

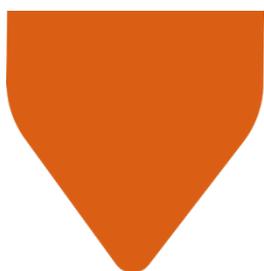
Interreg



Sudoe

ADDITool

European Regional Development Fund



D.2.2.1. RELATÓRIO SOBRE
RESULTADOS DE FABRICO ADITIVO
METÁLICO

DATA: 24/01/2023

Índice

INTRODUÇÃO.....	3
OBJETIVOS.....	3
DESCRIÇÃO.....	3
RESULTADOS.....	4
Piloto FR1-LAUAK.....	4
Piloto PT1-MOLDETIPO.....	30
Piloto SP1-MEUPE/INESPASA.....	34
Piloto FR2-SOMOCAP.....	45
Piloto PT2-VIDRIMOLDE.....	63

INTRODUÇÃO

O Pacote de Trabalho 2 (WP2) do projeto ADDITool, intitulado «Transferência de tecnologia do MAM para o sector de ferramentas» propôs-se desenvolver e fabricar cinco pilotos para transferir as tecnologias AM para PME do sector de ferramentas no SUDOE. Na Atividade 2.2: Fabrico, pós-processamento e caracterização dos demonstradores, todos os parceiros trabalharam em conjunto para desenvolver os cinco pilotos.

Neste relatório são explicados todos os resultados, conclusões e recomendações obtidas nos cinco projetos-piloto.

OBJETIVO

O principal objetivo deste documento é compilar os resultados obtidos nesta fase de investigação industrial do projeto ADDITool, seguindo as informações detalhadas em D.1.3.1. Conjunto de estudos de caso sobre cada projeto-piloto.

DESCRIÇÃO

Durante esta tarefa, foram desenvolvidos cinco pilotos de acordo com os Termos de Referência definidos na Atividade 1.3. Cada piloto foi liderado por diferentes centros tecnológicos e utiliza diferentes tecnologias e materiais, a fim de cobrir diferentes interesses da indústria. Foi realizada uma correspondência entre centros e tecnologias para desenvolver pilotos interessantes para a transferência de tecnologia AM. Os resultados são resumidos nas seguintes fases: fabrico, pós-processamento e caracterização.

Na Tabela 1, as tecnologias seleccionadas, participantes, e líder de cada piloto são detalhadas.

Tabela 1: Piloto, caso de utilização propondo empresa, líder e participantes de cada piloto.

Participantes	FR1 LAUAK	PT1 MOLDETIPO	SP1 MEUPE/ INESPASA	FR2 SOMO- CAP	PT2 VIDRI- MOLDE
ESTIA	Líder				
CEIT					
LORTEK				Líder	
UPV/EHU					
CATEC			Líder		
IPLEIRA		Líder			Líder
CEFAMOL					
ENIT					

RESULTADOS

Piloto FR1-LAUAK

DED LASER-fio

Antes de fabricar a peça, era importante desenvolver todo o conjunto de parâmetros para fabricar o 15CDV6 com tecnologia DED LASER-fio considerando, pelo menos:

- Potência do laser
- Velocidade do fio
- Velocidade de viagem

Mas também:

- Densidade mássica de Energia (DME)
- Densidade superficial de Energia(DSE)
- Energia por unidade de comprimento (DLE)

SUIVI D'ESSAI - PRECITEC										
Date	04/05/22		Opérateur(s)		VP	PS	FD			
Heure	11:40									
Machine	COMAU		Matériau		15CDV6					
Numéro fiche	220X		Densité (g/cm3)		8.12					
Numéro d'affaire/projet	ADDITool		Diamètre fil (mm)		1.2					
Numéro substrat	/		Dimension substrat (mm)		150x150x5					
Référence matière	/		Dimension pièce (mm)		/					
Préparation du substrat	Sablage		Inertage (PPM O2)		Début essais		/			
Objectif	Recherche de paramètres procédé pour le 15CDV6		Distance focale (course/substrat)		Fin essais		/			
Opération de vérification	Centrage laser/fil		Oui	Répartition de puissance	Oui	Redresseur	Non			
ADDIMADOUR ADDITIVE MANUFACTURING SOLUTIONS										
Observations et commentaires										Validation (OK, NOK)
Référence	Type (cordon, mur, bloc, pièce)	Puissance laser W	Vitesse robot mm/min	Vitesse fil m/s	Vitesse fil m/min	kg/h	Delta_z mm	Delta_xy mm	Temporisation s	
ADDITool_C1	Cordon de 50mm	3000	1500	0.025	1.50	0.83	/	/	/	pression argon : 0.3 bar et distance retract : 3mm
ADDITool_C2	Cordon de 50mm	3000	1500	0.025	2	1.10	/	/	/	pression argon : 0.3 bar et distance retract : 4mm DEFAUT : pas de retract et fil sorti du redresseur santé CORDON : largeur variable
ADDITool_C3	Cordon de 50mm	3000	1500	0.025	2.00	1.10	/	/	/	pression argon : 0.3 bar et distance 4mm Rajout d'une tempo 0.2s entre wireStop et laserStop
ADDITool_C4	Cordon de 50mm	3000	1250	0.021	2.00	1.10	/	/	/	pression argon : 0.3 bar + distance 4 mm + tempo 0.2s DEFAUT : variation largeur cordon
ADDITool_C5	Cordon de 50mm	3000	1250	0.021	2.50	1.38	/	/	/	pression argon : 0.3 bar + distance 4 mm + tempo 0.2s DEFAUT : boule. Fil trop bas au départ.
ADDITool_C6	Cordon de 50mm	3000	1250	0.021	2.50	1.38	/	/	/	pression argon : 0.3 bar + distance 4 mm + tempo 0.2s DEFAUT : trop d'apport de fil
ADDITool_C7	Cordon de 50mm	3500	1250	0.021	2.50	1.38	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm + C4 avec augmentation puissance laser +16,6% légère boule sur la fin et légères irrégularités dans le cordon
ADDITool_C8	Cordon de 50mm	3750	1250	0.021	2.50	1.38	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm + C4 avec augmentation puissance laser +25%
ADDITool_C9	Cordon de 50mm	4000	1250	0.021	2.50	1.38	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm + C4 avec augmentation puissance laser +33,3%
ADDITool_C10	Cordon de 50mm	4000	1500	0.025	2.50	1.38	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm + retour à vitesse robot 1500 mm/s
ADDITool_C11	Cordon de 50mm	5000	1500	0.025	2.50	1.38	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm + retour à vitesse robot 1500 mm/s + 1000W de puissance en +
ADDITool_C12	Cordon de 50mm	5500	1500	0.025	2.50	1.38	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm + retour à vitesse robot 1500 mm/s + 1500W de puissance en +
ADDITool_C13	Cordon de 50mm	5500	1500	0.025	4.00	2.20	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm DEFAUT : apport de fil trop important, pliage du fil en amont des galets redresseurs
ADDITool_MF1	Mur fin	3000	1500	0.025	2.00	1.10	0.50	/	/	parametrie C3 DEFAUT : fil bloqué dans le dévidoir
ADDITool_MF2	Mur fin	3000	1500	0.025	2.00	1.10	0.50	/	/	parametrie C3 mur très insatisfaisant sans raison valable
ADDITool_C14	Cordon de 50mm	3000	1500	0.025	2.00	1.10	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm parametrie C3 pas de tir. Laser non prêt
ADDITool_C15	Cordon de 50mm	3000	1500	0.025	2.00	1.10	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm parametrie C3 pas de tir. Laser non prêt
ADDITool_C16	Cordon de 50mm	3000	1500	0.025	2.00	1.10	/	/	/	argon : 0.3 + dist 4mm parametrie C3 parfait
ADDITool_MF3	Mur fin	3000	1500	0.025	2.00	1.10	0.50	/	/	parametrie C3 DEFAUT : boule sur fil à mi-cordon à la 3eme couche
ADDITool_MF4	Mur fin	3000	1500	0.025	2.00	1.10	0.50	/	/	parametrie C3 DEFAUT : boule sur fil à la 2eme couche
ADDITool_MF5	Mur fin	2500	1500	0.025	2.00	1.10	0.50	/	/	diminution de la puissance laser DEFAUT : goutte fil a cause du redresseur
ADDITool_MF6	Mur fin	2750	1500	0.025	2.00	1.10	0.50	/	/	augmentation puissance laser DEFAUT : goutte

Figura 1 : Pesquisa de parâmetros

Este primeiro passo permitirá encontrar o melhor cordão de soldadura para fabricar no final a peça, e 4 paredes para caracterização com as seguintes dimensões

- 115 x 15 x 95mm
- 80 x 20 x 100mm
- 100 x 20 x 90mm
- 85 x 25 x 50mm

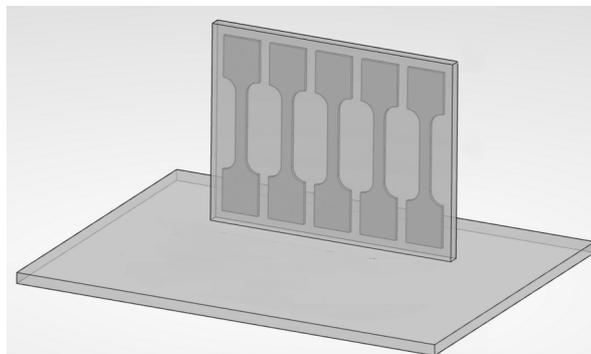


Figura 2 : Parede para caracterização

A caracterização dar-nos-á os dados de acordo com:

- Gradiente da micro-estrutura de cima para baixo
- Dureza
- Comportamento à tração na orientação vertical
- Comportamento à tração na orientação horizontal
- Etc.

Todos os resultados dos ensaios de micro-estrutura e mecânicos estão disponíveis no relatório D.2.1.1: Relatório sobre o material para o MAM.

Em termos de pesquisa de parâmetros, o material 15CDV6 pode ter muitos problemas com a oxidação e gerar muitos salpicos mesmo com deposição a LASER. Foi feita uma modificação da cabeça PRECITEC para conseguir blindagem local para proteger o cordão de soldadura.

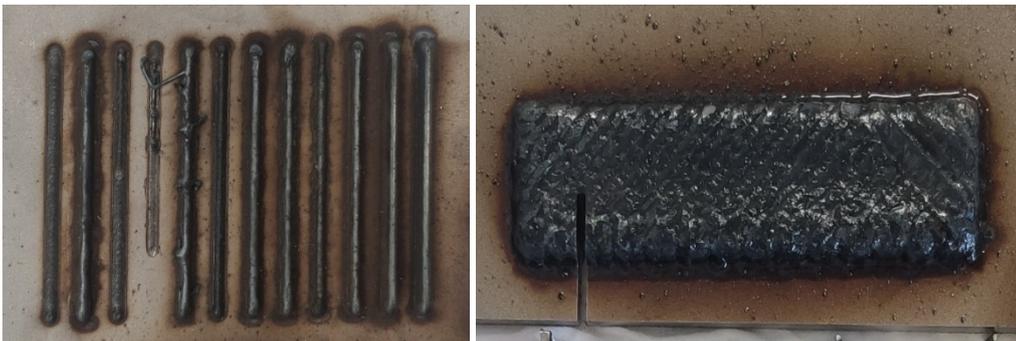


Figura 3 : Exemplo de oxidação

O efeito da blindagem (local e global) tem um efeito consequente sobre a deposição e sobre os parâmetros. Quanto melhor for a blindagem, mais o material reflete o laser, e a potência deve ser aumentada.

No entanto, com um poder laser demasiado elevado, a sublimação pode acontecer criando fumo que pode contaminar a cabeça de deposição. No entanto, é importante encontrar os limites do processo e encontrar a melhor "janela de disparo".

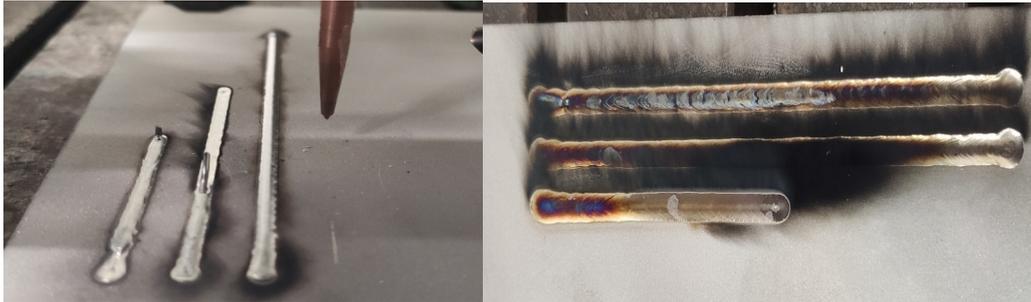


Figura 4 : Sublimação do material

Em termos de deposição, a estratégia também influencia o aspeto geométrico, bem como a micro-estrutura.

Para esta deposição, para evitar ter porosidades ou defeitos superficiais, foram desenvolvidas algumas estratégias:

- 0° ida e volta longitudinalmente
- +45°/-45° com contorno
- +45°/-45° sem contorno
- -135°/+120°/-45°/+60°/45°/-60°/135°/-120° sem contorno para evitar defeitos de superfície



Figura 5 : Influência da estratégia de deposição

O contorno pode ser um problema para obter uma superfície homogénea no topo e respeitar a altura do arco em toda a parte. Uma grande diferença entre o contorno e o preenchimento cria uma perda da altura do arco e o processo pára.

Uma vez definidos todos os parâmetros, foi feito um pequeno redesenho para criar uma forma próxima da final (NNS) e incluir a peça final no interior.



Figura 6 : Exemplo sem contorno

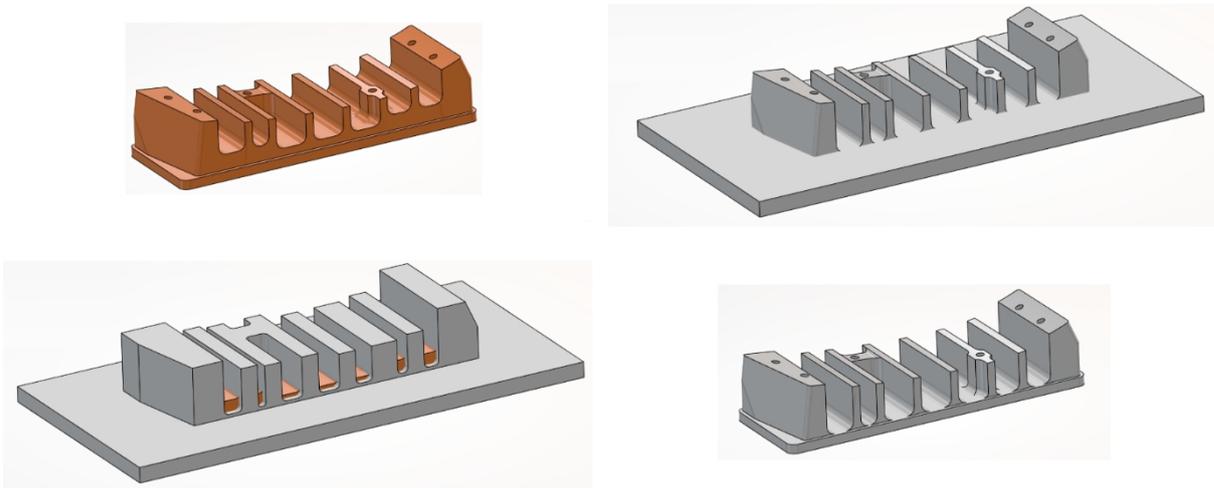


Figura 7 : Forma próxima da final (NNS).

O fabrico desta peça foi feito com:

- Robô COMAU NJ165
- PRECITEC CoaxPrinter
- Fio SelectArc 15CDV6 – Diâmetro 1.2mm



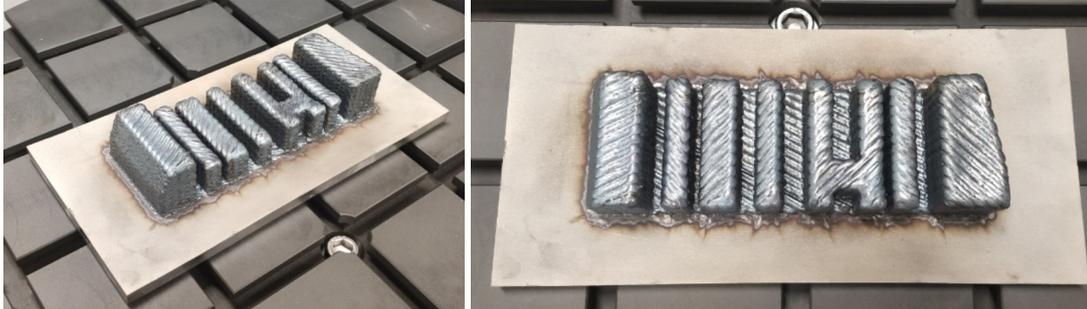


Figura 8 : Fabrico da forma próxima da final com DEDLASER – fio.

Uma vez terminado o fabrico, foi realizado um Scan 3D para ver os diferentes desvios entre o CAD e a realidade. O 3D Scan foi feito antes e depois do Tratamento Térmico.

O tratamento térmico (TT) realizado foi um alívio de tensões durante 8h a 400 °C.

- Desvio máximo entre o CAD e o NNS: 1,8mm
- Desvio máximo entre NNS antes e depois de TT: 0,204mm

O desvio antes e depois da TT, mesmo que seja pequeno (0,2 mm) prova que ocorreu de facto um relaxamento das tensões na peça e que a maquinagem será efetuada sem risco de fissuras.

Finalmente, a peça em acabamento, a última fase foi o controlo e os testes funcionais desta ferramenta.

Alguns pontos permanecem fora das tolerâncias iniciais devido ao não cumprimento das dimensões (maquinagem fornecida pela subcontratação) mas largamente aceites pela empresa LAUAK, sendo a definição das tolerâncias voluntariamente muito apertada.

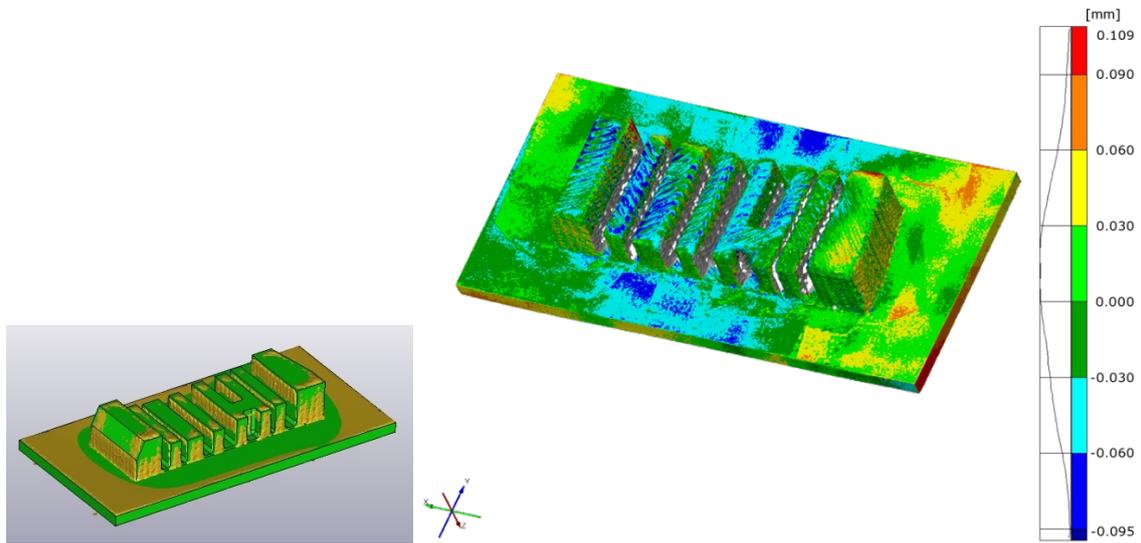


Figura 9 : Scan 3D

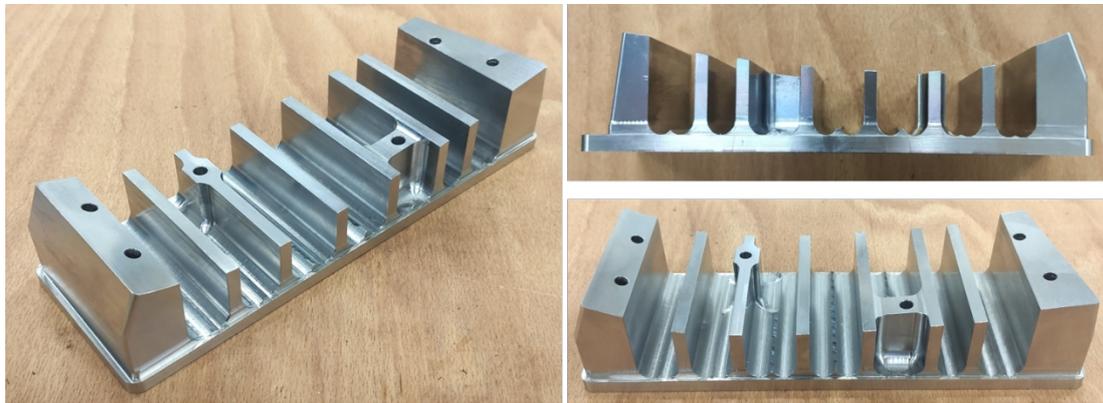


Figura 10 : Maquinação da peça DED LASER - fio.

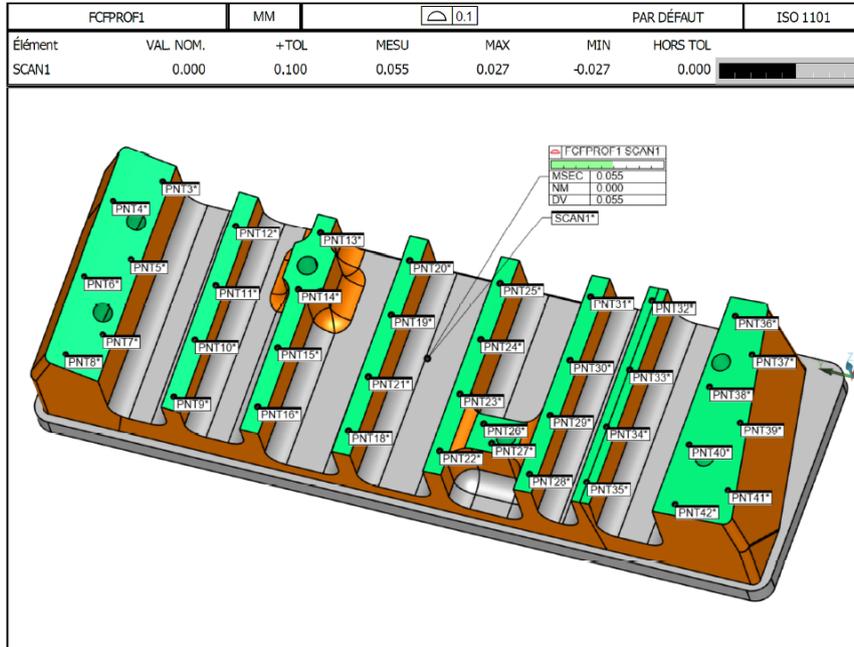


Figura 11 : Controlo e testes pela LAUAK

A peça é agora funcional e utilizada pela empresa LAUAK.

DED Arco - fio

O processo de fabrico foi feito por:

- Braço Fanuc Robotic
- Equipamento de soldadura CMT Fronius
- Fio SelectArc 15CDV6 - Diâmetro 1,2mm

O seguinte método foi aplicado para desenvolver as estratégias para o fabrico da peça por DED Arco - fio:

- Otimização dos parâmetros com material 15CDV6. A solidez e geometria dos cordões de soldadura foi verificada.



Figura 1. Cordões de solda unitários e secção transversal

Os parâmetros selecionados para o fabrico das paredes são mostrados na Tabela seguinte:

Tabela 2. Parâmetros selecionados para o fabrico das paredes

Velocidade de deposição (cm/min)	Velocidade de deposição (m/min)	Corrente (A)	Tensão (V)
40	6,2	200	15,5

Foram utilizados dois movimentos diferentes de robôs para selecionar aquele que obtém a espessura necessária (>6 mm): dois cordões de soldadura sobrepostos e circulações. A maquinação da superfície foi feita para ver como se retirava o menor material possível, obtendo-se a espessura de parede necessária.

- Após a caracterização da micro-estrutura e das propriedades mecânicas, foi selecionada a estratégia de circulação, uma vez que se conseguiu uma micro-estrutura homogénea em toda a parede.

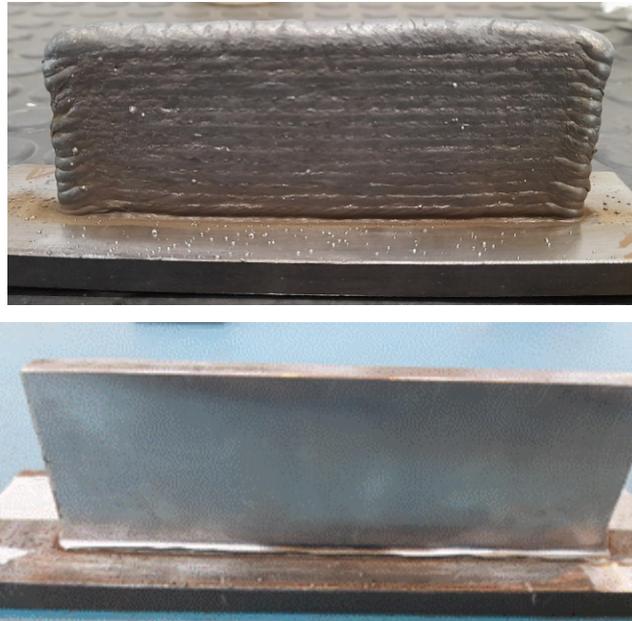


Figura 2. Paredes NNS fabricadas antes e depois da maquinação das superfícies

Foi feita uma grande parede para analisar as propriedades mecânicas em duas orientações.



Figura 3. Parede fabricada

- Redesenho da peça com sobre espessuras (1 mm em cada lado das paredes) considerando o material que tem de ser removido por maquinação.

O principal objetivo seguido foi o de reduzir ao máximo o material depositado, daí que as paredes foram descidas para o substrato e foram acrescentadas duas longarinas para evitar distorções em cada borda da peça.

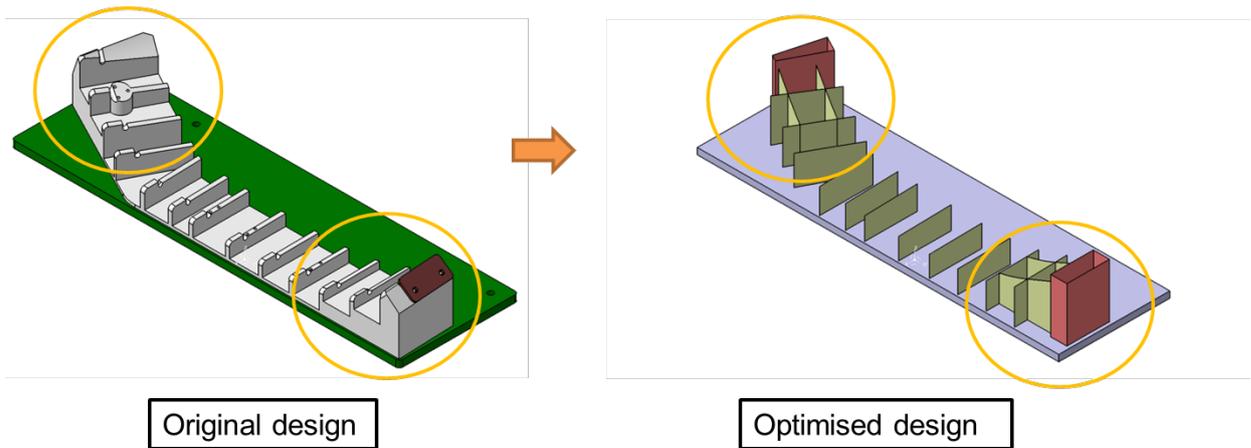


Figura 4. Desenho original e redesenho otimizado para WAAM

Os detalhes foram fabricados para otimizar a intersecção entre as paredes.



Figura 5. Produção detalhada para a otimização da estratégia

- Programação do percurso do robô com oscilações para reduzir as distorções. A sequência de fabrico é planeada para homogeneizar o calor na peça.

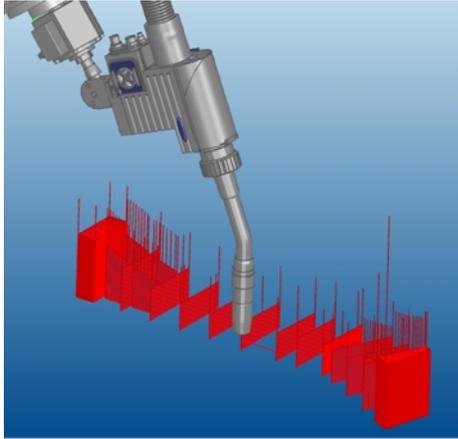


Figura 6. Simulação do planeamento do trajeto do robô para o fabrico da peça

- Realização de simulações térmicas e de distorção para definir o tempo de permanência entre camadas e o planeamento do percurso do robô que optimizou a estratégia de fabrico para reduzir as distorções durante a fase de fabrico.

O tempo de pausa entre camadas selecionado foi variável ao longo do crescimento da peça a fim de evitar a acumulação de calor. À medida que subimos em altura, o tempo de pausa teve de ser aumentado para assegurar uma temperatura limite da peça inferior a 150 °C.

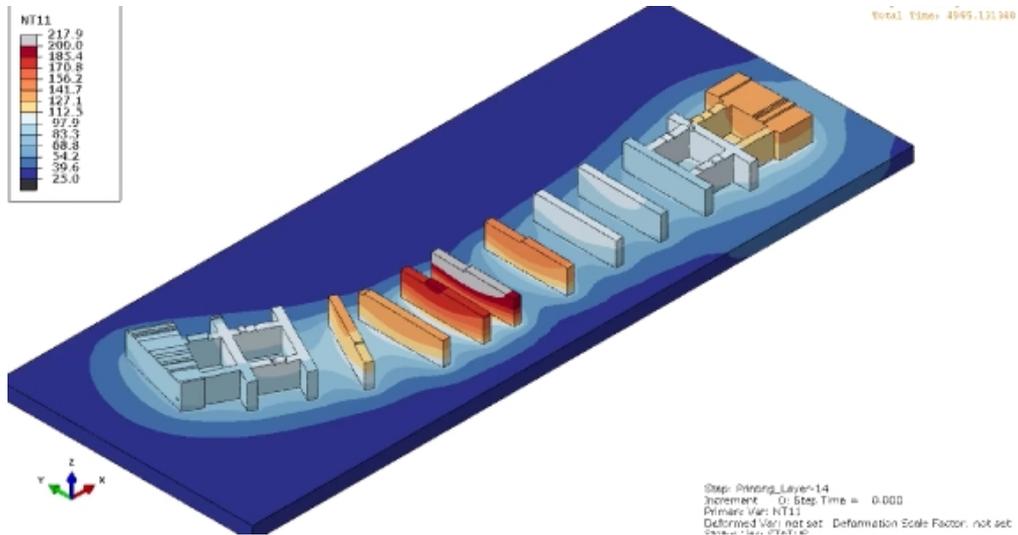


Figura 7. Simulação da temperatura após a deposição de cada camada

A deformação esperada mostrou como a peça deveria ser maquinada para satisfazer os requisitos dimensionais.

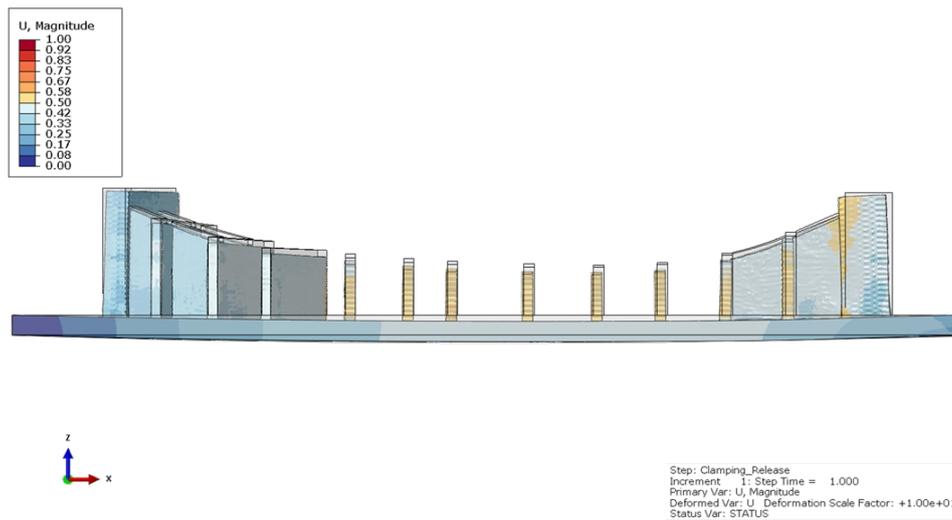


Figura 8. Simulação de distorção após a remoção dos grampos

- Desenho da ferramenta de fixação. Foram utilizadas braçadeiras de forma L com parafusos em cada lado do substrato.

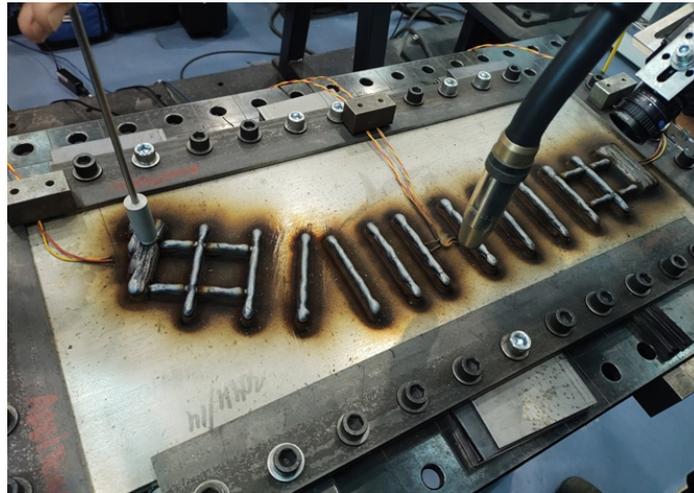


Figura 9. Fabrico do demonstrador e monitorização da temperatura

- O fabrico da peça foi feito com tecnologia CMT e braço robótico sobre um substrato de 650 x 250 x 14 mm de 304.

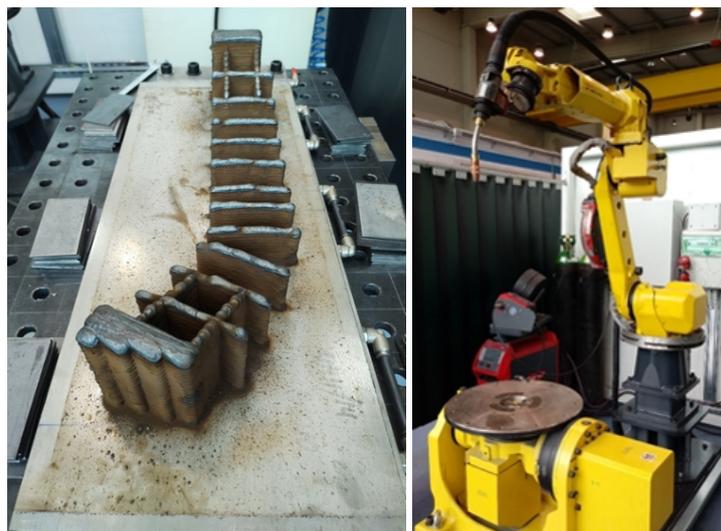


Figura 10. Peça fabricada e o robô utilizado para o seu fabrico

- Monitorização da temperatura e da poça de fusão.

Quatro termopares do tipo K foram ligados ao substrato e um termopar de contacto foi utilizado para monitorizar a temperatura no topo das paredes entre cada deposição de camadas e comparar os valores com os resultados da simulação.

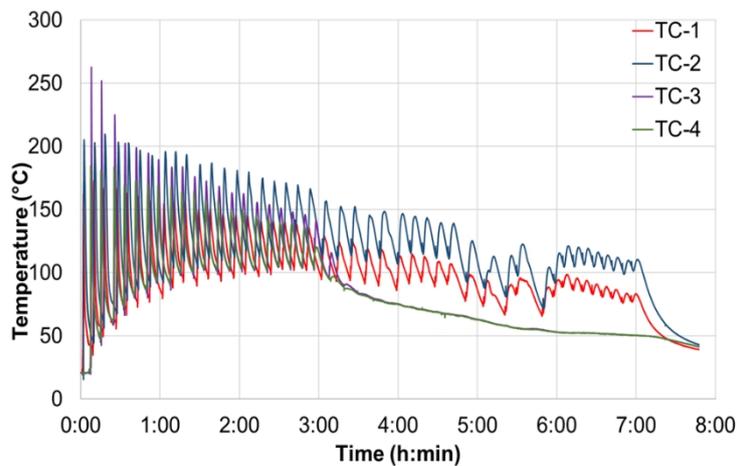


Figura 11. Gráfico de registo de temperatura obtido a partir de termopares do tipo K do substrato

- Análise dimensional e melhor ajuste após o fabrico.

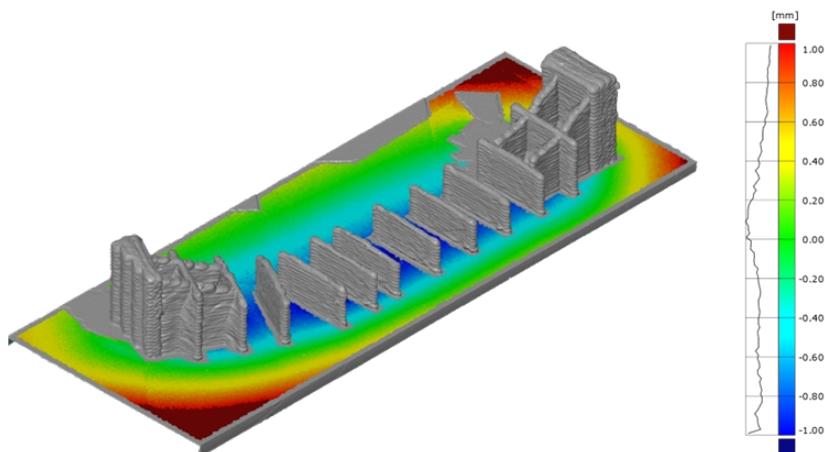


Figura 12. Melhor ajuste da distorção sofrida pelo substrato

- Maquinagem da peça. Durante a maquinagem, surgiram novas distorções devido às tensões residuais.



Figura 13. Maquinagem de zonas críticas do demonstrador

- Análise dimensional após a maquinagem e melhor ajuste das superfícies críticas.

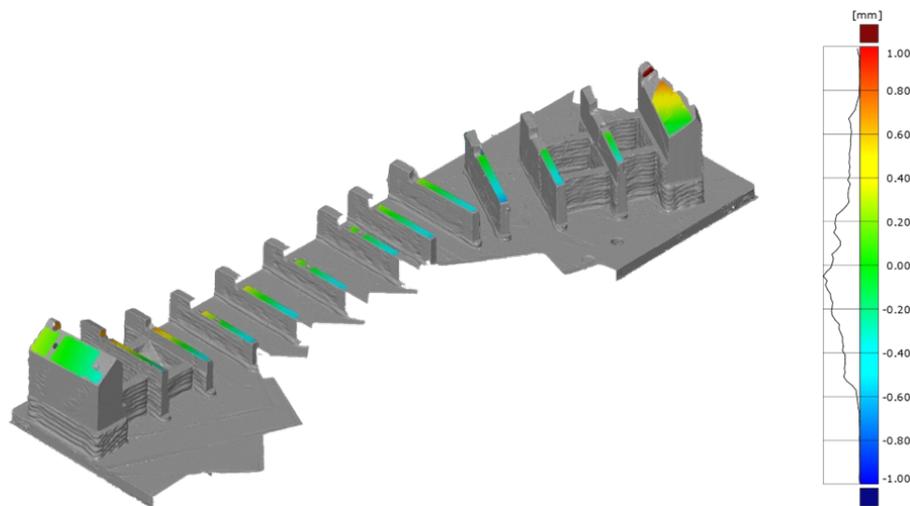


Figura 14. Melhor ajuste das zonas críticas maquinadas

Alguns pontos permanecem fora das tolerâncias programadas mas espera-se que sejam aceitáveis pela empresa LAUAK, porque a definição das tolerâncias foi muito apertada.

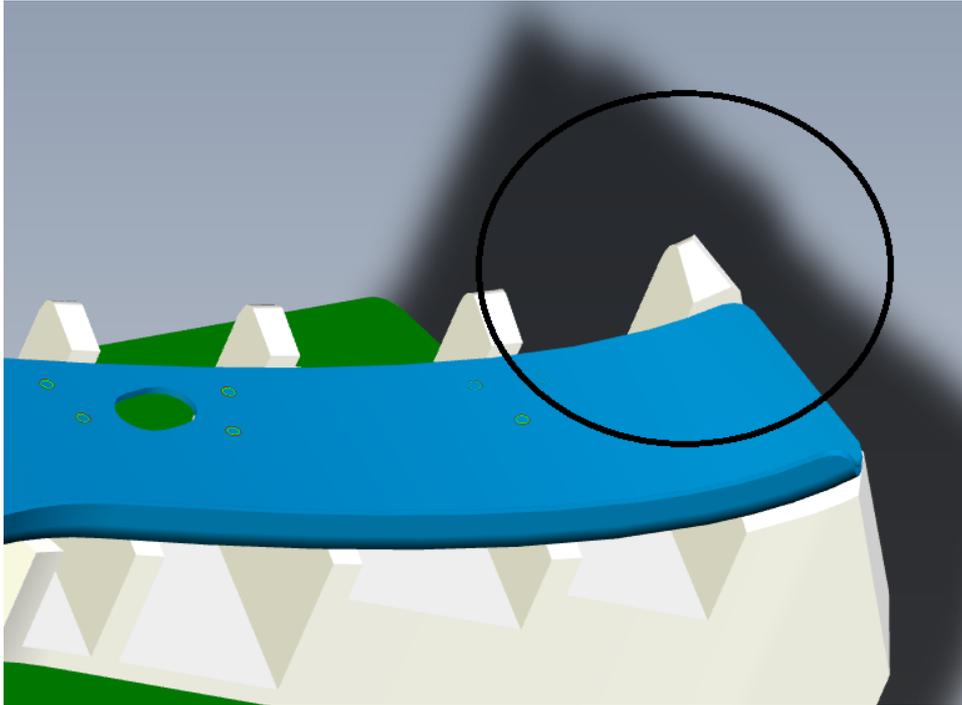


Figura 15. Zona fora das tolerâncias

DED LASER - PÓ

O pó atomizado foi caracterizado no centro tecnológico CEIT, assegurando um pó de morfologicamente adequado, de baixa porosidade, baixa quantidade de satélites, com uma dimensão de partícula entre 44-106 μm e diâmetro médio de 73 μm .

Foi aplicada a seguinte metodologia:

- **Otimização dos parâmetros com material 15CDV6. Testes com revestimento único e sobreposto**

Os valores ótimos para a potência do laser (P), taxa de alimentação (F) e taxa de alimentação do pó (Q) são estabelecidos através dos testes de revestimento simples. Para a conceção de experiências (Tabela 3), é utilizada uma metodologia de 3 níveis de fator 3, empregando os parâmetros de deposição para H13 como valores centrais:

Tabela 3 - Desenho de experiências para o revestimento único para a deposição de 154CDV6 por L-DED.

	P (W)	F (mm/min)	Q (g/min)
Ref.	600	450	3.3
Max	700	550	4
Min	500	350	2.6

A partir dos 27 revestimentos simples, escolhe-se o revestimento ótimo com base em:

- Integridade metalúrgica
- Geometria adequada (valor H/W próximo de 0,25)
- Um valor de diluição próximo de 30 %

Com base nos critérios anteriores, os valores ótimos dos parâmetros de deposição são determinados como sendo: P = 600 W, F = 550 mm/min e Q = 3,3 g/min. O revestimento fabricado por este conjunto de parâmetros é mostrado na Figura 16. A altura do revestimento é de 0,229 mm, a largura de 1.234 mm e a profundidade de diluição de 0,184 mm.

Quatro camadas foram fabricadas empregando os parâmetros acima e em cada configuração uma sobreposição de 30 %, 35 %, 40 % e 45 % entre os sucessivos revestimentos foi aplicada. O valor ótimo de sobreposição deve comprometer uma altura regular da camada com a manutenção de uma diluição suficiente no substrato, que para o material 15CDV6 é de 40 %. A Figura 17 mostra a secção transversal da camada de sobreposição ótima.

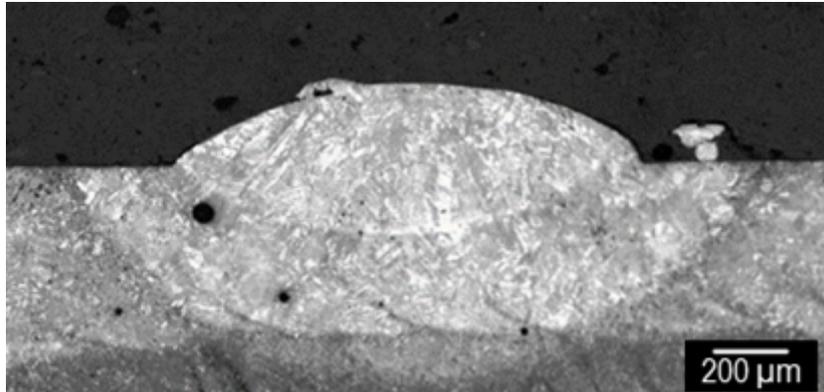


Figura 16: Secção transversal do revestimento único fabricado com parâmetros ótimos

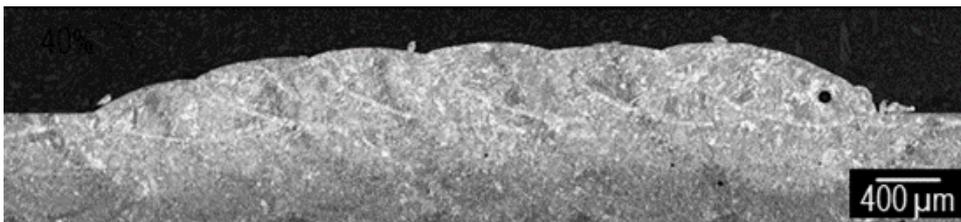


Figura 17: Camada ótima fabricada com uma sobreposição de 40 %

➤ **Teste da estratégia de deposição através da fabricação de paredes**

Afim de testar a melhor estratégia de deposição, três paredes 6x30x15 são fabricadas com as estratégias mostradas na Figura 18. A primeira camada é fabricada sem quebras de refrigeração otimizadas, enquanto a outra é fabricada com essas quebras a cada 8 camadas.

A segunda parede, em que o material foi depositado nas direções longitudinal e transversal em ZigZag para o enchimento, mostrou a altura mais uniforme e a melhor precisão geométrica, dada a uniformidade do campo térmico criado no processo de fabrico. As três secções transversais são mostradas na Figura 19.

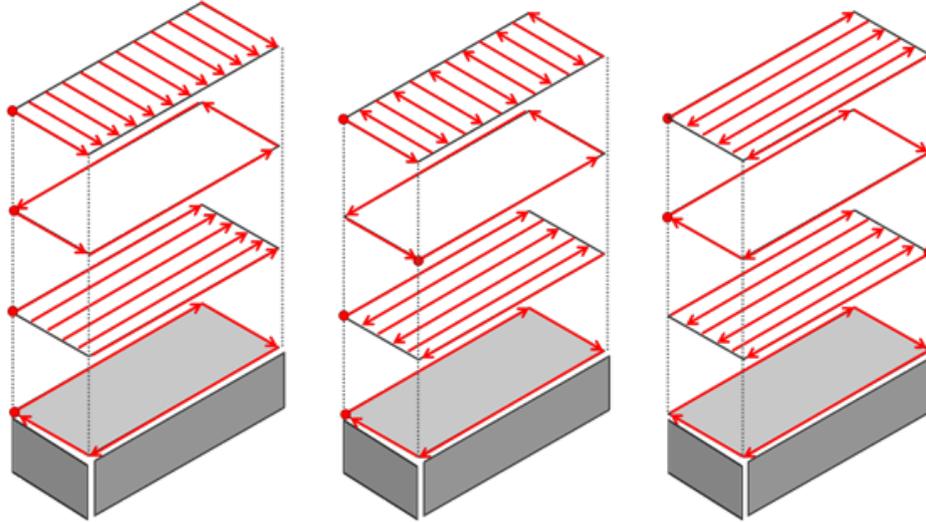


Figura 18: Testes de estratégias de deposição durante a fabricação de paredes

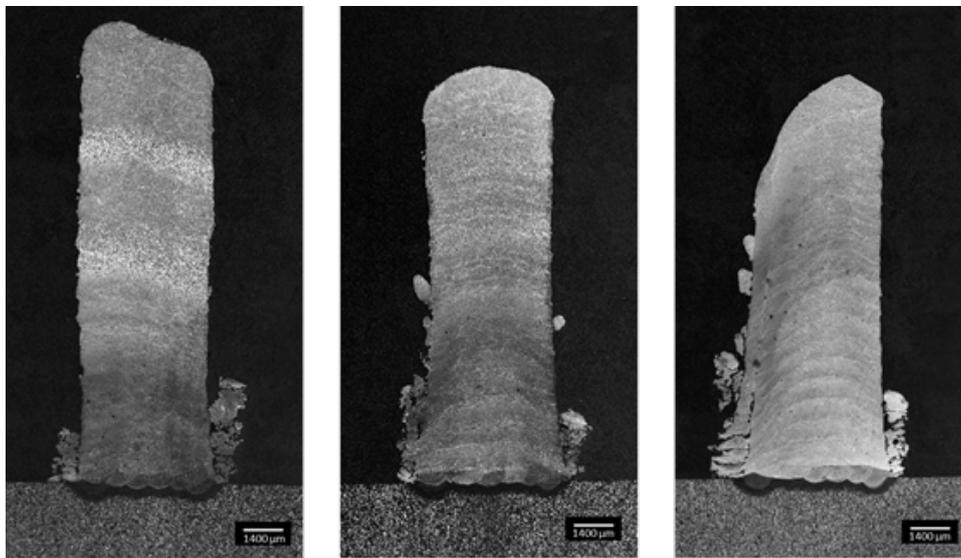


Figura 19: Secções transversais das paredes fabricadas

➤ **Caracterização da micro-estrutura e microdureza**

Uma análise micro-estrutural do material depositado revelou a criação de Ferrite Acicular durante o processo. A formação desta micro-estrutura é encorajada pelos

ciclos térmicos rápidos do L-DED e pelos elementos de liga presentes no material 15CDV6.

A relação entre os tempos de arrefecimento e a presença de Ferrite Acicular é observada na Figura 20, onde se mostra que o material depositado enquanto o substrato é sobreaquecido tem um grão mais grosseiro com maior conteúdo de ferrite. Após os intervalos de arrefecimento, o material dissipa o calor de forma eficiente novamente e a micro-estrutura anterior é atingida.

A formação de ferrite acicular está também relacionada com propriedades mecânicas elevadas no material depositado, com um valor médio de microdureza de 40 HRC.

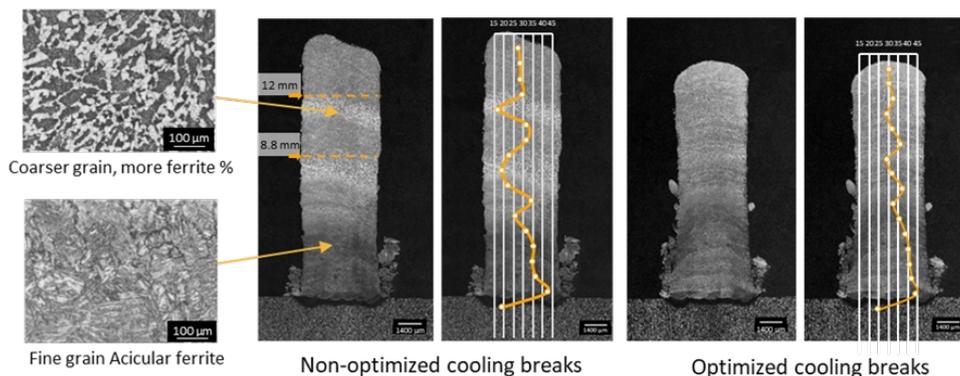


Figura 20: Micro-estrutura, tempos de arrefecimento e valores de microdureza para as paredes fabricadas com e sem quebras de arrefecimento

➤ Fabrico de peças do demonstrador

A peça demonstradora é fabricada a partir de uma pré-forma maquinada de material AISI1045. O processo foi realizado utilizando parâmetros de referência previamente desenvolvidos que dão 0,4mm de altura de revestimento com uma estratégia de sobreposição de 40 %. As faces ativas foram maquinadas mais 2 milímetros para preparar o revestimento 15CDV6 e a maquinação final.

Durante o processo de fabrico, a peça é inclinada para permitir que o bocal atinja a superfície de deposição, como mostra a Figura 21.

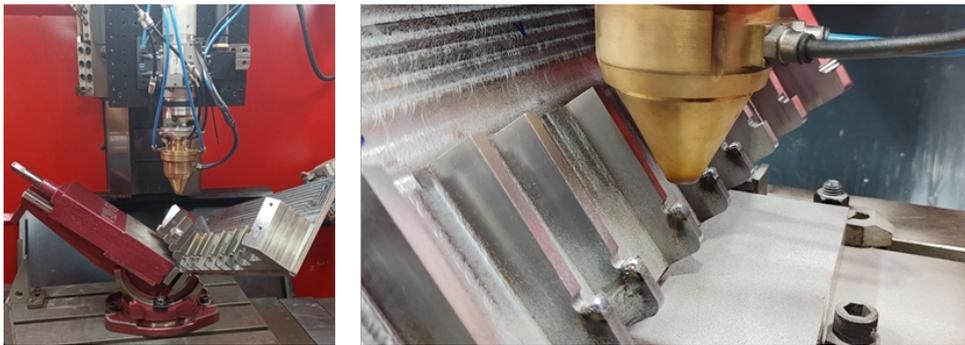


Figura 21: Configuração do fabrico da peça demonstradora em L-DED

A Figura 22 mostra a peça demonstradora antes da etapa de pós-processamento.

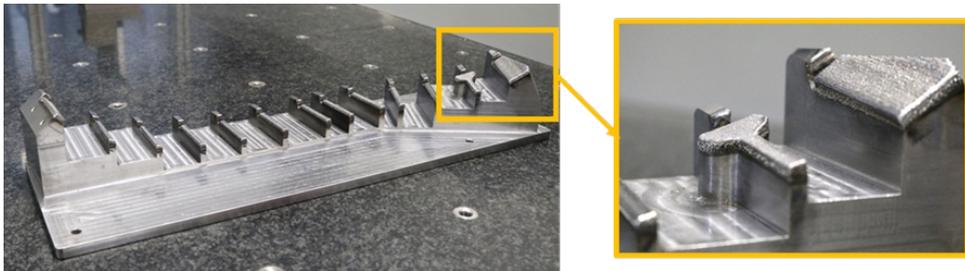


Figura 22: Peça demonstradora após 15CDV6 revestimento em L-DED.

A peça revestida é parcialmente maquinada, a fim de demonstrar as diferentes fases do processo de fabrico. As faces pós-processadas têm uma precisão dimensional de 0,1mm e uma Ra entre 1,5 e 2. A dureza medida nas faces pós-processadas é de 42 HRC.

As lições aprendidas no desenvolvimento deste piloto demonstrativo são:

Peças isentas de defeitos e sólidas foram fabricadas utilizando tecnologias MAM, aplicando diferentes estratégias:

- **Hibridação** de maquinação e MAM. Isto tem a vantagem de reduzir a dificuldade de maquinação em zonas específicas e ter a possibilidade de utilizar materiais de alto valor acrescentado apenas nas zonas requeridas e um material mais barato no resto.
- **Redesenho** para MAM. Isto tem a vantagem de reduzir a massa da peça em cerca de 30 %.

O redesenho é essencial para obter as vantagens do MAM:

- Economia de material
- Baixo desperdício de material
- Curto prazo de execução

A simulação melhora as estratégias de deposição para reduzir as distorções. Nestes termos, as simulações de temperatura e tensão residual foram realizadas para assegurar uma produção adequada sem distorções ou colapso. No entanto, é também muito importante conhecer a distorção final da peça para otimizar a sobre-espessura de modo a satisfazer os requisitos dimensionais após a fase de maquinação.

Piloto PT1-MOLDETIPO

Fabrico

O inserto do molde do Piloto PT1 foi fabricado por L-PBF num equipamento Trumpf TruPrint 1000. A peça foi fabricada utilizando pó Böhler W360, um aço ferramenta cujas propriedades são equivalentes às do aço H13.

Antes do fabrico da peça em si, foram produzidos provetes do mesmo material, para efetuar a caracterização mecânica, micro-estrutural e térmica. Os resultados desta tarefa podem ser consultados na entrega D 2.1. REPORT ON MATERIAL FOR MAM.

Tanto para o fabrico da peça como para as amostras, os parâmetros de processamento estão descritos na Tabela 4. A peça obtida é representada na Figura 23.

Tabela 4: Parâmetros de processamento L-PBF utilizados no fabrico da inserto.

Área / Zonas	Parâmetros: velocidade de deslocamento e potência LASER
Núcleo (dentro da peça)	700mm/s 120W
Downskin (áreas não suportadas)	460mm/s 30W
Inskin Hatch (sobreposição entre a camada exterior e o interior da peça)	700mm/ 120W
Inskin Border (camada exterior)	500mm/s 80W

Pós-processamento

O pós-processamento da peça envolveu a separação da chapa de base, através de fio EDM. Isto foi realizado numa empresa local (EROFIO) que possui o equipamento apropriado para esta tarefa. Não foi efetuado qualquer tratamento térmico.

Depois disto, a peça foi enviada para a Moldetipo, onde a fresagem, a EDM e as operações de ajuste de detalhe prepararam a peça para a montagem no molde. Estas operações foram como aquelas por que passou o inserto fabricado convencionalmente. A Figura 23 mostra o estado final do inserto.



Figura 23: Geometria final do inserto L-PBF, após o acabamento.

Após o fabrico, o inserto foi analisada por tomografia computadorizada, para verificar a geometria interior dos canais de refrigeração e para verificar a existência de eventuais defeitos. Uma visão geral do inserto é mostrada na Figura 24. É possível verificar se o canal de arrefecimento foi obtido corretamente, e só é detetada uma rugosidade superficial menor no interior do canal.

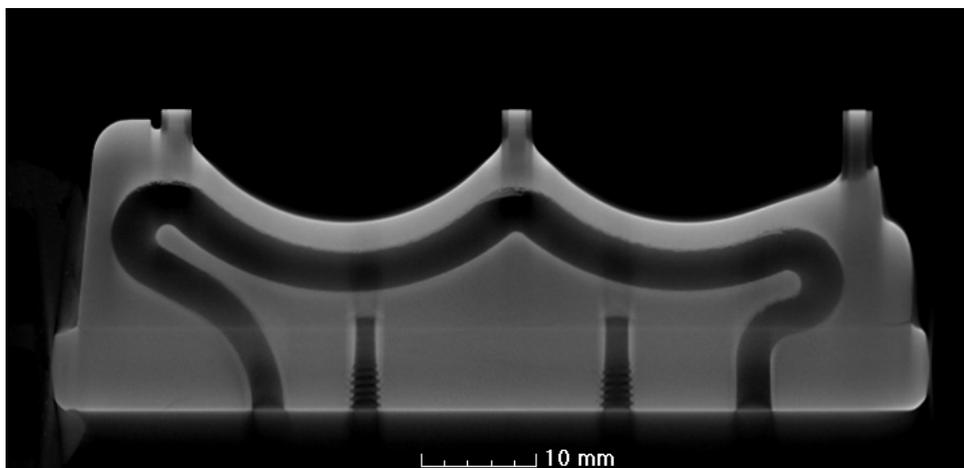
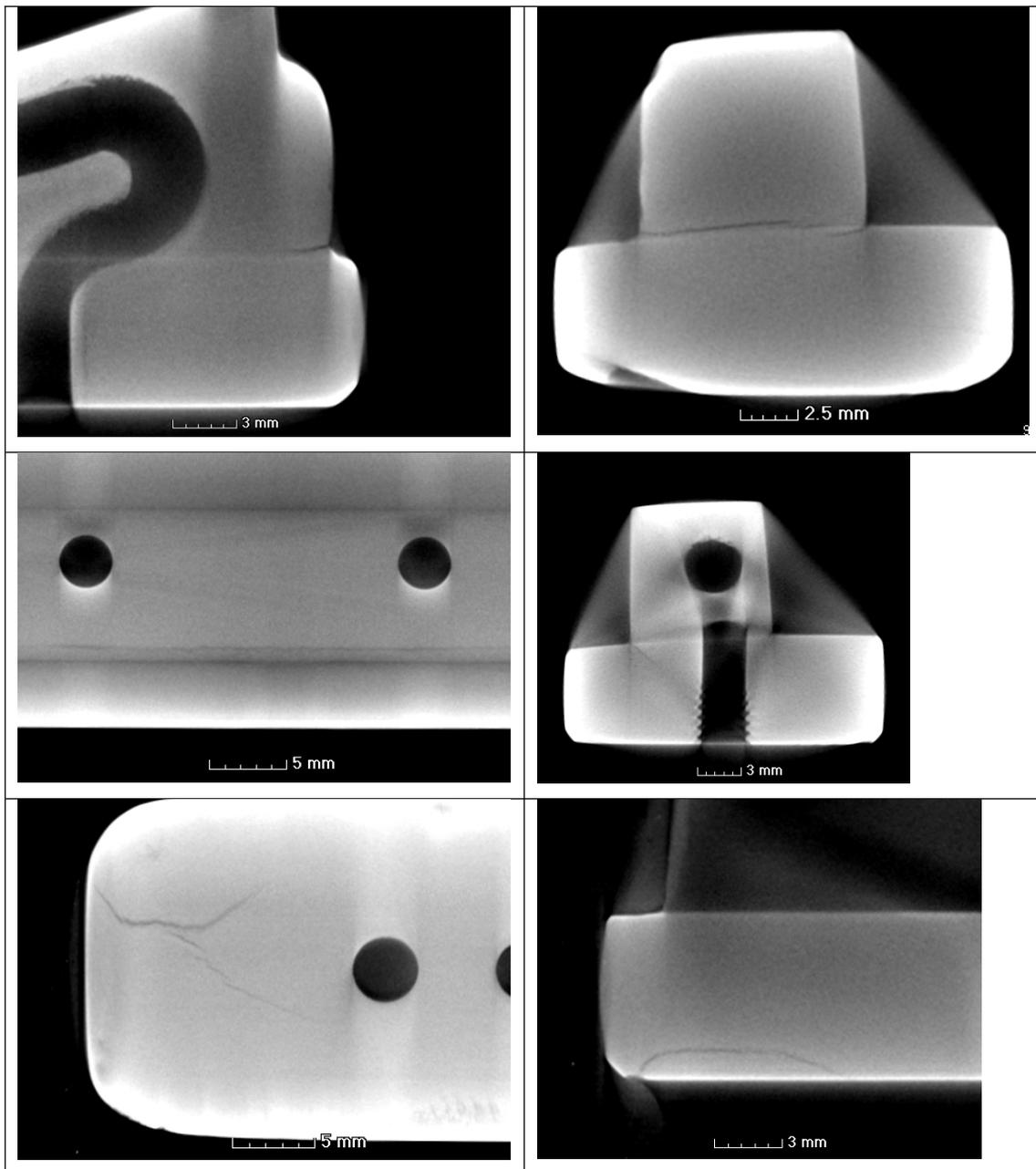


Figura 24: Imagem do inserto L-PBF obtida por tomografia computadorizada mostrando o canal de arrefecimento interno.

No entanto, análises detalhadas da área que liga a base à superfície ativa do inserto revelam uma série de fissuras - Figura 25. Algumas destas fissuras eram visíveis a olho nu.



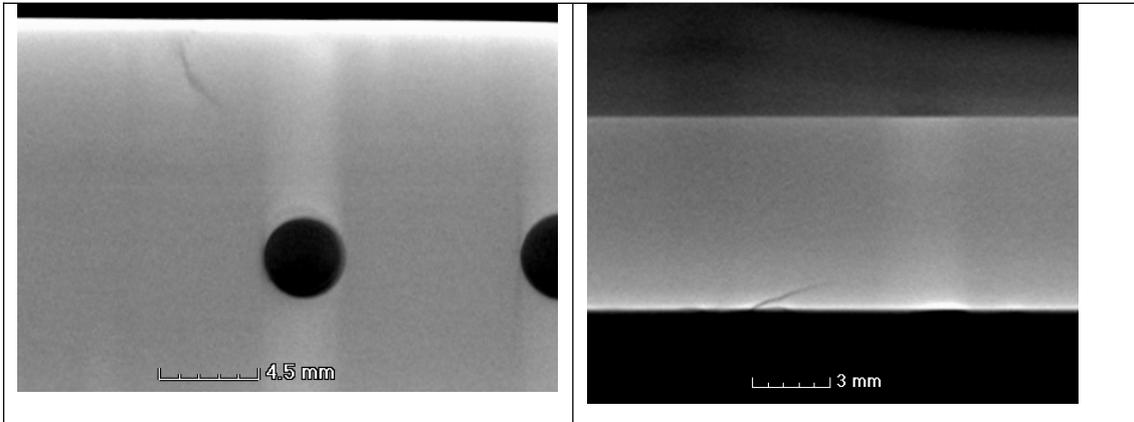


Figura 25: Tomografia computadorizada mostrando os defeitos internos do inserto.

Caracterização do demonstrador

Globalmente, o fabrico do demonstrador foi um sucesso. A Moldetipo considerou que a inserto do molde levaria a ganhos de produtividade para esta peça. Outras peças poderiam também beneficiar desta estratégia. Ficou provado que a geometria de refrigeração afetava significativamente o ciclo de moldagem e era economicamente viável - ver resultados de D3.2.1 - Estudo de Viabilidade.

O fabrico deste piloto mostrou que é possível utilizar tecnologias MAM para obter uma peça funcional, para uma aplicação industrial, com um desempenho superior ao original. A funcionalidade foi demonstrada, apesar de terem ocorrido alguns defeitos. Devem ser considerados tratamentos térmicos para este tipo de peças, para controlar a estrutura do material e obter uma maior tenacidade.

Piloto SP1-MEUPE/INSPASA

O redesenho do caso AM do piloto SP1 (Figura 26) foi levado a cabo tendo em consideração:

- Canais internos com ar forçado para diminuir a temperatura da superfície da caixa;
- Furos para refrigerar os motores com ar durante o funcionamento.

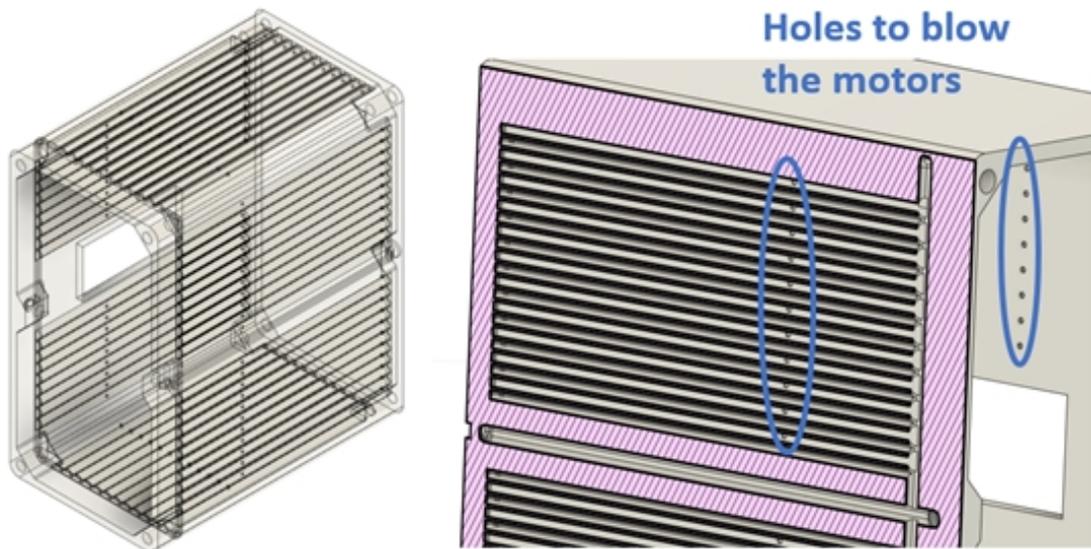


Figura 26: Imagem dos canais internos e furos de refrigeração dos motores no desenho do piloto SP1.

Antes do fabrico do caso AM, várias considerações foram tidas em conta:

- Resultados obtidos em termos de caracterização de materiais apresentados em D 2.1 Relatório sobre materiais para o MAM
- Resultados térmicos a nível de provete também apresentados em D 2.1 Relatório sobre materiais para MAM
- Resultados da simulação térmica sobre o caso

Relativamente a esta última, foram realizadas algumas simulações térmicas a fim de avaliar o comportamento de toda a máquina de perfuração. Ao contrário da análise realizada a nível de provete, neste caso as condições do modelo são mantidas constantes, e o teste experimental é realizado apenas para determinar o erro do modelo. A Figura 27 mostra a secção transversal da carcaça fabricada por AM. Como se pode ver, após 50 minutos de funcionamento, a temperatura no motor atinge quase 70°C, mas graças à conceção da caixa externa e ao sistema de convecção forçada implementado, a temperatura externa permanece abaixo dos 25°C.

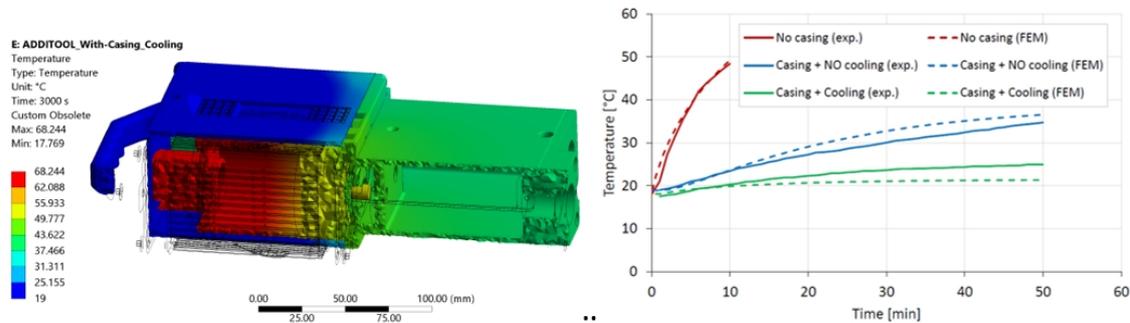


Figura 27: Secção transversal do campo térmico da máquina de perfuração com a caixa AM e o arrefecimento ativado (esquerda). Comparação entre a temperatura experimental e a temperatura FEM (direita).

Os pilotos SP1 foram produzidos por Laser Powder Bed Fusion (LPBF) numa plataforma Renishaw (RenAM 500E). Dois trabalhos de construção diferentes (BJ1 & BJ2) foram fabricados em Scalmalloy® com uma espessura de camada de 30 µm. As carcaças foram concebidas e orientadas na placa de construção para evitar estrutura de suporte, a fim de minimizar o tempo de fabrico e pós-processamento. Abaixo, podem observar-se os processos de fabrico (Figura 28 - esquerda) e extração (Figura 28 - direita) de BJ2.

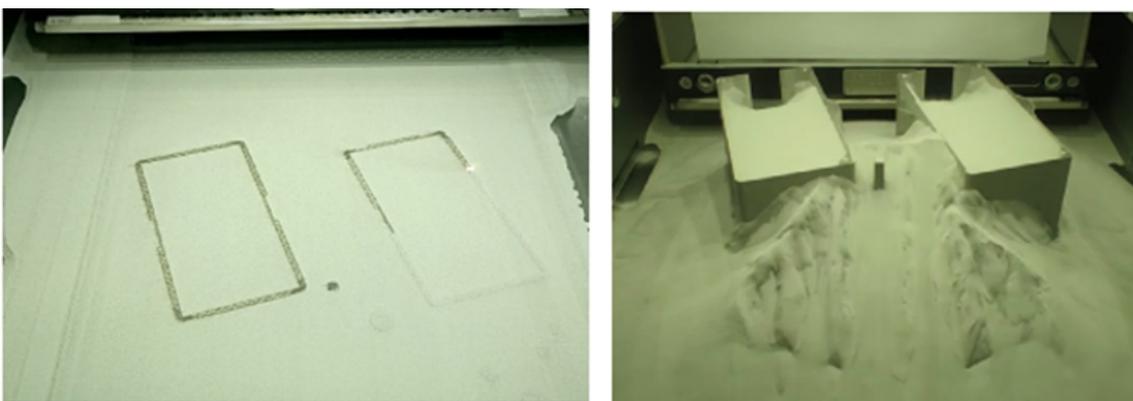


Figura 28: Processos de fabrico (esquerda) e de extração (direita) de BJ2.

Três carcaças foram fabricadas em 2 lotes diferentes. BJ1 (Figura 29 - esquerda) levou 30h com um consumo de material de 246g para produzir o demonstrador nº 1 (D1), enquanto BJ2 (Figura 29 - direita) levou 42h com um consumo de material de 432g

para fabricar os demonstradores 2 e 3 (D2 e D3). A extração do pó ocluído nos canais internos em D1 e D3 foi realizada através dos furos concebidos para soprar os motores.

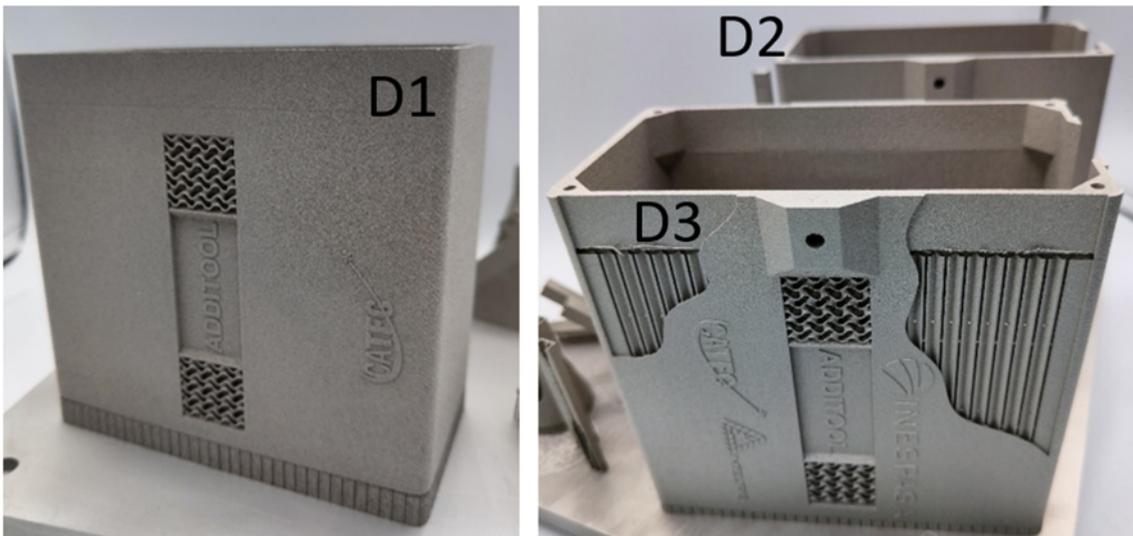


Figura 29: Imagem de (esquerda) D1, (direita) D2 e D3 ainda unidos à placa de fabrico.

D3 foi fabricado como demonstrador para mostrar os canais internos enquanto D1 e D2 foram produzidos para demonstrar a solução com ar forçado durante o funcionamento.

Afim de comparar diferentes processos para obter as interfaces (áreas com requisitos dimensionais mais elevados, destaque em vermelho na Figura 30), foram considerados dois pós-processos diferentes:

- As interfaces D1 e os furos roscados foram obtidos por maquinagem, (instalações MEUPE, Figura 31 - esquerda);
- As interfaces D2 e D3 foram obtidas por maquinagem EDM-Eletroerosão (Figura 31 - direita), e as roscas com um sistema de perfuração vertical (Figura 32)

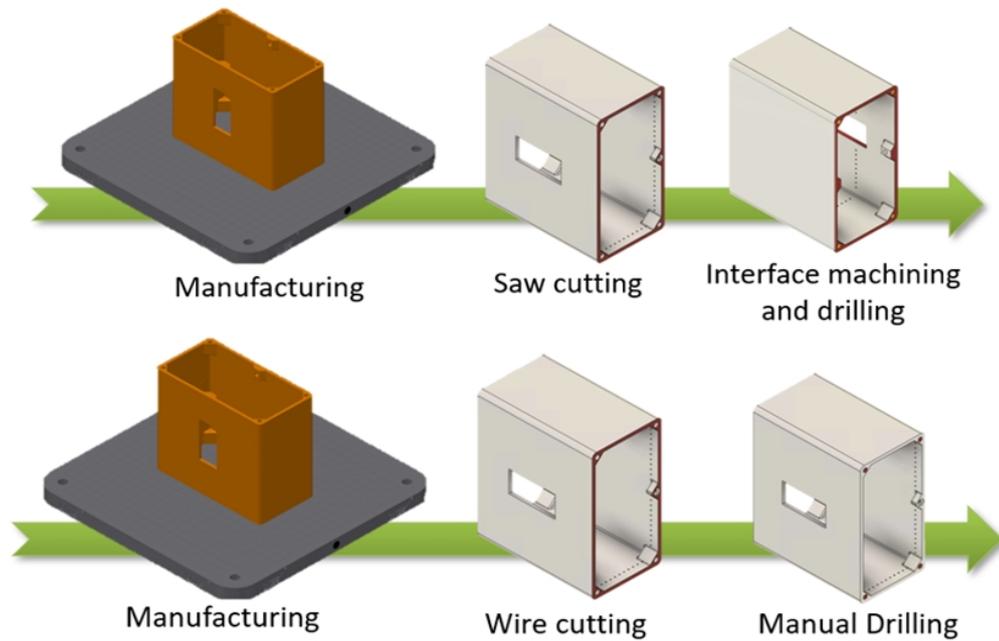


Figura 30: Sequência de pós-processamento de (para cima) D1, (para baixo) D2 e D3.

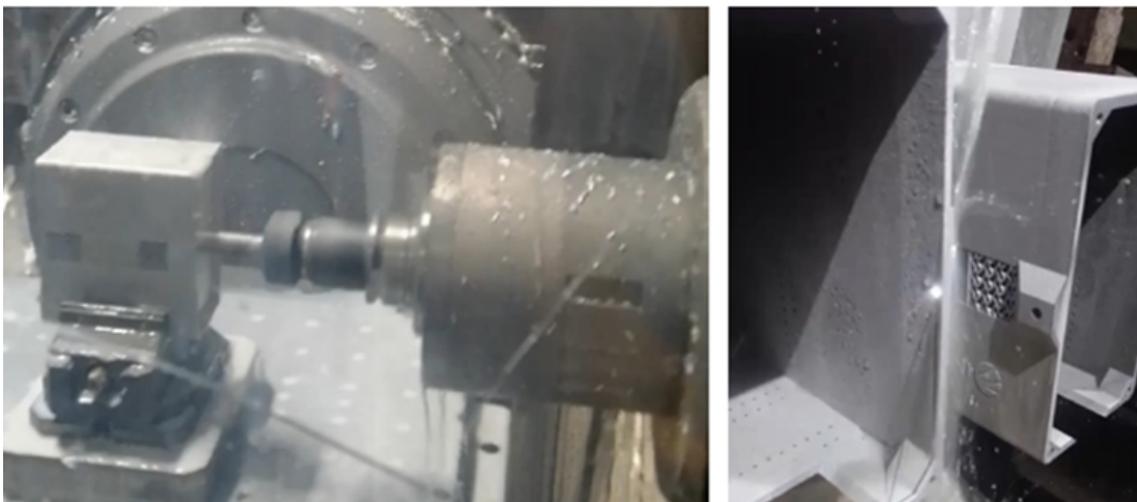


Figura 31: (esquerda) Processo de maquinação de interfaces D1 e realização de interfaces (direita) por EDM em D2 e D3.



Figura 32: (esquerda) Furos e roscas (direita) obtidas manualmente para D2 e D3.

Para assegurar que nenhum pó é ainda ocluído dentro dos canais internos, foi induzido um fluido químico através das cavidades internas. Um ácido nítrico - hidrófluorídrico foi utilizado apenas durante 5 minutos para evitar a redução da espessura e manter a integridade estrutural. Abaixo, podem ser observados os demonstradores após o processo de limpeza (Figura 33).

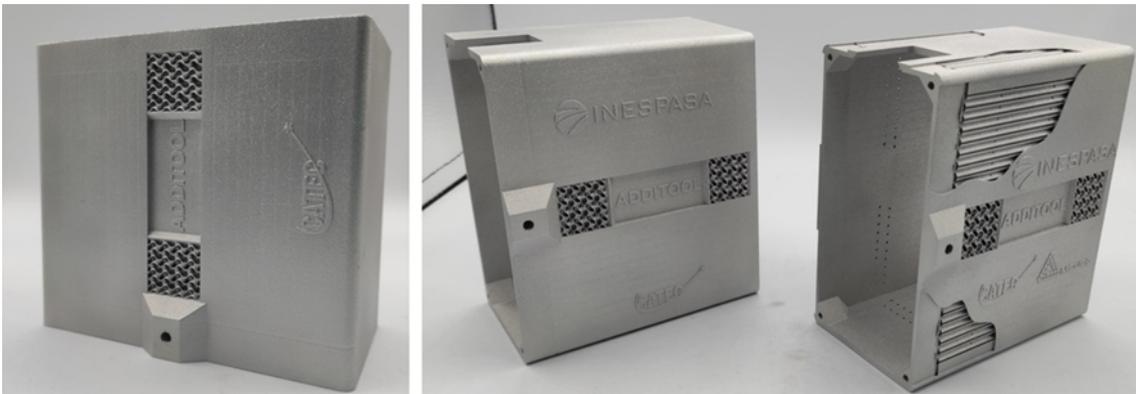


Figura 33: Imagens de (esquerda) D1, (direita) D2 e D3 após o processo de limpeza.

Todos eles foram inspecionados por tomografia computadorizada, que é a única técnica não destrutiva capaz de mostrar desvios dimensionais nas cavidades internas, e também de assegurar que nenhum pó foi ocluído dentro dos componentes. A Figura 34 apresenta a secção transversal 2D e a representação 3D dos resultados adquiridos pela tomografia computadorizada realizada em D1. Para obter a análise dos desvios 3D, foi realizada uma análise comparativa entre o CAD nominal (laranja na Figura 34) e o conjunto de dados do CT 3D (cinzento na Figura 34). Afirma-se que nenhum pó ocluído permanece dentro dos canais, e não são observados desvios significativos.

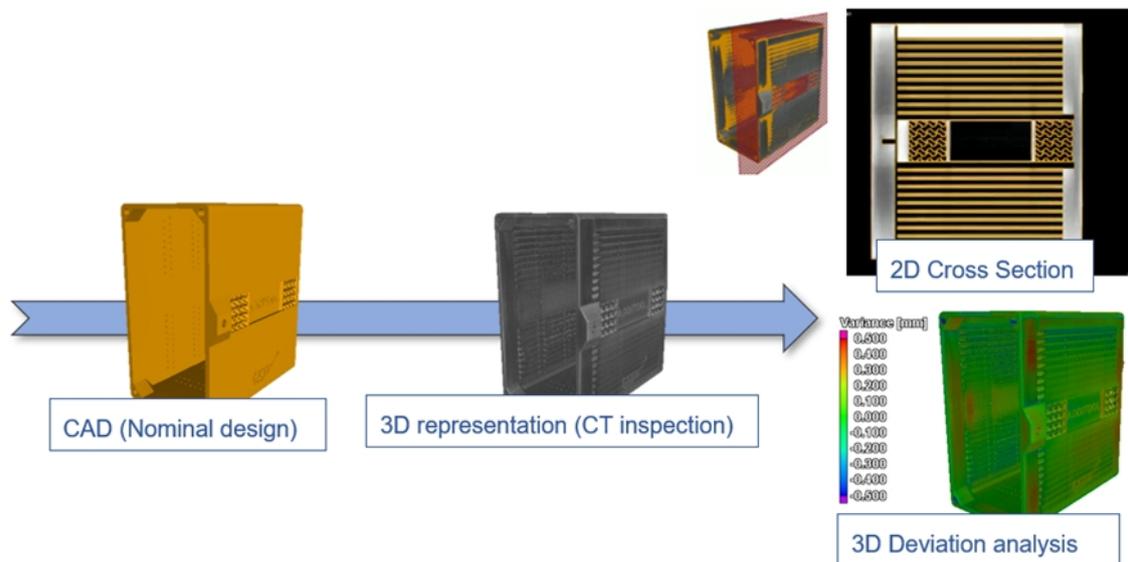


Figura 34: Resultados da inspeção CT de D1.

Foram realizados vários testes experimentais para validar a solução AM. Uma câmara de termografia infravermelha e um termopar foram utilizados para monitorizar o comportamento térmico durante o funcionamento. Ambos os casos, convencional e redesenho com canais internos, foram analisados trabalhando durante 50 minutos com os motores a funcionar a 300 rpm. A Figura 35-esquerda superior (indicação B) mostra o caso convencional atingindo 55°C em 50 minutos enquanto a temperatura

máxima alcançada no caso AM com ar forçado após 50 minutos de funcionamento é de 25°C (indicação A, Figura 35-esquerda inferior).

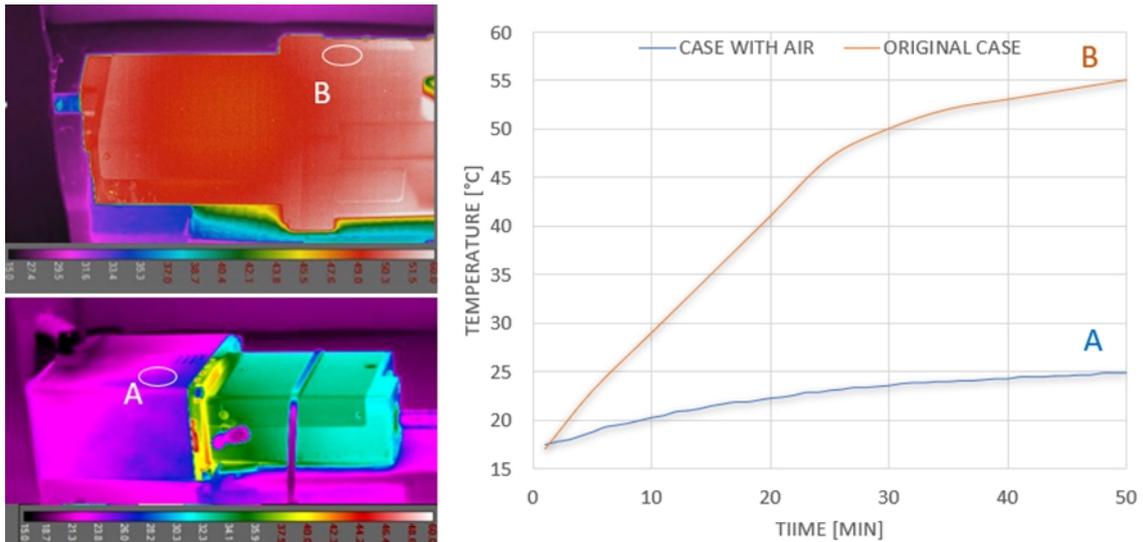


Figura 35: Imagens termográficas das carcaças convencionais (topo esquerdo) e (fundo esquerdo) de AM redesenhadas. (direita) Gráfico comparativo de termopares.

Foram realizados testes adicionais para analisar o comportamento do caso AM enquanto funcionava sem ar forçado. Neste caso, atinge 40°C após 50 minutos de trabalho (Indicação C, Figura 36 em vez dos 55°C registados no caso convencional. Neste ponto, se o ar for induzido dentro dos canais, o caso atinge 25°C em menos de 10 minutos (Indicação D Figura 36).

Se compararmos as simulações térmicas com o teste realizado no caso convencional e AM, pode ser visto na Figura 37 uma boa concordância geral entre o modelo e os dados experimentais.

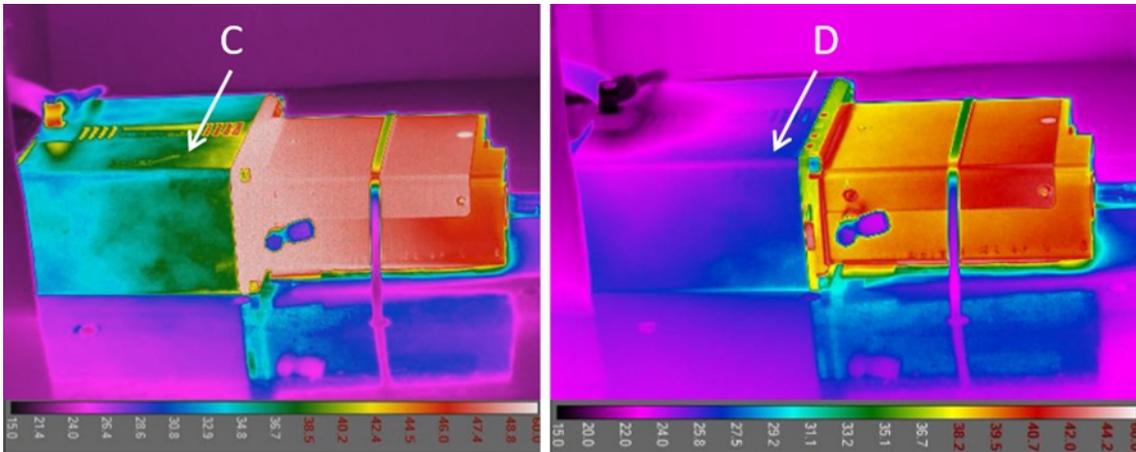


Figura 36: Imagens termográficas da caixa AM (esquerda) operando sem ar forçado e (direita) durante o processo de arrefecimento induzindo o ar.

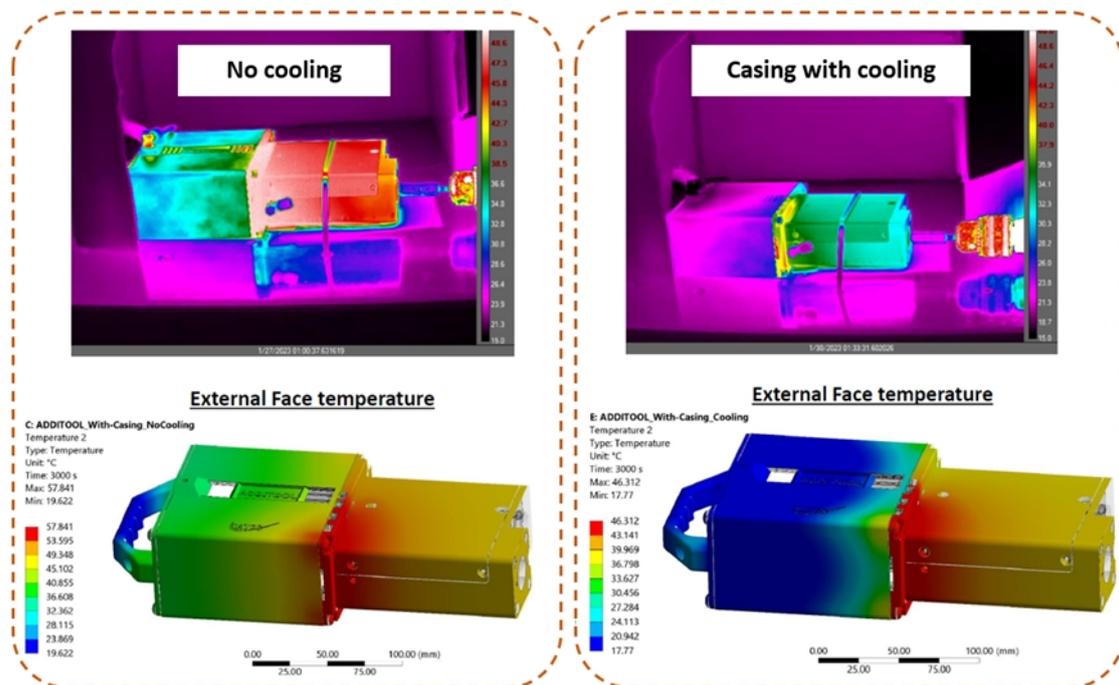


Figura 37: Comparação entre o comportamento experimental e de simulação.

Relativamente às lições aprendidas durante o desenvolvimento deste piloto, os testes finais mostraram a melhoria do comportamento térmico em termos de dissipação de calor através da introdução de arrefecimento interno. Em termos de aquecimento durante o funcionamento, diferenças de 15°C comparando a carcaça convencional com o novo desenho e 30°C se se introduzir ar de forma forçada. Se a carcaça AM for utilizada sem ar forçado, em menos de 10 min poderá estar novamente operacional (após 50 minutos de trabalho).

No que diz respeito ao peso do componente, ao utilizar a carcaça AM com canais internos, foi alcançada uma redução de 37 %.

Além disso, as simulações térmicas demonstraram uma correspondência estreita entre os resultados experimentais e simulados no caso AM. Esta aproximação poderia ser muito interessante no caso de ser proposto um novo desenho, por exemplo, redesenhando toda a carcaça, e não apenas onde os motores estão localizados. Neste contexto, o desempenho térmico da carcaça poderia ser verificado antes do fabrico, evitando testes experimentais adicionais para validar o componente.

Piloto FR2-SOMOCAP

Sendo a tecnologia nova para um sistema aberto, foi necessário começar desde o início e fazer algumas adaptações:

- Desenvolvimento com a máquina Lynxter S600D + NANOE H13 filamento (abortar o desenvolvimento do NANOVA 316L porque não possui propriedades mecânicas suficientes);
- Vários testes de impressão + desaglomeração + sinterização com um forno cúbico (Argon +2,5 % atmosfera de hidrogénio);
- Impressão de provetes para CEIT para melhorar a desaglomeração e sinterização;

- Redesenho da peça tendo em conta todas as regras de desenho (ciclos de discussão com SOMOCAP com a modificação do diâmetro do canal de arrefecimento e correlação com a simulação);
- Negociação com outras novas empresas para desenvolver uma nova pasta H13 ou 17-4PH (ver Entregável 2.3.1 Estudo de viabilidade).

1) Modificação do S600D + NANO H13

A máquina sendo originalmente montada em "Bowden", foi necessário fazer modificações no hardware para a transformar em "Direct Drive". De facto, dada a fragilidade do filamento (carregado a mais de 50 % em volume em pó metálico), recomenda-se uma máquina de "Direct Drive", com um bocal de 0,8mm em aço para evitar que fique entupida.

Esta modificação permitiu encontrar todos os parâmetros de impressão antes de adquirir a nova ferramenta de extrusão (desenvolvida pela Lynxter) – ver Figura 38.

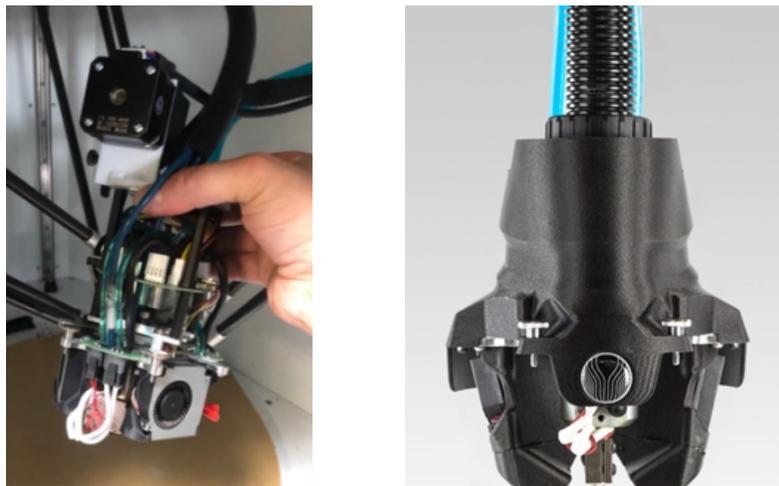


Figura 38: Modificação da extrusão tripla para Direct Drive.

Graças à identificação dos parâmetros, ver Figura 39, a parametrização para a impressão é a seguinte:

- Diâmetro do bico: 0,8mm
- Multiplicador de extrusão: 115 %
- Largura de extrusão: 0.8mm
- Altura da camada: 0,2mm
- Infiltração: 100 %
- Sobreposição de contornos: 50 %
- Temperatura do bico: 183°C
- Temperatura da cama: 35°C
- Temperatura da câmara: 25°C
- Arrefecimento: 10 %
- Velocidade: 15mm/seg

RECHERCHE DES PARAMETRES INITIAUX																	
Test N°	Extruder			Layer					Infill			Temperature		Cooldown	Speed	Commentaires	
	Nozzle	Distraction multiplier/ co	extrusion width/ mm	layer/mm	Top Solid	bottom	Solid	Outline Perimete	Internal Fill	External Fill	Interior Fill	Outline Overlap	Infill Extrusion	T°o buse	T°o plateau		Layer/°C
1	0.8	1.14	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	30	0	20	couche anachielgrinding sur filament
2	0.8	1.3	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	30	0	20	couche anachielgrinding sur filament Haquette 30x30x3mm
3	0.8	1.3	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	30	0	20	couche anachielgrinding sur filament
4	0.8	1.3	0.96	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	30	0	20	couche anachielgrinding sur filament
5	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	30	0	15	couche anachielgrinding sur filament
6	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	30	0	15	Pas d'adhérence sur plateau
7	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	35	0	15	dimensionnel ok avec optimization point
8	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	35	0	15	dimensionnel ok avec Random point
9	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	50	45	100	100	35	0	15	Délai cohésion couche
10	0.8	1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	35	0	15	Délai cohésion couche
11	0.8	1.07	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	35	0	15	Délai cohésion couche
12	0.8	1.1	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	35	0	15	Délai cohésion couche Modèle dia 20 ep 3mm
13	0.8	1.12	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	100	45	100	100	35	0	15	cohésion couche Perfectible
14	0.8	1.14	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	100	35	0	15	cohésion couche Perfectible entre perimetre et remplissage
15	0.8	1.14	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	104	100	35	0	15	grinding sur filament
16	0.8	1.14	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	100	35	0	15	Bonne cohésion couche Perimetre
17	0.8	1.16	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	100	35	0	15	Pas bonne cohésion centre Solid et grinding sur filament
18	0.8	1.19	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	103	35	0	15	Nettoyage filaire et Hair-break
19	0.8	1.15	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	103	35	2/200;	15	Perimetre délimité
20	0.8	1.15	0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	103	35	2/200;	15	Bonne cohésion de couche

Figura 39: Identificação dos parâmetros.

2) Testes de impressão + desaglomeração + sinterização

Foram impressas várias amostras - Figura 40 -, incluindo:

- Cubos;

- Paredes (para ver as espessuras máximas que podem ser desbobinadas e sinterizadas);
- Cilindros;
- Cubo com furo no interior;
- Estrutura em treliça;
- Provetes para ensaios de tração;
- Cilindros com canais de refrigeração - Ciclo com a fase de redesenho para ver a qualidade da deposição;
- "Benchy boat" para validar a boa impressão;
- Etc.

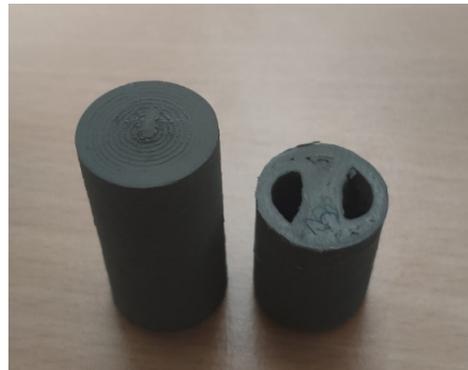
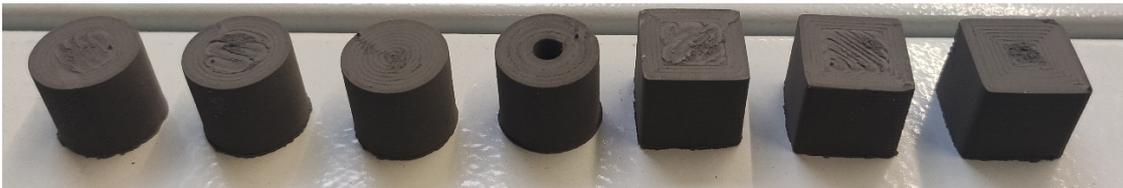


Figura 40: Testes de impressão.

A ESTIA Addimadour está simplesmente equipada com um forno cúbico dado por Lynxter para as primeiras experiências. Este forno é composto por paredes porosas com a possibilidade de ter atmosfera inerte e alta temperatura. O equipamento utilizado é visível na Figura 41.



Figura 41: Forno para as primeiras provas.

O fornecedor do filamento forneceu curvas de desaglomeração e sinterização para cada material. Para o aço H13, são necessárias 91 horas para desaglomerar e sinterizar a peça, ver Figura 42.

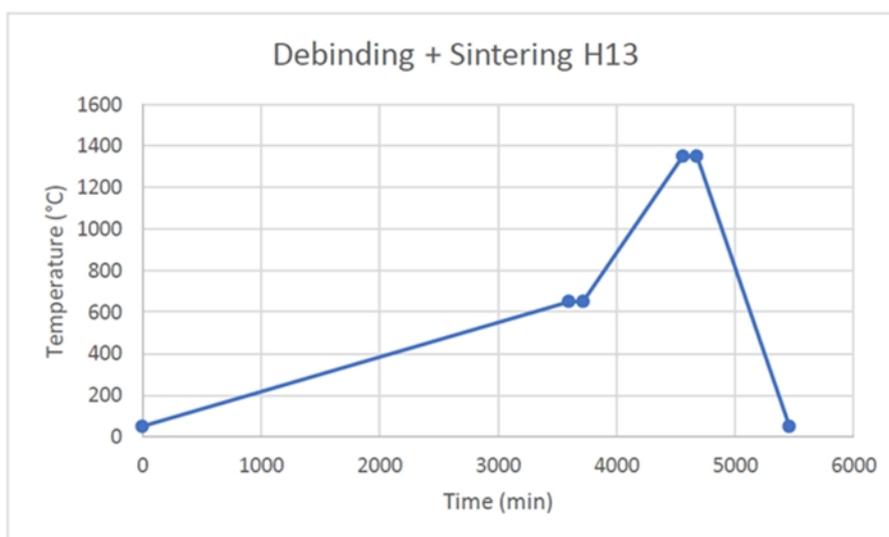


Figura 42: Exemplo de curva de desaglomeração/ sinterização de H13.

Apesar de numerosos testes, o forno utilizado não fornece resultados satisfatórios, resta: ver Figura 43.

- Fissuras;
- Bolhas de ar;
- Deformações;
- Resíduos de polímeros / carbonização;
- Etc.

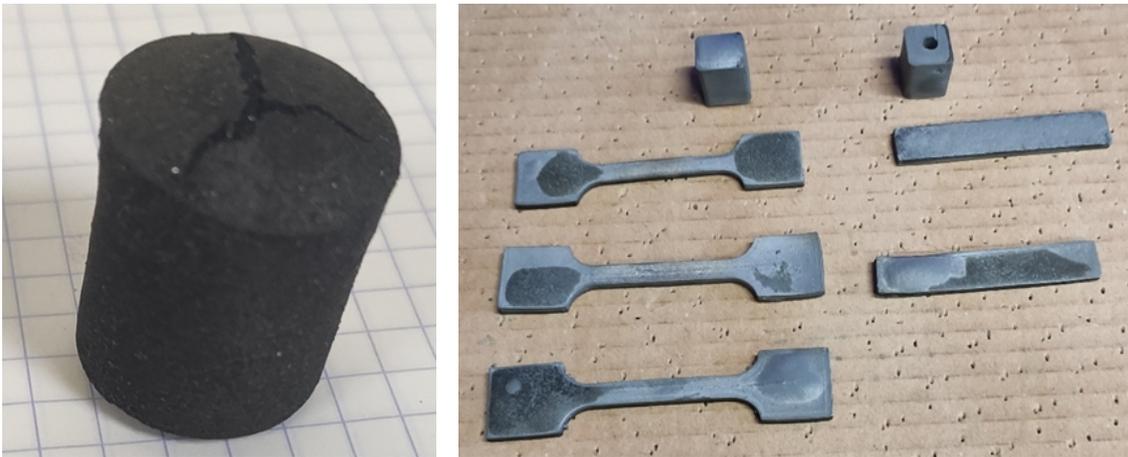


Figura 43: Exemplos de problemas de desaglomeração e sinterização.

Para concluir com este equipamento o ciclo para desaglomerar e sinterizar uma peça, cerca de 91h é demasiado longo e deve ser reduzido para permanecer competitivo. De facto, este tipo de ciclo implica um consumo muito elevado de eletricidade e um consumo muito elevado de gás: A 1,6L/min, é cerca de 8800L para um ciclo completo que corresponde aproximadamente a uma botija de gás de 50L a 200Bars.

Além disso, a peça tem propriedades mecânicas muito fracas para a utilizar tal como está. Um forno cúbico com paredes porosas no interior não é recomendado para esta aplicação. A desaglomeração é uma operação chave no processo. A qualidade desta operação é fundamental para não causar danos físicos (fissuração) ou químicos

(cementação) na peça. Uma grande parte dos defeitos que aparecem após a sinterização são gerados por uma desaglomeração inadequada.

3) Impressão de amostras para melhorar a desaglomeração e sinterização

Para melhorar a qualidade da desaglomeração e da fase de sinterização e para cobrir toda a cadeia de valor desta nova tecnologia, muitas amostras foram impressas com o Lynxter S600D e caracterizadas nas instalações da CEIT, ver Figura 44.



Figura 44: Amostras para melhorar a desaglomeração e a sinterização.

3.1) Otimização do processo de desaglomeração

A fim de escolher o ciclo de desaglomeração correto, testes termogravimétricos (TGA), foram realizados, Figura 45. Este teste mostra a perda de massa aglutinante devido à aplicação de um ciclo de aquecimento (5 °C/min taxa de aquecimento até 1000 °C na atmosfera H₂). A primeira curva (laranja) foi realizada numa amostra impressa e mostrou duas áreas de maior perda de massa aproximadamente em torno de (275 °C e 375 °C). A perda total de massa nesta amostra foi de 9,2 wt.% e isto foi completamente alcançado à volta de 500 °C.

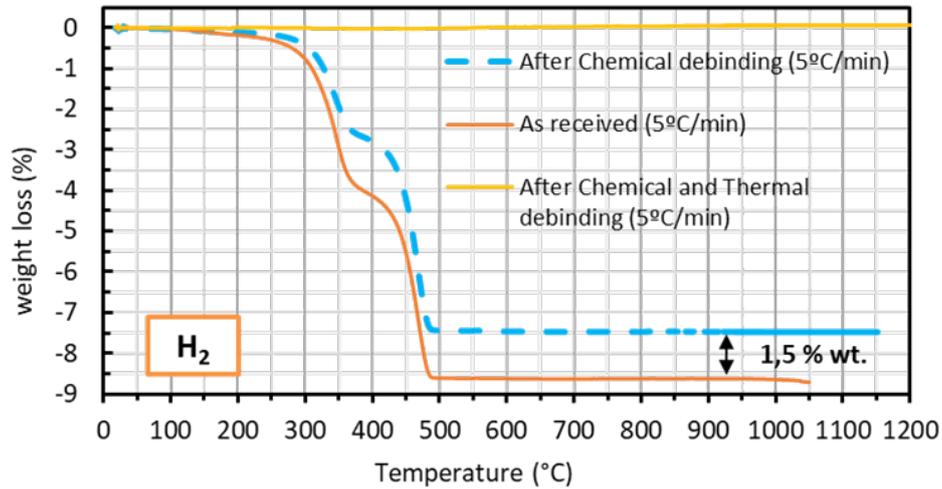


Figura 45: Resultados termogravimétricos de amostras de H13. Laranja: Ciclo TGA sobre a amostra recebida; Azul: Ciclo TGA após desaglomeração química; amarelo: Ciclo TGA numa amostra após desaglomeração térmica numa fornalha.

Tendo em conta os resultados da TGA, foi concebido um ciclo de desaglomeração com duas etapas de patamar (a 275 e a 375 °C) e temperatura máxima de 550 °C, para assegurar a remoção completa da aglomeração. Na primeira abordagem, a taxa de aquecimento utilizada foi de 1 °C/minuto. Esta taxa de aquecimento provou ser demasiado rápida, uma vez que as amostras mostraram presença de fissuras e deformação, Figura 46. Assim, o ciclo foi otimizado ao reduzir a temperatura de aquecimento para 0,5 °C/min, Figura 47.



Figura 46: Amostras de H13 após desaglomeração com taxa de aquecimento de 1 °C/min.

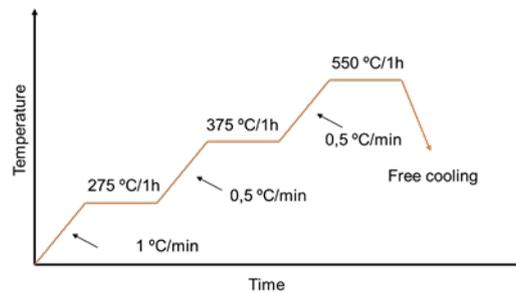


Figura 47: Ciclo de desaglomeração concebido com resultados de TGA para amostras H13.

Embora as fissuras tenham desaparecido após o novo ciclo de desaglomeração térmica, as amostras ainda apresentavam algumas deformações e bolhas (Figura 48 - a), e foi utilizada uma nova abordagem ao introduzir uma desaglomeração química antes da térmica.

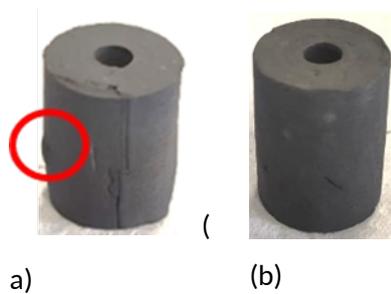


Figura 48: Amostras de H13 após desaglomeração térmica (a) e após desaglomeração química + desaglomeração térmica (b).

Para a **desaglomeração química**, as amostras foram completamente imersas em isopropanol (álcool etílico) durante 5 h a 55 °C; ver o laboratório montado na Figura 49. A TGA analisada em amostras com desaglomeração química mostrou o mesmo comportamento que as amostras recebidas, com duas inclinações diferentes, mas com menos quantidade (1,5 wt. %) de perda de aglutinante, Figura 45 curva azul. Embora a perda de massa diferente fosse muito pequena, esta etapa permite remover mais facilmente o ligante durante a desaglomeração térmica subsequente e assim a geometria das amostras lembra mais estável e sem a presença de bolhas, Figura 48b.

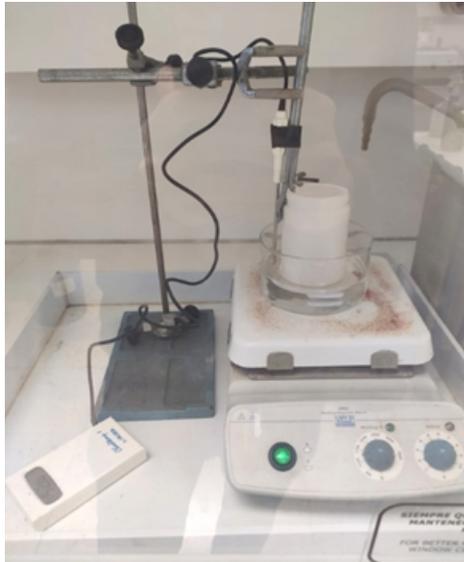


Figura 49: Laboratório preparado para a desaglomeração química.

Finalmente, graças à aplicação da desaglomeração química, a subsequente **desaglomeração térmica otimizada** pôde ser simplificada através da remoção das dois patamares, como mostrado na Figura 50. A desaglomeração térmica no CEIT foi realizado num forno do tipo Limberg com tubo metálico acoplado com tubos de entrada e saída para circulação de gás. Os ciclos foram realizados em atmosfera Arcal (97,5 % Ar e 2,5 % H₂). Após este ciclo foram novamente introduzidas amostras em ciclos TGA (linha amarela na Figura 45) confirmando a remoção total do ligante durante este ciclo otimizado e simplificado de desaglomeração térmica.

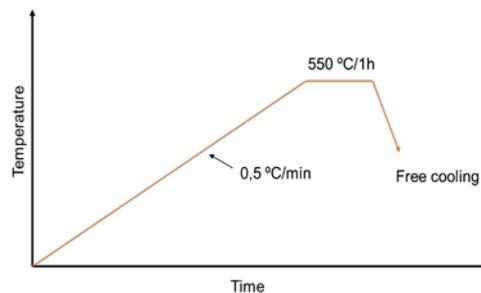


Figura 50: Desaglomeração térmica simplificada a ser utilizada após a desaglomeração química.

3.2) Otimização do processo de sinterização

A sinterização das amostras de H13 após a desaglomeração química + térmica foi efetuada num forno do tipo MRF. Dois tratamentos de sinterização (1350 °C e 1400 °C) foram aplicados com as mesmas condições, tempo de manutenção de 2h e atmosfera Arcal (97,5 % Ar y 2,5 % H2) - Figura 51. A diferença obtida com estes dois ciclos de sinterização é explicada no entregável 2.1. Relatório de material para MAM.

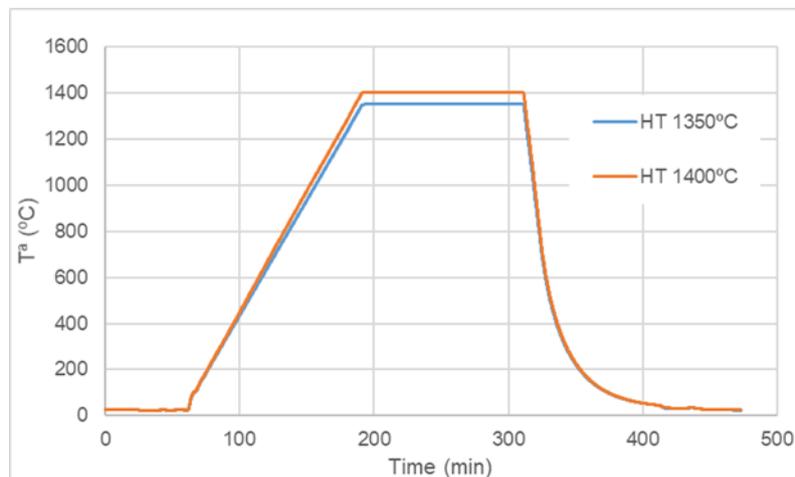


Figura 51: Ciclos de sinterização (1350 °C e 1400 °C) aplicados a amostras H13 após desaglomeração química + térmica.

3.3) Ciclos de HIP

Além disso, para obter uma maior densificação e poder fechar a porosidade interna do material, foi realizado um ciclo de prensagem isostática a quente (HIP) a 1150 °C e 150 MPa (pressão aplicada com argon) com uma manutenção de 2h. Foi utilizada uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e um arrefecimento livre para o ciclo HIP, Figura 52.

3.4) Validação dos componentes

A validação dos componentes foi feita, e os resultados são mostrados no Deliverable 2.1.

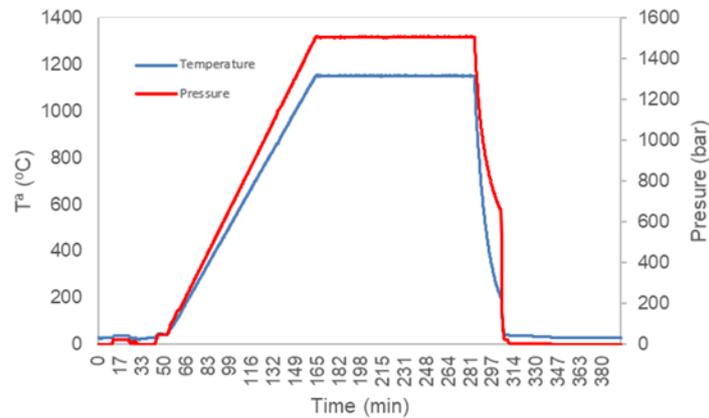


Figura 52: Ciclo HIP, 1150 °C, 2 h, 150 MPa, 10 °C/min de taxa de aquecimento e arrefecimento livre.

4) Redesenho da peça

O caso de utilização proposto pela empresa SOMOCAP tinha um canal de refrigeração convencional dentro da peça, ver Figura 53. Contudo, este simples orifício reto para arrefecimento não é suficiente e o arrefecimento não é eficiente: durante a fase de arrefecimento, a parte de polímero revela uma ovalização e não é completamente circular. A utilização de tecnologias de fabrico aditivo dá a opção de efetuar um arrefecimento conformado. Assim, foi feito um redesenho do arrefecimento interno, como se mostra na Figura 54.

Além disso, e como com todas as tecnologias MAM, foi adicionada uma espessura extra para o passo de maquinação da superfície externa e funcional.

Neste caso, foram adicionados 2 mm (ver Figura 55) a:

- Certificar-se de que existe material suficiente para ser maquinado e que não falta material;
- Antecipar possíveis deformações após desaglomeração e sinterização.

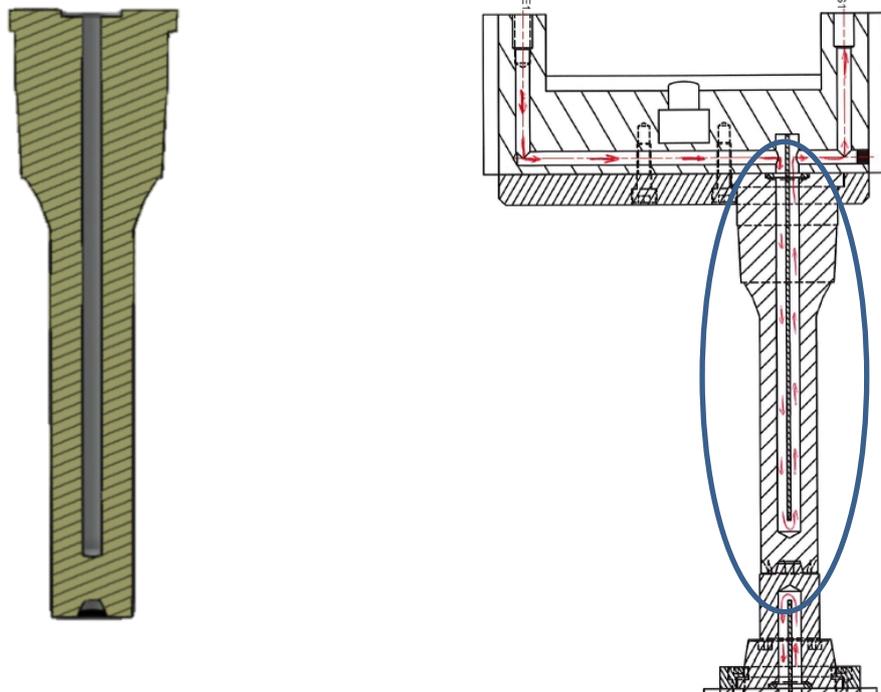


Figura 53: Regulação térmica original.

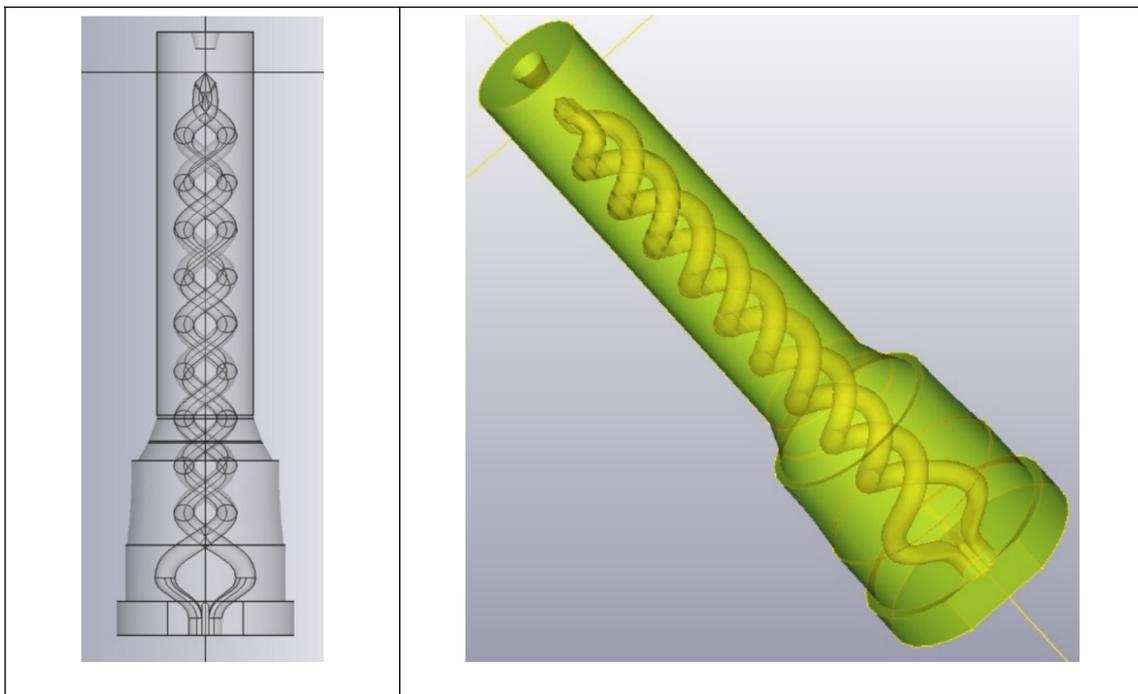


Figura 54: Arrefecimento conformado.

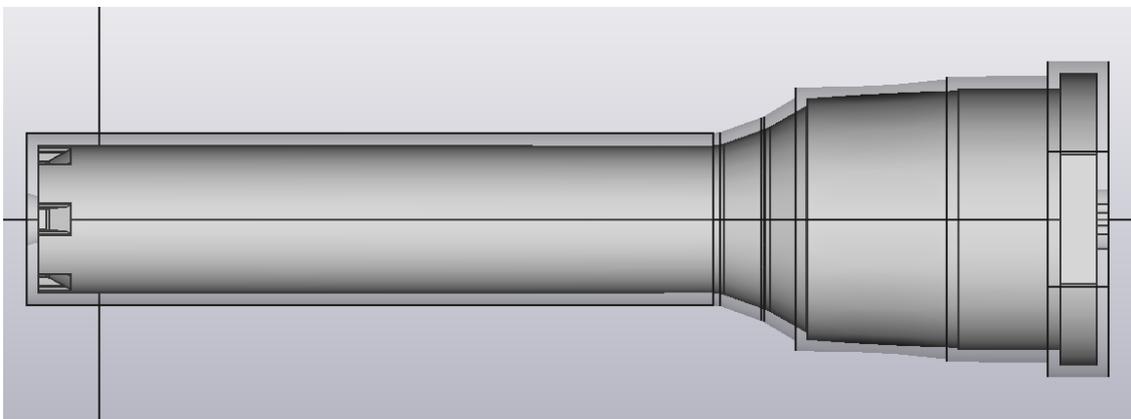


Figura 55: Sobre-espessuras para maquinagem.

Para as peças fabricadas pelo processo FFF com equipamento Markforged Metal X, foi aplicado o seguinte método:

- Fabrico de amostras para o fabrico de ambos os materiais: 17,4-PH e H13.

Os provetes de tração fabricados na orientação horizontal, provetes de dilatométrica, provetes HIP com forma cilíndrica e um orifício central e provetes para estudo micro-estrutural são mostradas na Figura 56.

- Seleção de parâmetros

Tabela 5. Parâmetros seleccionados para o fabrico de amostras

Altura da camada (mm)	0,125
Método de enchimento	Solid
Espessura do bordo (mm)	0,5-2
Espessura do telhado e do fundo (mm)	0-2



Figura 56: Provetes de tração, e outros, fabricados na orientação horizontal.

➤ Redesenho

A peça teve de ser fabricada em orientação horizontal devido à restrição da altura da câmara de fabrico. Assim, os canais de refrigeração precisavam de ser adaptados para evitar suportes no interior. A adaptação consistiu em escolher uma forma de gota, o que significa uma forma auto-suportável.

- Foi feito o fabrico de detalhes para verificar a integridade dos canais e a ausência de suportes no seu interior

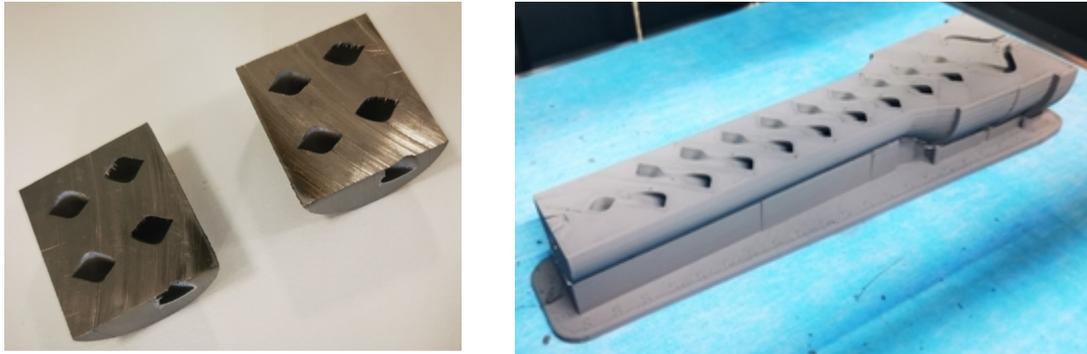


Figura 57. Pormenores dos canais de refrigeração adaptados

- Fabrico de demonstradores em ambos os materiais.

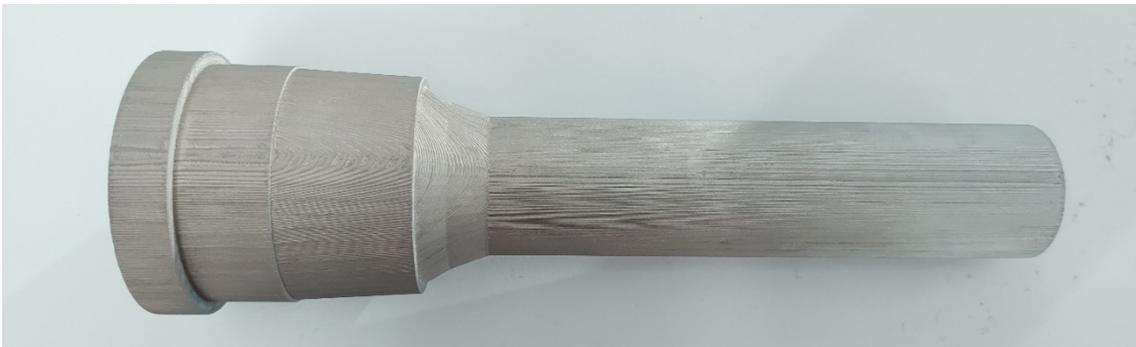


Figura 58: Peça fabricada.

- Maquinação para remover os 2 mm de sobre-espessuras na superfície externa e obter uma superfície lisa.



Figura 59: Peça final maquinada.

As lições aprendidas no desenvolvimento deste piloto demonstrativo são:

- A máquina de Markforged, é muito fechada, pelo que o processo não pode ser melhorado. Devido a restrições dimensionais na câmara de fabrico e no forno, teve de ser impressa horizontalmente e, portanto, foi aplicado um redesenho adicional nos canais para evitar suportes.
- HIP ajudou a fechar a maioria dos poros atingindo cerca de 98 % de densidade. Devido a isto, as propriedades mecânicas foram melhoradas em grande quantidade.

Piloto PT2-VIDRIMOLDE

Fabrico

Fabrico do corpo principal por L-PBF

O molde do Piloto PT2 foi fabricado em duas fases. Primeiro, o corpo principal foi fabricado por L-PBF, numa empresa local (DRT), devido ao tamanho da peça. Este corpo foi fabricado utilizando pó EOS StainlessSteel CX, um "aço para ferramentas caracterizado por ter uma boa resistência à corrosão, combinada com elevada resistência e dureza"[1]. A seguir, esse corpo foi adicionado de camadas de Inconel 718 por Deposição de Energia Direcionada a Laser (L-DED).

Antes do fabrico da peça em si, o pó foi analisado e foram produzidos provetes de L-PBF, para realizar testes de deposição de L-DED. Os resultados da primeira tarefa podem ser consultados no entregável D 2.1. Relatório sobre Material para Fabrico Aditivo Metálico. Quanto aos testes de deposição, são descritos a seguir.

Testes de deposição em L-DED

Os testes de deposição foram realizados num Trumpf TruLaser Cell 3000, com os parâmetros do processo de base mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros de L-DED

Parâmetro	Valor
Velocidade (m/min)	0.4
Diâmetro da foco LASER (μm)	2000
Modo de operação de saída laser	Anel
Potência do laser (W)	800
Densidade de potência superficial (W/mm^2)	255

Fluxo de massa (g/min)	5
Fluxo de gás portador (l/min)	4 (He)
Fluxo de gás do bocal (l/min)	15 (Ar)

A investigação seguinte caracterizará a hibridação L-DED com o processo L-PBF. Os objetivos deste trabalho são a clarificação dos seguintes parâmetros do processo:

- Espessura da camada sólida que cobre a estrutura de treliça interna. A investigação procurará reduzir este valor de espessura, evitando ao mesmo tempo a criação de defeitos no interior da estrutura;
- Parâmetros de fabrico para o processo L-DED, sendo estes a potência do laser (P), a taxa de alimentação (F) e o fluxo de pó (Q).

Metodologia: ensaios de revestimento único

Foram realizados ensaios de cordões simples, combinando os conjuntos de parâmetros descritos na Tabela 9 com substratos de diferentes espessuras: 6, 1 e 0,7 mm - Tabela 10. As esferas fabricadas têm um comprimento de 25 mm e foram centradas na superfície de 15mm x32mm.

Tabela 9: Referência L-DED conjunto de parâmetros do processo

	P (W)	F (mm/min)	Q (g/min)	P/F
Ref.	600	525	5.5	1.143
Reduced	500	525	5.5	0.952

[1] EOS, EOS StainlessSteel CX Folha de dados do material.

Tabela 10: Parâmetros do plano de ensaio de esferas simples

N.	Test type	Parameter set	Substrate thickness (mm)
1	Single bead	Ref.	6
2	"	Reduced	6
3	"	Ref.	1
4	"	Reduced	1
5	"	Reduced	0.7

Metodologia: testes sobrepostos

Foram produzidos ensaios de camadas utilizando os valores reduzidos dos parâmetros, em substratos de 2 e 1 mm de espessura - Tabela 11. Estas camadas consistem em 5 cordões sobrepostos, com uma distância de 1 mm entre eles. A fim de simular o efeito que uma maior área de deposição teria no processo de fabrico é definido um tempo de arrefecimento de 5 segundos após cada cordão ser depositado.

Tabela 11: Parâmetros do plano de teste de camadas

N.	Test type	Parameter set	Substrate thickness (mm)
6	Layer	Reduced	2
7	"	Reduced	1

Metodologia: parede de cordões simples

Foi realizada a fabricação de uma única parede de cordões utilizando os valores reduzidos dos parâmetros num substrato de 2 milímetros - Tabela 12. A parede consiste em 20 cordões, depositadas na mesma direção e com um tempo de arrefecimento de 10 segundos entre cada uma deles.

Tabela 12: Parâmetros do plano de ensaio de camadas

N.	Test type	Parameter set	Substrate thickness (mm)
8	Wall	Reduced	2

Após o teste acima referido, foi realizada uma análise das amostras fabricadas por análise metalográfica e a medição da deformação causada pela tensão residual do processo.

Resultados dos testes de deposição: Testes de cordões simples

A Figura 60 mostra a análise metalográfica da interface entre o substrato L-PBF e o talão L-DED.

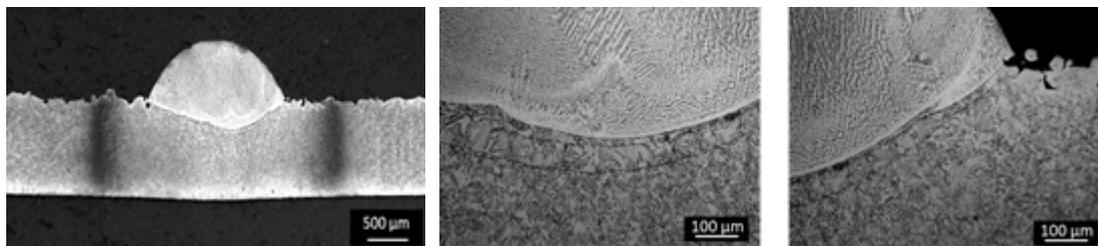


Figura 60: A interface L-PBF / L-DED

A partir da observação da Figura 60 (à direita), é possível observar duas linhas que distinguem uma descontinuidade no substrato, seguindo a linha de diluição. Isto poderia indicar a formação de micro-fissuras no substrato.

A Tabela 13 mostra as medições da Zona Afetada pelo Calor (HAZ). É possível observar que, para o substrato mais fino, a HAZ é mais larga.

Tabela 13. Medições da Zona Afetada pelo Calor (HAZ) para os testes 4 e 5.

N.	Substrate thickness (mm)	HAZ Measurements (mm)
4	1	2.89
5	0.7	3.88

Resultados dos testes de deposição: Testes de camadas

A Figura 61 mostra a secção transversal da camada depositada em amostras de base de 2 mm (em cima) e 1 mm (em baixo) de espessura. Pode-se observar que os parâmetros ótimos do processo L-DED num substrato PBF são os reduzidos da Tabela 14.

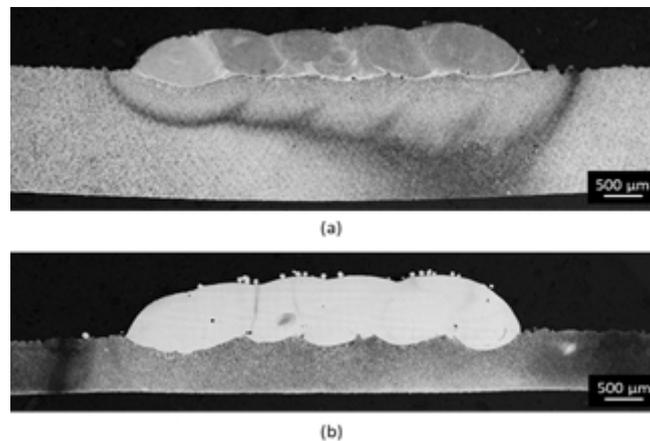


Figura 61: Secções transversais das camadas fabricadas: (a) n. 6, e (b) n. 7.

A Figura 62 mostra as amostras 6 e 7 após a deposição. Observa-se uma deformação significativa na amostra 7. Isto é ainda ilustrado na Figura 63. Em conclusão, a fabricação num substrato tão fino quanto 1 mm é viável, mas com uma deformação significativa da peça.



Figura 62: Amostras 6 e 7 após a deposição. A deformação observada é significativa, especialmente na amostra 7.

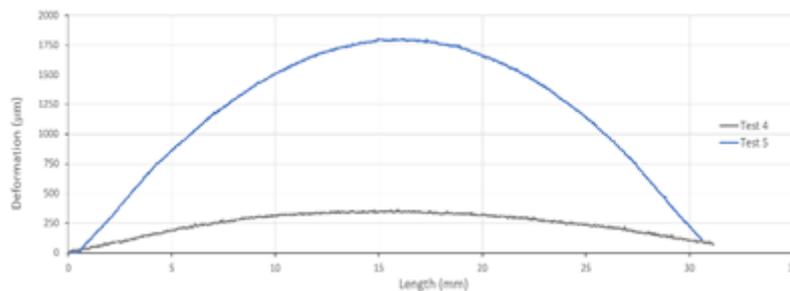


Figura 63: Medição da deformação vertical nas amostras 6 e 7 - Testes 4 e 5, respectivamente.

Resultados dos testes de deposição: Teste de parede

A secção transversal da parede fabricada de cordões simples é mostrada na Figura 64. Devido ao facto de a espessura do substrato utilizado ser maior do que a dos testes anteriores (2 milímetros), o HAZ é significativamente reduzido em comparação com os mesmos.

Resultados dos testes de deposição: Temperatura durante o fabrico

A Figura 65 representa a análise da temperatura durante o fabrico das amostras 4 e 5, como exemplo. Verifica-se uma temperatura mais elevada em substratos mais finos.

A Figura 66 representa o perfil de temperatura de fusão na fabricação de n.4, a título de exemplo. É observável que a temperatura do poço de fusão permanece entre os valores de 2000-2300 °C em todos os casos.

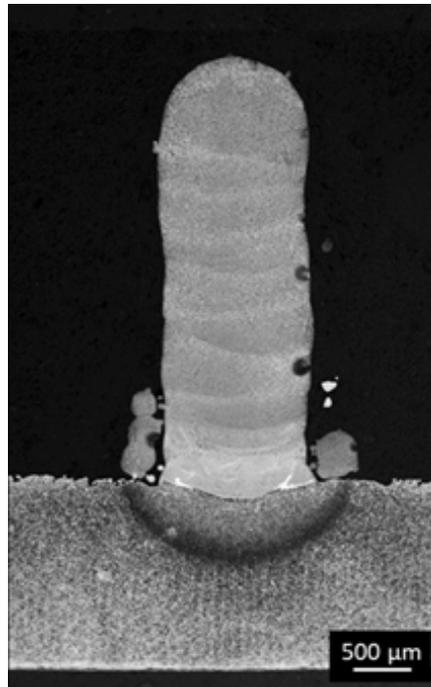


Figura 64: Teste de parede (teste 8).

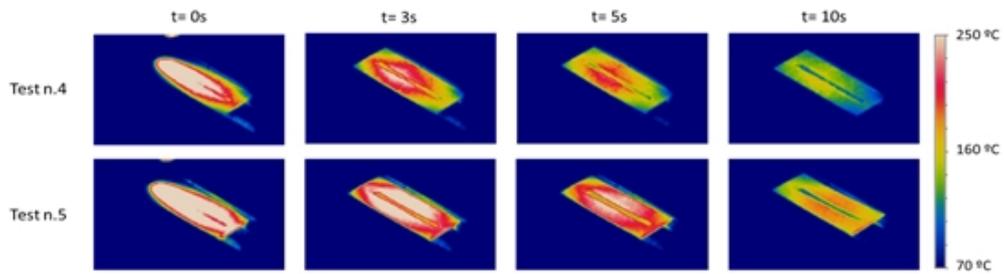


Figura 65: Análise da temperatura durante o fabrico para as amostras 4 e 5.

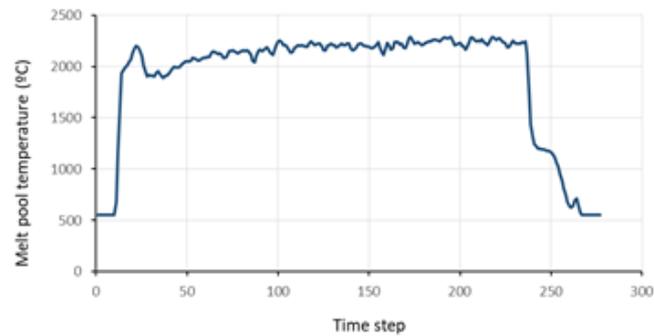


Figura 66: Perfil da temperatura da caldeira de fusão na fabricação de n.4.

Resultados dos testes de deposição: Conclusões

Uma potência laser (P) de 500 W, taxa de alimentação (F) de 525 mm/min e fluxo de pó (Q) de 5,5 g/min são os parâmetros ideais para a deposição de material em substratos finos.

Com estes parâmetros, substratos tão finos como 0,7 milímetros de espessura podem ser utilizados na fabricação de cordões simples.

No caso de fabrico de camadas, é possível a utilização de substratos com uma espessura de 1 mm, embora a deformação do substrato nessas condições deva ser tida em consideração.

Resultados de fabrico

A Figura 67 retrata o molde depois de fabricado por L-PBF. A peça foi então enviada à UPV para depósito por L-DED. A Figura 68 retrata o molde depois de depositado por L-DED.



Figura 67: Molde para vidro fabricado por L-PBF.



Figura 68: Molde após deposição por L-DED.

Pós-processamento

O pós-processamento da peça L-PBF envolveu a separação da placa de base, através de eletroerosão de fio. Isto foi realizado na mesma empresa (DRT) que possui o equipamento apropriado para esta tarefa. Não foi efetuado qualquer tratamento térmico.

As lições aprendidas no desenvolvimento deste piloto demonstrativo são:

- A tecnologia de moldação de vidro tem desafios específicos que fazem com que o fabrico alternativo de moldes por AM seja, em princípio, menos atrativo. Estes fatores são o baixo preço do molde convencional e o tempo de ciclo reduzido (tipicamente 5s) que deixam menos potencial de melhoria;
- O fabrico de um molde para vidro utilizando AM é demorado e tem um custo inicial muito elevado. Mas a combinação dos processos L-PBF e L-DED permitiu obter um molde com melhor desempenho térmico (devido aos canais de refrigeração conformados) e provavelmente com melhor duração, uma vez que toda a superfície do molde é agora revestida com uma liga à base de níquel (enquanto que no caso dos moldes convencionais o revestimento está apenas nas bordas da superfície do molde);

- É necessário demonstrar, através de instalações de testes piloto, o desempenho e a viabilidade desta solução, particularmente aos fabricantes de peças de vidro. Espera-se que a sua hesitação em permitir testes *in situ* deva ser mitigada.

Interreg Sudoe



EUROPEAN UNION

ADDITOOL

European Regional Development Fund

www.additool.eu