



ANA RITA OLIVEIRA FERREIRA

Licenciada em Engenharia Mecânica

CARACTERIZAÇÃO DE FERRAMENTAS METÁLICAS PRODUZIDAS POR FABRICO ADITIVO:

**ESTUDO DE DURABILIDADE DE FACAS PARA CORTE DE
PLATINAS DE AÇO NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL**

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2024



CARACTERIZAÇÃO DE FERRAMENTAS METÁLICAS PRODUZIDAS POR FABRICO ADITIVO:

ESTUDO DE DURABILIDADE DE FACAS PARA CORTE DE
PLATINAS DE AÇO NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

ANA RITA OLIVEIRA FERREIRA

Licenciada em Engenharia Mecânica

Orientadora: Doutora Carla Maria Moreira Machado
Professora Auxiliar, FCT-NOVA

Coorientadora: Cláudia Sofia Mendes Mestre
Tools Production Coordinator, Volkswagen Autoeuropa

Júri

Presidente: Doutor Miguel Araújo Machado
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Arguentes: Doutor Ricardo António Lamberto Duarte Cláudio
Professor Coordenador, ESTS-Instituto Politécnico de Setúbal

Doutor Valdemar Rebelo Duarte
Professor Auxiliar Convidado, FCT-NOVA

Orientadora: Doutora Carla Maria Moreira Machado
Professora Auxiliar, FCT-NOVA

**Caracterização de ferramentas metálicas produzidas por fabrico aditivo:
Estudo de durabilidade de facas para corte de platinas de aço na indústria automóvel**

Copyright © Ana Rita Oliveira Ferreira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à Professora Carla Machado, orientadora desta dissertação, pelos conselhos prestados e por ter possibilitado a realização do estágio na Autoeuropa. À Engenheira Cláudia Mestre, minha coorientadora, pela confiança depositada e pelo apoio diário ao longo do estágio.

A todos os elementos da fábrica que tiveram um contributo direto ou indireto na concretização deste projeto e, em especial, à equipa do *Tool&Die* pelos ensinamentos e acompanhamento constante.

Aos meus amigos, que me acompanharam e me ajudaram a superar desafios, quer a nível pessoal quer a nível académico.

Por último, quero agradecer à minha família, sem a qual não teria conseguido terminar esta etapa da minha vida, pela educação, pelo apoio incondicional e pela paciência.

A todos muito obrigada!

RESUMO

A indústria automóvel está em constante desenvolvimento, necessitando de ferramentas mais resistentes e inovadoras. O processo de estampagem aplicado nesta indústria é complexo e provoca desgaste nos componentes das ferramentas usadas, punções e matrizes. Assim, é frequente estes serem substituídos por *sparcs*, levando a que tenham de ser produzidos novos punções regularmente.

Convencionalmente, são produzidos por maquinaria, mas esta dissertação de mestrado pretende estudar a sua produção por *Selective Laser Melting* (SLM). O objeto de estudo é uma faca de corte, implementada na estampagem de platinas da Autoeuropa para remover material em excesso. Esta foi escolhida especialmente por estar integrada numa ferramenta com um elevado número de *quickrepairs* provocados pelo desgaste, aumentando a necessidade de se produzirem punções *spare*.

O *Tool&Die* pretende perceber os benefícios da produção de ferramentas por SLM e concluir se esta pode ser uma alternativa ao método convencional.

Para isso, é feita uma caracterização mecânica do material. É abordada a influência da parametrização e da têmpera na qualidade da peça e são apresentados resultados dos testes feitos com um protótipo. É efetuada uma análise dos tempos e custos de fabrico, fatores determinantes nesta indústria. Por fim apresentam-se as conclusões.

Palavras-chave: Indústria Automóvel, Estampagem, Punções de Corte, *Spare*, SLM

ABSTRACT

The car industry is constantly developing, requiring resistant and innovative tools for vehicle production. The stamping process applied to this industry is quite complex and causes wear on the components of the tools used (punches and dies). These components will often have to be replaced by spares, which means that new punches have to be produced regularly to replace the damaged ones.

Conventionally, these punches are produced by machining processes, but this master's thesis aims to study their production using SLM technology. The object of study is a punch, which is implemented in the stamping process to remove excess material from steel blanks. This particular punch was chosen as it is integrated into a tool with a large number of quickrepairs caused by wear, which increases the need to produce more spare punches.

With the proposal of this case study, Tool & Die wants to understand the benefits of SLM in the production of tools and conclude if this technology can be a viable alternative to the conventional machining method.

In order to achieve the proposed goals, a mechanical characterization of the material is carried out. The influence of parameter setting and heat treatment on the quality of the printed part is discussed. The results of tests carried out on the production line with a prototype are presented. A comparative analysis is made of manufacturing time and costs, as these are key factors in this industry. Finally, the conclusions are presented.

Keywords: Car industry, Stamping, Punches, Spare, SLM

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Motivação	1
1.2	<i>Volkswagen</i> Autoeuropa	2
1.2.1	Área de Prensas	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Estrutura	4
2	Revisão da Literatura	5
2.1	Processo de Estampagem	5
2.1.1	Punção de Corte	7
2.2	Fabrico Aditivo	10
2.3	Fabrico Aditivo por SLM	11
2.3.1	Parâmetros do Processo	12
2.3.2	Materiais	15
2.3.3	Defeitos	17
2.3.4	Aplicações	19
3	Caso de Estudo	20
3.1	Produção pelo Método Convencional	25
3.2	Produção por SLM	26
4	Caracterização Mecânica do Material	31
4.1	Ensaio de Tração	32
4.2	Ensaio de Flexão	37
4.3	Ensaio de Impacto (Charpy)	38
4.4	Discussão dos Resultados	41
5	Análise de Resultados e Implementação do Protótipo	43
5.1	Discussão de Resultados	45

6	Análise de Custos e Tempos de Produção	47
6.1	Tempos de Produção	47
6.2	Custos de Produção	49
7	Conclusões e Perspetivas Futuras	53
7.1	Conclusões	53
7.2	Perspetivas Futuras	55
	Bibliografia	56
A	Anexos	61
A.1	<i>Datasheet</i> HWS	61
A.2	<i>Datasheet</i> Aço Ferramenta 1.2709	62
A.3	Equipamento de SLM	63

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Linha de Produção para (a) Corte de platinas [5]; (b) Estampagem [6];	3
2.1	Exemplo de uma Prensa usada no Processo de Estampagem	6
2.2	Componentes de uma Ferramenta de Estampagem	7
2.3	Corte por Arrombamento (Adaptado de: [11])	7
2.4	Identificação das diferentes zonas de corte (Adaptado de: [11])	8
2.5	Relação entre o valor de Folga e a Espessura da platina a cortar [7]	9
2.6	Esquema do Processo de SLM [18]	11
2.7	Parâmetros do Processo de SLM [19]	13
2.8	Efeito Escada e Identificação das diferentes Superfícies [21]	14
2.9	Rugosidade de Superfície após impressão [31]	14
2.10	Estratégias de varrimento usadas em SLM [32]	15
2.11	Microestrutura do Aço Ferramenta 1.2709, característica de SLM [31]	16
2.12	Fratografia de Aço Ferramenta 1.2709 por SLM [36]	17
2.13	Defeitos de SLM em peças de Aço Ferramenta 1.2709 (a) Porosidades [36]; (b) Fusão incompleta do material [36]	18
2.14	Aplicações de SLM: (a) Pinça de travão <i>Bugatti</i> [39]; (b) Matriz para Estampagem [9];	19
3.1	Identificação do <i>Part Number</i>	20
3.2	(a) Faca de Corte pos. 51.281; (b) Matriz associada à Faca	21
3.3	Exemplificação do movimento da faca e da respetiva matriz	22
3.4	Longarina Dianteira (a) após a op. 20; (b) após a op.30;	22
3.5	Tempo perdido em <i>quickrepairs</i> na TAP5, em 2023	23
3.6	Tempo perdido em <i>quickrepairs</i> na ferramenta 5Q0.803.106, em 2023	24
3.7	Localização das longarinas dianteiras do carro [41]	24
3.8	Disposição das Peças Impressas na Plataforma de Impressão	28
3.9	Faca de Corte após impressão por SLM	29
3.10	Maquinação: (a) Zonas a Maquinar; (b) Faca depois de maquinada;	30
3.11	Têmpera: (a) Zonas a Temperar (b) Faca depois de Têmpera	30

4.1	Marcação das Zonas a aplicar Têmpera a Laser nos Provetes de (a) Tração; (b) Flexão; (c) Charpy;	31
4.2	(a) Curva Tensão-Deformação [44]; (b) Apresentação do Ensaio de Tração	32
4.3	Dimensões dos Provetes do Ensaio de Tração de norma DIN50125 <i>standard</i> [45]	33
4.4	Correção da curva Força-Alongamento do Provete A	34
4.5	Método para obter a Tensão de Cedência	34
4.6	Curvas de Tensão-Deformação do Ensaio de Tração	35
4.7	Provetes após a realização do Ensaio de Tração	36
4.8	Fratografias SEM referentes ao Provete D ao Ensaio de Tração	37
4.9	Provetes de Flexão depois do tratamento térmico	37
4.10	Equipamento necessário para realização do Ensaio de Impacto Charpy [47]	38
4.11	Dimensões dos Provetes do Ensaio de Charpy de norma ASTM E23 [0]	38
4.12	Provetes depois da realização do Ensaio de Charpy	39
4.13	Fratografias SEM referentes ao Provete C do Ensaio de Charpy	40
4.14	Variação da Dureza do Aço Ferramenta 1.2709 com a Temperatura aplicada no Tratamento Térmico [31])	41
5.1	Ferramenta 5Q0.803.106 da op.30 com a faca em SLM incorporada	44
5.2	Ferramenta implementada na Prensa de <i>Try-Out</i> do <i>Tool&Die</i> com a platina posicionada	44
5.3	Desgaste apresentado no punção de SLM depois de sair da linha de produção	45
6.1	Resultados da Análise de Custos	51
6.2	Gráfico de comparação de custos dos dois métodos	52
A.1	Características do Equipamento de SLM <i>TruPrint</i> 3000 da marca <i>Trumf</i>	63

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Parâmetros do Processo de SLM (Adaptado de: [18, 19]).	13
3.1	Características da Faca de Corte em Estudo	21
3.2	Características da Impressão por SLM	28
4.1	Resultados obtidos do Ensaio de Tração	35
4.2	Resultados do Ensaio de Charpy	39
6.1	Tempos de Produção pelo método convencional e por SLM	48
6.2	Valores considerados na Análise de Custos	50
A.1	Propriedades Físicas e Mecânicas do HWS	61
A.2	Propriedades Físicas e Mecânicas Térmicas do HWS	61
A.3	Aço Ferramenta 1.2709: Composição Química do Pó (wt.-%)	62
A.4	Propriedades Mecânicas do Aço Ferramenta 1.2709	62

SIGLAS E ACRÓNIMOS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CENTIMFE	Centro Tecnológico da Indústria dos Moldes, Ferramentas especiais e Plásticos
EDM	Eletroerosão a fio
FA	Fabrico Aditivo
HWS	<i>High Wear resistance Steel</i>
op.	operações
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
UNCC	Unidade de Negócios de Cunhos e Cortantes
VW	<i>Volkswagen Autoeuropa</i>

SÍMBOLOS

A_0	Área inicial [mm^2]
A_c	Área de Corte [mm^2]
c	Constante de Corte ($c = 0,007\sqrt{mm^2/N}$)
C_{conv}	Custo por peça do Método Convencional [€]
C_{energ}	Custos de Energia associados às etapas de Maquinação [€]
c_{energ}	Custos energéticos por hora [€/h]
C_{eq}	Custo de Aquisição do Equipamento [€]
C_{HWS}	Custo de Material HWS por Kg [€/Kg]
C_{maq}	Custos associados às etapas de Maquinação [€]
C_{mat}	Custos de Material [€]
C_{temp}	Custos associados à aplicação de Têmpera [€]
c_{temp}	Custo da aplicação de têmpera por Kg [€/Kg]
Δl	Variação de Comprimento [mm]
$\bar{\sigma}$	Desvio Padrão
$E_{impacto}$	Energia de Impacto [J]
ϵ	Deformação
F	Força Aplicada [N]
F_c	Força de Corte [N]
l_0	Comprimento inicial [mm]
l_c	Comprimento da aresta de Corte [mm]
L_{eq}	Depreciação do Equipamento
m_{final}	Massa Final da Peça [Kg]
$\bar{\mu}$	Média Aritmética

r_m	Resistência do Material [MPa]
ρ_{HWS}	Densidade do material HWS [Kg/cm^3]
s	Espessura da Platina [mm]
t	Tempo [h]
t_v	Tempo de Vida útil do Equipamento [h]
σ	Tensão [MPa]
τ_c	Tensão de Corte [MPa]
V_{HWS}	Volume de material [cm^3]
w	Folga [mm]

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Motivação

Com a chegada da quarta revolução industrial, denominada Indústria 4.0, o Fabrico Aditivo (FA) passou a desempenhar um papel fundamental a nível industrial por oferecer uma maior liberdade de design para produção de peças, a partir de diferentes materiais.

O caso de estudo desta dissertação está relacionado com o FA de metais, aplicado na Indústria Automóvel, mais concretamente no processo de estampagem de platinas de aço. Este projeto surgiu no seguimento de um estágio curricular realizado na Área de Prensas da *Volkswagen* Autoeuropa (VW), no departamento *Tool&Die*.

A estampagem de platinas é um processo complexo que gera um elevado desgaste nas ferramentas utilizadas para o efeito. Assim, os componentes dessas ferramentas, os punções e as matrizes, têm de ser substituídos com frequência. Com o objetivo de perder o mínimo de tempo possível com estas substituições, é importante ter *spares* destes componentes.

Tradicionalmente, a produção destes *spares* é feita por processos de maquinação. Com este estudo, a VW pretende saber se é possível produzir essas peças através da tecnologia de SLM, sem comprometer o seu desempenho. Visto que este problema é aplicado à indústria automóvel, uma indústria extremamente competitiva, importa também perceber se com a impressão por SLM, é possível reduzir o custo ou o tempo de produção destes componentes.

É importante referir que, para já, o que se pretende não é que o SLM venha a substituir totalmente o processo convencional. No entanto, para situações em que a produção de *spares* é urgente, poderá ser benéfico ter como alternativa um processo de FA. A *spare* produzida em SLM ficaria a substituir temporariamente a peça original até à sua produção estar concluída. Isto porque, ao contrário do processo de SLM, a produção de peças por maquinação pode arrastar-se durante algum tempo, causando perdas significativas para a fábrica.

De forma geral, SLM é uma tecnologia de FA inserida na variante *Powder Bed Fusion* (PBF) e que consiste em incidir um laser de elevada densidade energética numa camada

fina de pó, provocando assim a fusão e solidificação rápidas do material [2]. Isto permite a formação de camadas sólidas, produzindo componentes interessantes do ponto de vista industrial. Sendo a principal vantagem a capacidade de produzir peças com grande complexidade para variadas aplicações, que não seriam possíveis de produzir por métodos convencionais.

1.2 *Volkswagen* Autoeuropa

O Grupo *Volkswagen* AG é um reputado grupo alemão, dos mais valorizados a nível mundial [3]. Foi fundado na década de 1930 pelo governo alemão e, atualmente, é constituído por marcas como a *Volkswagen*, *Porsche*, *Bentley*, *Lamborghini*, *Audi*, *Seat* ou a *Škoda*.

A marca *Volkswagen*, que significa "carro do povo", foi criada com o objetivo de produzir automóveis económicos e acessíveis a todos [3]. Esta produz veículos em vários países, sendo Portugal um deles. Atualmente, a fábrica *Volkswagen* Autoeuropa destina-se à produção do modelo *T-Roc*, tendo conseguido, em 2023, produzir mais de 930 carros/dia, vendidos essencialmente ao mercado europeu. A produção do carro pode ser dividida em quatro secções: a área de prensas (*Press Shop*), de carroçarias (*Body Shop*), da pintura (*Paint Shop*) e da montagem final (*Assembly Shop*).

1.2.1 Área de Prensas

A *Press Shop* é o local onde se dá o início da produção do *T-Roc*, pelo corte e estampagem de platinas de aço. Para executar estas funções, a Autoeuropa tem prensas de corte (*Coil Shear*, *Blanking 1* e *Blanking 2*) e linhas de estampagem (*Fagor*, *Tandem Line*, TAP3/4 e TAP5/6).

Nesta área da fábrica são utilizadas cerca de 200 toneladas de platinas por turno. De forma resumida, as bobinas de aço são desenroladas, como se pode observar na Figura 1.1a, e passam depois por uma prensa de corte, onde as platinas são cortadas por uma faca implementada numa ferramenta. Na Autoeuropa: a linha de corte *Coil Shear* realiza cortes a direito com facas retas, gerando platinas retangulares; A *Blanking 1* consegue cortar platinas com formas angulares; A *Blanking 2* possui ambas as funcionalidades.

Depois de cortadas, as platinas são colocadas em paletes e posteriormente em *racks*, até serem levadas para as linhas de estampagem onde são transformadas nas peças finais pretendidas. A Figura 1.1b ilustra este processo de estampagem, que é explicado em detalhe no capítulo seguinte. Posteriormente, as peças podem seguir para exportação ou para a área de carroçaria, no caso de serem partes do *T-Roc*.

O departamento de *Tool&Die*, onde foi realizado o estágio referente a esta dissertação, está inserido nesta área, sendo responsável pela manutenção e pelas correções necessárias das ferramentas utilizadas na linha de produção. Isto é, realizam a manutenção preventiva para evitar erros e perdas de tempo na linha e também realizam a manutenção corretiva

quando já ocorreu algum problema [4]. Esta última, por ser mais urgente, pode ter de ser realizada mesmo no interior da prensa (*quickrepairs*).



(a)



(b)

Figura 1.1: Linha de Produção para (a) Corte de platinas [5]; (b) Estampagem [6];

1.3 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo apresentar um estudo acerca da tecnologia de SLM, quando aplicada à produção de punções de corte de ferramentas de estampagem. Este estudo pretende avaliar se é viável produzir estes punções por SLM, como alternativa ao processo de produção atual, feito por maquinação.

Para garantir que, com a alteração do método de produção, o desempenho da faca não é comprometido é necessário fazer uma caracterização mecânica do material. Assim, deverá ser possível concluir se este tem ou não potencialidade para esta aplicação. Pelas características do problema em causa, outro aspeto a ter em conta é a durabilidade da faca e a sua resistência ao desgaste, sendo que estes aspetos poderão ser avaliados através da implementação em linha de um protótipo do punção de corte.

Por esta dissertação ser referente a um problema real de uma fábrica, a implementação das tecnologias de FA não dependem apenas dos resultados, sendo que os custos e tempos de produção são fatores com um grande peso. Desta forma, o objetivo passará também por analisar o processo relativamente aos tempos e custos, comparando-o com o método de produção atual.

Sumariamente, os objetivos desta dissertação de mestrado são:

1. Avaliar se é possível produzir o punção de corte através da tecnologia de SLM;
2. Realizar a caracterização mecânica do material usado;
3. Avaliar se o desempenho do punção não é comprometido;
4. Implementar um protótipo na linha de produção e avaliar como se comporta;
5. Tirar conclusões em relação à durabilidade e resistência ao desgaste;
6. Comparar os dois métodos de produção, ao nível do custo e tempo.

1.4 Estrutura

Este documento é composto por 7 capítulos. Neste primeiro capítulo, a Introdução, é feito um enquadramento do problema em estudo e são apresentados os objetivos, bem como as motivações desta dissertação de mestrado.

Segue-se o segundo capítulo, Revisão da Literatura, em que se abordam os processos de estampagem e de corte por arrombamento em platinas de aço. É feita uma breve introdução aos processos de Fabrico Aditivo, aprofundando mais em detalhe a tecnologia de SLM.

No terceiro capítulo, Caso de Estudo, é explicado em detalhe o tema a tratar, relacionando o projeto com as necessidades da Autoeuropa. Mostra-se a aplicação do punção em estudo e são evidenciadas as diferenças entre o seu processo de produção atual e aquele que pretendemos estudar, por SLM.

No quarto capítulo, Caracterização Mecânica do Material, encontra-se uma componente prática desta dissertação em que se estudam as propriedades mecânicas do material, através de Ensaio de Tração e de Impacto. São apresentados os resultados dos ensaios mecânicos realizados e é feita a discussão dos mesmos.

No quinto capítulo, Análise de Resultados e Implementação do Protótipo, são mostradas as etapas realizadas após a produção do punção de corte, até à sua implementação na linha de produção, seguindo as normas da Autoeuropa.

No sexto capítulo, Análise de Custos e Tempos de Produção, analisa-se a viabilidade do projeto ao nível dos tempos e custos de produção. O processo convencional e o proposto por SLM são comparados e apresentam-se as conclusões chegadas.

No sétimo e último capítulo, Conclusões e Perspetivas Futuras, apresentam-se sumariamente os resultados obtidos nesta dissertação e as conclusões a retirar dos mesmos. São deixadas ainda considerações sobre trabalhos a realizar futuramente.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo de Estampagem

A estampagem de platinas metálicas é um processo de produção no qual se recorre uma prensa para deformar o material. Esta aplica uma força sobre a platina, obrigando o material a escoar para uma matriz, adquirindo assim a geometria pretendida [7]. Apesar de também existir estampagem a quente, nesta dissertação apenas será abordada a estampagem a frio, uma vez que é o único tipo realizado na Autoeuropa.

A estampagem permite a produção de peças em série a um preço bastante competitivo, sem afetar a qualidade das mesmas. Está, por isso, integrada na indústria automóvel com o objetivo de dar forma às platinas metálicas, incorporadas na carroçaria do veículo. Desta forma, é um processo decisivo no que diz respeito ao estilo, geometria e desempenho do veículo produzido [8].

Na aplicação a esta indústria, o processo de estampagem é feito numa ou mais prensas: É iniciado aquando da preparação das platinas, a partir de bobinas de aço e termina, algumas estações depois, na deformação das platinas para obter as geometrias finais pretendidas.

Convencionalmente, nesta indústria, utiliza-se aço 1.2379 e aço 1.2358 para a produção de componentes de ferramentas de estampagem. É ainda aplicado a este material um tratamento térmico para otimizar o seu desempenho [9]. Em casos específicos, a VW recorre a aços ainda mais resistentes, como é o caso do *High Wear resistance Steel* (HWS). Este é uma liga de aço de elevada dureza, tenacidade e resistência ao desgaste e que é especialmente utilizado no corte de aços, aplicando-se às ferramentas de estampagem [10]. Ainda que possua excelentes propriedades mecânicas, não dispensa de um tratamento térmico para otimizá-las.

Sumariamente, as ferramentas de estampagem produzem peças finais pela aplicação de uma força sobre a platina, através do movimento exercido pelo punção (móvel) sobre a matriz (fixa), obtendo a forma definida por estes [11]. Isso acontece numa prensa, onde são implementadas essas ferramentas de produção. Geralmente, para não aplicar tensões demasiado elevadas nas platinas, originando fissuras e rasgos de material, as peças só

atingem a sua forma final após seis ou sete operações (op.).

No caso da Autoeuropa, estas são numeradas da seguinte forma:

- **Op. 10** - Corte da platina com as dimensões apropriadas;
- **Op. 20** - Primeira operação de estampagem, em que se cria a forma inicial da peça;
- **Op. 30 até à 70** - Operações finais onde são feitos os cortes de material em excesso, furações ou quinagem;
- Entre todas estas operações existem "**estações vazias**", com estruturas responsáveis pelo transporte das platinas de uma op. para outra.

Cada operação é realizada por uma ferramenta de estampagem, sendo que o conjunto das ferramentas que formam a peça final, desde a primeira até à última operação, é designado de *die set*. Na Figura 2.1 observa-se uma prensa com um *die set* implementado que permite uma melhor compreensão dos termos abordados.

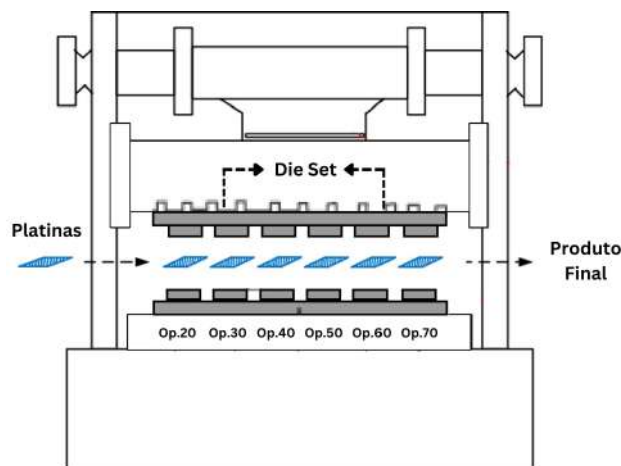


Figura 2.1: Exemplo de uma Prensa usada no Processo de Estampagem
Adaptado de: [12]

Após a conclusão de todas as operações, a qualidade da peça final é avaliada com base no aspeto e nas dimensões finais [8]. Os defeitos mais comuns são fissuras, rebarba excessiva, zonas com excesso/falta de material ou anomalias nas dimensões das peças.

A Figura 2.2 apresenta em destaque uma ferramenta de estampagem, permitindo observar os seus principais constituintes. A parte superior é composta por punções, que aplicam uma força sobre o material. Já a parte inferior é composta pelas matrizes correspondentes, opostas aos punções. Estas têm a forma negativa da platina a produzir, sendo responsáveis por suportá-la durante o processo e, juntamente com os punções, definir a sua forma final.

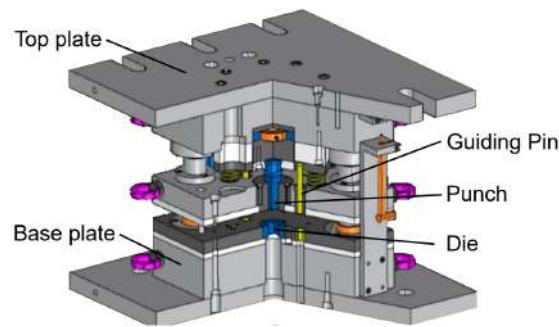


Figura 2.2: Componentes de uma Ferramenta de Estampagem
Retirado de: [13]

Para aplicações exigentes como é a estampagem, é exigido que tanto os punções como as matrizes das ferramentas apresentem excelentes propriedades mecânicas (elevada dureza, resistência mecânica, resistência ao desgaste e ao impacto) [14]. De seguida, é definido mais detalhadamente o papel dos punções que cortam o material em excesso, denominados punções ou facas de corte.

2.1.1 Punção de Corte

Os punções de corte, também designados por facas de corte, cortam o material em excesso das platinas através do processo de corte por arrombamento. Estes encontram-se na parte superior da ferramenta, como já tinha sido mostrado na Figura 2.2. Deve ser mencionado que estes, tal como os outros punções, têm matrizes associadas na parte inferior da ferramenta.

O corte por arrombamento é feito pelo movimento relativo da faca de corte contra a matriz, originando a separação do material, como observado na Figura 2.3. Esta tecnologia é uma das mais utilizadas para cortar platinas de metal, pois consegue ter uma elevada taxa de produção a baixo custo e com boa precisão dimensional [11].

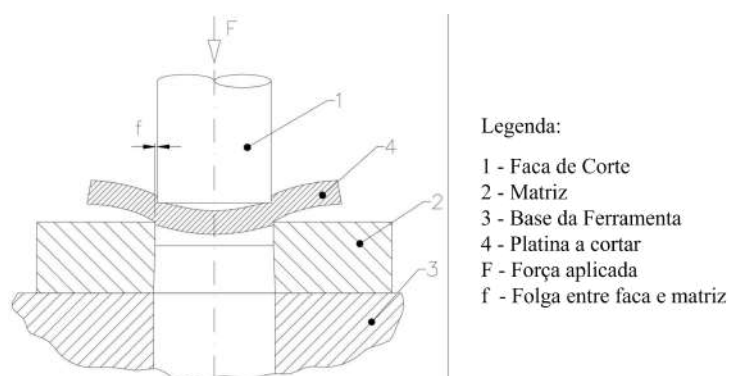


Figura 2.3: Corte por Arrombamento (Adaptado de: [11])

O processo é feito em várias fases: Inicia-se pelo contacto entre o punção e a platina, no qual o material sofre uma ligeira flexão (deformação elástica). A platina é então pressionada pelo avanço do punção sobre a matriz e dá-se o escoamento do material (deformação plástica). Este é facilitado pela folga existente entre o punção e a matriz e pelo ângulo de saída presente na matriz [14]. Na última fase, devido às elevadas tensões na zona de corte, ocorre a fratura, ou seja, dá-se a separação completa do material. O processo termina após a inversão do movimento do punção e extração da peça [8, 11].

Como evidenciado na Figura 2.4, o metal deforma de maneira diferente, dependendo da zona de corte. A formação de rebarba é um fenómeno comum nesta tecnologia mas que se pretende evitar ao máximo. Este ocorre por causa do desgaste das arestas de corte, do material das platinas ou da folga e força de corte aplicadas [7]. A produtividade e a qualidade do corte são tanto melhores, quanto menor for a dimensão da rebarba formada.

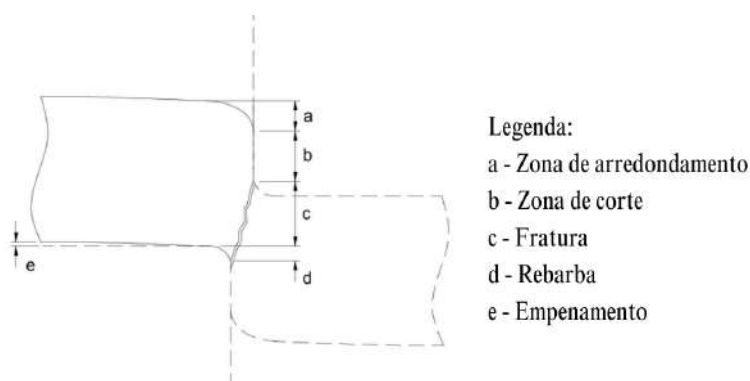


Figura 2.4: Identificação das diferentes zonas de corte (Adaptado de: [11])

Geralmente, se existir rebarba, esta é detetada na fase de controlo da qualidade e, nesses casos, é necessário procurar a sua origem. Por vezes, o problema fica resolvido com pequenas alterações na folga entre o punção e a matriz, mas existem casos em que é necessário substituir peças, originando paragens na linha (*quickrepairs*). Para evitar a formação de rebarba deve ter-se em atenção os principais parâmetros de corte: o material a cortar, a força aplicada, a velocidade e o ângulo de saída e a folga entre o punção e a matriz [11].

A folga é um parâmetro que influencia a qualidade do corte e o tempo de vida do punção e da matriz. Caso seja aplicada uma folga excessiva, a probabilidade de se formar rebarba aumenta, bem como a rugosidade da superfície cortada. No limite, a folga pode ser tão grande que não ocorre corte, mas sim flexão do material [4].

Se, pelo contrário, é aplicada uma folga demasiado pequena, o desgaste apresentado nas arestas de corte do punção aumenta significativamente [14] devido ao aumento da força de corte. Logo, quando se está abaixo do limite crítico de folga, há uma deformação plástica anormal, podendo levar ao aparecimento de fissuras [7].

Portanto, a folga ideal é designada como aquela que permite realizar o corte, consumindo o mínimo de energia possível. Este valor pode ser calculado pela Equação 2.1, sendo: w o valor de folga em mm ; c a constante de corte que corresponde a $0,007\sqrt{mm^2/N}$; s a espessura da platina em mm ; $\sqrt{\tau_c}$ a tensão de corte em MPa .

$$w = c \times s \times \sqrt{\tau_c} \quad (2.1)$$

Para facilitar, existem gráficos com o da Figura 2.5, que indicam o valor a aplicar, consoante a espessura e o material.

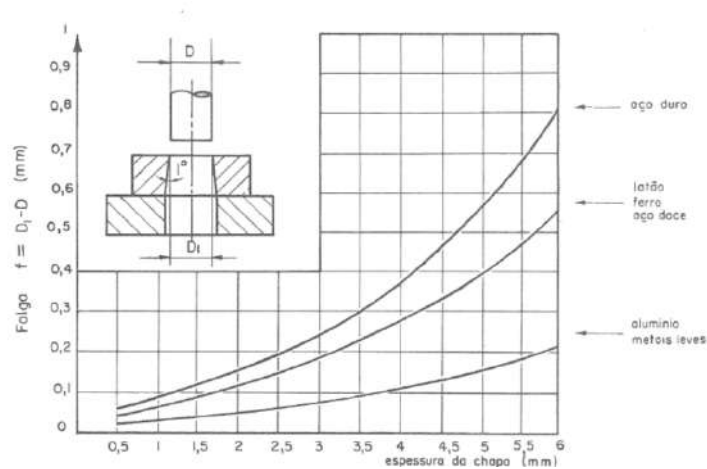


Figura 2.5: Relação entre o valor de Folga e a Espessura da platina a cortar [7]

As forças envolvidas no corte de platinas são elevadas devido ao encruamento do material durante a deformação plástica. Assim, a força de corte aumenta gradualmente, até atingir um máximo [11] e é relevante considerar esse valor máximo de força no projeto dos constituintes da ferramenta [7]. O valor da Força de corte pode ser calculado através da Equação 2.2, com recurso às Equações 2.3 e 2.4.

$$F_c = \tau_c \times A_c \quad (2.2)$$

$$A_c = l_c \times s \quad (2.3)$$

$$\tau_c = 0,8 \times r_m \quad (2.4)$$

Sendo que, F_c é a força de corte em N ; τ_c é a tensão de corte em MPa ; A_c é a área de corte em mm^2 ; l_c é o comprimento da aresta de corte em mm ; s é a espessura da platina a cortar em mm ; r_m é a resistência do material em MPa ;

Dependendo do material a cortar e da sua microestrutura, a tensão corte (τ_c) está geralmente entre 50 e 80% da tensão de resistência do material [11]. Caso a área de corte do punção seja muito maior que a espessura da platina pode usar-se a Equação 2.4.

A F_c é influenciada por fatores como a folga, o desgaste ou a espessura da platina. A força de corte máxima pode ser reduzida pela inclinação das arestas de corte. Isto porque quando a linha de corte é paralela ao material, o corte é efetuado simultaneamente em toda a superfície, elevando a $F_{c_{max}}$. Quando existe um ligeiro ângulo entre o punção e a platina, o material é cortado progressivamente, reduzindo a força máxima necessária [15].

2.2 Fabrico Aditivo

Tendo em conta que a geometria final é obtida pela adição progressiva de material, o fabrico aditivo é, como o nome indica, considerado um processo aditivo. Difere das metodologias de fabrico subtrativo, de moldação, de deformação ou de modificação e é definido como o processo de unir materiais para fabricar objetos a partir de um modelo 3D, normalmente camada a camada [16].

Quando surgiu era utilizado para prototipagem rápida, pois tinha a vantagem de não necessitar de moldes nem de ferramentas especiais para produzir protótipos de teste. Isto permitia testar vários designs, sem acarretar custos elevados. Esta era uma enorme vantagem numa perspetiva de novos projetos, já que cerca de 80% do custo de um produto é estabelecido antes da sua fase de produção [17]. A produção de componentes por FA tem progredido significativamente nos últimos 40 anos e desde a década de 90 até tem sido aplicado ao fabrico de ferramentas.

Atualmente, as tecnologias de Fabrico Aditivo, tal como a sua aplicação são bem diferentes, fruto de evoluções tecnológicas e introdução de novos materiais. Segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) 52900, é possível estabelecer 7 “famílias” principais em que se agrupam as múltiplas variantes do FA [16, 18, 19]: *Binder Jetting*, *Directed Energy Deposition*, *Material Extrusion*, *Material Jetting*, *Powder Bed Fusion*, *Sheet Lamination* e *Vat Photopolymerization*.

Apesar de muito diferentes, detêm um conjunto de etapas em comum [16]: Inicialmente, procede-se à criação do modelo 3D com recurso a *softwares Computer-Aided Design* (CAD), convertendo de seguida esse modelo num arquivo STL. Este é manipulado, num processo designado *slicing*, para obtenção de um *G-code*, que fornece comandos para o equipamento realizar a impressão do modelo. Frequentemente, é ainda necessário proceder ao tratamento da peça obtida, nas designadas etapas de pós-processamento.

2.3 Fabrico Aditivo por SLM

Selective Laser Melting é um processo que, dentro das tecnologias de FA, integra-se na categoria de PBF. Como o nome indica, é uma técnica que consiste em incidir uma fonte de calor a alta temperatura numa camada fina de pó metálico distribuído numa plataforma, conseguindo assim fundir as partículas do material [20].

Dentro dos processos de PBF, a tecnologia de *Selective Laser Sintering* (SLS) foi uma das primeiras a ser desenvolvida, em 1995. Foi a partir desta que se gerou o SLM, sendo que em 1999 foi lançada a primeira máquina de SLM que usava pó metálico [21]. O processo de SLM distingue-se dos demais de PBF porque, através do varrimento do laser, funde completamente o pó metálico para obter a geometria pretendida, conseguindo assim peças com alto teor de densidade [18].

Este processo tem sido alvo de grande interesse porque consegue produzir peças *near-net-shape*, com boas propriedades mecânicas, utilizando materiais metálicos [19]. Além disso, é benéfico para produção de componentes complexos de paredes finas, pois dispensa processos auxiliares, encurtando o tempo de produção [20]. Ainda assim, não dispensa de operações de pós-processamento, que elevam consideravelmente os custos das peças produzidas.

Esta tecnologia necessita que antes de tudo seja criado, em *software* CAD, o modelo do objeto a produzir para que, posteriormente, o *software* de pré-processamento consiga dividir o modelo em camadas de espessura finita [22]. Desta forma, é convertido numa linguagem de programação que pode ser lida pelo equipamento.

A Figura 2.6 ilustra como se realiza o SLM. Primeiramente, uma camada fina de pó metálico é depositada uniformemente na placa de base. A espessura da camada de pó deve ser controlada com precisão, tendo normalmente entre 20 a 100 μm de espessura [23], já que os parâmetros estão calibrados para fundir uma determinada espessura de material.

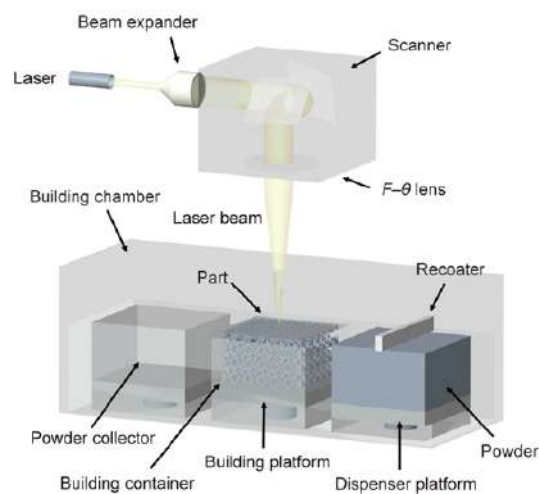


Figura 2.6: Esquema do Processo de SLM [18]

Para cada camada, o feixe de laser é aplicado na base de pó rapidamente (entre 100 a 1000 mm/s), segundo a trajetória planeada pelo *software*, gerando uma camada sólida [24]. Para que o percurso seja realizado com precisão, o feixe de laser aplicado passa por um sistema de lentes (galvanómetro) e é refletido para a plataforma, controlando assim o movimento nas direções X e Y [25].

Após a passagem do laser, as partículas de pó são fundidas totalmente, formando um banho de fusão que solidifica rapidamente (entre 10 a 100 μs) [26]. Devido ao curto período de interação entre o laser e o pó, as taxas de aquecimento e arrefecimento são muito elevadas durante o processo [18]. Desta forma, o crescimento dos grãos é afetado, como será explicado ainda neste capítulo.

Com a conclusão da primeira camada, a plataforma baixa-se de acordo com a espessura da camada. De imediato, uma escova de recobrimento empurra o pó fresco do depósito para o topo da superfície anteriormente gerada [18, 25] e o processo repete-se até se obter a peça completa.

Todo o processo é realizado numa câmara fechada, numa atmosfera de azoto ou argon com um teor muito baixo de oxigénio [23]. Além disso, a câmara está sujeita a condições de sobrepressão para minimizar a contaminação por oxigénio. Estes procedimentos são necessários para evitar a oxidação dos pós metálicos durante a fusão do material. A criação deste ambiente favorável ao processo limita o tamanho das peças produzidas ao interior da câmara e aumenta os custos de SLM. A velocidade de impressão, o elevado consumo de energia e a rugosidade das peças são outras limitações de SLM [2].

Caso seja necessário, a impressão por SLM pode ser otimizada, ao aquecer-se a placa de base entre 200 a 500 $^{\circ}C$, diminuindo assim as taxas de arrefecimento. Geralmente, esta técnica é usada para evitar possíveis fissuras durante a solidificação, quando se trabalha com materiais frágeis [2].

2.3.1 Parâmetros do Processo

A impressão de uma peça sem defeitos por SLM requer uma compreensão abrangente dos principais parâmetros do processo. Estes devem ser cuidadosamente afinados, uma vez que, quando mal ajustados, podem afetar a qualidade da peça ou promover o aparecimento de defeitos. Uma má parametrização pode levar à diminuição da densidade final, a fracas propriedades mecânicas ou a um acabamento grosseiro. Por oposição, se forem bem escolhidos e conjugados permitem obter baixas tensões residuais e atingir a microestrutura e as características desejadas [19].

Na Tabela 2.1 estão listados alguns parâmetros considerados relevantes para SLM, divididos por categorias. Em seguida, destacam-se de entre os listados alguns com maior influência no produto final obtido. Na Figura 2.7, são evidenciados alguns dos parâmetros abordados, mostrando nomeadamente o que se entende por distância entre passagens (*hatch spacing*) e espessura da camada (*layer thickness*).

Tabela 2.1: Parâmetros do Processo de SLM (Adaptado de: [18, 19]).

Categoria	Parâmetros do Processo
Laser	Tipo, Potência, Comprimento de onda, Velocidade e Trajetória de varrimento, Densidade de energia, Distância entre passagens; <i>Beam Shape</i> ;
Material	Densidade, Distribuição, Tamanho e forma dos grãos, Fluidez do pó, Propriedades Mecânicas, Composição Química e espessura da Camada; Contaminação e Reutilização do Pó;
Atmosfera	Nível de Oxigênio, Temperatura, Pressão, Gás Inerte utilizado.

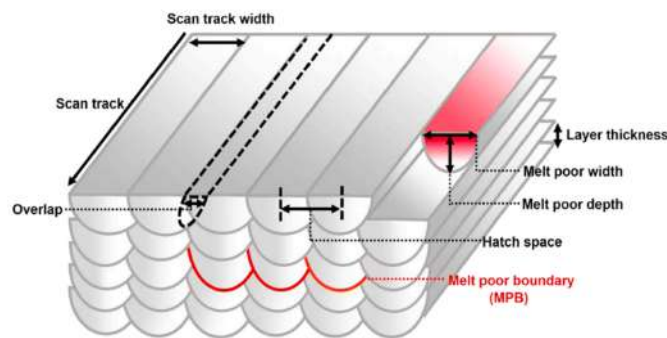


Figura 2.7: Parâmetros do Processo de SLM [19]

Em SLM, o laser é a fonte de energia do processo logo tem uma influência direta na qualidade da peça. Existem dois tipos possíveis de serem utilizados: maioritariamente usam-se lasers contínuos mas os lasers pulsados podem trazer benefícios na prevenção de fissuras [23].

A densidade do componente impresso é otimizada quando se aplica um laser de alta intensidade a uma velocidade baixa [27], já que isso garante a fusão completa do material. A porosidade é também reduzida quando aplicado um laser de elevada potência [28], pelo que se pode concluir que os parâmetros relacionados com o laser devem ser conjugados de forma a existir um fusão completa e uniforme do material.

A combinação entre o ângulo da parede e a espessura da camada geram um efeito de escada que influencia negativamente a rugosidade da peça [29]. A rugosidade continua a ser uma limitação para SLM, principalmente para o fabrico de ferramentas, porque ainda não se consegue obter um acabamento capaz de dispensar a maquinação final.

Este efeito de escada, representado na Figura 2.8, pode ser reduzido diminuindo a espessura da camada ou aumentando o ângulo da parede. Isso faz com que o tamanho dos degraus diminua, diminuindo a rugosidade da superfície. No entanto, a rugosidade não é apenas influenciada por este efeito.

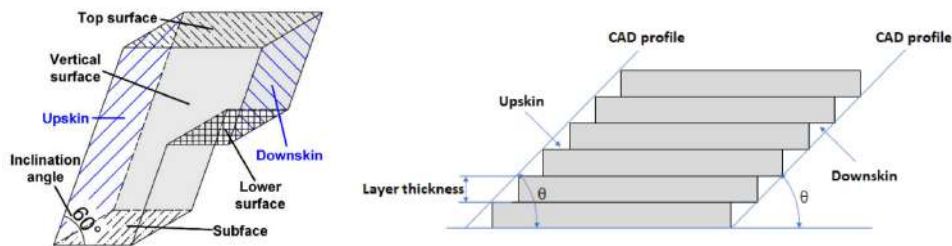


Figura 2.8: Efeito Escada e Identificação das diferentes Superfícies [21]

A rugosidade difere ainda consoante o tipo de superfície e a inclinação da mesma. As superfícies de *Downskin* são as que apresentam maior rugosidade ao passo que as superfícies *Upskin* têm uma qualidade superficial significativamente melhor [21]. Além disso, os valores de rugosidade mais baixos são alcançados em superfícies orientadas verticalmente (90°), pois o efeito de escada é reduzido ao máximo [30]. Estas características acabadas de enunciar são corroboradas pela Figura 2.9, que contém um gráfico relativo à variação da rugosidade do aço 1.2709, consoante o tipo e a inclinação da superfície.

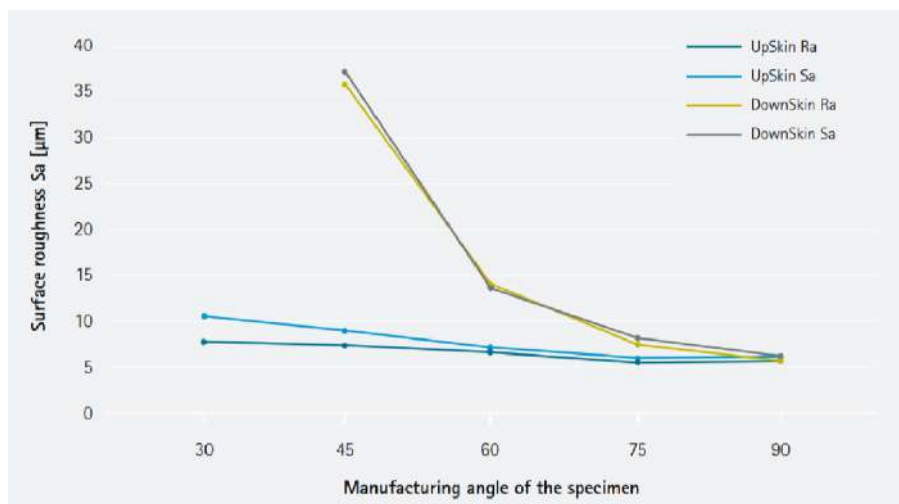


Figura 2.9: Rugosidade de Superfície após impressão [31]

Assim, fica explícita a importância de escolher a orientação correta da peça a imprimir durante a fase de parametrização. Esta decisão influencia o acabamento, a resistência, a quantidade necessária de suportes e o tempo de fabrico da peça [19].

Na impressão SLM, as estruturas de suporte, para além de fornecerem o suporte necessário à peça, dispersam o calor, podendo assim diminuir o impacto dos elevados gradientes de temperatura a que o material está sujeito. Estes suportes são necessários para manter a integridade da peça quando o ângulo da parede é inferior a 45° [21], mas aumentam o custo total do processo. No fim do processo de impressão, é necessário remover estas estruturas mas essa não é a única coisa a fazer, pois também é preciso limpar a peça depois de impressa [16].

A velocidade e a estratégia de varrimento são outros parâmetros decisivos em SLM. Entende-se por estratégia de varrimento, a trajetória adotada pelo feixe de laser na formação da camada. Esta está fortemente relacionada com a distribuição dos defeitos, sendo que a maioria se localiza no início ou no fim dos vetores de varrimento [24].

As mais comuns são as estratégias de varrimento unidirecionais (Figura 2.10a) e bidirecionais (Figura 2.10b), mas são também as que geram peças com menor densidade. Por essa razão, nalguns casos pode ser benéfico adotar uma estratégia com vetores de varrimento mais curtos como é a estratégia de ilha/xadrez (Figura 2.10c). Esta já permite obter uma elevada densidade [19, 21], pois divide a zona de impressão em pequenos quadrados. As estratégias rotativas (Figura 2.10d) conseguem distribuir uniformemente a temperatura, o que também é vantajoso para a qualidade final da peça.

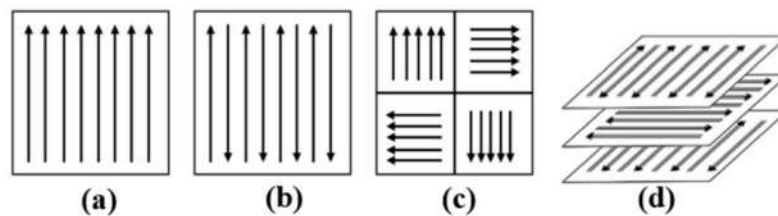


Figura 2.10: Estratégias de varrimento usadas em SLM [32]

A principal diferença entre as várias estratégias reside na refusão do material, conseguido pela sobreposi o. A sobreposi o (*overlap*), já evidenciada na Figura 2.7, assegura a fusão completa do p , promovendo o aumento de densidade, redu o da rugosidade e obten o de uma microestrutura fina com boas propriedades mecânicas [32]. Em contrapartida, uma maior sobreposi o pode levar ao aumento de tensões residuais.

2.3.2 Materiais

A tecnologia SLM   considerada bastante versátil, pois permite trabalhar com uma vasta gama de materiais. No entanto, a escolha do material a usar continua a ser um fator a ter em conta, pois influencia a densidade relativa e as propriedades mecânicas do produto final. Neste caso, o p  metálico   processado sem material aglutinante e sem qualquer tipo de pré-processamento, o que torna ainda mais relevante as características do material.

Geralmente, as peças impressas por SLM não têm um acabamento excelente, necessitando frequentemente de passar por processos de maquina o após a impressão. Este fator agrava-se se forem utilizadas partículas de p  de grandes dimensões ($\approx 120 \mu m$), tendo já sido comprovado [2] que se consegue uma qualidade superficial melhor com partículas de $\approx 20 \mu m$. No entanto, isso irá prejudicar a fluidez do p  e aumentar os custos do material, pelo que   necessário encontrar um equilíbrio.   ainda possível melhorar o acabamento das peças impondo uma velocidade de varrimento mais lenta, o que também irá aumentar o tempo de impressão [33].

Já foi comprovado [26] que os resultados obtidos são significativamente melhores quando o pó metálico utilizado cumpre alguns requisitos: as partículas devem ser homogêneas e esféricas, com um tamanho até $50 \mu m$ [21, 34] porque isso melhora a fluidez do metal e reduz o aparecimento de poros na peça. Tendo em conta as características do processo, é benéfico que o material tenha ainda um alto teor de pureza e que não seja muito suscetível à oxidação, para minimizar este fenómeno.

O material está sujeito a um aquecimento e arrefecimento muito rápidos, afetando o crescimento dos grãos [33]. Esta condição, aliada ao facto de o escoamento de calor ser oposto à fonte de calor, promove o crescimento de grãos colunares, altamente orientados. Geralmente, estes apresentam uma forma alongada e estão inclinados de acordo com a direção de varrimento [25].

Portanto, as elevadas taxas de arrefecimento ($\approx 105 Ks^{-1}$) conferem ao material uma microestrutura fina e uniforme, traduzindo-se numa alta resistência e tenacidade [2, 20]. Apesar de complicado, é possível controlar a microestrutura ao monitorizar em tempo real a temperatura da *melting pool* [26]. Na Figura 2.11 observa-se uma microestrutura característica de SLM, neste caso do aço ferramenta 1.2709.



Figura 2.11: Microestrutura do Aço Ferramenta 1.2709, característica de SLM [31]

Ao falar de materiais para SLM deve ser referido que, para imprimir uma peça de altura considerável tem que se garantir uma grande quantidade de pó. Isto acontece porque, quer seja ou não utilizado, o pó terá de preencher a câmara ao longo das várias camadas [34]. Assim, nestes casos, existe uma grande quantidade de pó que não é utilizado.

Para aumentar a taxa de utilização de matéria-prima e reduzir os custos de material é importante reciclar esses pós inutilizados. Anteriormente, foram realizados estudos [2] que demonstraram que os pós metálicos podem, teoricamente, ser reutilizados várias vezes, reduzindo o desperdício e tornando o processo mais económico e ecológico. No entanto, importa referir que isso poderá afetar ligeiramente as propriedades do material [20].

Alguns dos materiais usados em SLM são ligas à base de alumínio, titânio, níquel e cobre [2]. Nos casos de produção de ferramentas, a seleção do material baseia-se no

desempenho exigido pela aplicação da mesma.

Desta forma, deve mencionar-se o Aço Ferramenta 1.2709, o material utilizado para impressão nesta dissertação. É um aço martensítico com boa resistência à deformação e tenacidade [35]. Destaca-se ainda a sua maquinabilidade, um fator importante em SLM. Na Figura 2.12 encontra-se uma fratógrafia deste material, em que é possível identificar *dimples*, desvendando um comportamento dúctil. No entanto, este comportamento pode ser alterado consoante a parametrização, já que o aparecimento de porosidades reduz a ductilidade [35].

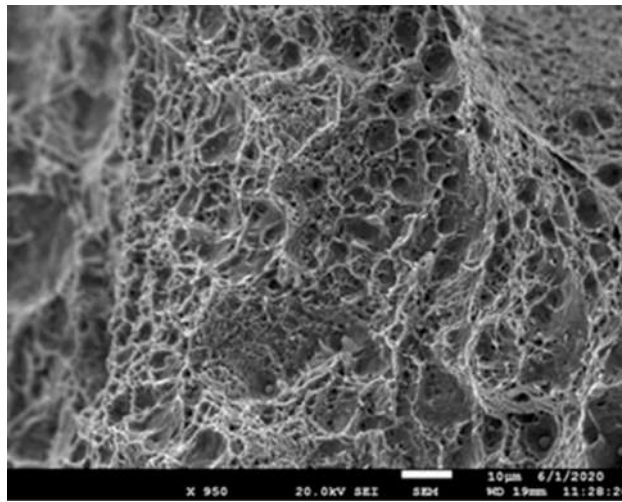


Figura 2.12: Fratógrafia de Aço Ferramenta 1.2709 por SLM [36]

2.3.3 Defeitos

Num processo tão complexo quanto o de SLM é natural que surjam defeitos [24]. Alguns poderão ser causados pelas características de SLM, outros pelo material utilizado e outros pela escolha incorreta dos parâmetros do processo.

Os elevados gradientes térmicos a que o material está sujeito provocam tensões residuais que aumentam à medida que mais camadas são adicionadas. Como já foi referido, a estratégia de varrimento do laser também influencia o aparecimento de tensões e, conseqüentemente, de defeitos. As tensões residuais combinadas com as tensões causadas por cargas externas, reduzem significativamente a resistência das peças, favorecendo o aparecimento e propagação de fissuras. Este fenómeno pode ser evitado se o material for pré-aquecido [2] ou se for submetido a um tratamento térmico, após a impressão.

Os defeitos que mais frequentemente surgem em SLM são: porosidades, defeitos devido à fusão incompleta do material e *keyhole*. Como seria de esperar, estes defeitos prejudicam as propriedades mecânicas do componente produzido [19, 24].

Uma das limitações desta tecnologia é o aparecimento de poros, que são difíceis de eliminar completamente, por estarem distribuídos aleatoriamente [24]. Tipicamente, um

poro tem uma forma aproximadamente esférica de pequena dimensão ($< 100 \mu m$) e resulta de condições instáveis do processo.

A formação de poros é promovida por gases presos na *melting pool*: o gás presente entre as partículas de pó pode dissolver-se na *melting pool* e, como a taxa de arrefecimento é alta, pode não conseguir escapar antes da solidificação, formando assim um poro. Este fenómeno pode ser evitado com o pré-aquecimento do material e com a refusão por sobreposição [20]. A Figura 2.13a corresponde a uma fotografia que apresenta alguns poros.

Por oposição, a fusão incompleta do material deve-se geralmente à falta de intensidade do laser, o que não permite que os pós sejam totalmente fundidos. Além disso, uma baixa intensidade do laser gera uma *melting pool* reduzida e isso reduz a sobreposição de varrimento que poderia auxiliar na fusão dos pós. Por essa razão, os defeitos por fusão incompleta do material estão normalmente localizados entre os vetores de varrimento ou entre camadas. As zonas em que este defeito está presente apresentam uma superfície rugosa, promovendo a propagação do defeito para mais camadas [24]. Na Figura 2.13b é possível observar a fusão incompleta do material, uma vez que se distinguem claramente partículas não fundidas.

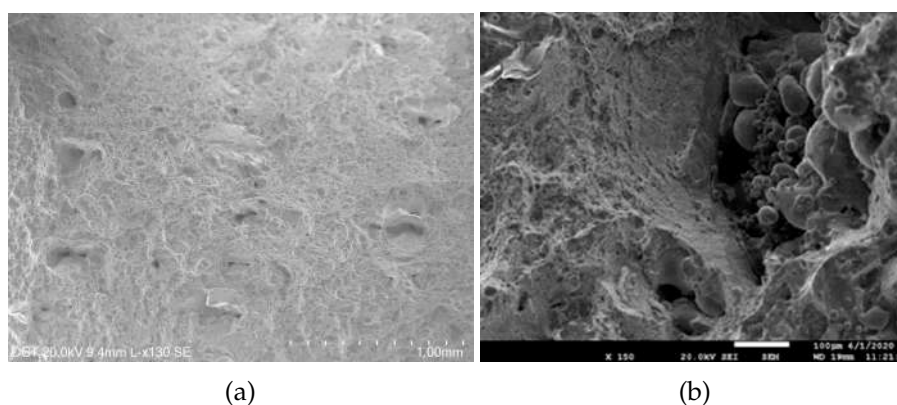


Figura 2.13: Defeitos de SLM em peças de Aço Ferramenta 1.2709 (a) Porosidades [36]; (b) Fusão incompleta do material [36]

Apesar da câmara protetora, o oxigénio presente entre as partículas de pó pode influenciar negativamente a impressão, tendo já sido comprovado [23] que mesmo em pequenas quantidades, o oxigénio provoca alterações na *melting pool*. Isto pode ser reduzido caso se garanta que o pó esteja seco e limpo [20]. A vaporização é outro fenómeno indesejado, já que também gera porosidades pelo aprisionamento de gases na *melting pool*. Este fenómeno ocorre quando é aplicada uma elevada intensidade do laser sobre o material, levando à vaporização de componentes com um ponto de fusão mais baixo [24].

Para prever e evitar a formação de defeitos pode recorrer-se a simulações numéricas ou a sistemas de monitorização. Já depois da impressão da peça, pode ainda maquinar-se a superfície afetada [24]. Apesar de já existirem soluções para evitar ou reduzir o aparecimento destes defeitos, garantir a integridade estrutural e a fiabilidade das peças

produzidas continua a ser um desafio [22].

2.3.4 Aplicações

Pelas características já destacadas neste documento, percebe-se que SLM é uma tecnologia promissora a nível industrial [37], principalmente em áreas onde é necessária precisão nas peças produzidas, como é o caso da indústria automóvel, médica e aeroespacial.

Tendo em conta o tema da dissertação, é dado ênfase à indústria Automóvel. A Figura 2.14a apresenta uma pinça de travão da marca *Bugatti*, produzida em SLM. Neste caso, foi possível reduzir significativamente o peso, sem comprometer o desempenho da peça.

A indústria automóvel está em constante desenvolvimento para fazer face às tendências de design e às evoluções tecnológicas [9]. Isso fez com que o conceito de ferramenta se tornasse mais complexo, tornando o FA uma solução viável para a produção dessas ferramentas [38] e o SLM não foi exceção. Através de projetos anteriores foi já comprovado [34] que o desempenho das ferramentas feitas por SLM é semelhante ao das produzidas por maquinação. Um exemplo disso é a matriz de corte, apresentada na Figura 2.14b, que é aplicada na estampagem de platinas.



(a)



(b)

Figura 2.14: Aplicações de SLM: (a) Pinça de travão *Bugatti* [39]; (b) Matriz para Estampagem [9];

Na estampagem a quente, o SLM também pode ser uma mais valia, pois permite a produção de ferramentas de corte com cavidades internas para referigeração, algo que não seria conseguido através da maquinação [34].

CASO DE ESTUDO

De forma mais profunda e detalhada, é agora abordado o problema em causa. O objetivo é estudar a tecnologia de SLM na aplicação de facas de corte para estampagem de platinas, logo o primeiro passo foi escolher qual a faca mais adequada para ser estudada neste projeto.

Esta escolha teve em conta vários fatores: Pretende-se que a faca seja pequena e de geometria simples, para não correr o risco de fissurar, quando produzida por SLM; Pretende-se que seja uma faca com bastante uso e desgaste e que, por isso, tenha de ser substituída regularmente; Pretende-se que seja uma faca que corte platinas resistentes, para que se teste os limites da tecnologia de SLM; Além destes fatores mais técnicos, pensou-se também na logística, pelo que a faca escolhida deve pertencer a uma ferramenta que tenha uma ferramenta *spare* também. Isto permite que se possa testar a durabilidade e o desempenho da faca de SLM em qualquer momento, sem ter de parar a produção em linha. Outro fator importante foi a facilidade de substituição: a faca de corte escolhida deve estar numa extremidade da ferramenta para poder ser retirada facilmente no caso de avarias, durante o processo de *Try-Out*.

Uma vez que assegura todos estes critérios foi selecionada para este projeto, a faca de corte 5Q0.803.106 (Pos 51_281). A Figura 3.1 explica como é identificado e organizado o *part number*.

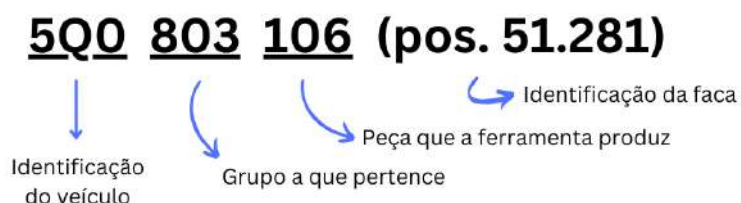


Figura 3.1: Identificação do *Part Number*

Este punção de corte está integrado na parte superior da ferramenta da op. 30, que produz **longarinas dianteiras**. Como o nº de identificação da peça é o 106, um número par, sabe-se que se trata de uma longarina dianteira colocada no lado direito do carro. Esta é uma peça produzida na prensa da **TAP5** da Autoeuropa mas que segue, posteriormente,

para exportação. As principais características do punção, bem como algumas características do material a cortar podem ser encontradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características da Faca de Corte em Estudo

Faca de Corte pos. 51.281	
Material	HWS (anteriormente 1.2358)
Dimensões Máximas	80 × 70 × 80 mm
Peso	1,5 Kg
Dureza exigida	54 + 4 HRC
Peça produzida	Longarina dianteira direita
Material das Platinas	Aço Dual Phase 450/780
Espessura das Platinas	1,65 mm
Nº de Golpes/semana	12 600

Para uma melhor compreensão do objeto de estudo desta dissertação, na Figura 3.2a encontra-se uma *spare* da faca escolhida, produzida pelo método convencional. Na Figura 3.2b está a matriz equivalente.

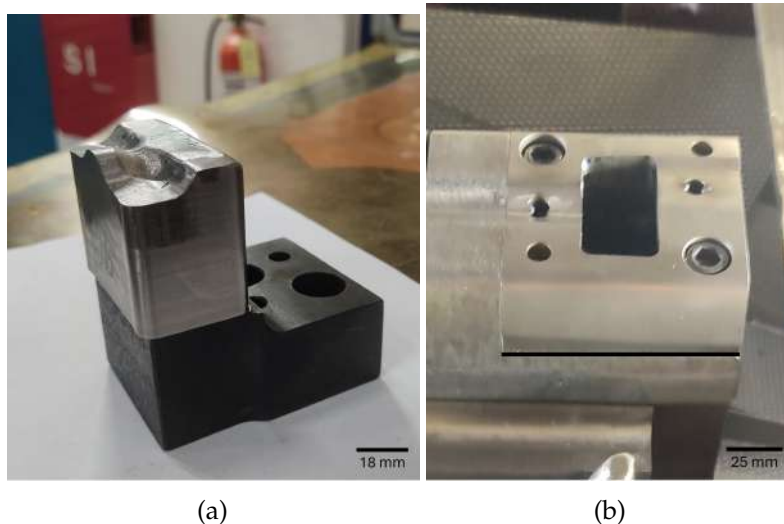


Figura 3.2: (a) Faca de Corte pos. 51.281; (b) Matriz associada à Faca

Para esclarecer a forma como é feito o corte das platinas, a Figura 3.3 apresenta qual é o movimento entre a faca e a sua matriz correspondente. Como se percebe, o punção penetra a matriz, aplicando um força sobre a platina e forçando o material a escoar pela folga existente.

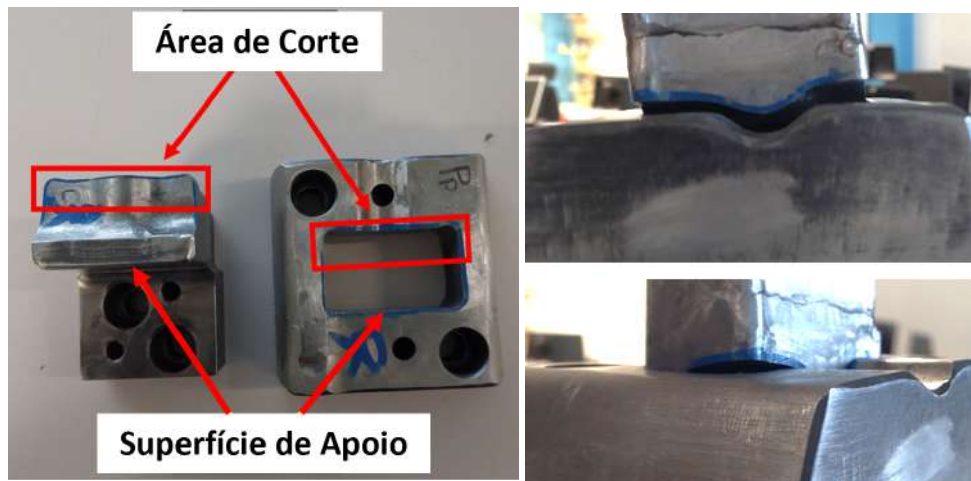


Figura 3.3: Exemplificação do movimento da faca e da respetiva matriz
Retirado de documentos Autoeuropa

Para obter a forma final da longarina em estudo é necessária uma operação de corte e seis operações de estampagem, sendo que o processo não é todo realizado na mesma prensa. O processo de produção da longarina direita tem início na preparação das platinas, através de bobinas de aço. Depois da platina passar pela op.10, na prensa de corte, possui as dimensões máximas de $907 \times 380 \times 2 \text{ mm}$ e a geometria ideal, pensada com o objetivo de economizar material e facilitar as operações seguintes.

Na op. 20, já na prensa de estampagem, dá-se a designada operação de desenho e, portanto, quando chegam à op.30, na qual se encontra o punção de corte em estudo, as platinas já têm uma forma semelhante à final. A análise da Figura 3.4 permite perceber o corte do material em excesso, efetuado nesta terceira operação: na Figura 3.4a encontra-se a platina depois da op.20 e na Figura 3.4b a platina depois da op.30. Os círculos vermelhos, apresentados em ambas as figuras identificam o corte efetuado pela faca em estudo. Depois desta são ainda feitas outras quatro operações até se chegar ao produto final.



Figura 3.4: Longarina Dianteira (a) após a op. 20; (b) após a op.30;

Depois desta introdução ao objeto de estudo, pretende-se demonstrar agora que, de facto, a produção destas longarinas tem apresentado um elevado número de paragens, gerando constrangimentos para a fábrica. Para provar isso, analisam-se as paragens por *quickrepairs*, ou seja, paragens rápidas da linha de produção que acontecem para que

sejam feitas reparações das ferramentas dentro da prensa. Estas paragens, apesar de serem rapidamente resolvidas, quando acontecem várias vezes afetam o *uptime* da linha.

A produção destas longarinas aumentou desde 2022 e, conseqüentemente, aumentou também a quantidade de paragens para *quickrepairs* deste *die set*. Por estarem a produzir durante mais tempo, o *Tool&Die* deixou de ter o tempo necessário para realizar a manutenção preventiva entre *production runs*. Para aliviar esta situação, foi pedido que, para além dos *sparcs* dos punções e matrizes, se produzissem *sparcs* das ferramentas das op. 30 e op. 50, uma vez que estas eram que originavam mais problemas.

Ainda assim, em 2023, as ferramentas desta longarina direita (5Q0.803.106) foram a segunda maior causa de paragens para *quickrepairs* da TAP5, causando, no total, 2201 minutos de paragem (Figura 3.5). Deve referir-se que, no top 3 está também a longarina esquerda (5Q0.803.105) que é muito semelhante. Desta forma, caso o projeto desta dissertação seja considerado um sucesso, deve aplicar-se também a implementação do FA por SLM nesta ferramenta.

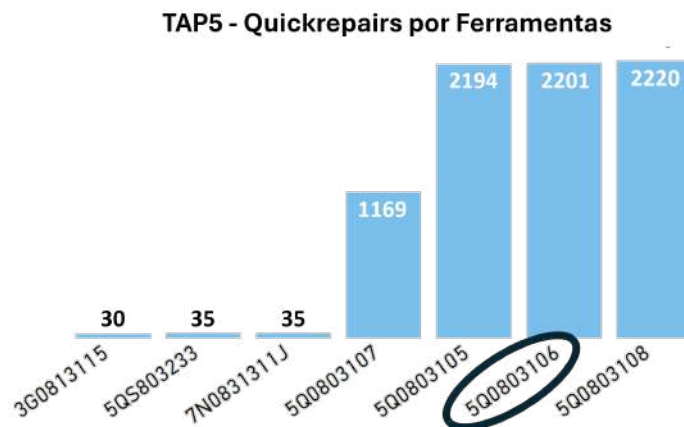


Figura 3.5: Tempo perdido em *quickrepairs* na TAP5, em 2023
Retirado de: *d-Press*, Autoeuropa

Na Figura 3.6 encontra-se um gráfico referente apenas à ferramenta 5Q0.803.106. Este apresenta, para o ano de 2023, o tempo perdido em *quickrepairs* na ferramenta, por operações. Analisando-o conclui-se que a op.30 foi a maior causa de paragens em 2023, com um total de 629 minutos de paragens em linha, dos quais 170 minutos foram relacionados com o corte de material, quer seja por facas e matrizes partidas ou pelo aparecimento de rebarba nas platinas cortadas.

Estas ocorrências são tratadas como *quickrepairs* porque existem peças *sparcs* que, quando necessário, permitem fazer a substituição de imediato na prensa. Caso contrário, a substituição destas facas demoraria vários dias, causando perdas de produção ainda maiores.

TAP5 – Quickrepairs na 5Q0.803.106 por op.

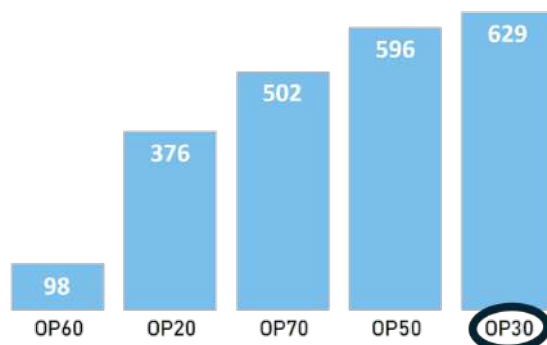


Figura 3.6: Tempo perdido em *quickrepairs* na ferramenta 5Q0.803.106, em 2023
Retirado de: *d-Press*, Autoeuropa

Anteriormente, a fábrica já tinha tentado encontrar a causa e a possível solução para este número tão elevado de minutos perdido por *quickrepairs*. Inclusive, em 2023, foi feita uma tese de mestrado relativamente à produção deste tipo de longarinas e às platinas usadas para esse efeito [40]. Isto porque as longarinas dianteiras são estruturas de suporte que se encontram perto das rodas frontais e do *bumper* do carro, como destacado a vermelho na Figura 3.7. São, portanto, perfis em aço responsáveis pela resistência estrutural do veículo e pela absorção de energia em caso de acidentes, protegendo a carroçaria e os passageiros [41].

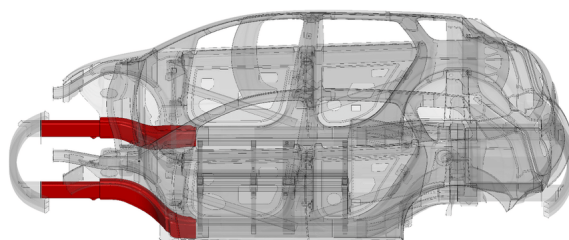


Figura 3.7: Localização das longarinas dianteiras do carro [41]

Assim sendo, as platinas de aço usadas para produzir as longarinas têm de ter elevada resistência à torção e ao choque. Tendo isso em atenção, na Autoeuropa substituíram-se as platinas de aço macio, anteriormente usadas por platinas de aço *Dual Phase 450/780* com revestimento de zinco. O objetivo passou por reduzir o peso do automóvel e o seu consumo, sem comprometer a sua segurança e a resistência ao choque. Na tese de mestrado efetuada [40] concluiu-se que, as facas e matrizes partidas ou excessivamente desgastadas nestas ferramentas eram potenciadas pelo uso deste material.

Os aços *Dual Phase* são interessantes a nível industrial, pois possuem uma microestrutura que lhes confere propriedades mecânicas adequadas a esta aplicação [40]. A Autoeuropa usa-os para a produção de longarinas por terem uma ótima capacidade de absorção de energia e elevada resistência à fadiga. Estes aços têm elevada resistência sem comprometer demasiado a sua ductilidade. A grande limitação deste material é a

dificuldade apresentada na estampagem e corte de platinas. Por serem mais resistentes, as platinas *Dual Phase* danificam e desgastam mais os constituintes das ferramentas de estampagem.

Na Autoeuropa, para se conseguir trabalhar com este material, passou a usar-se HWS nos componentes das ferramentas em causa, pois estas tinham um elevado número de ocorrências de facas e matrizes fissuradas ou desgastadas. Anteriormente, esses punções e matrizes eram feitos com um aço tradicionalmente usado na indústria automóvel (Aço Ferramenta 1.2358) mas, desde que se substituiu pelo HWS, o número de paragens diminuiu. Isto terá acontecido uma vez que o HWS tem uma maior resistência ao desgaste, alta dureza e tenacidade. Assim, este desgasta-se menos quando realiza o corte ou estampagem de platinas de Aço *Dual Phase*.

3.1 Produção pelo Método Convencional

Como já foi demonstrado, é comum o *Tool&Die* ter de realizar a reparação ou substituição de componentes das ferramentas. Devido ao desgaste provocado pelos processos de corte e estampagem é necessário substituir, regularmente, os punções de corte pelos punções *spare*, sendo que quando isto acontece deve fazer-se um pedido à Unidade de Negócios de Cunhos e Cortantes (UNCC) da Autoeuropa para se dar início à produção de uma nova peça de substituição.

Pelo motivo já enunciado anteriormente, no processo convencional a faca de corte em estudo é produzida totalmente em HWS. As características e propriedades deste material encontram-se no Anexo A.1.

Por norma, os componentes das ferramentas de estampagem são produzidos através de fundição ou através da maquinação de um bloco de material, sendo que o punção estudado é produzido através esta última. Pelas dimensões reduzidas e pela geometria que o punção apresenta, a maquinação traz mais vantagens comparativamente à fundição, por ser um processo mais económico e mais rápido.

Caso não exista material em stock na fábrica, o primeiro passo para a produção da faca de corte é a encomenda de material. Neste caso, é pedido um bloco em bruto com as dimensões de $90 \times 70 \times 90$ mm. Na fábrica, o objetivo passa sempre por economizar o processo ao máximo e desperdiçar o mínimo de material possível, logo as dimensões pedidas só devem ser ligeiramente superiores às dimensões finais máximas da faca.

A primeira fase de maquinação serve para maquinar a forma, a partir do bloco de material em bruto. Para que se consiga uma cópia exata da faca a substituir, é feita a digitalização das superfícies da *spare* na FIDIA, um equipamento da Autoeuropa. Deve ser referido que os desenhos técnicos CAD não foram utilizados, uma vez que estas facas sofrem ligeiras alterações constantemente. A peça em bruto segue para uma CNC, onde são realizadas as operações iniciais de maquinação, uma num plano bidimensional (*2D Base*) e outra num plano tridimensional (*3D Top Pre*).

Na etapa *2D Base* remove-se grande parte do material em excesso ao passo que, na etapa *3D Top Pre*, usando como referência a digitalização do punção, é possível chegar à geometria pretendida, já incluindo os furos necessários. Esta última é feita com recurso a uma fresadora de elevada precisão dimensional e vários eixos de trabalho, que permitem assim obter formas complexas, com as curvas e inclinações necessárias. Após estas duas primeiras etapas de maquinação, a peça está sobredimensionada em $0,5\text{ mm}$ e pode seguir para tratamento térmico.

O punção de corte sobredimensionado é submetido a um processo de têmpera integral para adquirir valores mais elevados de dureza. Neste tratamento, o material é aquecido gradual e uniformemente, sendo depois aplicada uma taxa de arrefecimento elevada para aumentar a resistência ao desgaste e para que a dureza seja igual em todos os pontos da peça [42].

Depois do tratamento térmico, a faca segue para a segunda fase maquinação, o acabamento final. Realiza-se a retificação, um processo abrasivo que remove pequenas quantidades de material para aumentar a precisão dimensional da faca de corte. Além disso, este processo é também eficaz na eliminação de superfícies rugosas existentes após a têmpera, melhorando assim o acabamento superficial.

De seguida, é aplicada a Eletroerosão a fio (EDM) na superfície de corte da faca. Neste processo é possível remover material através de um fio condutor, tendo por isso um controlo e uma precisão elevados. Assim, conseguem-se gerar arestas vivas cortantes, essenciais no processo de corte das platinas das longarinas.

A última etapa, em que se obtém o produto final é designado por *Finish HRC*, um processo de acabamento a alta velocidade, que complementa as etapas de retificação e EDM. Com esta refinação final, o punção de corte obtém finalmente o acabamento e as tolerâncias finais desejadas.

3.2 Produção por SLM

O que se pretende com este projeto é estudar a viabilidade de substituir o processo convencional, referido no subcapítulo anterior, pela impressão 3D com a tecnologia de SLM. Já existem estudos suficientes [9] que permitem concluir que é possível, através do fabrico aditivo de metais, produzir ferramentas para o processo de estampagem com um excelente desempenho.

Para a produção em SLM será utilizado o Aço Ferramenta 1.2709, material proposto pela empresa que possui o equipamento e que realizou a impressão, o Centro Tecnológico da Indústria dos Moldes, Ferramentas especiais e Plásticos (CENTIMFE). Este material é adequado para a aplicação pretendida, uma vez que tem uma elevada resistência e é maquinável, após a impressão. As suas propriedades podem ser observadas no *Datasheet* do material, apresentado no Anexo A.2.

No início do projeto foi necessário alterar, através do *software CATIA V5*, o modelo CAD, para otimizar a impressão 3D por SLM. Para reduzir ao máximo a necessidade

de estruturas de suporte eliminaram-se as arestas vivas existentes no modelo, ao bolear algumas arestas. Obviamente, os punções que realizam o corte, como é o caso do punção em estudo, não podem ter as arestas de corte boleadas porque isso inviabiliza o corte das platinas. No entanto, essa questão não se coloca pois as arestas de corte são maquinadas após a impressão.

Além de bolear arestas no modelo CAD, foi ainda necessário sobredimensionar certas zonas da peça para que, posteriormente, através da maquinação se obtivessem as dimensões desejadas. Por segurança, no modelo CAD definiu-se 1 mm de sobresspessura mas este é um valor elevado comparativamente com o que geralmente é aplicado a punções deste tipo (cerca de 0,5 mm). Pelo que, este foi um valor aplicado neste protótipo mas, posteriormente, pode usar-se um valor mais baixo.

Durante esta fase de alteração do ficheiro CAD, estudou-se a possibilidade de se introduzir "*pockets*" (zonas sem material no interior da faca) com o objetivo de testar a tecnologia e reduzir o peso da peça e a quantidade de material utilizado. Isto seria vantajoso, pois iria reduzir o tempo e os custos de produção. No entanto, esta ideia não foi concretizada porque a faca tem dimensões demasiado pequenas. Esta poderá ser uma possibilidade caso, no futuro, se decida imprimir em SLM punções maiores.

Para além do design, outros fatores a ter em conta na fase preparação são a parametrização e a orientação das peças a imprimir. Existem diferentes orientações possíveis para a impressão da faca mas deve escolher-se a mais adequada com o objetivo de otimizar o produto final. Essa escolha deve ter em conta que a superfície de base irá ficar com um acabamento superficial grosseiro. Isto acontece uma vez que, depois de concluída a impressão da peça a sua separação da plataforma, por EDM, afeta a qualidade de superfície. Desta forma, deve escolher-se como base uma superfície que não esteja necessariamente dependente do acabamento superficial.

Depois de algumas reuniões para discutir ideias e otimizar os parâmetros de impressão, decidiu-se que a faca de corte seria impressa segundo a disposição apresentada na Figura 3.8. Note-se que, tal como pretendido, a superfície de base escolhida não interfere diretamente no corte das platinas. Esta foi a orientação ideal para diminuir as estruturas de suporte necessárias e, como se observa, os suportes existentes são mínimos. Isto é importante, pois apesar dos seus benefícios, estes suportes aumentam o tempo e custo de fabrico e podem dificultar as operações de pós-processamento [19]. Note-se que foi ainda necessário organizar as peças, de maneira a imprimir a faca juntamente com os provetes dos Ensaios Mecânicos.

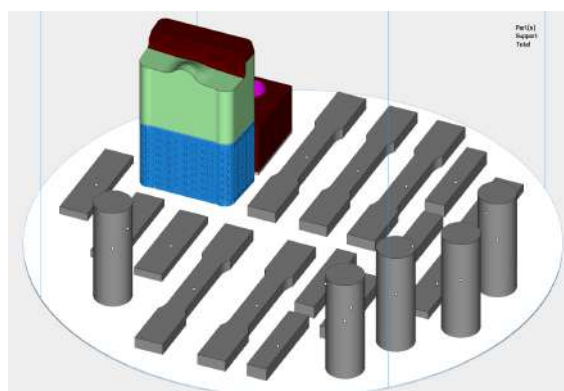


Figura 3.8: Disposição das Peças Impressas na Plataforma de Impressão

Considerando as sugestões do CENTIMFE, que já possui experiência no FA por SLM e está familiarizado com o equipamento, foram definidos alguns parâmetros que se encontram representados na Tabela 3.2. A impressão foi realizada com recurso ao equipamento *TruPrint 3000*, que permite produzir peças para diferentes setores, através de uma câmara de $\varnothing 300 \times 400$ mm. As características principais deste equipamento encontram-se no Anexo A.3.

Tabela 3.2: Características da Impressão por SLM

Características de Impressão SLM	
Tempo de Impressão	16,5 h
Espessura das Camadas	60 μm
Tamanho das Partículas de Pó	20-65 μm
Densidade do Pó	> 8.05 g/cm ³
Velocidade de Varrimento	800 mm/s
Potência do Laser - <i>UpSkin</i>	360 W
Potência do Laser - <i>InSkin</i>	260 W
Potência do Laser - <i>DownSkin</i>	270 W
Potência do Laser - <i>Core</i>	340 W
Gás Inerte	Árgon
Pré-Aquecimento	Não aplicado
Orientação de Impressão	Vertical

A Figura 3.9 mostra a faca de corte, imediatamente após a impressão, ainda sem qualquer tipo de pós-processamento, através da qual foi possível fazer uma breve comparação com outros projetos já realizados na fábrica.

A impressão do protótipo foi considerada um sucesso pois, contrariamente ao que tinha acontecido num estudo feito em SLS para metais, o punção de corte produzido por SLM não apresentou fissuras. Isto revela que SLM pode ser uma tecnologia mais vantajosa para a produção deste tipo de punções.



Figura 3.9: Faca de Corte após impressão por SLM

Pelas características do processo, não era esperado um acabamento superficial excelente. No entanto, comparando com outras peças já produzidas por SLM para a Autoeuropa, admite-se que este punção ficou com um acabamento mais grosseiro, agravado nas zonas em que foram necessárias estruturas de suporte e na superfície de base, como esperado. Isto poderá ser um indicador de que a parametrização não beneficiou o acabamento superficial. No entanto, considera-se que este fator não influencia negativamente o desempenho da faca de corte, pois ainda é necessário maquinar as sobreespessuras da peça.

Como já mencionado, depois da impressão é necessário maquinar as zonas de contacto e as zonas de corte, para garantir um melhor acabamento. Na produção por SLM, a maquinação só é feita para retirar o material em excesso e melhorar o acabamento das superfícies. Desta forma, percebe-se que, com a impressão, a maquinação passa a ser um processo mais fácil e rápido, pois desta forma não se começa com um bloco de material em bruto mas sim com uma forma semelhante à final. Salienta-se que as zonas a maquinar correspondem às zonas em que se adicionaram inicialmente sobreespessuras no modelo CAD.

Assim é possível passar algumas etapas, quando comparando com o método convencional. No entanto, é necessário passar por um processo de retificação em que se aprimora a qualidade superficial e as tolerâncias dimensionais.

Tal como no método tradicional, o punção de corte é submetido a um processo de EDM para obter superfícies cortantes, uma etapa de extrema importância tendo em conta a aplicação do punção. Por fim, é dado um acabamento final que permite a finalização deste processo produtivo. A Figura 3.10a e a Figura 3.10b apresentam, respetivamente, a marcação das zonas a maquinar e a faca já depois da maquinação. Nesta última, é possível observar a diferença de rugosidade entre as superfícies impressas e as que foram posteriormente maquinadas.

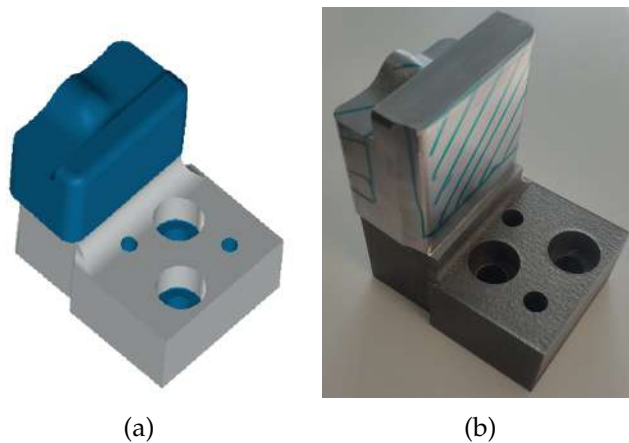


Figura 3.10: Maquinação: (a) Zonas a Maquinar; (b) Faca depois de maquinada;

O tratamento térmico é o último passo e é realizado por subcontratação. Tendo em conta a aplicação da faca de corte, a têmpera superficial a laser pareceu ser o processo mais vantajoso, uma vez que é económico e que se demonstra eficaz a reduzir o desgaste do material, evitando assim o aparecimento de fissuras. Na Figura 3.11a e a Figura 3.11b está, respetivamente, a marcação das zonas a temperar e a faca, já depois do tratamento térmico. Verifica-se que, as superfícies temperadas a laser apresentam um aspeto bem diferente das outras superfícies, com uma cor significativamente mais escura.

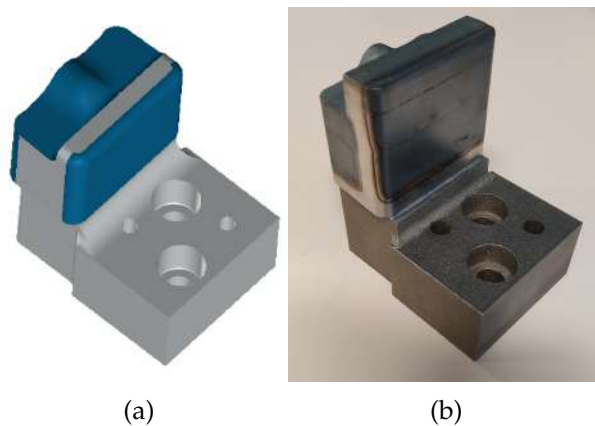


Figura 3.11: Têmpera: (a) Zonas a Temperar (b) Faca depois de Têmpera

Ao contrário da têmpera total ou integral, em que o tratamento é aplicado a todo o material, este por ser um tratamento a laser, permite aplicar a têmpera de forma localizada, apenas nas zonas de corte e de contacto. A profundidade atingida varia entre 1 e 3 *mm* de espessura, podendo chegar-se a valores de dureza entre os 55/60 HRC [42].

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO MATERIAL

A caracterização mecânica do material vai de encontro ao objetivo desta dissertação, uma vez que permite avaliar o desempenho da faca de corte produzida por SLM e compará-lo com o desempenho apresentado pela faca de corte produzida pelo método convencional. Essa caracterização será feita com base nos resultados dos Ensaios de Tração, Flexão e Impacto (Charpy).

Os provetes impressos foram, todos eles, sobredimensionados em cerca de 1 *mm* para posteriormente serem maquinados. Assim garante-se que se encontram nas mesmas condições do protótipo. Com o mesmo objetivo, os provetes foram submetidos a têmpera a laser, apenas nas regiões de maior esforço. A localização das zonas temperadas está identificada na Figura 4.1.

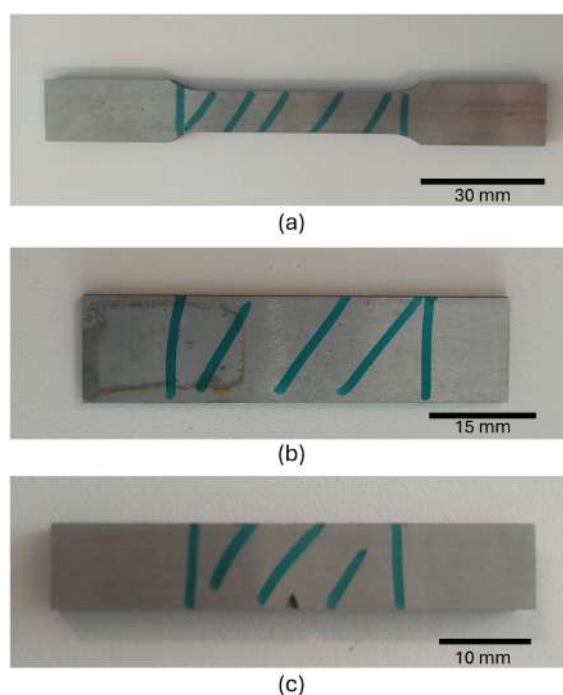


Figura 4.1: Marcação das Zonas a aplicar Têmpera a Laser nos Provetes de (a) Tração; (b) Flexão; (c) Charpy;

Desde já, importa referir que, durante o tratamento térmico os provetes, tal como o protótipo reagiram de forma inesperada. Com a aplicação da têmpera pretendia-se alcançar valores de dureza à volta dos 57 HRC, sabendo pelo Datasheet do Aço 1.2709 que estes eram valores possíveis de alcançar. Mas os valores obtidos foram muito inferiores.

Considera-se que este fator não invalida os resultados obtidos nos ensaios, pois ainda é possível perceber as capacidades deste material. No entanto, esta anomalia deve ser tida em conta na interpretação dos resultados.

Para cada ensaio foram impressos 5 provetes, produzidos por SLM em Aço Ferramenta 1.2709. Os provetes foram impressos segundo a orientação já apresentada na Figura 3.8, sendo que esta foi a solução encontrada tendo em conta os esforços a que cada provete está sujeito durante os ensaios.

4.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração uniaxial é utilizado frequentemente para estudar as propriedades mecânicas de metais. Através de uma curva Tensão-Deformação, como a apresentada na Figura 4.2a, os resultados deste ensaio permitem obter valores de tensão de cedência, tensão máxima e tensão de rotura, bem como os respetivos valores de deformação. Além disso, permite estudar a rigidez, ductilidade e deformação do material [43]. Neste ensaio, o provete é sujeito a uma força de tração uniaxial, que irá alongar e deformar até ao ponto de rotura, algo evidenciado na Figura 4.2b.

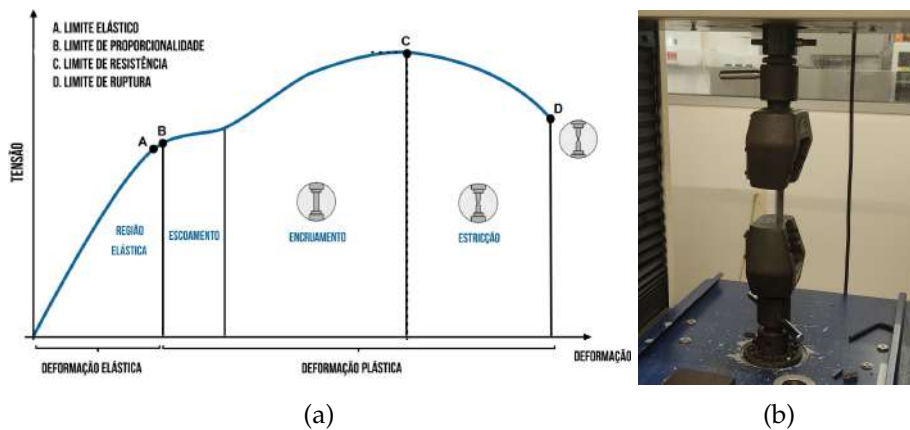


Figura 4.2: (a) Curva Tensão-Deformação [44]; (b) Apresentação do Ensaio de Tração

Para a produção dos provetes seguiu-se a norma DIN50125 *standard* [45]. Tal como já foi explicado, a dureza obtida nestes provetes de tração não foi a pretendida, tendo ficado com cerca de 45 HRC, um valor baixo para a aplicação que pretendemos.

As dimensões do provete são apresentadas na Figura 4.3. Tendo em conta estas dimensões, nos cálculos de tratamento de dados considera-se que:

- $A_0 = 10 \times 4 = 40 \text{ mm}^2$
- $l_0 = 45 \text{ mm}$

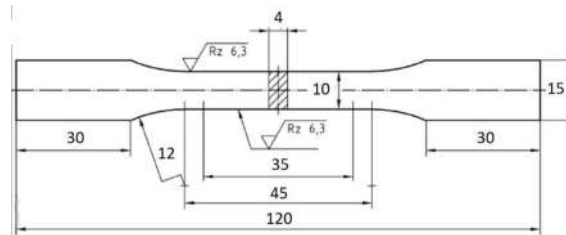


Figura 4.3: Dimensões dos Provetes do Ensaio de Tração de norma DIN50125 *standard* [45]

O ensaio foi realizado no CENIMAT, na FCT, usando o equipamento *Shimadzu AG-50kNG*, que possui uma força máxima de 50 kN . A velocidade com que a carga era aplicada foi de 1 mm/min .

O equipamento fornece, ao longo do tempo, valores de alongamento para a correspondente carga aplicada. Desta forma, percebe-se que os resultados, que se verificam na Tabela 4.1, bem como as curvas de Tensão-Deformação apresentadas na Figura 4.6 não foram obtidos de forma direta. São agora descritos os procedimentos realizados no tratamento de dados do provete A. É de salientar que o mesmo foi feito para os 4 provetes restantes.

Para além dos procedimentos normais necessários para obtenção dos resultados, foi preciso realizar ligeiras correções nos valores. Isto acontece uma vez que não foi usado um extensómetro, o que provoca uma ligeira ondulação nas curvas de Força-Alongamento e Tensão-Deformação, o que iria afetar negativamente os resultados.

Começou-se por definir a curva Força-Alongamento, com recurso aos valores obtidos do equipamento. Através do *Excel*, chegou-se à linha de tendência da região linear da curva e à equação correspondente. Com essa equação descobriu-se o valor x de alongamento para $F = 0$. Esse x foi depois subtraído a todos os valores de alongamento, gerando uma curva corrigida.

A Figura 4.4 permite perceber como foi feita esta correção e mostra a diferença apresentada: na Curva A é visível a ondulação descrita acima e na Curva A corrigida essa ondulação já não existe.

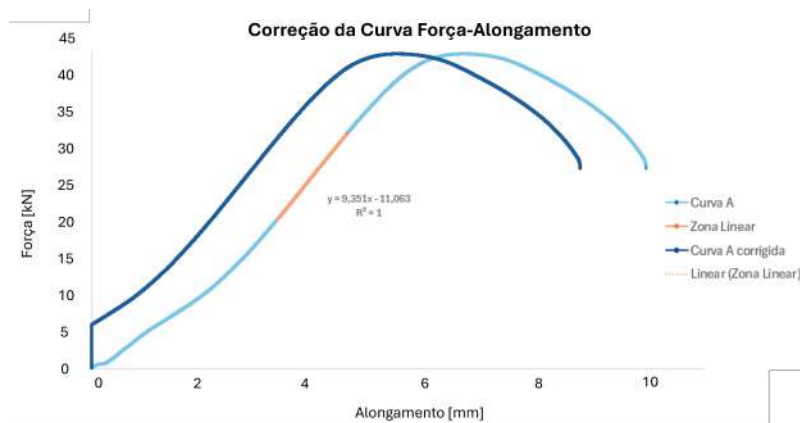


Figura 4.4: Correção da curva Força-Alongamento do Provete A

Além desta correção inicial, destaca-se ainda a forma como se chega à Tensão de Cedência. Para isso, foi necessário traçar a curva de Tensão-Deformação, sendo que a obtenção dos valores de Tensão e de Deformação foi feita através das Equações 4.1 e 4.2, respetivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.2)$$

Neste caso, em que não é claro onde é que ocorre a transição da zona de deformação elástica para a zona de deformação plástica é possível obter a Tensão de Cedência, traçando uma reta paralela à zona linear da curva, que possua uma deformação de 0,2% para $\tau = 0$.

Assim, depois de obtida a equação referente à zona linear da curva, traçou-se uma reta paralela, com igual declive, que contivesse o ponto (0,002 ; 0). O ponto de interseção entre esta reta e a curva Tensão-Deformação corresponde ao ponto de Tensão de Cedência. A Figura 4.5 evidencia como foi aplicado este método na curva de Tensão-Deformação do Provete de Tração A.

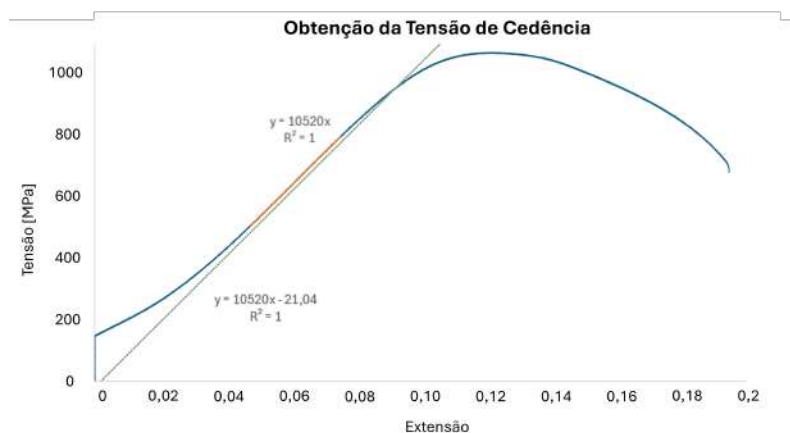


Figura 4.5: Método para obter a Tensão de Cedência

Na Figura 4.6 encontram-se representadas as curvas Tensão-Deformação obtidas nos 5 ensaios realizados e na Tabela 4.1 os resultados desses ensaios. Após fazer uma comparação com outros estudos [35] realizados ao Aço Ferramenta 1.2709, é possível afirmar que os valores obtidos estão dentro da gama esperada. No entanto, são comparáveis com peças que não sofreram tratamento térmico, o que comprova que a dureza alcançada nos provetes não foi a esperada.

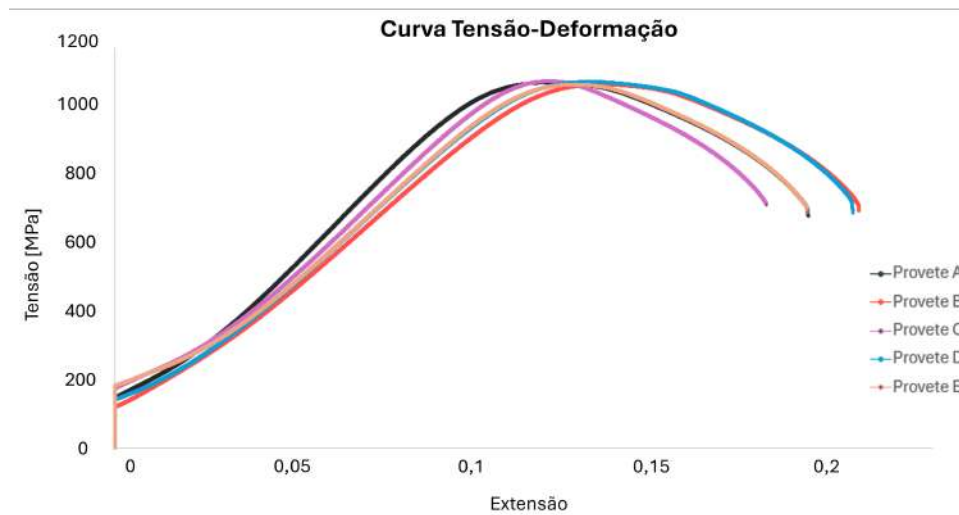


Figura 4.6: Curvas de Tensão-Deformação do Ensaio de Tração

Tabela 4.1: Resultados obtidos do Ensaio de Tração

	$\sigma_{cedencia}$ (MPa)	Deformação em $\sigma_{cedencia}$	σ_{maxima} (MPa)	Deformação em σ_{maxima}	$\sigma_{fratura}$ (MPa)	Deformação em $\sigma_{fratura}$
A	952,19	0,093	1065,94	0,123	677,50	0,195
B	947,50	0,106	1060,00	0,135	691,56	0,209
C	989,06	0,102	1070,00	0,122	708,44	0,183
D	958,13	0,103	1067,50	0,133	685,63	0,207
E	966,56	0,104	1060,00	0,128	687,19	0,195
$\bar{\mu}$	962,69	0,102	1064,69	0,128	690,06	0,198
$\bar{\sigma}$	16,37	0,005	4,52	0,006	11,464	0,011

As curvas Tensão-Deformação exibem todas um comportamento idêntico e consistente, apresentando valores que não diferem muito de provete para provete. Destaca-se apenas o provete C, com valores de Tensão ligeiramente superiores, mas sem grande variação. Isto faz sentido, já que a impressão de todos os provetes foi realizada segundo a mesma orientação. No entanto, é um indicador de que a impressão foi bem realizada, já que não existe nenhum provete com um defeito de impressão consideravelmente maior (pois isso alteraria significativamente os resultados).

Conclui-se que o material apresenta um comportamento dúctil com uma elevada tenacidade, mostrando ser capaz de suportar tensões elevadas.

Ao comparar os valores obtidos com os valores apresentados no *Datasheet* do Aço Ferramenta 1.2709 (Anexo A.2) percebe-se que os valores do *Datasheet* são claramente superiores, já que são referentes a provetes de dureza de 57 HRC. Por exemplo, a tensão máxima no *Datasheet* é de 2250 MPa, o que corresponde a mais do dobro do valor médio obtido, 1064,69 MPa. Isto é explicado pelo facto do tratamento térmico dos provetes impressos não ter sido corretamente aplicado, deixando-os com uma dureza aquém do esperado.

Na Figura 4.7 encontram-se os provetes depois de realizados os ensaios. É visível que a zona em que ocorreu a fratura não é exatamente a mesma para os 5 provetes mas isso não influencia os resultados: A zona em que ocorre a fratura é influenciada pela existência de microporos ou pequenos defeitos de impressão, pois será aí que as tensões se acumulam.

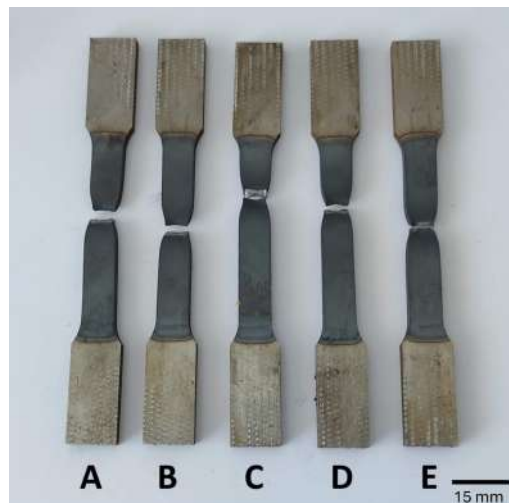


Figura 4.7: Provetes após a realização do Ensaio de Tração

Para analisar a microestrutura na superfície de fratura recorreu-se ao *Scanning Electron Microscope* (SEM). As Figura 4.8a e 4.8b são fractografias tiradas ao provete D do Ensaio de Tração. Da observação destas imagens destacam-se algumas porosidades e o facto do material ter um comportamento considerado maioritariamente dúctil, pelo aparecimento de *dimples*. Portanto, esta fractografia corrobora os resultados do ensaio.

No entanto, a Figura 4.8b, que é uma ampliação dos defeitos alinhados da Figura 4.8a, apresenta um comportamento frágil nas zonas circundantes aos poros. Esta conclusão é retirada pelo facto dessas zonas não apresentarem *dimples*, mas sim planos de fratura.

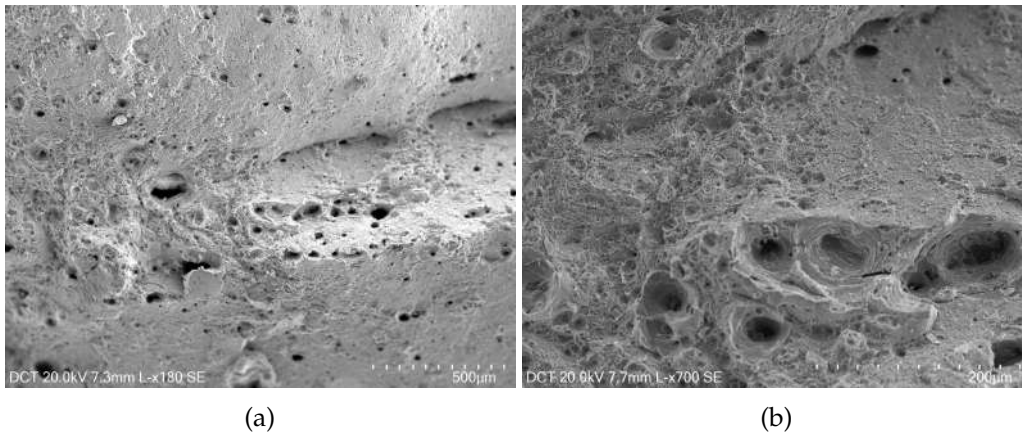


Figura 4.8: Fratografias SEM referentes ao Provete D ao Ensaio de Tração

Considerando ainda a escala de ampliação, os poros alinhados parecem ter surgido a cada camada de impressão. A espessura de camada é de $0,06 \text{ mm}$ ou $60 \mu\text{m}$, o que corresponde à distância entre os poros que se encontram alinhados, pelo que se conclui que serão defeitos de impressão.

4.2 Ensaio de Flexão

Os Ensaios de Flexão têm como objetivo determinar propriedades de flexão do material como a deformação e resistência à flexão [43, 46]. Para o ensaio de flexão, os provetes foram impressos com uma forma retangular de $60 \times 15 \times 1,86 \text{ mm}$, conforme a norma ASTM E290 [0]. A impressão e maquinação dos 5 provetes correu como desejado, mas o mesmo não aconteceu com o processo de tratamento térmico. Os gradientes de temperatura aplicados durante a têmpera a laser terão sido demasiado altos, pelo que os provetes empenaram, como se pode observar na Figura 4.9. Isto impossibilita a realização do Ensaio de Flexão.



Figura 4.9: Provetes de Flexão depois do tratamento térmico

4.3 Ensaio de Impacto (Charpy)

Num Ensaio de Impacto Charpy, o provete, composto por um entalhe em V, é apoiado apenas nas extremidades, como ilustrado na Figura 4.10. O impacto é aplicado por um pêndulo, largado a $1,5\text{ m}$, embatendo entre os dois pontos de apoio. Este ensaio indica a energia necessária para fraturar o provete, com o objetivo de estudar a capacidade do material absorver e dissipar energia quando sofre um impacto [46].

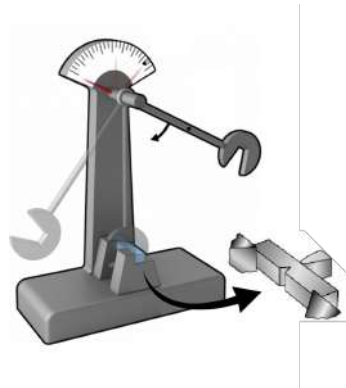


Figura 4.10: Equipamento necessário para realização do Ensaio de Impacto Charpy [47]

O ensaio de impacto realizado foi do tipo Charpy com entalhe do tipo A. Os provetes têm uma forma retangular de $55 \times 10 \times 5\text{ mm}$ e possuem um entalhe ao centro num dos lados com um ângulo de 45° conforme a norma ASTM E23 [0]. As dimensões dos provetes encontram-se na Figura 4.11.

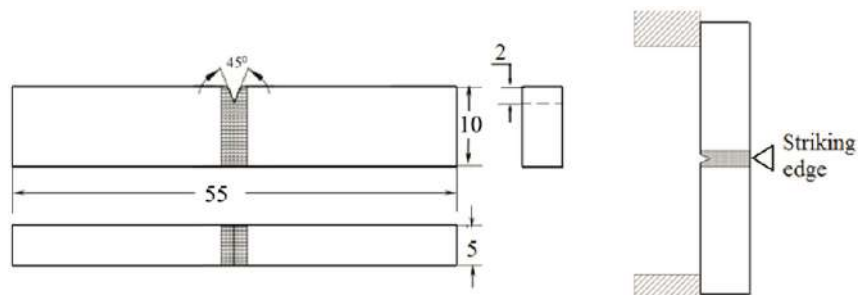


Figura 4.11: Dimensões dos Provetes do Ensaio de Charpy de norma ASTM E23 [0]

Após aplicado o impacto sobre o provete, o ponteiro presente no equipamento indica a diferença entre a energia cinética do pêndulo antes e depois do impacto. Isto corresponde à energia absorvida pelo provete durante o ensaio. Os valores de energia obtidos para cada provete encontram-se na Tabela 4.2. Daí retira-se que $\bar{\mu} = 31\text{ J}$ e $\bar{\sigma} = 3,54$.

Tabela 4.2: Resultados do Ensaio de Charpy

Provetes	E_{impacto} (J)
A	31
B	28
C	27
D	35
E	34

Os resultados do Ensaio de Impacto são de rápida interpretação, bastando analisar a energia necessária para fraturar o provete. De referir que os valores apresentados não diferem muito uns dos outros, sendo que o provete D foi o que absorveu mais energia e o provete C o que absorveu menos. Isto é um indicador de que o provete C possui mais microdefeitos, contrariamente ao provete D.

Considerando os 5 ensaios, obteve-se assim uma média de 31J, com um desvio padrão de 3,54. Este é um valor superior aos 10J apresentados pelo material com dureza 57HRC [31], já que um material com menor dureza, apresenta menos resistência, mas também é mais dúctil. Assim consegue absorver mais energia até à fratura. Esta ductilidade do material é também vista nas fractografias que serão apresentadas de seguida, onde se identificaram dimples, característicos de um comportamento dúctil.

Tal como no ensaio de tração, os valores obtidos no ensaio de *Charpy* são considerados normais quando comparados com estudos acerca do material 1.2709 sem aplicação de têmpera [35, 36]. Todos os provetes apresentaram uma fratura total, como se pode verificar na Figura 4.12.

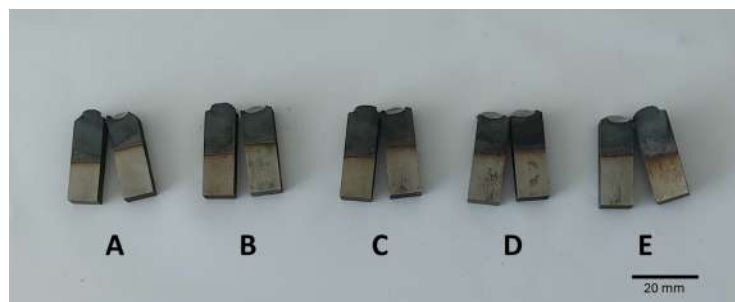


Figura 4.12: Provetes depois da realização do Ensaio de Charpy

Apesar destes resultados serem favoráveis, já foi comprovado [35] que a porosidade tem uma influência significativa na energia de impacto, sendo que esta diminui com o aumento da porosidade. Por existir essa relação, foi feita uma análise no SEM para estudar a microestrutura na superfície de fratura e analisar o nível de porosidade das amostras, apresentada na Figura 4.13.

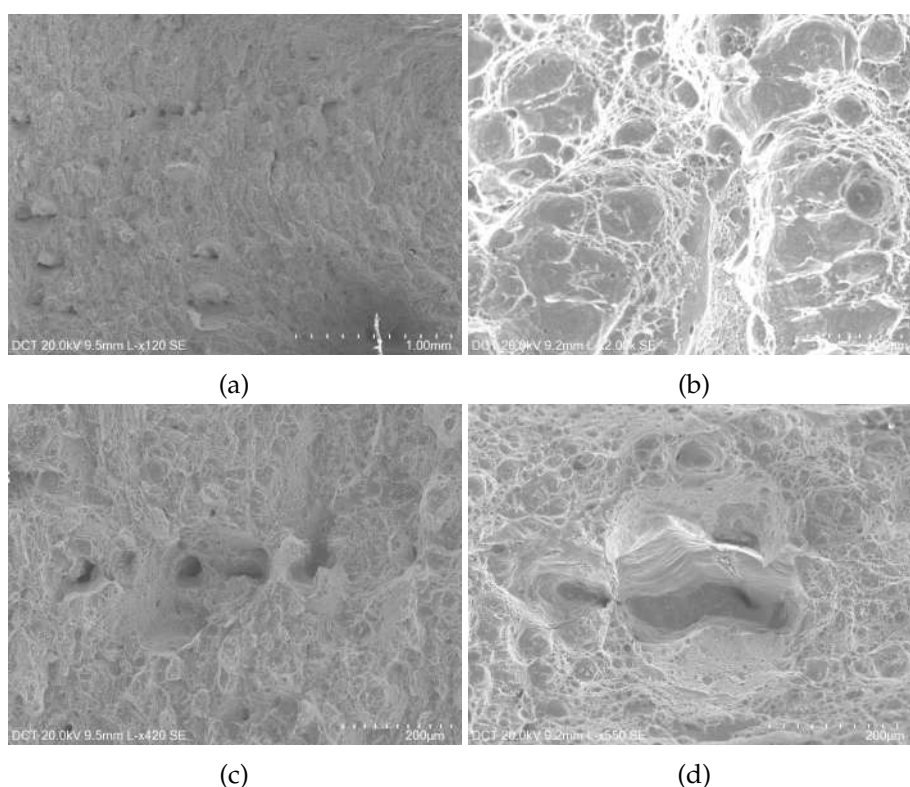


Figura 4.13: Fratografias SEM referentes ao Provete C do Ensaio de Charpy

A Figura 4.13a, apesar de ter uma baixa ampliação, permite identificar *dimples*, característicos de um comportamento dúctil. A Figura 4.13b apresenta os *dimples* a uma maior ampliação. A Figura 4.13c é uma ampliação focada numa zona com defeitos alinhados. Pela escala utilizada, conclui-se que existe um poro a cada camada de material depositado ($\approx 60 \mu\text{m}$), indicando que poderão ser defeitos de impressão. Na Figura 4.13d está, em pormenor, um poro e, tal como o que aconteceu com os provetes de tração, o material não tem um comportamento dúctil nas zonas em redor do poro.

Estas fratógrafias são referentes ao provete C, que apresentou o menor valor de energia absorvida logo os restantes provetes deveriam ter menos defeitos. Isso foi verificado, ao analisar fratógrafias do provete D, aquele que absorveu mais energia no ensaio.

Nas imagens SEM do provete D não foram encontrados defeitos alinhados, o que pode indicar também que estes defeitos de impressão possam ter ocorrido apenas numa zona específica da câmara de construção. Apesar de existirem pequenas diferenças, a microestrutura é considerada semelhante, pelo que se conclui que este é o comportamento padrão do material.

4.4 Discussão dos Resultados

Como seria esperado, os resultados obtidos mostraram estar aquém das capacidades do material devido à aplicação incorreta do tratamento térmico nos provetes. Um erro na aplicação do tratamento térmico ou uma reação inesperada do material à têmpera a laser terão impedido que se chegassem a valores perto dos 57 HRC.

Apesar do *Datasheet* do material apresentar os valores máximos conseguidos, os resultados obtidos estão muito abaixo destes. Não fica claro se a dureza dos provetes é afetada por um problema pontual na aplicação do tratamento térmico ou se o material não reage bem à têmpera a laser, tendo-se escolhido mal o tipo de tratamento aplicado.

Ainda assim, o material deu bons indicadores de que pode ser utilizado para aplicações como a da faca em estudo: mostrou ter alta tenacidade, ductilidade e provou que resiste a altas tensões. À parte de alguns defeitos de impressão e porosidades, as imagens de SEM mostram uma microestrutura comum, para um material impresso por SLM, revelando uma boa qualidade de impressão. Isto descarta a hipótese de que os resultados menos bons dos ensaio terão sido provocados por erros na impressão da peça. Apesar destes terem ocorrido ocasionalmente não foram a causa maioritária dos maus resultados, creditando assim a hipótese de que terá sido a têmpera a laser.

Foi notório que os provetes de flexão impressos reagiram mal ao processo de têmpera a laser, uma vez que empenaram, impossibilitando a realização dos ensaios. Este pode ser um indicador de que o tratamento térmico escolhido não terá sido o mais indicado. O facto de ser um tratamento térmico localizado gera tensões residuais, que se acumulam com as geradas pelo processo de impressão.

Pela interpretação do *Datasheet* do Aço Ferramenta 1.2709, conclui-se que o tempo de aplicação e também a temperatura da têmpera influencia a dureza final. Isto é compreendido pelo gráfico da Figura 4.14, que sugere que a aplicação do tratamento térmico seja feita entre 3 a 6 horas, o que não acontece de todo na têmpera a laser.

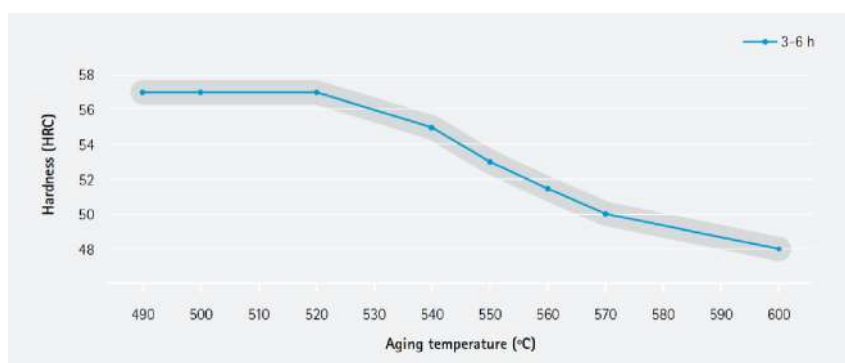


Figura 4.14: Variação da Dureza do Aço Ferramenta 1.2709 com a Temperatura aplicada no Tratamento Térmico [31])

O gráfico da Figura 4.14 não é referente ao processo de têmpera a laser mas permite perceber que o material tem tendência para perder dureza com o aumento da temperatura aplicada. Esta poderá ser a causa para o baixo valor de dureza dos provetes, pois a têmpera a laser é um processo que atinge temperaturas muito altas rapidamente. A aplicação de têmpera por indução parece agora ser o mais indicado, pois o aumento de temperatura é feito de forma mais gradual e não tão localizada. No entanto, tendo em conta o período de tempo em que este projeto foi realizado e, sabendo que o tratamento térmico é efetuado por subcontratação, não foi possível testar esta hipótese.

Como nota final, deve ser referido que os provetes demonstraram ter dimensões demasiado grandes para o que se pretendia. Os ensaios de tração conseguiram, no limite, ser realizados com o equipamento da universidade. No entanto, pelos resultados percebe-se que foi necessário aplicar forças muito próximas do limite do equipamento, 50 kN. No futuro, caso seja necessário realizar testes neste ou em materiais semelhantes, deve ter-se isso em atenção.

ANÁLISE DE RESULTADOS E IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo do punção de corte em estudo foi impresso juntamente com os provetes para se poder testar o seu desempenho. Esta decisão foi tomada ainda sem se ter realizado os ensaios mecânicos porque se considerou importante, quer para a dissertação quer para a fábrica, perceber como é, na prática, o comportamento do punção produzido por SLM.

O objetivo é testar este protótipo na ferramenta e avaliar: se corta platinas sem apresentar rebarba; se a faca não fissa ao cortar a platina; se é capaz de cortar um número elevado de peças em linha; se o protótipo apresenta um desgaste excessivo depois de produzir ao ritmo normal da linha de produção.

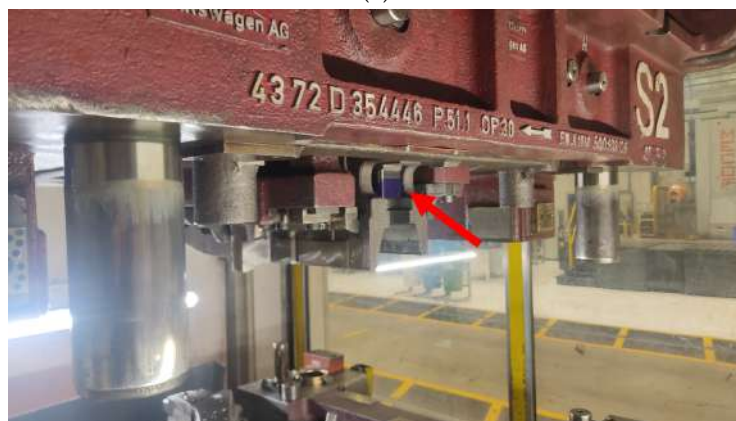
Quando a produção da faca é dada por terminada esta tem de passar pela fase de *Try-out* antes de ser considerada apta. O *Try-Out* é um teste em que se assegura que as ferramentas realizam a estampagem das platinas com as dimensões certas e sem apresentar defeitos. Ao longo deste processo o *Tool&Die* poderá fazer pequenos ajustes para otimizar a estampagem ou corte das platinas, garantindo que quando seguirem para a linha de produção, não ocorrem irregularidades.

Para se poder realizar este teste, começou-se por incorporar o punção de corte na ferramenta. Aí foi detetado que ainda era necessário polir e limpar melhor as cavilhas e furos antes de se poder apertar os parafusos. Isto é algo a ter em conta em possíveis impressões futuras já que diz respeito à maquinação aplicada após a impressão.

Para facilitar a visualização, coloriu-se a faca de uma cor diferente. Isto é percebido na Figura 5.1, em que a faca produzida em SLM já se encontra montada na ferramenta. Esta é depois levada por uma grua até uma mesa, para depois ser montada na prensa de teste.



(a)



(b)

Figura 5.1: Ferramenta 5Q0.803.106 da op.30 com a faca em SLM incorporada

Neste primeiro *Try-Out*, realizado na prensa de teste da oficina do *Tool&Die*, apenas se pretende confirmar que a faca realiza o corte de uma platina sem a danificar. Foi pedido, para isso uma platina da op. 20. Esta corresponde, portanto, à forma da platina que entra nesta op. 30. Na Figura 5.2 é possível observar essa platina, já corretamente posicionada na parte inferior da ferramenta em teste.



Figura 5.2: Ferramenta implementada na Prensa de *Try-Out* do *Tool&Die* com a platina posicionada

Deste primeiro *Try-Out*, provou-se que a platina foi cortada corretamente. Verificou-se a formação de rebarba, mas depois dos supervisores do *Tool&Die* inspecionarem a ferramenta percebeu-se que a rebarba tinha sido provocada pela matriz que estava danificada e não pelo punção. Assim, depois de algumas retificações feitas na matriz, conseguiram-se os resultados desejados, o que permitiu concluir que a faca consegue desempenhar a tarefa para a qual foi desenhada.

Visto que os resultados foram positivos a faca manteve-se incorporada na ferramenta passando para a segunda fase de *Try-Out*, sendo este realizado na linha de produção. Nem sempre se testam logo os protótipos na linha mas considerou-se que a produção de peças não iria ser afetada. Como este punção está localizado na extremidade da ferramenta, é facilmente substituído caso apresente desgaste ou fissuras.

Neste teste final, pretende-se perceber se a faca tem capacidade de cortar peças em série, ao ritmo de produção. Para isso foi pedido um *Try-Out* de 2 horas na TAP5. Inicialmente produziu-se a um ritmo baixo mas como não se verificaram anomalias nas platinas aumentou-se progressivamente o ritmo. No final, já se produziam peças ao ritmo de produção normal.

A faca de corte impressa por SLM conseguiu cortar peças durante as horas de *Try-Out*, sem ocorrência de avarias ou anomalias. Como o protótipo correspondeu bem, este foi mantido na ferramenta durante o resto da *production run*.

O teste do punção foi considerado um sucesso, visto que produziu **12 000 platinas**, sem causar paragens. Depois da produção, o *Tool&Die* retirou a faca da ferramenta para se poder analisar o protótipo. Na Figura 5.3 é mostrado o desgaste apresentado pelo punção depois de sair da linha de produção.

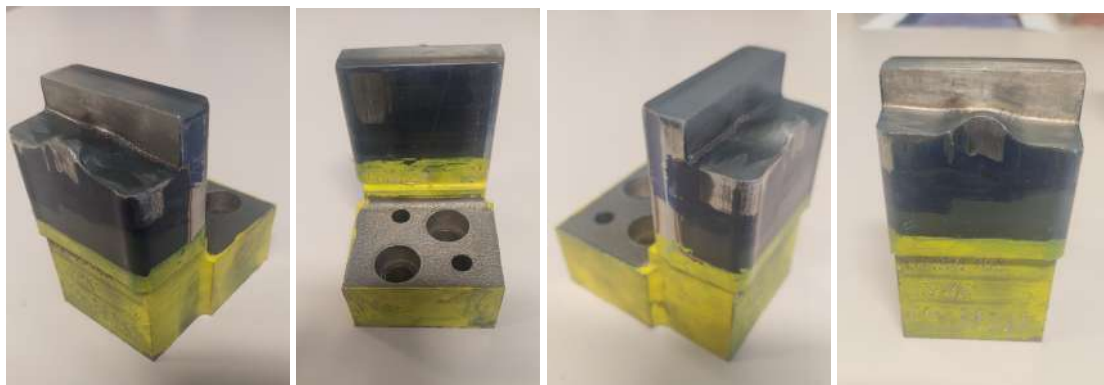


Figura 5.3: Desgaste apresentado no punção de SLM depois de sair da linha de produção

5.1 Discussão de Resultados

Como já foi evidenciado, a produção destas longarinas gera desgaste nos punções e matrizes das ferramentas. No entanto, o desgaste observado no punção produzido por SLM foi superior ao normal.

Como se está a testar um novo material, é mais difícil tirar conclusões em relação à causa do desgaste. Não se descartou a possibilidade de ser causado pelo material usado (Aço Ferramenta 1.2709) ou pelo método de impressão. No entanto, os ensaios mecânicos e os Try-Outs realizados, bem como os estudos já efetuados acerca deste material e desta tecnologia fazem crer que o motivo terá sido outro.

Após o processo de estampagem de teste, notou-se que existia pouca folga entre a faca e a matriz, o que terá contribuído para o aumento do desgaste do punção. Esta situação acontece regularmente, quando a oficina aplica um aperto demasiado grande nos componentes da ferramenta, originando um valor de folga baixo e, conseqüentemente, aumentando o desgaste.

No entanto, importa não esquecer que, tal como aconteceu com os provetes, o tratamento térmico aplicado ao protótipo não surtiu efeito, pelo que não foram obtidos os valores de dureza e resistência ao desgaste pretendidos. Após a têmpera a laser, o punção apresentava uma dureza de 40/45 HRC, o que é significativamente mais baixo do que a dureza apresentada pelo punção de corte original (\approx 58 HRC).

O facto de existir pouca folga pode ter influenciado o estado de desgaste do punção, surgindo a necessidade de refazer o teste. De maneira a danificar o menos possível o material, maquinaram-se apenas as superfícies desgastadas, rebaixando a superfície de corte. Isto aumenta ligeiramente a zona de apoio, o que não tem importância no corte das platinas, desde que os componentes sejam ajustados corretamente na ferramenta. Como o protótipo perde a dureza adquirida com a maquinação é necessário uma nova aplicação de têmpera a laser.

O intuito é perceber se, com a têmpera aplicada com mais cuidado e com um valor de folga adequado entre a matriz e a faca, se consegue um menor desgaste. Depois de aplicado novamente o tratamento térmico, o punção foi mais uma vez para a linha de produção.

Tal como aconteceu anteriormente, o punção conseguiu cortar as platinas sem problemas ou paragens. No entanto, depois da *production run* apresentou um desgaste excessivo outra vez. Isto permite concluir que a têmpera a laser não será o tratamento mais viável para peças produzidas por SLM com este material.

De forma geral, os resultados da implementação do protótipo foram muito positivos. Apesar de existirem aspetos a melhorar, o protótipo é capaz de substituir o punção original, ainda que temporariamente.

Portanto, os testes feitos com o protótipo em linha corroboram os resultados dos ensaios. O punção de SLM mostra ser capaz de substituir o original mas é notório que não tem a mesma resistência e durabilidade, pelo que terá sem dúvida um tempo de vida útil mais curto.

ANÁLISE DE CUSTOS E TEMPOS DE PRODUÇÃO

A viabilidade de implementação de processos de FA não depende apenas da qualidade dos resultados obtidos. Nas indústrias mais competitivas, como é o caso da indústria automóvel, um dos fatores mais decisivos é o custo do processo. Mesmo apresentando ótimos resultados, muitos projetos acabam por não seguir em frente por causa do fator económico.

Além dos custos, o tempo de produção é também um fator decisivo. Isto inclui, para além do fase de fabrico, a fase de pré e pós-processamento. Em certos casos, quando a urgência em obter uma peça se sobrepõe ao custo da mesma, a redução do tempo de fabrico conseguido pelas tecnologias de FA é uma mais valia.

Pretende-se agora analisar, para o caso de estudo desta dissertação, os tempos e os custos de fabrico da faca de corte, comparando o método convencional com a impressão 3D por SLM.

6.1 Tempos de Produção

A falta de *spares* de punções ou matrizes pode levar a paragens na produção com perdas significativas para a fábrica. Assim, quando é necessária a produção de uma *spare* existe alguma urgência na sua produção.

A Tabela 6.1 contém os tempos despendidos nos dois processos de produção, permitindo compará-los. Os tempo estão divididos pelas várias etapas, que já foram descritas anteriormente. Destaca-se que o Tempo de Impressão SLM é de 16,5 *h*, mas considerou-se que 2/3 dias seria o tempo necessário já com os transportes necessários. Esta linha de pensamento foi aplicada também às etapas de tratamento térmico, que são executadas por subcontratação.

Tabela 6.1: Tempos de Produção pelo método convencional e por SLM

Fase	Método Atual(1)	Método SLM(2)
1 Enc. do Material	2/3 dias	-
2 Impressão 3D	-	2/3 dias
3 2D Base	8h	-
4 3D Top Pre	8h	-
5 Temp. Total	4/7 dias	-
6 Retificação	2h	2h
7 EDM	4h	4h
8 Finish HSC	8h	8h
9 Temp. a Laser	-	4/7 dias
Tempo Total	11 dias e 6h (34 turnos)	10 dias e 14h (32 turnos)
		-2 turnos

Comparando os tempos de produção relativos aos dois métodos, conclui-se que o método de SLM consegue produzir mais rapidamente o punção de corte. A impressão da peça demora aproximadamente o mesmo tempo que a encomenda do bloco de material HWS, sendo que este bloco ainda terá de ser posteriormente maquinado para obter uma forma aproximada da final.

A etapa em que o método de SLM ganha mais tempo em relação ao método convencional é, sem dúvida, a maquinação. Desta forma, percebe-se que o tempo ganho seria ainda maior, caso se tivesse escolhido um punção de geometria mais complexa, que necessitasse de mais tempo de maquinação. É o caso de punções ou matrizes de grandes dimensões, que possuam várias superfícies de contacto. Esta conclusão pode ser interessante na escolha do objeto de estudo de um possível projeto futuro.

É importante referir que, nesta análise, foi calculado o tempo necessário para produzir somente uma faca, mas sabe-se que a impressora *TruPrint 3000* permite a impressão simultânea de mais componentes. A sua câmara de impressão permite a produção simultânea de 5 facas com estas dimensões. Assim, se em vez de apenas uma faca se produzissem mais, a poupança de tempo no processo de impressão seria ainda mais significativa.

Destaca-se ainda que este estudo não considerou todos os possíveis atrasos, que podem acontecer. Uma vez que esses atrasos podem surgir tanto para o processo convencional como para o processo de SLM, isso não será relevante na comparação de processos.

6.2 Custos de Produção

Por norma, o processo de SLM não permite a produção de peças a preços muito competitivos. Sabe-se, desde logo, que esta tecnologia requer um elevado investimento inicial, devido ao elevado custo do equipamento. Juntando isso aos custos de material, de energia e de pós-processamento, o processo de SLM pode tornar-se dispendioso. Outro custo significativo desta tecnologia é causado pela necessidade de ter uma atmosfera de azoto ou argon, algo bastante dispendioso [34].

No entanto, o aumento do preço das matérias-primas aumentou a necessidade de otimização do peso e redução da quantidade de material utilizado, sendo que os processos de fabrico aditivo de metais, como SLM oferecem boas oportunidades nesta área [48]. Além de que, no processo convencional, os custos de mão de obra são altos, uma vez que os *toolmakers* são altamente qualificados. Já em SLM, esses custos são mais baixos.

Com base num Modelo de Custos [49] adequado a este projeto é possível estimar o custo por peça e comparar a produção convencional com a produção por SLM. O custo unitário do punção produzido pelo método convencional (C_{conv}) é dado pela Equação 6.1. Este depende dos Custos de Material (Equação 6.2), Custos de Maquinação (Equação 6.3), Custos Energéticos (Equação 6.4) e Custos associados ao Tratamento Térmico (Equação 6.5).

$$C_{conv} = C_{mat} + C_{maq} + C_{energ} + C_{temp} \quad (6.1)$$

sendo que,

$$C_{mat} = V_{HWS} \times \rho_{HWS} \times C_{HWS} \quad (6.2)$$

$$C_{maq} = \frac{C_{eq}}{L_{eq} \times t_v} \times t_{maq} \quad (6.3)$$

$$C_{energ} = c_{energ} \times t \quad (6.4)$$

$$C_{temp} = c_{temp} \times m_{final} \quad (6.5)$$

A Equação 6.3 foi desenvolvida para estimar tanto os custos de fresagem como os custos de EDM. Note-se que assim os custos de maquinação têm em conta a depreciação do equipamento com a utilização.

O custo unitário do punção produzido por SLM (C_{SLM}) é dado pela Equação 6.6. A este estão associados Custos de Impressão, de Maquinação e de Tratamento Térmico.

$$C_{SLM} = C_{imp} + C_{maq} + C_{temp} \quad (6.6)$$

O custo de impressão (C_{imp}) deste punção não necessita de ser estimado, sendo considerada a cotação fornecida pelo CENTIMFE, de 900€. Não se considerou necessário realizar uma estimativa destes custos, uma vez que a Autoeuropa não possui o equipamento e terá de recorrer a subcontratação para imprimir peças por SLM. Assim, estará sempre sujeita aos valores impostos pelo CENTIMFE ou outros fornecedores.

Os 900€ já incluem custos energéticos, custos de material, de equipamento e mão de obra. Incluem também as operações de pré-procedimento (escolha de parâmetros, alterações no CAD e preparação do equipamento) e pós-procedimento (limpeza e remoção da peça final). A este valor, têm de ser adicionados os custos de maquinação e de tratamento térmico, sendo que estes são calculados pela Equações 6.3 e 6.5, respetivamente.

Na Tabela 6.2 encontram-se os valores estimados para as variáveis apresentadas. Estes valores baseiam-se nos exemplos dados no modelo de custo escolhido [49]. Ao aplicá-los nas equações já enunciadas, é possível estimar o custo unitário do punção estudado.

Tabela 6.2: Valores considerados na Análise de Custos

V_{HWS}	$90 \times 70 \times 90 = 567 \text{ cm}^3$	$t_{v(EDM)}$	15 anos = 131 400 h
ρ_{HWS}	$7,67 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$	$t_{EDM(1)}$	4h
C_{HWS}	50 €/kg	c_{energ}	5€/h
$C_{eq(fres)}$	650 000€	$c_{temp(1)}$	2€/Kg
$L_{eq(fres)}$	20%	C_{imp}	900€
$t_{v(fres)}$	15 anos = 131 400 h	$t_{fres(2)}$	= 10h
$t_{fres(1)}$	= 26h	$t_{EDM(2)}$	4h
$C_{eq(EDM)}$	200 000 €	$c_{temp(2)}$	5€/Kg
$L_{eq(EDM)}$	10%	m_{final}	1,5 Kg

Os cálculos efetuados segundo o Modelo de Custos [49] foram realizados com recurso ao Excel. A Figura 6.1 mostra a folha de Excel onde foi realizada esta análise.

Pelo método convencional, o custo por peça do punção em estudo é de 1074,40€. O custo total de produção do punção de corte por SLM é de 1285,72€. O processo de SLM é, assim 211,32€ mais dispendioso que o processo convencional.

Vale a pena referir que estes são valores estimados e que, podem diferir ligeiramente da realidade.

Método Convencional		
Vhws	567	cm ³
ρ hws	0,00767	Kg/cm ³
mfinal	1,5	Kg
Chws	50	€/Kg
Ceq(fres)	650000	€
Leq(fres)	20	%
tv(fres)	131400	h
tfres	26	h
Ceq(EDM)	200000	€
Leq(EDM)	10	%
tv(EDM)	131400	h
tEDM	4	h
c temp	2	€/Kg
c energ	5	€/h
Custos Material		
	217,44	€
Custos Maquinação (fresagem)		
	643,07	€
Custos Maquinação (EDM)		
	60,88	€
Custos Têmpera		
	3,00	€
Custos Energia		
	150,00	€
Total	1 074,40	€

Método SLM		
Cimp	900	€
Ceq(fres)	650000	€
Leq(fres)	20	%
tv(fres)	131400	h
tfres	10	h
Ceq(EDM)	200000	€
Leq(EDM)	10	%
tv(EDM)	131400	h
tEDM	4	h
c temp	5	€/Kg
c energ	5	€/h
mfinal	1,5	Kg
Custos Impressão		
	900,00	€
Custos Maquinação (fresagem)		
	247,34	€
Custos Maquinação (EDM)		
	60,88	€
Custos Têmpera		
	7,50	€
Custos Energia		
	70,00	€
Total	1 285,72	€
Custo Adicional	211,32	€

Figura 6.1: Resultados da Análise de Custos

De uma forma mais visual, é possível analisar os resultados pelo gráfico da Figura 6.2. Percebe-se que os custos de SLM são significativamente mais elevados devido aos custos de impressão. Pelas características do processo, este resultado já era esperado.

Deve ter-se em conta que este é um estudo simplificado, não tendo em consideração alguns fatores importantes como a inflação. No entanto, os resultados permitem tirar algumas conclusões à cerca do processo de SLM.

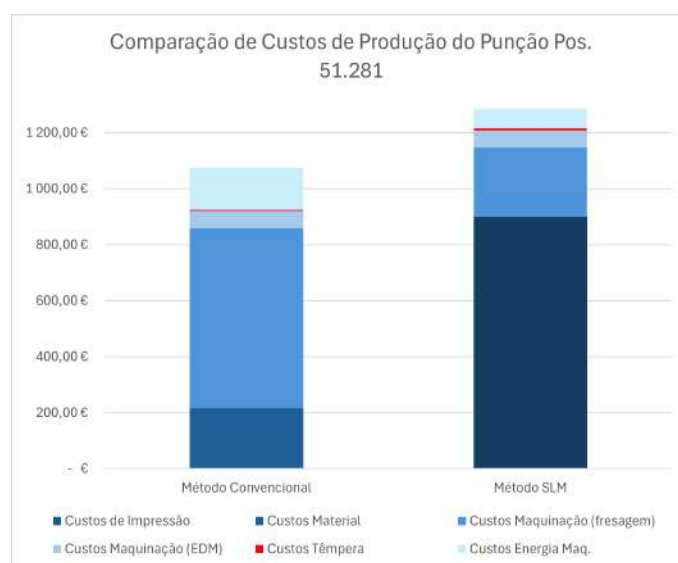


Figura 6.2: Gráfico de comparação de custos dos dois métodos

Tal como esperado [21], as facas de corte produzidas por SLM são mais dispendiosas do que as fabricadas tradicionalmente. O aumento da utilização da tecnologia de SLM em indústrias tão competitivas com a indústria automóvel só acontecerá quando os custos de impressão começarem a reduzir.

Pelos resultados da análise de custos, percebe-se que para além dos custos de impressão, os custos de pós-processamento continuam a ser um fator que contribui para os elevados custos das peças de SLM [43]. Desta forma, a redução dos custos desta tecnologia só será possível caso se consiga melhorar o acabamento superficial ao ponto da maquinação poder ser dispensada.

No entanto, o processo de SLM pode ser interessante nos casos em que o fator tempo se sobrepõe ao fator custo, uma vez que permite reduzir o tempo de produção. Pode também ser uma tecnologia a ter em conta nos projetos de desenvolvimento, em que a redução de custos não é o principal objetivo.

O custo total por peça poderia ser reduzido se fossem produzidas mais peças de uma só vez, já que o punção de corte em estudo tem pequenas dimensões. No entanto, esta possibilidade é dificilmente aplicada ao caso de estudo desta dissertação, pois as facas *spare* apenas são substituídas quando se encontram danificadas. Portanto, a sua necessidade de produção ao longo do ano não é certa. É também por essa razão que não se considera a hipótese da fábrica adquirir o equipamento necessário para a impressão por SLM. Caso a impressão não fosse realizada por subcontratação, o custo por peça iria baixar seguramente. No entanto, não é possível garantir quantas peças é preciso imprimir por ano, o que não permite sequer equacionar o investimento. Além de que seria necessário apresentar mais casos de estudo com bons resultados.

CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

7.1 Conclusões

Como pensado inicialmente, a incorporação de SLM na produção de componentes das ferramentas de estampagem revelou ser uma alternativa com futuro, apesar de ainda necessitar de alguns ajustes para ser otimizada.

Em geral, os objetivos propostos no início deste documento foram cumpridos e a solução apresentada para o problema em causa mostrou ser adequada. A análise e interpretação dos resultados obtidos permite concluir que é possível produzir o punção de corte em estudo pela tecnologia de SLM, sem o aparecimento de defeitos significativos. As fractografias tiradas aos provetes corroboram isso mesmo, pois revelam uma alta qualidade de impressão, apresentando apenas porosidades e alguns defeitos de impressão ocasionais.

A caracterização mecânica do Aço Ferramenta 1.2709 feita através de Ensaio de Tração e de Impacto(Charpy) revelaram um comportamento dúctil, uma elevada tenacidade e uma boa resistência a tensões elevadas. Portanto, os resultados indicaram que o material, quando produzido por SLM, é adequado para a produção de punções de corte ou de estampagem.

No entanto, foi comprovado que o material não reage bem à aplicação de têmpera a laser por este ser um tratamento térmico em que se atingem temperaturas muito elevadas rapidamente. Para além do valor de dureza pretendida não ser de todo alcançado, a peça poderá empenar, dependendo da sua geometria, tal como aconteceu com os provetes do Ensaio de Flexão. Assim, surgem duas alternativas a este tratamento térmico: a têmpera total e a têmpera por indução. Admite-se que estes tratamentos consigam valores mais altos de dureza, já que não apresentam taxas de aquecimento tão elevadas.

A verdade é que, mesmo com um valor de dureza mais baixo, o protótipo do punção foi capaz de realizar uma *production run* inteira sem causar danos na ferramenta ou nas platinas. Este resultado é muito positivo, pois mesmo sem ter as propriedades do material otimizadas, fica comprovado que o punção de corte produzido pelo método de SLM é capaz de substituir temporariamente o punção original, cumprindo assim o principal objetivo deste projeto.

Uma vez que o punção deste caso de estudo corta platinas de elevada resistência, pode concluir-se que os resultados obtidos com o processo de SLM seriam ainda mais interessantes no caso dos punções de ferramentas que trabalham com platinas de aço menos resistentes.

Ainda assim, existe espaço para melhorar esta solução, já que o desgaste apresentado pelo protótipo foi excessivo. Isto revela que, apesar deste conseguir substituir o punção original, sem comprometer o processo de estampagem, o protótipo não tem a mesma resistência e durabilidade, sendo desgastado mais facilmente. Isto irá, portanto, reduzir o tempo útil de vida do punção.

Pela análise de tempos de produção, o método de SLM mostrou ser mais rápido. Uma vez que se provou que o processo de impressão permite reduzir o número de etapas de maquinação, conclui-se que este método seria tão mais vantajoso quanto maior a complexidade da peça escolhida. Se, por exemplo, se escolher um punção cujo o tempo de maquinação é tradicionalmente muito elevado, o tempo ganho com SLM será consideravelmente superior ao deste projeto.

Pela análise de custos de produção, o método convencional apresentou um custo por peça mais baixo. Assim, a escolha de uma indústria tão competitiva como é a automóvel recairá para o processo convencional, o que não invalida que se utilize o SLM, para casos pontuais em que o desenvolvimento da peça ou o seu tempo de produção sejam cruciais. Conclui-se assim que continua a ser difícil produzir ferramentas por SLM que tenham custos interessantes, quando comparados com os dos métodos convencionais. Enquanto isso não acontecer, a introdução do fabrico de ferramentas por SLM nas indústrias torna-se mais difícil.

7.2 Perspetivas Futuras

Apesar dos resultados terem sido positivos, a solução apresentada para o problema desta dissertação pode sofrer melhorias. Para dar seguimento ao estudo deste punção deve-lhe ser aplicado outro tipo de tratamento térmico, com o intuito de perceber se isso gera melhores resultados ao nível da dureza e resistência ao desgaste. Idealmente, deveria imprimir-se outra faca igual: numa seria aplicada a têmpera por indução e noutra a têmpera integral. Depois ambas serem implementadas na linha seria analisado o desgaste apresentado nas superfícies de corte. Através da comparação das duas facas, seria possível concluir qual o tratamento térmico mais adequado.

Em trabalhos futuros, outra forma de melhorar a dureza da peça final é através da parametrização. Isto porque se sabe que, em SLM, a dureza da peça é beneficiada com o aumento da potência do laser ou com a diminuição da velocidade de varrimento. No entanto, será sempre necessário encontrar um equilíbrio durante a parametrização para não gerar outros defeitos.

A Autoeuropa, através dos dados obtidos com este projeto, pode continuar a explorar a tecnologia de SLM, testando diferentes geometrias e aplicações. Como se demonstrou que a maior redução do tempo de produção dá-se na etapa de maquinação, o próximo objeto de estudo deverá ser uma peça com um nível de dificuldade de maquinação elevado. Seria também interessante realizar uma análise de tempo e custo de produção, desta vez, para a impressão de mais do que um punção, já que isto poderá trazer resultados diferentes aos apresentados neste documento.

A fábrica pode também usar este estudo como fundamento para aplicar o processo de SLM a punções com características semelhantes ao estudado. Além disso, através da partilha da informação obtida com outras áreas da fábrica podem surgir novas aplicações para a tecnologia de SLM.

Espera-se que, no futuro, o processo de SLM esteja mais presente na indústria auto-móvel, pelo que estudos como este são uma mais valia para descobrir cada vez mais as possibilidades desta tecnologia. Ainda é necessário realizar mais investigações no que toca ao fabrico de ferramentas por SLM. É importante serem feitos desenvolvimentos para melhorar a qualidade superficial, tentando reduzir ao máximo a necessidade de um pós-processamento [21]. Isso seria também fundamental para a redução dos custos, que ainda não conseguem fazer face aos custos de produção do método tradicional.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. M. Lourenço. *The NOVAtesis L^AT_EX Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. 2021. URL: <https://github.com/joaomlourenco/novathesis/raw/main/template.pdf>.
- [2] P. K. Gokuldoss, S. Kolla, e J. Eckert, «Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines», *Materials*, vol. 10, n. 6. MDPI AG, 2017. doi: 10.3390/ma10060672.
- [3] Volkswagen, «A marca Volkswagen», 2024 [Online] Disponível em: <https://www.volkswagenautoeuropa.pt/media/> Acedido em Abr, 17, 2024.
- [4] Cunha, T. (2021) «Aplicação, Análise e Melhoria do Indicador Overall Equipment Effectiveness numa Metalomecânica» [Dissertação apresentada no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica]. Repositório do Politécnico de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10400.21/13148>.
- [5] Saronni, «Blanking Lines», [Online] Disponível em: <https://saronni.com/en/products/blanking-lines/> Acedido em Jan, 15, 2024.
- [6] SICK Sensor Intelligent, «Component detection in a crossbar robot», [Online] Disponível em: <https://ptmcs.id/en/brands/sick-sensors-robotic/component-detection-in-a-crossbar-robot> Acedido em Jan, 15, 2024.
- [7] Spindola, D. (2014) «Influência do Pré-Corte no Aspeto do Acabamento Superficial da Secção de Corte» [Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Técnico em Fabricação Mecânica]. Repositório do IFSC. <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/262>.
- [8] M. A. Omar, *The automotive body manufacturing systems and processes*. John Wiley Sons, Ltd., Publication, 2013.
- [9] R. Leal et al., «Additive manufacturing tooling for the automotive industry» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, no. 5–8, pp. 1671–1676, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0239-8.
- [10] ROVALMA S.A, «HWS High Performance PM Cold Work Tool Steel» [Online] Disponível em: <https://rovalma.com/wp-content/uploads/2017/03.pdf> Acedido em Set, 15, 2024.

- [11] CBCM, «Corte de Chapas», 2007 [Online] Disponível em: <http://cbcm-metalforming.com/> Acedido em Set, 22, 2024.
- [12] C. Zhou, K. Liu, X. Zhang, W. Zhang e J. Shi, «An Automatic Process Monitoring Method Using Recurrence Plot in Progressive Stamping Processes», em *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 1102-1111, 2016, doi: 10.1109/TASE.2015.2468058.
- [13] I. Pätzold, P. Tröber, M. Welm e W Volk, «Blanking of Stainless Steel», em *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1238, no. 1, 2022, doi:10.1088/1757-899X/1238/1/012030.
- [14] I. Benazzi, J. Elpidio, e G. Caversan, «Tecnologia de Estampagem 1 - Corte», 2012. Acedido: 21 de Agosto de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.yumpu.com/s/uazLFx1b6nC7pipb>.
- [15] Sirtolini, S. (2013) «Projeto de Matrizes de Corte por Cisalhamento Transversal Aplicado ao Corte Preciso de Aço» [Dissertação apresentada na Universidade de Caxias do Sul para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica]. Repositório institucional da UCS. <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/1839>.
- [16] O. Ojogba Spencer, «Additive Manufacturing Technology Development: A Trajectory Towards Industrial Revolution», *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 3, n. 5, p. 80, 2018, doi: 10.11648/j.ajmie.20180305.12.
- [17] Tom. Drozda, Charles. Wick, J. T. Benedict, R. F. Veilleux, Ramon. Bakerjian, e Society of Manufacturing Engineers., *Tool and manufacturing engineers handbook: a reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians*. Society of Manufacturing Engineers, 1983.
- [18] B. Nagarajan, Z. Hu, X. Song, W. Zhai, e J. Wei, «Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives», *Engineering*, vol. 5, n. 4. Elsevier Ltd, pp. 702–720, 1 de Agosto de 2019. doi: 10.1016/j.eng.2019.07.002.
- [19] E. M. Sefene, «State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review», *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 63. Elsevier B.V., pp. 250–274, 1 de Abril de 2022. doi: 10.1016/j.jmsy.2022.04.002.
- [20] J. Zhang, B. Song, Q. Wei, D. Bourell, e Y. Shi, «A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends», *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 35, n. 2. Chinese Society of Metals, pp. 270–284, 1 de Fevereiro de 2019. doi: 10.1016/j.jmst.2018.09.004.
- [21] N. Asnafi, «Application of laser-based powder bed fusion for direct metal tooling», *Metals*, vol. 11, n. 3. MDPI AG, pp. 1–48, 1 de Março de 2021. doi: 10.3390/met11030458.
- [22] R. Zhou, H. Liu, e H. Wang, «Modeling and simulation of metal selective laser melting process: a critical review», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 121, n. 9–10. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 5693–5706, 1 de Agosto de 2022. doi: 10.1007/s00170-022-09721-z.

- [23] T. G. Spears e S. A. Gold, «In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing», *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, vol. 5, n. 1. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 16–40, 1 de Dezembro de 2016. doi: 10.1186/s40192-016-0045-4.
- [24] B. Zhang, Y. Li, e Q. Bai, «Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review», *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 30, n. 3. Chinese Mechanical Engineering Society, pp. 515–527, 1 de Maio de 2017. doi: 10.1007/s10033-017-0121-5.
- [25] Y. Zhang et al., «Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review», *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 27, n. 1. Springer New York LLC, 2018. doi: 10.1007/s11665-017-2747-y.
- [26] D. Chen et al., «Characteristics of Metal Specimens Formed by Selective Laser Melting: A State-of-the-Art Review», *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, n. 10. Springer, pp. 7073–7100, 1 de Outubro de 2021. doi: 10.1007/s11665-020-05323-6.
- [27] J. Gunasekaran, P. Sevel, e I. J. Solomon, «Metallic materials fabrication by selective laser melting: A review», em *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 252–256. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.162.
- [28] C. Qiu, M. Al Kindi, A. S. Aladawi, e I. Al Hatmi, «A comprehensive study on microstructure and tensile behaviour of a selectively laser melted stainless steel», *Sci Rep*, vol. 8, n. 1, Dez. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-26136-7.
- [29] F. Simoni, A. Huxol, e F. J. Villmer, «Improving surface quality in selective laser melting based tool making» *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 32, no. 7, pp. 1927–1938, 2021, doi: 10.1007/s10845-021-01744-9.
- [30] T. Schwanekamp, M. Bräuer, e M. Reuber, «Geometrical and topological potentialities and restrictions in selective laser sintering of customized carbide precision tools», 2017.
- [31] Centimfe «SLM - Fusão por Laser Seletiva» [Online] Disponível em: <https://3dprinting.centimfe.com/slm.html> Acedido em Set, 15, 2024.
- [32] H. Jia, H. Sun, H. Wang, Y. Wu, e H. Wang, «Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review», 1 de Abril de 2021, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi: 10.1007/s00170-021-06810-3.
- [33] H. K. Rafi, N. V. Karthik, H. Gong, T. L. Starr, e B. E. Stucker, «Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting», *J Mater Eng Perform*, vol. 22, n. 12, pp. 3872–3883, 2013, doi: 10.1007/s11665-013-0658-0.
- [34] S. Kugaevskii, E. Pizhenkov, e A. Gamberg, «The effectiveness of additive SLM-technologies in the manufacture of cutting tools», em *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 1977–1981. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.055.

- [35] I. Hatos, H. Hargitai, G. Fekete, e I. Fekete, «Effect of Energy Density on the Mechanical Properties of 1.2709 Maraging Steel Produced by Laser Powder Bed Fusion», *Materials*, vol. 17, n. 14, p. 3432, Jul. 2024, doi: 10.3390/ma17143432.
- [36] A. E. W. Jarfors, A. C. G. H. Shashidhar, H. K. Yepur, J. Steggo, N. E. Andersson, e R. Stolt, «Build strategy and impact strength of slm produced maraging steel (1.2709)», *Metals (Basel)*, vol. 11, n. 1, pp. 1–20, Jan. 2020, doi: 10.3390/met11010051.
- [37] C. Qiu, C. Panwisawas, M. Ward, H. C. Basoalto, J. W. Brooks, e M. M. Attallah, «On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting», *Acta Mater*, vol. 96, pp. 72–79, 2015, doi: 10.1016/j.actamat.2015.06.004.
- [38] K. D. Traxel and A. Bandyopadhyay, «First Demonstration of Additive Manufacturing of Cutting Tools using Directed Energy Deposition System: Stellite™-Based Cutting Tools», *Additive Manufacturing*, vol. 25, pp. 460–468, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.11.019.
- [39] L. Griffiths, « Bugatti uses SLM Solutions' metal 3D printing to produce optimised functional components», 2019 [Online] Disponível em: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/bugatti-slm-solutions-metal-3d-printing/>, Acedido em Jan, 15, 2024.
- [40] Oliveira, J. (2023) «Numerical and Experimental Analysis of Dual Phase Steels in Automotive Applications» [Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica]. Repositório aberto da Universidade do Porto. <https://hdl.handle.net/10216/151746>.
- [41] M. Pyrz, M. Krzywobłocki, e N. Wolska, «Optimal crashworthiness design of vehicle S-frame using macro-element method and evolutionary algorithm», *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 65, n. 3, Mar. 2022, doi: 10.1007/s00158-021-03099-4.
- [42] Ramada Aços, «Tratamentos Térmicos» 2024 [Online] Disponível em: <https://www.ramada.pt/pt/servicos/acos-ligas/tratamentos-termicos/tempera/tempera-a-laser.html> Acedido em Jun, 15, 2024.
- [43] Abreu, S. (2015) «Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo» [Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica]. Repositório aberto da Universidade do Porto. <https://hdl.handle.net/10216/80019>.
- [44] Biopdi, «Ensaio de Tração», [Online] Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/> Acedido em Feb, 22, 2024.
- [45] Headmade Materials, «Metal 3D Printing», [Online] Disponível em: <https://www.headmade-materials.de/en/> Acedido em Feb, 20, 2024.
- [46] Pais, J. (2022) «Manufatura Aditiva numa Empresa de Fabrico de Componentes para a Indústria Automóvel» [Dissertação apresentada na Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Manufatura Aditiva]. Repositório da Universidade de Aveiro. <http://hdl.handle.net/10773/36013>.

BIBLIOGRAFIA

- [0] G. Jeon, D. Ha, Y. Park, e C. Jeong, «Three-Point Bending Properties of Hybrid Multi-Materials Using Adhesive Bonding Dependent on Strength Difference between Steel and Aluminum», *Materials*, vol. 15, n. 9, Mai. 2022, doi: 10.3390/ma15093328.
- [47] *Manufacturing Guide*, «Charpy Impact Test», [Online] Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/charpy-impact-test> Acedido em Aug, 20, 2024.
- [0] R. I. Badiger, S. Narendranath, e M. S. Srinath, «Microstructure and mechanical properties of Inconel-625 welded joint developed through microwave hybrid heating», *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 232, n. 14, pp. 2462–2477, Dez. 2018, doi: 10.1177/0954405417697350.
- [48] G. Ingarao e P. C. Priarone, «A comparative assessment of energy demand and life cycle costs for additive- and subtractive-based manufacturing approaches», *J Manuf Process*, vol. 56, pp. 1219–1229, Ago. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.06.009.
- [49] B. Previtali, A. G. Demir, M. Bucconi, A. Crosato, e M. Penasa, «COMPARATIVE COSTS OF ADDITIVE MANUFACTURING VS. MACHINING: THE CASE STUDY OF THE PRODUCTION OF FORMING DIES FOR TUBE BENDING», 2017.

A.1 Datasheet HWS

Aprofundam-se agora um pouco mais as propriedades do material utilizado na produção convencional do punção em estudo. As propriedades apresentadas nas Tabelas A.1 e A.2 são referentes ao aço HWS. No entanto, são valores a que se chegam quando é aplicado corretamente o tratamento térmico, atingindo um nível de dureza de 63 HRC.

Tabela A.1: Propriedades Físicas e Mecânicas do HWS

Retirado de: ROVALMA, S.A. 2018

Proprieties	300K
Mechanical Resistance [<i>MPa</i>]	2727
Yield Strength 0.2% [<i>MPa</i>]	2329
Compressive Yield Strength 0.2% [<i>MPa</i>]	2850-3050
Density [<i>g/cm³</i>]	7.67
Elastic Modulus [<i>GPa</i>]	219

Tabela A.2: Propriedades Físicas e Mecânicas Térmicas do HWS

Retirado de: ROVALMA, S.A. 2018

Proprieties	300K	373K
Thermal Exp. Coefficient [$\times 10^{-6}/K$]		10.8
Thermal Diffusivity [<i>mm²/s</i>]	5.69	5.53
Thermal Conductivity [<i>W/m.K</i>]	20	21
Specific Heat Capacity [<i>J/g.K</i>]	0.46	0.49

A.2 *Datasheet* Aço Ferramenta 1.2709

O Aço Ferramenta 1.2709 foi utilizado na produção do punção de corte produzido em SLM, sendo que as suas propriedades se mostram interessantes para esta e outras aplicações.

A sua composição química é apresentada na Tabela A.3. Este pó metálico é composto por grãos que variam entre 20 e 65 μm . No *Datasheet*, além das informações dadas, recomenda-se que o gás inerte aplicado na câmara de SLM seja Árgon e que sejam aplicadas camadas de espessura de $\approx 40 \mu\text{m}$ na produção das peças.

Tabela A.3: Aço Ferramenta 1.2709: Composição Química do Pó (wt.-%)

Retirado de: *EOS ToolSteel 1.2709 Material Data Sheet*

Element	Min.	Max.
Fe	Balance	
Ni	17.00	19.00
Co	8.50	10.00
Mo	4.50	5.20
Ti	0.80	1.20

As propriedades mecânicas apresentadas na Tabela A.4 são referentes a provetes de Aço Ferramenta 1.2709, aos quais foram aplicados um tratamento térmico, tendo atingido uma dureza de 57 HRC. Além disso, a impressão foi feita horizontalmente, podendo assim comparar estes valores com os resultados obtidos neste projeto.

Tabela A.4: Propriedades Mecânicas do Aço Ferramenta 1.2709

Retirado de: *EOS ToolSteel 1.2709 Material Data Sheet*

Yield strength [MPa]	2170
Tensile strength [MPa]	2250
Elongation at break [%]	4.2
Fatigue strength [MPa]	732
Impact toughness [J]	10

Percebe-se, portanto, que o material, através da aplicação correta do tratamento térmico, consegue alcançar valores de dureza de 57 HRC.

A.3 Equipamento de SLM

O equipamento usado, neste projeto, para produzir as facas e os provetes por SLM foi a *TruPrint 3000* da marca *Trumpf*, cujas características estão presentes na Figura A.1. A impressão foi feita numa parceria com o CENTIMFE, que possui este equipamento.

TruPrint 3000	
VOLUME DE CONSTRUÇÃO (CILINDRO)	Diâmetro 300 mm x 400 mm Altura
MATÉRIAS-PRIMAS PROCESSÁVEIS	Metais soldáveis em pó, como por exemplo, aços inoxidáveis, aços de ferramenta, ligas de alumínio, níquel ou titânio. Disponibilidade atual de matérias-primas e de parâmetros a pedido.
PRÉ-AQUECIMENTO (PADRÃO)	Até 200 °C
POTÊNCIA LASER MÁXIMA NA PEÇA DE TRABALHO (LASER DE FIBRA TRUMPF)	700 W
DIÂMETRO DO RAIOS (PADRÃO)	80 µm
ESPESSURA DA CAMADA	20 - 150 µm
TAXA DE DEPOSIÇÃO	5 - 120 cm³/h
TEOR MÍN. DE OXIGÊNIO MENSURÁVEL	Até 100 ppm
LIGAÇÃO E CONSUMO	
CONEXÃO ELÉTRICA (TENSÃO)	400/460 V
CONEXÃO ELÉTRICA (INTENSIDADE DE CORRENTE)	32 A
CONEXÃO ELÉTRICA (FREQUÊNCIA)	50/60 Hz
GÁS INERTE	Nitrogênio, argônio
MODELO	
DIMENSÕES (INCL. FILTRO) (L X A X P)	3385 mm x 1750 mm x 2070 mm
PESO (INCL. PÓ)	4300 kg

Figura A.1: Características do Equipamento de SLM *TruPrint 3000* da marca *Trumpf*
Retirado de *Trumpf* (<https://www.trumpf.com/pt>)



2024

Caracterização de ferramentas metálicas produzidas por fabrico aditivo: Estudo de durabilidade de facas para corte de platinas de aço na indústria automóvel

Ana Ferreira

NVA

NOVA

SCHOOL OF

MANAGEMENT

TECHNOLOGY