, que têm um tempo de cura relativamente longo e uma capacidade limitada para resistir a ambientes químicos e térmicos agressivos [3]. A junção direta por laser, a soldadura por fricção, a soldadura por vibração ultrassónica ou a soldadura por pontos são tecnologias recentes para a união em peças híbridas plástico-metal. No entanto, estes méto-dos necessitam de ferramentas e de etapas de processamento adicionais que aumentam o tempo, o peso e o custo.

Novos métodos permitem unir materiais dissimilares (como o metal e o termoplástico) através da adesão direta da estrutura termoplástica moldada por injeção ao metal, sem a utilização de rebites, bordos sobre-moldados ou adesivos estruturais. Para tal, foi estudada a utilização de promotores de adesão, compostos que têm a capacidade de formar uma ligação duradoura entre materiais orgânicos e inorgânicos [4]. Os silanos promovem a adesão e protegem o substrato metálico. Os silanos sofrem hidrolise quando é adicionada água ao sistema, resultando em grupos silanol que podem reagir com grupos de hidróxido de metal na superfície do substrato e formar uma interface metal/filme com ligação covalente -Si-O-M.

Os silanos funcionais podem ligar-se tanto ao metal, com um grupo hidrolisável, como ao plástico, com um grupo organofuncional. Os promotores de adesão têm geralmente a forma: R-Si-(OR`)3 em que R é um grupo organofuncional e OR` é um segundo grupo funcional hidrolisável (normalmente alcoxi). Este último reage com a água para formar silanol (Si-OH) que é capaz de reagir consigo próprio e produzir variações que reagem com superfícies activas que contêm grupos hidroxilo. Os silanóis acabam por formar uma ligação oxano com o substrato inorgânico (Si-O-Metal). O grupo organofuncional (R) é responsável pela compatibilidade com o polímero de base, co-reagindo com os seus grupos funcionais [5], [6], [7]. A ligação à molécula do polímero orgânico é mais complexa do que a ligação ao substrato inorgânico.

## MATERIAIS E MÉTODOS.

### MATERIAIS

A produção dos provetes híbridos, visíveis na Figura 1, foi realizada em duas etapas: a modificação da superfície metálica dos insertos e a injeção do termoplástico sobre os insertos previamente tratados. O material dos insertos metálicos, sob a forma de pinos com 4mm de diâmetro e 40mm de comprimento, foi o aço X46Cr13. A composição deste é apresentada na Tabela 1. O termoplástico sobre injetado foi sulfureto de polifenileno (PPS), reforçado com 40% de fibras de vidro, conhecido por oferecer uma elevada precisão dimensional numa vasta gama de temperaturas. Este tem uma densidade de 1,649 g/cm³, uma temperatura de fusão de 280 °C, um calor específico de 1500 J/kg. K, e índice de fluidez de 28 g/10 min (300ºC/5 kg).



**FIGURA 1**
*Provete bi-material utilizado nos ensaios de tração.*

### MÉTODOS

Cada tratamento foi aplicado a seis insertos metálicos. Os tratamentos aplicados encontram-se resumidos na Tabela 2. Os tratamentos T1 e T2 foram preparados com as seguintes concentrações iniciais dos reagentes: HCl 35%, HNO3 65% e H2O2 5%. As soluções foram deixadas a repousar cerca de 5h à temperatura ambiente, e o ataque químico aos insertos foi realizado durante 120 segundos, igualmente à temperatura ambiente. Após o ataque os insertos foram enxaguados com água destilada, secos com ar comprimido e por fim armazenados. Os

**TABELA 1**
*Composição química do aço X46Cr13*

| Elem | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Cu | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | 0.432 | 0.34 | 0.51 | 0.03 | 0.0004 | 12.7 | 0.37 | 0.07 | 0.004 |

**TABELA 2**
*Parâmetros de corte.*

| Designação | Tratamento Superficial | |
|---|---|---|
| Normal (N) | Sem tratamento. | |
| Flame (F) | Superfície exposta a chama (butano). | |
| SB | A superfície do inserto foi uniformemente submetida a jato de areia. | |
| T1 | Ataque químico: 10 mL CH3OH + 10 mL HCl + 10 mL HNO3 | |
| T2 | Ataque químico: 10 mL HCl + 2 mL H202 | |
| T3 | NaOH (2%) + 3-(2-Aminoethylamino)propyldimethoxymethylsilane (diferente rácio) | 5% |
| T4 | | 15% |
| T5 | H2SO4 (0.4M) + 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) (diferente rácio) | 2% |
| T6 | | 5% |
| T7 | N-(2-Aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane (AEAPS) (diferente rácio) | 1% |
| T8 | | 2% |
| SB + T1 | Jato de areia seguido de T1 | |
| SB + T2 | Jato de areia seguido de T2 | |

tratamentos T3 a T8 utilizaram soluções com silanos como promotores de adesão [8], [9], [10], [11]. Antes do tratamento, todos os insertos foram cuidadosamente limpos com acetona num banho de ultrassons, de forma a garantir uma superfície sem contaminantes para os processos subsequentes. Foram utilizados três silanos diferentes, e para cada silano foram testadas duas concentrações diferentes, para avaliar a sua eficácia na promoção da adesão entre os insertos e o material termoplástico. As soluções que envolveram silanos foram repousadas durante 1.5h para promover a hidrólise das soluções. As amostras T3 e T4 foram primeiramente colocadas numa solução de 2% NaOH durante 2 a 3 min para remover contaminantes superficiais e outras impurezas. Posteriormente foram limpas com acetona num banho ultrassons. Assim que as amostras se encontravam secas foram imersas na solução durante 80 segundos. A solução possuía um rácio de volume de 3-(2-Aminoethylamino) propyldimethoxymethylsilane, água destilada e etanol de 5:75:25 e 15:75:25, respetivamente para o tratamento T3 e T4. As amostras foram retiradas da solução e secas (curadas) a 110ºC durante 30 minutos. As amostras T5 e T6 foram primeiramente colo-cadas numa solução de H2SO4 com uma concentração de 0.4M para remover contaminantes superficiais e promover a oxidação da superfície metálica. Posteriormente foram limpas com acetona num banho ultrassons durante 5 minutos. Depois de secas foram mergulhadas na solução durante 60 segundos. A solução possuía um rácio de volume de 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES), água destilada e etanol de 2:75:25 e 5:75:25, respetivamente para o tratamento T5 e T6. As amostras foram retiradas da solução e secas (curadas) a 110ºC durante 15 minutos. As amostras T7 e T8 foram limpas cuidadosamente com acetona num banho ultrassons durante 5 minutos. Uma vez secos, os insertos foram mergulhados na solução durante 5 minutos. A solução possuía um rácio de volume de N-(2-Aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane (AEAPS), água destilada e etanol de 1:75:25 e 2:75:25, respetivamente para o tratamento T7 e T8. As amostras foram retiradas da solução e secas (curadas) a 110ºC durante 15 minutos.

A adesão na interface polímero-metal foi avaliada através de um ensaio de tração com recurso a uma máquina de ensaios universal (Instron 5900R). A força de adesão foi determinada através da força máxima registada durante o ensaio. Para melhor caraterizar o efeito de cada tratamento, foi medida a rugosidade média da superfície ($R^a$) dos insertos metálicos, em cinco locais aleatórios com um medidor de rugosidade superficial portátil (Mitutoyo Surftest SJ-210). Foram também obtidas imagens da superfície dos pinos pós tratamento, com recurso a microscopia eletrónica de varrimento (SEM).

## RESULTADOS

A adesão entre o polímero e os insertos metálicos não tratados é relativamente fraca. Na Figura 2 é exibido o aspeto geral dos pinos após tratamento superficial. A Figura 3-a) apresenta a força máxima obtida durante os ensaios de tração e o respetivo desvio padrão para cada tratamento superfície testado. Os valores da rugosidade média superficial e respetivo desvio padrão são apresentados na Figura 3-b). Os provetes N (sem tratamento) e com tratamento de chama obtiveram resultados semelhantes nos ensaios de tração, com um pequeno aumento de 2,5% detetado nos pinos tratados com chama. A principal diferença entre os resultados foi o a variação dos resultados, o que




**FIGURA 2**
*Aspecto geral dos insertos após modificação superficial.*

sugere que o tratamento com chama pode ter promovido uma superfície limpa de contaminantes, e assim oferecer resultados com maior consistência. O tratamento por chama representa uma abordagem tradicional que serve como base de comparação com posteriores métodos de modificação de superfícies metálicas.

Os tratamentos de superfície T1 e T2 foram testados independentemente e em conjunto com o tratamento de jato de areia. O jato de areia promove um amento de rugosidade e da superfície de contacto entre o polímero e o metal e uma consequente melhoria da adesão através do aumento do número de centros ativos. A combinação do tratamento T1 com o jato de areia promoveu uma forte adesão entre os materiais, e por isso necessitou da maior força de arrancamento entre os tratamentos de superfície testados. Curiosamente, o tratamento T1, por si só, não aparentou melhorar a adesão, tendo sido observada uma diminuição na força de ligação entre o polímero e o metal, com uma rugosidade superficial semelhante à do inserto não tratado. O tratamento T2 resultou num aumento significativo da rugosidade da superfície, atribuído à intensa reação química e consequente corrosão superficial causada pelo ácido clorídrico. No entanto, aumento de rugosidade não foi afetou na força de ligação, possivelmente devido a resíduos do tratamento químico que podem ter permanecido na superfície, limitando a ligação entre o metal e o polímero fundido, nas amostras T1 e T2 (sem jato de areia). As modificações superficiais por meio de ataque químico T1 e T2, na ausência de jato de areia, não resultaram num aumento de força da ligação polímero-metal e originaram uma deterioração da qualidade da superfície dos insertos. A força de adesão apresentou valores distintos (consistentemente acima de 250N) quando a modificação da superfície envolveu a técnica de jato de areia. Quando sobre as superfícies foram aplicados (de forma sequencial) jato de areia e um ataque químico foi observada uma melhoria considerável na adesão. O principal inconveniente é a modificação significativa das superfícies metálicas que

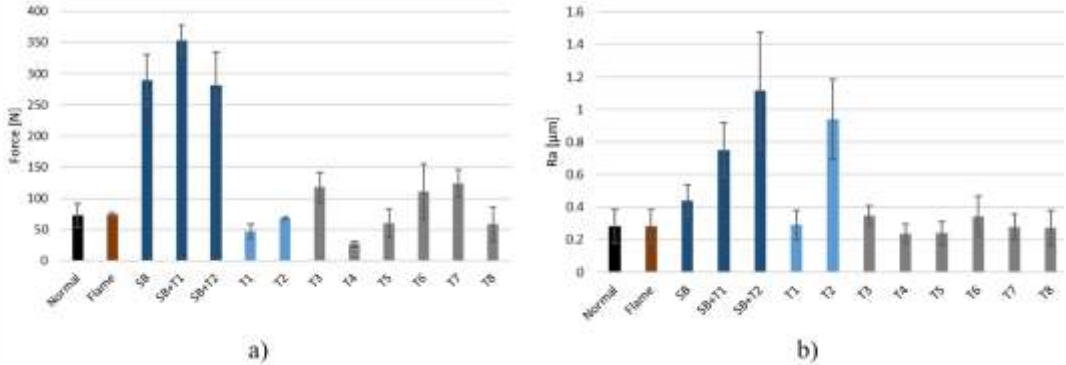



**FIGURA 3**
*a) força máxima registada durante o ensaio de tração; b) rugosidade média dos pinos após tratamento.*

pode afetar negativamente a sua funcionalidade, como se pode ver na Figura 2. Consequentemente, a investigação prosseguiu com a aplicação de tratamentos de superfície teoricamente menos agressivos, nomeadamente os silanos, que parecem preservar o aspeto da superfície.

O tratamento T3 registou um aumento de mais de 50% na força de adesão quando comparado com os insertos não tratados. Os resultados da força de adesão dos tratamentos T3 e T4 apresentaram alguma discrepância, com uma diminuição notável da força de ligação quando a concentração do silano no banho foi aumentada de 5 para 15%. Considerando que a espessura da camada de silano curado depende linearmente da concentração do banho de silano [8], parece plausível assumir que o aumento da espessura da camada, devido à maior concentração do silano, foi propício à diminuição da força de adesão. O tratamento de superfície T3 é caracterizado pela existência de uma camada com vales e picos, visível na Figura 4- a). As zonas de cor mais escura (picos) são caracterizadas pela presença de silício, oxigénio e carbono, provenientes da solução utilizada, e as zonas brancas (vales) correspondem ao metal do inserto. Por outro lado, o tratamento T4, visível na Figura 4- b), permitiu depositar uma camada espessa e uniforme, sendo possível distinguir marcas de fratura na mesma. Este poderá ser um indicador que a excessiva espessura do filme fragilizou a camada, não sendo por isso benéfica para a adesão polímero metal. Além disso, a cura e a secagem podem ter sido insuficientes, já que os as soluções com silanos aplicadas necessitam de ser hidrolisadas para gerar grupos silanóis, enquanto que a água presente na camada depositada é removida por aquecimento durante o processo de cura.

O tratamento T5 obteve resultados semelhantes aos insertos não tratados. O tratamento T6 demonstrou resultados promissores, com uma concentração mais elevada de APTES do que o tratamento T5 (5% versus 2%), com um aumento de mais de 50% na força de adesão (112N) em comparação com as pastilhas não tratadas. A oxidação da superfície com recurso ao ácido sulfúrico aparenta ter promovido a existência de uma superfície ativa, que permitiu um melhor desempenho do revestimento de silano subsequente. O revestimento promovido pelo tratamento T6, visível na Figura 5, apresenta uma textura homogénea e fina. O tratamento T7 exigiu a maior força de arrancamento registada de todas os inserto submetidos a tratamento à base de silano (124N). Infelizmente, o tratamento T8 apenas registou um aumento marginal na força de adesão em comparação com os pinos não tratados. Este resultado evidencia a

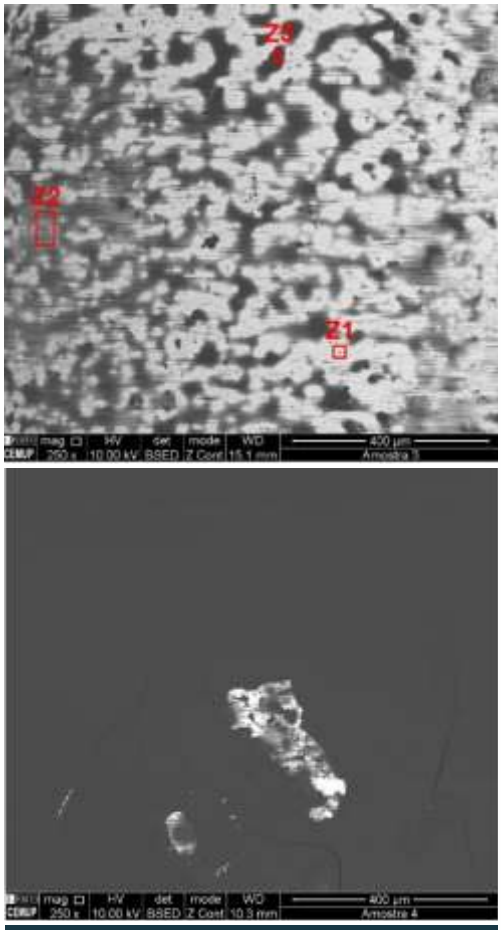



**FIGURA 4**
*Imagens SEM da superfície dos pinos após tratamento: a) T3; b) T4*

variabilidade dos tratamentos com etapas sequenciais, em que cada etapa pode introduzir variâncias que afetam a repetibilidade e a convergência dos resultados.

## CONCLUSÃO

Foi estudada a eficácia de diferentes tratamentos de superfície em insertos metálicos para melhorar a adesão ao termoplástico PPS, num contexto de sobre moldagem. O jato de areia aumentou a rugosidade da superfície e melho-

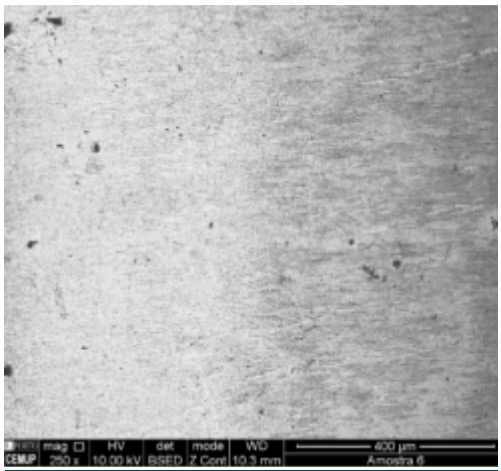



**FIGURA 5**
*Imagens SEM da superfície do inserto após revestimento T6.*

rou significativamente a adesão devido ao aumento da área de contacto e dos centros ativos. Quando combinado com outros tratamentos (T1 e T2), proporcionou os melhores resultados de adesão.

Os silanos, em particular os tratamentos T3, T6 e T7, produziram resultados promissores, com aumentos significativos na força de adesão. Os tratamentos T3 e T7 aparentam ter provocado o menor impacto na funcionalidade da superfície. Já os tratamentos que apenas consistiram no ataque de superfícies com soluções ácidas (T1 e T2) comprometeram a adesão, possivelmente devido a resíduos deixadas pelas mesmas. Embora alguns tratamentos melhorem a adesão, há o risco de que estes promovam alterações excessivas da superfície metálica, como desgaste ou corrosão, que podem comprometer a funcionalidade dos insertos. Para além disso, os resultados evidenciam que os tratamentos com recurso a silanos apresentam uma elevada sensibilidade às concentrações do mesmo e ao processo de cura. A concentração e o tempo de cura excessivo dos silanos podem resultar em camadas espessas e frágeis, reduzindo a eficácia da ligação. Estes fatores, além de exigirem um controlo rigoroso, são particularmente difíceis de gerir em ambientes industriais, onde as condições variáveis podem amplificar as dificuldades e afetar a reprodutibilidade dos resultados.

**AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Projeto Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002) cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa através do programa NextGeneration EU.

**REFERÊNCIAS**

**[1]** P. K. Mallick, *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles.* Woodhead publishing, 2020.

**[2]** A. Canegrati *et al.*, "Experimental characterization of a Polymer Metal Hybrid (PMH) automotive structure under quasi-static, creep, and impact loading," *Compos Struct*, vol. 330, p. 117813, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117813.

**[3]** M. Grujicic, "Injection over molding of polymer-metal hybrid structures," *American Journal of Science and Technology* , vol. 1, no. 4, pp. 168-181, 2014.

**[4]** E. M. Petrie, "Silanes as Primers and Adhesion Promoters for Metal Substrates," *Metal Finishing*, vol. 105, no. 7, pp. 85-93, 2007, doi: https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80186-3.

**[5]** P. G. Pape, "15 - Adhesion Promoters," *in Handbook of Adhesives and Surface Preparation*, S. Ebnesajjad, Ed., Oxford: William Andrew Publishing, 2011, pp. 369-386. doi: https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-4461-3.10015-X.

**[6]** S. Ebnesajjad, Ed., "Chapter 1 - Introduction and Adhesion Theories," in *Adhesives Technology Handbook (Second Edition)*, Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2009, pp. 1-19. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1533-3.50004-9.

**[7]** M. Honkanen, M. Hoikkanen, M. Vippola, J. Vuorinen, and T. Lepistö, "Metal-Plastic Adhesion in Injection-Molded Hybrids," *J Adhes Sci Technol*, vol. 23, pp. 1747-1761, Sep. 2009, doi: 10.1163/016942409X12489445844435.

**[8]** M. Hoikkanen, M. Honkanen, M. Vippola, T. Lepistö, and J. Vuorinen, "Effect of silane treatment parameters on the silane layer formation and bonding to thermoplastic urethane," *Prog Org Coat*, vol. 72, no. 4, pp. 716-723, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.08.002.

**[9]** V. Rohart, L. Laberge Lebel, and M. Dubé, "Improved adhesion between stainless steel heating element and PPS polymer in resistance welding of thermoplastic composites," *Compos B Eng*, vol. 188, p. 107876, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107876.

**[10]** X. Li, D. Xu, N. Gong, Z. Xu, L. Wang, and W. Dong, "Improving the strength of injection molded aluminum/polyphenylene sulfide lap joints dependence on surface microstructure and composition," *Mater Des*, vol. 179, p. 107875, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107875.

**[11]** R.-Y. Yeh and R.-Q. Hsu, "Improving the adhesion of plastic/metal direct bonding by injection moulding using surface modifications," *Advances in Materials and Processing Technologies,* vol. 2, no. 1, pp. 21-30, Jan. 2016, doi: 10.1080/2374068X.2016.1147765.

# SISTEMA DE CONTROLO DE ÁGUAS DO PROCESSO DE INJECÇÃO

**Marco Dias[1], Pedro Santos[1], Valdemar Duarte[1], Pedro Neves[1] , Francisco Matos[2] Joao Sousa[2,3], Tiago Silva[2]**

**1** DRT Rapid - Protótipos e Moldes, Lda
**2** INEGI, Rua Dr. Roberto Frias 400, 4200-425, Porto, Portugal
**3** FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-425, Porto, Portugal

## INTRODUÇÃO

O sector da metalomecânica e, em particular, o fabrico de moldes para a injecção de plástico, requer uma abordagem consistente e de alta precisão, que permita em contexto produtivo a maior eficiência e qualidade da ferramenta e que resulte em peças plásticas com elevados padrões de qualidade. A participação da DRT no projecto Hi-rEV permite avançar com o estudo detalhado dos processos envolvido na cadeia produtiva da peça plástica. Com base nos conhecimentos e expertise da engenharia de moldes, o projecto combina e integra ferramentas auxiliares de produção e interpretação do fluxo de dados históricos, com o objetivo de criar uma curva de tendência, e obter linhas orientadoras para a optimização e melhoria das condições de produção.

Neste sentido, e no contexto do projecto Hi-rEV a DRT procura desenvolver um sistema integrado de melhoria da performance do seu processo produtivo de injecção de plástico, através da combinação de um dispositivo de gestão de águas de arrefecimento, ligado ao circuito de refrigeração da ferramenta molde, que permita reduzir os tempos de ciclo, e aumentar a eficiência do uso da água de arrefecimento, através da variação sensorizada do bombeamento desta. Esta estrutura, articula um conjunto de "estações", que são controlados por um processador digital, dotado de ferramentas de inteligência artificial, que ao analisar e monitorizar os fluxos do processo de injecção de plástico e as suas variáveis, a rede de refrigeração e a qualidade da peça produzida (segundo




**FIGURA 1**
*Arquitectura do ecossistema definido para o caso de estudo da DRT.*

os critérios de aceitação definidos), irá calcular o melhor esquema produtivo e eficiente, que permita o ajuste da refrigeração de forma automática, bem como dar directrizes de ajuste e optimização do processo, ao operador que acompanha o processo produtivo, conforme a figura 1.

## MÉTODOS E DESENVOLVIMENTOS

Com o objetivo de desenvolver o sistema proposto, foram definidos pacotes de trabalho dedicados a cada uma das "estações" do processo, para que numa primeira instância possam actuar isoladamente, mas numa segunda fase possam articular-se entre si, de forma combinada e completamente entrosada. Para tal, foi seleccionada uma peça do sector automóvel, com características suscetíveis de melhoria, e respetiva optimização do processo de injecção, em particular o tempo de ciclo - figura 2.

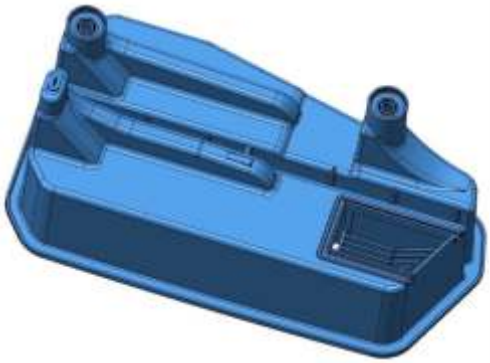


**FIGURA 2**
*Componente seleccionado para o caso de estudo da DRT*

Tendo por base a arquitectura definida (figura 1) foi analisada a configuração dos circuitos de refrigeração dos postiços inerentes ao molde, responsáveis pelo arrefecimento do polímero durante o ciclo de injecção da peça plástica, com o objetivo de melhorar a ferramenta molde. Para este caso, foi considerada a tecnologia de fabrico aditivo metálico e, assim, desenvolver designs de canais conformados que possibilitem uma maior expansão do raio de arrefecimento em pontos críticos da peça. Na figura 3 é representada a simulação que espelha as diferenças entre um processo convencional e o produzido por fabrico aditivo.

No que concerne à máquina de injecção, esta apresenta-se como o meio para testar a funcionalidade do ecossistema desenhado, entre a ferramenta molde, o gestor de águas, o processador de Inteligência Artificial e o sistema de inspecção. Assim, são implementados protocolos de recolha de dados produtivos, referentes aos parâmetros do processo de injecção, como exemplo, a temperatura das diferentes zonas do fuso, as pressões de injecção e contrapressão (ou pressão de compactação), a almofada, velocidades, dosagens, entre outros. Estas dados são essenciais para adequar o ajuste e a optimização de toda a arquitectura das estações e, dar inputs ao processador de inteligência artificial, para que este interprete as fontes de dados, monitorize as tendências e apresente linhas de optimização a considerar na melhoria da eficiência produtiva.

Para promover a agilização e automatização da avaliação da qualidade das peças, foi decidido implementar um sistema de captura de imagem automático, que permitisse a comparação de uma peça padrão aprovada, com as que são obtidas pelo processo de injecção. Este mecanismo, no contexto da arquitectura dota o processador de inteligência artificial com informação que combinada com as variáveis do processo de injecção, dá a relação de correspondência de ajuste ao fluxo de gestão da água de refrigeração do circuito da ferramenta molde, por forma a melhorar a qualidade final da peça -

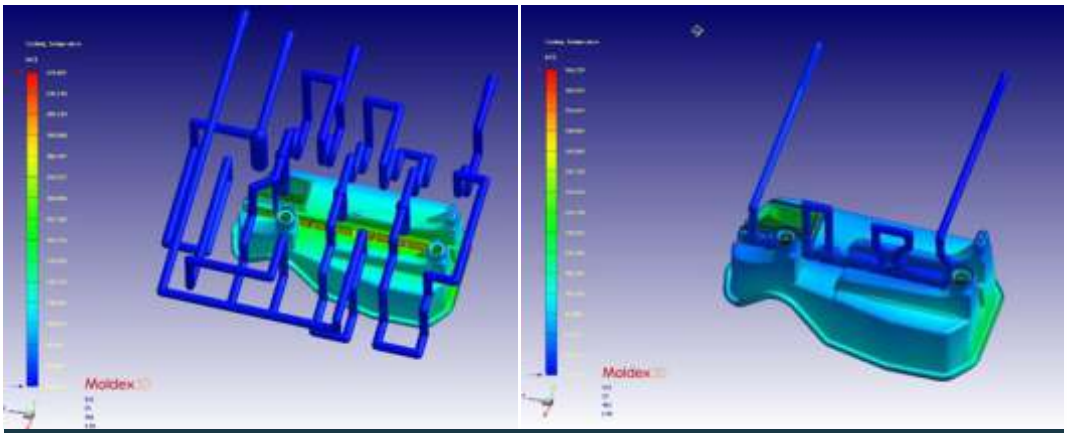


**FIGURA 2**
*Simulação de variação térmica entre circuitos de águas do caso de estudo: Circuito de águas convencional (a), Circuito com canais conformais (b).*

objectivo chave do negócio, e a eficiência produtiva e redução de custos, com forte impacto na orgânica da empresa e da performance do OEE (Overall Equipment Effectiveness) - melhoria dos tempos de ciclo de injecção, impacta na redução dos tempos de produção, e de todos os outros factores que interagem com o mesmo. O sistema de inteligência artificial faz uso da optimização Bayesiana (BO), uma abordagem utilizada em funções em que a relação entre os vários parâmetros é complexa e/ou desconhecida e, com elevado custo de avaliação da qualidade. Foi escolhida uma função de aquisição "expected improvement" (EI), que permite procurar um novo ponto no design space com um compromisso equilibrado entre a "exploration-exploitation". A função pretende minimizar a score - erro em relação ao às medidas nominais para cada peça.



**FIGURA 5**
*Segundo protótipo de sistema de controlo de arrefecimento em desenvolvimento pela DRT para ensaios em contexto real de injecção de plástico.*

Por fim, e a fechar o circuito de inputters foi desenvolvido um sistema de gestão de águas, que para além de fornecer inputs para o processador de inteligência artificial, faz a gestão da função de fluxos de água, com base no controlo de temperaturas, pressões e caudais, que apresentará significativas vantagens no processo de produção (i.e., estabilização e arrefecimento).

Foram desenvolvidos alguns modelos protótipo, como apresentado nas figuras 4 e 5, e que ainda se encontra em fase de optimização funcional, relativamente à precisão face aos circuitos de refrigeração da ferramenta molde.

O ponto convergente deste ecossistema é o processador de inteligência artificial, que congrega todos os dados das diferentes "estações", interpreta e recalcula as fórmulas dos diferentes indicadores, através de algoritmos suportados por técnicas de machine learning, deep learning, trend analisys e isolation forest, e que dão as direcções para o sistema de gestão de águas, no sentido da incrementação ou corte do fluxo de água, em função da análise qualitativa dos índices de padrão, recolhidos pelo sistema de inspecção automática.

## DISSERTAÇÃO DE DESENVOLVIMENTOS

Este trabalho contempla uma série de fases, que acabam por se desenvolver por passos iterativos e testes de tentativa-erro.

No que respeita aos circuitos de canais conformados, a possibilidade de melhoria é tanto melhor, quanto mais se conseguir aproximar ao limite do ponto de tolerância. Neste campo, embora tenham sido feitas algumas simulações de fluxo e de tendência térmica, ainda existe margem para melhoria, até por força do próprio processo de fabrico aditivo que, em função de possíveis parametrizações, poderá dar espaço a dilatar as margens de tolerância.

Já no caso do circuito de águas, as diferentes abordagens e testes efectuados, conduziram a uma série de optimizações e retrocessos na configuração do equipamento. Depois de desenvolvidos os primeiros protótipos e ensaiados em meio produtivo, foram identificadas algumas lacunas funcionais e efeitos adversos face ao que tinha sido inicialmente preconizado. Embora a arquitectura do sistema estivesse bem sequenciada, constataram-se perdas térmicas significativas que tornavam o equipamento instável, o que resultava num consumo de energia exagerado e no descontrolo da refrigeração na ferramenta molde. Foram introduzidas medidas para a redução da instabilidade térmica, optimizando o dimensionamento do sistema, com a redução de canais isolados, e a consequente fusão de alguns, que mantêm a possibilidade de controlo de circuitos segregados.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de uma grande parte do desenvolvimento já tenha sido concretizada, ainda permanecem várias incertezas que requerem novas abordagens e testes de hipóteses. A conjugação do sistema de gestão de águas com o processo de injecção já provou o seu potencial no que respeita à mitigação dos defeitos de fabrico, por resultados visíveis nas peças plásticas produzidas. Em ensaios produtivos em que o sistema foi monitorizado, foi possível verificar - por regula-

ção manual dos circuitos, que a abertura e fecho dos mesmos no decorrer do intraciclo de injecção, resulta na simplificação das variáveis de injecção, isto é, independentemente do setup inicial, o sistema de águas consegue fazer o ajuste correctivo dos parâmetros, reduzindo o índice de feitos, por exemplo de Shrinkage ou empenos, uma vez que a temperatura está directamente ligada com as contracções dos materiais. A versão manual da abertura/fecho dos circuitos permitiu identificar falhas do sistema, e canalizar as optimizações quer em termos de reconstrução do hardware do "dispositivo", quer da implementação automática de electroválvulas, sensores e controladores. A expectativa é que, embora se mude a configuração do circuito de refrigeração do molde, seja possível aprender o processo, identificar os padrões e implementar a "fórmula" corrigida do processo de injeção através do processador de inteligência artificial.

**AGRADECIMENTOS**

Embora os desenvolvimentos do projecto ainda decorram, o progresso até à data é fruto das sinergias que são estabelecidas entre os parceiros. Neste contexto, deixamos um especial agradecimento a todos os co-promotores do HirEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (Agendas/Alianças Verdes para a Inovação Empresarial, código da operação 02/C05-i01.02/2022.PC644864375-00000002), que de alguma forma têm tido uma intervenção nos desenvolvimentos, em especial o INEGI, parceiro-chave no desenvolvimento do processador de inteligência artificial e desenvolvimentos dos algoritmos.

# DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA MEDIÇÃO DE CURVATURA EM BACK LIGHTS DE ECRÃS

**André Solipa[1] | João Frade[1] | Luciano Dias[1] | Rui Sebastião[2]**

**1** MD Plastics, Lda, ALE Valado dos Frades, Lote 12, 2450-378 Valado dos Frades, Portugal
**2** DreamForIt, Praceta de José Ramos Ribeiro, Lote 20 2oesq. Batalha 2440-372

***A crescente procura por ecrãs de grandes dimensões em automóveis impõe requisitos dimensionais extremamente rigorosos. Uma área crítica envolve o back light destes ecrãs, onde a precisão na curvatura é vital para garantir o desempenho e a estética. Este artigo descreve o desenvolvimento e a aplicação de um algoritmo de medição de curvatura, suportado por inteligência artificial, implementado para garantir a conformidade das peças com as especificações exigidas.***
***O sistema desenvolvido utiliza um laser que se desloca ao longo de um eixo linear, realizando um scan completo da peça. O algoritmo processa os dados do scan para calcular seis raios distintos, essenciais para avaliar a conformidade da peça. Para aumentar a precisão e confiabilidade das medições, foi também incluída no desenvolvimento a correlação de medições com o 3D scan da ISRA Vision.***

*The increasing use of large screens in modern vehicles highlights the automotive industry's focus on innovation and aesthetic sophistication. These screens not only fulfill critical functional roles but also serve as standout design elements, seamlessly integrated into the vehicle's interior. However, their growing dimensions demand stricter manufacturing precision to ensure dimensional accuracy. The backlight, a vital component of these screens, is particularly sensitive to geometric inconsistencies. Its curvature directly affects optical performance, assembly quality, and the overall visual appeal of the final product. This work explores a novel approach to measuring backlight curvature, providing a reliable and efficient solution to meet the high standards required in the automotive industry.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
SEM CONTACTO; SCAN LASER; CONTROLO DE QUALIDADE.
*Contactless; laser scanning, quality control.*

## INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, os ecrãs tácteis nos automóveis evoluíram de um nicho de luxo para se tornarem uma norma na indústria. O crescimento do uso de ecrãs em automóveis, tanto nas dimensões como nas aplicabilidades dos mesmos, oferece aos condutores uma infinidade de funcionalidades e capacidades de personalização. A crescente procura por ecrãs de grandes dimensões, muitas vezes elegantes e minimalistas, em automóveis impõe requisitos dimensionais extremamente rigorosos.

Uma área crítica envolve o back light destes ecrãs, onde a precisão na curvatura é vital para garantir o desempenho e a estética. Torna-se essencial efetuar uma medição tridimensional não destrutiva (e, em algumas aplicações, sem contacto) para controlo de qualidade das peças injetadas. Essencialmente podem ser usados dois tipos de soluções de medição não destrutiva em peças: métodos assistidos por câmaras 3D e métodos com sensores ópticos. Para auxiliar o sistema laser de medição de curvatura pretendeu-se desenvolver e a aplicar um algoritmo suportado por inteligência artificial, com o objetivo de garantir a conformidade das peças com as especificações exigidas. Com o objetivo de aumentar a precisão e confiabilidade das medições, foi também incluída no desenvolvimento a correlação de medições com o 3D scan da ISRA Vision. Este faz uso da técnica de

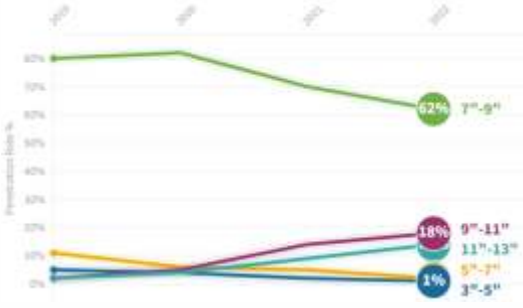



**FIGURA 1**
*Distribuição das dimensões dos ecrãs em OEM dos EUA*

*Fonte: VehiclePlannerPlus*

digitalização 3D baseada na deflectometria, utilizando tecnologia ISRA Vision. Este método analisa padrões refletidos na superfície da luz de fundo para para captar a sua forma e curvatura com uma com uma precisão excecional. Assim, torna-se possível avaliar e comparar os resultados dos dois sistemas, permitindo uma análise detalhada da precisão e conformidade das peças com as especificações exigidas.

## MÉTODOS

O produto inspecionado é um back light retangular com uma curvatura específica. Para medir esta curvatura de forma precisa, foi desenvolvido um sistema equipado com um laser (blue laser) que se desloca ao longo de um eixo linear, realizando um scan completo da peça. Embora a tecnologia de laser azul seja mais dispendiosa, este tem um comprimento de onda mais curto, o que proporciona uma maior resolução ótica; e, por conseguinte, melhores resultados de digitalização e uma redução de 50% do ruído speckle. O algoritmo utiliza os dados do scan para calcular seis raios distintos, visível na Figura 2, essenciais para avaliar a conformidade da peça.

Foram medidas duas versões de backlights com diferentes dimensões. Os raios teóricos para as duas versões são:

· Versão 14.9': Raio 2754,45 ± 225 mm
· Versão 12.3': Raio 2754,61 ± 225 mm

A qualidade da regressão foi avaliada através do parâmetro $R^2$ (Goodness of Fit), que avalia a fiabilidade dos dados utilizados no cálculo da regressão. Além disso, as áreas que têm um impacto negativo nos resultados, como as superfícies em contacto com o suporte de medição, são excluídas da análise para manter a precisão.

O seguinte procedimento foi seguido para calibrar o laser de luz azul:

Etapa 1: Medição de 5 provetes calibrados com raios ao longo da escala do equipamento.
Etapa 2: Utilizar os provetes medidos para calibrar o laser azul.
Etapa 3: Determinação das curvas de calibração e introdução no software do equipamento.
Etapa 4: Medição de amostras com diferentes raios para determinar a linearidade do equipamento.
Etapa 5: Determinar a repetibilidade do equipamento.
Etapa 6: Correlacionar a fiabilidade entre a tecnologia ISRA Vision e o Blue Laser.

## RESULTADOS

Para avaliar a correlação entre o sistema de medição 3D Shape e o laser azul, foi realizada a classificação das peças em conformes (OK) ou não conformes (NOK) utilizando ambos os equipamentos. Os resultados obtidos, resumidos na Figura 6, demonstraram que ambos os sistemas apresentam consistência na classificação das peças, fornecendo resultados equivalentes.




**FIGURA 2**
*Esquema da localização da medição dos seis raios distintos da peça injetada.*

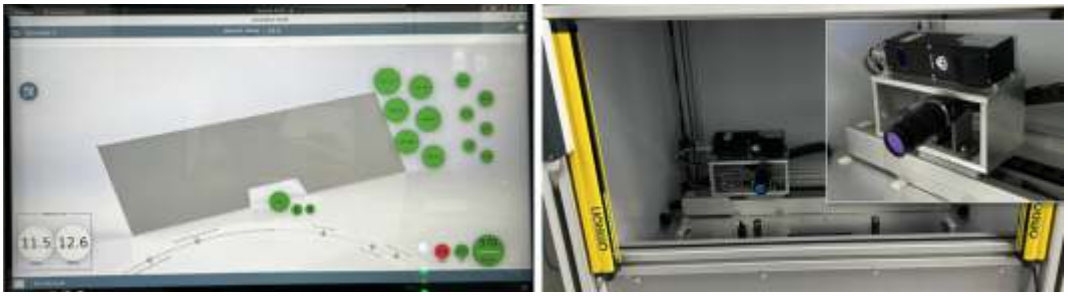



**FIGURA 3**
*Plataforma digital e aparato de medição da peça.*

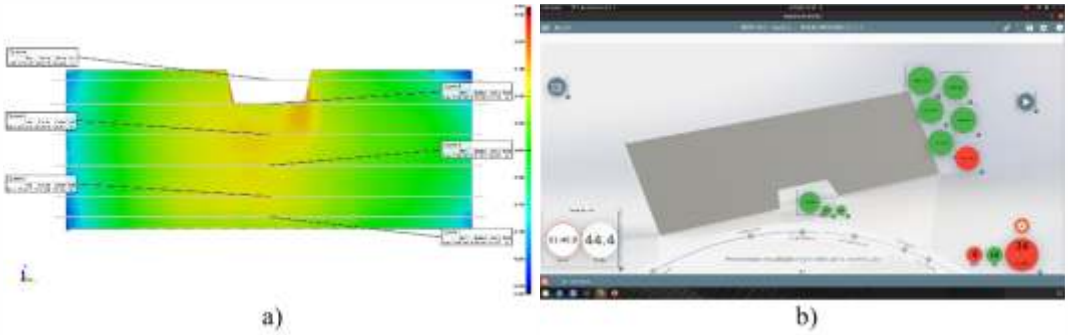


**FIGURA 4**
*a) Medição de provetes calibrados; b) Determinação das curvas de calibarção.*

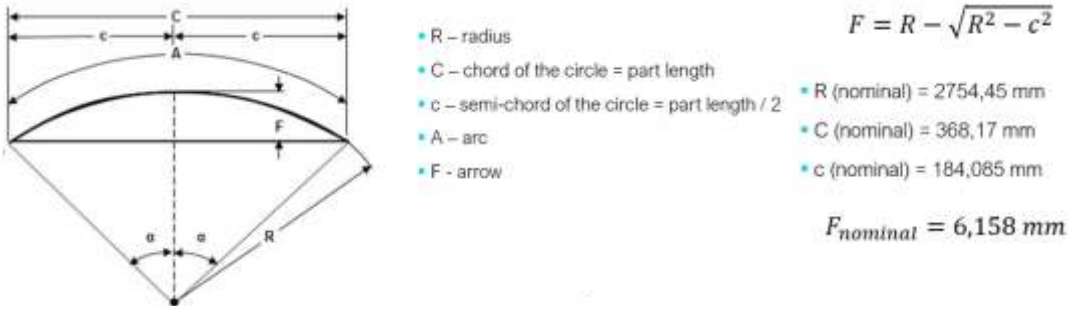



**FIGURA 5**
*Método de corelacionamento das medições (ISRA vs. Blue Laser).*

| Sample | 3D Shape | 3D shape Rate | Blue Laser (1) | Blue Laser Rate | Sample | 3D Shape | 3D shape Rate | Blue Laser (1) | Blue Laser Rate |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,806 | Nok | 2473,61 | Nok | 11 | 0,777 | Nok | 2433,78 | Nok |
| 2 | 0,691 | Nok | 2477,61 | Nok | 12 | 0,901 | Nok | 2397,05 | Nok |
| 3 | 0,313 | Ok | 2678,72 | Ok | 13 | 0,383 | Ok | 2586,33 | Ok |
| 4 | 0,606 | Nok | 2520,92 | Nok | 14 | 0,559 | Nok | 2514,43 | Nok |
| 5 | 0,306 | Ok | 2666,71 | Ok | 15 | 0,364 | Ok | 2591,54 | Ok |
| 6 | 0,459 | Ok | 2560,73 | Ok | 16 | 0,623 | Nok | 2495,03 | Nok |
| 7 | 0,536 | Nok | 2527,37 | Nok | 17 | 0,448 | Ok | 2563,95 | Ok |
| 8 | 0,356 | Ok | 2615,93 | Ok | 18 | 0,367 | Ok | 2516,94 | Ok |
| 9 | 0,360 | Ok | 2595,43 | Ok | 19 | 0,414 | Ok | 2578,12 | Ok |
| 10 | 0,480 | Ok | 2548,64 | Ok | 20 | 0,390 | Ok | 2583,56 | Ok |

**FIGURA 6**
*Resultados das medições com ISRA 3D scan e Blue Laser.*

## CONCLUSÃO

O desenvolvimento e implementação deste algoritmo de medição de curvatura demonstraram um avanço significativo na garantia de qualidade dos back lights de ecrãs automóveis. O uso de inteligência artificial, combinado com técnicas avançadas de laser scanning, não só aumenta a precisão nas medições como também melhora a eficiência do processo produtivo, assegurando que os produtos finais cumpram os rigorosos padrões dimensionais exigidos pela indústria automóvel.

Ambos os sistemas (3D shape e Blue Laser) foram capazes de avaliar o produto corretamente, existindo uma correlação funcional entre ambos os métodos de medição. Verificou-se uma redução nas tolerâncias aplicadas em produção face às tolerâncias calculadas: para a versão 14,9, a tolerância calculada foi de ±230,5 mm, enquanto a utilizada é de ±225 mm; para a versão 12,3, a tolerância calculada foi de ±349 mm, sendo utilizada ±340 mm.

O método adotado em produção contínua envolve a utilização do scanner 3D controlar a produção em intervalos de quatro horas, en-

quanto o Blue Laser é empregue para realizar o controlo contínuo da totalidade da produção. Em conclusão, o sistema foi configurado de forma robusta, garantindo proteção eficaz contra a entrega de amostras defeituosas ao cliente.

**AGRADECIMENTOS**

Os autores reconhecem o financiamento do Projeto Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002) cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa através do NextGeneration EU.

# SISTEMA AUTOMÁTICO DE INSPEÇÃO DA QUALIDADE DE PEÇAS DE ALUMÍNIO FUNDIDO

**Rui Nascimento[1], Cláudia D. Rocha[1], Joana Alves[2], Dibet Garcia Gonzalez[2], Luís F. Rocha[1]**
**1** INEST TEC - Institute for Systems and Computer Engineering Technology and Science, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
**2** Sentinelconcept, Lda, N105 247 Piso 1, Sala J1.3, 4835-164 Guimarães

A indústria de manufatura continua a expandir-se, impulsionando o crescimento económico, a criação de empregos e estimulando a investigação, a inovação tecnológica e a criação de valor. À medida que os produtos se tornam mais avançados, a exigência de precisão e fiabilidade nos componentes aumenta. Peças de alumínio injetadas, amplamente utilizadas em diversos sectores, apresentam desafios únicos que podem complicar o processo de inspeção. O processo de fabrico destas peças é suscetível a defeitos que podem comprometer a qualidade, a funcionalidade e a fiabilidade do produto. A deteção destes defeitos durante a produção é essencial para assegurar a qualidade e minimizar falhas. Dada a natureza competitiva da indústria, manter elevados padrões de qualidade é fundamental para as empresas se diferenciarem dos seus concorrentes.

Atualmente, muitas empresas ainda dependem da inspeção visual manual para o controlo de qualidade. Este método é demorado, subjetivo e propenso a erros causados por fadiga e desatenção dos operadores, permitindo que peças não conformes avancem no processo de produção. Em linha com os princípios da Indústria 5.0, a integração de tecnologias, como sistemas de visão computacional para a inspeção de qualidade, pode melhorar substancialmente a qualidade dos produtos. Estes sistemas permitem inspeções mais rápidas e precisas, agilizam o processo de inspeção, apoiam os operadores humanos, melhoram a eficiência global e reduzem a incidência de peças defeituosas na linha de produção [1, 2].

O presente caso de estudo recorre a peças de alumínio da SLM, uma empresa especializada na produção de componentes de alumínio fundido para a indústria automóvel, em que a Sentinel concept, LDA e o INESC TEC desenvolveram um sistema de inspeção automático para o controlo de qualidade de peças de alumínio fundido, representado na Figura 1.




**FIGURA 1**
*Sistema de inspeção desenvolvido nas atividades do projeto Hi-rEV.*

Após as operações de fundição e maquinagem, as peças são rigorosamente inspecionadas visualmente pelos operadores para identificar eventuais não conformidades antes do seu envio aos clientes. Tais defeitos podem comprometer a funcionalidade e a integridade estrutural das peças, reduzindo a sua durabilidade. Atualmente, a inspeção é predominantemente manual, sendo caracterizada por ser repetitiva e complexa, sujeita a falhas decorrentes de fadiga e distração dos operadores.

Diante desses desafios, o objetivo é validar o sistema desenvolvido com o intuito de auxiliar os operadores durante a inspeção. Entre as possíveis não conformidades, a ocorrência de porosidade nas peças, especialmente após o processamento mecânico, destaca-se como a mais significativa e difícil de detetar manualmente. Nesse contexto, podem ser identificadas dois tipos de porosidade presentes: na superfície das peças, conforme ilustrado na Figura 2, e no interior dos furos, representadas na Figura 3. Neste último caso, devido à limitação dos sistemas de inspeção em visualizar todas as áreas críticas das peças, é necessário recorrer a métodos não convencionais que permitam a aquisição de imagens dessas áreas, como o uso de câmaras endoscópicas.



**FIGURA 2**
*Exemplos de porosidade na superfície das peças.*

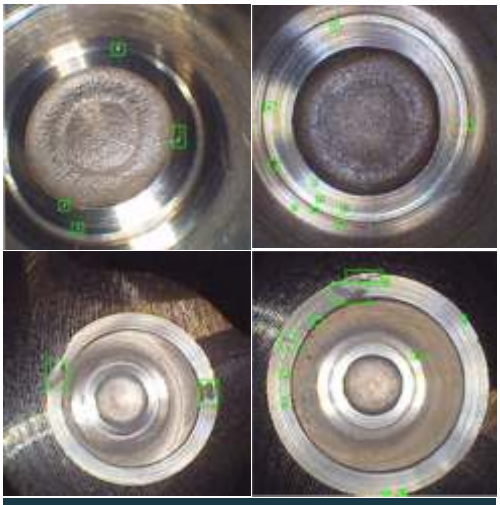


**FIGURA 3**
*Exemplos de porosidade no interior dos furos.*

A arquitetura do sistema desenvolvido, ilustrada na Figura 4, utiliza um manipulador colaborativo Universal Robot UR5 com uma garra Robotiq 2F-85 para operações precisas de manipulação e transporte de peças durante a inspeção. Uma câmara Mako G-503B capta imagens em alta resolução das peças, enquanto uma iluminação domo minimiza reflexos e sombras típicos de componentes de alumínio fundido. A comunicação entre os diversos componentes do sistema é gerida por protocolos como TCP/IP, comunicação serial, GigE e RS232, garantindo uma integração eficaz. O design modular do sistema permite uma fácil adaptação a diferentes ambientes de produção, oferecendo uma solução versátil e escalável para o sistema.

O sistema utiliza o software Sentinel Vision, desenvolvido em C++, para gerir o processo de inspeção. Este software integra bibliotecas como Qt, OpenCV, Halcon e Nvidia CUDA Toolkit, assegurando uma comunicação robusta entre componentes. A operação segue um modelo de fluxo de execução, gerido por um componente Core multithread que coordena a sequência de execução dos blocos funcionais. Estes blocos realizam tarefas específicas, como processamento de imagens e comunicação com dispositivos externos, incluindo câmaras compatíveis com GigE e deteção de defeitos com recurso a um modelo de deteção de objetos pré-treinado, especificamente a arquitetura YOLOv8. O design deste sistema, que segue uma arquitetura modular, permite a sua personalização para lidar com os desafios deste projeto. Na Figura 5, é possível visualizar algumas das janelas do Sentinel Vision: à esquerda encontra-se a janela do Dashboard

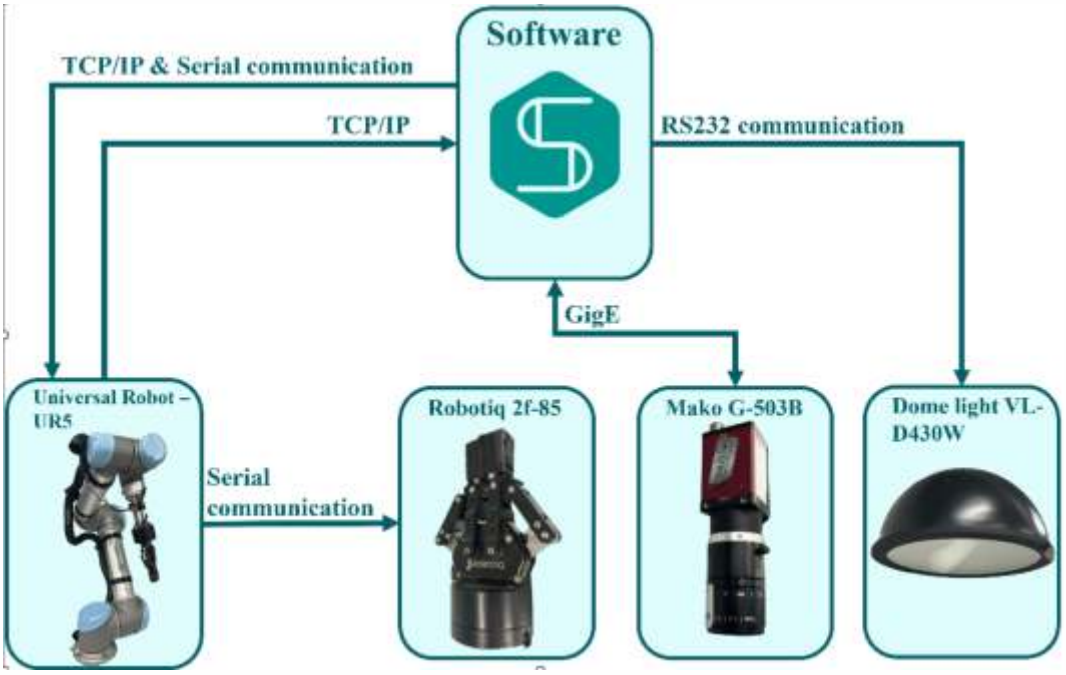



**FIGURA 4**
*Diagrama de blocos da arquitectura do sistema de inspeção.*



**FIGURA 5**
*Sofware Sentinel Vision: (esq.) Dashboard e (dir.) Configuração do ciclo.*

que permite controlar o início do processo de inspeção e exibe os resultados obtidos, ao passo que à direita visualiza-se a janela dedicada à definição do fluxo de inspeção.

O desenho desta ferramenta simplifica o trabalho dos especialistas em inspeção ótica automática com recurso a técnicas de visão artificial e inteligência artificial. Além das interfaces apresentadas na Figura 5, outras janelas do software ajudam a agilizar os trabalhos de configuração, testes e colocação em funcionamento de todos os equipamentos e algoritmos utilizados na solução.

Com os resultados obtidos durante a fase de testes foi possível provar que o sistema consegue realizar a inspeção das peças e detetar as porosidades, quer à superficie das peças quer no interior dos furos. O sistema, que integra capacidades de automação através do software Sentinel, realiza inspeções de qualidade em diferentes peças, transportando-as para o local de inspeção. Para validar o sistema, foi conduzido um estudo com a SLM focado na deteção de porosidades nas superfícies e no interior dos furos das peças. Com estas implementações, o sistema não só demonstrou a sua capacidade de deteção de defeitos, mas também realçou os benefícios práticos na redução de desperdício de material e na melhoria da eficiência nos processos industriais.

**AGRADECIMENTOS**
Publicação enquadrada na Agenda Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis n.º C644864375-00000002, empresa líder, PALBIT, S.A., projeto n.º 64.

**REFERÊNCIAS**

**[1]** Nascimento, R., Ferreira, T., Rocha, C., Filipe, V., Silva, M. F., Veiga, G., & Rocha, L. (2023). Quality Control of Casting Aluminum Parts: A Comparison of Deep Learning Models for Filings Detection. 2023 *IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, (pp. 105-111). Tomar. doi:10.1109/ICARSC58346.2023.10129634

**[2]** Nascimento, R., Martins, I., Dutra, T. A., & Moreira, L. (2023). Computer Vision Based Quality Control for Additive Manufacturing Parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3241-3256. doi:10.1007/s00170-022-10683-5




## As nossas áreas de atuação

### Automação

Efetuamos toda a eletrificação dos equipamentos, programação de PLC's e HMI's, programação de eixos lineares, implementação de sistemas de alimentação flexíveis ou através de panelas vibratórias.

### Robótica

Para operações de assemblagem, "Pick & Place", "Bin Picking", paletização, entre outras. Trabalhamos com diversas marcas e tipos de robôs industriais de forma a encontrar o que melhor se adapta às necessidades do cliente.

### Visão Artificial

Temos um leque de opções alargado neste ramo, com software desenvolvido por nós à medida de cada cliente e da solução pretendida e com o uso de diversos tipos de câmaras.

### IoT – Indústria 4.0

Desenvolvemos soluções de eletrónica feitas à medida, para comunicação entre o chão de fábrica e cloud.

Dream For IT
You Dream, we Do IT

BATALHA
+351 244 881 223
geral@dreamforit.com
www.dreamfortek.dreamforit.com

# LIMITATIONS AND PROSPECTS OF WIRELESS VIBRATION MONITORING FOR AUTOMATIC CHATTERING DETECTION

**Henrique Oliveira[1], Ana Reis[1], Joaquim Mendes[1,2], Tiago Silva[2]**

**1** Faculty of Engineering of the University of Porto, Porto, Portugal
**2** INEGI, Porto, Portugal

***IIoT and Machine Learning applications have been on the rise when it comes to manufacturing processes' automation and optimization. In fact, this sector has heavily invested on improving performance and shortening maintenance downtimes with its implementation. Machining operations, being a considerably flexible and versatile solution to the manufacturing of mechanical components and parts. It allows for rather complex geometries and cutting trajectories, which the operator must account for while setting up the operation's parameters. Additionally, CNC machining centers already come instrumented with a great variety of sensoring devices, and data extraction. All of this makes for a phenomenal playground to experimenting with this next automation step.***

***In this article are covered the beginnings of the devisal of a sensing device to extract vibration data from the CNC machine. After some research, it was found that this data is extremely relevant for chattering detection and tool wear prediction. The current solutions being used are experimental, expensive, non-modular and difficult to setup. Thus, it is unthinkable to implement them at a large scale in continuous operation. The current work consists on exploring different, more compact, wireless gadgets and seeing where they stand when compared to the current solution. Apart from the aforementioned advantages, this solution should provide a cheap, home-made, compact solution that could just about solve many of the tool failure prediction obstacles [1]. Two such devices were put side by side for comparison purposes, so as to see where their limits lie, in terms of sampling rate performance. The first device proved that using such a low-energy solution combined with BLE communication wouldn't suffice our needs. A second, higher performance hardware arrangement was found - the ATOM S3 from M5Stack - that showed much better results could be obtained.***

***Additionally, this latter device was carefully chosen in line with the future work that is intended to be made with this data. Namely, the processing power is much higher, which could support AI computation models for edge implementation.***

**KEYWORDS**
IIOT, EDGE COMPUTING, CNC MACHINING, PREDICTIVE MAINTENANCE

## INTRODUCTION

IIoT sensoring and AI implementation on manufacturing processes is considered to constitute the next big step in revolutionizing industry [2]. CNC machining processes are no exception to this change of paradigm. Research has already been conducted on how these tools could be monitored in terms of wear, as well as chatter detection [3]. This technological merge has proven to lead, when successfully implemented, to high quality machined surfaces. This is especially true for more complex operations, such as the case of multi-material components, and/or variable removal rates (due to complex geometry paths). These complex operations introduce non-linearities and are becoming more and more recurrent in the industry. Thus, the importance of studies such as these is highly opportune.

A common data feature used for machining fault detection and tool wear prediction is vibration. The phenomenon known as chattering [4] is considered to be one of the major causes of poor surface finishes and of reducing tool life. Being a case of self-induced vibration, its connection to tool vibration is trivial. Kounta et

al. [5] and Sener et al. [6] developed two, very similar approaches to these vibration-based deep learning models. Their success, as well as other academics' is validation of the relevance of this piece of data information for such solutions.
In this paper is proposed and developed a home-made, low-cost and compact solution for acquiring vibration data via wireless connection. With these characteristics, it is expected that this device could be distributed at a large scale to various machining centers. This way, the acquired data accounts for machine-inherent variability, increasing robustness of the AI models to be trained with them. Additionally, the flexibility with which the aforementioned attributes equip this solution is yet another notable feature to take into account. In fact, such a device could be easily installed in any kind of machining center, without much of a hassle during setup. Figure 1 provides a simple scheme of what the end goal solution may seem like when finished.




**FIGURA 1**
*Schematic of end goal solution.*

## TOOLS AND METHODS

The example cable connected solution (from now on original solution) used for comparison purposes was PCB Piezotronics' accelerometer model 356B08. This is an analog accelerometer with measuring range of +/- 50g . It was mounted on the machine tool head, as can be seen in Figure 2b, and it's connected to a DAQ system acquired at a rate of 2048Hz. Although this is the goal and reference of all our device iterations, some adjustments to these requirements were made to ease the selection process. Specifically, the measuring interval does not need to be so wide, being the standard +/-16g sufficient for these kinds of operations. Additionally, even if the sampling frequency decreases, the important information should still be present for sampling frequencies rounding the 1kHz mark, so this was set as the goal for these wireless devices.

The device development was done in an iterative way, with the first solution based around the Seeed Studio XIAO nRF52840 Sense board. Later on, due to hardware constraints this solution was dropped and a second solution was developed around the M5Stack ATOM-S3 Dev Kit. The next sections of this article cover the steps taken to develop both of these devices, as well as an analysis to what measures were or could be taken to harness their full potential. Simply put, the optimal device for the case at hand is one that acquires the 3-coordinate acceleration time-series with the highest sampling rates possible in a relatively low energy manner.

Both solutions share multiple similarities. Both are to be connected to an outside device adjacent to the CNC machine via a wireless communication protocol. Both solutions integrate within the same board a 6-axis IMU sensor, and a microprocessor with wireless communication capabilities. They should be fed by an external power source (i.e. a battery). These should be fixed to the machine stator, as close to the spindle as possible. Using IMU sensors, this is the best option for positioning, as extremely high rotation speeds would introduce centrifugal accelerations far greater than the vibration component, thus ruining the output values. These characteristics keep the devices compact as well as low cost.

### 1ST DEVICE ITERATION - BLE

The Seeed Studio XIAO nRF52840 Sense board is built around the nRF52840 microprocessor, which has a maximum clock speed of 64MHz and 256KB RAM memory. It offers connectivity through Bluetooth 5.0, lacking any kind of Wi-Fi protocol support. Its integrated 6-axis IMU is a LSM6DS3TR-C with 16 bits of resolution and maximum sampling speeds of 6.66kHz. Figures 2a and 2b illustrate the wire connections of this first device, as well as its experimental setup in the machine, respectively. From Figure 2b can be seen both this wireless device - circled in red, with the battery in the upper square - and the original cable connected solution - circled in blue.

### 2ND DEVICE ITERATION - WI-FI

As will be discussed in the next section 3, the first approach was too conditioned in terms of

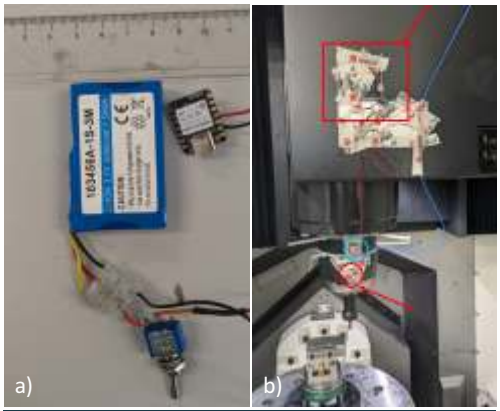



**FIGURA 2**
*a) Device Wiring; b) Device setup.*

hardware capabilities for the expected performance level. After some research, the M5Stack ATOM-S3 Dev Kit was selected as it was the most promising solution in the market considering the limited price range - Figure 3. Although slightly less compact in size (24x24x13 mm), this ESP32-S3FN8 microprocessor based chip reveals itself as a far more promising solution than its predecessor. The microprocessor consists on a 240MHz dual core with 512 SRAM of memory space. It supports both Bluetooth 5.0 and 2.4GHz Wi-Fi wireless connectivity protocols. The integrated IMU sensor is a MPU-6886 model, with very similar characteristics to the previous solution.

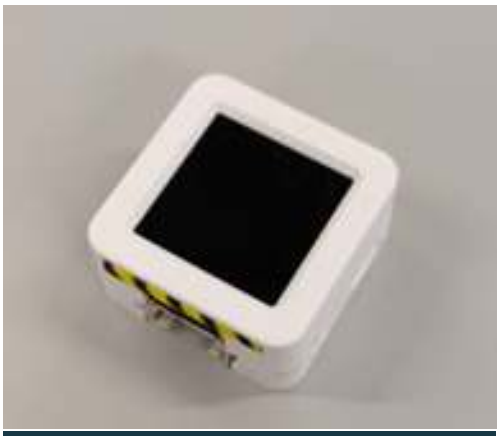


**FIGURA 3**
*Second device iteration.*

Its main advantages and driving forces to choose this board are multiple. Firstly, the ability to establish a Wi-Fi connection instead of a BLE one is already an enormous upgrade. BLE connections tend to be faultier and less reliable, as well as having lower throughput. They are more fit for less energy consuming device solutions. Secondly, the esp32-S3 MCU has far better performance characteristics than the nRF52840. It tops with an increase on clock speed of almost fourfold, as well as double the memory space. Additionally, this new MCU has a dual core processor, which could be utilized in an independent manner and separate the tasks of data acquisition and continuous transmission via Wi-Fi. Another feature of this MCU is the capability of vector processing (SIMD). Altogether, this could greatly improve processing speeds of data intensive operations, namely NN computation [7]. Vector processing should help attenuate energy consumption [8]. Finally, it should also be noted that this solution offers a built in LCD screen. This could be useful for some kind of HMI feature, such as visual instability warnings.

## RESULTS AND DISCUSSION

A thorough analysis on the capabilities and limitations of the developed solutions is resumed in this section.

### 1ST DEVICE ITERATION - XIAO NRF52840

For the first gadget, several algorithms were developed, and compared so as to conclude on the effects of given factors or features. These features include:

- Batch vs Continuous;
- Cable vs Wireless;
- 1 vs 3 coordinates;
- Resultant acceleration calculation;
- Circular Buffer.

Table 1 summarizes the results of this feature analysis. To obtain the best comparison quality, all of the algorithms share the same basic characteristics. All were optimized to get the highest value of sampling speed by sending as much data as possible to a receiver laptop for a time interval of 10s. This way, an average value for sampling rate could be easily calculated by dividing the number of samples by 10. The commanding algorithm is a python script on a laptop that receives the data from the board and stores it in a CSV file.

**TABELA 1**
*Comparison of Sampling Speeds for the different algorithm solutions - 1st Device.*

| Algotithm Name | Sampling Speed [Hz] |
|---|---|
| Serial_1Coord_Batch | 1500 |
| Serial_3Coord_Batch | 500 |
| Serial_ResultantOnly_Batch | 500 |
| Serial_1Coord_CircularBuffer | 600 |
| Serial_1Coord_Continuous | 600 |
| Serial_3Coord_Continuous | 330 |
| Serial_ResultantOnly_Continuous | 330 |
| BLE_1Coord_Batch | 600 |
| BLE_3Coord_Batch | 200 |
| BLE_ResultantOnly_Batch | 200 |
| BLE_1Coord_Continuous | 50 |
| BLE_3Coord_Continuous | 50 |
| BLE_ResultantOnly_Continuous | 50 |

First, an analysis of Serial connection algorithms was done. Although this isn't a wireless solution, it provides useful insight of what the top limit of performance might be for this specific board. Thus, it was observed that a maximum of 1500 data values could be obtained per second if stored as a batch before being sent (Serial+Batch algorithms). If only one of the coordinate values of acceleration is stored, this corresponds to a 1500Hz sampling rate. This value drops, however, if the three components are read, precisely to a third of this value, which hints that it might halve for a 2 coordinate read.

The 3 coordinates need to be read for resultant computation, as can be seen in Equation 1. Since the sampling rate is unaffected between the 3 coordinate and the resultant transmission, independently from all other factors at play, it can be concluded that the transmission prints aren't as computationally time consuming as the

sensor reads. This is an interesting find, as it demonstrates the flexibility of this solution for edge computation, since it doesn't decrease its performance.

$$Resultant = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

When making the jump for continuous, real-time sensor reads, the microprocessor becomes busier, as it is asked to read and send data one at a time. This explains the significant drop in sampling rate. Moreover, an analysis on the impacts of the

decimal places of the data being sent was conducted for all algorithms present in Table 1. The only ones that observed any considerable deviations in terms of sampling speed were the serial connection, continuous acquisition ones. Table 2 summarizes the actual results. As expected, less decimal places equate to an increase in sampling speed.

Still in the Serial transmission algorithms, the idea of implementing a Circular Buffer [9] emerged and was analyzed. Since this microprocessor has limited capabilities of executing merely one instruction at the time, the buffer couldn't be of much use, and didn't change the performance results. Still, this tool is later on reutilized on the second device, since it has a dual core processor that can take care of two instructions at the same time.

Moving on to the BLE algorithms, one can expect the aforementioned phenomena to occur. Apart from those, other effects deserve a closer look. For example, the batch algorithms proved to have lower rates than their serial connection counterparts. During the data collection time interval of these algorithms consist only in sensor reads and data storage, exactly as happens in the serial+Batch algorithms. This goes to show that simply maintaining the BLE connection between devices heavily hinders sampling rates. And in the case of the continuous acquisition algorithms, the connection speed is so low that the number of coordinates read doesn't affect performance.

Considering that the BLE continuous sampling rate is considerably low, and cutting operations

**TABELA 2**
*Effects of Data Decimal Places in Sampling Rate for 1 coordinate reads and only resultant accelaration transmission.*

| Algorithm Name | Ser_1Coord_Cont | Ser_Result_Cont |
|---|---|---|
| 6 Decimal Places | 600Hz | 340Hz |
| 3 Decimal Places | 750Hz | 375Hz |
| 2 Decimal Places | 800Hz | 380Hz |
| 1 Decimal Places | 890Hz | 410Hz |

are very brief, a further analysis on the batch limitations was seen as the obvious follow-up. Thus, Table 3 presents the data transmission rates of both Serial and BLE connections. This provides useful information to compute the time interval needed between batch reads (during which no data is gathered) for a certain batch size. Additionally, the board's memory is capped at 45000 values, which corresponds to 30s batches for Serial connection algorithms or

**TABELA 3**
*Transmission Rates: BLE vs Serial connection.*

| | Samples/Second |
|---|---|
| Serial | 1000 |
| BLE | 50 |

## 2ND DEVICE ITERATION - M5STACK ATOM S3

A similar analysis approach was conducted for the second device selection - the ATOM-S3. Due to its outstanding performance relative to the previous device, some of the less interesting factors were taken into account. Table 4, analogously to Table 1, compares various algorithm variations implemented on this device.

**TABELA 3**
*Comparison of Sampling Speeds for the different algorithm solutions - 2nd Device.*

| Algorithm Name | Sampling Speed [Hz] |
|---|---|
| Serial_3Coord_Continuous_1Core | 1000 |
| Wi-Fi_3Coord_Continuous_1Core | 600 |
| Wi-Fi_3Coord_Batch_1Core | 1000 |
| Wi-Fi_3Coord_Continuous_2Core | 1000 |

The first algorithm for serial, three-coordinate continuous data acquisition provided a benchmarking sample rate for the following comparison. No need for batch or 1 coordinate algorithm analysis, as this 1 kHz limit is imposed by the IMU settings.

When making the jump to wireless communication - namely Wi-Fi - this value drops to 600 Hz. This loss of information can be circumvented with a fixed buffer (batch acquisition) or by applying techniques that utilize the dual core capabilities of the board. The first - batch - solution would bring the sampling rate back to the 1 kHz mark, however at the cost of lag and chip memory space.

That's where the final and most adequate solution to this problem comes around - the dual core algorithm. This divides the program into two different tasks. The first only reads the sensor information at maximum rate, storing it into a shared buffer. From it, the second task, performed by a different core, sends the data via Wi-Fi. This dual-core solution provides the ability of both tasks being executed independently at

the same time.
In order to guarantee the coordination between the two tasks and a reliable performance from said algorithm, a more carefully thought out solution was implemented. Namely, the need for a circular type buffer was considered essential. A simple scheme on the basic workings of such a tool is illustrated on Figure 4.

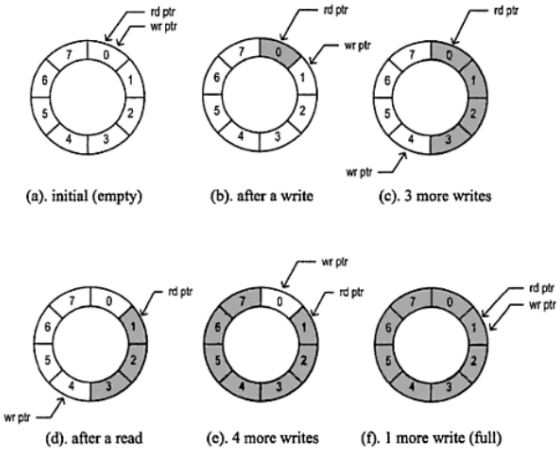



**FIGURA 2**
*a) Device Wiring; b) Device setup.*

With this, the read and write pointers index the stored values independently from one another. The buffer gives them some time-space to work around lag issues. They should, however, run on average at the same speed, so as to not completely saturate the buffer. This does not seem to be an issue in this specific application, as the evolution of the available space inside the buffer throughout a read was recorded for some experiments, and the transmission task was able to catch up to the reading task for countless times, managing not to lose any information.

## CONCLUSION

This preliminary study served to get some insights on the capabilities of the current low-cost MCP units on the market and their potential for an industrial process monitoring implementation. One can conclude after this brief read, that the computing performance of such devices is already considerable for these applications.

Due to the laboratory nature of these results, however, further on-site analysis is a must as a future work. Namely, issues with the device's fixation and damage safety during operation are some of the obstacles found in terms of their mechanical behavior. Lag, range and quality of wireless connection, to name some of the other problems expected when making the jump to the aggressive industrial environment.

The current analysis on the computing performance of these low-level sensing devices brought about a promising view over their implementation on industrial machinery monitoring. Their cost to performance potential ratio is commercially interesting, making for a promising solution for wide-spread distribution.

Acknowledgements

The author gratefully acknowledges the funding of Project Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002) cofinanced by Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa through NextGeneration EU.

Another special thanks to Full Professor Joaquim Gabriel Mendes who supervised and greatly helped during the process of developing this study.

## REFERENCES

**[1]** F. D. Santos, Alteracões climáticas / Filipe Duarte Santos, Ensaios da Fundação, Fundação Francisco Manuel dos Santos, Lisboa, 2021.
**[2]** C. A. My, The role of big data analytics and ai in smart manufacturing: An overview, in: R. Kumar, N. H. Quang, V. Kumar Solanki, M. Cardona, P. K. Pattnaik (Eds.), Research in Intelligent and Computing in Engineering, Springer Singapore, Singapore, 2021, pp. 911-921.
**[3]** M. Iliyas Ahmad, Y. Yusof, M. E. Daud, K. Latiff, A. Z. Abdul Kadir, Y. Saif, Machine monitoring system: a decade in review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 108 (11) (2020) 3645-3659.
**[4]** G. Quintana, J. Ciurana, Chatter in machining processes: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture 51 (5) (2011) 363-376. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001.
**[5]** C. A. K. A. Kounta, L. Arnaud, B. Kamsu-Foguem, F. Tangara, Deep learning for the detection of machining vibration chatter, Advances in Engineering Software 180 (2023) 103445. doi:https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2023.103445.
**[6]** B. Sener, M. U. Gudelek, A. M. Ozbayoglu, H. O. Unver, A novel chatter detection method for milling using deep convolution neural networks, Measurement 182 (2021) 109689. doi:https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109689.
**[7]** S.-J. Lee, S.-S. Park, K.-S. Chung, Efficient simd implementation for accelerating convolutional neural network, in: Proceedings of the 4th International Conference on Communication and Information Processing, ICCIP '18, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018, p. 174-179. doi:10.1145/3290420.3290444. URL https://doi.org/10.1145/3290420.3290444
**[8]** A. Fanariotis, T. Orphanoudakis, V. Fotopoulos, Reducing the power consumption of edge devices supporting ambient intelligence applications, Information 15 (3) (2024). doi:10.3390/info15030161. URL https://www.mdpi.com/2078-2489/15/3/161
**[9]** R. Inglés, M. Orlikowski, A. Napieralski, A c++ shared-memory ring-buffer framework for large-scale data acquisition systems, in: 2017 MIXDES-24th International Conference" Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE, 2017, pp. 161-166.
**[10]** T. Karadeniz, Hardware design and implementation of a network-on-chip based high performance crossbar switch fabric.

glartek

# Mais segurança.
# Mais qualidade.
# Mais produtividade.

Digitalize e conecte operadores, processos, e máquinas para reduzir erros, aumentar a eficiência e garantir a conformidade.



Confiado por:

SUBARU · RENAULT · YAZAKI · DAIMLER TRUCK · +40 líderes industriais

Saiba mais em:
glartek.com →

# SMART FACTORY - PLATAFORMA IOT COM FERRAMENTAS DE IA INTEGRADAS

**Cristina Garrido[1], Yuga Hatta[1], João Morgado[1], António Pontes[1], Miguel Magalhães[1], Rui Madureira[2], Ricardo Carvalho[2], Filipe Monteiro[2], Ana Reis[3]**

**1** Microprocessador, Rua Cidres 1444, 4455-442, Perafita, Portugal.
**2** INEGI, Rua Dr. Roberto Frias 400, 4200-465, Porto, Portugal.
**3** FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal.

***As plataformas IoT associadas a ferramentas de inteligência artificial (IA) permitem otimizar e planear a produção, assim como a possibilidade de deteção de falhas na produção que possam influenciar a qualidade do produto. O aparecimento das tecnologias 4.0 está a marcar uma mudança de paradigma no setor industrial, promovendo a transformação digital de diversos processos por meio da integração de sensores conectados à internet e consequentemente poderem ser utilizadas ferramentas de Machine Learning (ML). Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma plataforma IoT com ferramentas de IA integradas para monitorizar a produção de um equipamento de fundição por baixa pressão. A plataforma IoT desenvolvida pela Microprocessador é uma ferramenta flexível com possibilidade de aquisição de diferentes contadores, máquinas e sensores, utilizando diferentes protocolos de comunicação. A organização dos dados na plataforma é dinâmica, isto é, permite a criação de grupos para diferentes áreas de produção, processos, centros de custos e tipos de equipamentos. Com esta plataforma, os processos digitalizados podem ser consultados em tempo real em dashboards personalizadas por utilizador permitindo a deteção de falhas e o controlo e otimização do processo.***

*Using IoT platforms combined with artificial intelligence (AI) tools allows production to be optimised and planned, and production faults that could affect product quality to be detected. The emergence of 4.0 technologies is marking a paradigm shift in the industrial sector, promoting the digital transformation of various processes through the integration of sensors connected to the internet and, consequently, the use of Machine Learning (ML) tools. This paper presents the development of an IoT platform with integrated AI tools to monitor the production of a low-pressure die casting equipment. The IoT platform developed by Microprocessador is a flexible tool that can acquire different counters, machines and sensors using different communication protocols. The organisation of data on the platform is dynamic, i.e., it allows groups to be created for different production areas, processes, cost centres and types of equipment. With this platform, the digitalised processes can be consulted in real time on dashboards customised for each user, enabling the detection of faults and the control and optimisation of the process.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL; FUNDIÇÃO.
*Artificial Intelligence; Casting.*

## INTRODUÇÃO

A indústria da manufatura tem vivenciado rápidas e significativas transformações impulsionadas pelos últimos avanços tecnológicos. A aplicação destes recursos não aumenta apenas a disponibilidade de informação precisa sobre os processos e produtos, mas também contribui para a melhoria das condições de trabalho dos operários, sobretudo promovendo a otimização de métodos e hábitos na execução de tarefas, resultando em maior eficiência, segurança e qualidade no ambiente de produção. No caso do setor de fundição, a introdução de IA e ML permite melhorar a qualidade das peças, redução de taxas de refugo, redução de custos, desenvolvimento de novos produtos, etc [1-3].

O processo de fundição por baixa pressão é uma técnica com adoção crescente na indústria para a produção de componentes de alto desempenho a partir de ligas leves, como alumínio e magnésio. Esta técnica oferece várias vantagens em comparação com o processo tradicional de fundição por gravidade, destacando-se principalmente pelo controlo preciso do processo de enchimento. Esse controlo permite que o metal líquido flua de forma laminar, reduzindo ao mínimo o aprisionamento de ar e, consequente-

mente, os defeitos internos nos fundidos. Devido ao enchimento se realizar em contra gravidade, também deixa de existir a necessidade de utilização de alimentadores, pois o controlo da solidificação passa a ser realizado por via de canais de refrigeração. Por estas características, a fundição por baixa pressão é amplamente reconhecida pela sua capacidade de produzir peças de altíssima qualidade [4].

## MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento de baixa pressão disponibilizado pelo INEGI (Figura 1) está equipado com uma prensa capaz de aplicar uma força de fecho de 24 toneladas, um forno elétrico de resistências com um cadinho com capacidade para 350 kg de liga fundida e um circuito de arrefecimento a ar e/ou água para o molde.

A Microprocessador tem uma plataforma IoT - *AllSynergy* que se caracteriza por ser uma ferramenta flexível com possibilidade de aquisição de diferentes contadores, máquinas e sensores, utilizando diferentes protocolos de comunicação (por exemplo: OPC, OPC UA, MQTT, RestAPI, etc.). Esta plataforma é uma solução web com arquitetura centralizada, de forma a que uma única instância do servidor possa ser utilizada para diversos sites. Esta solução pode ser instalada em servidor privado ou em serviço de nuvem, e permite o acesso a partir de diversos tipos de equipamentos eletrónicos (ex: computador, telemóvel, tablet) bem como o acesso a múltiplos utilizadores, cada um com um perfil de acesso personalizado, com diferentes níveis de acesso aos dados e funcionalidades da plataforma.

A plataforma permite a aquisição de qualquer tipo de variável (como temperaturas, pressões, energia elétrica, etc.) e efetua o armazenamento de um conjunto de dados previamente selecionados que melhor caracterizam o processo. O tipo de base de dados a utilizar é de acordo com o tipo e volume de dados gerados pelo processo (exemplos: timeseries, Big Data, etc.), sendo a organização dos dados na plataforma dinâmica, isto é, permite a criação de grupos para diferentes áreas de produção, processos, centros de custos e tipos de equipamentos.

Os processos digitalizados podem ser consultados em *dashboards* personalizados pelo utilizador e sob a forma de análises de vários tipos, o que permite definir objetivos e metas simples ou agregar aos processos, com a possibilidade de definir alarmes.

Importa salientar que os dados são recolhidos provenientes de dois sistemas: o PLC do forno e um sistema de medida de energia elétrica auxiliar. No primeiro sistema, o PLC, as variáveis identificadas como relevantes são disponibilizadas pelo sistema principal do forno e através do protocolo OPC-DA são lidas e posteriormente inseridas na base de dados com uma periodicidade de segundo. O segundo sistema apenas para medida da energia elétrica consumida, disponibiliza os seus dados (ex: tensão, corrente, potência, etc) através do protocolo aberto Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) a cada minuto. De salientar que este dispositivo de medida é versátil e permite configurar as variáveis a serem enviadas via MQTT.

## RESULTADOS

A plataforma *AllSynergy* foi instalada num servidor interno que o INEGI disponibilizou sendo que no início optou-se por usar a versão SQL Server EXPRESS com 10 GB de capacidade de armazenamento, mas após recolher dados durante alguns dias, a capacidade de armazena-



**FIGURA 1**
*Equipamento de fundição por baixa pressão - fases do processo.*

mento da base de dados revelou-se insuficiente e foi necessário mudar para uma versão com uma maior capacidade de armazenamento: o SQL SERVER 2022. Esta versão oferece capacidade de armazenamento ilimitada, restringindo-se unicamente ao espaço disponível no disco.

Para alimentar o *AllSynergy* com dados do forno, foi desenvolvido um novo *Smart Connector,* módulos de software, para recolha de dados do processo em tempo real ou quase real, medindo os aspetos/fluxos mais importantes do processo, de modo a existirem dados em quantidade suficiente, com o objetivo de detetar desvios em relação ao padrão da produção, e emitir alertas para minimizar a quantidade de peças com defeito. Inicialmente, este *Smart Object* iria comunicar com o PLC que controla os processos do forno, mas esta funcionalidade teve de ser alterada uma vez que o INEGI já estava a fazer essa recolha de dados e o PLC Siemens S7 não suportava duas ligações em paralelo. O INEGI passou a disponibilizar os dados recolhidos do forno, através de uma instância da base de dados e o *Smart Object* passou a ler essa base de dados e a inserir os dados na plataforma *AllSynergy.*

As variáveis de processo do forno a serem monitorizadas foram selecionadas pelo INEGI. A frequência de registo dos dados varia com as características dos dados: os dados do processo (temperaturas, pressões, caudais/fluxos, estados, posições) são registados ao segundo e os valores elétricos (energias/potências/correntes /frequências/tensão) são registados ao minuto. Durante o desenvolvimento do projeto, tornou-se essencial desenvolver uma solução alternati-




**FIGURA 2**
*Dashboard. Em cima, dados de produção. Em baixo, dados de produção em tempo real.*

va para garantir a gestão dos dados em cenários de indisponibilidade da base de dados, falhas de rede, ou outro tipo de interrupções. Para tal, é num ficheiro.csv que são armazenadas temporariamente as variáveis a serem inseridas na base de dados. Este sistema assegura a integridade e a preservação dos dados ao registar continuamente as informações adquiridas, incluindo a referência temporal. Deste modo, quando a conexão à base de dados for restabelecida ou esta volte a estar disponível, os dados armazenados no ficheiro .csv são automaticamente transferidos para a base de dados, garantindo a continuidade do fluxo de informações e minimizando eventuais perdas. As *dashboards* para monitorização das grandezas relativas ao processo, são configuráveis de acordo com o interesse do utilizador. Esta customização, permite, inclusive, que de acordo com o perfil e nível de intervenção do utilizador, as dashboards sejam desenhadas para responder às necessidades desse utilizador. Na Figura 2 podem ser observados dois exemplos, conforme a vontade dos respetivos utilizadores.

## CONCLUSÃO

As principais conclusões a serem retiradas após a realização deste trabalho são:

- Portabilidade do sistema: o sistema pode ser facilmente migrado para um ambiente de serviço em nuvem ou para outro tipo de servidor, assegurando continuidade operacional;
- Personalização da informação: adaptar e mostrar informações relevantes direcionada a cada nível de utilizador, contribuindo para o aumento da eficiência e usabilidade;
- Impacto das variáveis a serem mostradas: sobrecarga de variáveis ou informações podem gerar atrasos na visualização, indicando limitações no poder de processamento do servidor, o que deve ser monitorado e otimizado no futuro.


### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento do Projeto HirEV-Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002), cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), através da NextGeneration EU.


### REFERÊNCIAS


**[1]** Ducic, N., et al., *Casting Process Improvement by the Application of Artificial Intelligence*. Applied Sciences, 2022. 12(7): p. 3264. https://doi.org/10.3390/app12073264.

**[2]** Javaid, M., et al., *Artificial Intelligence Applications for Industry 4.0: A Literature-Based Study.* Journal of Industrial Integration and Management, 2022. 07(01): p. 83-111. https://doi.org/10.1142/S2424862222130004010.1142/s2424862221300040.

**[3]** Sundaram, S. and A. Zeid, *Artificial Intelligence-Based Smart Quality Inspection for Manufacturing.* Micromachines, 2023. 14(3): p. 570. https://doi.org/10.3390/mi14030570.

**[4]** Monteiro, F., et al., *Development of the Low-Pressure Die Casting Process for an Aluminium Alloy Part*. Materials, 2024. 17(12): p. 2835. https://doi.org/10.3390/ma17122835.

# A EVOLUÇÃO PARA A MOBILIDADE ELÉTRICA: UM BENCHMARKING DE HIPERCARROS ELÉTRICOS & O DESIGN E DIMENSIONAMENTO DE UM CONTENTOR DE BATERIA EM COMPÓSITO

**Beatriz Miranda[1], Frederico Ribeiro[2], José Machado[1], and Ana Reis[1]**
**1** FEUP, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto, Portugal
**2** Adamastor, Perafita, Portugal

***Considerando o crescimento dos compósitos e o aumento do mercado de baterias (e dos seus contentores), a utilização destes materiais como componente estrutural torna-se uma necessidade crescente, dadas as suas vantagens e desvantagens; o projeto Hi-rEV surge para responder a esta necessidade, alinhando-a com o crescimento da indústria automóvel, com o objetivo de torná-la mais sustentável e orientada para um futuro mais verde.***
***Design/Metodologia/Abordagem - este projeto abrange dois principais âmbitos de trabalho: o primeiro consiste num estudo sobre a química de baterias mais adequada para um possível hipercarro elétrico fabricado pela Adamastor; o segundo consiste no desenvolvimento de uma caixa de bateria prevista para acomodar cerca de metade do mercado total de carros elétricos comerciais;***

## INTRODUÇÃO

Com o aumento do interesse no mercado de hipercarros e na mobilidade elétrica, os hipercarros elétricos começam a entrar no mercado regular, com um aumento exponencial do interesse. Este projeto centra-se em dois tópicos distintos: o estudo e benchmarking das duas químicas de baterias mais populares utilizadas em veículos elétricos, com o objetivo de apoiar uma empresa de hipercarros na escolha da química ideal, no caso de uma decisão de fabricar um hipercarro elétrico produzido pela Adamastor, bem como o dimensionamento de uma caixa de bateria prevista para integrar um carro elétrico de gama média a gama alta.

## MÉTODO

A abordagem deste estudo começou com uma revisão detalhada das informações de base sobre o uso de materiais compósitos para contentores de baterias, o conceito de passaporte digital da bateria e as tendências de mercado de hipercarros e supercarros. Para avaliar as químicas LFP e NMC, foi realizada uma análise esta-tística no Excel, desenvolvendo critérios especí-ficos e métricas de comparação. Esta análise teve como objetivo determinar a química mais adequada com base em vários aspetos de desempenho.

Para o design do modelo de bateria, foram realizadas alterações iterativas no software Inventor, ajustando a geometria da caixa da bateria em cada iteração. Estes modelos foram exportados para o software *HyperMesh*, onde se criou a malha, definiu-se condições de contorno, aplicou-se cargas e preparou-se as configurações de simulação. As ferramentas do *HyperMesh* permitiram a exploração da geometria das camadas, os conectores e as modificações de espessura, analisando como estas alterações impactaram a estrutura e o desempenho da caixa da bateria. Este processo iterativo forneceu informação sobre como diferentes designs e escolhas de materiais podem melhorar a durabilidade e a eficiência geral da caixa da bateria.

## REVISÃO DA LITERATURA

### USO ATUAL DE BATERIAS NO MERCADO DE SUPERCARROS

Um hipercarro pode ser descrito como "o

automóvel de luxo moderno, capaz de um desempenho de última geração e construído com materiais inovadores". Não existem definições ou critérios oficiais que encaixem na descrição destes veículos, pelo que estes tendem a ser caracterizados por um desempenho e custos superiores em comparação com veículos de mercado de massa. Comparando as vendas de ambos os mercados, estudos mostram que os fabricantes de veículos de mercado de massa produzem cerca de 78 milhões de veículos por ano, enquanto os fabricantes de super/hipercarros produzem cerca de 15.000 veículos por ano, o que confere um sentido de raridade ao mercado de super/hipercarros.

No entanto, com o aumento dos veículos desportivos, esta definição tornou-se mais difícil de estabelecer, considerando o desempenho aprimorado que estes veículos tendem a apresentar. Algumas das principais diferenças entre estas classes de veículos residem nas diferenças de potência e na posição de alguns componentes.

**BENCHMARKING**

O mercado de hipercarros introduz uma fusão artística das melhores tecnologias existentes, complementada por características superiores (como maior conforto e desportismo para um carro familiar). Além disso, implementa um conceito que maximiza a competição, visando capturar vantagens de mercado e de fabrico. A avaliação do mercado atual foi realizada considerando os seguintes critérios:

· Potência da bateria (em kWh);
· Potência do motor (em cavalos-vapor);
· Tempo necessário para ir de 0 a 100 km/h;
· Autonomia inicial;
· Peso total do carro;
· Relação entre a potência da bateria e seu volume.

**PASSAPORTE DIGITAL DA BATERIA**

No cenário em constante evolução do armazenamento de energia e sustentabilidade, o conceito de "Passaporte Digital da Bateria"surge como uma inovação crucial. Essa ferramenta digital é projetada para acompanhar o ciclo de vida das baterias, fornecendo dados essenciais sobre suas origens, composição, uso e processos de reciclagem.

O Passaporte Digital da Bateria funciona como um registro digital abrangente, permitindo que *stakeholders* - desde fabricantes até consumidores e reguladores - acedam e compartilhem informações de maneira integrada. Ele contribui para assegurar conformidade com regulamentações ambientais, otimizar esforços de reciclagem e aprimorar a sustentabilidade geral da produção e descarte de baterias. Este capítulo explora os principais componentes, *frameworks* tecnológicos e potenciais impactos da implementação de passaportes digitais de bateria em diversas indústrias.

**PASSAPORTE DIGITAL DO PRODUTO**

O Passaporte Digital do Produto (DPP), conforme descrito pelo Serviço de Pesquisa do Parlamento Europeu, combina um identificador do produto e dados que caracterizam o produto, seus processos e *stakeholders*, variando em detalhe ao longo do ciclo de vida do produto. Ele promove o fluxo de informações e apoia a circularidade, conforme descrito no "Acordo Verde Europeu"no "Plano de Ação para a Economia Circular"e nas "Conclusões do Conselho sobre tornar a recuperação circular e verde."O Conselho enfatiza a necessidade urgente de um passaporte do produto para melhorar a gestão de resíduos. (Council, 2020)
O objetivo do DPP é promover uma economia circular e enfrentar desafios como a falta de informações sobre os produtos. Ele pode apoiar modelos de negócios sustentáveis, dependendo do produto e do design.

No contexto de baterias, o eco-design foca em utilizar menos recursos, incorporar materiais



**FIGURA 1**
*Comparação de autonomia.*



**FIGURA 2**
*Comparação de potência da bateria.*



**FIGURA 3**
*Comparação de potência do motor.*

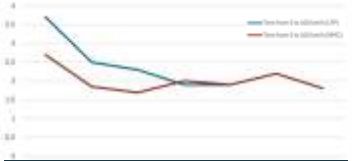


**FIGURA 4**
*Comparação de tempo de 0 a 100 km/h.*

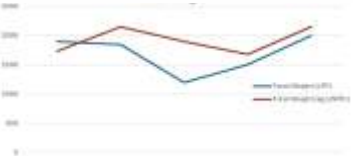


**FIGURA 5**
*Comparação de peso total.*

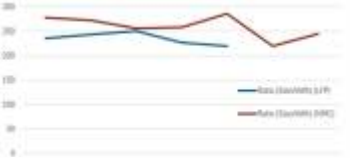


**FIGURA 6**
*Comparação de relação potência-volume.*

renováveis e recicláveis e minimizar impactos ambientais. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) avalia esses impactos ao longo do ciclo de vida da bateria, orientando estratégias de eco-design.

A Diretiva Europeia sobre baterias destaca a importância de reduzir os impactos ambientais e promover materiais mais seguros. As baterias são fundamentais para a descarbonização e a neutralidade de carbono, especialmente por meio da eletrificação e sistemas de energia renovável. ( s.d.)

**CADEIA DE VALOR**

De acordo com a European Battery Alliance, a cadeia de valor das baterias pode ser dividida em seis categorias principais: Matérias-Primas, Materiais Ativos, Fabricação de Células, Pacotes e Sistemas de Baterias, Aplicação e Integração, e Reciclagem e Segunda Vida.

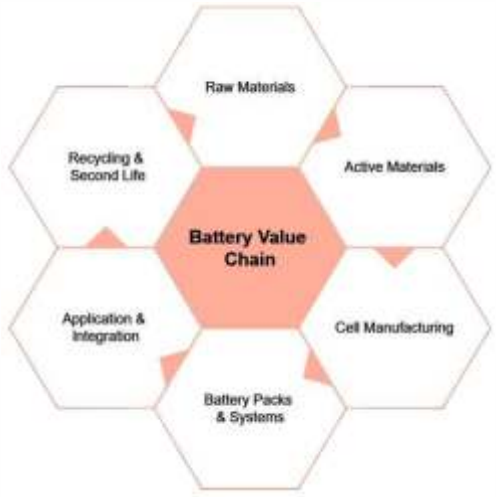



**FIGURA 7**
*Ciclo de vida das baterias.*

Espera-se que o Passaporte da Bateria contribua especialmente nas últimas três etapas, aprimorando a comunicação de dados, bem como simplificando a determinação de valor residual, entre outros aspetos.

Para avaliar essa contribuição, foram identificados 12 casos de uso, todos independentes e influenciando-se mutuamente apenas por meio de efeitos amplificadores.

**CAIXAS DE BATERIAS**

As caixas de baterias para carros elétricos (tanto regulares quanto hipercarros) são predominantemente feitas de alumínio e aço. No entanto, os compósitos podem ser apresentados como uma alternativa aprimorada, considerando que resultam em uma redução de peso e aumento na segurança contra incêndios, além de melhor gestão térmica, entre outros benefícios. (M. J. Osiak e 94 O'Dwyer, 2018)

Essa alternativa deve ser estudada e considerada, não apenas pelos ganhos em segurança e confiabilidade que pode oferecer, mas também pelo crescimento esperado do mercado de caixas de baterias (estimado em cerca de 4,47 bilhões de dólares até 2025), apresentando-se como uma oportunidade atraente para os fornecedores.

**CAIXAS DE COMPÓSITOS**

Analisando os materiais mais populares utilizados para caixas de baterias, os três principais que merecem estudo são os compósitos, o alumínio e o aço. Embora o aço e o alumínio sejam os mais utilizados, o mercado de caixas de baterias está se deslocando em direção aos compósitos, devido às vantagens que podem trazer em comparação aos metais.

A literatura sobre a influência dos compósitos no mercado de baterias e o desenvolvimento de passaportes digitais para baterias destaca os avanços e desafios-chave na tecnologia de baterias. (M. J. Osiak e O'Dwyer, 2018) enfatiza o papel da química dos materiais e do design de eletrodos no futuro das baterias de lítio, impulsionado pelos setores automotivo e de eletrônicos de consumo. Ele explora configurações inovadoras como baterias flexíveis e impressas, embora integrar
essas inovações sem comprometer a estética dos dispositivos continue sendo um desafio. (P. Yao e Y. L. e. al., 2019) revisa avanços em eletrólitos compostos à base de polímeros para baterias de estado sólido, com foco em como a incorporação de vários aditivos pode melhorar o desempenho e a eficiência. (Grant e O'Dwyer, 2022) muda o foco para métodos de avaliação de desempenho, introduzindo o conceito de passaportes digitais para rastrear o histórico das baterias e otimizar aplicações em segunda vida. Juntos, esses estudos reforçam a importância dos materiais compósitos no avanço da tecnologia de baterias e o papel emergente dos dados na melhoria da segurança e longevidade das baterias.

(Schludi e Joos, 2019) desenvolveu um teste comparativo entre aço e compósito, analisando essencialmente a evolução da temperatura quando aquecido. O aço atingiu cerca de 750 ºC após 30 segundos, o compósito de resina epoxy padrão atingiu 550 ºC após 60 segundos, e a estrutura sanduíche atingiu cerca de 350 ºC após 180 segundos. O alumínio não foi considerado para este teste devido à sua temperatura de

fusão o de 660 ºC. Dito isso, estruturas sanduíche de compósitos mostraram-se não apenas mais leves (cerca de 40% de redução de peso em comparação ao aço e ao alumínio), mas também mais seguras contra incêndios, algo extremamente relevante ao analisar um componente tão sensível ao fogo quanto as baterias.

### RETARDÂNCIA AO FOGO

Pesquisas recentes destacam o papel crítico dos materiais compósitos na melhoria da segurança contra incêndios das baterias de lítio. (P. Yao e Y. L. e. al., 2019) demonstra que a incorporação de cerâmicas inertes e líquidos iônicos em eletrólitos sólidos poliméricos (SPEs) melhora a condutividade iônica ao mesmo tempo que aumenta a resistência ao descontrole têrmico, um fator chave na mitigação de riscos de incêndio. (F. Danzi e A. A. e. al., 2021) explora compósitos de fibra de carbono em estruturas de baterias, observando seu potencial para melhorar tanto o armazenamento de energia quanto as propriedades retardantes ao fogo, embora persistam desafios de estabilidade térmica e mecânica. (Li e Duan, 2023) enfatiza o desempenho superior de separadores de compósitos retardantes ao fogo, reduzindo significativamente os riscos de incêndio. A integração de materiais ecológicos e resistentes ao fogo também é defendida para alinhar com objetivos de sustentabilidade. Coletivamente, esses estudos reforçam a importância de desenvolver compósitos resistentes ao fogo para melhorar a segurança e a confiabilidade das baterias.

## MODELO DE SIMULAÇÃO

Para testar a caixa de bateria desenvolvido neste trabalho, utilizou-se o software *HyperMesh* 2024. As dimensões do caixa foram projetadas para que ele fosse considerado "modular," podendo ser integrado em cerca de 40% do mercado de BEVs (representando a maioria dos veículos de médio a grande porte). É importante mencionar que este caixa foi projetado para acomodar apenas os módulos da bateria (com base nos módulos de um veículo elétrico de mercado), não incluindo outros 148 sistemas da bateria (como refrigeração, BMS, PCBs, entre outros componentes). As dimensões da 149 caixa apresentam-se na Figura 8.



**FIGURA 8**
*Dimensões da caixa.*

Para o contentor, foi considerada uma estrutura *sandwich*, composta de Fibra de Carbono Pre-Preg Toray E745/IM7 e espuma Rohacell A. As propriedades relevantes para o trabalho estão descritas abaixo.

### GERAÇÃO DE MALHA

Pesquisas sobre caixas de bateria em compósitos utilizando Análise por Elementos Finitos (FEA) têm avançado com melhorias na ciência dos materiais e nos métodos computacionais. (C. M. Wai, 2014) enfatizou a importância da seleção de elementos FEA baseada na geometria, nos resultados esperados e nas restrições de tempo, observando que projetos simples requerem elementos 1D, enquanto os mais complexos necessitam de elementos 2D ou 3D. (D. C. e. al., 2022) explorou o equilíbrio entre integridade mecânica e desempenho eletroquímico em baterias estruturais, focando na modelagem de tensões e danos em elétrodos de fibra de carbono. (14) refinou ainda mais as escolhas de materiais para s de compósitos, recomendando o uso de SMC fenólico para resistência ao 164 fogo e destacando a necessidade de propriedades otimizadas para melhorar a resistência a impactos 165 e a segurança em veículos elétricos.

**TABELA 1**
*Propriedades da fibra de carbono Pre-Preg Toray E745/IM7 (s.d.)*

| Propriedade do Material | Simbolo (unidades) | Valor |
|---|---|---|
| Densidade | $\rho$ [kg/m$^3$] | 1589 |
| Módulos elásticos de tração no plano | $E^T = E^T$ [GPa] | 62.2 |
| Módulos elásticos de compressão no plano | $E^C = E^C$ [GPa] | 64.2 |
| Coeficiente de Poisson em tração no plano | $\nu^T$ [-] | 0.02 |
| Coeficiente de Poisson em compressão no plano | $\nu^C$ [-] | 0.05 |
| Módulo de Elasticidade | $G_{12}$ [GPa] | 3.8 |
| Resistência à tração (eixo X) | $X_t$ [MPa] | 768.0 |
| Resistência à tração (eixo Y) | $Y_t$ [MPa] | 776.0 |
| Resistência à compressão (eixo X) | $X_c$ [MPa] | 731.0 |
| Resistência à compressão (eixo Y) | $Y_c$ [MPa] | 836.0 |
| Resistência ao Cisalhamento | $S_{12}$ [MPa] | 123.0 |

**TABELA 2**
*Propriedades da fibra de carbono Pre-Preg Toray E745/IM7*

| Propriedade do Material | Simbolo (unidades) | Valor |
|---|---|---|
| **Densidade** | r [kg/m³] | 1589 |
| **Módulos elásticos de tração no plano** | $E^T_1$ = ET2 [GPa] | 62.2 |
| **Módulos elásticos de compressão no plano** | $E^C_1$ = EC2 [GPa] | 64.2 |
| **Coeficiente de Poisson em tração no plano** | $n^T_{12}$ [-] | 0.02 |
| **Coeficiente de Poisson em compressão no plano** | $n^C_{12}$ [-] | 0.05 |
| **Módulo de Elasticidade** | $G_{12}$ [GPa] | 3.8 |
| **Resistência à tração (eixo x)** | $X_t$ [MPa] | 768.0 |
| **Resistência à tração (eixo y)** | $Y_t$ [MPa] | 776.0 |
| **Resistência à compressão (eixo x)** | $X_c$ [MPa] | 731.0 |
| **Resistência à compressão (eixo y)** | $Y_c$ [MPa] | 836.0 |
| **Resistência ao Cisalhamento** | $S_{12}$ [MPa] | 123.0 |

**TABELA 3**
*Propriedades do Rohacell 31 A (s.d.)*

| Propriedade do Material | Simbolo (unidades) | Valor |
|---|---|---|
| **Densidade** | **r [kg/m³]** | **32.00** |
| **Resistência à compressão** | **$S_c$ [MPa]** | **0.4** |
| **Resistência à tração** | **$S_t$[MPa]** | **1.0** |
| **Módulo de tração** | **E [MPa]** | **36** |
| **Resistência ao Cisalhamento** | **$S_{12}$ [MPa]** | **0.4** |
| **Módulo de cisalhamento** | **$G_{12}$ [Mpa]** | **13** |

Com base no contexto dessas simulações, apenas elementos quadráticos de segunda ordem foram utilizados, definindo-se a malha por meio de iterações para evitar a existência de elementos lineares ou triangulares.

### CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Os carregamentos foram definidos de acordo com a norma E/ECE/324/Rev, que exige que, para uma bateria ser comercializada, ela deve suportar os seguintes carregamentos (aplicados ao conteúdo da bateria): Carga vertical de 40 G; Carga transversal de 20 G; Carga longitudinal de 20 G. No que diz respeito ás condições de contorno, foram consideradas 20 condições de apoio simples distribuídas ao longo das laterais da caixa, representando uma aproximação adequada da realidade. Isto visa a aproximar a fixação da caixa a uma situação real em que seja integre num veículo.

Para além disso, foram também considerados conectores nas fronteiras separantes da caixa e da respetiva tampa, assim como nos relevos interiores da caixa, de modo a atribuir resistência à mesma.

## RESULTADOS

Os resultados das simulações da iteração final encontram-se representados abaixo. A métrica avaliada nas simulações foi a tensão *Von Mises* na camada mais externa da caixa.

Os resultados da iteração final (considerada a melhor) estão analisados a seguir - linhas 16.1, 187 16.2, 16.3 e 16.4. A figura abaixo mostra, à direita, a evolução do coeficiente de segurança de 188 acordo com o Critério de Tensão Máxima, e à esquerda, a evolução conforme o critério de *Tsai-Hill.* Esses resultados foram comparados às iterações 17 e 5, levando à decisão de considerar a 190 iterção 16 como final.

É importante mencionar que esta análise do último critério foi realizada para a primeira e mais 193 externa camada de 3 iterações, sem garantia de que os resultados seriam similares para as camadas 194 internas.

## CONCLUSÃO

Concluindo, a química de LFP apresenta-se como uma solução bastante vantajosa para a produção de hipercarros elétricos, enquanto a química NMC consegue alcançar densidades de energia mais altas, mantendo massas totais e tempos similares aos da LFP.

No que diz respeito ao desenvolvimento da caixa de bateria, o uso de fibra de carbono provou ser uma opção superior ao alumínio e ao aço, considerando a redução significativa de massa (40 kg no total, comparado com 98,245 kg no alumínio e 285 kg no aço), sem comprometer o coeficiente de segurança. O uso do Rohacell - transformando a estrutura em um tipo sanduí-

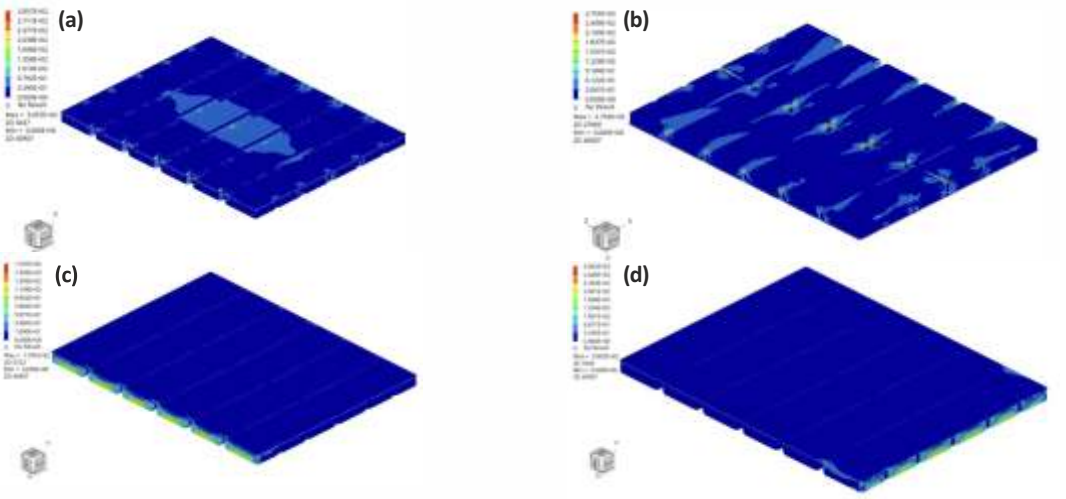



**FIGURA 9**
*Resultados das Simulações. (a) Resultados para a Carga Vertical na Parte Superior da Caixa; (b) Resultados para a Carga Vertical na Parte Inferior da Caixa; (c)Resultados para a Carga Transversal na Caixa; (d) Resultados para a Carga Longitudinal na Caixa*

| ITERATION | Xt [Mpa] | Xc [Mpa] | Yt [Mpa] | Yc [Mpa] | S [Mpa] |
|---|---|---|---|---|---|
| | 768,00 | 731,00 | 776,00 | 836,00 | 123,00 |
| 16,10 | 105,60 | 14,00 | 30,51 | 197,80 | 147,00 |
| 16,20 | 298,60 | 27,63 | 121,00 | 88,13 | 165,00 |
| 16,30 | 245,80 | 28,87 | 55,13 | 96,09 | 171,50 |
| 16,40 | 153,30 | 14,00 | 49,46 | 69,12 | 98,48 |
| 17,10 | 144,70 | 32,88 | 39,73 | 272,70 | 206,10 |
| 17,20 | 420,80 | 33,23 | 172,00 | 117,50 | 231,20 |
| 17,30 | 340,60 | 47,00 | 75,61 | 133,10 | 234,90 |
| 17,40 | 219,10 | 18,41 | 68,58 | 88,28 | 139,10 |
| 5,20 | 2156,00 | 0,00 | 630,60 | 21,83 | 1061,00 |
| 5,30 | 271,30 | 16,90 | 191,80 | 11,03 | 141,20 |
| 5,40 | 464,80 | 0,00 | 265,90 | 16,92 | 196,40 |

| TSAI-HILL (if >1 then failure) | |
|---|---|
| 1,43784 | 0,05591 |
| 1,85249 | 1,80295 |
| 2,00563 | 1,94849 |
| 0,65924 | 0,64462 |
| 2,82629 | 2,88254 |
| 3,63710 | 3,54038 |
| 3,76602 | 3,65324 |
| 1,31717 | 1,28462 |
| 78,33931 | 74,40884 |
| 1,32727 | 1,31784 |
| 2,61422 | 2,55001 |

**FIGURA 10**
*Evolução dos Coeficientes de Segurança.*

che - mostrou-se uma solução vantajosa, considerando a resistência estrutural adicional que oferece, sem aumentar significativamente o peso da caixa.

Os coeficientes de segurança alcançados para a caixa foram considerados seguros, sendo esses resultados positivos quando comparados a outras iterações de massas similares.

**AGRADECIMENTOS**
O autor agradece o financiamento do Projeto HirEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-0000002), cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa, através do Next Generation EU.

**REFERÊNCIAS**

d. carlsedt et al. (2022). available at: https://www.toraytac.com/product-explorer/products/Nn1i/TC346.

(S.d.). available at: https://performance-foams.evonik.com/enal., D. Carlsedt et (2022). ?Experimental and computational characterization of carbon fibre basedstructural battery electrode laminae, *Composites Sciences and Technology*,

C. M. Wai A. Rivai, O. Bapokutty (2014). Modelling optimization involving different types of elements in finite element analysis,

Council, General Secretariat of the (2020). *Draft Council conclusions on making the recovery circular and green*, rel. t´ec. Council of the European Union.

F. Danzi R. Martim Salgado, J. Espain Oliveira e al., A. Arteiro et (2021). Structural Batteries: A Review,

Grant, A. e O'Dwyer, C. (2022). *Operando Methods and Probes for Battery Electrodes and Materials,*

Li, L. e Duan, Y. (2023). *Engineering Polymer-Based Porous Membrane for Sustainable Lithium-Ion Battery Separators,*

M. J. Osiak H. Geany, E. Armstrong e O'Dwyer, C. (2018). *Structuring materials for Lithium-ion batteries: Advancements in nanomaterial structure, composition, and defined assembly on cell performance*,

P. Yao H. Yu, Z. Ding e al., Y. Liu et (2019). *Review on Polymer-Based Composite Electrolytes for Lithium Batteries*,

Schludi, Christian e Joos, Jürgen (2019). *Lightweight and Safe Composite Battery Housings.*

# GESTÃO DE STOCKS DE FERRAMENTAS DE STOCK COM DEEP Q-LEARNING

**Ricardo Alves[1,2], Benedita Malheiro[1], Carlos Melo[2], Tiago Silva[2], Ricardo Carvalho[2], Pedro Rios[3], Daniel Figueiredo[3]**

**1** ISEP, Politetecnico do Porto, Portugal, mail@isep.ipp.pt
**2** INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, Portugal
Palbit S.A., R&D Departamento Portuga
**3** INESC TEC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência, Portugal
{1201562, mbm}@isep.ipp.pt, {cemelo, tesilva, rjcarvalho}@inegi.up.pt, {prios,dfigueiredo}@palbit.pt

***Este trabalho propõe um método para desenvolver um modelo para prever pedidos baseado em Deep Q-learning, usando dados reais. Estes pedidos referem-se a ferramentas de corte e são caracterizadas por peça e cliente. O objetivo é gerir o stock de cada cliente, minimizar o stock enquanto evita roturas e tendo em consideração o tempo de entrega. Os dados foram obtidos a partir de armários inteligentes, a quantidade de dados disponíveis é pequena, e entre estes encontram-se também entradas inconsistentes e não identificadas. O método foi aplicado com sucesso para treinar e testar um modelo de Deep Q-Network para prever pedidos semanais por parte-cliente, obtendo uma acurácia de 97%% e tendo roturas de stock 5% das vezes. Dadas as limitações dos dados estes resultados são promissores. O método pode ser reaplicado para gerar modelos cada vez mais exatos.***

*This work proposes a method for developing an order forecasting model based on Deep Q-Learning, using real data. These orders relate to hard metal cutting tool parts and depend on the part and the client. The aim is to manage the inventory of the parts for each client, minimising stock levels, avoiding stock-outs and taking delivery times into account. The real data, obtained from smart warehouses, are reduced in size and include inconsistent and unidentified entries. The method was successfully applied to train and test a Deep Q Network model for forecasting weekly part-client orders, obtaining an average accuracy of 97 % and generating 5 % of stock-outs. Given the limitations of the available data, these results are promising. The method can be reapplied to generate increasingly accurate forecasting models whenever more or better data become available.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
DEEP Q-LEARNING, GESTÃO DE INVENTÁRIOS, MACHINE LEARNING, REINFORCEMENT LEARNING, OTIMIZAÇÃO DE MODELOS, PREVISÃO DE PEDIDOS.
*Deep Q-learning, Inventory Management, Machine Learning, Reinforcement Learning, Model Optimization, Order Forecasting.*

## INTRODUÇÃO

Palbit S.A. é uma fabricante de peças de corte de metal duro que também vende um armazém inteligente para monitorização de consumo de peças - o Store-o-Matic.

O objetivo deste trabalho é utilizar os dados disponíveis nestes armazéns para prever os pedidos por peça e cliente, enquanto otimiza a gestão de stock do cliente e do fornecedor. Esta otimização é necessária pois o armazenamento de peças tem custos associados, para além do custo de fisicamente guardar as peças existe também a falta de um retorno imediato no investimento, visto que peças armazenadas não geram valor. Adicionalmente, é necessária investigação para investigar perspetivas práticas e detetar tecnologias digitais avançadas que possam ser aplicadas usando princípios *lean* para obter benefícios ambientais [1]. O número ideal de peças em stock seria zero, mantendo apenas peças em uso, no entanto é impossível manter este nível sem conhecimento perfeito em relação ao consumo de peças. No caso atual, a previsão de consumos é um processo estocástico em que a quantidade a encomendada é decidida continuamente sem certezas quanto ao consumo. [2] No entanto ainda é possível reduzir o nível de stock encomendando apenas o que é esperado ser consumido e mantendo uma pequena quantidade de material armaze-nada para lidar com casos inesperados. O inven-tário pode ser gerido com recurso a *Deep Q-learning*

para prever procurar, reduzir o stock e reduzir roturas de stock. Este trabalho propõe um método *data-driven* que inclui, aquisição, analise, pré-processamento, processamento e avaliação dos dados disponíveis no *Store-o-Matic* para criar e testas um mo-delo de previsões baseado em DQL, A previsão utiliza uma janela de tempo de uma semana e calcula a erro quadrático medio normalizado entre o consumo de peças previsto e consumo obtido para o mesmo período. Este documento está organizado em quatro secções adicionais. A secção de contexto introduz alguns conceitos essenciais sobre o modelo utilizado. A secção de Método detalha o processo utilizado, a secção de Experiências e Resultados aplica o método e apresenta os resultados, e a Conclusão apresenta as conclusões limitações e sugere trabalhos futuros.

## CONTEXTO

*Reinforcement Learning* (RL) representa uma classe de algoritmos de machine learning especializados em tomada de decisão sequencial. RL determina como tomar ações num determinado ambiente para maximizar uma recompensa e assim servir como um controlador adaptável para sistemas complexos. [3]. *Q-learning* (QL) é um algoritmo de RL para criar agentes capazes tomar decisões ótimas em ambientes Markovianos [4]. Em Q-learning um agente escolhe a ação com a maior recompensa para o estado atual. Esta tomada de decisão é baseada numa tabela de valores Q, que representa para cada estado conhecido e ação possível a recompensa esperada para a tomada dessa decisão naquele estado. A tabela é atualizada ao repetir para cada estado as ações possíveis, aprendendo assim a agir de forma ótima. Uma desvantagem de QL é que a complexidade da tabela cresce com o número de estados e diferentes possíveis ações visto que cada estado necessita dos valores Q para cada ação. De acordo com [3], o algoritmo clássico de QL ainda é a técnica de RL mais usada para gestão de inventários. *Deep Reinforcement Learning* (DRL) combina RL com deep learning, este é o caso para *Deep Q-Learning* (DQL) com *Deep Q-Networks* (DQN), que integra QL com redes neuronais para estimar valores Q para es-tados não vistos anteriormente [5]. A rede neuronal recebe o estado atual $S_t$ e retorna os valores $Q_t$ estimados para cada ação possível, assim DQN permite que ações discretas sejam tomadas em ambientes de estados contínuos. Este método utiliza uma *target network* para calcular o a função de erro durante o treino e uti-liza experience replay para estabilizar a aprendizagem [6]. *Experience replay* consiste em usar as transições entre estados e as recompensas associadas previamente para treinar a rede neuronal, quebrando dependências temporais [7] e fazendo com que seja difícil para a rede neuronal de se esquecer. Apesar de não ser uma solução ideal ações devem ser discretizadas para poder adotar DQN. Figura 1, inspirada por Arwa e Folly(2020) [8], esquematiza a operação da técnica DQN, onde $S_t$ representa o estado atual $a_t$ a ação tomada, $S_{t+1}$ o próximo estado. $Q_t$ a estimativa atual para os valores Q, $Q_t$ os valores alvo de Q, g o peso atribuído a recompensas futuras $\tilde{N}_q$ $L(q)$ o gradiente da função de custo L(q) e q os pesos da rede preditiva.

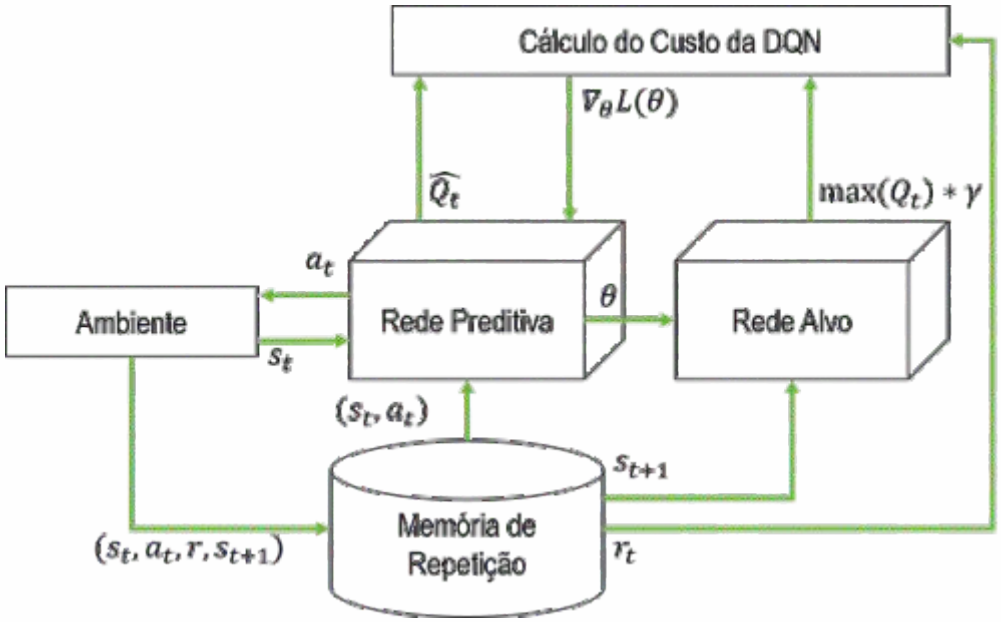



**FIGURA 1**
*Diagrama de blocos para DQN.*

## MÉTODO

O método proposto neste artigo é composto por 5 etapas: Aquisição de dados, Analise dos dados, Treino do modelo Pré-Processamento e Teste do Modelo

### AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados utilizados para treinar o modelo foram obtidos diretamente através da API do Store-o-Matic sob a forma de um ficheiro JSON. O ficheiro JSON obtido contem uma lista de movimentos de peças, i.e., dados em relação às peças guardadas ou retiradas de cada armário inteligente (cliente, peça, fornecedor, numero de peças movidas).

### ANÁLISE DE DADOS

Esta etapa caracteriza os conteúdos (período coberto, número de peças diferentes, número de clientes, número de movimentos por cada peça e cliente. Em seguida realiza uma análise estatística do número de movimentos por peça e cliente (média, desvio padrão, máximo e mínimo). Estes paços permitem obter informação sobre o tamanho dos dados, a sua distribuição e a sua diversidade. O último passo verifica os dados estão completos, i.e. cada entrada contem todos os campos preenchidos.

### PRÉ-PROCESSAMENTO

A API do Store-o-Matic disponibiliza informação sobre o movimento de stock na forma de uma lista JSON. Estes dados são depois convertidos para várias tabelas sobre o formato de *Comma Separated Values* (CSV), cada tabela contendo a informação sobre uma peça, sendo que cada linha contém o número de peças consumidas num determinado dia. Finalmente os dados cronologicamente ordenados são separados em du-as partições: 75% para treino e 25% para teste.




**FIGURA 2**
*Etapas do método desenvolvimento.*

### MOVIMENTO DE PEÇAS

O treino de um modelo representativo requer um mínimo de movimentos por parte e por cliente. Este limite inferior vai ser determinado experimentalmente ao treinar vários modelos com limites diferentes para o número mínimo de movimentos por peça. Estes modelos vão ser testados em três partições: Partição de teste (PT) que contém movimentos relativos a peças e clientes presentes no modelo, partição de Teste Comum (PC) a todos os conjuntos de dados, que contém movimentos relativos a peças e clientes do menor conjunto de teste, e Peças Desconhecidas (PD) do modelo, peças em que nenhum modelo treinou, estas peças cobrem um período maior visto que 75% dos seus dias não foram usados para treinar modelos. O período máximo coberto por PT e PC é de um mês, apenas as peças que contem mais movimentos que os mínimos determinados vão ser mantidas para o treino dos próximos modelos.

### OTIMIZAÇÃO DE HIPERPARÂMETROS

O desempenho de um modelo de ML depende da configuração dos seus hiperparâmetros, visto que existem combinações infinitas de valores para hiperparâmetros, foram escolhidos alguns valores para cada hiperparâmetro, todas as combinações possíveis destes valores foram testadas com *successive halving* [3]. Este método, começa com vários modelos, e a cada iteração descarta a metade dos modelos com pior desempenho. Este processo é repetido até restar apenas um modelo.

## TREINO DO MODELO

### ARQUITETURA DA REDE NEURONAL

A arquitetura do modelo preditivo e das redes neuronais é composto por várias, a *input layer* contem 27 neurónios para receber informação sobre o ambiente com 27 campos. O estado do ambiente descreve para cada peça e cliente, os consumos de peças nos últimos 14 dias ($t_{13}$,...,$t_0$), o stock atual (S), o stock virtual (VS) que é igual á soma do número de peças em stock com o número de peças encomendadas e ainda não recebidas, a tendência (T), representa a média dos últimos 7 consumos diários superio-res a zero. O intervalo de stock especificado pelo limite inferior (LI) e limite superior (LS), o *lead time* (LT) que representa o tempo que uma peça encomendada demora a chegar ao cliente. E visto que o máximo de *lead time* com que o modelo trabalha, as encomendas a chegar nos seguintes 7 dias ($\hat{E}_1$,...,$\hat{E}_7$). O número de *hidden layers* e os seus neurónios vão ser determinadas experimentalmente. A *output layer* é composta por 5 neurónios, um para cada possível ação, estes valores representam o valor Q para cada ação. O impacto de uma determinada ação é

calculado através da Equação 1 em T representa a tendência e a ação escolhida. Esta fórmula permite com que o modelo se adapte a peças com elevados consumos diários e ao mesmo tempo manter apenas 5 possíveis ações.

**Equação 1 - Impacto de uma ação**

$$\hat{E}_{p,c,w} = T \times 0.5 \times a$$

**TREINO DO MODELO**

O algoritmo adotado é uma DQN baseada nos trabalhos de [4] [5]. DQN requere 2 redes neuronais, a rede de previsão Q com pesos q e a rede alvo Qt com pesos qt, requere ainda uma memoria para *experience replay*. Durante o treino cada transição de estado, composta pelo estado $S_t$, pela ação *a*, pela recompensa *r* e pelo próximo estado $S_t$+1, é guardada na memória de replay *D*. Esta implementação ao contrário dos trabalhos de Mnih et al. [5], trabalha com o esta-do diretamente sem uso de uma função para simplificar o estado. A exploração é feita através de uma estratégia a e-*greedy* que escol-he uma ação aleatória e% das vezes, e nos restantes casos escolha a ação com o valor Q mais eleva-do. Depois o algoritmo calcula o efeito dessa ação no estado atual para determinar o próximo estado e guarda a transição em *D*. Em seguida é selecionada um *mini-batch* de transições de D para calcular a perda e atualizar os pesos de *Q*. Por último, os pesos da *target network* $Q_T$ são atualizados com aqueles de *Q* a cada *U* episódios.

**AVALIAÇÃO**

A avaliação do desempenho de um modelo é feita através do erro quadrático medio normalizado (NMRSE) entre o consumo de peças semanal estimado e o consumo de peças semanais reais. Equação 2 apresenta a fórmula utilizada onde S representa semana, P peça, C cliente, $E^{(p,c,w)}$ peças encomendadas para a semana e $R^{(p,c,w)}$ o consumo real dessa semana.

**Equação 2 - Cálculo do RMSE**

$$\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{w=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{c=1}^{C}\left(\hat{E}_{p,c,s} - R_{p,c,s}\right)^2}$$

O RMSE é depois normalizado de acordo com Equação 3 onde $\mu_R$ representa a media de peças realmente consumidas por semana.

**Equação 3: Normalização de NMRSE**

$$NMRSE = \frac{RMSE}{\mu_R}$$

Roturas de stock, e violações do LS e LI do inter-valo de stock são também tidas em regista-das, sendo testadas todas as possibilidades para LS Î {LI + 3, … ,10}, LI Î {1, … ,7}, LT Î {1, …, 7}. Estes valores preferem inferir sobre custos adicionais. Os modelos são testados em PT e PD.

## EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS

O processo começa por analisar os dados. De-pois, determina o mínimo de movimentos por peça e cliente, a arquitetura interna da rede neuronal, e os valores dos hiperparâmetros. Por último avalia o desempenho do modelo final.

## ANÁLISE DE DADOS

### CONTEÚDO DOS DADOS

Os dados obtidos no início do projeto pela API do Store-o-Matic cobrem um período de 4 meses de 20231205 a 20240408. Cada entrada no ficheiro JSON deve conter informação sobre a peça, o cliente, o fornecer e o número de peças retiradas/guardadas. Estes dados contêm 4614 movimentos em relação a 513 partes. Neste dataset nenhuma peça é consumida por mais que um cliente, pelo que é possível analisar os dados apenas com base na peça.

### ESTATÍSTICAS

Os movimentos das peças seguem uma distri-buição *long tail*, com a grande maioria das peças tendo menos de 10 movimentos e apenas um número reduzido de peças tendo muitos movimentos. A média e desvio padrão de movimentos por peça é de 9.0 ± 19.9 com um mínimo de 1 e um máximo de 146.

### QUALIDADE

O sistema do Store-o-Matic assume que o utilizador insere sempre os dados corretos. No entanto, o *dataset* contém dados inconsistentes e entradas incompletas que afetam negativa-mente a qualidade dos dados, reduzindo o desempenho do modelo. Os dados inconsisten-tes foram mantidos dado a quantidade reduzida de dados disponíveis, uma peça não identificada com 270 movimentos foi removida.

### PRÉ-PROCESSAMENTO

Para determinar o número mínimo de movi-mentos que cada peça deve ter para o modelo aprender o seu comportamento, cinco modelos foram treinados com um mínimo de 10, 20, 30, 40 e 50 movimentos por peça. Os resultados são apresentados na Tabela 1 com os melhores resultados realçados a cinzento. Os resultados mostram que o melhor resultado é 50 para PT, 30 para PC e 20 para PD. Dado que existem poucos dados disponíveis foi escolhido o mínimo de 20 movimentos. O conjunto final de dados tem um total de 2398 movimentos para 48 partes, 1946 movimentos para 463 partes foram remoídos por não cumprirem o mínimo de 20 movimentos.

**TABELA 1**
*NRMSE (%) face `arquitectura neuronal.*

| | Camadas Internas | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | | | 2 | | | 3 | | |
| Neurónios | 23 | 64 | 128 | 23 | 64 | 128 | 23 | 64 | 128 |
| PT | 2.19 | 2.26 | 2.23 | 2.66 | 2.60 | 2.20 | 2.22 | 2.25 | **2.17** |
| PD | 2.93 | 2.89 | 2.90 | 3.40 | 3.26 | **2.60** | 3.11 | 3.00 | 2.84 |

## OTIMIZAÇÃO DO MODELO

### ARQUITETURA DA REDE NEURONAL

A Tabela 1 apresenta os resultados das experiências na arquitetura da rede neuronal. Os melhores resultados foram obtidos com 3 camadas internas e 128 neurónios por camada interna para PT e 2 camadas internas com 128 neurónios para PD. A arquitetura selecionada tem 3 camadas com 128 neurónios por camada.

### OTIMIZAÇÃO DE HIPERPARÂMETROS

Tabela 3 apresenta os valores dos hiperparâmetros considerados. Estes valores resultam em 144 possíveis combinações e requerem 7 iterações de *sucessive halving*. Os melhores resultados, realçados a negrito, foram 0.0001 para *learning rate*, 0,999 para g, 500 (passos) para *target update*, e 32 para *batch size.*

### AVALIAÇÃO DO MODELO FINAL

O modelo otimizado, que incorpora os melhores resultados na etapa anterior, foi treinado com 10 000 episódios. A etapa de teste considera todas as combinações de LI, LS, lead time e peças, resultando num total de 288 557 passos para PT, e 32 536 para PD, Este modelo final atingiu um NRMSE de 2.23% para PT e 2,89% para PD. Isto significa que o modelo consegue prever o consumo de peças semanal com uma acurácia de 97%. Os longos períodos sem movimentos de peças contribuem para este resultado, nesses casos o modelo escolhe sempre a opção correta: Encomendar 0 peças. Tabela 4 caracteriza o comportamento do modelo em relação ao intervalo de stock predefinido. Houve 5% de roturas de stock com PT e 4% com PD, maioritariamente causados pelos dados inconsistentes. Quando uma rotura de stock ocorre os dados demoram alguns dias a recuperar devido ao lead time e do máximo número de peças que o modelo consegue encomendar. O stock esteva abaixo do LI 13% do tempo com PT e 20% com PD maioritariamente causadas pelos dados inconsistentes. O stock esteve acima do LS 28% das vezes com PT e 40% com PD devido a longos períodos de inatividade, i.e., quando nenhuma parte é usada, o stock não se altera. O curto período de testes faz com que o stock inicial tenha um forte impacto no modelo.

**TABELA 2**
*NRMSE (%) face ao número mínimo de movimentos por tipo de peça e cliente.*

| | Número mínimo de movimentos | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| PT | 2.13 | 2.21 | 2.13 | 2.45 | **1.40** |
| PC | 1.38 | 1.38 | **1.31** | 1.64 | 1.40 |
| PD | 2.85 | **2.57** | 2.80 | 4.04 | 2.78 |

**TABELA 3**
*Valores de hiperparâmetros.*

| Hiperparâmetros | Valores testados |
|---|---|
| Learning rate | { 0.01, 0.001, **0.001** } |
| g | { 0.9, 0.95, 0.99, **0.999** } |
| Target update | { **500**, 1000, 5000 } |
| Batch size | { **32**, 64, 128, 256 } |

**TABELA 4**
*Comportamento de stock*

| | Roturas de stock (%) | Abaixo do limite (%) | Acima do limite (%) |
|---|---|---|---|
| PTD | 5 | 13 | 28 |
| UTD | 4 | 20 | 40 |

## CONCLUSÕES

Este trabalho propõe um método para criar um modelo com base nos dados retirados de armazéns inteligentes. Os dados disponíveis foram o maior desafio. O conjunto de dados explorado é pequeno e inclui muitas entradas incompletas ou inconsistentes. Muitos dados estavam também abaixo do limite mínimo. O sistema atual está a ser melhorado para garantir melhor qualidade dos dados, e mais dados estão constantemente a ser recolhidos. O método desenvolvido foi aplicado para treinar um modelo capaz de prever os pedidos necessários por peça-cliente, atingido uma acurácia de 97 % e 5 % de rotura de stocks. Este resultado é prometedor dados as limitações dos dados disponíveis. Este método pode ser reaplicado sempre que houver mais dados e melhor qualidade destes, de forma a produzir modelos de previsão cada vez melhores. Trabalho futuro vai se focar no refinamento do modelo. A configuração dos hiperparâmetros deve ser revisitada, visto que os valores obtidos experimentalmente correspondem aos menores e

maiores valores considerados. Para atingir controlo de stock mais preciso pode ser aumentado o número de ações possíveis dos atuais 5 e reduzir o peso desta ação dos atuais 50% no calculo de peças encomendadas (Equação 1). Os dados podem também ser agrupados em 3 categorias, baixo, intermedio e alto numero de movimentos de peça por ciente, com diferentes valores de tendência por categoria.

**AGRADECIEMENTOS**

Os autores reconhecem com gratidão o financiamento fornecido pelo Projeto Hi-rEV- Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002), cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) da República Portuguesa, através do pacote Next-Generation EU, assim como o financiamento Português através da FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia - como parte do projeto UIDP/50014/2020 (DOI: 10.54499/ UIDP/ 50014/ 2020 | https://doi.org/10.54499/UIDP/ 50014/ 2020.

**REFERÊNCIAS**

**[1]** X. Chen, M. Kurdve, B. Johansson e M. Despeisse, "Enabling the twin transitions: Digital technologies support environmental sustainability through lean principles," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 38, p. 13-27, 2023.

**[2]** J. B. Munyaka e V. S. S. Yadavalli, "Inventory management concepts and implementations: a systematic review," *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 33, p. 15-36, 2022.

**[3]** B. Rolf, I. Jackson, M. Müller, S. Lang, T. Reggelin e D. Ivanov, "A review on reinforcement learning algorithms and applications in supply chain management," *International Journal of Production Research,* vol. 61, p. 7151-7179, 2023.

**[4]** C. J. C. H. Watkins e P. Dayan, "Q-learning," *Machine learning*, vol. 8, p. 279-292, 1992.

**[5]** V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra e M. Riedmiller, *Playing Atari with Deep Reinforcement Learning*, 2013.

**[6]** V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. A. Rusu, J. Veness, M. G. Bellemare, A. Graves, M. Riedmiller, A. K. Fidjeland, G. Ostrovski, S. Petersen, C. Beattie, A. Sadik, I. Antonoglou, H. King, D. Kumaran, D. Wierstra, S. Legg e D. Hassabis, "Human-level control through deep reinforcement learning," *Nature*, vol. 518, nº 7540, pp. 529-533, February 2015.

**[7]** J. Fan, Z. Wang, Y. Xie e Z. Yang, "A Theoretical Analysis of Deep Q-Learning," em *Proceedings of the 2nd Conference on Learning for Dynamics and Control*, 2020.

**[8]** E. O. Arwa e K. A. Folly, "Reinforcement Learning Techniques for Optimal Power Control in Grid-Connected Microgrids: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 208992-209007, 2020.

**[9]** F. Hutter, L. Kotthoff e J. Vanschoren, Automated machine learning: methods, systems, challenges, Springer Nature, 2019.

# SENSORIZAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE SOLDADURA BASEADA EM IA

**Pedro Malaca[1], João Oliveira[1], Guilherme Melo[1], Artur Cordeiro[2], João Souza[2], Luís F. Rocha[2], Pedro Tavares[1]**

**1** SARKKIS, Rua Alfredo Allen 455/461, 4200-135 Porto, Portugal.
Email: pedro.malaca@sarkkis.com, joao.oliveira@sarkkis.com, guilherme.melo@sarkkis.com, pedro.tavares@sarkkis.com
**2** INESC TEC, Rua Dr. Roberto Frias 400, 4200-465, Porto, Portugal.
Email: artur.j.cordeiro@inesctec.pt, joao.p.souza@inesctec.pt, luis.f.rocha@inesctec.pt

***A área da robótica tem transformado múltiplos setores a uma velocidade considerável. No entanto, esta velocidade ainda não é a que muitos peritos imaginavam. Este crescimento mais lento na área da robótica tem de ser atribuídos aos desafios que a indústria encontra para de forma adequada utilizar os sistemas robóticos como sistemas de produção contínua. Uma exceção a esta dificuldade são, por exemplo, os sistemas de palatização onde a função do robot é bem definida e contida. No entanto, focando a indústria generalizada e em particular indústria que requer soldadura, o uso de robots é ainda hoje limitado por (1) precisão absoluta limitada nas tolerâncias construtivas das peças, (2) complexidade no processo de soldadura e (3) falta de interfaces intuitivas para programação.***

***Nessa medida, um dos focos deve ser a capacidade de fazer sensorização inteligente que por sua vez permitirá a utilização de sistema cyber-físicos para aplicações industriais (que são a base para a digitalização e manufatura baseada em inteligência artificial). Com base nestas tecnologias novas e de rápida difusão, temos assistido à transformação digital. Em particular, considerando sistemas de manufatura, a modelação de produtos, processos e recursos como réplicas digitais promove a capacidade maior capacidade de otimização dos mesmos. A utilização de sensorização inteligente permite alimentar estes modelos com dados e informação sobre o estado atual da estação de trabalho. Esta mesma alimentação favorece a utilização de aplicações robotizadas que requerem atualizações em contínuo dos modelos do ambiente de trabalho e da peça a ser produzida, de forma a gerarem trajetórias livres de colisão ou ajuste do processo produtivo. Deste forma, tem cada vez mais sido sentido a necessidade de utilizar método de não-contacto para medir e atualizar a estação de trabalho e a respetiva tarefa.***

***Esta transição promove também uma nova necessidade de formalizar e descrever um novo processo produtivo, por forma a controlá-lo garantindo a conformidade das peças produzidas.***

***Um dos processos tecnológicos mais exigentes é definitivamente o processo de soldadura. Dado o número de variáveis em jogo, como materiais a ser soldados, o fio, gases, condições externas, aporte térmico, entre outros, a parametrização automática de soldadura é até hoje ignorada dada a incapacidade de análise de todos estes dados. Adicionalmente, o uso de robots, em particular para soldadura, é crucial para a indústria automóvel de grande escala, no entanto, para peças maiores com tolerâncias construtivas ou pequenas séries, muitas vezes a utilização robótica é ignorada dado o consumo de tempo para programação e muitas vezes a sua fiabilidade.***

***Assim, o presente projeto assume-se como uma potencial solução para ultrapassar estas dificuldades. Atualmente, as soluções presentes no mercado são manuais ou semi-manuais baseadas em interfaces. Foi desenvolvida uma solução capaz de integrar programação offline de robots para soldadura conseguindo: (1) garantir a deteção das tolerâncias construtivas; (2) promover um algoritmo de parametrização inteligente de soldadura e (3) automaticamente programar o robot e a fonte de soldadura. Este tópico foca-se num mercado multibilionário e sua integração na industrial generalizada potenciará a fabricação flexível de elementos soldados.***

*The robotics area has transformed multiple sectors at considerable speed. However, this speed is still not what many experts imagined. This slower growth in the area of robotics has to be attributed to the challenges that the industry faces in adequately using robotic systems as continuous production systems. An exception to this difficulty are, for example, palatization systems where the robot's function is well defined and contained. However, focusing on generalized industry and in particular industry that requires welding, the use of robots is still limited today by (1) limited absolute precision in the construction tolerances of parts, (2) complexity in the welding process and (3) lack of intuitive programming interfaces.*

*To this extent, one of the focuses should be the ability to perform intelligent sensing, which in turn will allow the use of cyber-physical systems for industrial applications (which are the basis for digitalization and manufacturing based on artificial intelligence). Based on these new and rapidly disseminating technologies, we have seen digital transformation. In particular, considering manufacturing systems, modelling products, processes and resources as digital replicas promotes greater capacity for their optimization. The use of intelligent sensing allows these models to be fed with data and information about the current state of the workstation. This also favours the use of robotic applications that require continuous updates of the models of the work environment and the part to be produced, in order to generate collision-free trajectories or adjustments to the production process. The need to use a non-contact method to measure and update the workstation and the respective task has increasingly been felt.*
*This transition also promotes a new need to formalize and describe a new production process, in order to control it and guarantee the conformity of the parts produced.*
*One of the most demanding technological processes is definitely the welding process. Given the number of variables at play, such as materials to be welded, the wire, gases, external conditions, thermal input, among others, automatic welding parameterization is still ignored today due to the inability to analyse all this data. Additionally, the use of robots, in particular for welding, is crucial for the large-scale automotive industry, however, for larger parts with constructive tolerances or small series, robotic use is often ignored given the time consumption for programming and many times its reliability.*
*Therefore, this project is seen as a potential solution to overcome these difficulties. Currently, the solutions on the market are manual or semi-manual based on interfaces. A solution capable of integrating offline programming of welding robots was developed, achieving: (1) ensuring the detection of construction tolerances; (2) promote an intelligent welding parameterization algorithm and (3) automatically program the robot and the welding source. This topic focuses on a multi-billion dollar market and its integration into widespread industrial will drive flexible manufacturing of welded elements.*

**PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS**
SENSORIZAÇÃO AVANÇADA; INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL; SOLDADURA.
*Avanced Sensing; Artificial Intelligence; Welding.*

## INTRODUÇÃO

Até 2035, na Europa, deixarão de ser produzidos motores a combustão, o que implicará mudanças na cadeia de valor iniciada com a produção do FORD modelo T. As metas para a transição energética colocam novos desafios às empresas produtoras de componentes puxando-as para uma readaptação na sua estrutura produtiva, recorrendo a materiais, processos e tecnologias diferentes, que representam mudanças disruptivas na sua estrutura produtiva.

O conceito de manufatura inteligente inicia-se quando a visão de Indústria 4.0 expande as expectativas de eficiência e flexibilidade da automação considerando produção energeticamente eficaz por meio da digitalização de processos e da integração de tecnologias baseadas em inteligências artificial.

O presente projeto procura desenvolver uma solução genérica e centralizada no operador por forma a transformar a manufatura inteligente com a inclusão de sistema robotizados de soldadura para processos de difícil automação, com dependência em sensorização [1-3].

Do ponto de vista produtivo e dado o contínuo aumento de competitividade, diversos elementos tipicamente produzidos por forjamento ou fundição mais maquinação têm sido tendencionalmente substituídos por soluções de estampagem e soldadura. Esta transição promove também uma nova necessidade de formalizar e descrever um novo processo produtivo, por forma a controlá-lo garantindo a conformidade das peças produzidas. Um dos processos tecnológicos mais exigentes é definitivamente o processo de soldadura. Dado o número de variáveis em jogo, como materiais a ser soldados, o fio, gases, condições externas, aporte térmico, entre outros, a parametrização automática de soldadura é até hoje ignorada dada a incapacidade de análise de todos estes dados.
O projeto surge como resposta da necessidade industriais de vários setores e de pequenas e médias empresas que procuram utilizar os robots como soluções de grande valor acrescentado, como é o caso das indústrias automóveis, metalomecânica, aerospacial e construção.

## METODOLOGIA

A abordagem proposta explora aprendizagem adaptativa. Esta solução diferencia-se da aprendizagem computacional genérica dado que não apenas classifica o cordão de soldadura fornecendo futuras indicações para apoio à decisão do processo de parametrização de soldadura, como também utiliza estes dados para executar de forma adequada as próximas tarefas de soldadura. Este conceito permite reduzir drasticamente o tempo moroso de parametrização e ultrapassar potenciais falhas do processo construtivo na indústria. Uma abordagem com-

plementar a este conceito é a integração do tipo de junta de soldadura, a sua deteção e ajuste com base no modelo real. Para tal, é forçada a utilização de sistema de inspeção e sensorização não destrutivos que permitirão detetar e conceber a parametrização adequada para casa peça a produzir. Esta inspeção ao ser realizada previamente ou no final da soldadura permite ainda completar a informação da mesma e a informação perante o ajuste preventivo detetado nos inícios das operações.

Esta capacidade de dinamicamente regerar a célula robotizada e o modelo da peça a produzir potencia a utilização de um sistema de programação offline. A grande maioria dos robots industriais são até à data programada utilizando a consola proprietária de robot. Aqui, a experiência empírica do operador é ainda a solução tradicionalmente utilizada para muitas unidades industriais. No entanto, utilizando o sistema proposta na sua globalidade é possível ultrapassar as barreiras que levam as indústrias hoje a esta solução de recurso para utilizar uma solução genérica e automática. Assim é defendida uma abordagem baseada em software capaz de verticalmente ligar a fase de projeto à fase de produção em chão de fábrica. Esta estrutura de software será dividida em três fase: preparação, geração e produção, sendo que cada fase servirá de base para a fase seguinte.

A fase de preparação processa um modelo 3D (obtido a partir um ficheiro CAD standard de modelação geométrica como STEP / STL / IGES ou através de inspeção e reconstrução sensorial) e identifica os segmentos de soldadura. Através da análise geométrica, um conjunto de candidatos de soldadura é proposta ao utilizador. De seguida, candidatos não selecionados ou apresentados podem ser adicionados via dados digitais (ou ficheiros de especificação). A segunda fase gera os cordões de soldadura e o devido posicionamento do sistema tocha-robot para completar a operação. Um procedimento de otimização local, gera, valida e otimiza posições e postura, assegurando trajetórias limpas e seguras para a célula robotizada. Por fim a última fase, diretamente ligada ao momento produtivo, é responsável pela comunicação com o sistema robótico e respetivos periféricos de operação. Esta solução será construída em cima do atual software MetroID PrimeWELD da SARKKIS Robotics que usa informação CAD / BIM para gerar programas de robot de forma automática. Abaixo é apresentado o diagrama de funcionamento da abordagem proposta (Figura 1).

## CASO DE ESTUDO MCG

O processo de construção de componentes complexos do chassis automóvel e da sua suspensão foca numa sequência de tecnologias de fabricação: (1) Estampagem, (2) Forjagem, (3) Soldadura MAG, (4) Maquinação e (5) Acabamento (Coating). Ao longo desta cadeia de produção são inseridas diversas tolerâncias construtivas que embora reduzidas, inserirão variabilidade ao estado do produto final. Além do mais, considerando esta sequência, o passo mais crítico é a etapa da soldadura que formalização a conexão entre múltiplas peças e que adicional consistência estrutural ao produto final.

Desta forma, o objetivo deste caso de estudo é desenvolver uma estação de soldadura capaz de garantir a integridade estrutural da soldadura (e consequentemente as características físicas desejadas para os produtos finais), bem como a minimização da perturbação da soldadura no

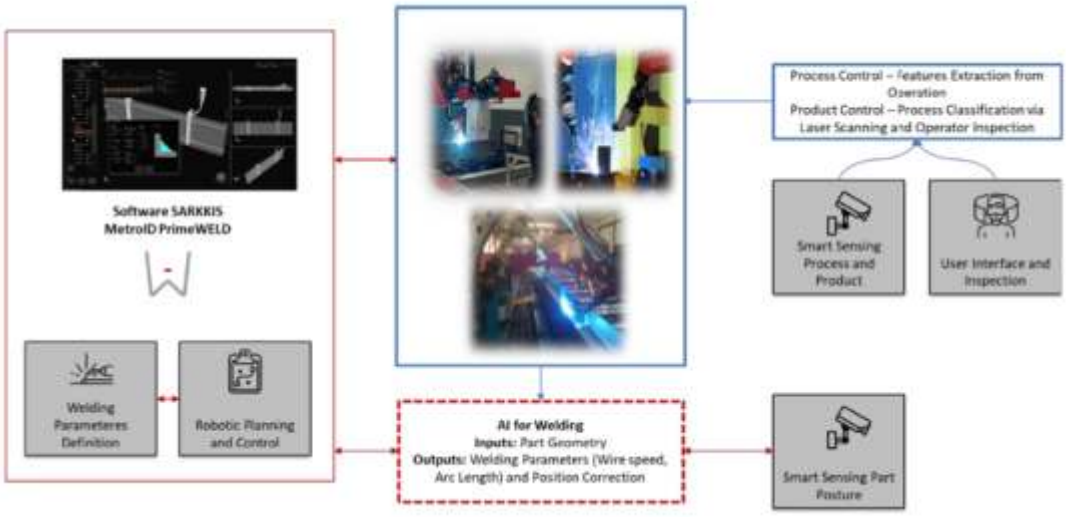



**FIGURA 1**
*Diagrama de funcionamento.*

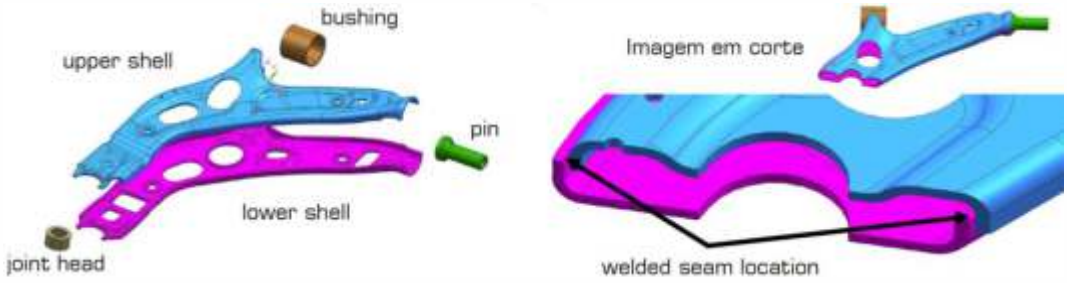



**FIGURA 2**
*Vista explodida do braço de suspensão.*

processo de acabamento. Por forma a cumprir com esta especificação, será necessário criar um canal de comunicação entre sistema de inteligência artificial, robot e equipamento de soldadura. Incluindo um sistema de aprendizagem computacional para definição dos parâmetros de operação (potência, velocidade de fio, velocidade do robot, ângulos de operação, comprimento de arco, entre outros) e o controlo dinâmico da operação capaz de reportar error e ajustar pequenos desvios, é possível ultrapassar as questões dimensionais ao longo do processo de preparação da peça e assegurar a sistematização da sequência até a secção final de acabamento. Outra contribuição de valor acrescentado é a formalização de uma abordagem que não só consegue classificar a qualidade de um produto final como prever o melhor conjunto de parâmetros para garantir qualidade na operação de soldadura e subsequente preparação para as restantes tarefas.

Considerando o caso prático da MCG, a peça selecionada é um componente da suspensão onde crucialmente deve ser assegurada a fase construtiva por motivos de segurança automóvel (Figura 2).

A MCG pretende controlar o processo produtivo de todo este componente crucial, em particular controlar de forma direta ou indireta os processos de: estampagem, soldadura e coating. Mais ainda a interface entre os três processos é também importante de ser controlada por forma a ser garantida a integridade geométrica a cada passo e as condições adequadas para as etapas seguintes.
No processo de estampagem, o objetivo é monitorizar a qualidade e precisão (nomeadamente das carcaças, o componente mais complexo, por forma a garantir a geometria final da peça). Deve ser ainda identificada a margem entre juntas de soldadura por forma a ser considerada esta margem e corrigida posteriormente no processo de soldadura.

A parametrização de soldadura deve ser influenciada diretamente pelo conceito desenvolvido, sendo que a qualidade da mesma é avaliada dinamicamente e deve ser otimizada por forma a conseguir a estabilização do processo com o mínimo de contaminação, preservando todas as características dimensionais e estruturais da peça final e não acrescentado barreira para o processo de acabamento (usando ZnMi e KTL). Assim, é importante que o momento da soldadura (controlo direto do conceito) utilize a parametrização correta para compensar desvios no processo de estampagem, que evite respingos de soldadura, e cria uma estrutura uniforme para indiretamente facilitar o terceiro processo, ou seja, o processo de acabamento.

## RESULTADOS

Definiu-se a etapa de produção necessária para otimizar, sendo este o processo de soldadura de peças estruturais. Foram realizados estudos iniciais no que concerne à avaliação e classificação do processo, com base em diferentes moldes produzidos. Desta forma, realizou-se um estudo para perceber onde a sensorização teria mais impacto, tendo-se concluído que à entrada do processo de soldadura da primeira face completa (OP10) seria o ponto ideal. Seguindo-se a segunda face (OP20) e acabamentos dos restantes componentes (OP40) consolidando a soldadura de faces, pino, bushing e joint head (Figura 3).




**FIGURA 3**
*Sequenciação de tarefas.*

Iniciou-se ainda o estudo de tecnologias de sensorização necessárias para ultrapassar erros de estampagem que antecedem a soldadura. Este mesmo módulo está em fase de industrialização para posterior inserção na célula real. Segmentou-se o estudo em 3 métodos de sensorização: disparo por câmara 3D (Mech

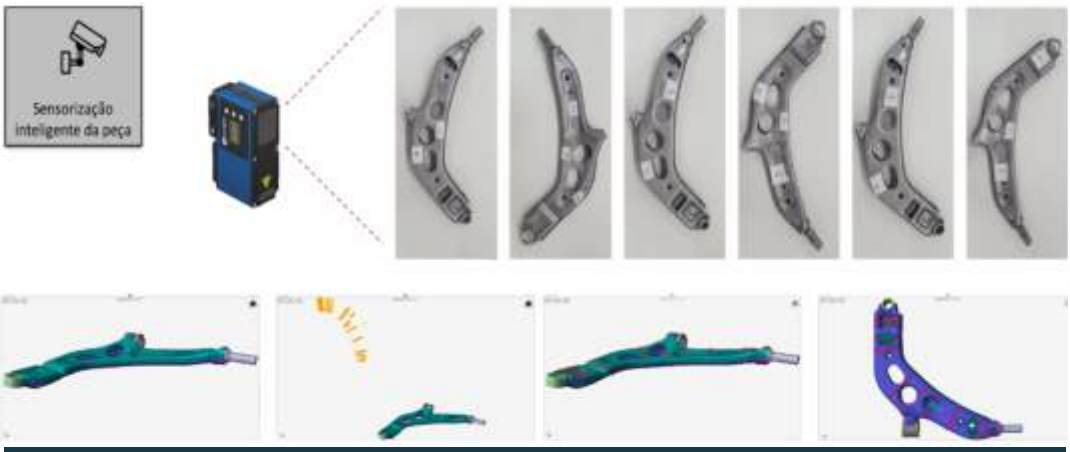



**FIGURA 4**
*Deteção inteligente da peça.*

Mind Eye e Revopoint Surface HD50 são alguns exemplos avaliados), disparos laser 2D (Wenglor MLSL124) e varrimento com laser-ponto 1D (Sick DS50-N1112 via triangulação laser). Por análise de precisão e dada a necessidade de detetar descontinuidades verificou-se melhor aproveitamento com laser linha.
De seguida foi iniciado um processo de captação de dados partindo de peças com diferentes desvios e o desenvolvimento de uma aplicação de matching dos pontos à peça. Com isto torna-se possível a comparação dos pontos teóricos CAD com os pontos medidos e o reconhecimento e validação da peça. Cada leitura foi discreta sendo o processo moroso e preciso capaz de recolher, tratar dados e adaptá-los à estrutura da peça.

Para otimizar a parametrização de sensorização foi criado um posto robótico para leitura contínua e comparação dos valores de descontinuidade das peças com os valores medidos.

Com a optimização de resultados, conseguiu-se reduzir o erro de leituras para centésimas com alguns resultados abaixo (Figura 5).

## INTEGRAÇÃO VERTICAL

A SARKKIS como promotora tecnológica deste dedicou-se à preparação de uma aplicação CAD /CAM, capaz de reconhecer a peça, a junta a ser medida e processar o programa de robot adequado para executar a tarefa. Esta aplicação denominada GapControl permite a um qualquer utilizador conexão a um sistema de sensorização avançada, que recolhe os dados de forma segmentada e controlada por forma a maximizar a eficiência na leitura da junta a soldar.

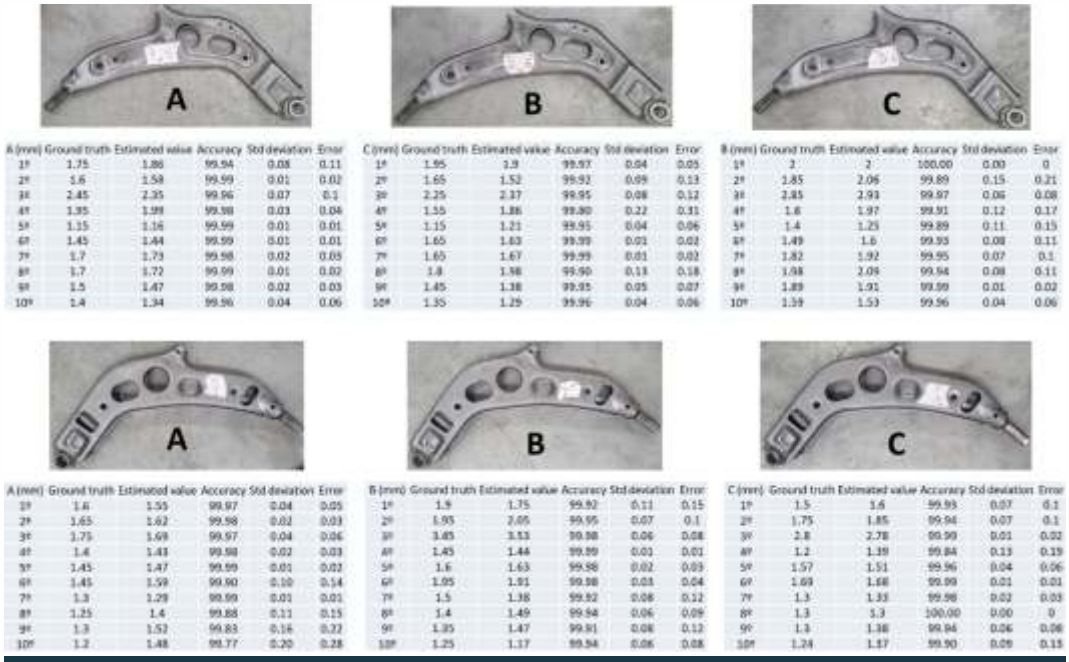



**FIGURA 5**
*Resultados da detação de descontinuidades.*

Para simplificar esta leitura e tornar o processo robusto e repetível para um conjunto alargado de peças foram dimensionados posicionadores independentes e flexíveis que suportem a peça de estudo. A padronização de posições é depois injetada no software CAD / CAM SARKKIS onde o robot reconhece o posicionamento da peça e restantes elementos da célula e de forma segura garante a sensorização sem colisão. Com este processamento foi possível replicar a taxa de sucesso das medições iniciais obtidas em ambiente laboratorial, tendo desta vez as mesmas sido executadas em ambiente industrial.

Com base nestas informações o programa de soldadura é capaz de se atualizar de forma dinâmica conseguindo durante a soldadura da junta reposicionar a tocha no local mais indicado que assegure qualidade de soldadura, com penetração da soldadura na peça, mas sem desgaste excessivo da mesma.

Desta forma formalizou-se o demonstrador inicial para leitura e correção da gap das partes envolvidas na soldadura.

## CONCLUSÃO

As principais conclusões a serem retiradas após a realização deste trabalho são:

- Adaptação ao processo industrial: Capacidade de reconhecer tolerâncias construtivas, identificação de gaps e alteração ao modelo 3D teórico;
- Otimização Soldadura: Ajuste automático ao posicionamento da tocha de soldadura, redução de erros de programação robótica;
- Redução de falhas produtivas: Por meio de sensorização avançada foi possível corrigir trajetórias e potenciar a eficácia do processo produtivo, reduzindo a necessidade de retrabalho ou reparação.


### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento do Projeto HirEV-Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002), cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), através da NextGeneration EU.


### REFERÊNCIAS


**[1]** J. Xu, N. Xi, C. Zhang, Q. Shi, J. Gregory, Real-Time 3D Shape Inspection System of Automotive Parts Based on Structured Light Pattern, Opt. Laser Technol., 2011.

**[2]** V.K. Pathak, A.K. Singh, M. Sivadasan, N.K. Sing, Framework for Automated GD&T Inspection Using 3D Scanner, J. Inst. Eng., 2018.

**[3]** L. Marchewka, M. Grudzi?ski, An Approach to an Intelligent Scanning of the Machine Tool Workspace, Journal of Machine Engi., 2021.

# INTERAÇÃO E COMUNICAÇÃO DE AGV PARA HUMANO

**Pedro Santos, Silvia Santos**
Streak - Engenharia em Automação, Figueira da Foz, Portugal

## INTRODUÇÃO

O uso de tecnologia digital e a melhoria no processamento digital tem permitido a inserção de sistemas robóticos com elevada capacidade de adaptação. Este conceito está em tudo alinhado com as necessidades de virtualização produtiva e aumento de flexibilidade nos processos industriais que é defendido pela Indústria 4.0/5.0.

Neste contexto, um dos principais promotores da evolução produtiva é a evolução no processo logístico e de transporte em chão-de-fábrica. Adicionalmente, a utilização de plataformas robotizadas permite e facilita este transporte, respondendo às necessidades de chão-de-fábrica.

Associado a estas plataformas robotizadas estão atualmente sistemas cyber-físicos capazes de prever produção, otimizar rotas e utilizar estas plataformas como agentes inteligentes e reutilizáveis pelos operadores, resultando num aumento produtivo e de otimização de recursos.

Atualmente, um dos principais focos na comunidade industrial prende-se com a capacidade de escalar o referido a um pro jeto real. Com o novo paradigma industrial, uma solução modular capaz de ser facilmente reconfigurável para atender às necessidades de múltiplas linhas de produção e manufatura é crucial para assegurar eficiência industrial. O sucesso industrial depende da passagem de abordagens proprietárias e restritas para soluções padrão e modulares [1].

Um dos desafios de utilizar estes sistemas é a necessidade do seu controlo e otimização. A abordagem tradicional baseia-se num processo heurístico dependente da experiência do utilizador. No entanto, o desenvolvimento tecnológico tem promovido a discussão e a necessidade de catalisar a indústria por meio de um correto escalonamento produtivo [2].

Assente no referido anteriormente, o trabalho desenvolvido pelo PPS11.3 tem o objetivo otimizar e, consequen- temente, melhorar as operações de manufatura, contribuindo assim para a redução do impacto social e económico. A solução apresentada, desenvolvida pela STREAK com a contribuição académica do INESC TEC, pretende assim ultrapassar os desafios inerentes à realidade em chão-de-fábrica, onde os recursos industriais são muitas vezes limi- tados e em que se verifica uma falta de componentes capazes de manipular (como pontes rolantes) ou incapacidade de acesso. Deste modo, torna-se imperativo o desenvolvimento de plataformas operacionais capazes de dotar os operadores fabris de recursos logísticos para melhoria produtiva. A contribuição do projeto baseia-se assim na melhoria ergonómica, da segurança e na introdução de tecnologias avançadas para execução de tarefas monótonas, na realidade fabril da empresa Palbit.

Os processos produtivos da Palbit caraterizam-se por um conjunto de etapas produtivas onde se destaca os processos da compactação, sinterização e retificação. Por sua vez, entre estes existe ainda um conjunto de processos produtivos intermédios, no qual se encontram inseridos os processos de inspeção, medição e maquinação de peças, que exigem um elevado grau de manuseamento. Dentro do manuseamento, destaca-se dois pontos críticos que afetam o fluxo produtivo:

- Transporte de peças em formato aglomerado (tabuleiros) entre etapas e sua rastreabilidade.
- Carga e descarga para cada processo produtivo na sua forma singular ou múltipla.

Os objetivos deste caso de estudo são claramente identificados pela transposição dos limites e otimização do transporte entre as principais etapas produtivas e pelo desenvolvimento de solução móvel, tendo em conta os seguintes critérios:

- Utilização do existente layout sem alterações profundas do mesmo.
- Adaptação à maquinaria existe sem um excessivo investimento.
- Solução compacta e flexível para adaptação futura a alterações de layout ou mesmo da sua ampliação.
- Capacidade de carga que permita a rastreabilidade de lote.

· Interface intuitivo com a operação.

Os principais desafios são questões logísticas, tais como:
· Layout existente e restrições de espaço.
· Percursos entre edifícios.
· Infraestrutura de suporte à navegação e respetivas rotas.
· Variedade de equipamentos existentes com interfaces distintos.

O desenvolvimento deste caso de estudo e a respetiva execução do demonstrador focar-se-á nos seguintes passos:
· Software de Controlo e Navegação, nomeadamente o desenvolvimento e aplicação de Software Siemens Simove.
· Sistemas de Comunicação Wireless, com recurso a PLC Simatic ET200SP e Antenas Scalance IWLAN
· Periféricos de Suporte Logístico, utilizando definição de rotas com recurso a refletores tecnológicos em ação com laser scanner Sick, bem como correção de trajetórias com recurso a leitores RFID.

## METODOLOGIA | RESULTADOS

### SOFTWARE DE CONTROLO E NAVEGAÇÃO

Por forma a garantir flexibilidade, rápida adequação ao layout e facilidade em realizar futuras melhorias associadas ao crescimento da unidade fabril, o sistema de navegação incorporado é do tipo Navegação Livre, com a implementação do software SIMOVE ANS+.

No que diz respeito ao desenvolvimento do software, este está assente na unificação das ferramentas da plataforma da Siemens SIMATIC TIA Portal e SIMOVE Tools, em que todos os pontos devem ser sincronizados numa estrutura de comunicação. Deste modo, estão reunidas as condições para elaboração de uma plataforma de monitorização com a introdução de rede wireless dedicada aos veículos autónomos e sua gestão.

Relativamente ao SIMOVE, este trata-se de um software desenvolvido pela Siemens, tratando-se de uma solução inovadora capaz de transformar a forma como as empresas gerenciam a movimentação de materiais e processos logísticos. Combinando tecnologia avançada e flexibilidade, o SIMOVE destaca-se na automação de armazéns e na otimização de operações industriais. Além disso, o sistema é pro jetado para se conectar facilmente a softwares de gestão, como WMS (Warehouse Management System) e ERP (Enterprise Resource Planning), permitindo uma troca de informações em tempo real. O SIMOVE pode ser ainda adaptado a diferentes configurações de armazém, permitindo a reconfiguração rápida para atender às mudanças nas demandas operacionais. Este utiliza sensores sofisticados, como LIDAR e câmaras, para navegação e mapeamento, garantindo um transporte seguro e preciso. Deste forma, a sua utilização representa uma evolução significativa na automação logística, oferecendo soluções que otimizam a movimentação de materiais e melhoram a eficiência operacional. À medida que as empresas buscam se adaptar às exigências do mercado, a adoção de tecnologias como o SIMOVE torna-se essencial para se manter competitivas [3].

Nesta base, o Streaktec-1, Veículo Guiado Autónomo (AGV) desenvolvido, foi incorporado com o sistema de navegação SIMOVE por aliar uma tecnologia fiável a uma navegação user friendly. A projeção do software no HMI instalado na unidade fabril permite a interação em tempo real do responsável e linha com a possibilidade de correção de rotas para maximizar a produtividade no que diz respeito à manipulação do produto.

Como representado na Figura 1, recorrendo ao

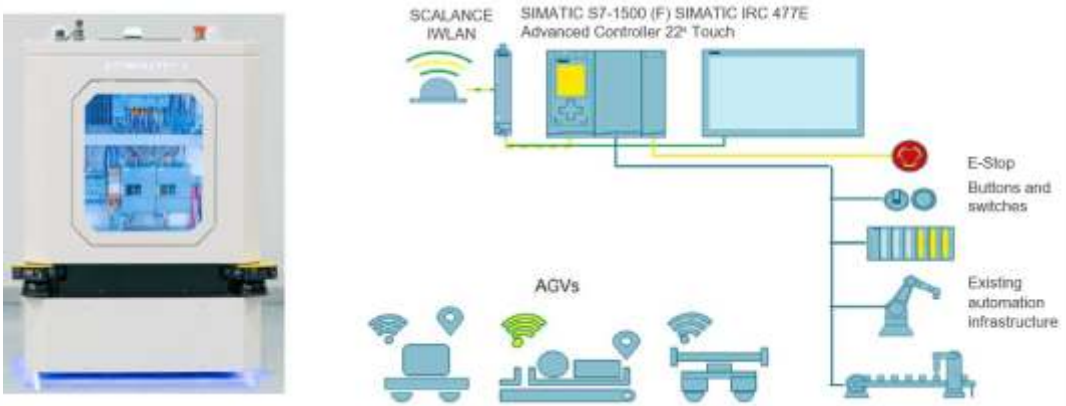



**FIGURA 1**
*Estrutura de comunicação Factory - Machine*

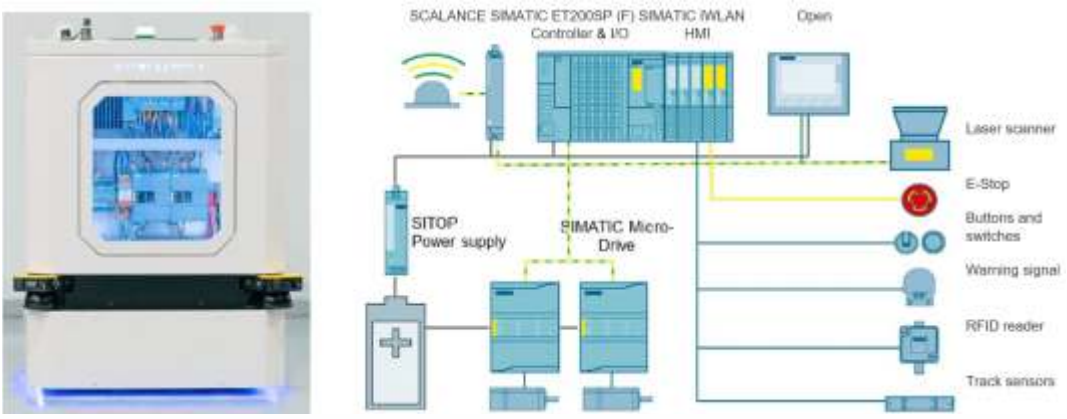



**FIGURA 2**
*Arquitectura lógica do Streaktec-1.*

sistema de comunicação sem fios implementado, o AGV como equipamento individual consegue, em tempo real comunicar com o Master Control (Sistema que controla a frota de AGVs em funcionamento), cruzando dados por si obtido para confirmar a posição essencial á tarefa a executar.

### PERIFÉRICOS DE SUPORTE LOGÍSTICO

Os AGVs estão cada vez mais integrados com tecnologias de identificação e rastreamento, como o RFID, por forma a melhorar a eficiência e a precisão nas operações logísticas. Os refletores RFID desempenham um papel importante nesse contexto.

De uma forma geral, os refletores RFID são dispositivos que aumentam a capacidade de deteção de sinais RFID em ambientes logísticos. Eles não são tags ativas, mas refletem o sinal do leitor para melhorar a leitura em áreas onde a deteção pode ser limitada.

No que diz respeito à aplicação em questão (Figura 2), a implementação de estratégias para a correção de trajetórias (aumento da precisão), como as mencionadas, tiveram de ser tidas em conta, uma vez que o Streaktec-1 tem por objetivo a alimentação e descarga de uma máquina cuja geometria de entrada e saída de material otimizado obriga a uma atracagem com uma precisão de aproximadamente ± 2mm. Assim, a sua utilização permite ultrapassar os desafios associados à realidade de um chão de fábrica, tais como, piso irregular, objetos de pequena dimensão no solo, piso escorregadio, fissuras, etc.

## CONCLUSÃO

A integração de tecnologias digitais e sistemas robóticos na indústria moderna, em consonância com os princípios da Indústria 4.0 e 5.0, representa um avanço significativo na otimização de processos logísticos. A utilização de AGVs, equipados com sistemas de navegação avançados como o SIMOVE, aliados a tecnologias de comunicação wireless e RFID, permite um controle preciso e eficiente do fluxo de materiais. A capacidade de adaptar rapidamente essas soluções a diferentes layouts e demandas operacionais é crucial para aumentar a flexibilidade e a eficiência nas fábricas. Além disso, o desenvolvimento de plataformas logísticas que incorporam refletores RFID e sistemas de monitoramento em tempo real contribui para a rastreabilidade e a segurança nas operações. Os desafios logísticos, como restrições de espaço e a necessidade de interfaces intuitivas, são abordados com soluções modulares que garantem escalabilidade. Por fim, a automação não apenas melhora a produtividade, mas também promove condições de trabalho mais seguras e ergonómicas, refletindo um compromisso com a sustentabilidade social e económica na indústria.

### REFERÊNCIAS

[1] Stephan Weyer, Mathias Schmitt, Moritz Ohmer, and Dominic Gorecky. Towards industry 4.0 - standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. IFAC-PapersOnLine, 48(3):579- 584, 2015. 15th IFAC Symposium onInformation Control Problems inManufacturing.

[2] Teena Mathew, K. Chandra Sekaran, and John Jose. Study and analysis of various task scheduling algorithms in the cloud computing environment. In 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), pages 658-664, 2014.

[3] Gwynne Richards. Warehouse Management: A complete guide to improving efficiency and minimising costs in the modern warehouse. 06 2011.

SENTINEL
A SMART VISION

Vendas: sales@sentinel-vision.com
Geral: sentinel@sentinel-vision.com
Telefone: +351 253 412 219
Website: www.sentinel-vision.com

# AI & Computer Vision SOLUTIONS

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

VISÃO POR COMPUTADOR

SOLUÇÕES PERSONALIZADAS

## Sobre nós

Na Sentinel, criamos soluções de visão artificial personalizadas, concebidas para otimizar operações e aumentar a precisão. Da análise à implementação, oferecemos soluções completas que colocam os nossos clientes na vanguarda da inovação industrial.

## Deveríamos ser parceiros?

Se acha que devemos trabalhar juntos, envie um e-mail para: partners@sentinel-vision.com.

## Por que deve escolher-nos?

- **Soluções personalizadas:** adaptamos cada sistema às suas necessidades.
- **Soluções chave na mão:** desde o desenvolvimento até a instalação, nós cuidamos de tudo.
- **Alta precisão:** melhor desempenho com tecnologias de ponta.
- **Suporte especializado:** uma equipa dedicada ao sucesso do cliente.

## Os nossos softwares

VISIONCORE



Um software que processa imagens 2D e 3D utilizando uma poderosa biblioteca de recursos de visão computacional. Quer saber o que há de melhor neste software? Não é preciso programar.

K AI Maker



Uma aplicação web-based para criar algoritmos de inteligência artificial mais poderosos. Contém funcionalidades para ajudar os utilizadores a convergir para a melhor solução de IA.

AUTOMÓVEL - MÉDICO E FARMACÊUTICO - PLÁSTICO - METAL - ALIMENTAR - CORTIÇA - RECICLAGEM

**VAMOS CONSTRUIR A SUA SOLUÇÃO PERSONALIZADA ENTRE EM CONTACTO AGORA MESMO!**

# BEATRIZ RODRIGUES

**1 | Parágrafo biografia (origem, percurso académico e pessoal)**

*Sou a Beatriz Rodrigues, estudante do segundo ano do Mestrado em Engenharia Mecânica mais especificamente no ramo de Materiais e Processos Académicos. Venho de Vale de Cambra, uma cidade onde a indústria metalomecânica é o principal foco da economia e por ter crescido assim num meio fez com que surgisse o gosto pela engenharia. Para além de engenharia gosto muito de fazer trilhos pela natureza assim como de ouvir música.*

**2 | O que a motivou a escolher fazer realizar um trabalho no âmbito de uma bolsa de iniciação de investigação em colaboração com uma empresa?**

*Desde o segundo ano da faculdade que tenho procurado realizar estágios em empresas para conseguir ter uma perceção realista da aplicabilidade dos conceitos que são lecionados na faculdade. No entanto, também tinha curiosidade de saber um pouco pelo que passava investigação, assim quando soube que havia a possibilidade de realizar investigação em colaboração com uma empresa nem pensei duas vezes, assim podia aliar os dois mundos.*

**3 | Pode explicar brevemente o tópico do seu estágio e o impacto para o setor automóvel?**

*Durante este estágio tive a oportunidade de fazer um estudo relativamente ao uso de pastilhas cerâmicas, mais especificamente em SiAlON para a fresagem de Inconel 718, uma superliga de níquel. O objetivo central era estudar qual a performance destas ferramentas e quais os mecanismos de desgaste associados aos mesmos.*

*Considerando que Inconel 718 é uma superliga de níquel com propriedades extraordinárias tais como alta resistência à temperatura, certos componentes num veículo são sujeitos a altas temperaturas que leva ao uso de materiais adequados. No entanto, este tipo de materiais tem baixa maquinabilidade também devido a baixa condutibilidade térmica pelo que ferramentas cerâmicas são efetivamente uma solução promissora e os resultados encontrados comprovam isso. Assim ao estudar este tipo de materiais para este tipo de ferramentas talvez abra portas para a aplicação de materiais semelhantes a ligas de níquel em certos componentes dos automóveis.*



# BEATRIZ SOUSA MONTEIRO

**1 | Parágrafo biografia (origem, percurso académico e pessoal)**

*O meu nome é Beatriz Sousa Monteiro e sou natural de Vila Verde, uma pequena aldeia no concelho de Alijó, em Vila Real. Licenciei-me e completei o mestrado em Engenharia de Materiais na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, onde adquiri conhecimentos relacionados com materiais e técnicas avançadas de caracterização e processamento. Durante o mestrado, tive a oportunidade de realizar um estágio de iniciação à investigação, na área dos nanocompósitos de matriz de cobre, que acendeu a minha curiosidade pela inovação e investigação. Atualmente, sou aluna de doutoramento na mesma instituição, com tema focado na otimização de revestimentos para ferramentas de corte. Para além da investigação, tenho uma grande paixão pelo FC Porto, sou grande aficionada de viagens e concertos e o meu maior hobbie é a pastelaria e manufatura de trabalhos manuais detalhados em papelaria.*

**2 | O que a motivou a escolher fazer um doutoramento?**

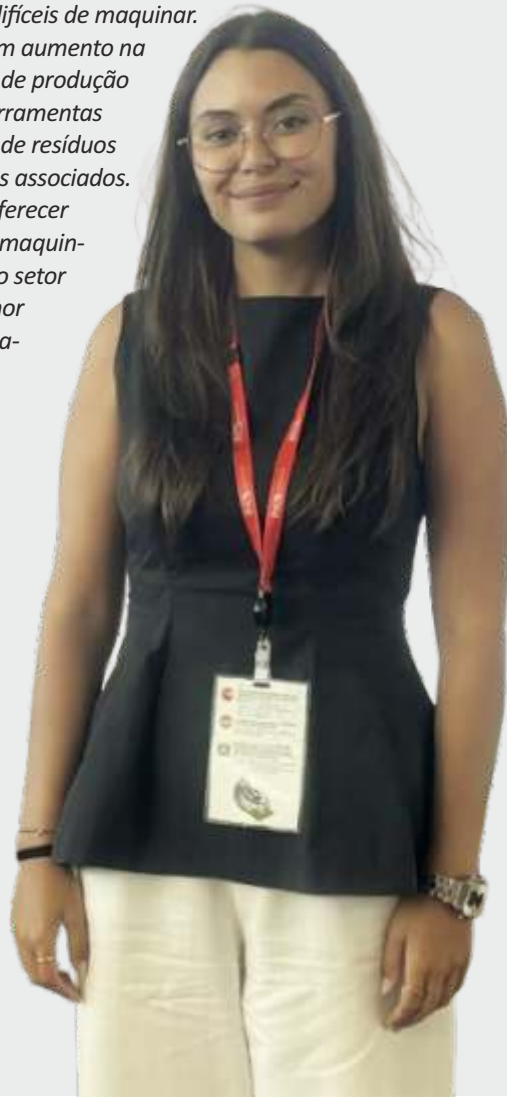
*O tema do meu doutoramento é altamente relevante para o setor de mobilidade e da maquinagem, que constituem setores cuja tendência se direciona visando o cumprimento de metas ambientais rigorosas, inseridas no atual contexto mundial. A oportunidade de trabalhar diretamente com uma empresa de relevo nacional, a Palbit S.A., permite atuar e dirigir o curso da investigação paralelamente às necessidades da indústria, relacionando sempre o desenvolvimento científico à prática industrial. Neste contexto, existe um apoio constante de especialistas na área da maquinagem e das ferramentas de corte, favorecendo a partilha de conhecimento, a incessante tentativa de otimização das diferentes etapas de produção e a procura constante de soluções inovadoras. Em comparação, um trabalho exclusivamente académico muitas vezes dificulta a aplicação dos resultados, criando um possível distanciamento entre a inovação científica e a indústria, podendo dificultar o "scale-up" e a implementação dos resultados no final do doutoramento.*

**3 | Pode explicar brevemente o tópico do seu doutoramento e o impacto para o setor automóvel?**

*O meu projeto do meu doutoramento visa melhorar a resistência ao desgaste das ferramentas de corte cerâmicas utilizadas na maquinagem de ligas leves, materiais compósitos e superligasresistentes ao calor (HRSA) - considerados materiais hard-to-cut, ou seja, difíceis de maquinar. Esta melhoria na resistência ao desgaste não representa apenas um aumento na vida útil das ferramentas, como também contribui para uma linha de produção mais eficiente e sustentável, já que uma maior durabilidade das ferramentas implica menos substituições das pastilhas, diminuindo a produção de resíduos e, consequentemente, reduzindo o consumo de recursos e os custos associados. Para a Palbit, S.A., este projeto representa uma oportunidade de oferecer produtos mais capazes de responder às exigências da indústria da maquinagem e de todos os setores que dependem desta indústria - como o setor da mobilidade. Simultaneamente, estes produtos apresentam menor impacto ambiental, atendendo às crescentes exigências de sustentabilidade.*

**4 | O que gostaria de fazer no final do doutoramento?**

*No final do doutoramento, gostaria de continuar a minha carreira no ambiente académico, continuando o trabalho realizado de investigação na área dos materiais e das tecnologias avançadas de processamento e caracterização. Paralelamente, gostaria de continuar a colaborar em projetos de investigação e inovação com a Palbit S.A., e contribuir para o desenvolvimento de novas soluções na área das ferramentas de corte e revestimento.*



# RÚBEN COSTA

**1 | Parágrafo biografia (origem, percurso académico e pessoal)**

*O meu nome é Rúben Costa e vivo em Oliveira do Douro, em Vila Nova de Gaia. Estudei no ISEP durante 5 anos, tendo feito a licenciatura em Engenharia Mecânica e o mestrado na mesma área, no ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico. Durante o mestrado contei com duas experiências de estágios em duas empresas na indústria, um curricular e um de verão. Depois disso, emigrei para Angola durante um ano, onde estive a trabalhar na maior empresa de construção do país a gerir uma frota de mais de 2000 equipamentos. Não satisfeito com o meu ramo de trabalho e com o intuito de querer enveredar pela via da investigação científica e poder contribuir para a constante inovação que faz o mundo evoluir, decidi regressar a Portugal e iniciar um doutoramento em engenharia mecânica na FEUP. No 2º ano do doutoramento fiz Erasmus+ na Universidade de West Bohemia, em Pilsen, na República Checa, tendo tido uma experiência de trabalho no centro da Europa durante a qual continuei a desenvolver o tema de investigação que tinha em curso com as tecnologias presentes nessa universidade.*

**2 | O que o motivou a escolher fazer um doutoramento?**

*O que me levou a ingressar num doutoramento foi essencialmente a vontade por querer aprender mais ao trabalhar na área da investigação e alargar os meus conhecimentos para poder contribuir para o desenvolvimento de soluções inovadoras para a indústria.*

**3 | Pode explicar brevemente o tópico do seu doutoramento e o impacto para o setor automóvel?**

*O meu tópico de doutoramento é no ramo da maquinagem e foca-se no desenvolvimento de novas soluções de ferramentas para a furação de multi-materiais CFRP/metal. No setor automóvel, cada vez mais componentes são produzidos por materiais híbridos, através da combinação de compósitos, devido ao seu baixo peso e elevada resistência à fratura, fadiga e corrosão, com metais, que se destacam pela sua maior resistência, rigidez e durabilidade. O material resultante possui características melhoradas em relação a qualquer dos seus constituintes usados isoladamente, daí ser mais adotado. No entanto, a furação destes materiais, indispensável para a união de diferentes componentes através de furos ou rebites, constitui um desafio. A natureza abrasiva e anisotrópica do compósito, devido às suas fibras, produz defeitos nos furos, entre os quais a delaminação, que compromete a integridade estrutural do componente. Para além disto, o facto de a ferramenta de corte ter de maquinar dois materiais dissimilares em simultâneo resulta no seu desgaste excessivo e redução do seu tempo de vida útil. Assim, o meu tema centra-se no estudo deste processo, com vista a determinar os parâmetros ideais de corte, assim como a melhor ferramenta, para produzir o menor desgaste possível e que resulte na melhor qualidade do multi-material, mantendo a sua integridade estrutural.*

**4 | O que gostaria de fazer no final do doutoramento?**

*No final do doutoramento gostaria de lecionar no ensino superior para poder formar novos engenheiros e inspirá-los a serem melhores profissionais e também eles contribuírem para uma melhoria contínua do mundo em que vivemos. Quero continuar a trabalhar na investigação para transmitir conhecimentos às próximas gerações e em conjunto com eles desenvolver novas soluções para a indústria.*



# RUI NASCIMENTO

**1 | Parágrafo biografia (origem, percurso académico e pessoal)**

*Nasci a 19 de janeiro de 1999, em Mirandela, onde vivi até aos 18 anos. Em setembro de 2016, iniciei a licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pertencente ao Instituto Politécnico do Porto (IPP). Concluí o Mestrado na mesma área em 2021. Nesse ano, comecei a trabalhar como engenheiro de desenvolvimento de produto no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Industrial (INEGI). Em 2022, integrei o Centro de Robótica Industrial e Sistemas Inteligentes (CRIIS) do INESC TEC como investigador, participando em vários projetos e prosseguindo o meu doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Os meus principais interesses de investigação incluem inteligência artificial, visão computacional, robótica e automação.*

**2 | O que a motivou a escolher fazer um doutoramento?**

*Decidi seguir um doutoramento devido ao meu forte interesse em investigação e inovação. Sempre fui motivado pelo desafio de explorar novas ideias e contribuir para o avanço do conhecimento. O doutoramento permite-me aprofundar a minha experiência em áreas como inteligência artificial, visão computacional, robótica e automação, que são centrais para os meus objetivos profissionais e académicos. Além disso, vejo esta oportunidade como uma preparação para uma futura carreira como professor universitário, onde poderei partilhar o meu conhecimento e inspirar a próxima geração de engenheiros e investigadores.*

**3 | Pode explicar brevemente o tópico do seu doutoramento e o impacto para o setor automóvel?**

*O meu doutoramento foca no desenvolvimento de sistemas de inspeção automáticos para o controlo de qualidade de peças refletoras e transparentes. Este tema é relevante na indústria automóvel, onde muitas empresas ainda dependem da inspeção visual manual, um método lento e sujeito a erros devido à fadiga e desatenção do operador, o que pode permitir que peças defeituosas prossigam na produção. A integração de sistemas de visão computacional para inspeção de qualidade, alinhada com os princípios da Indústria 5.0, pode melhorar a eficiência do processo, aumentar a precisão das inspeções e apoiar os operadores, reduzindo a incidência de peças defeituosas. O alumínio, muito utilizado na indústria automóvel pela sua resistência e leveza, apresenta propriedades altamente refletoras que podem comprometer a qualidade da imagem captada pelos sistemas de inspeção e dificultar a deteção de defeitos. Este desafio requer o desenvolvimento de métodos capazes de minimizar as interferências causadas pela reflexão da luz. Além disso, o uso de materiais transparentes na produção de componentes ópticos, como faróis e lanternas, apresenta desafios adicionais devido às suas características ópticas, como reflexão e refração da luz, que dificultam a deteção de defeitos. Por isso, é essencial criar soluções de inspeção automáticas que possam lidar com estas características e assegurar a qualidade dos componentes na produção.*



**4 | O que gostaria de fazer no final do doutoramento?**

*No final do doutoramento, o meu objetivo é continuar a trabalhar na área de investigação em Portugal, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que tragam benefícios reais para a sociedade e promovam um futuro mais sustentável e eficiente. Quero participar ativamente em projetos que ajudem a posicionar Portugal na vanguarda do desenvolvimento tecnológico, destacando-o como um centro de inovação e excelência no panorama europeu e global. Simultaneamente, ambiciono integrar a minha carreira académica como professor universitário, onde poderei partilhar o conhecimento adquirido, promover o pensamento crítico e inspirar a próxima geração de engenheiros e investigadores.*

# MÓNICA FARIA

**1 | Parágrafo biografia (origem, percurso académico e pessoal)**

*Mónica dos Santos Faria, mestre em Engenharia de Materiais desde 2016. Trabalha como bolseira de investigação na área da manufatura aditiva e materiais duros, nomeadamente nitreto de silício, desde então. Ainda com formação como Técnica Superior de Segurança no Trabalho, alia a curiosidade sobre o processo de organização das entidades e a ciência envolvente. No final 2022 inicia o doutoramento no programa doutoral de Nanociências e nanotecnologias com o tema "Fabrico de peças à base de nitreto de silício por manufatura aditiva".*

**2 | O que a motivou a escolher fazer um doutoramento?**

*A necessidade de um conhecimento mais profundo sobre o tema que responda aos desafios que surgiram na empresa.*

**3 | Pode explicar brevemente o tópico do seu doutoramento e o impacto para o setor automóvel?**

*O tema do meu doutoramento relaciona-se com o desenvolvimento e melhoria de ferramentas com performance de alto desgaste. Ao melhorar a qualidade e condições de processamento de ferramentas de maquinação de componentes duras, o tempo e gastos associados ao processo serão de igual modo impactados. Este input pode igualmente aumentar tempo de vida das ferramentas, reduzir gastos energéticos e além de tornar o procedimento mais ecológico, torná-lo mais eficaz. É de extrema importância este investimento na investigação e desenvolvimento de novos materiais para tornar a indústria competitiva e com resposta aos desafios.*

**4 | O que gostaria de fazer no final do doutoramento?**

*Possivelmente trabalhar na indústria, ligada à investigação e desenvolvimento, mas com uma forte vontade de estar ligada à gestão de pessoas e a sua segurança e bem-estar no trabalho.*



# VITOR SOUSA

**1 | Paragrafo biografia (origem, percurso académico e pessoal)**

*O meu nome é Vitor Fernando Crespim Sousa, nascido em 1994 no Porto, Portugal. Sou atualmente um estudante de doutoramento, na área da engenharia mecânica, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Obtive o grau de licenciado em engenharia mecânica no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), em 2017. Obtive, também, o grau de mestre na mesma instituição em 2019 na área de materiais e tecnologias de fabrico, tendo apresentado a minha tese acerca da maquinabilidade de aço inoxidável duplex, um material conhecido por ser de difícil maquinagem. Durante a duração do meu mestrado fiz parte do Projeto ON-SURF, este focado principalmente no estudo do comportamento de ferramentas revestidas quando usadas para maquinar diferentes tipos de liga. Como disse, neste momento estou inscrito no programa doutoral em engenharia mecânica (PRODEM) da FEUP, estando a realizar um estudo acerca de práticas sustentáveis para a maquinagem de ligas de INCONEL.*

**2 | O que o motivou a escolher fazer um doutoramento?**

*Durante o meu mestrado fiz parte do projeto ON-SURF como bolseiro de investigação. Durante o projeto realizei trabalho na área da maquinagem de ligas classificadas como difíceis de maquinar, com ferramentas revestidas, tema que me despertou um grande interesse bem como um gosto pelo trabalho de investigação. Como tal, após a conclusão do projeto ON-SURF e do meu mestrado decidi (com ajuda dos meus orientadores e mentores) que o próximo passo seria o doutoramento, aonde iria continuar a realizar trabalho na área da maquinagem.*

**3 | Pode explicar brevemente o tópico do seu doutoramento e o impacto para o setor automóvel?**

*O tema do meu doutoramento é a Maquinagem Sustentável de INCONEL 718, uma liga considerada de difícil maquinagem, utilizada em vários setores industriais, principalmente no aeronáutico e automóvel. A maquinagem desta liga é bastante problemática, causando elevados níveis de desgaste nas ferramentas de corte mesmo após alguns minutos de maquinagem. Como tal, é necessária a utilização de lubrificação abundante bem como trocar várias vezes de ferramentas (e outros consumíveis de maquinagem), o que não é sustentável. Comumente, são utilizadas ferramentas de carboneto de tungsténio revestidas para a maquinagem destas ligas, todavia, devido às propriedades do INCONEL 718, os parâmetros de maquinagem adotados são bastante conservadores, o que torna o processamento destas ligas não sustentável e pouco produtivo. Desta forma, o meu trabalho de doutoramento poderá ser útil ao fornecer formas mais sustentáveis e produtivas de processar este tipo de ligas.*

**4 | O que gostaria de fazer no final do doutoramento?**

*Após a conclusão do meu doutoramento gostaria de me dedicar ao trabalho de investigação nesta área da maquinagem.*

*Adicionalmente, gostaria de partilhar o conhecimento adquirido ao longo do meu percurso académico através do leccionamento de aulas.*



# ROYA DARABI

**1 | Biography paragraph**

*I am a mechanical engineer originally from Iran, where I completed my bachelor's and master's degrees in Manufacturing and Production Engineering. Growing up and studying in Iran shaped my engineering identity, giving me a strong foundation in problem-solving and resilience, especially through hands-on industrial work. After several years as a mechanical design engineer in the valve and oil-and-gas sector, I moved to Portugal to pursue my PhD at the University of Porto. There, my work evolved toward computational mechanics and advanced modelling of additive manufacturing processes. Since completing my PhD, I have continued as a postdoctoral researcher and Invited Professor, with additional international experience at the University of Oxford. My research now bridges materials science, numerical modelling, and sustainability challenges in modern manufacturing.*

**2 | What motivated you to choose to pursue a PhD?**

*My motivation to pursue a PhD grew gradually from my early engineering experience in Iran, where I worked on designing valves and critical mechanical components. I often encountered limitations in the tools available for predicting material behaviour-especially under extreme operating conditions common in the energy sector. This inspired me to continue my studies abroad and gain a deeper scientific understanding of the physical mechanisms behind materials and processes. A PhD offered the opportunity to combine rigorous modelling, physics, and engineering and to contribute to emerging fields such as additive manufacturing. It allowed me to move from purely empirical engineering toward developing predictive, mechanistic tools that can guide innovation.*

**3 | Can you briefly explain the topic of your PhD and its impact on the automotive sector?**

*My PhD focused on developing multiscale and multi-physics modelling strategies for metal additive manufacturing-specifically selective laser melting and direct energy deposition. By integrating thermal, mechanical, and microstructural evolution through phase-field models, I created tools capable of predicting defects, residual stresses, dendrite growth, and hot-cracking behaviour.*

*Such modelling is highly relevant for the automotive sector as it transitions toward high-efficiency, low-emission, and digitally integrated manufacturing. Simulation tools like those developed in my PhD can significantly reduce trial-and-error, accelerate material qualification, and guide the design of next-generation automotive components. They support lightweighting, improved durability, and the digital-twin approaches that industries like Hi-rEV are adopting. In essence, advanced AM modelling can help reshape how components are designed and validated, enabling cleaner and more innovative mobility technologies.*

**4 | What would you like to do after completing your PhD?**

*After completing my PhD, my goal is to continue developing advanced modelling frameworks that integrate physics-based simulations with data-driven methodologies to support the next generation of high-performance and sustainable materials. I am particularly motivated to build an academic and research career that bridges computational mechanics, materials science, and industrial innovation. A significant step toward this vision has been receiving the Schmid Prize / Schmid Science Fellowship at Imperial College London, awarded to early-career researchers with exceptional potential in materials engineering. This fellowship offers me the opportunity to join the Department of Materials at Imperial College as a Schmid Science Fellow, where I will be working within a world-leading environment for materials research. This achievement represents an important progression in my academic path-from my industrial engineering work in Iran, to my doctoral research in Portugal, and now to a globally recognized centre of excellence in materials science.*

*At Imperial College, I aim to expand my research into multiscale modelling, damage prediction, and microstructure-informed design, while collaborating with experts working on advanced manufacturing, alloys for extreme environments, and computational materials engineering. Ultimately, I hope to leverage this experience to build a strong independent research profile focused on sustainable technologies-whether in the automotive sector, renewable energy systems, or broader engineering applications. My long-term aspiration is to lead research that connects fundamental modelling with real industrial challenges, enabling safer, more durable, and eco-efficient materials and components.*





# MATERIAIS 2027

## Materials for a Better Future

## 22 A 24 DE MARÇO

### ISEP . INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

A conferência MATERIAIS 2027, que integra o XXIII Congresso da Sociedade Portuguesa de Materiais e o XIV International Symposium on Materials. O evento reunirá estudantes, investigadores e profissionais da área dos materiais, proporcionando um fórum de excelência para a apresentação e discussão dos mais recentes avanços científicos e tecnológicos em Ciência e Engenharia de Materiais, com especial enfoque na **sustentabilidade e reciclabilidade.**

O MATERIAIS 2027 contará com um programa técnico-científico de elevada qualidade, que incluirá:
ESCOLA + PALESTRAS PLENÁRIAS E CONVIDADAS + COMUNICAÇÕES ORAIS, SELECIONADAS + SESSÕES DE POSTERS

**materiais2027@isep.ipp.pt** **https://congressomateriais.pt/**

# PROCESSAMENTO DE MATERIAIS E IA: FUSÃO INUSITADA OU LIGAÇÃO PERFEITA?

CRISTINA FERNANDES, DANIEL FIGUEIREDO

Os materiais fazem parte do nosso dia-a-dia, sem eles a nossa sobrevivência seria fortemente afetada, uma vez que estão presentes em todos os setores da economia. O desenvolvimento de materiais aliado à ciência que os investiga está em permanente desassossego, para fazer face às constantes exigências económicas, tecnológicas, ambientais e para incrementar o progresso da humanidade.

O processamento dos materiais requer a otimização dos parâmetros dos processos associados, de forma a alcançar as propriedades e caraterísticas pretendidas para um bom desempenho durante a sua aplicação. Esta otimização requer em alguns casos um longo período de experimentação, especialmente nos novos materiais. A implementação da inteligência artificial (IA) em áreas multidisciplinares permitiu uma evolução extraordinária na computação moderna. A utilização desta ferramenta no processamento de materiais permite uma otimização dos processos e um controlo mais eficiente das caraterísticas dos materiais. No caso específico do processamento do metal duro desenvolveu-se, em parceria com o INEGI, um algoritmo de base de dados enquadrado nas atividades do projeto Hi-rEV, que se traduziu numa ligação perfeita entre processamento de materiais e IA, conforme apresentado seguidamente.

A Palbit S.A. é uma empresa especializada no processamento de carbonetos cementados à base de WC, normalmente designado de metal duro. As principais aplicações do metal duro incluem ferramentas de corte e anti-desgaste. O processamento pulverometalúrgico de metal duro envolve as etapas de moagem, atomização, prensagem e sinterização [1]. As peças prensadas uniaxialmente são colocadas em tabuleiros de grafite de modo a controlar a estequiometria do carbono do WC durante o processo de sinterização. Os tabuleiros de grafite são empilhados em lotes e colocados no forno de sinterização constituindo uma carga. Normalmente cada carga de sinterização é formada por 6 lotes com 25 tabuleiros cada. Durante o processo de sinterização ocorre a densificação do material através de sinterização em fase líquida de modo a eliminar a porosidade. Para garantir uma densificação total das peças aplica-se pressão no final da etapa de sinterização. Este processo ocorre no forno Sinter-HIP a temperaturas próximas de 1450ºC (Figura 1).



**FIGURA 1**
*Forno Sinter-HIP utilizado no processo de sinterização de WC-Co.*

As peças sinterizadas são posteriormente sujeitas a controlo para atestar a sua qualidade (Figura 2). O controlo das características microestruturais e das propriedades do metal duro é efetuado através de várias técnicas destrutivas e não destrutivas. A utilização da caraterização magnética é preferida relativamente às outras técnicas, porque é não destrutiva, não inviabilizando a utilização das peças após caraterização. As análises magnéticas normalmente realizadas na caraterização do metal duro, são a balança magnética (BMS) e a força coerciva (HC). A balança magnética consiste na pesagem de amostras antes e após saturação magnética do cobalto ferromagnético (ligante). O valor obtido em percentagem corresponde ao cobalto livre na estrutura WC+Co. Através dos valores obtidos é ainda possível determinar a quantidade de tungsténio dissolvido no cobalto. A formação de fases indesejadas, como a fase eta ou grafite, durante a etapa de sinterização, estão relacionadas com quantidades de carbono diferentes da estequiometria, inferiores ou superiores, respetivamente.

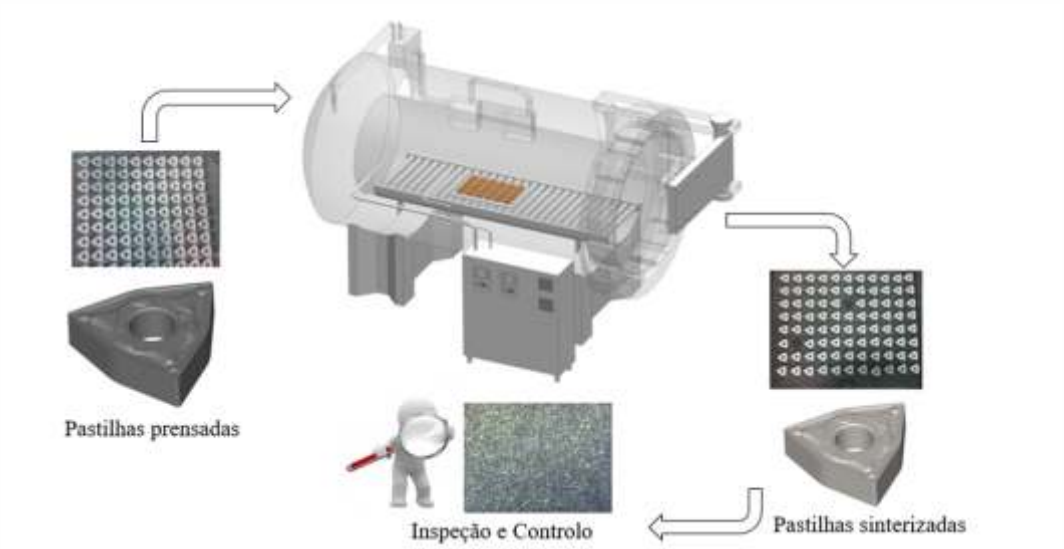



**FIGURA 2**
*Exemplificação das peças prensadas e sinterizadas.*

A força coerciva é a resistência que o material oferece a ser desmagnetizado, após ter atingido saturação magnética. O valor da resistência depende da mobilidade das paredes de Bloch, representadas pelas fronteiras das regiões magnetizadas na mesma direção (domínios de Weiss). A diminuição do tamanho de grão aumenta o número de domínios de Weiss provocando um aumento da força coerciva. Através dos valores de força coerciva é possível retirar várias ilações, nomeadamente sobre a distribuição do cobalto, i.e. quanto menor a sua quantidade entre a fase dispersa (caminho médio livre), ou quanto maior a quantidade tungsténio dissolvido no ligante maior o valor de força coerciva.

O equipamento utilizado para medir a força coerciva, segundo a norma ISO 3326 [2], é o Foerster Koerzimet 1.097 HCJ com unidades Oersted (Oe), enquanto que a balança magnética Foerster Koerzimet 1.097 MS, foi utilizada para medir os valores de BMS.

Os graus de metal duro podem ter composições binárias (WC+Co) ou ternárias (WC+Co+carbonetos mistos) com tolerâncias previamente definidas para os valores de força coerciva (HC) e balança magnética (BMS). Após o seu processamento inicial de moagem e atomização os graus são submetidos a uma rigorosa caraterização que inclui, para além da caraterização magnética, a caraterização microestrutural e mecânica para serem aprovados para produção (prensagem e sinterização). Após a etapa de sinterização o controlo de qualidade das peças é efetuado com recurso à obtenção das caraterísticas magnéticas (HC e BMS), uma vez que são ensai-os não destrutivos como referido anteriormente.

A Palbit possui 2 fornos de sinterização Sinter-HIP com gradientes de temperatura no seu interior, ou seja, existem zonas mais quentes e zonas com diferenças de temperatura entre 5 e 10ºC. Estas diferenças de temperatura podem influenciar os valores obtidos de caracterização magnética e resultar em rejeições desnecessárias. Para evitar estas situações o carregamento das peças é efetuado tendo em atenção a aprovação dos graus e o volume das peças e ainda o histórico dos valores obtidos anteriormente. Esta operação é efetuada manualmente indicando qual a posição mais adequada dos




**FIGURA 3**
*Diagrama do processo de sinterização.*




**FIGURA 4**
*Definição do dataset.*

tabuleiros de grafite com as diferentes ordens de fabrico, sendo normalmente morosa. Para facilitar esta operação implementou-se um algoritmo para carregamento do forno recorrendo a inteligência artificial que indique automaticamente qual a posição adequada dentro do forno de determinada ordem de fabrico.

Dependendo da composição e características da pastilha prensada, a zona do forno onde é sinterizada tem influência no controlo do BM (Balança Magnética) e HC (Coercividade) resultante - diagrama da Figura 3. Quando estes valores estão muito próximo dos limites de conformidade, a zona do forno tem um papel fulcral na sua correção.

Com o histórico de dados de caracterização de amostras dos últimos 3 anos construiu-se um algoritmo que auxilia o operador na decisão da seleção da zona de sinterização no forno, de modo a alcançar as caraterísticas de controlo de qualidade dentro das especificações. Recorrendo ao histórico de dados e baseado em algoritmos de regressão de Machine Learning (ML) [3], estabeleceu-se o primeiro objetivo de previsão do BM e HC após sinterização. Para a definição do dataset recorreu-se a três fontes de dados distintas onde as variáveis escolhidas são apresentadas na Figura 4. Destaca-se que o controlo de qualidade é realizado em várias peças pelo que as previsões são uma média das mesmas.

Com base nos resultados de comparação dos modelos, o modelo Random Forest foi o selecionado. O erro médio quadrático (Mean Square Error - MSE) obtido no dataset de teste é de 9.4e-5 com um coeficiente de determinação (R2 score) de 0.996, indicando uma boa representatividade do modelo previsto e o resultado esperado (Figura 5).

A realização deste trabalho permitiu evidenciar uma clara vantagem da utilização de Machine Learning com dados de produção de forma a torná-los úteis. Adicionalmente, permitiu definir linhas orientadoras para novos desenvolvimentos no auxílio do planeamento da alocação das pastilhas nos fornos de sinterização, contribuindo para a redução de desperdício - não conformidades. Essa abordagem permite oferecer outras conhecimentos e assim automatizar tarefas proporcionando uma vantagem competitiva.

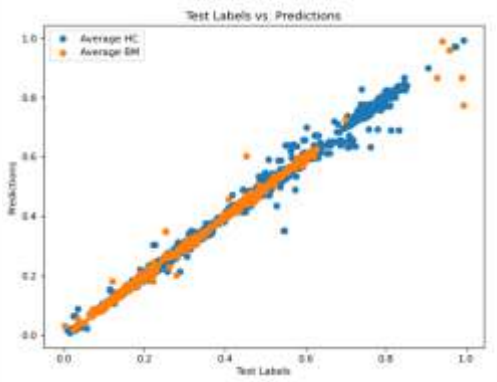



**FIGURA 5**
*Gráfico com a previsão do modelo Random Forest vs previsão esperada.*

## REFERÊNCIAS

[1] World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard Materials, Kenneth J.A. Brookes, Ed. 6, International Carbide Data, 1996.
[2] ISO 3326:2013 Hardmetals - Determination of (the magnetization) coercivity, Ed.2 2013.
[3] Machine Learning and Artificial Intelligence with Industrial Applications, Diego Carou, António Sartal, J. Paulo Davim, Management and Industrial Engineering, Springer, 2022.

Publicação enquadrada na Agenda Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis n.º C644864375-00000002, empresa líder, PALBIT, S.A., projeto n.º 64.

# HI.REV: ONDE A INOVAÇÃO E A COMPETITIVIDADE SE CRUZAM

**MIGUEL ARAÚJO**
*Diretor-Geral da MOBINOV - Cluster Automóvel e da Mobilidade*

A importância da indústria automóvel para a economia nacional é sobejamente reconhecida, e tem igual relevância no contexto europeu, onde se afirma como motor de exportações, inovação e investimento. Contudo, o cenário está a mudar de forma acelerada: a transição para a mobilidade elétrica e a disrupção das cadeias de valor e de abastecimento colocam desafios profundos, exigindo respostas rápidas e estratégias bem definidas.

A transformação em curso ultrapassa as fronteiras da própria indústria automóvel. Os fornecedores, sobretudo de componentes, precisam de adaptar os seus produtos aos requisitos dos veículos elétricos; a Europa necessita de construir cerca de 20 gigafábricas de baterias; e é urgente expandir de forma massiva a rede de postos de carregamento, assegurando também a respetiva manutenção.

Ao longo da sua história, o setor automóvel já enfrentou várias mudanças estruturais e soube adaptar-se. No entanto, a atual transição distingue-se de todas as anteriores: a velocidade e a escala da mudança não têm precedentes.

Manter e reforçar a competitividade neste contexto exige muito mais do que inovações pontuais ou ajustes logísticos. É fundamental um rumo claro, alinhado com a Bússola para a Competitividade da UE, definida pela Comissão Europeia, que assenta em três prioridades - inovação, descarbonização integrada na política industrial e segurança estratégica - e cinco medidas transversais, incluindo financiamento, qualificação e simplificação administrativa.

Portugal dispõe aqui de uma oportunidade única para se reindustrializar, apoiando-se na combinação de três elementos inseparáveis: competitividade, redes colaborativas e inovação.



Empresas inovadoras, mas isoladas, dificilmente escalam; redes sólidas sem produtos competitivos perdem tração; e sem ideias novas aplicadas em rede, nenhum das duas estratégias se sustenta.

Esta abordagem estruturada é a bússola para navegar num ambiente VUCA (Volatilidade, Incerteza, Complexidade e Ambiguidade), reforçando a resiliência e posicionando o setor automóvel nacional para capitalizar as oportunidades emergentes.

É neste enquadramento que surge a agenda mobilizadora Hi.Rev, integrada no Plano de Recuperação e Resiliência, com a missão de reposicionar o setor automóvel português num novo paradigma tecnológico e competitivo. O seu foco está no desenvolvimento de soluções avançadas em mobilidade inteligente, eletrificação, digitalização industrial e sustentabilidade ambiental, reforçando a capacidade nacional de inovação e aumentando o valor acrescentado ao longo da cadeia de valor.

A Hi.Rev não é apenas um conjunto de projetos. É uma visão estratégica, executada em rede, que aposta em produtos diferenciadores, tecnologia nacional e escala internacional. Com mais de 20 entidades, entre empresas, universidades e centros tecnológicos, já apresenta resultados concretos: em 2025, enquanto grande parte da indústria automóvel europeia encolhe, várias empresas do consórcio mantêm ou aumentam o volume de negócios, graças à capacidade de adaptação, ao desenvolvimento de novos produtos e à antecipação tecnológica. Os produtos criados no âmbito desta agenda perspetivam crescimentos de 12% a 30% nos próximos anos.

Este desempenho, em contraciclo com a tendência europeia, demonstra que investir em redes colaborativas, agendas mobilizadoras e inovação integrada gera resultados sólidos. A resiliência das empresas da Hi.Rev confirma que é possível criar e renovar cadeias de valor, garantindo a competitividade e o futuro do setor.

A indústria automóvel está a reinventar-se. Portugal tem todas as condições para liderar este movimento, mas para isso, é essencial manter o investimento em projetos como a Hi.Rev, com visão, escala, ambição e, sobretudo, execução eficaz.

A transformação já começou. Antecipar e criar a mudança é a fórmula de sucesso, construindo novas cadeias de valor e renovando as que já existem.

# A-MoVeR: TECNOLOGIA, CIÊNCIA E INDÚSTRIA A ACELERAR A MOBILIDADE DO FUTURO

**MIGUEL PINTO**
*Diretor Geral do AUMOVIO Advanced Antenna*
*Presidente da Mobinov - Cluster Automóvel e da Mobilidade*

A Agenda Mobilizadora A-MoVeR representa um passo firme e estratégico para o reforço da inovação nacional na área da mobilidade inteligente e sustentável. Integrada no Plano de Recuperação e Resiliência, esta iniciativa articula investigação científica de ponta com a aplicação industrial, envolvendo empresas e centros de conhecimento em torno de um objetivo comum: desenvolver produtos e sistemas que elevem a conetividade, a segurança e a eficiência no setor automóvel e da mobilidade elétrica.

O propósito central da A-MoVeR é claro: criar soluções tecnológicas avançadas que tornem possível uma mobilidade mais verde, conectada e autónoma. No caso da Continental Advanced Antenna (CAA), os objetivos passam pelo desenvolvimento de antenas inteligentes V2X (Vehicle-to-Everything), pela instalação de linhas de produção automatizadas para módulos de antena V2X e Wi-Fi, pela integração otimizada destas tecnologias em motociclos elétricos e, mais recentemente, pelo avanço no Intelligent Antenna Module (IAM), elemento que está a redefinir a próxima geração de comunicações veiculares.

O IAM assume-se como um marco de inovação. A sua ambição não é apenas construir mais uma antena, mas sim concentrar, num único módulo compacto, múltiplas funcionalidades de comunicação que atualmente se encontram dispersas em diferentes pontos dos veículos. Esta evolução tecnológica permitirá reduzir significativamente a cablagem, o espaço de instalação e os custos de integração, ao mesmo tempo que melhora a qualidade do sinal e centraliza a eletrónica de emissão e receção.

Do ponto de vista técnico-científico, o desenvolvimento do IAM abrange desde a conceção mecânica - incluindo housings inovadores em PBT GF30 e prototipagem 3D - até ao design avançado de PCB com requisitos rigorosos de radiofrequência (RF), aplicando práticas como via stitching e linhas de transmissão otimizadas. Os primeiros protótipos demonstraram múltiplos pontos de ressonância entre 0,5 e 8 GHz, adequados às bandas de operação de V2X e 5G, confirmando o potencial do conceito. Paralelamente, a integração em veículos (carros e motos) está a ser estudada ao nível de posicionamento, desempenho eletromagnético e impacto aerodinâmico.

Os resultados alcançados até agora confirmam a ambição da agenda: protótipos funcionais de antenas validados em câmara anecoica, duas linhas de produção de última geração instaladas, integração de antenas V2X em motociclos elétricos com suportes universais e posicionamento otimizado, bem como progressos consistentes no IAM, que já se destaca como peça-chave na mobilidade conectada do futuro.

O impacto da A-MoVeR vai muito além dos resultados técnicos. Trata-se de um investimento estruturante para a competitividade da indústria portuguesa da mobilidade, reforçando a capacidade de produção nacional com forte incorporação tecnológica e elevando o perfil de inovação do país em redes internacionais. No campo da mobilidade sustentável, estas soluções promovem maior segurança rodoviária, gestão de tráfego mais eficiente, redução de emissões e integração harmoniosa de veículos elétricos e conectados nas cidades.

Num momento em que a transição energética e digital redefine a indústria automóvel, a A MoVeR demonstra como a colaboração entre empresas, universidades e centros de I&D pode transformar conhecimento em valor económico e social. É uma prova de que Portugal pode não só acompanhar, mas liderar, na criação de tecnologias críticas para a mobilidade do futuro.






**DANIEL FIGUEIREDO**
*PALBIT, Administrador Executivo responsável I&D*

# FERRAMENTAS PARA O CARRO DO FUTURO: A IMPORTÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO E INTERAÇÃO DE NOVOS MATERIAIS NO SETOR AUTOMÓVEL

***A mobilidade elétrica traz novos desafios ao setor automóvel. Mais do que criar novos materiais - que também é necessário - a imprevisibilidade prende-se com o comportamento da interação entre materiais.***

***A mobilidade elétrica está a transformar o setor automóvel, trazendo consigo novos desafios. Do desenvolvimento de novos materiais, algo que continua a ser essencial, à complexidade que reside cada vez mais no comportamento da interação entre diferentes materiais. Neste âmbito surge o projeto HI-REV, uma agenda mobilizadora para o desenvolvimento, teste e demonstração de uma nova geração de tecnologias, processos e produtos que permitam um novo posicionamento do cluster automóvel nacional nas cadeias de valor globais do carro do futuro.***

**A Palbit lliderou o projeto HI-REV,** no qual teve um papel central no desenvolvimento soluções de corte avançadas, essenciais para a maquinação de componentes metálicos de nova geração. O foco principal esteve no desenvolvimento e produção de ferramentas revestidas de elevada performance, capazes de responder às exigências técnicas dos novos materiais utilizados no setor automóvel.

As ferramentas desenvolvidas para o setor automóvel enfrentam ambientes tribológicos extremamente exigentes, sujeitos a elevadas solicitações físicas e químicas. Nestes contextos, é essencial que sejam capazes de controlar eficazmente o desgaste e a afinidade entre materiais. Com o crescimento da mobilidade elétrica, estes desafios tornam-se ainda mais críticos. A evolução tecnológica tornou inevitável o surgimento de alterações significativas de materiais, sobretudo nos motores, considerados o "coração" do automóvel.

"Atualmente os motores elétricos ou híbridos não atingem temperaturas tão elevadas quanto os motores de combustão, permitindo o uso de materiais diferentes, com novas necessidades e novos desafios" afirma Daniel Figueiredo, membro do conselho executivo da Palbit, que lidera o departamento de investigação, inovação e desenvolvimento de produto. "Perante esta mudança contínua, sempre que os materiais de um componente são alterados, surgem novas dificuldades na maquinabilidade do mesmo e nos processos de fabrico", que implicam o desenvolvimento de novos substratos e geometrias nas ferramentas de corte.

Segundo o executivo, os desafios da eletrificação exigem inovação ao nível dos materiais e processos, e as ferramentas desenvolvidas no âmbito do projeto foram fundamentais para dotar as equipas de desenvolvimento do know-how necessário para responder aos desafios e necessidades emergentes do setor automóvel. "Os materiais têm um impacto assinalável, temos trabalhado em soluções que com alterações ao nível nanométrico podem representar ganhos de 20 a 30% em performance", explica.

No decorrer deste projeto, e em consonância com os desenvolvimentos realizados no âmbito da agenda, a Palbit reforçou o seu portfólio através da criação e integração de soluções de vanguarda, concebidas para dar uma resposta rápida e eficaz às exigências do setor automóvel, um segmento de elevada relevância estratégica para o negócio. A participação permitiu consolidar competências em investigação e desenvolvimento neste domínio, perspetivando-se que no futuro a Palbit continue a apostar na criação de novos materiais, mais eficientes e com potencial para aumentar a sua quota de mercado e credibilidade no setor.

A liderança no projeto HI-REV também permitiu à Palbit colaborar com empresas de referência e reforçar a sua credibilidade para assumir, no futuro, novas iniciativas colaborativas. Por sua vez, a parceria com universidades revelou-se



igualmente estratégica, ao aproximar o meio académico do setor industrial, promovendo a partilha de conhecimento entre novos talentos e profissionais com experiência. A valorização de perfis altamente qualificados é, aliás, um fator determinante para a competitividade e inovação tecnológica. O desenvolvimento de soluções de vanguarda depende, em grande medida, das equipas que lhes dão forma. É nelas que reside o verdadeiro motor da inovação e a capacidade de transformar conhecimento em progresso.

Com a conclusão do projeto, é tempo de olhar para o futuro. Para a Palbit, isso significa continuar a apostar na ciência e na engenharia de materiais como motores de inovação. "Queremos desenvolver produtos que respondam aos novos desafios, seja através do controlo rigoroso das matérias-primas, seja através da substituição estratégica de materiais." O reforço da equipa e a aposta em I&D estão no centro da estratégia da empresa.

**INOVAÇÃO CONTÍNUA: DA CIÊNCIA DOS MATERIAIS À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Num contexto em que os ciclos de desenvolvimento são cada vez mais curtos, a tecnologia assume um papel cada vez mais determinante na capacidade de resposta das empresas industriais. A inteligência artificial, por exemplo, tem vindo a destacar-se como uma ferramenta estratégica na aceleração da tomada de decisão e na antecipação de cenários.

"Ferramentas como digital twins ou simulações ajudam-nos a tomar decisões mais rápidas e informadas. Nem sempre são exatas, mas apontam tendências", refere Daniel Figueiredo. "Na fase de validação, em vez de fazermos dez protótipos, podemos concentrar-nos em dois ou três, porque já temos uma previsão do comportamento.»

Neste domínio, a Palbit tem vindo a explorar novas possibilidades através da participação em agendas colaborativas de base tecnológica, como é o caso do projeto SNexT. Um projeto no qual está a ser desenvolvido um sistema inteligente baseado em sensores e modelos preditivos, recorrendo à análise de parâmetros como vibrações e corrente elétrica durante o processo de maquinação. O objetivo passa por aplicar este conhecimento à monitorização em tempo real, permitindo o controlo e a otimização dos processos produtivos, bem como a mitigação de falhas em ferramentas de corte. Estas falhas, quando não identificadas atempadamente, podem comprometer a qualidade da peça, aumentar o tempo de ciclo e impactar diretamente a produtividade.

A capacidade de antecipar e corrigir desvios é, por isso, um fator que acrescenta valor a empresas que operam em setores exigentes.

Ainda no projeto HI-REV, estão propostos novos PPS's enquadrados nesta temática e que irão desenvolver produtos na área digital e da inteligência artificial.

# CONFERÊNCIA HI-REV - SHAPING THE FUTURE OF AUTOMOTIVE COMPONENTS

***A Conferência Hi-rEV 2024 - Shaping the Future of Automotive Components realizou-se no dia 5 de dezembro de 2024, no Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões. Este evento reuniu especialistas da indústria e da academia para debater os desafios e oportunidades emergentes no setor dos componentes automóveis, com especial enfoque na inovação, sustentabilidade e digitalização.***



























Com a participação de cerca de **175 inscritos**, a conferência contou com **28 oradores**, distribuídos por oito **sessões temáticas**, que incluíram **keynotes**, **uma mesa-redonda, apresentações técnico-científicas e demonstrações digitais.** Além disso, estiveram expostos **20 posters científicos** e participaram **oito expositores**, destacando as mais recentes inovações tecnológicas do setor.

A sessão de abertura contou com a presença de representantes institucionais e empresariais, que sublinharam a importância da investigação e desenvolvimento para a competitividade da indústria automóvel nacional. Ao longo do dia, foram abordadas questões como novos materiais para componentes automóveis, processos de fabrico avançados, eletrificação e mobilidade sustentável.

Um dos pontos altos do evento foi a **apresentação dos demonstradores digitais**, que permitiram visualizar aplicações práticas das soluções desenvolvidas no âmbito do projeto Hi-rEV. Estas demonstrações incluíram desde componentes inovadores a modelos digitais para otimização de processos produtivos e análise de desempenho.

A conferência promoveu ainda um espaço de interação entre a academia e a indústria, com o objetivo de impulsionar colaborações estratégi-



Com a participação de cerca de **175 inscritos**, a conferência contou com **28 oradores**, distribuídos por oito **sessões temáticas**, que incluíram **keynotes**, **uma mesa-redonda, apresentações técnico-científicas e demonstrações digitais.** Além disso, estiveram expostos **20 posters científicos** e participaram **oito expositores**, destacando as mais recentes inovações tecnológicas do setor.

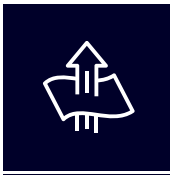
A sessão de abertura contou com a presença de representantes institucionais e empresariais, que sublinharam a importância da investigação e desenvolvimento para a competitividade da indústria automóvel nacional. Ao longo do dia, foram abordadas questões como novos materiais para componentes automóveis, processos de fabrico avançados, eletrificação e mobilidade sustentável.

Um dos pontos altos do evento foi a **apresentação dos demonstradores digitais**, que permitiram visualizar aplicações práticas das soluções desenvolvidas no âmbito do projeto Hi-rEV. Estas demonstrações incluíram desde compo-nentes inovadores a modelos digitais para otimização de processos produtivos e análise de desempenho.

A conferência promoveu ainda um espaço de interação entre a academia e a indústria, com o objetivo de impulsionar colaborações estratégi-

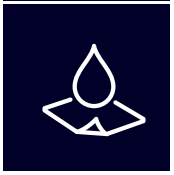
# DIVISÕES TÉCNICAS

*Representam importantes Áreas do conhecimento e desenvolvimento em Ciência e Tecnologia de Materiais, proporcionando aos membros ações no seio das várias comunidades profissionais específicas, reuniões técnico-científicas e recursos, oportunidades de educação, de participação e formação de redes e plataformas e divulgação nas respetivas áreas do conhecimento.*



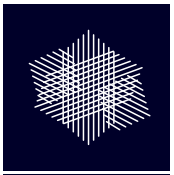
## CORROSÃO E PROTEÇÃO DE MATERIAIS,

*coordenada por **Teresa Diamantino** (LNEG) **Isabel Tissot** (Universidade Nova de Lisboa), contempla conhecimento e a atividade no domínio da Corrosão e Proteção de Materiais.*



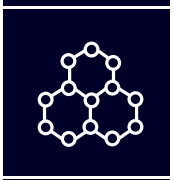
## ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES,

*coordenada por **Fábio Ferreira** (FCTUC) **Cláudia Lopes** (TEMA, Universidade de Aveiro), agrega: Eletroquímica de Materiais, Tratamentos Térmicos e Engenharia de Superfícies, Tribologia e áreas afins Materiais.*



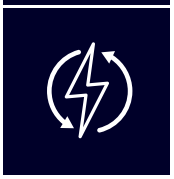
## MATERIAIS ESTRUTURAIS,

*coordenada por **Ana Reis** (FEUP), **Rui L. Amaral** (INEGI/FEUP), **Tiago Silva** (INEGI/FEUP), tem como principal missão o estudo, desenvolvimento e aplicação de materiais utilizados em estruturas que exigem elevada resistência mecânica, durabilidade e desempenho em condições extremas. Estes materiais são fundamentais para setores como a construção civil, indústria automóvel, aeroespacial, naval e energética.*



## MATERIAIS FUNCIONAIS,

*coordenada por **Diana Gaspar** (CENIMAT-UNL) **Vítor Sencadas** (DEMaC-UA), abrange áreas de Nanotecnologias e Biomateriais, Materiais para a Eletrónica, Optoeletrónica e Dispositivos Médicos.*



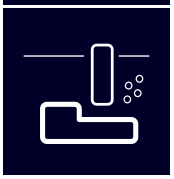
## MATERIAIS PARA A ENERGIA,

*coordenada por **Filipe Neves** (LNEG) **Jennifer Teixeira** (INL), agrega: Materiais a serem usados em aplicações energéticas de conversão, armazenamento e para o aumento de eficiência energética de vários processos.*



## POLÍMEROS E COMPÓSITOS,

*coordenada por **Jorge Coelho** (FCTUC), **A. Torres Marques** (FEUP), **J. C. Bordado** (IST e UTIS), A. Correia Diogo (IST), agrega: termoplásticos, elastómeros, termoendurecíveis, polímeros funcionais e respectivos sistemas compósitos.*



## TECNOLOGIA E PROCESSAMENTO DE MATERIAIS,

*coordenada por **Abílio de Jesus** (FEUP), **Hélder Puga** (UM) e **Pedro Rosa** (IST) tem como principal objetivo contribuir para a dinamização da investigação e disseminação em tecnologias de produção de componentes mecânicos num enquadramento de constante evolução dos materiais e consideração pela sustentabilidade ambiental e social.*



## J-SPM,

*coordenada por I**nês Prata, Bernardo Ribeiro, João Miranda** e **Fábio Brandão** integra os sócios da SPM com menos de 35 anos e tem como principal objetivo representar os pontos de vista, as necessidades e expectativas dos sócios jovens.*



## COMUNICAÇÃO E DIVULGAÇÃO,

*Coordenada por **Paula Vilarinho** (U Aveiro), conta com a colaboração de **Manuela Oliveira** e **Joana Sousa** foi criada em julho de 2019, pretende ser o veículo da SPM por excelência, através do qual se dará mais voz à área de Materiais.*



## MATERIAIS E PATRIMÓNIO CULTURAL,

*Coordenada por **João Pedro Veiga** e **Márcia Vilarigues** foi criada na Assembleia Geral da SPM de dezembro de 2022, tendo como objetivo ser um fórum dinâmico na promoção e divulgação do conhecimento aa área dos materiais do património cultural. Através da dinamização de ações para o público em geral e especializado, assim como para empresas que operam no sector e instituições de Ensino que oferecem formação na área, seja através de palestras, workshops, conferências, exposições ou notícias, pretende-se incentivar novos estudos e uma melhor compreensão do papel desempenhado pelos materiais no património cultural.*

# PERITOS

***A SPM disponibiliza no seu site uma lista de peritos que pode consultar se necessitar de apoio, colaboração ou serviço.***

## JUNTE-SE A ESTA LISTA!

- Abílio de Jesus
- Abílio Manuel Pereira da Silva
- Adriana Cavaco
- Aida Beatriz Vieira Moreira
- Albano Cavaleiro
- Alice Tavares
- André Ferreira Costa Vieira
- Andrei Kholkin
- Andreia Ruivo
- Andreia F. Sousa
- Ana Cabral
- Ana Rosanete Lourenço Reis
- Ana Sofia Figueira Ramos
- António José Vilela Pontes
- António Paulo Cerqueira Duarte
- António Torres Marques
- Artur Jorge dos Santos Mateus
- Bruno Araújo de Almeida
- Carlos Manuel da Fonseca Dias
- Carlos Miguel Marto
- Celeste Pereira
- Clara Rodrigues Pereira
- Cláudia Lopes
- Cláudia Ranito
- Edmundo Manuel Tavares Marques
- Fernando de Almeida Costa Oliveira
- Frederico Calheiros Maia
- Georgina Miranda
- Guilherme Nuno Carvalho
- Hugo Águas
- Inês Rondão
- João Alexandre Costa Gomes da Peixinha
- João Carlos Velosa Pereira
- João C.C. Abrantes
- João Pedro Nunes Pereira
- João Pedro Oliveira
- João Salvador Fernandes
- Joana Filipa dos Santos Teixeira
- Jingzhong Xiao
- José Cruz Oliveira
- José David Castro Castro
- José Luís de Sousa Amorim do Vale Quaresma
- José Manuel Antelo
- Jorge Fernando Jordão Coelho
- Jorge Lino Alves
- José Manuel Monteiro da Costa
- José Ramiro Afonso Fernandes
- Luís Gil
- Luís Manuel Lopes de Carvalho
- Maria de Fátima Reis Vaz
- Maria do Carmo Henriques Lança
- Mariana Sofia Peixoto Fernandes
- Manuel João Mendes
- Martinho Oliveira
- Nuno Ferreira
- Paulo Mourão
- Pedro A.R. Rosa
- Pedro Barquinha
- Pedro Salomé
- Penka Girginova
- Regina Santos
- Rosa Marat Mendes
- Sónia Simões
- Susana França de Sá
- Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado
- Teresa Monteiro
- Vanessa Cardoso
- Virgínia Infante
- Vitor Sencadas
- Zohra Benzarti

*Para mais informações consulte o nosso site:*
**http://www.spmateriais.pt/socios/bolsa-de-peritos**

# SÓCIOS COLETIVOS

- AIMMAP
- ALMASCIENCE COLAB
- AMORIM CORK COMPOSITES
- C5LAB - SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS ASSOCIATION
- CATIM
- CELOPLÁS - PLÁSTICOS P/A INDÚSTRIA, S.A.
- CEMMPRE - UNIVERSIDADE DE COIMBRA
- CENIMAT - UNL NOVA.ID.FCT
  ASSOCIACAO PARA A INOVACAO
- CENTI - CENTRE FOR NANOTECHNOLOGY AND SMART MATERIALS
- CHEMITEK - QUIMICA AVANÇADA, S.A
- CIN - CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, S.A.
- CIRES
- CODEPLAS - ENGª DE PEÇAS PLÁSTICAS, S.A.
- COFICAB PORTUGAL
- CTCV
- DIAS DE SOUSA - INSTRUMENTAÇÃO ANALÍTICA E CIENTÍFICA S.A.

# SÓCIOS COLETIVOS

| | |
|---|---|
| | DIRECÇÃO DE NAVIOS |
| DURIT | DURIT |
| eurogalva | EUROGALVA |
| U.PORTO FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO | FEUP |
| Filsat | FILSAT EQUIPAMENTOS MÉDICO-CIENTÍFICOS, LDA |
| gravimeta Equipamentos para Laboratório | GRAVIMETA-EQUIPAMENTOS PARA LABORATORIO,LDA |
| ictpol | ICTPOL |
| I.L.C. | ILC - INSTRUMENTOS LABORATÓRIO E CIENTÍFICOS, LDA |
| IMMAS | IMMAS<br>INSTITUTO DE MATERIAIS, MANUTENÇÃO, AMBIENTE E SEGURANÇA |
| inegi driving science & innovation | INEGI |
| INL | INL |
| ISEP INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO |
| IPN | IPN |
| Leica | LEICA - APARELHOS ÓPTICOS DE PRECISÃO, S.A. |
| LISNAVE ESTALEIROS NAVAIS, S.A. | LISNAVE ESTALEIROS NAVAIS SA |
| MASILVA WE ARE CORK | M A SILVA CORTIÇAS LDA |

# SÓCIOS COLETIVOS

- M.T.BRANDÃO
- MEDBONE
- PALBIT,SA
- PARALAB, SA
- PIEP ASSOCIAÇÃO
  PÓLO DE INOVAÇÃO EM ENGENHARIA DE POLÍMEROS
- PLASTIFA - PLÁSTICOS TÉCNICOS, LDA
- RELACRE
- REPSOL POLÍMEROS, UNIPESSOAL, LDA
- SMALLMATEK
- SRAMPORT
- UBI
- ULTRAPRECISÃO LDA
- UNIVERSIDADE DE AVEIRO/CICECO
- VISTA ALEGRE ATLANTIS SA



# SER SÓCIO COLETIVO DA SPM.

## VANTAGENS

***Participação*** *com custos reduzidos nas iniciativas da SPM,tais como Cursos técnico-científicos, Conferências, Palestras, Seminários e eventos juntamente organizados com a Ordem dos Engenheiros e Sociedades afins (nacionais e internacionais);*

***Divulgação*** *de atividades, resultados e outras comunicações, tanto na Revista Ciência & Tecnologia dos Materiais, bem como na Newsletter e em eventos realizados pela SPM;*

***Identificação*** *e acesso direto a peritos qualificados para consultoria, estudos, projetos de investigação nas áreas das divisões técnicas nomeadamente: Corrosão e Proteçãode Materiais; Engenharia de Superfícies; Materiais para aEnergia; Materiais Estruturais; Materiais Funcionais; Materiais e Património Cultural; Polímeros e Compósitos; Tecnologia e Processamento de Materiais; entre outras*

***Promoção*** *de formações técnico-científicas em áreas específicas;*

***Dinamização*** *de iniciativas de interesse conjunto em consórcio;*

***Acesso*** *a informação sobre os finalistas ou recém--licenciados na área de Ciência e Engenharia de Materiais e áreas afins;*

***Integração*** *nas diferentes divisões técnicas da Sociedade Portuguesa de Materiais.*

***Desconto*** *de 20% nos valores da publicidade na Revista Ciência & Tecnologia dos Materiais com condições negociáveis.*

*Os novos sócios podem considerar o Estatuto do Mecenato, onde se define o regime dos incentivos fiscais no âmbito do mecenato social, ambiental, cultural, científico ou tecnológico e desportivo, para usufruírem de vantagens acrescidas pela sua ligação à SPM.*

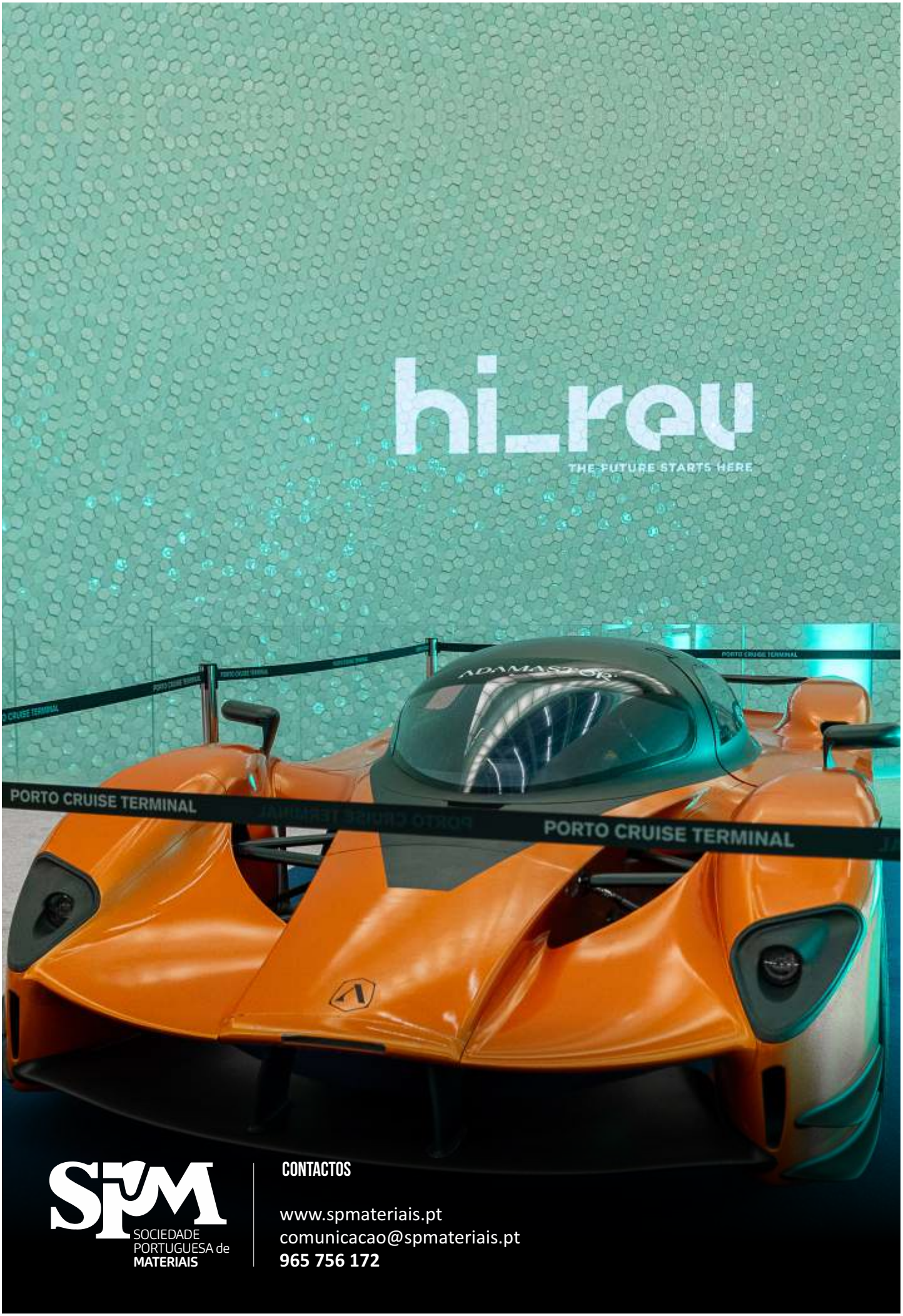
SPM
SOCIEDADE PORTUGUESA de MATERIAIS


**CONTACTO**

**Manuela Oliveira**
**Tel: 96 5756172**

SPM - Apartado 4538
EC Carnide
1511-970 Lisboa

**spm@spmateriais.pt**
**www.spmateriais.pt**




SPM
SOCIEDADE PORTUGUESA de MATERIAIS

**CONTACTOS**

www.spmateriais.pt
comunicacao@spmateriais.pt
**965 756 172**