

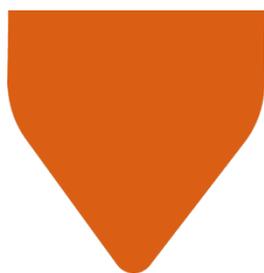
Interreg



Sudoe

ADDITool

European Regional Development Fund



D 2.3.1. RELATÓRIO DO ESTUDO DE VIABILIDADE

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. ESTUDO TECNOLÓGICO E ECONÓMICO.....	4
2.1. Piloto FR1- LAUAK.....	4
2.2. Piloto PT1-MOLDETIPO.....	15
2.3. Piloto SP1- MEUPE/INESPASA.....	21
2.4. Piloto FR2-SOMOCAP.....	24
2.5. Piloto PT2- VIDIRIMOLDE.....	32
3. CONCLUSÕES.....	37

1. INTRODUÇÃO

Na sequência dos resultados obtidos durante a Atividade 2.1 (Materiais para o fabrico aditivo metálico) e 2.2 (Fabrico, pós-processamento e caracterização de demonstradores), este documento pretende analisar a viabilidade tecnológica e económica de cada piloto desenvolvido durante o projeto ADDITOOL.

O principal objetivo deste estudo é comparar e analisar os resultados alcançados durante o desenvolvimento dos casos de utilização do Fabrico Aditivo Metálico (MAM), com os processos convencionais que são aplicados no ambiente real das PME. Concretamente:

- Estudo do processo de fabrico convencional que as PME utilizam para o fabrico da ferramenta-alvo;
- Análise de viabilidade tecnológica para a implantação de processos de fabrico aditivo apropriados para o fabrico dos componentes;
- Estudo económico da implantação do MAM ou modificação dos processos pela adição do MAM e comparação do custo da peça para obter o caso de estudo;
- Benefícios que o MAM ofereceu para a obtenção do componente.

Os demonstradores fabricados pelos parceiros do ADDITOOL foram testados em cada empresa (parceiros associados das PME), diretamente no seu local de produção. O objetivo é validar ou não a relevância da utilização das tecnologias MAM nos seus processos de produção e comparar com o desempenho da peça original.

2. ESTUDO TECNOLÓGICO E ECONÓMICO

2.1. Piloto FR1- LAUAK

Enquadramento

As peças-piloto oferecidas pelo parceiro associado LAUAK são dois tipos de gabaritos para controlar a boa forma de uma chapa metálica de avião.

Estas duas ferramentas são originalmente maquinadas a partir de um bloco de aço 40CMD8T pré-tratado a 110MPa, aço que beneficia de uma boa maquinabilidade e desempenho mecânico adequado.

As tolerâncias das superfícies funcionais cumprem a norma ISO 2768 mK com um Ra de 3,2µm. Em toda a peça, as tolerâncias são de 0,1mm +/-0,05mm.

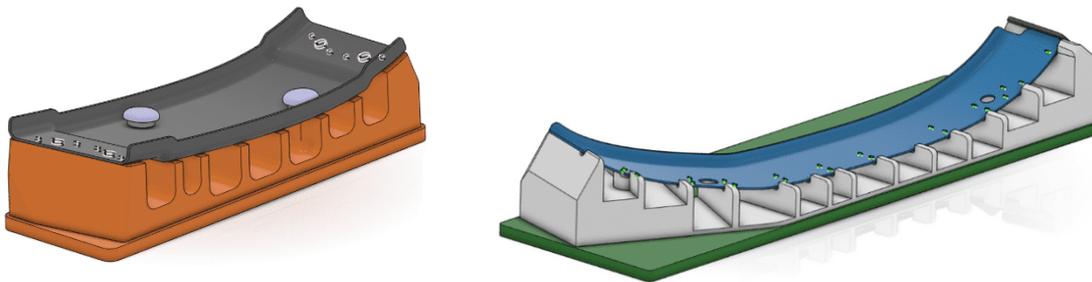


Figura 1 LAUAK peças D54516181 & D54516298

A peça D54516181 (em laranja na Figura 1) é produzida internamente pela empresa LAUAK, que dispõe de todos os meios necessários para fabricar a peça:

- Tempo de entrega de material: 1 semana - Bloco de 40CMD8T (200 x 100 x 50mm)
- Maquinagem: Entre 15h e 20h e algumas ferramentas de corte

- Preço de custo: 1750 €, incluindo estudo / fornecimento de material / fabrico / controlo tridimensional.
- Ciclo de vida: 1000 peças

A peça D54516298 (em cinzento na Figura 1) é produzida internamente pela empresa LAUAK, que dispõe de todos os meios necessários para fabricar a peça:

- Tempo de entrega de material: 1 semana - Bloco de 40CMD8T (600 x 200 x 100mm)
- Maquinagem: mais de 100h e muitas ferramentas de corte
- Preço de custo: 3500 €, incluindo estudo / fornecimento de material / fabrico / controlo tridimensional.
- Ciclo de vida: 1000 peças

Objetivos do piloto

O objetivo deste piloto será triplo:

- Manter um preço de custo semelhante para o fabrico.
- Manter um "time-to-market" equivalente ou mais reduzido.
- Melhorar o desempenho (aumentar a vida útil) ao mesmo tempo que se reduz os custos e o tempo de maquinação.

Para atingir estes objetivos, eis o método que foi utilizado:

- Caracterização do material: matéria prima, bem como a peça fabricada, para cada tecnologia
- Simulação de temperaturas e tensões residuais durante o fabrico
- Fabrico das duas ferramentas com 3 tecnologias diferentes:
 - o DED LASER - fio : Peça D54516181 - Fabrico da peça completa
 - o DED Arco - fio: Peça D54516298 - Fabrico da peça completa com um redesenho.

- o DED LASER - Pó: Peça D54516298 - Revestimento para melhorar a dureza apenas no topo da peça (apenas a parte em contacto com a peça da aeronave)
- Digitalização 3D das peças para ver quaisquer deformações antes do tratamento térmico e após a maquinação
- Tratamento térmico
- Maquinação
- Controlos e Testes em condições reais de utilização

Seleção do material

Sendo o material utilizado pela LAUAK (40CMD8T) muito pouco soldável, foi acordada uma mudança de material para permitir a fabricação e melhorar o seu desempenho mecânico, em particular a sua dureza. A melhoria da dureza permitirá assim um consequente prolongamento da vida útil.

Após um estudo sobre os materiais disponíveis, seleccionámos o aço 15CrMnMoV5-4-9-3 (15CDV6) para o fabrico destas peças.

	Designation	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	A5 (%)	Hardness (HRC)	Available for Wire D1,2mm	Available for DED Powder 40-110microns	Weldability
Original	40CMD8 (40CrMnMoS8-6)	850	1000	11	32 - 34	No	?	No
Proposal	EN4334 (15CrMnMoV5-4-9-3) // AIR 9117 : 15CDV6	930	1080 - 1280	10	42	Yes		Yes
Proposal	EN4331 (25CrMnMo4-2-2) // AIR 9117 : 25CD4	750	880 - 1080	12	46	Yes		Yes
proposal	INVAR 36	679	717	5.5	98 (RCB)	YES	YES	YES

Figura 2 : Seleção do material

A Figura 2 mostra que o aço 15CDV6 tem melhor desempenho do que o material original, com +10HRC e +80MPa no Re. Este material está disponível em fio, e é portanto adaptável para o processo DED Arco - fio, e também possui boa absorção de LASER infravermelho, sendo portanto possível usá-lo com o processo DED LASER de fio.

Sendo o objetivo deste piloto a comparação de 3 processos (DED LASER - fio, DED Arco - fio, e DED LASER - pó), foi necessário desenvolver um pó de 15CDV6 com as mesmas características químicas que o fio, ver Figura 3.

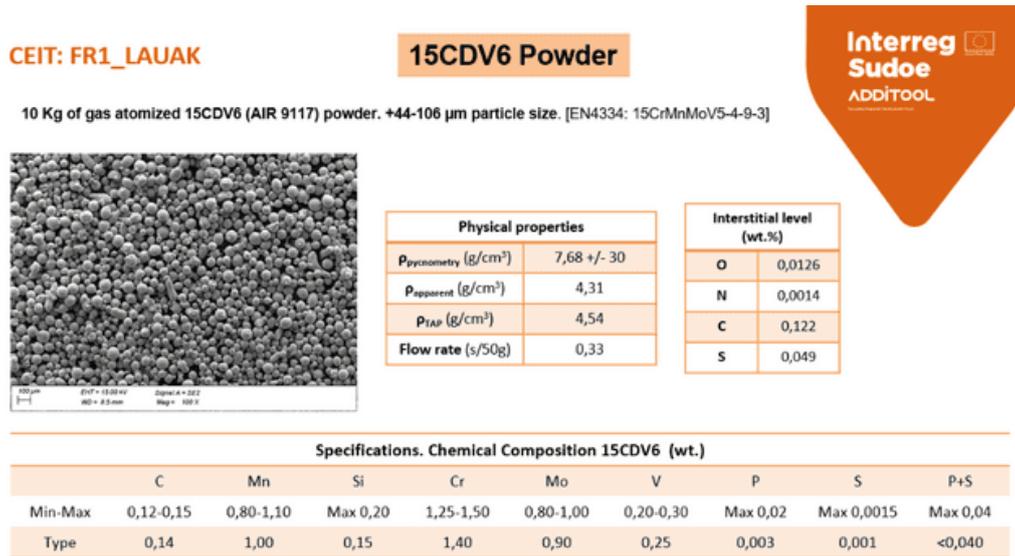


Figura 3 Desenvolvimento e caracterização do pó 15CDV6

Os resultados da caracterização do pó estão disponíveis no D2.1.1 Relatório sobre o material para MAM.

Estudo de viabilidade

Como detalhado anteriormente, foram utilizadas três tecnologias para fabricar estas duas peças:

- DED LASER - fio
- DED Arco - fio
- DED LASER - pó

A vantagem de utilizar a tecnologia DED LASER - fio é ter uma peça na sua forma quase final, reduzindo operações de maquinação adicionais, e ter uma elevado rendimento / taxa de deposição (superior às tecnologias de pó).

O DED Arco - fio torna possível ter uma peça na sua forma quase final, que é mais aproximada do que o DED LASER - fio, mas um rendimento / taxa de deposição muito mais elevada do que os outros dois processos.

Finalmente, o DED LASER - Pó é muito útil para a tarefa de revestimento/reparação ou para a funcionalização de uma peça. Dado que as taxas de deposição são relativamente baixas, não há necessariamente qualquer interesse em fabricar estas duas peças totalmente com esta tecnologia. Neste caso, foi rentável maquinar um bloco de AISI 1045 que tem a vantagem de ter um custo muito baixo e de ser muito fácil de maquinar e soldar, para depois adicionar material (15CDV6) às áreas funcionais a fim de aumentar a dureza superficial.

DED LASER - fio

O fabrico da peça LAUAK D54516181 foi realizado com os seguintes meios:

- Robot COMAU NJ165
- Cabeça PRECITEC CoaxPrinter
- LASER TRUMPF TrueDisk 6000 - 6kW
- Fio SelectArc 15CrMnMoV5-4-9-3 // Diâmetro 1.2mm

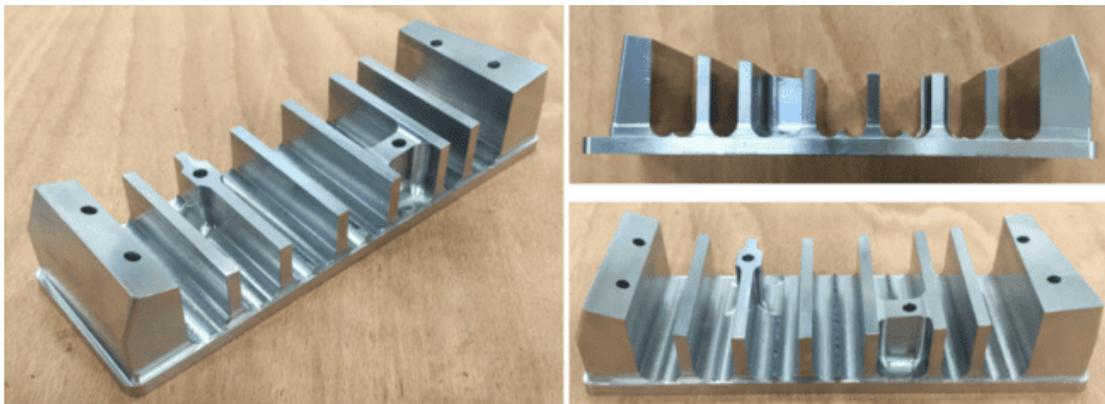


Figura 4 : Peça fabricada com DED LASER - fio

A peça foi verificada pela LAUAK e cumpre integralmente os requisitos. A dureza foi melhorada em comparação com a peça original, o que sugere um aumento da vida útil. Além disso, as propriedades metalúrgicas são boas, com desempenhos semelhantes ou mesmo superiores a um bloco forjado, ver Entregável D2.1.1 - Relatório sobre material para MAM.

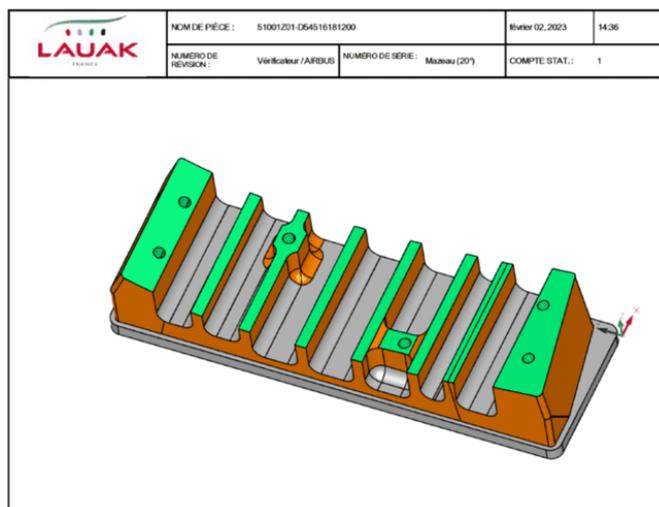


Figura 5 : Controlo da peça pela LAUAK

É difícil comparar os custos de fabrico de uma peça em dois locais e com dois modos de negócio diferentes. No entanto, aqui está uma estimativa de preço baseada em despesas reais de externalização.

Descrição	Preço	Atraso
Fornecimento de substrato 300 x 150 x 10mm	95€	3 semanas (pode ser muito reduzido)
Fornecimento de arame (2,2kg depositados)	215,5 € (98 €/kg)	3 semanas (pode ser muito reduzido)
Programação	112,5 € (900 €/dia)	1h
Fabrico	412,5 € (1500 €/dia)	2.2h
Digitalização & Tratamento térmico	500€	8h
Maquinagem	1620 € (externalizado) (pode ser	5h de maquinação - 1 semana

	<p> muito reduzido se feito internamente)</p>	<p> de subcontratação</p>
<p>Controlo</p>	<p>-</p>	<p>1 semana (realizado por LAUAK)</p>
<p>Total</p>	<p>2955.5€</p>	<p>5 semanas, incluindo 4,9 semanas em aquisições e subcontratação</p>

Eis o que é importante notar no fabrico desta peça com a tecnologia DED LASER - fio:

- Tempo de programação e fabrico da forma quase final em menos de 4 horas.
- O custo de 2955,5 € tem em conta os 1620 € de subcontratação de maquinaria e que podem ser grandemente reduzidos.
- O tempo de maquinação da forma quase final é de apenas 5h em vez de mais de 20h a partir de uma maquinação de um bloco. Isto conduz inevitavelmente a uma redução considerável do desgaste da ferramenta.
- O tempo de aquisição pode ser grandemente reduzido para uma empresa de produção.
- As propriedades metalúrgicas são semelhantes ou mesmo superiores ao forjado, ver documento D2.1.1 Relatório sobre o material para MAM.

DED Arco - fio

O fabrico da peça LAUAK D54516298 foi realizado com os seguintes meios:

- Robot FANUC Arcmate 120iC
- CMT Fronius TPSi
- Fio SelectArc 15CrMnMoV5-4-9-3 // Diâmetro 1.2mm



Figura 6 : Peça fabricada com DED Arco - fio

A peça também foi verificada e responde plenamente às necessidades do LAUAK. A dureza foi melhorada em comparação com a peça original, o que sugere um aumento da vida útil. Além disso, as propriedades metalúrgicas são boas, com desempenhos semelhantes ou mesmo superiores a um bloco forjado, ver Entregável D2.1.1 Relatório sobre material para MAM.

	NOM DE PIÈCE : 51001201-054510298200		février 14, 2023		0054	
	NUMERO DE REVISION :		NUMERO DE SÉRIE : AVEC LAMAGE		COMPTE STAT. : 1	

 DEFAUT DE FORME 0.2 DES FACES DE DESSUS

MM	LOC1 - PNT1	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.024	0.024	0.000
MM	LOC2 - PNT28	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	-0.003	-0.003	0.000
MM	LOC3 - PNT27	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	-0.010	-0.010	0.000
MM	LOC4 - PNT26	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.037	0.037	0.000
MM	LOC5 - PNT25	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.037	0.037	0.000
MM	LOC6 - PNT24	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.092	0.092	0.000
MM	LOC7 - PNT23	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.088	0.088	0.000
MM	LOC8 - PNT22	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.045	0.045	0.000
MM	LOC9 - PNT21	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.050	0.050	0.000
MM	LOC10 - PNT20	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.017	0.017	0.000
MM	LOC11 - PNT19	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.019	0.019	0.000
MM	LOC12 - PNT18	AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
		T	0.000	0.100	-0.100	0.002	0.002	0.000

Figura 7 : Controlo dimensional da peça fabricada por DED Arco - fio

Da mesma forma que no processo DED LASER – fio, é difícil comparar os custos de fabrico de uma peça em dois locais e com dois modos de negócio diferentes. No entanto, aqui está uma estimativa de preço baseada em despesas reais de subcontratação.

Descrição	Preço	Atraso
Fornecimento de substrato 650 x 250 x 14 mm	194 €	1 semana (pode estar em stock)
Fornecimento de arame (5,9 kg depositados)	527 € (90 €/kg)	3 semanas (pode estar em stock)
Programação	112,5 € (900 €/dia)	1 h
Fabrico	1312,5 € (1500 €/dia)	7 h (2,3 h de tempo de permanência que pode ser reduzido)
Digitalização	100 €	1 h
Maquinagem	3470 € (externalizado) (pode ser muito reduzido com formação)	3 semanas de subcontratação (problemas com distorções)
Controlo	-	1 semana (realizado pela LAUAK)
Total	5716 €	8 semanas (pode ser reduzida para 1 semana)

Eis o que é importante notar no fabrico desta peça com a tecnologia DED Arco - fio:

- Tempo para programar e fabricar a forma quase final foi de 7 horas, incluindo 2,3 horas de tempo de pausa - com uma taxa de deposição de 3,3 kg/h.
- O custo de 5716 € inclui os 3470 € de subcontratação na maquinação e que pode ser grandemente reduzido se for feita mais formação para maquinar a peça na forma quase final.

- O tempo de maquinação da forma quase final é de apenas 20 horas em vez de mais do triplo ou mesmo quádruplo de uma maquinação a partir de um bloco. Isto induz inevitavelmente uma redução considerável no desgaste da ferramenta - No total, mais de 40 kg de economia de material.
- O tempo de entrega pode ser muito reduzido para uma empresa de produção para um máximo de 1 semana.
- As propriedades metalúrgicas são semelhantes ou mesmo superiores ao forjado, ver Entregável D2.1.1 Relatório sobre material para MAM.
- A grande redução de material (mais visível para a peça maior), a redução do trabalho de maquinação e a possibilidade de utilização destas tecnologias para reparação, contribui para a sustentabilidade.

DED LASER - Pó

O fabrico da peça LAUAK D54516298 foi realizado com os seguintes meios:

- DED Trumpf Trucell 300 + 3kW Disco LASER.
- Alimentador de pó com cabeça coaxial
- Pó desenvolvido pela CEIT como parte do ADDITool - a mesma química do fio
- Bloco maquinado a partir de AISI 1045

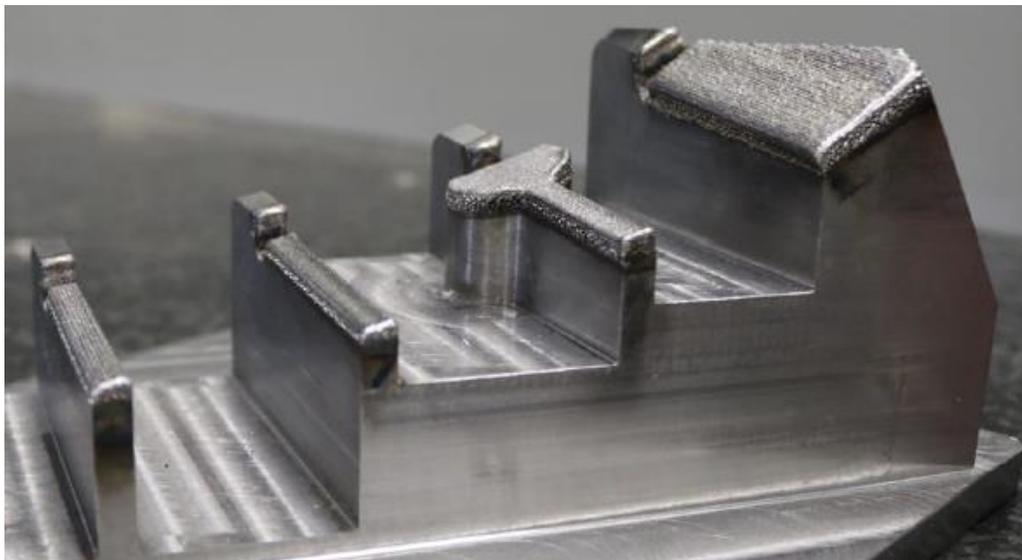




Figura 8 : Peça fabricada com DED LASER – Pó.

Esta peça não foi verificada porque foi apenas parcialmente maquinada para servir de demonstradora do projeto. Por outro lado, a dureza também foi melhorada em comparação com a peça original, o que sugere um aumento da vida útil - 39HRC na superfície e 18HRC no substrato. Em termos de custos, aqui está uma estimativa:

Descrição	Preço	Atraso
Fornecimento de substrato 570 x 175 x 95 mm	148 €	1 semana
Fornecimento de pó (0,33kg depositados com 70% de eficiência de deposição)	85,8 € (200 €/kg)	4 semanas (pode ser muito reduzido)
Programação	726 € (900 €/dia)	6,5 h
Fabrico	311,25 € (1500 €/dia)	1.66 h
Maquinagem	1.829,00 € (externalizado) (pode ser muito reduzido se feito internamente)	7h de maquinação - 4 semanas de subcontratação

Controlo	-	1 semana (realizado por LAUAK)
Total	3,100.00 €	9 semanas, incluindo 4 semanas em compras e 4 semanas em subcontratação

Eis o que é importante notar no fabrico desta peça com a tecnologia DED LASER - pó:

- Tempo de fabrico próximo da forma quase final em menos de 2 horas.
- O custo de 3100 € tem em conta os 1.829,00 € de subcontratação de maquinagem e que podem ser grandemente reduzidos.
- O custo da matéria-prima é grandemente reduzido com este processo. Além disso, este processo permite uma reparação se a ferramenta tiver sido desgastada e tiver perdido as suas dimensões.

2.2. Piloto PT1-MOLDETIPO

Enquadramento

Os canais de arrefecimento conformáveis, ou seja, os canais de arrefecimento concebidos para se adaptarem à geometria da peça para melhorar o seu arrefecimento, já foram conseguidos pelas tecnologias MAM em moldes para plásticos, com resultados significativos.

Nestas aplicações, o grau de otimização alcançado no desempenho térmico do molde traduz-se numa taxa de produção muito mais elevada, reduz os custos de produção e, por conseguinte, dá um valor acrescentado significativo ao molde.

A peça proposta é um inserto para um molde de injeção, utilizado no fabrico de uma peça bi-material (POM + Elastómero Termoplástico). Este inserto funciona em conjunto com outro inserto, trabalhando com um par para moldar a peça. No entanto, esta última não será estudada, por uma questão de simplicidade. O molde em si tem dois conjuntos de insertos. Em conjunto com uma rotação do molde, isto permite a injeção de dois materiais em simultâneo.

Os insertos funcionam como movimentos laterais, destacados no molde - Figura 10. O molde é concebido para produzir duas peças em cada injeção. Como mencionado, apenas um inserto foi produzida por fabrico híbrido, enquanto o outro inserto do par e o segundo conjunto de insertos foram produzidos por meios convencionais. Isto permitiu uma comparação dos seus desempenhos sem ter de trocar os insertos. Os componentes têm uma base (cinzenta na figura) que, devido à sua geometria, poderia ser fabricada utilizando quer uma abordagem híbrida, quer uma abordagem convencional. Neste último caso, cada inserto pode ser fabricado como 2 peças separadas, que são posteriormente montadas, ou a base pode ser fabricada convencionalmente e depois a parte ativa pode ser construída sobre ela, utilizando uma tecnologia de fabricação aditiva.

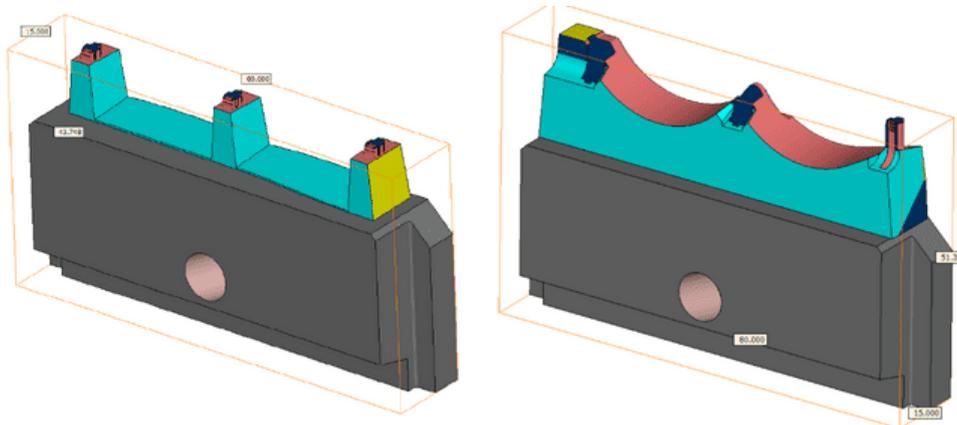


Figura 9. Os insertos que funcionam em conjunto para moldar a peça. Apenas o inserto da direita foi estudado e produzido por fabrico híbrido - SLM + maquinação.

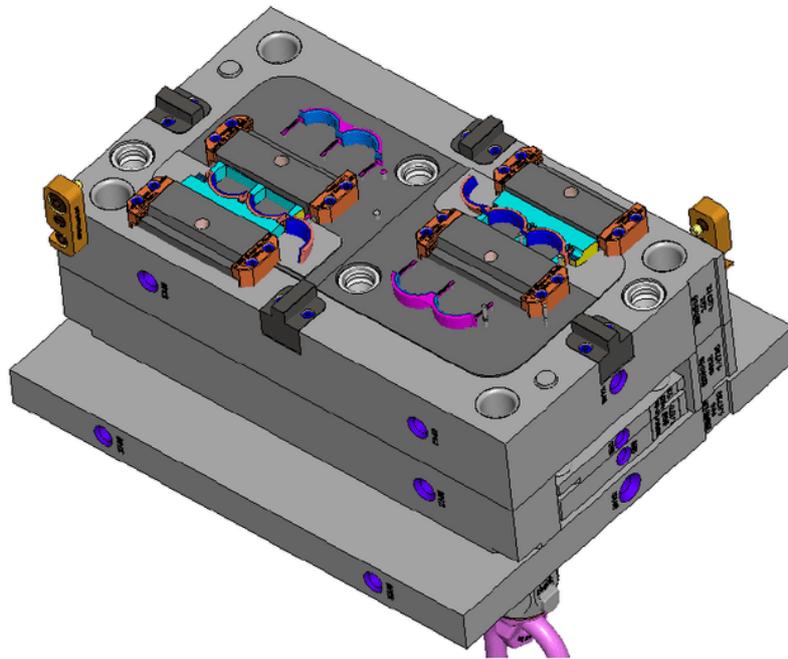


Figura 10. O molde onde os insertos são montadas. Os insertos azuis claros são mecanismos deslizantes. Um deles será fabricado por um processo híbrido.

Objetivos do piloto

O estudo de caso propõe-se otimizar o arrefecimento do inserto, acrescentando canais de arrefecimento conformados. A pequena dimensão da zona a ser arrefecida neste caso torna o fabrico de canais de arrefecimento conformados muito difícil para os processos convencionais. Isto é possibilitado através do seu fabrico pela tecnologia LASER em cama de pós (L-PBF).

O objetivo deste piloto é otimizar as metodologias de conceção e fabrico de insertos de moldes para a otimização do arrefecimento, empregando modelação avançada, incluindo otimização topológica, simulação térmica, fabrico híbrido e ensaios não destrutivos. A análise de custos também será abordada. Todos os resultados serão comparados com as soluções convencionais de fabrico.

Seleção do material

O material selecionado para o piloto é um aço para ferramentas comercial em pó - Böhler W360 - como alternativa ao aço padrão H13. Isto porque o W360 foi concebido para máquinas sem uma cama aquecida, que é o caso do Trumpf TruPrint 1000 que foi utilizado para fabricar o inserto.

Estudo de viabilidade

O inserto foi fabricado por L-PBF na sua forma completa. A operação de acabamento envolveu fresagem da base e maquinação por electro erosão (EDM) para a região ativa do inserto. Segundo a Moldetipo, estas operações de acabamento são semelhantes às necessárias para obter o inserto convencional (sem quaisquer canais de refrigeração). A diferença adicional foi a presença de entradas de arrefecimento para a ligação ao circuito de arrefecimento de água. Não foi possível determinar o desempenho a longo prazo do inserto, e as preocupações sobre a integridade estrutural derivadas das fissuras detetadas na análise não devem ser desconsideradas. Seria, portanto, relevante realizar um tratamento térmico ao inserto, após o fabrico por L-PBF e antes das operações de acabamento, para produzir uma peça mais resistente e talvez evitar fissuras.

Os insertos convencionais e L-PBF foram montados no molde e foram efetuados testes de injeção. Para comparação, foram considerados dois tempos de arrefecimento: 10s e 16s. As peças produzidas foram separadas em 4 grupos:

- C10 - inserto convencional, 10s de tempo de arrefecimento
- C16 - inserto convencional, 16s de tempo de arrefecimento;
- S10 - inserto L-PBF, 10s de tempo de arrefecimento;
- S16 - inserto L-PBF, 16s de tempo de arrefecimento.

Para a avaliação completa dos desvios em relação ao modelo CAD, foram analisados 5 peças de cada um desses tipos de grupos.

As figuras 11 e 12 mostram um exemplo da análise dimensional (desvio da geometria CAD) de 2 amostras de peças injetadas: fabricadas com o inserto L-PBF e fabricadas com o inserto convencional. Ambas as peças tiveram um tempo de arrefecimento de 16s (C16 e S16).

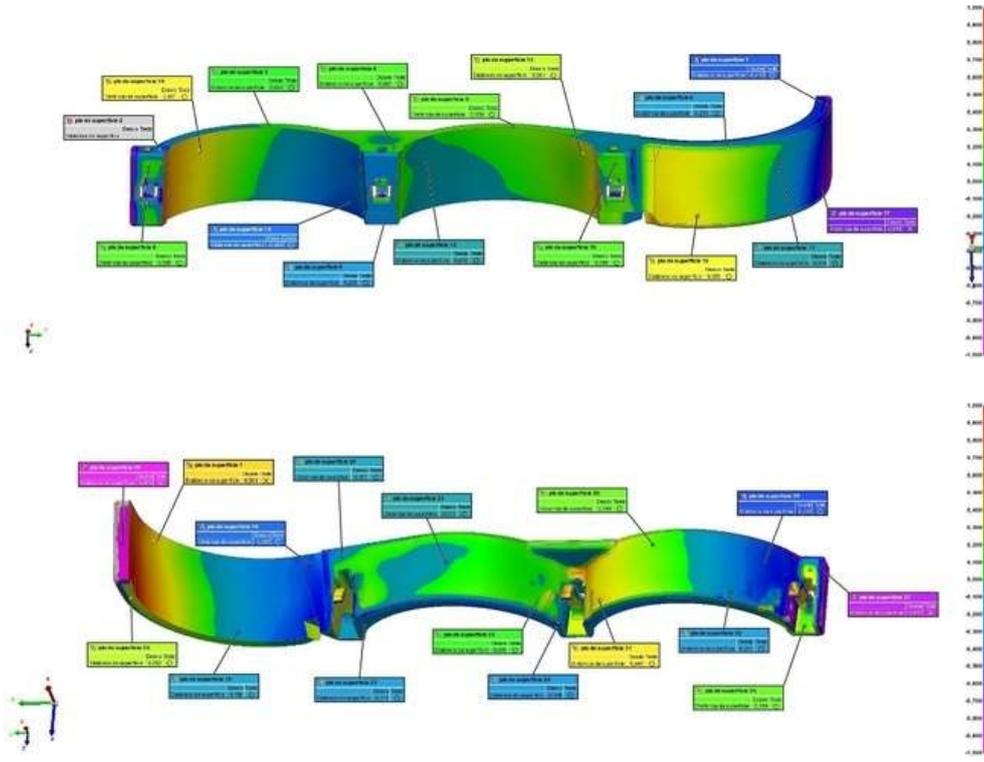


Figura 11- Análise dimensional das peças injetadas com o inserto L-PBF e arrefecidas durante 16s.

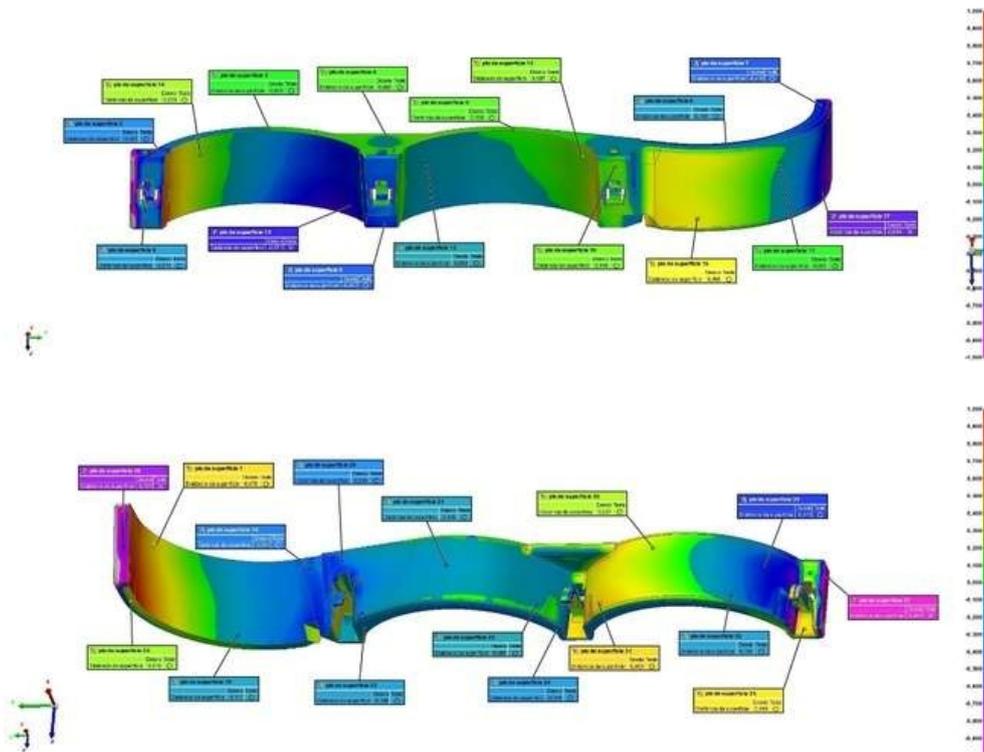


Figura 12- Análise dimensional das peças injetadas com o inserto convencional e arrefecidas durante 16s.

Foram medidos 32 pontos em cada peça. Uma análise detalhada dos desvios ao longo desses pontos é apresentada na Figura 13. O resumo do desvio médio e da média dos desvios-padrão é apresentado na Figura 14. É possível observar que a quantidade macroscópica e a tendência da distorção não é muito diferente entre todos os espécimes. Contudo, é possível detetar um menor grau de desvio da CAD nas peças L-PBF (S10 e S16), embora o desvio-padrão médio seja significativo.

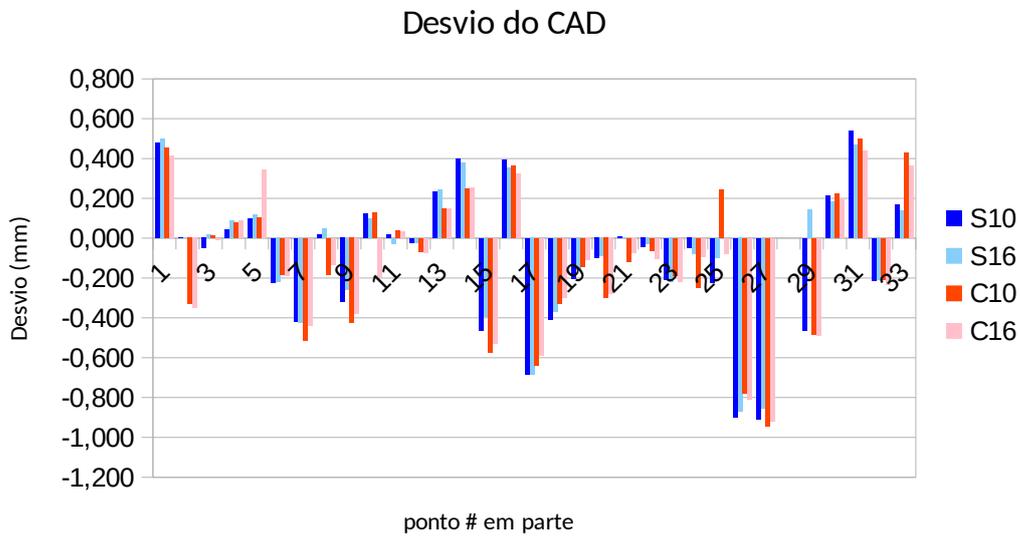


Figura 13- Desvios médios em cada ponto das peças.

Análise dimensional - desvios em relação ao CAD
 média das medições de desvio absoluto; desvio-padrão das medições

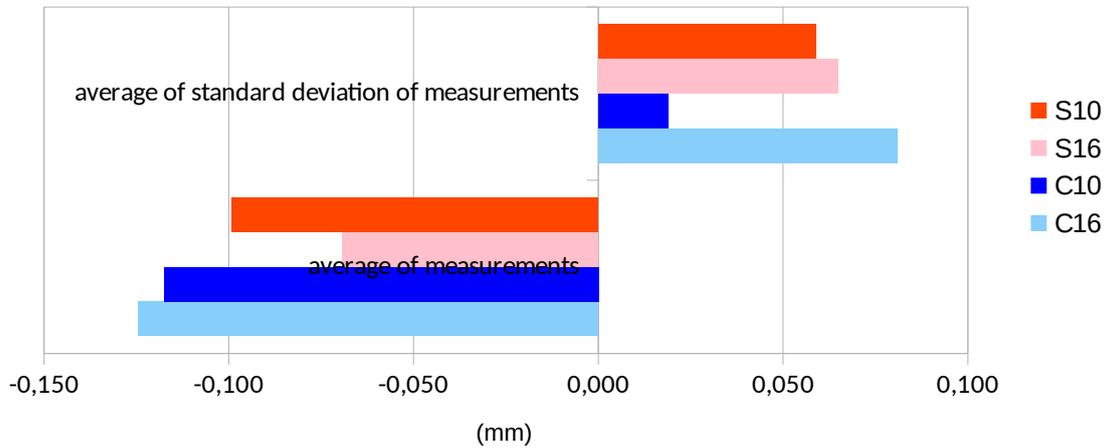


Figura 14- Média e desvio-padrão das medições para todos os espécimes

Para o estudo de viabilidade, os custos internos de modelação e produção do inserto L-PBF foram comparados com os mesmos custos para a produção do inserto convencional. A tabela 1 resume os elementos de custo considerados para ambas os insertos. O nível de detalhe de cada uma é diferente, uma vez que o inserto L-PBF foi fabricado internamente no CDRSP e o inserto convencional foi fabricado na Moldetipo e, portanto, existe uma limitação de informação, devido a questões de confidencialidade.

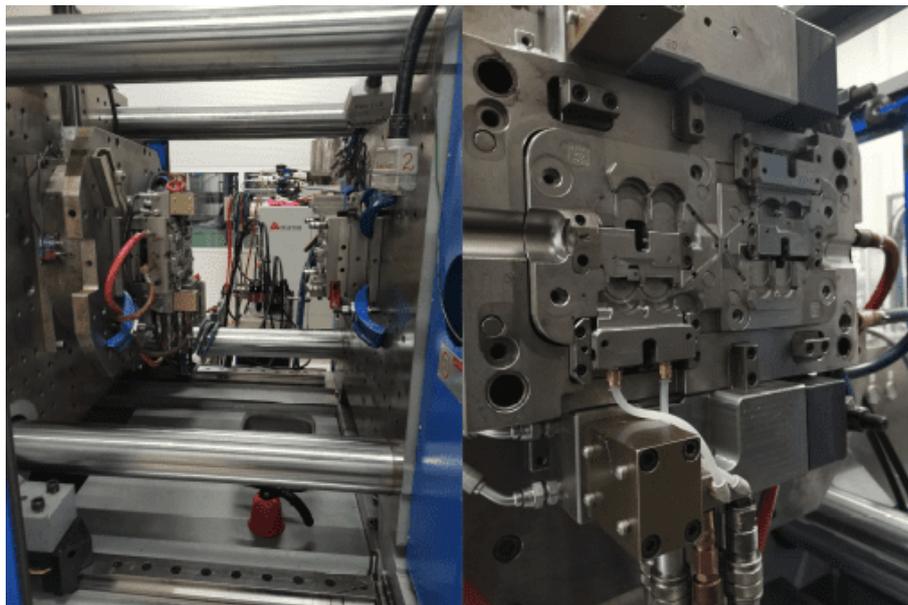


Figura 15 (esquerda) Máquina de moldação por injeção com molde montado; (direita) Detalhe da cavidade do molde mostrando o inserto L-PBF com entradas de refrigeração acopladas.

	Custo de fabrico (€)	Custo de acabamento (€)
Inserto L-PBF	Materiais e equipamento: Pó + tempo de impressão + gás + eletricidade + depreciação do equipamento + taxa de insucesso - 77 € Tempo (considerando a tarifa horária de 50 €) Modelação e simulações + Preparação + Pós-processamento - 925 € Total: 1002 €	Fresagem + EDM + ajustes - 100

Inserto convencional	Fabrico - 250 €	Fresagem + EDM + ajustes - 100
Diferença de custos	752 €	0

Pode observar-se uma diferença de custo de 752 €, que será utilizada como entrada para o estudo de viabilidade.

O estudo de viabilidade foi realizado com os seguintes parâmetros:

- desvantagem de custo inicial - -752 €
- diferença de tempo do ciclo de injeção (menor no inserto L-PBF) - 6s
- custo horário da máquina de moldação por injeção, incluindo os custos fixos do operador e os restantes - 40 €

Calculando os custos de produção para lotes de tamanhos variáveis de 1000 a 100000 peças, é possível determinar o ponto de compensação da desvantagem inicial do custo para o inserto L-PBF - Figura 16. Como se pode observar, um lote de apenas cerca de 12000 peças é suficiente para recuperar a diferença de custo do inserto L-PBF. Este é um resultado muito interessante, uma vez que o tamanho do lote é bastante pequeno no contexto de uma tarefa de produção de moldação por injeção.

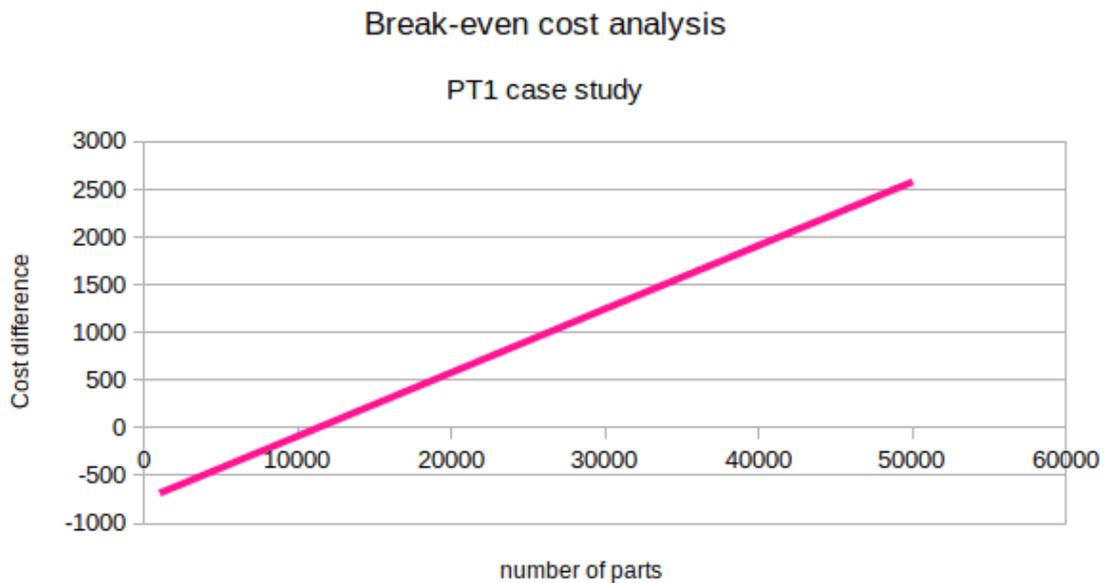


Figura 16: Análise de retorno de investimento para o inserto L-PBF em comparação com o inserto convencional.

2.3. Piloto SP1- MEUPE/INSPASA

Enquadramento

O piloto analisado nesta secção é um sistema de perfuração manual desenvolvido pela INSPASA para o setor aeronáutico (Figura 17.a). Este sistema deve ser compacto (sem espaço interior para além da eletrónica e motores) e leve. A carcaça foi originalmente obtida através da maquinagem de um bloco de Alumínio (material de baixa densidade e de baixo custo). Esta solução compacta demonstrou algumas dificuldades associadas à dissipação de calor. Durante o funcionamento, o calor gerado pelos motores produz um aumento de temperatura onde o operador precisa de colocar a sua mão (Figura 17.b), até mais de 60°C. Dependendo das rotações por minuto, os motores podem até parar devido a uma temperatura de funcionamento elevada.

O tempo de entrega de todo o sistema é de 3-4 semanas e pode ser produzido com menos de 1.000 €. No entanto, a peça em estudo é a carcaça que alberga os motores (à esquerda), Figura 17.b), e este componente poderia ser produzido em 1 dia (8h) e a um custo de 500 € aproximadamente.

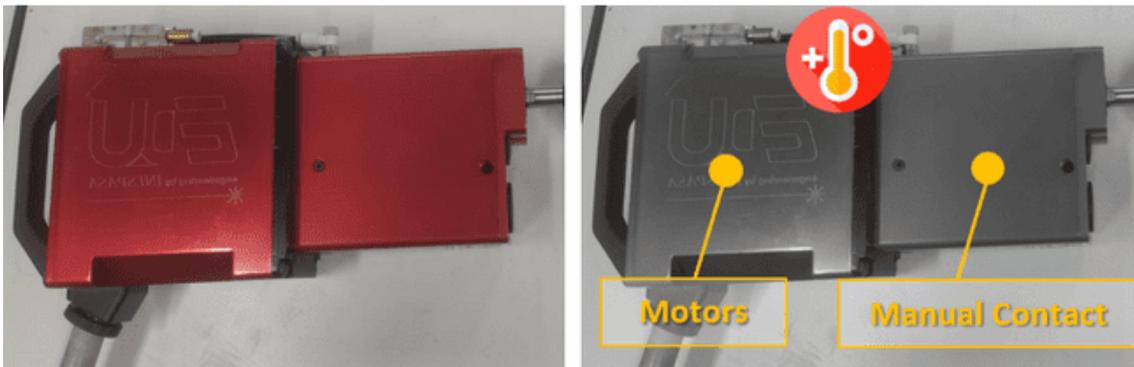


Figura 17. Imagem de (a) carcaça original e (b) áreas com má dissipação térmica

Objetivos do Piloto

Os principais objetivos deste piloto são enumerados abaixo:

- Fabricar toda a caixa de alumínio com Fusão em Leito de Pó por LASER (L-PBF).

- Aumentar o desempenho térmico adicionando canais ativos (canais de arrefecimento dentro do componente) ou dissipação passiva de calor (treliça ou estrutura giróide).
- Comparar as propriedades térmicas entre a peça maquinada original com os resultados obtidos pelo L-PBF
- Diminuir a necessidade de ferramentas para a maquinação
- Procurando otimizar a tecnologia já existente, acrescentando funcionalidade a uma ferramenta.

Para cumprir estes objetivos, a solução MAM proposta foi fabricar a carcaça em que os motores estão localizados, incluindo canais internos para refrigerar a carcaça e os motores (Figura 18). Uma vez que o sistema já tinha um subsistema pneumático interno, o mesmo fluxo de ar pode ser utilizado para melhorar o desempenho térmico.

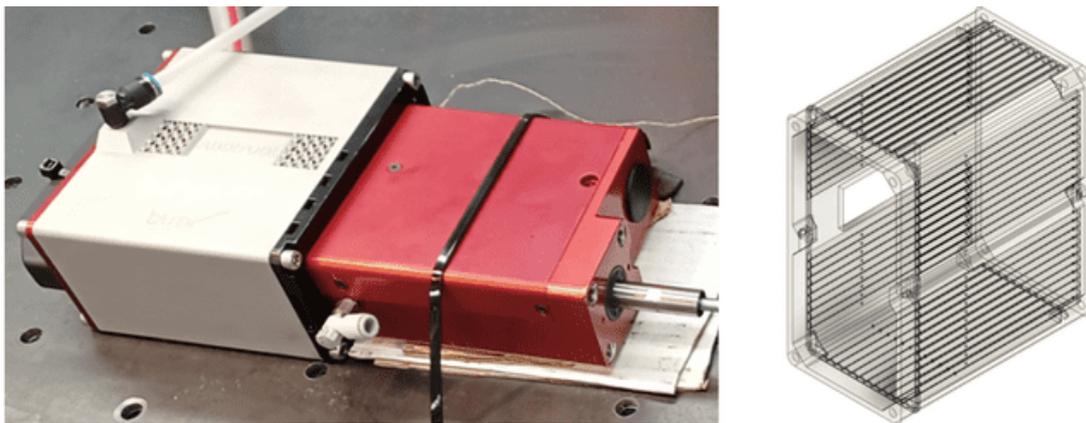


Figura 18. Imagem de (a) carcaça fabricada por MAM e (b) visão esquemática dos canais internos.

Seleção do material

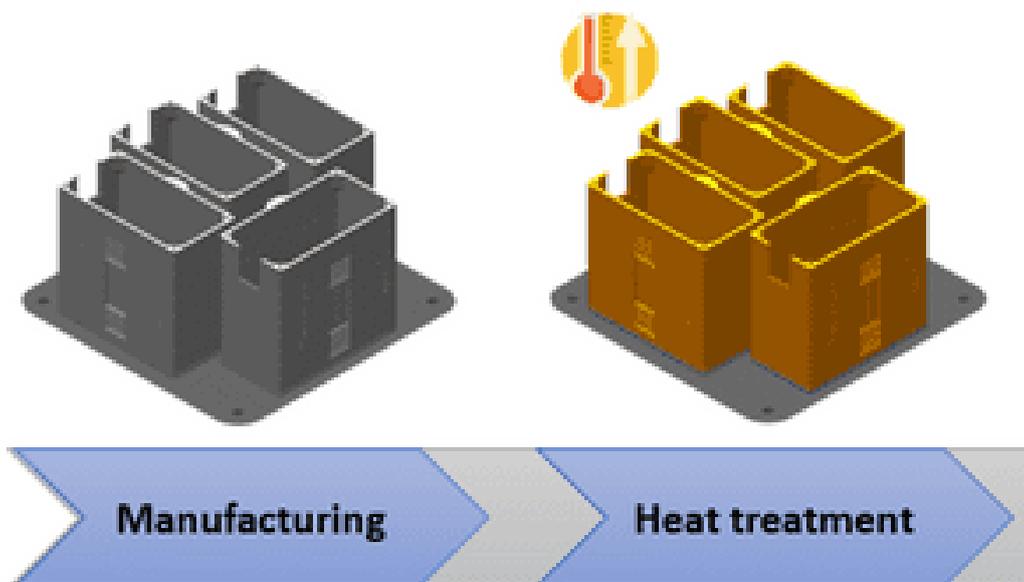
Dois materiais diferentes foram estudados durante o desenvolvimento deste piloto: AlSi10Mg e Scalmalloy®.

Como o principal objetivo era caracterizar as propriedades elétricas e térmicas de ambos os materiais uma vez fundidos (sólidos) nenhuma caracterização sobre as matérias-primas (pó) foi considerada neste piloto. A informação fornecida pelo fornecedor do pó foi considerada como base de referência. O pó de Scalmalloy foi fornecido por TOYAL e o de AlSi10Mg pela LPW.

Os resultados e conclusões da seleção do material são apresentados em D2.1 Relatório sobre o Material para o MAM. Como conclusão principal, o Scalmalloy® foi selecionado como a melhor opção para o piloto, por ter melhores propriedades mecânicas mas também uma condutividade térmica mais baixa.

Estudo de viabilidade

Para estudar a viabilidade económica da solução MAM proposta, a melhor abordagem foi encontrada fabricando quatro carcaças de uma só vez, utilizando erosão por fio para extrair os componentes mas também para obter as interfaces. Os furos e as roscas são obtidas manualmente (Figura 19).



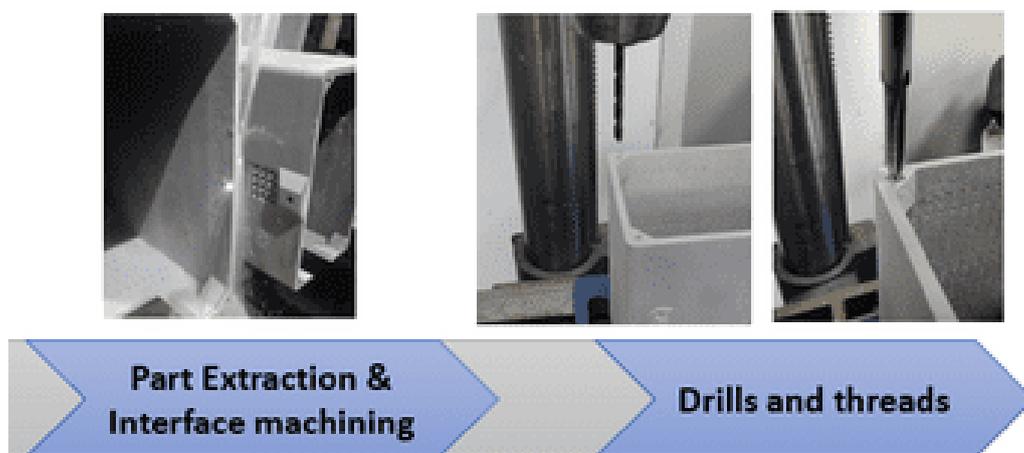


Figura 19. Sequência para fabricar a carcaça por MAM.

Considerando o processo de fabrico apresentado na Figura 19, quatro carcaças podem ser fabricadas, tratadas termicamente, cortadas, perfuradas e roscadas em menos de 30 h (7,5h/caso). O custo de cada carcaça é de, aproximadamente, 750 €.

Comparando as carcaças convencional e MAM, pode-se observar que ambas têm prazos de entrega semelhantes, mas em termos de custo, a carcaça obtido por MAM é 250 € mais cara do que a convencional. Este resultado era esperado, uma vez que o custo de maquinação de uma geometria simples de Alumínio é difícil de melhorar.

Por outro lado, em relação à viabilidade tecnológica, os resultados apresentados no entregável D 2.2.1 *Relatório de resultados de fabrico*, mostram como o redesenho da carcaça com canais internos melhorou drasticamente o desempenho térmico de todo o sistema, atingindo uma diferença de 31° C (55° C para 24° C) na superfície da carcaça analisada.

A figura abaixo mostra a análise termográfica realizada sobre a carcaça convencional (Figura 20.a) e a carcaça redesenhada (Figura 20.b), depois de funcionar durante 50 minutos. Pode-se observar como a temperatura máxima atingida pela carcaça MAM é 24° C, enquanto a carcaça convencional atinge 55° C.

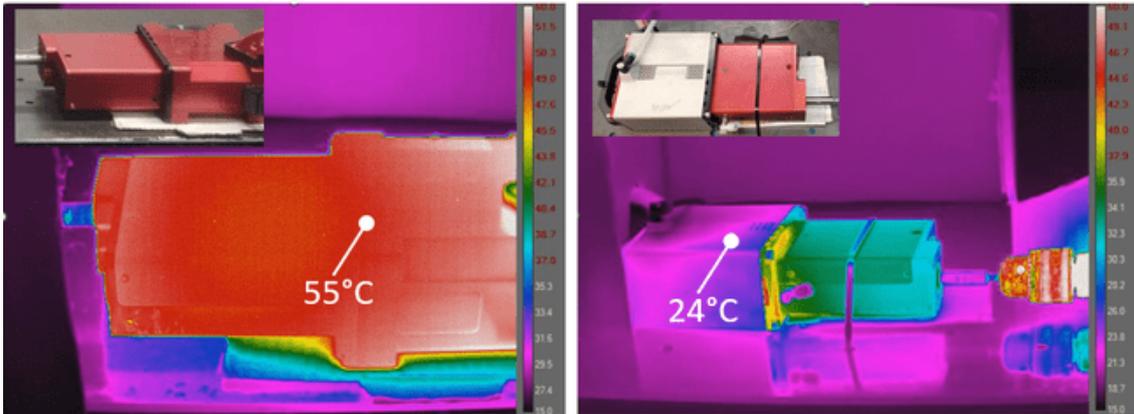


Figura 20. Imagens termográficas de (a) carcaças convencionais e (b) MAM

O demonstrador foi testado em conjunto com a empresa INESPASA e, além do custo adicional de 250 € por carcaça, a solução proposta durante este projeto satisfaz claramente o utilizador final, uma vez que o sistema está agora funcional, com um comportamento térmico que torna a ferramenta confortável, mais leve (37% de redução de peso) e operacional por longos períodos.



Figura 21. Imagem do teste final realizado para validar a ferramenta.

2.4. Piloto FR2-SOMOCAP

Enquadramento

A peça-piloto oferecida pelo parceiro associado SOMOCAP é um inserto de moldação para um molde de injeção de plástico (Polietileno PE).

Esta ferramenta, destinada à indústria agrícola, é uma peça originalmente maquinada a partir de um bloco maciço de aço 40CMD8 (C45), com um furo de 10mm no interior para arrefecer a peça de polímero em toda a volta.

No entanto, este simples orifício reto para arrefecimento não é suficiente e o arrefecimento não é eficiente: durante a fase de arrefecimento, a parte polimérica revela uma ovalização e não é completamente circular.

Dados originais:

- Tolerância final: +/-0.02mm polimento para desmoldagem
- Preço original: 5000 € (incluindo electro erosão para o topo da peça)
- Prazo de entrega original: 2 semanas
- Pressão de injeção: 800 bar

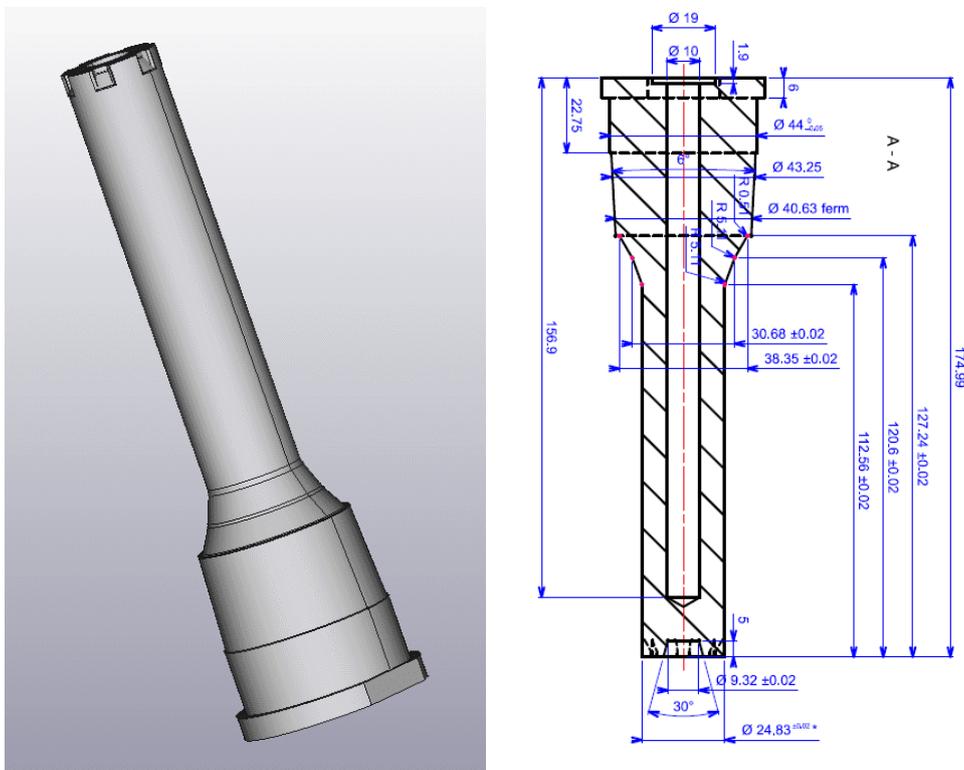


Figura 22: SOMOCAP Proposta de piloto.

A regulação térmica é atualmente feita com um separador (refrigeração em cascata), como se mostra na Figura 23.

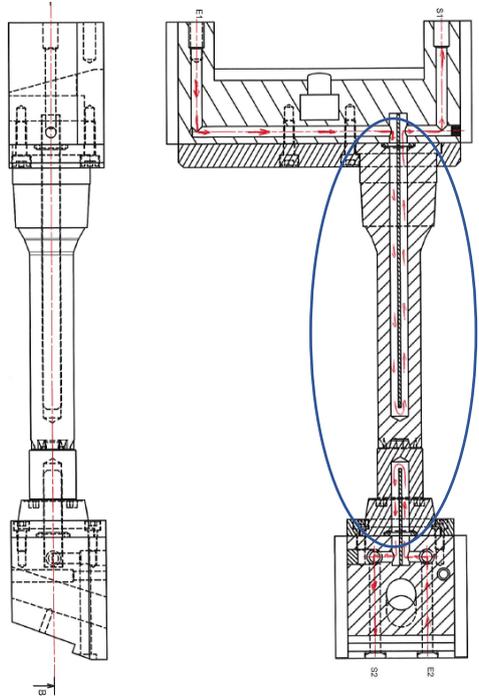


Figura 23: Solução de regulação térmica atual

Objetivos do Piloto

Os objetivos deste piloto são vários:

- Fabricar esta peça com 2 diferentes FFF/FDM metálicos carregados (Fabrico de Filamento Fusível / Modelação por Deposição de Fundidos) e sinterização (com e sem Pressão Isostática a quente (HIP)).
- Aumentar o desempenho desta ferramenta, adicionando arrefecimento conformado.
- Reduzir o tempo de entrega e o preço.
- Tornar acessível o fabrico aditivo metálico a todos / Tecnologias baseadas no processo Metal Injection Moulding (MIM).

As tecnologias de fabrico aditivo metálico, incluindo DED LASER - Fio ou Arco, L-PBF, DED LASER - Pó, etc. são muito caras e estes custos são geralmente proibitivos para uma PME.

Desenvolver um novo processo, baseado numa tecnologia bem conhecida (processo FDM (Fused Deposition Modeling)) e tentar ter uma peça metálica mais barata é um dos principais objetivos deste piloto.

A referência no mercado para fazer este tipo de aplicação é a Markforged Metal X, disponível no consórcio ADDITool. No entanto, esta máquina é um sistema fechado e totalmente "tecnologia proprietária".

Tentar fazer o mesmo trabalho com uma máquina clássica e aberta, diretamente disponível no mercado, pode ser muito interessante.

Um redesenho da ferramenta proposta pela SOMOCAP foi feito pelos parceiros da ADDITool para aumentar o desempenho de arrefecimento. O piloto a fabricar é apresentado na Figura 24.

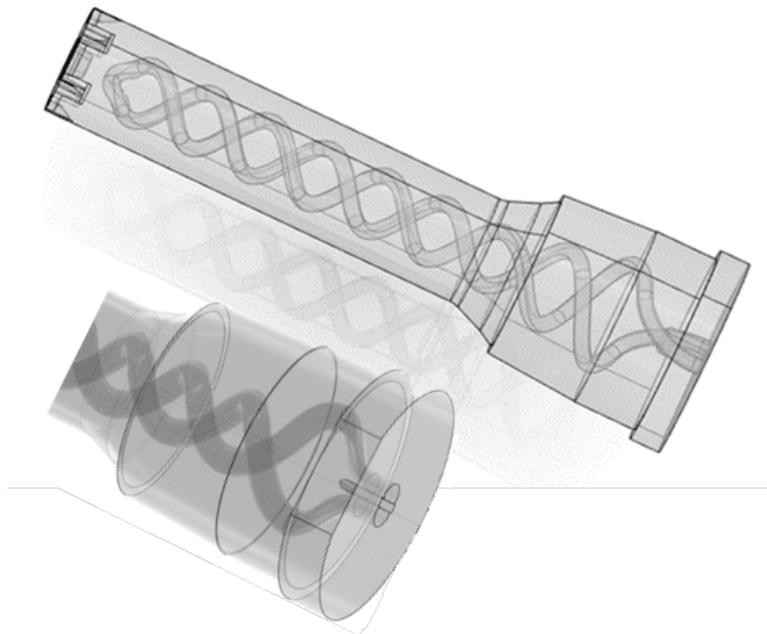


Figura 24 Somocap piloto com canais de arrefecimento

Para atingir estes objetivos, foi utilizado o seguinte método:

- Caracterizar o material e a peça fabricada para cada tecnologia: Matéria-prima e material fabricado.
- Fabricar a peça através de diferentes tecnologias: Markforged Metal X + acessórios & Lynxter S600D + acessórios.
- Tratamento térmico : Remoção de ligante / Sinterização.

- Digitalização 3D / Tomografia.
- Maquinagem das peças.
- Testar as ferramentas no seu local de produção + entregável sobre viabilidade.

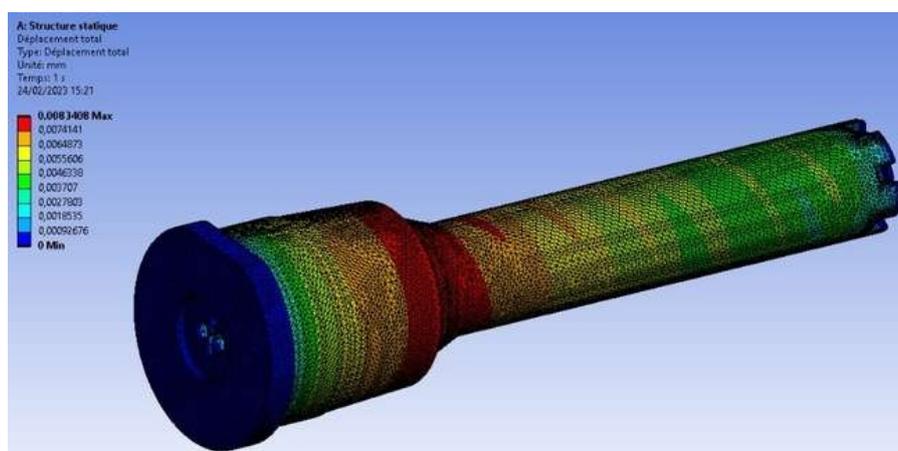
Seleção do material

No início do ADDITool, estes eram os materiais disponíveis no mercado:

- BASF: Ultrafuse 316L & Ultrafuse 17-4PH – Remoção de ligante catalítica
- Nanoe: Zetamix 316L & Zetamix H13 - Remoção de ligante térmica
- Nanovia: Mt 316L - Remoção de ligante térmica
- Markforged: 17-4PH, Cobre, Inconel 625, H13, A2 e D2 aço para ferramentas. Todos os materiais são dedicados com máquina Metal X e acessórios -Remoção de ligante com Opteon SF-79

De acordo com a especificação dada pela SOMOCAP, apenas o 17-4PH e o H13 respondem à nossa problemática (dureza e exigência de alta pressão), ver Figura 25.

Além disso, o H13 e o 17-4PH estão disponíveis tanto para o Markforged Metal X como para um sistema aberto.



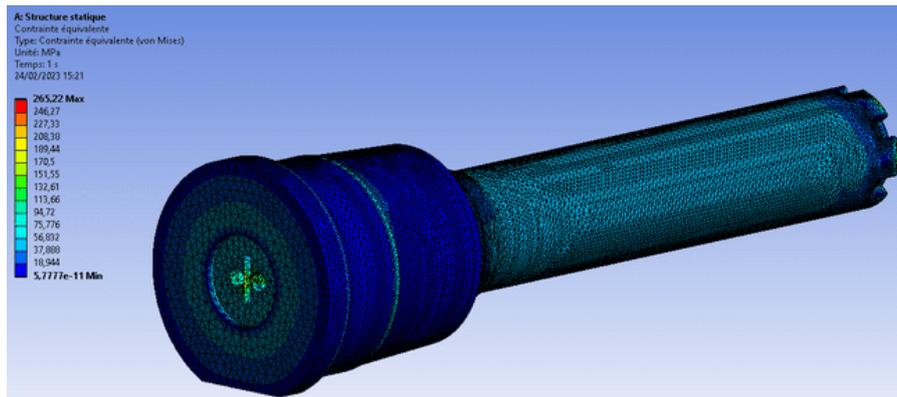


Figura 25: Simulação e dimensionamento de acordo com o material

Estudo de viabilidade

O fabrico da peça SOMOCAP foi realizado com os seguintes meios:

- Markforged Metal X + acessórios
- LYNXTER S600D + acessórios
- Tecnologia RAPIDIA baseada em pasta metálica aquosa.

Tecnicamente, o filamento NANOE dá maus resultados; não com a impressão (Lynxter S600D) mas com a fase de remoção de ligante e sinterização se for usado como é recomendado. O processo de remoção de ligante e sinterização foi otimizado pelo consórcio para este filamento, obtendo-se uma boa geometria externa e níveis de C controlados. O ciclo final HIP permitiu fechar a maior parte da porosidade, mas é necessário ter uma primeiro remoção de ligante química para abrir poros e facilitar a remoção de ligante térmica.

O fabricante anunciou 91h de processo de remoção de ligante /sinterização que não é aceitável para uma PME e que foram reduzidos para menos de 20h, o que é um resultado interessante.

No entanto, propriedades metalúrgicas e mecânicas relativamente baixas obrigaram-nos a parar o desenvolvimento para uma peça tão grande. Este filamento pode funcionar para peças pequenas, mas não é atualmente viável para peças grandes e altas.

A Markforged Metal X, referência real no mercado, dá resultados bastante bons, mas um pouco abaixo da especificação anunciada, ver entregável D2.1.1 Relatório sobre o material

MAM. Além disso, o Markforged H13 já estava quase denso após a sinterização e com HIP todos os poros restantes foram fechados. No entanto, ainda existem restrições dimensionais no Markforged para o fabrico e sinterização de uma peça grande.



Figura 26: Fabrico com Markforged Metal X

A tecnologia RAPIDIA parece promissora na medida em que não utiliza um filamento carregado com 50 % de pó metálico, mas uma pasta aquosa com cerca de 60 % de carga de sólidos, e um ligante de polímero muito baixo (<1 %).

A utilização de uma matéria-prima com quantidades muito pequenas de polímeros presentes permite ao RAPIDIA simplificar a remoção de ligante e produzir menos emissões. O sistema de impressão Rapidia metal 3D é um sistema capaz de imprimir peças com estruturas internas complexas, utilizando tecnologia proprietária de suporte evaporativo. A pasta à base de água permite a criação de conjuntos complexos com facilidade através da colagem de peças impressas em 3D com água, ou através da fusão de peças impressas em 3D a peças maquinadas. Este sistema de impressão 3D em metal permite que as peças sejam sinterizadas diretamente da impressora, sem etapa de remoção de ligante separada. As peças impressas com processos convencionais de três etapas precisam de ser preparadas para a sinterização através da dissolução do ligante de polímero. Esta etapa pode demorar vários dias e requer o tratamento da peça impressa com um solvente químico. O processo Rapidia elimina a necessidade de uma etapa de remoção de ligante separada, substituindo a maior parte dos ligantes de polímero por água. A água evapora durante a impressão, deixando uma peça em verde com menos de 1 % de aditivos aglomerantes. As peças verdes feitas no sistema Rapidia

podem ir diretamente para a sinterização, com ciclos curtos de sinterização - um processo seguro que pode entregar as peças mais rapidamente.

Tanto o Markforged como o RAPIDIA permitem uma impressão com uma vasta gama de metais, com opções de excelente resistência, capacidades a altas temperaturas, e boa resistência à corrosão.

Toda a cadeia de fabrico da marca comercial Markforged e Rapidia é otimizada e trabalha em tempo oculto, o que torna estas tecnologias muito competitivas (produção durante a noite, por exemplo, sem necessidade de ter um operador em frente da máquina, etc.).



Figura 27: Tecnologia Rapidia

Alguns custos de acordo com a matéria-prima:

Material	Preço/kg
Nanovia Monte 316	250 € /kg

Nanoe Zetamix 316L	500 €/kg
Nanoe Zetamix H13	500 €/kg
BASF Ultrafuse 17-4PH	100 €/kg
BASF Ultrafuse 316L	130 €/kg
Markforged H13	245 €/200cm ³
Markforged 17-4PH	135 €/200cm ³
RAPIDIA 17-4PH	376 €/l --> 75,2 €/kg

Descrição	Preço	Atraso
Programação	56 € (900 €/dia)	30min
Fabrico	150 € (150 €/dia)	20h
Material - 1,8kg	156 € para 17-4PH Markforged 283 € para H13 Markforged 87 € para Rapidia 17-4PH	/
Remoção de ligante e sinterização	900 €	Dia +1
Maquinagem	865 €	1 semana de subcontratação
Total	2 127 € Markforged 17-4PH 2 254 € Markforged H13 2058 € RAPIDIA 17-4PH	5 dias

O custo, mesmo que seja menos importante do que o original, não é aqui um indicador porque a comparação com a peça original não é possível.

De facto, este processo permite fabricar a peça com um real valor acrescentado (o canal de refrigeração conformado só é possível com tecnologias MAM) que não era possível com tecnologias convencionais.

2.5. Piloto PT2- VIDIRIMOLDE

Enquadramento

A aplicação de canais de arrefecimento conformados, concebidos para se adaptarem estreitamente à geometria da peça para melhorar o seu arrefecimento, foi aplicada a moldes de injeção de plásticos, matrizes de estampagem e outras ferramentas, para permitir uma redução do tempo de ciclo e/ou a obtenção de ciclos térmicos específicos, tais como a têmpera.

No entanto, este não tem sido o caso dos moldes para vidro. Estes têm aspetos que fazem valer a pena estudar a aplicação de canais de refrigeração conformados. Estes são: as temperaturas de trabalho - cerca de 600° C -, o meio de arrefecimento - ar comprimido -, e o tempo de ciclo - tipicamente alguns segundos.

O arrefecimento convencional dos moldes de vidro é realizado injetando ar comprimido através de um conjunto de furos retos que correm ao longo da direção vertical do molde. Isto é chamado "vertiflow" - Figura 28. A vantagem desta abordagem é a relativa simplicidade na realização destes furos. A desvantagem é que a temperatura à volta da peça de vidro não é uniforme em toda a superfície do molde. Isto significa que existe uma maior probabilidade de defeitos na peça final.

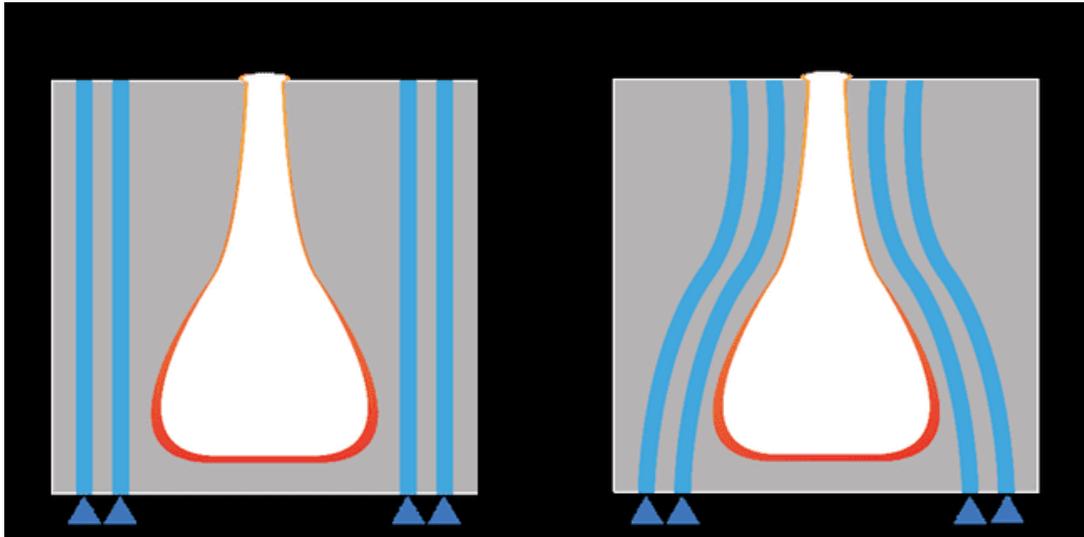


Figura 28: Os dois tipos de arrefecimento para moldes de vidro. Esquerda - o método de arrefecimento convencional; Direita - o método de arrefecimento conforme proposto.

Os moldes para vidro também têm problemas de desgaste nas superfícies de moldação, devido às altas temperaturas de serviço. Isto é normalmente mitigado depositando uma camada de material mais duro, tal como uma liga à base de níquel, nos bordos internos do molde. Este processo é geralmente realizado por deposição de plasma, TIG, ou MIG, como um processo adicional dentro da linha de produção.

A peça proposta é um molde para uma pequena garrafa de vidro - Figura 29. Esta garrafa tem uma geometria invulgar, o que representa um desafio adicional para o sistema de arrefecimento convencional. No entanto, dada a sua pequena dimensão, será mais apropriado para produzir por MAM.

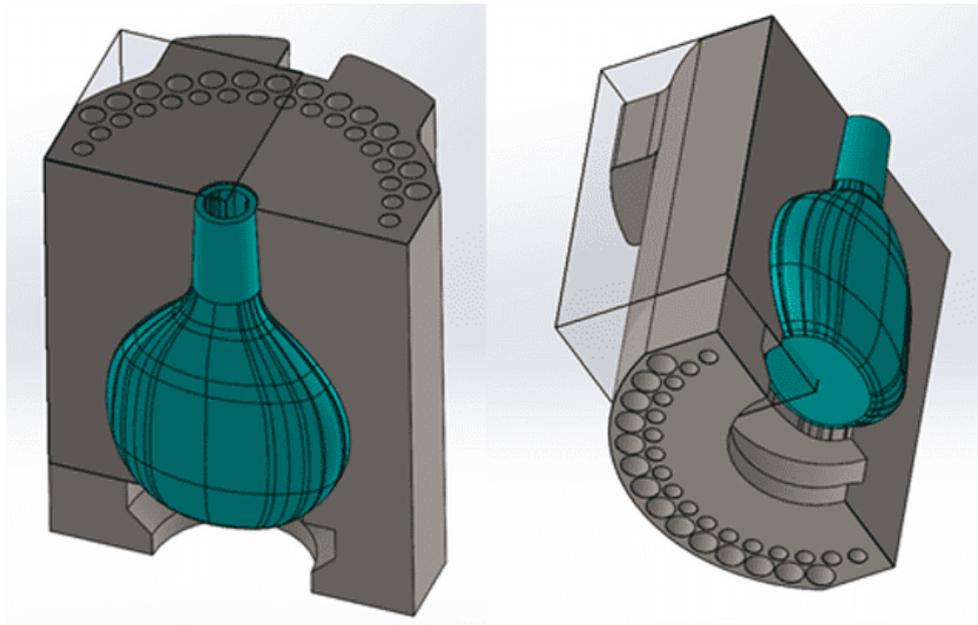


Figura 29: Um molde para uma garrafa de vidro.

Objetivos do Piloto

O objetivo do piloto é avaliar a viabilidade da aplicação de um sistema de arrefecimento conformado ao molde, combinando-o ao mesmo tempo com uma estrutura de malha interna para redução de peso e com uma superfície de moldação melhorada. Os dois primeiros objetivos são alcançados utilizando o fabrico de L-PBF, enquanto o último é alcançado através da deposição de camadas de liga de níquel através de DED LASER - pó.

Seleção do material

O material selecionado para o piloto é um aço inoxidável comercial em forma de pó - EOS Stainless Steel CX. Isto porque a peça será fabricada numa empresa parceira, devido à sua dimensão, e este é o pó (SS) que tinham disponível no equipamento.

Estudo de viabilidade

O molde foi inicialmente fabricado por L-PBF, deixando uma superfície compensada para a deposição subsequente por DED LASER - pó. A operação de acabamento envolveu a fresagem da superfície de moldação.

Não foi possível testar o molde em condições reais de trabalho, pois exigiria a paragem de uma linha de produção e a substituição de um conjunto de moldes numa estação (normalmente composta por cerca de 12 moldes). Assim, as indicações sobre o desempenho do arrefecimento foram extraídas de testes de modelos. Nestes, um conjunto de amostras para várias opções de sistemas de arrefecimento foi testado utilizando ar comprimido, após ter sido aquecido às temperaturas de serviço típicas. Estas opções incluíam canais com secção circular, secção elíptica, combinada com secções não uniformes ao longo do comprimento da amostra, bem como a combinação com estruturas de treliça e alhetas internas - Figura 30.

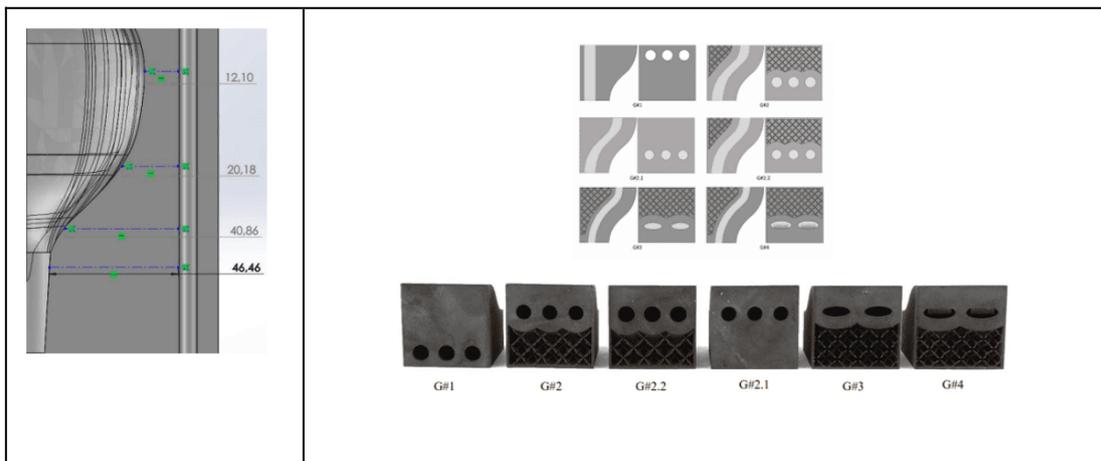


Figura 30: A geometria dos espécimes para a modelação de arrefecimento.

Os resultados indicam que todas as soluções de refrigeração conformadas atingem uma taxa de refrigeração mais rápida quando comparadas com a solução de refrigeração convencional. Para uma temperatura inicial de 650° C, a solução de arrefecimento conformada com melhor desempenho - G#3 (canais elípticos combinados com uma estrutura em malha) - reduz o tempo de arrefecimento para atingir, por exemplo, 610° C, para aproximadamente metade (de cerca de 9s para 4,5s) - Figura 31.

Os custos internos de modelação e produção do molde L-PBF foram comparados com os mesmos custos de produção do molde convencional. O quadro abaixo resume os itens de custo considerados para ambos os moldes.

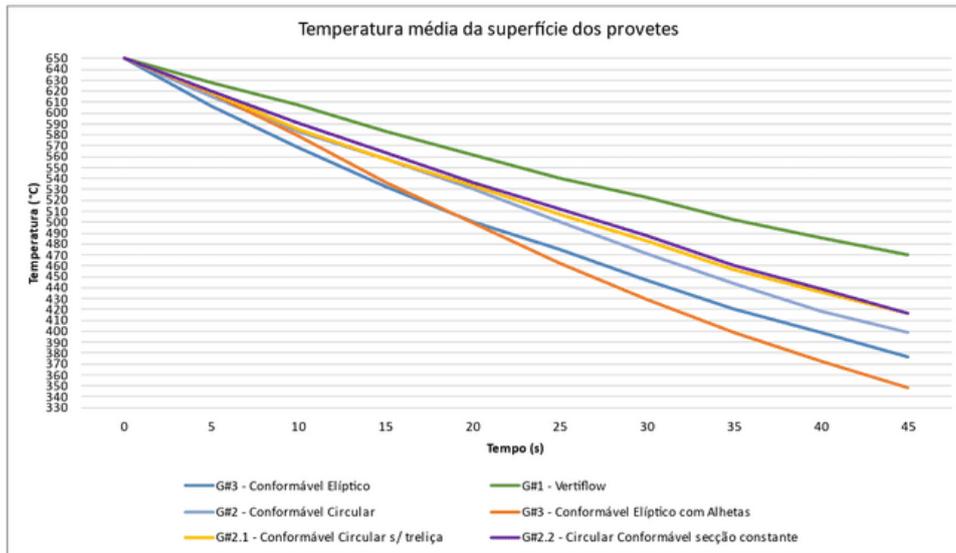


Figura 31: Comparação do desempenho de arrefecimento a partir do arrefecimento convencional e várias opções de arrefecimento em conformidade. Temperatura média à superfície dos espécimes (a superfície do molde)

	Custo de fabrico (€)	Custo de acabamento (€)
Fabrico L-PBF	Custo estimado: 10000 €	Fresagem - 100 €
Depósito por DED	Custo estimado: 5000 €	
Molde convencional	Custo estimado: 280 €	Fresagem - 100 €
Diferença de custos	14720	0

Para o cálculo do número de peças necessárias para compensar a diferença de custo inicial, foram considerados os seguintes parâmetros:

- desvantagem de custo inicial: **14720 € - 1 molde;**

- num ambiente de produção, cada máquina funciona com entre 8 a 12 moldes. São considerados 10 moldes por máquina para este cenário. Isto eleva a diferença de custo inicial para **147 200 €**.
- para o tempo do ciclo de cada peça, foi considerado um valor base de **3s**
- para a redução do tempo de ciclo (ganho), foram considerados dois cenários:
 - 25 % de redução (novo ciclo de tempo=2,25s) e
 - 50 % de redução (novo tempo de ciclo=1,5s). Estas foram baseadas nas simulações anteriormente apresentadas.
- A tarifa horária da máquina / operador / instalações foi considerada 80 € (estimativa)
- A taxa de produção foi considerada **15 peças/minuto por molde, ou 150 peças/minuto para o conjunto de 10 moldes**
- A linha de produção foi considerada a funcionar continuamente (24h)

Dados os parâmetros acima referidos, é possível calcular o número de peças que compensam a desvantagem inicial dos custos para ambos os cenários:

- para uma redução de 25 % no tempo de ciclo – 883 200 peças. Considerando a taxa de produção, isto significa 41 dias.
- para redução de 50 % no tempo de ciclo – 441 600 peças. Considerando a taxa de produção, isto significa 21 dias.

Como é observável, embora o custo inicial para implementar 10 moldes produzidos por L-PBF + DED num ambiente de produção seja muito elevado - cerca de 15 000 € - o facto de a indústria vidreira trabalhar com taxas de produção elevadas significa que o tempo de retorno não é tão elevado como se poderia esperar. Embora os custos não estejam totalmente determinados, uma vez que não foi possível aceder a informação mais detalhada, é razoável dizer que existe viabilidade potencial para a utilização das tecnologias MAM no setor do fabrico do vidro .

3. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nestes documentos mostraram uma viabilidade potencial para a utilização das tecnologias MAM no sector de ferramentas. Foram desenvolvidos cinco pilotos diferentes (FR1, PT1, SP1, SP1, FR2, PT2) para este amplo setor (molde para plástico, molde para vidro, maquinagem, gabaritos de controlo...) utilizando diferentes tecnologias MAM (PBF-L/M, DED LASER - fio, DED Arco - fio, DED LASER - pó e FFF).

A viabilidade tecnológica tem sido demonstrada testando os pilotos em condições reais. Todos eles demonstraram bons resultados cumprindo os requisitos (excluindo o PT2, uma vez que este teste requer a paragem da linha de produção, logo tal será levado a cabo numa próxima paragem programada da linha).

Em termos do estudo de viabilidade económica, foram encontradas diferentes conclusões dependendo do piloto estudado (ver conclusões de cada piloto). Em geral, o tempo de entrega foi reduzido através da utilização de tecnologias MAM. Quanto ao custo, pode observar-se que a subcontratação de maquinagem tem um grande impacto sobre o custo total. Este incremento deverá diminuir se for realizada mais formação para maquinar próximo da forma final.

**Interreg
Sudoe**



EUROPEAN UNION

ADDITool

European Regional Development Fund

www.additool.eu