



Estudo de modificação funcional de
materiais por tratamento térmico laser

UMinho | 2022

André Fernando Marques Duarte



André Fernando Marques Duarte

**Estudo de modificação funcional de
materiais por tratamento térmico laser**

outubro de 2022



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

André Fernando Marques Duarte

**Estudo de modificação funcional de
materiais por tratamento térmico laser**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor Nuno Ricardo Maia Peixinho

outubro de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A realização de todo o trabalho desenvolvido na minha Dissertação não seria possível sem o apoio de várias pessoas.

Inicialmente quero dedicar estas palavras à minha família, pela compreensão e apoio incondicional ao longo deste percurso académico. Em especial aos meus pais e irmã por acreditarem no meu projeto de vida.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Peixinho, por todos os conhecimentos transmitidos, disponibilidade e apoio prestado ao longo desta etapa académica.

Ao Professor Doutor Vítor Carneiro e Delfim Soares, à professora Alexandra Alves e aos técnicos Miguel Abreu e Filipe Marques pela sua disponibilidade e auxílio na realização de todos os ensaios experimentais.

Ao meu colega Engenheiro Rui Pereira, por toda a disponibilidade, orientação e ajuda na realização deste trabalho.

Por fim, a todos os amigos e colegas que me acompanharam na vida académica.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

STATEMENT OF INTEGRITY

I hereby declare having conducted this academic work with integrity. I confirm that I have not used plagiarism or any form of undue use of information or falsification of results along the process leading to its elaboration.

I further declare that I have fully acknowledged the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

Universidade do Minho, outubro de 2022

RESUMO

Este trabalho consiste na caracterização mecânica de ligas tratadas termicamente via laser, para aplicação em componentes automóveis. Pretende-se que o tratamento provoque um amaciamento local do material, mantendo as restantes zonas inalteráveis.

Para tal, o trabalho foca-se essencialmente na análise experimental da liga de aço DP 1000 e na liga de alumínio AW5754-H111. Inicialmente, o trabalho realizado pretende dar continuidade ao estudo da liga de aço ‘*Dual Phase*’ DP 1000, estudo realizado numa anterior dissertação, “Modificação funcional de materiais e componentes metálicos por tratamento térmico localizado” [2]. E numa segunda fase, fazer o estudo de uma nova liga de alumínio AW5754-H111.

Os materiais foram submetidos a diversos ensaios experimentais. No caso da liga de aço DP 1000, como esta já tinha sido tratada termicamente via laser, apenas foi realizado o ensaio de dureza e microdureza. Já no caso da liga de alumínio, foi realizado um estudo mais aprofundado, no qual se realizou a análise de calorimetria (DSC), tratamento térmico localizado via laser, ensaio de dureza e ensaio de tração. De forma a complementar o estudo, também foi realizado um tratamento térmico de homogeneização.

Desta forma, será possível analisar o comportamento das ligas em estudo, liga de aço DP 1000 e liga de alumínio AW5754-H111, estabelecendo correlação entre a temperatura máxima e as modificações das propriedades mecânicas, consequência das alterações microestruturais.

No entanto, para a liga de aço DP 1000, os resultados foram contrários à bibliografia existente, pois foi verificado um aumento de dureza do material. No caso da liga de alumínio AW5754-H111, os valores obtidos coincidem com a bibliografia existente, pois a liga de alumínio AW5754-H111, caracteriza-se por ser uma liga não tratável termicamente.

PALAVRAS-CHAVE

amaciamento, liga de aço DP 1000, liga de alumínio AW 5754-H111, tratamento térmico localizado,

ABSTRACT

This work consists of the mechanical characterization of alloys thermally treated via laser, for application in automotive components. The purpose of the treatment is to cause a local softening of the material, keeping the remaining areas unchanged.

For this, the work focuses essentially on the experimental analysis of the steel alloy DP 1000 and the aluminum alloy AW5754-H111. Initially, the work carried out intends to continue the study of the 'Dual Phase' DP 1000 steel alloy, a study done in a previous dissertation, "Functional modification of materials and metallic components by localized heat treatment" [2]. And in a second phase, study a new aluminum alloy AW5754-H111.

The materials were submitted to several experimental tests. In the case of the DP 1000 steel alloy, as it had already been thermally treated via laser, only the hardness and microhardness tests were done. In the case of the aluminum alloy, a more in-depth study was carried out, in which it was done the calorimetry analysis (DSC), the localized heat treatment via laser, the hardness test and the tensile test. In order to complement the study, a heat treatment of homogenization was also done.

This way, it will be possible to analyze the behavior of the alloys under study, steel alloy DP 1000 and aluminum alloy AW5754-H111, establishing a correlation between the maximum temperature and changes in mechanical properties, a consequence of microstructural changes.

However, for the DP 1000 steel alloy, the results were the opposite to the existing bibliography, as an increase in the material hardness was verified. In the case of the AW5754-H111 aluminum alloy, the values obtained coincide with the existing bibliography, since the AW5754-H111 aluminum alloy is characterized by being a non-heat treatable alloy.

KEYWORDS

Aluminum alloy AW 5754-H111, DP 1000 steel alloy, local heat treatment, softening

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Índice	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	11
Índice de Gráficos.....	12
Índice de equações.....	13
Notações e Convenções	14
Siglas e abreviaturas.....	15
1. Introdução.....	16
1.1. Enquadramento e Motivação	16
1.2. Objetivos.....	17
1.3. Estrutura da dissertação.....	18
2. Enquadramento da Indústria Automóvel	19
2.1. Redução de peso na Indústria automóvel.....	20
2.2. Materiais utilizados em componentes automóveis	21
2.2.1. Aço.....	22
2.2.2. Ligas de Alumínio	23
2.3. Processo de conformação	24
2.4. Modificação funcional	25
2.4.1. Tecnologias de tratamento térmico.....	25

2.4.2.	Parâmetros de tratamento térmico	28
2.4.3.	Escolha do Tratamento térmico localizado.....	30
2.5.	Ensaio de tração	31
3.	Procedimento experimental	32
3.1.	Materiais em estudo.....	35
3.1.1.	Liga de Aço DP 1000	35
3.1.2.	Liga de alumínio AW5754-H111.....	37
3.2.	Tratamento térmico de homogeneização	38
3.2.1.	Ensaio experimental de tratamento térmico de homogeneização	39
3.3.	Tratamento térmico localizado	41
3.3.1.	Ensaio experimental de tratamento térmico localizado.....	42
3.4.	Ensaio de DSC	45
3.5.	Ensaio de dureza.....	46
3.6.	Ensaio de microdureza	48
3.6.1.	Ensaio experimental de microdureza.....	48
3.7.	Ensaio experimental de tração	50
4.	Análise de resultados	51
4.1.	Ensaio de dureza- Liga de aço DP 1000	51
4.2.	Ensaio Microdureza DP 1000.....	53
4.3.	Ensaio de dureza Liga AW5754-H111.....	55
4.3.1.	Associada ao Tratamento térmico forno	55
4.3.2.	Associado ao Tratamento térmico laser	56
4.4.	Ensaio DSC - Liga AW5754-H111	58
4.5.	Resultados Ensaio de tração.....	60
4.6.	Avaliação global de resultados	63
5.	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	64

5.1. Conclusões.....	64
5.2. Desenvolvimentos futuros	65
6. Bibliografia	66
Anexo A- Desenho técnico de fabrico de provete de tração	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Setor automóvel português, 2022[4]	19
Figura 2 - Atividades conexas com participação na cadeia de valor do fabrico de veículos automóveis [4]	20
Figura 3 - Ilustração da distribuição das ligas metálicas na carroçaria, Volvo S60 [Fonte: Auto Esporte] [7].....	21
Figura 4 - Fonte: Euro NCAP, 2022 [8]	22
Figura 5 - Parâmetros do processo de aquecimento [16]	26
Figura 6 - Etapas de tratamento [12].....	28
Figura 8 – Variação da austenitização de aços especiais [5]	29
Figura 9 – Diagrama das transformações de fase associadas ao tempo de arrefecimento [5].....	30
Figura 10 - Procedimento dos ensaios experimentais e caracterização da liga de aço - DP 1000	33
Figura 11 - Procedimento dos ensaios experimentais e caracterização da liga de alumínio - AW5754 - H111.....	34
Figura 12-Composição microestrutural [5].....	35
Figura 13: Forno de Mufla	38
Figura 14: Forno de mufla - Lab. Metalurgia	39
Figura 15: Laser de diodo LM100.....	41
Figura 16 - Localização de incidência laser no provete	42
Figura 17 - Pontos de medição de dureza	43
Figura 18: Provetes TTL AW5754-H111	43
Figura 19: Fixação dos provetes no <i>LM1000</i>	44
Figura 20 - Equipamento 'DSC Q20'	46
Figura 21 - Impressão do indentador Vickers	46
Figura 22 - Ensaio de dureza-Liga de aço DP1000	47
Figura 23 - Ensaio de dureza-Liga de alumínio AW5754-H111	47
Figura 24: DuroScan -EMCO-TEST.....	48
Figura 25 - Amostra em base de resina	49

Figura 26 - Ensaio microdureza.....	49
Figura 27 - Máquina universal de ensaios tração/ compressão ' <i>Instron</i> '.....	50
Figura 28- DP 1000 - Amostra 2	51
Figura 29 -DP 1000 - Amostra 3	51
Figura 31- Esquema - Ensaio microdureza - Amostra 3.....	53
Figura 30 - Esquema - Ensaio microdureza – Amostra 2	53
Figura 32 - Resultado do ensaio de tração	60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-Equipamentos utilizados e respectivos ensaios realizados.....	32
Tabela 2 - Ensaio realizado para a liga de aço DP 1000.....	33
Tabela 3 - Ensaio realizado para a liga de alumínio AW5754 H111	34
Tabela 4 - Composição química DP 1000 [17]	36
Tabela 5 - Propriedades mecânicas DP 1000 [17]	36
Tabela 6 - Propriedades físicas DP 1000 [17]	36
Tabela 7 - Composição química AW5754 - H111 [18]	37
Tabela 8 - Propriedades físicas [18]	37
Tabela 9 - Propriedades mecânicas [18].....	37
Tabela 10 - Ensaio 2 - Forno.....	40
Tabela 11: Especificações técnicas do equipamento de tratamento térmico localizado.	42
Tabela 12 - Ensaio tratamento laser	44

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Extração das amostras ao longo do tratamento.....	40
Gráfico 2 - DP 1000 - Amostra 2	52
Gráfico 3 - DP 1000 - Amostra 3	52
Gráfico 4 - Microdureza - Amostra 2	54
Gráfico 5 - Microdureza - Amostra 3	54
Gráfico 6 - Dureza TTF sem estágio	55
Gráfico 7 - Dureza TTF com estágio	56
Gráfico 8 - Dureza Tratamento Laser.....	57
Gráfico 9 – Tratamento de dados de obtenção da curva de fluxo de calor DSC - Liga de alumínio AW 5754 H111	58
Gráfico 10 – Reações químicas- AW 5754 H111.....	59
Gráfico 11- Tensão-Deformação - Provetes 250°C.....	61
Gráfico 12- Tensão-Deformação - Provetes 300°C.....	61
Gráfico 13- Tensão-Deformação - Provetes 400°C.....	61
Gráfico 14- Tensão-Deformação - Provetes 350°C.....	61
Gráfico 16- Tensão-Deformação - Provetes 450°C.....	62
Gráfico 15- Tensão-Deformação - Provetes 430°C.....	62
Gráfico 17 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW5754 H111 em função da temperatura máxima de tratamento térmico localizado via laser.....	63

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

(1).....	31
(2).....	31
(3).....	31
(4).....	472
(5).....	585

NOTAÇÕES E CONVENÇÕES

β	Taxa de aquecimento
c_p	Calor específico
d_m	Diagonal média de indentação
$Q_{amostra}$	Fluxo de calor da amostra
$Q_{linha\ base}$	Fluxo de calor linha base
$F_{m\acute{a}x.}$	Força máxima
σ_y	Tensão de cedência
σ_u	Tensão de rotura
m	Massa

SIGLAS E ABREVIATURAS

DP	Dual Phase Steel
DSC	Differential Scanning Calorimetry
THTB	Tailor Heat Treated Blanks
TT	Tratamiento térmico
TTL	Tratamiento térmico localizado
UHSS	Ultra High Strength Steels
ZTA (s)	Zona(s) termicamente afectada(s)

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial, será apresentada uma breve introdução ao trabalho desenvolvido, no qual estão incluídos: enquadramento, motivação, objetivos e estrutura da dissertação, com o intuito de uma fácil compreensão do trabalho realizado.

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

Na elaboração desta dissertação, pretende-se estudar parâmetros e processos de tratamento térmico laser, com o objetivo de modificar localmente propriedades mecânicas de ligas de aço e de alumínio de alta resistência. Para tal, será realizado um plano experimental de ensaios e seleção do processo de tratamento térmico adequado. No qual se inclui, análise das propriedades mecânicas; composição química e caracterização microestrutural. Este trabalho de investigação, tem como finalidade a redução de risco de rotura em processo de conformação, para a fabricação de componentes metálicos, para a indústria automóvel.

A indústria automóvel, está em constante desenvolvimento, verificando na atualidade uma evolução impulsionada por fatores de carácter qualitativo e social, de tal forma, que aumenta a exigência na produção de componentes de extrema complexidade e alto desempenho.

Para que esta se mantenha economicamente rentável e competitiva, é necessário que se encontre na vanguarda da tecnologia. Isto é, que acompanhe as necessidades dos consumidores, bem como as necessidades do planeta.

A indústria automóvel, está a passar por uma eletrificação em massa, condução autónoma e inteligente. No entanto, noutra perspetiva, tem se exigido grande esforço á indústria automóvel na redução da poluição. Cumprindo as normas europeias (Euro7) [\[1\]](#) que ano após ano define novos limites de emissões de poluentes, nos veículos a combustível fóssil.

Desta forma, torna-se necessário reduzir a emissão de gases efeito de estufa, mas mais importante ainda tornar as plataformas elétricas mais apelativas de forma a alterar as tendências do mercado.

Para que tal seja possível, é necessário reduzir o seu peso, capacitando-os de uma maior autonomia, sem comprometer a fiabilidade e a segurança rodoviária.

A redução de peso só é possível, se os materiais ou as tecnologias de fabrico forem alteradas, desta forma podemos falar de *'Tailor Heat Treated Blanks'*, tecnologia capaz de tratar termicamente uma peça localmente, mais explicitamente modificar localmente as propriedades mecânicas do material. Desta forma é possível, utilizar o mesmo material com uma secção de chapa inferior, tornando o processo de conformação viável.

A possibilidade de estudar e desenvolver soluções que possam trazer benefícios para a sociedade atual, torna-se muito aliciante.

1.2. OBJETIVOS

A realização da presente dissertação, tem como objetivo dar continuidade e complementar o estudo realizado numa anterior dissertação, "Modificação funcional de materiais e componentes metálicos por tratamento térmico localizado" [2], que visa, validar a utilização da modificação funcional de componentes metálicos para componentes automóveis, através de tratamento térmico laser.

Com o aparecimento dos aços de alta resistência (UHSS) e as ligas de alumínio endurecidas, estes estão capacitados de uma elevada resistência comparativamente aos materiais convencionais, permitindo assim a redução de espessura de chapa no processo de fabrico. No entanto, isto nem sempre é possível, uma vez que o processo de fabrico poderá não conseguir responder à elevada complexidade geométrica e a especificações técnicas impostas pelo componente. Para tal, foi necessário desenvolver novas técnicas e metodologias de fabrico, exemplo disso é o *'Tailor Heat Treated Blanks'* (THTB). O tratamento térmico localizado (TTL), possibilita a modificação das propriedades mecânicas da chapa ao longo da sua extensão, isto é, um amaciamento nas zonas críticas no processo de conformação.

Desta forma, o objetivo da presente dissertação passa por submeter dois materiais metálicos: liga de aço DP 1000 e alumínio AW5754- H111, a ensaios experimentais, validando a redução do risco de rotura no processo de conformação. Como tal, foi necessário inicialmente caracterizar mecanicamente e metalurgicamente os materiais em estudo, posteriormente foram definidos os parâmetros a utilizar nos ensaios experimentais e por fim validar experimentalmente as amostras.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação divide-se em seis capítulos, subdividindo-se em diversos subcapítulos, de forma a explorar mais intensa e especificamente um determinado tema do respetivo capítulo. O objetivo de transmitir toda a informação necessária ao leitor.

O presente capítulo, introduz o tema da dissertação, enquadramento, motivação e objetivos, para que se entenda de uma melhor forma a razão da sua realização.

O capítulo 2, apresenta uma revisão bibliográfica, relativamente à indústria automóvel, materiais em estudo e tecnologias utilizadas.

O capítulo 3, formula toda a componente experimental, escolha de equipamentos e sua configuração.

O capítulo 4, engloba toda a análise de resultados inerentes à caracterização dos materiais, avaliando assim a resistência mecânica dos materiais após modificação funcional.

O capítulo 5, expõe a análise global, comparação e crítica dos resultados, bem como breves sugestões de melhorias.

Por fim, o capítulo 6, apresenta toda a bibliografia utilizada e necessária para a realização da presente dissertação.

2. ENQUADRAMENTO DA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

A Indústria Automóvel é um dos maiores geradores económicos mundial, caracterizando-se pela abrangência global, elemento central da mobilidade.

Conforme os dados atualizados da “*European Automobile Manufacturers Association*” (ACEA, 2022) [3], em 2021 foram produzidos 79,65 milhões de carros ligeiros em todo o mundo, apresentando um crescimento de 3,5% em relação ao ano anterior. Em termos de volume de vendas, a primeira posição é ocupada pela China, seguindo-se a União Europeia e os Estados Unidos.

A indústria automóvel não se resume apenas à produção e montagem de automóveis, a produção de componentes automóveis é um subsetor de extrema importância para a economia. Em Portugal, é um setor que agrega cerca de 752 empresas, gerando 43.247 postos de trabalho e um volume de exportação de 7.620 milhões de euros, (Figura 1) [4].



Figura 1 - Setor automóvel português, 2022[4]

Gera um volume de negócios de 9 211 milhões de euros, o qual se divide na atividade metalúrgica e metalomecânica com 32%, a elétrica e eletrónica 29%, a de polímeros 19%, os têxteis e outros revestimentos 10%, montagem de sistemas 8% e outras atividades com 2%, (Figura 2) [4].



Figura 2 - Atividades conexas com participação na cadeia de valor do fabrico de veículos automóveis [4]

O setor de componentes automóveis português está em constante desenvolvimento tecnológico, de forma a melhorar o processo de fabrico, qualidade do produto nacional, para que sejam captados novos investidores.

2.1. REDUÇÃO DE PESO NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

A indústria automóvel está em constante desenvolvimento, ao longo dos tempos os seus componentes são sujeitos a alterações drásticas.

Posto isso, existe uma grande necessidade de reduzir o peso dos automóveis, aumentar a segurança, torná-los mais económicos e menos poluentes. Os automóveis são responsáveis por um elevado nível de emissão de gases de efeito de estufa e gases nocivos para a saúde pública. Na tentativa, de reduzir o impacto ambiental causado, são criadas normas pela Comissão Europeia de forma a regulamentar a quantidade de emissões dos automóveis em circulação. [1]

Desta forma, as montadoras foram obrigadas a investir em inovação tecnológica, com o propósito de produzir automóveis mais leves e económicos sem comprometer o conforto, a segurança e o desempenho do mesmo.

Tudo isto não era possível sem recorrer a novos meios tecnológicos e à ciência dos materiais. Combinando novos materiais e processos de fabrico.

2.2. MATERIAIS UTILIZADOS EM COMPONENTES AUTOMÓVEIS

Os automóveis são constituídos por quatro grandes famílias de materiais, metais, polímeros, cerâmicos e compósitos. No entanto, a maior parte dos componentes estruturais são fabricados em metal, mantendo uma boa relação entre resistência mecânica/ductilidade.

Na década de 50 e 60, foram desenvolvidas novas técnicas de industrialização, tal como “Lean Manufacturing” [6], o que permitiu produção em massa, pois a procura automóvel era elevada e pretendia-se um bom desempenho e boa rentabilidade para as montadoras. Era recorrente a utilização de chapas aço com boa capacidade de deformação plástica. Na década de 70 e 80 com a crise do petróleo, o consumo de combustível tornou-se uma preocupação, sendo um impulso no desenvolvimento de aços de alta resistência para permitir a redução da espessura de chapa. Já na década de 90, as preocupações na construção automóvel passam pela segurança e questões ambientais, procurando novas técnicas de fabrico e desenvolvimento de novas ligas de alumínio de forma a reduzir drasticamente o peso das construções, resultando estruturas constituídas por vários materiais. (Figura 3) [7]

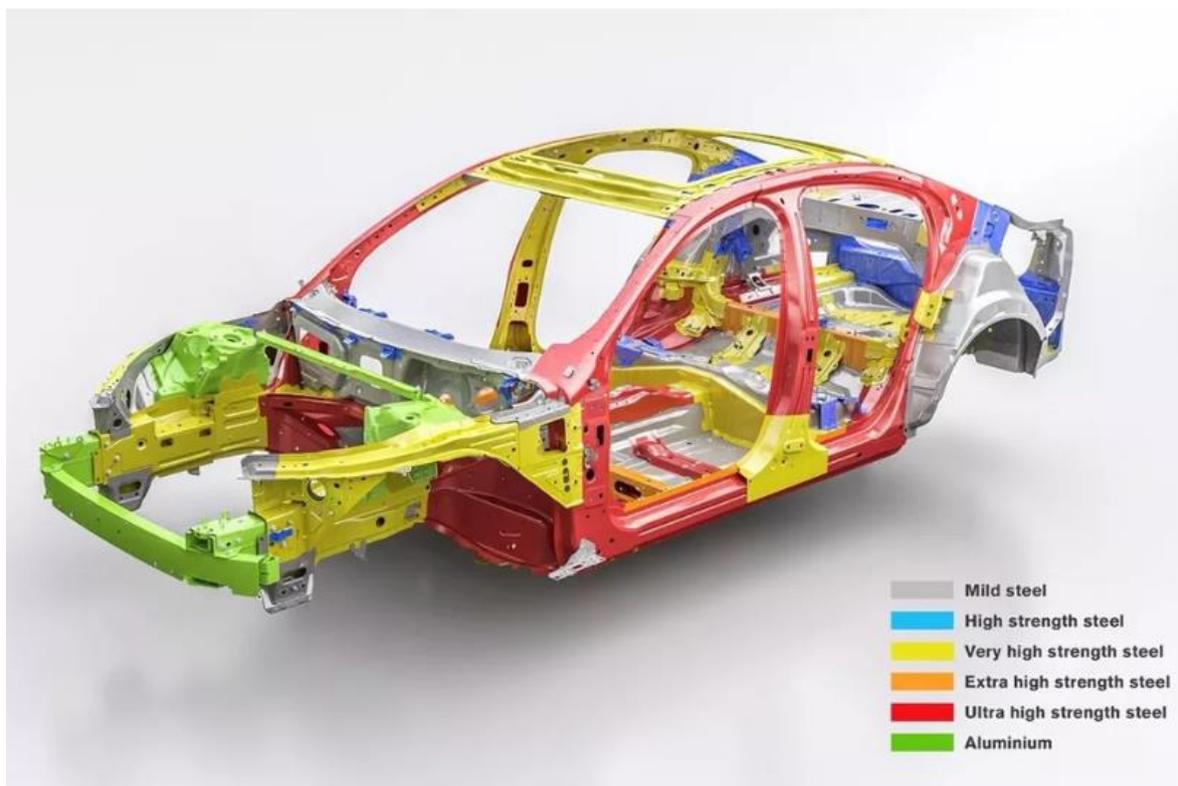


Figura 3 - Ilustração da distribuição das ligas metálicas na carroçaria, Volvo S60 [Fonte: Auto Esporte] [7]

2.2.1. Aço

O aço é uma liga metálica constituída essencialmente por ferro e carbono, a percentagem de carbono pode variar entre 0,008 e 2,11%, no entanto existem modificações significativas com a adição de outros elementos, tais como: cromo, vanádio, magnésio e tungstênio. As ligas modificadas, são alteradas de forma a aumentar a sua aptidão para serem conformadas (CALLISTER,2000) [5] .

Desta forma, a geometria dos componentes pode-se tornar mais complexa e a redução de massa ser maior.

Assim, surgiram os “*Advanced High Strength Steels-AHSS*”, Aços Avançados de Alta Resistência, muito utilizados em componentes do carro capazes de dissipar a energia em caso de colisão, combinando elasticidade e rigidez de forma a garantir a segurança do passageiro. (Figura 4). [8]



Figura 4 - Fonte: Euro NCAP, 2022 [8]

2.2.2. LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio é um metal não ferroso, assumindo uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Possui baixa densidade, elevada condutividade térmica, boa resistência à corrosão.

Grande aplicabilidade, com algumas limitações, tal como por exemplo baixa resistência mecânica, a dureza e um baixo ponto de fusão quando comparados com o aço. Mas quando, combinado com alguns elementos de liga, torna-se capazes de responder às necessidades exigidas.

As ligas de alumínio normalmente têm, como elementos de liga o cobre, manganês, silício, magnésio e o zinco, podendo ter no seu todo um máximo de 10%. Estas podem ser divididas em dois grupos: - ligas para trabalho mecânico e conformação, destinados ao fabrico de produtos semiacabados, chapas, lingotes, arame, entre outros, e ligas para fundição, destinados a componentes fundidos. As ligas para trabalho mecânico podem ainda ser divididas em ligas não tratáveis e ligas tratáveis termicamente, isto é, quando adquirem melhorias significativas de resistência mecânica, através de um processo de endurecimento por precipitação.

2.2.2.1. NOMENCLATURA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Segundo a Aluminum Association (AA) [\[9\]](#), as ligas de alumínio são divididas em nove séries, dependendo da sua composição química e características mecânicas.

-série 1: Série de alumínio com pureza de 99,9%, apresenta elevada resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica. No entanto, apresenta baixa resistência mecânica.

-série 2: Tem como principal elemento de liga o cobre e quando tratada termicamente, esta aumenta a sua resistência mecânica sendo muito utilizada na indústria aeronáutica.

-série 3: Tem como principal elemento de liga o manganês. São ligas não-tratáveis termicamente, tendo como principal aplicação os produtos estampados.

-série 4: Tem como principal elemento de liga o silício, apresentando baixo ponto de fusão e impossibilidade tratamento térmico. Utilizadas essencialmente como material de adição de soldadura.

-série 5: Tem como principal elemento de liga o magnésio, esta caracteriza-se por ser uma liga não-tratável termicamente. Quando estas são submetidas a qualquer tipo de

tratamento térmico, estas apresentam um processo de estabilização e conseqüentemente perda de propriedades mecânicas. Tem como principal aplicação em produtos estampados.

-série 6: Liga de AL-MG-Si, com grande capacidade de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento. São utilizadas em processos de extrusão, perfis de construção civil e fabrico de bicicletas uma vez que podem ser soldadas, no entanto, não apresentam tanta resistência quanto as séries 2 e 7.

-série 7: Liga de Al-Zn, apresentando os mais altos índices de resistência mecânica e tenacidade quando tratadas termicamente.

-série 8: Tem como principal elemento de liga o lítio. São tratáveis termicamente, apresentando alta resistência mecânica.

-série 9: Ligas que não se enquadrem nas séries anteriormente referidas, pertencem à série 9.

2.2.2.2. LIGA DE ALUMÍNIO – SÉRIE 5

A série 5 tem como elemento principal o magnésio, elemento este capaz de conferir maior endurecimento ao alumínio. Este elemento inibe que as ligas sejam tratáveis termicamente, quando representa o elemento principal ou em conjunto com Mn. Possuem boas características de soldagem, boa plasticidade e alta resistência à corrosão.

A ligas AL-Mg quando expostas a longos períodos à temperatura ambiente, ocorre a precipitação de Mg_2Al_3 ao longo das bandas de deslizamento. Também, quando expostas a altas temperaturas, em condições de recozimento, ocorrerá o mesmo fenômeno na fronteira de grão. Esta estrutura é indesejável por ser suscetível à corrosão intergranular.

A ligas AL-Mg quando expostas a longos períodos à temperatura ambiente, ocorre a precipitação de Mg_2Al_3 ao longo das bandas de deslizamento. Também, caso sejam expostas a altas temperaturas, em condições de recozimento, ocorrerá precipitação. Como tal, estas carecem de um tratamento de superfície, de forma a eliminar ou minimizar esta instabilidade.

2.3. PROCESSO DE CONFORMAÇÃO

A grande vantagem da utilização de metais, é a capacidade tecnológica na conformação dos mesmos, tais como tubos, chapas, barras e outras diversas geometrias. Sendo obtidas por processos de deformação plástica, conservando a sua massa, tais processos são: extrusão,

laminagem, forjamento, etc. Na maioria dos produtos as propriedades mecânicas dependem do controlo durante o encruamento, estando assim, diretamente dependente do processo utilizado.

Com a procura de materiais de reduzido peso específico para a indústria automóvel, tais como ligas de alumínio, houve uma necessidade acrescida no desenvolvimento de novos processos de conformação. No entanto, todos estes processos só são possíveis se as propriedades mecânicas do material forem alteradas.

2.4. MODIFICAÇÃO FUNCIONAL

A modificação funcional consiste na modificação das propriedades mecânicas de um material, aumentando a aptidão para um dado processo de conformação.

Utilizando o tratamento térmico localizado, permite modificar localmente as propriedades mecânicas de um material, que posteriormente será submetido a um processo de conformação. Exemplo disso, uma chapa plana que terá como resultado, um componente com embutidura com grande profundidade e raios de pequena dimensão.

Uma técnica controlada e limpa da modificação das superfícies. Esta técnica oferece muitas vantagens, devido à sua facilidade de automação, bem como a capacidade de tratamento de peças tridimensionais.[\[9\]](#) Esta técnica tem a capacidade de ser empregue no tratamento de quase todos os materiais, capacitando-os de uma boa conformabilidade.

Para melhorar o processo de conformação, pretende-se que o tratamento térmico conduza a um amaciamento localizado do material.

2.4.1. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO TÉRMICO

Os processos de produção nem sempre fornecem as características necessárias aos materiais, de tal forma que muitas vezes é necessário submetê-los a tratamentos, de forma a modificar as suas propriedades mecânicas. Os tratamentos referidos são designados como “tratamentos térmicos”, processo sem adição de material, envolvendo operações de aquecimento e arrefecimento em condições controladas. [\[10\]](#)

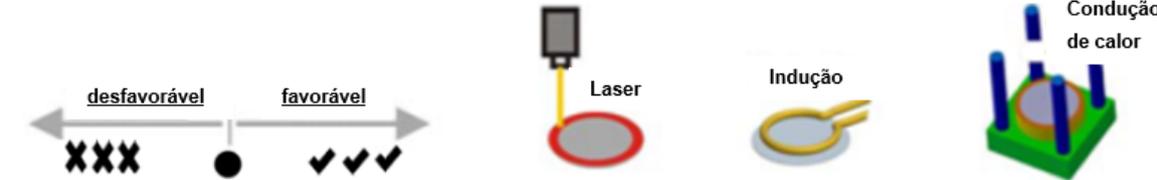
O tratamento térmico tem como finalidade tratar termicamente uma área selecionada na peça sem que esta seja fundida, esta tecnologia está sempre associada a questões geométricas e económicas.

As tecnologias mais utilizadas para tratamento térmico são: radiação laser, indução e condução de calor por contacto. Na Figura 5, o estudo de Geiger et al. [11] permitiu avaliar as vantagens e desvantagens destes três meios de aquecimento, tal como taxas de aquecimento, custos de investimento, etc.

Como referido em [2], a tecnologia mais adequada para tratamento térmico localizado é a radiação laser, pois possui bastante flexibilidade, permite elevadas taxas de aquecimento, precisão, restrição da zona termicamente tratada em curto espaço de tempo. Utilizado essencialmente em pequenas séries.

Particularmente, a condução de calor tem a capacidade de homogeneizar a temperatura em peças de complexa geometria. Apresenta excelente reprodutibilidade e possibilidade de definir tempos de estágio. Esta tecnologia é vantajosa em termos financeiros, uma vez que tem baixos custos de investimento, operação e manutenção.

Desta forma, será uma tecnologia utilizada nos ensaios experimentais ao longo deste trabalho.



	Laser	Indução	Condução de calor
Taxa de aquecimento	✓✓✓	✓✓✓	✓✓
Distribuição homogénea da temperatura	●	XX	✓✓✓
Reprodutibilidade	●	X	✓✓✓
Possibilidade de um tempo de espera	XXX	X	✓✓✓
Custos de investimento – Máquina	XXX	●	●
Custos de investimento – Ferramentas	✓✓✓	XX	XX
Tempo de preparação	✓✓✓	XX	●
Produtividade	XX	✓✓✓	✓✓✓

Figura 5 - Parâmetros do processo de aquecimento [16]

Como referido em [2], a tecnologia mais adequada para tratamento localizado, é a radiação laser. Desta forma, será um tema a desenvolver. Também será estudado o tratamento no forno, pois será utilizado nos ensaios.

2.4.1.1. RADIAÇÃO LASER

O LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), tecnologia de elevada precisão, reduzida deformação e controlo de temperatura e velocidade. O feixe de luz possui grande intensidade de energia e propriedades únicas. O laser é dividido em três categorias, dependendo do meio ativo: gasoso, líquido e sólido.

- Laser de CO₂: laser em meio gasoso, mistura de dióxido de carbono (CO₂), estimulada eletricamente. Possuem alta eficiência do feixe.

- Laser de fibra: laser em meio sólido, tem como vantagem a capacidade de obter um diâmetro de incidência muito pequeno, sendo que podemos obter uma intensidade 100 vezes maior que o de CO₂.

A radiação laser é controlada por um robot, que permite fazer um tratamento térmico localizado de alta precisão, com elevadas taxas de aquecimento num curto período, tornando-se assim a tecnologia mais vantajosa.

2.4.1.2. FORNO

Para a realização do ensaio de tratamento térmico de homogeneização, recorreu-se ao tratamento no forno. Resume-se a um equipamento a fornecer calor uniforme, de forma a alterar a microestrutura de um dado material.

Existem uma grande diversidade de fornos, dependo da aplicação, combustível usado, bem como o tipo de atmosfera utilizada no processo. Estes podem ser alimentados a combustível fóssil (líquido ou gasoso) ou a eletricidade. A grande desvantagem dos fornos alimentados a combustível fóssil, é a contaminação da atmosfera no interior do forno com a combustão. No entanto, os equipamentos elétricos têm como desvantagem o tempo de arranque mais demorado e conseqüentemente um maior custo de operação.

2.4.2. PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico depende de determinadas variáveis, tais como: temperatura de aquecimento, taxa de aquecimento, tempo de estágio, taxa de arrefecimento e atmosfera de aquecimento. (Figura 6)

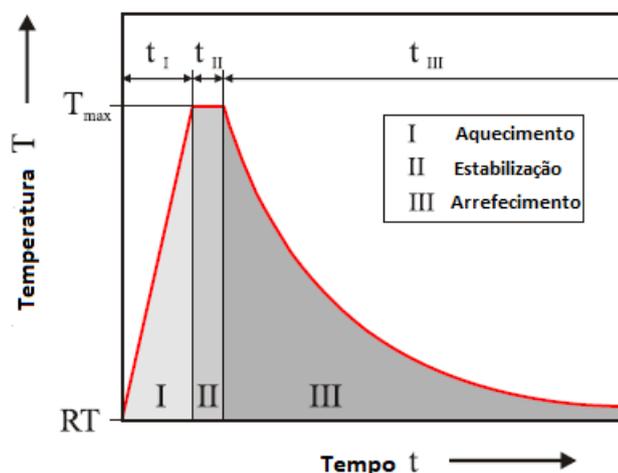


Figura 6 - Etapas de tratamento [12]

2.4.2.1. TEMPERATURA DE AQUECIMENTO

A temperatura de aquecimento é definida de acordo com as propriedades do material, com o tipo de processo utilizado, bem como com as estruturas finais desejadas. Em que, no presente trabalho temos como objetivo o amaciamento do material e conseqüente aumento da ductilidade.

A temperatura tem uma grande influencia na seqüência de solubilização, na qual o material é aquecido até uma dada temperatura durante um determinado tempo até que os elementos de liga fiquem completamente dissolvidos na matriz.

O caso mais frequente nos aços, pretende alterar uma ou mais propriedades mecânicas através de uma austenização completa, total dissolução das fases. O aquecimento utiliza temperaturas acima da temperatura critica, de forma a garantir a total dissolução. Quanto mais elevada for essa temperatura, maior garantia se tem na dissolução, no entanto o tamanho de grão vai aumentar, o que também poderá ser prejudicial.

2.4.2.2. TAXA DE AQUECIMENTO

A taxa de aquecimento deve ser ajustada ao volume de material e às suas propriedades mecânicas e químicas.

No caso de aços especiais, que exigem uma temperatura de austenização muito elevada, na zona crítica a taxa de aquecimento deve ser elevada, para que seja evitado o crescimento de grão da austenite.

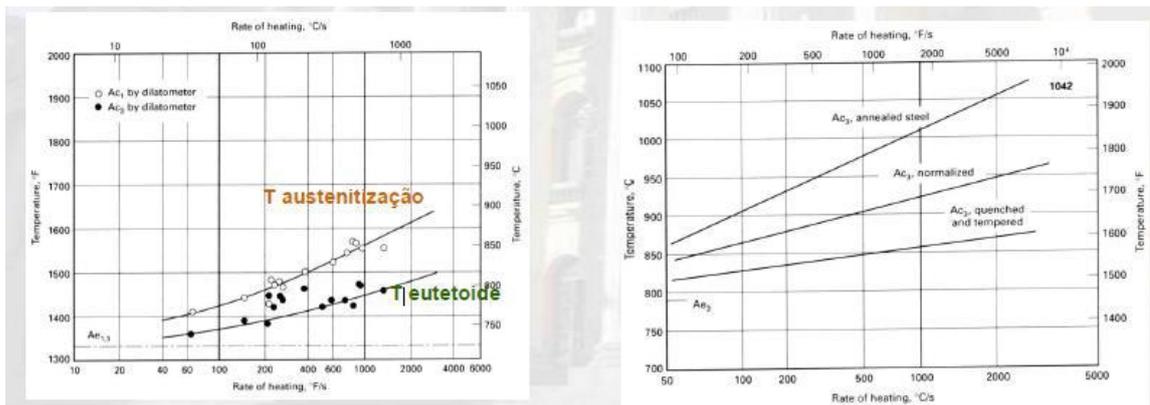


Figura 7 – Variação da austenitização de aços especiais [5]

2.4.2.3. TEMPO DE ESTÁGIO

O tempo de estágio é fundamental, para que se obtenha uma temperatura uniforme na secção da peça, garantindo as modificações estruturais desejadas.

Tal como a temperatura de aquecimento, quanto mais longo o tempo de estágio mais completa é a dissolução das fases. Mas admite-se que em termos de modificação estrutural, a temperatura de aquecimento mais elevada, é mais vantajosa do que um tempo de estágio mais longo a uma temperatura inferior.

2.4.2.4. TAXA DE ARREFECIMENTO

A taxa de arrefecimento é considerada o fator mais importante de um tratamento térmico, pois define a sua estrutura e conseqüentemente as suas propriedades mecânicas. Com a variação da taxa de arrefecimento, pode-se obter perlite grosseira (baixa resistência mecânica e baixa dureza) até martensite (alta dureza).

Permitindo a formação de precipitados por toda a estrutura, ocorrendo uma dissolução e conseqüente diminuição do tamanho de grão, conferindo um aumento da ductilidade e diminuição das tensões residuais.

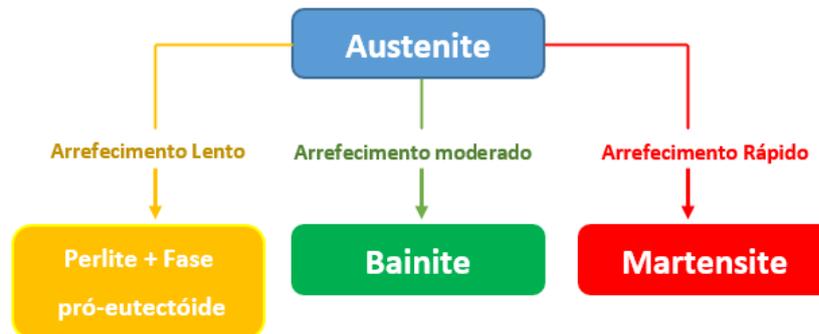


Figura 8 – Diagrama das transformações de fase associadas ao tempo de arrefecimento [5]

2.4.3. ESCOLHA DO TRATAMENTO TÉRMICO LOCALIZADO.

Para uma adequada escolha do tratamento térmico localizado, é necessário seguir os seguintes passos, de acordo com Merklein et al. [12]

- Localizar e restringir as áreas termicamente afetadas, pois estas são zonas críticas no processo de conformação.

- Distribuir uniformemente a temperatura máxima pelas ZTA's; é um passo extremamente importante, uma vez que se pretende a homogeneização da ZTA, caso isto não se verifique será introduzida descontinuidades, provocando falhas no processo de conformação.

- Garantir um perfil de temperatura, é necessário definir com exatidão a velocidade e tempo de tratamento, uma vez que não queremos afetar a área periférica às ZTA's. Por exemplo, um longo período de estágio possui uma boa capacidade de homogeneização, conjugada com a temperatura, no entanto, quando este ultrapassa valores limites, passamos a introduzir alterações na periferia.

2.4.3.1. ATMOSFERA DE AQUECIMENTO

A atmosfera num tratamento térmico é um fator muito importante, pois a oxidação da superfície ou descarbonização pode ocorrer quando esta não é controlada. Obrigando desta forma a necessidade de métodos de limpeza.

2.5. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é considerado um dos ensaios mecânicos mais importantes para a caracterização dos materiais, uma vez que se consegue determinar importantes propriedades, tais como, módulo de elasticidade, tensão de cedência, tensão de rotura, entre outras.

No ensaio dos provetes, regista-se uma curva tensão-deformação através das medições da carga aplicada e a deformação do provete.

A tensão define-se como a resistência de um dado corpo a uma força externa aplicada sobre o mesmo, por unidade de área. A tensão média (σ) é dada pela seguinte expressão.

$$\sigma = \frac{\text{Força de ensaio (F)}}{\text{Área da secção inicial do provete (S}_0\text{)}} \quad (1)$$

A deformação (ϵ) representa a variação dimensional quando o corpo é sujeito a um esforço, determinado pelo quociente entre o deslocamento das amarras do equipamento (ΔL), e o comprimento inicial de referência do provete (L_0).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

A tensão de rotura (σ_R), é representada pelo quociente da força máxima do equipamento de ensaio ($F_{m\acute{a}x.}$) e a área da secção inicial do provete (S_0).

$$\sigma_R = \frac{F_{m\acute{a}x.}}{S_0} \quad (3)$$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão apresentados todos os ensaios realizados para caracterização dos materiais, bem como do seu comportamento mecânico. Como anteriormente referido, tem como objetivo estudar a influencia dos tratamentos térmicos na liga de aço DP 1000, sendo as amostras fornecidas tratadas termicamente via laser e na liga de alumínio AW5754-H111, amostras fornecidas sem tratamento térmico. Para tal, foi realizado um conjunto de ensaios experimentais, apresentados na seguinte tabela

Tabela 1-Equipamentos utilizados e respetivos ensaios realizados

Equipamento	Tipo de ensaios:	Função:	Nº de ensaios
Durómetro Galileo	Ensaio de dureza	-Influência do TT na dureza; -Envelhecimento artificial;	31
Leica DM 2500M'	Microscópio ótico	- Análise metalográfica; -Medição das diagonais das indentações.	31
'EMCOTEST'	Ensaio de microdureza	-Influência do TT na microdureza;	2
Forno	Tratamento térmico de homogeneização	-Alteração das propriedades mecânicas; -Fenómenos de dissolução/precipitação.	15
DSC Q20	Ensaio calorimetria	-Temperatura máxima para o TT;	1
'LM100 Diode Laser'	Tratamento térmico localizado	-Amaciamento das propriedades mecânicas	16
'Instron 25 kN'	Ensaio de tração	-Determinação das propriedades mecânicas dos materiais.	16

Para um maior detalhe, são apresentados os diagramas da realização dos ensaios e caracterização para cada liga e tabelas, identificando o número de ensaios realizados para cada liga (Figura 10 e 11), (Tabela 2 e 3)

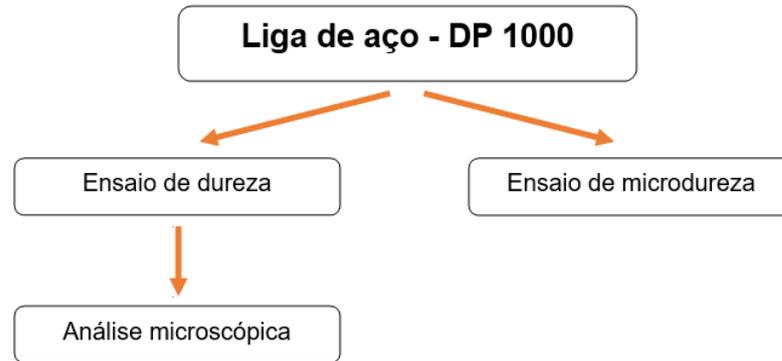


Figura 9 - Procedimento dos ensaios experimentais e caracterização da liga de aço - DP 1000

Tabela 2 - Ensaios realizados para a liga de aço DP 1000

Tipo de ensaios:	Nº de ensaios
Ensaios de dureza	2
Ensaios de microdureza	2
Análise microscópica	2

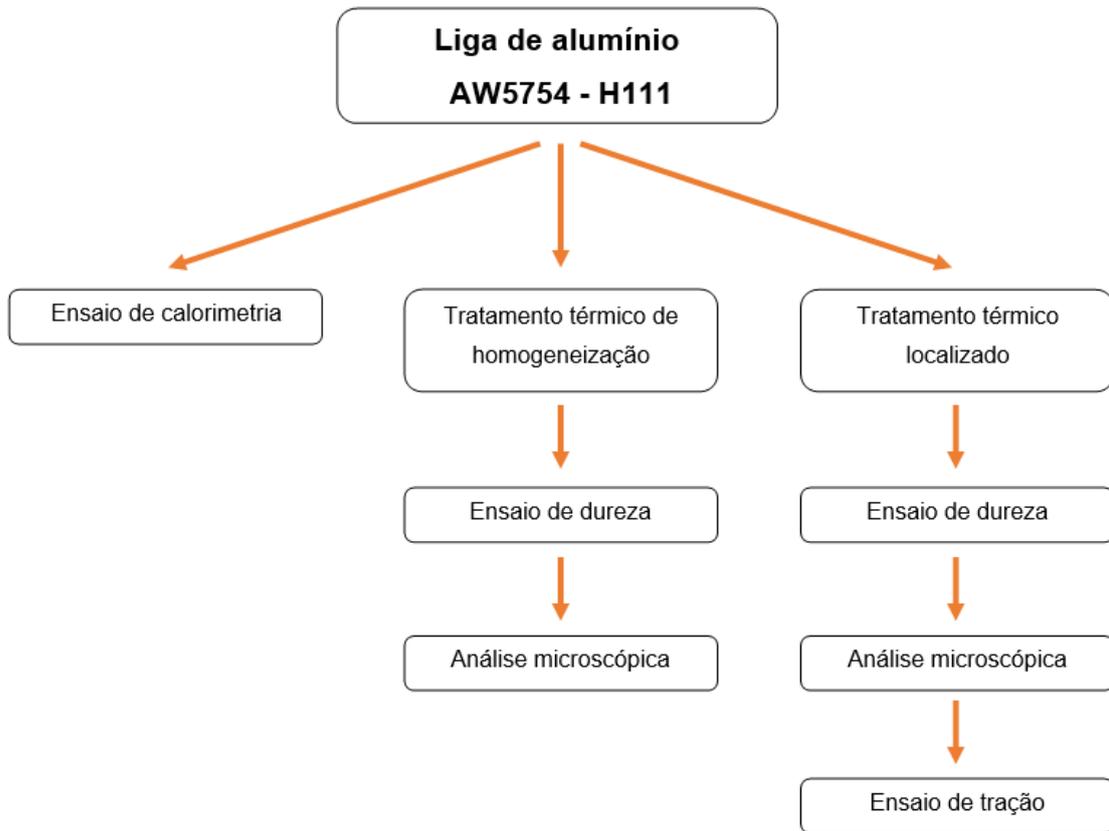


Figura 10 - Procedimento dos ensaios experimentais e caracterização da liga de alumínio - AW5754 - H111

Tabela 3 - Ensaios realizados para a liga de alumínio AW5754 H111

Tipo de ensaios:	Nº de ensaios
Ensaio de calorimetria	1
Tratamento térmico de homogeneização	15
Tratamento térmico localizado	16
Ensaio de dureza	29
Análise microscópica	29
Ensaio de tração	2

3.1. MATERIAIS EM ESTUDO

A escolha do material deve ter subjacente as propriedades e estrutura do material, os processos de produção envolvidos de forma a responder às necessidades requeridas.

O material selecionado deve ser suficientemente dúctil para sofrer o processo de conformação e resistente ao desgaste. Tratando-se de uma aplicação na indústria automóvel, a resistência à corrosão é também um fator relevante, dado que o componente em questão pode estar exposto a ambiente corrosivo.

Como referido anteriormente, o estudo experimental será dedicado, à liga de aço DP 1000 e à liga de alumínio AW5754-H111. Seguidamente, serão caracterizadas as duas ligas.

3.1.1. LIGA DE AÇO DP 1000

Liga de aço DP, pertence ao grupo de aços avançados de alta resistência (AHSS), possui uma microestrutura de fase dupla, constituída por uma matriz ferrítica e martensite.

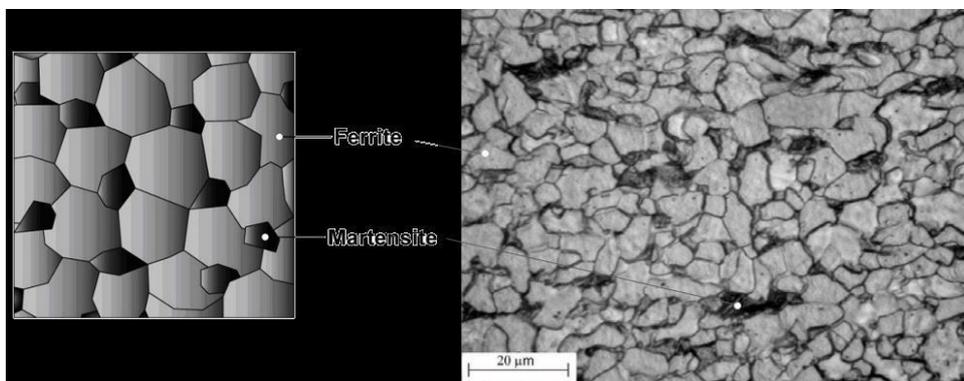


Figura 11-Composição microestrutural [5]

A principal característica dos aços DP consiste na dispersão de fase martensítica, que lhe confere elevada resistência, numa matriz de fase ferrítica que lhe confere ductilidade.

A fração volúmica da fase martensítica, determina a resistência do material. Logo, o aço DP 1000 significa que apresenta uma tensão de rotura aproximadamente de 1000 MPa.

Para obter um aço DP 1000 é necessário utilizar tratamentos térmicos específicos, tais como têmpera e arrefecimento controlado do material, de forma a obter a seguinte composição química.

Tabela 4 - Composição química DP 1000 [17]

EN DP1000	Composição química (wt%)						
Elementos	<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>
wt%	95,79	0,08	2,90	0,62	0,35	0,16	0,10

Tabela 5 - Propriedades mecânicas DP 1000 [17]

	Propriedades mecânicas
Tensão de cedência	800 MPa
Tensão de rotura	1075 MPa
Alongamento A 50mm	10,8%
Dureza Brinell - HB	52

Tabela 6 - Propriedades físicas DP 1000 [17]

	Propriedades físicas
Densidade	7,8 g/cm ³
Módulo de elasticidade	210 GPa
Condutividade térmica	52 W/m.k
Condutividade elétrica	0.010x10 ⁻⁶ Ω.m
Ponto de fusão	1500 °C

O aço DP 1000 devido à sua composição química, apresenta uma tensão de cedência de 800MPa.

3.1.2. LIGA DE ALUMÍNIO AW5754-H111

A liga de alumínio AW 5754 é uma liga da série 5000, constituída essencialmente por elementos de liga principais, alumínio e magnésio, Al-Mg, fabricada de acordo com a norma EN AW 5754 H111, que apresenta boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa capacidade de soldabilidade e de fácil conformação.

A amostra de material foi fornecida pela empresa *Poly Lanema*, e apresenta a seguinte composição química.

Tabela 7 - Composição química AW5754 - H111 [18]

EN 573-3 EN AW-5754	Composição química (wt%)										
Elementos	Mg	Mn+Cr	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Outros elementos	Al
Mínimo	2,60	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	Restante
Máximo	3,60	0,60	0,5	0,40	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10	0,05	

Tabela 8 - Propriedades físicas [18]

EN AW-5754	Propriedades físicas
Densidade	2,67g/cm ³
Módulo de elasticidade	68 GPa
Condutividade térmica	130-140 W/m.k
Condutividade elétrica	0.049x10 ⁻⁶ Ω.m
Ponto de fusão	600 °C

Tabela 9 - Propriedades mecânicas [18]

EN 485-2 EN AW-5754-H111	Propriedades mecânicas
Tensão de cedência	80 MPa
Tensão de rotura	190-240 MPa
Alongamento A 50mm	16%
Dureza Brinell - HB	52

3.2. TRATAMENTO TÉRMICO DE HOMOGENEIZAÇÃO

Para a realização do ensaio de tratamento térmico de homogeneização, recorreu-se a um forno de mufla, que consiste numa câmara de secção retangular, revestida com tijolos refratários. Alimentado eletricamente por resistências incorporadas nas paredes da câmara, tal como podemos observar na figura seguinte.



Figura 12: Forno de Mufla

É um equipamento para tratamento de peças de pequena dimensão e o carregamento e descarregamento é feito manualmente, normalmente é usado em tratamentos térmicos de relaxação de tensões, recozimento, cementação, endurecimento de aços de baixa liga entre outros.

3.2.1. ENSAIO EXPERIMENTAL DE TRATAMENTO TÉRMICO DE HOMOGENEIZAÇÃO

O equipamento utilizado é um forno de mufla, disponibilizado pelo laboratório de metalurgia.



Figura 13: Forno de mufla - Lab. Metalurgia

Neste ensaio, apenas foi analisada a liga de alumínio AW5754-H111, na qual foram ensaiados vários provetes, para uma gama de temperaturas dos 250° até 550°C.

Num primeiro ensaio, foram analisados 14 provetes para 7 temperaturas. Os provetes foram todos introduzidos no forno à temperatura ambiente. O forno foi programado, à potência máxima para atingir a temperatura de 550°C. Conforme a temperatura ia aumentando, era retirado dois provetes a cada patamar de temperatura atingido. Sendo estes arrefecidos ao ar.

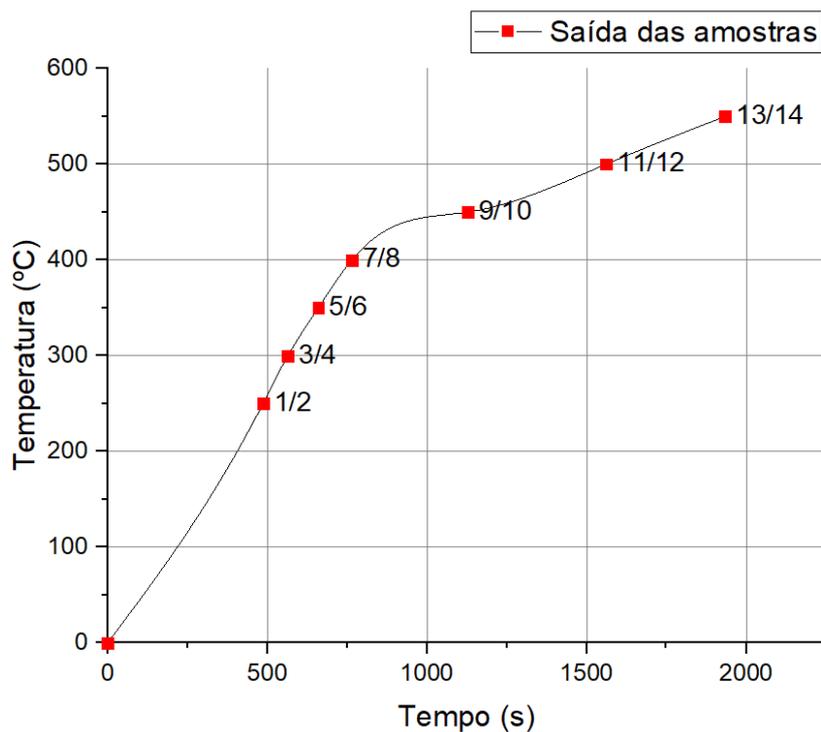


Gráfico 1 - Extração das amostras ao longo do tratamento

Num segundo ensaio, foram analisados também 14 provetes para 7 temperaturas. No entanto, os provetes só eram introduzidos quando o patamar de temperatura era atingido, tendo um provete um estágio de 5 min e um de 10 min.

Tabela 10 - Ensaio 2 - Forno

Amostra	Temp. Máx [°C]	Tempo de espera [min.]
1	250	5
2		10
3	300	5
4		10
5	350	5
6		10
7	400	5
8		10
9	450	5
10		10
11	500	5
12		10
13	550	5
14		10

3.3. TRATAMENTO TÉRMICO LOCALIZADO

Para realização dos ensaios de tratamento térmico localizado, recorreu-se à tecnologia laser, mais concretamente, ao equipamento laser de diodo LM100 disponível na empresa PIEP, pelas razões mencionadas no capítulo [2.4.1.1.](#)

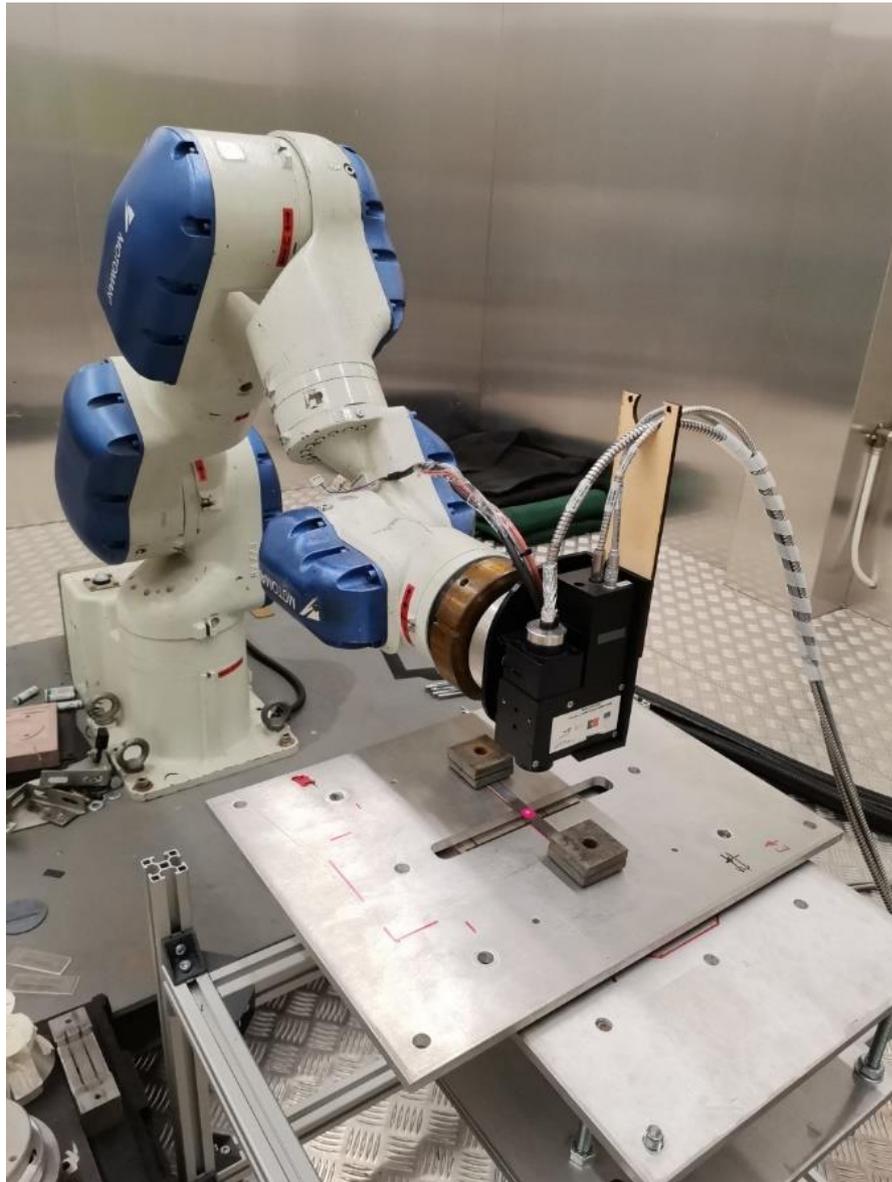


Figura 14: Laser de diodo LM100

Na tabela seguinte, são apresentadas as especificações técnicas do equipamento.

Tabela 11: Especificações técnicas do equipamento de tratamento térmico localizado.

Marca do equipamento	LM100 Diode Laser de uso manual
Tipo de laser	Laser de díodo de fibra acoplada
Potência do laser	500 W máx.
Saída ótica	100 W cw
Comprimento de onda	940 +/- 10 nm (a 25°C)
Comprimento de onda laser	800 nm até 1000 nm
Comprimento de onda pirômetro	1600 nm até 2100 nm
Diâmetro fibra	600 µm
Comprimento fibra	5 mm
Controlo do 'output'	Analógico 0 até 10V (corresponde de 0 a 100% da corrente de díodo)
Tempo de atuação	300 ms
Sistema de arrefecimento	Sistema de arrefecimento de ar passivo interno
Frequência da rede	50/60 Hz
Dimensões cabeça de laser com pirômetro	133mm x 90mm x 45mm
Diâmetro do feixe de abertura	23 mm máx.

3.3.1. ENSAIO EXPERIMENTAL DE TRATAMENTO TÉRMICO LOCALIZADO

Este ensaio experimental, apenas foi realizado para estudo da liga de alumínio AW 5754-H111, no qual foram utilizados provetes conforme Figura 21 e anexo A.

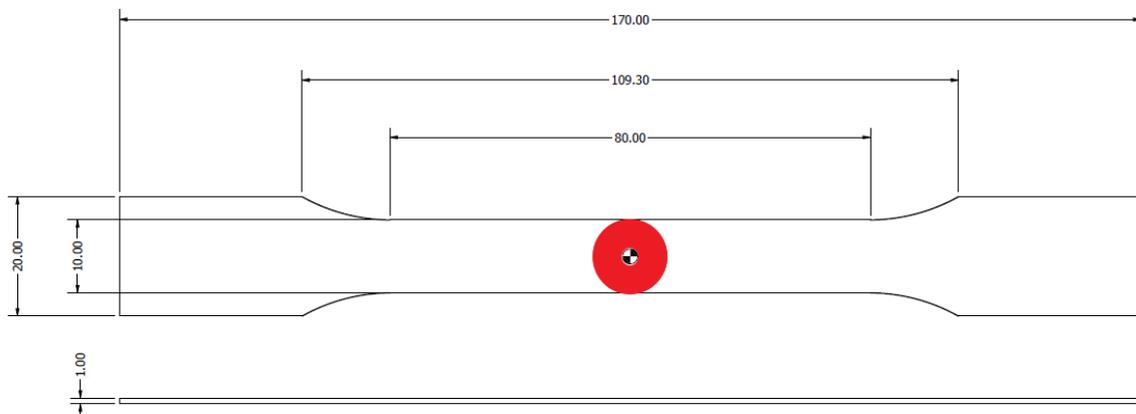


Figura 15 - Localização de incidência laser no provete

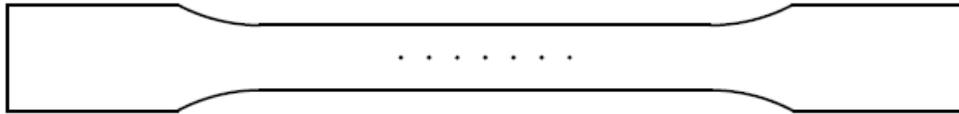


Figura 16 - Pontos de medição de dureza



Figura 17: Provetes TTL AW5754-H111

Os provetes foram revestidos através do processo de pintura com 'Graphit 33', esta etapa torna-se fundamental nomeadamente para as ligas de alumínio, uma vez que estas apresentam elevado índice de refletividade, desta forma torna-se mais eficiente o tratamento térmico laser.

Para um adequado ensaio, foram também realizados cinco ensaios teste de forma a ajustar os parâmetros a ser utilizados nos ensaios finais, tais como diâmetro do feixe de abertura, velocidade do feixe laser, emissividade e temperaturas. Para atingir as várias temperaturas desejadas, foi necessário ajustar a emissividade do material, isto é, a capacidade de emissão de energia por radiação, na qual segundo Gustav Kirchhoff traduz que é igual à capacidade de absorção de energia. O controlo da temperatura máxima e sua

homogeneização é realizado por um pirômetro, dispositivo de medição de temperatura, através da diferença do valor de referência e a energia emitida pelos corpos.

Na figura seguinte, é apresentado a fixação dos provetes para realização do ensaio.

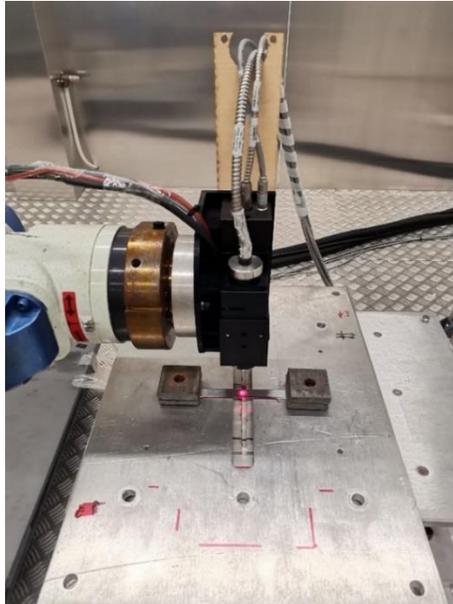


Figura 18: Fixação dos provetes no LM1000

Na seguinte tabela, são apresentadas as amostras em estudo com os parâmetros correspondentes.

Tabela 12 - Ensaio tratamento laser

Amostra	Temperatura [°C]	Emissividade	Pulsos [ms]
1	250	0,4	100
2		0,4	100
3	300	0,3	100
4		0,3	100
5	350	0,21	100
6		0,21	100
7	400	0,20	100
8		0,15	100
9	430	0,1	200
10		0,1	200
11	400	0,1	200
12	450	0,1	200
13		0,1	200

Para realização do ensaio, os provetes são fixados na mesa de trabalho, como anteriormente referido, no qual o feixe laser com um diâmetro de 10mm vai incidir, e quando a temperatura máxima desejada for atingida o laser é desligado manualmente.

Como controlador da temperatura, o equipamento possui um pirómetro de cor acoplado à saída ótica. Desta forma o controlo é feito através da medição e controlo da temperatura máxima na zona em que o feixe de laser incide.

Para redução dos custos dos ensaios, optou-se por reduzir a área termicamente afetada, na qual apenas se fez incidência no centro geométrico do provete, com o diâmetro de feixe de 10mm.

Desta forma, o estudo tornou-se limitativo, uma vez que apenas foi possível estudar a temperatura máxima, numa gama de temperaturas de 250 a 450°C.

3.4. ENSAIO DE DSC

A análise de calorimetria DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), é uma técnica de análise térmica, capaz de estudar os mecanismos de transformação de fase, mais concretamente o processo de precipitação dos elementos de liga.

O ensaio resume-se, na análise da diferença de energia fornecida a um material de referência e ao material em estudo. Estes, são submetidos a uma taxa de aquecimento pré-definida e o equipamento 'DSC Q20' mede o fluxo de calor. Se a amostra em estudo sofrer alguma transformação, esta irá libertar ou absorver calor. O registo gráfico da análise é expresso em temperatura/ fluxo de calor ou tempo/fluxo de calor. Quando ocorre uma reação exotérmica, significa que estamos perante a formação de precipitados e a cada reação endotérmica ocorre solubilização.

Desta forma, relacionando os fenómenos de dissolução e precipitação consegue-se determinar a gama de temperaturas a aplicar no tratamento térmico laser.



Figura 19 - Equipamento 'DSC Q20'

3.5. ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza Vickers, foi realizado no Laboratório de Materiais num durómetro 'Galileo', tendo como finalidade verificar a dureza do material.

Este ensaio consiste no cálculo da dimensão da diagonal da indentação da amostra, através de um indentador de diamante em forma de pirâmide quadrangular. (Figura 13)

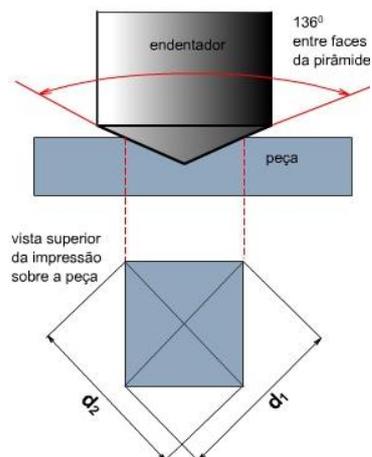


Figura 20 - Impressão do indentador Vickers

Utilizando a seguinte expressão, determina-se a dureza Vickers:

$$HV = \frac{1,8544 \times F}{d_m^2} \quad (4)$$

Para determinar uma média de valores de dureza, foram realizadas um mínimo de 5 indentações e em ambas superfícies. Foi utilizado uma carga de 60kgf para a liga de aço DP1000 e 30kgf para a liga de alumínio AW5754-H111. A carga aplicada sobre da superfície, teve uma duração de 20s de forma a garantir a total indentação.



Figura 21 - Ensaio de dureza-Liga de aço DP1000



Figura 22 - Ensaio de dureza-Liga de alumínio AW5754-H111

3.6. ENSAIO DE MICRODUREZA

O ensaio de microdureza teve como intuito medir a dureza da liga de aço DP1000 ao longo da espessura de chapa, de forma a avaliar a capacidade de homogeneização de temperatura

Para determinar a microdureza recorreu-se ao equipamento (DuroScan G5- EMCO-TEST). Utilizado para peças pequenas, com carga reduzida e calculo automático das diagonais da indentação.



Figura 23: DuroScan -EMCO-TEST

3.6.1. ENSAIO EXPERIMENTAL DE MICRODUREZA

Para realizar o ensaio de microdureza foi necessário preparar previamente as amostras, isto é, cortar a amostra, fixá-las numa base de resina polimérica e posteriormente desbaste de polimento. Esta é uma etapa fulcral para obtenção de uma superfície plana, espelhada e isenta de riscos. O desbaste grosseiro pode ser realizado com torno ou lixa de cinta, no entanto, é necessário ter um meio de arrefecimento, pois ao introduzir aquecimento estamos a danificar a amostra.

Na etapa de polimento em meio húmido, são utilizadas lixas número 80, 220, 600, 800 e 1200, função da granulometria do abrasivo de cada lixa. Em todas as mudanças de lixa é necessário rodar a amostra 90°, garantindo a eliminação dos sulcos provocados pela lixa anterior.

Por fim, realiza-se um polimento mecânico recorrendo a pasta de diamante, alumina em suspensão aquosa ou a outros óxidos em suspensão.

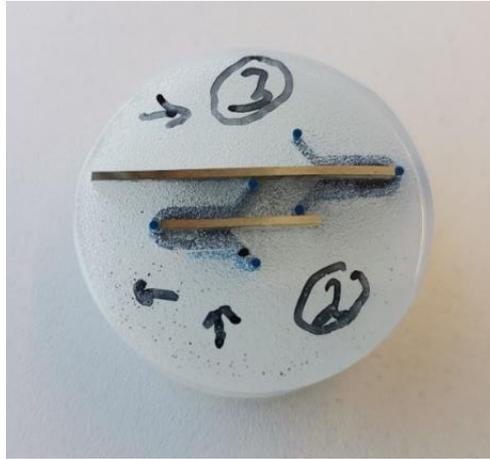


Figura 24 - Amostra em base de resina

Para cada amostra, foi definida 3 linhas de análise, a superfície de tratamento, centro e superfície inferior, na qual foram feitas 11 indentações com espaçamento de 15 μ m.

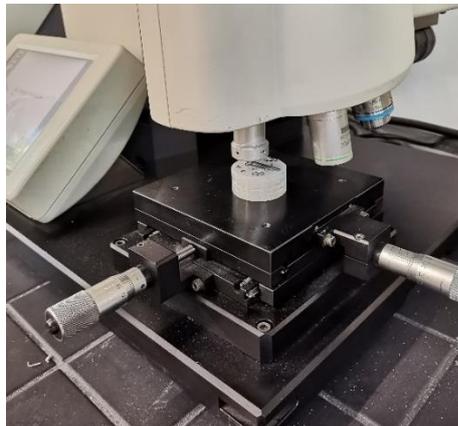


Figura 25 - Ensaio microdureza

3.7. ENSAIO EXPERIMENTAL DE TRAÇÃO

A realização do ensaio de tração, teve como base a norma EN 10 002-1. Utilizando provetes de dimensões e formas padronizadas, de forma que os resultados sejam comparados e reproduzíveis. Este ensaio, apenas foi realizado para a liga AW5754- H111.

O equipamento utilizado, foi uma máquina universal de testes de tração da marca 'Instron', do Laboratório de ensaios de materiais Os provetes são fixados às garras do equipamento, que aplica esforços axiais, sendo medido o deslocamento e as correspondentes deformações do material. A força aplicada de 25 kN, sendo o provete levado até à rotura.



Figura 26 - Máquina universal de ensaios tração/ compressão 'Instron'

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos diversos ensaios experimentais realizados. Como referido nos capítulos anteriores, a variável de maior relevância para o tratamento térmico localizado é a temperatura máxima e homogeneização na zona termicamente afetada. Desta forma, este capítulo pretende retirar todas as ilações em função das variáveis: avaliando a influencia das diferentes temperaturas máximas na microestrutura e consequentes modificações nas propriedades mecânicas dos materiais.

4.1. ENSAIO DE DUREZA- LIGA DE AÇO DP 1000

Para a liga de aço DP 1000, foram realizados dois ensaios de dureza Vickers. As amostras fornecidas, possuem tratamento térmico e um diâmetro de 80 mm, sendo que a “Amostra 2” apresenta um tratamento com temperatura máxima de 600°C e um diâmetro de feixe laser de 20mm. No entanto, a “Amostra 3” a temperatura máxima é de 800°C e um diâmetro de feixe de laser de 30mm. Tal como representado nas figuras seguintes.

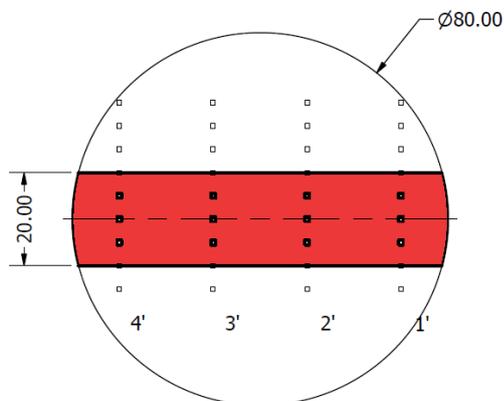


Figura 27- DP 1000 - Amostra 2

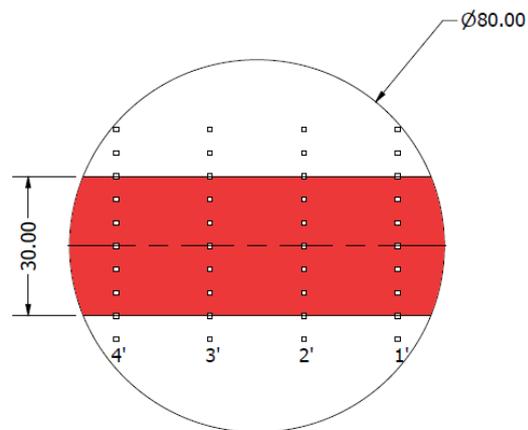


Figura 28 -DP 1000 - Amostra 3

O feixe de laser apenas incidiu numa das superfícies da amostra, de forma a diferenciar as mesmas, foi utilizada a nomenclatura (SL) superfície de incidência de laser e (SNL) superfície de não incidência de laser.

Para um estudo detalhado, foram realizadas indentações ao longo da amostra e em ambas as superfícies, superfície de incidência de laser (SL) e superfície de não incidência laser (SNL). Nas Figuras 28 e 29, pode-se observar a escala utilizada para a realização das indentações, sendo que estas foram realizadas com um espaçamento de 5mm e o valor “0” corresponde ao centro de incidência do laser.

Nos gráficos seguintes são apresentados os resultados obtidos:

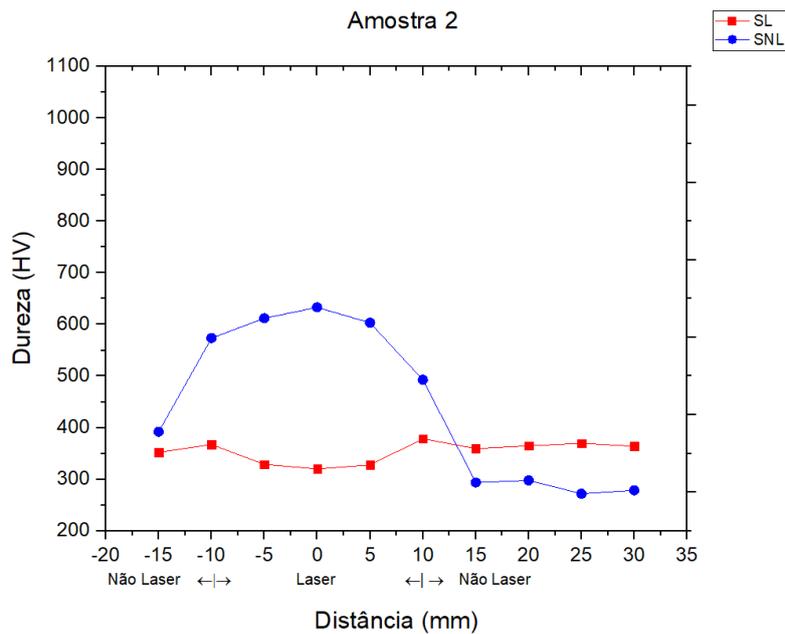


Gráfico 2 - DP 1000 - Amostra 2

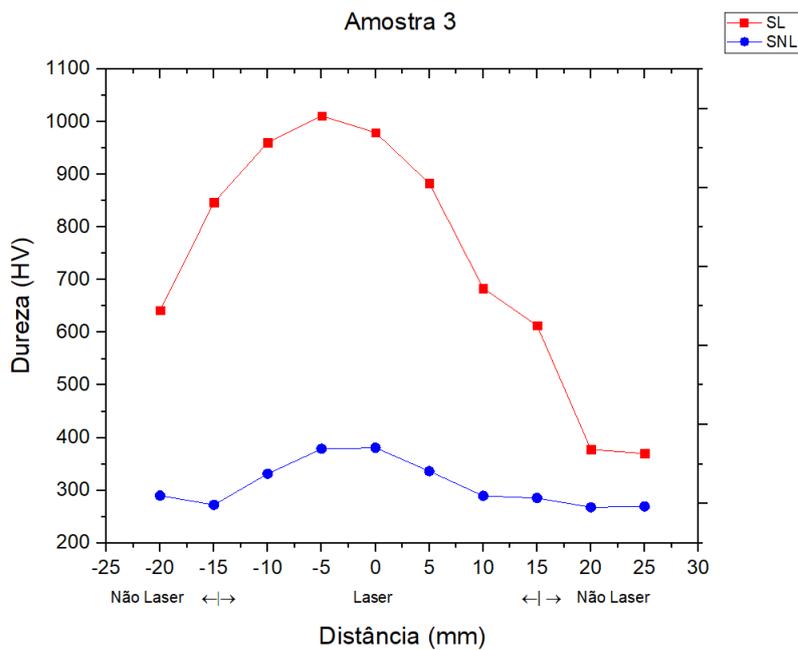


Gráfico 3 - DP 1000 - Amostra 3

Na “Amostra 2”, foi verificada uma pequena diminuição da dureza na superfície de incidência do laser (SL) e um aumento elevado de dureza na superfície (SNL). Já na “Amostra 3” foi verificado um aumento de dureza em ambas as superfícies, mais explícita na superfície (SNL). Assim, pode-se considerar que não tenha ocorrido homogeneização do material na zona termicamente afetada.

De forma a aprofundar o estudo do aço DP 1000 e, uma vez que estes resultados não foram satisfatórios segundo a bibliografia, procedeu-se à realização dos ensaios de microdureza.

4.2. ENSAIO MICRODUREZA DP 1000

Os ensaios de microdureza, têm como objetivo verificar o amaciamento do material resultante do tratamento térmico, bem como analisar a homogeneização do material ao longo da espessura das amostras. Para tal, foi retirada uma amostra da espessura de chapa para realização do ensaio. Esquema representativo das microindentações realizadas.

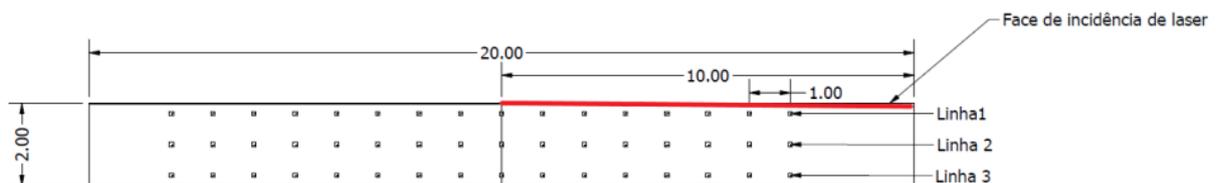


Figura 30 - Esquema - Ensaio microdureza – Amostra 2

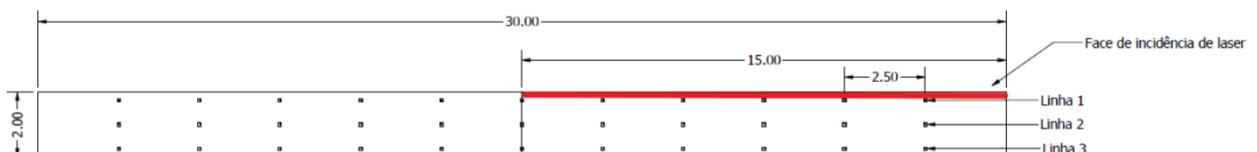


Figura 29- Esquema - Ensaio microdureza - Amostra 3

Nos gráficos seguintes são apresentados os resultados obtidos:

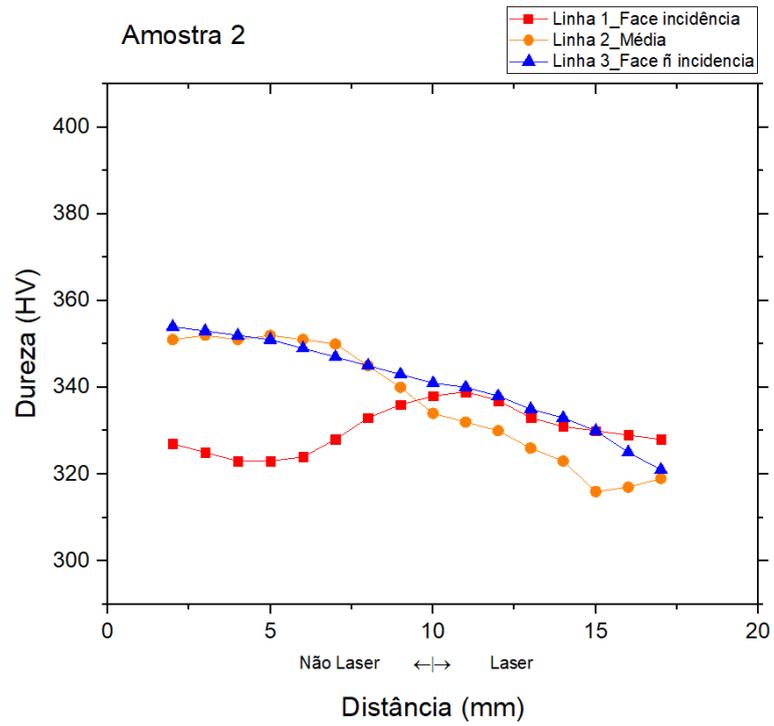


Gráfico 4 - Microdureza - Amostra 2

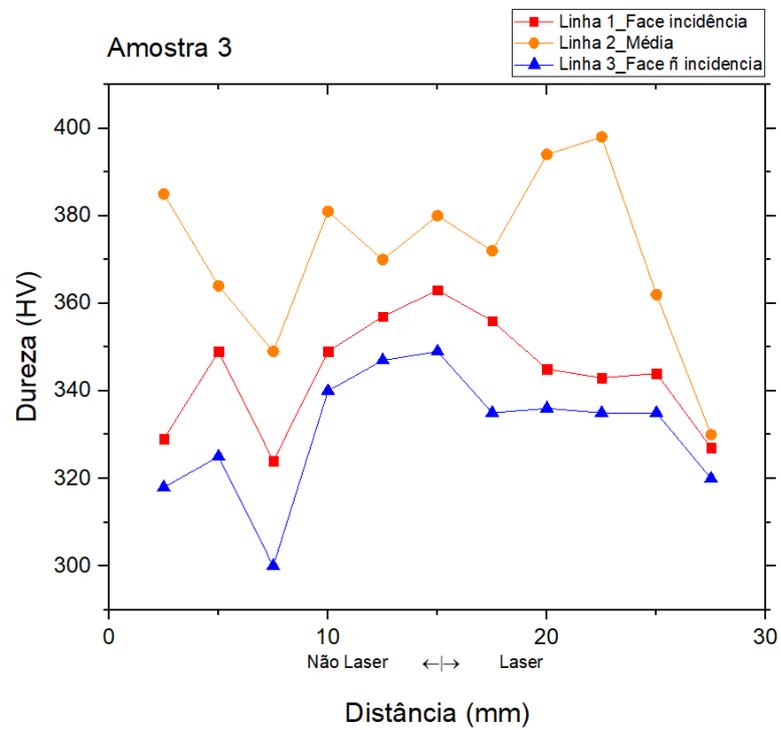


Gráfico 5 - Microdureza - Amostra 3

Na amostra 2, verifica-se um amaciamento na parte central de incidência do laser, valores coincidentes ao ensaio de dureza anteriormente realizado. Referente à homogeneização do material ao longo da espessura, esta é notável, uma vez que as três linhas em análise acompanham o decréscimo de dureza..

Na amostra 3, verifica-se um aumento de dureza na zona de incidência do laser e não ocorreu homogeneização do material.

Desta forma, o ensaio de microdureza reforça os valores obtidos nos ensaios de dureza anteriormente realizados.

4.3. ENSAIO DE DUREZA LIGA AW5754-H111

4.3.1. ASSOCIADA AO TRATAMENTO TÉRMICO FORNO

Para uma análise adequada da gama de temperaturas realizou-se um tratamento térmico no forno tal como descrito em 3.3.1

Os resultados obtidos são os seguintes:

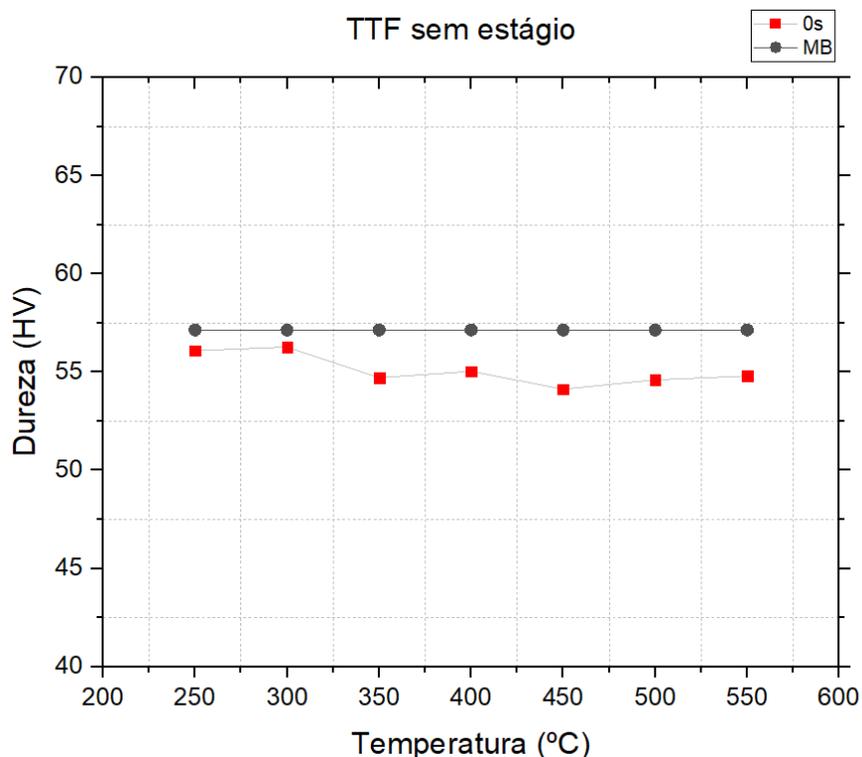


Gráfico 6 - Dureza TTF sem estágio

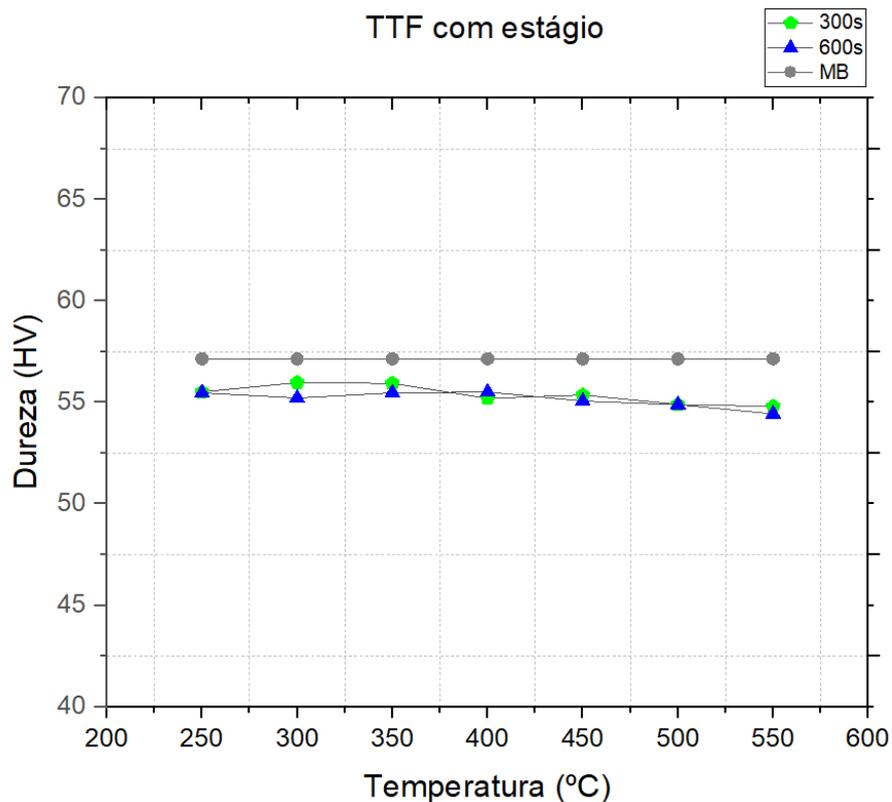


Gráfico 7 - Dureza TTF com estágio

Com este ensaio, constatou-se que o tempo de estágio não é vantajoso, pois este só aumenta o tempo de realização de ensaio e não se verificou melhorias na obtenção de resultados. Também, as temperaturas afetam muito pouco o amaciamento do material, tornando os resultados muito aproximados. Desta forma, foi possível reduzir o tempo de ensaio, bem como a gama de temperaturas posteriormente utilizadas no tratamento térmico laser, e conseqüentemente diminuído o custo de ensaio. A diminuição de dureza, não é representativa, no entanto temos de ter noção que estamos a analisar um material com uma dureza muito baixa resultante da percentagem reduzida de elementos de liga.

4.3.2. ASSOCIADO AO TRATAMENTO TÉRMICO LASER

Após o tratamento térmico localizado via laser, foram realizados ensaios de dureza aos provetes de forma a avaliar o amaciamento do material.

Uma vez que o amaciamento do material não é estável, a realização do ensaio de dureza foi realizada o mais rápido possível, no máximo 3 horas, de forma a não ser expresso envelhecimento ativo.

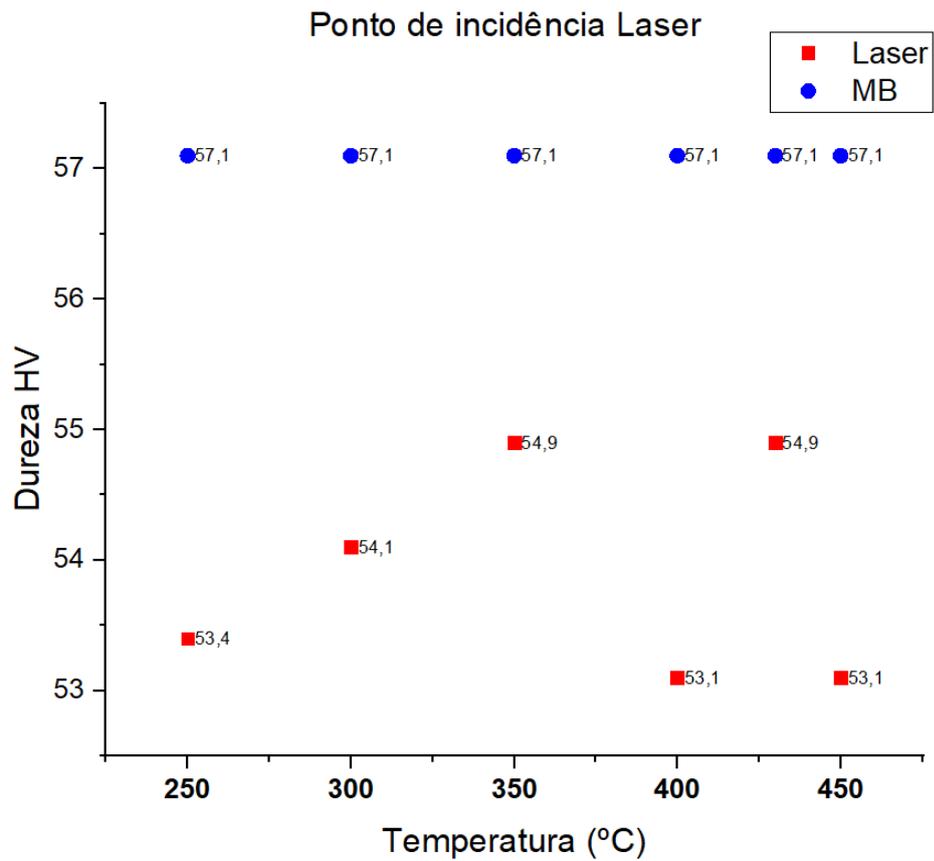


Gráfico 8 - Dureza Tratamento Laser

Pela análise do Gráfico 8, pode-se constatar que ocorreu amaciamento na zona termicamente afetada, esta não é muito significativa, mas como anteriormente foi referido estamos perante um material com baixa dureza. Também se pode concluir que as temperaturas utilizadas não fazem variar os resultados de dureza.

4.4. ENSAIO DSC - LIGA AW5754-H111

Com a análise de calorimetria DSC e após tratamento de dados, foi possível gerar o Gráfico 7, no qual se obteve a curva de fluxo de calor DSC para a liga de alumínio.

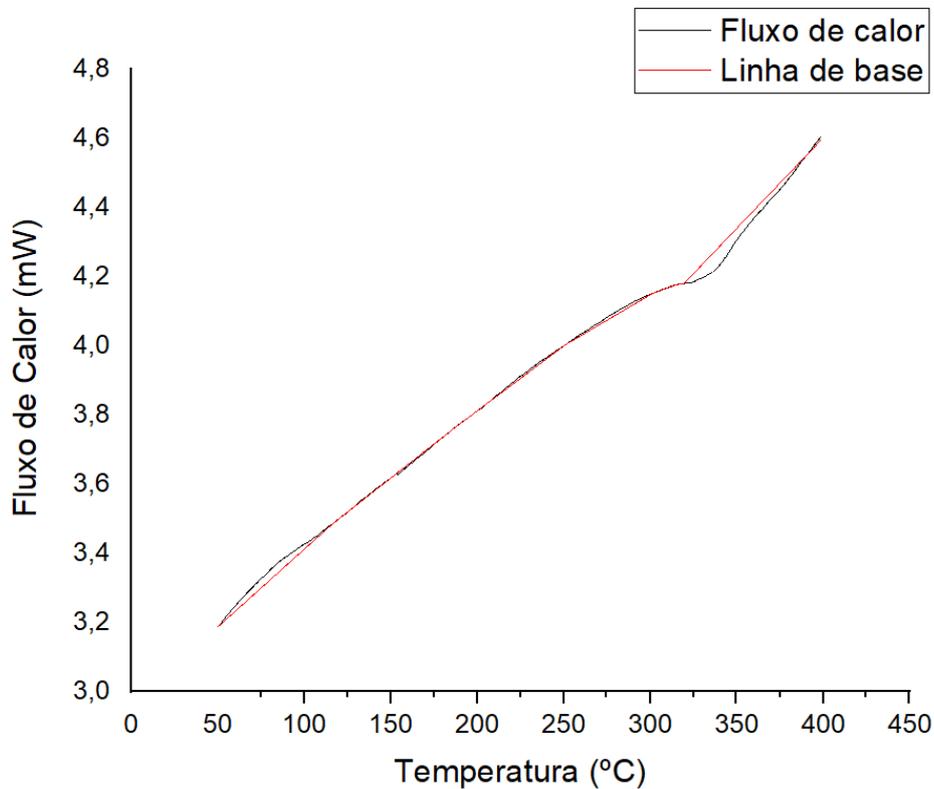


Gráfico 9 – Tratamento de dados de obtenção da curva de fluxo de calor DSC - Liga de alumínio AW 5754 H111

Pela análise da curva de fluxo de calor da linha de base apresentada no Gráfico 9, verifica-se que a linha de fluxo de calor da amostra em estudo não apresenta desvios relevantes.

Posteriormente, foi possível analisar a curva de calor específico em função da temperatura, determinando as temperaturas de início e término das transformações químicas, reações exotérmicas e endotérmicas. Isto é, reações de dissolução e precipitação dos elementos de liga através da variação do calor específico.

Para calcular o calor específico, foi utilizada a seguinte expressão:

$$C_p [J(g.K)^{-1}] = \frac{Q_{amostra} - Q_{linha\ base}}{m.\beta} \quad (5)$$

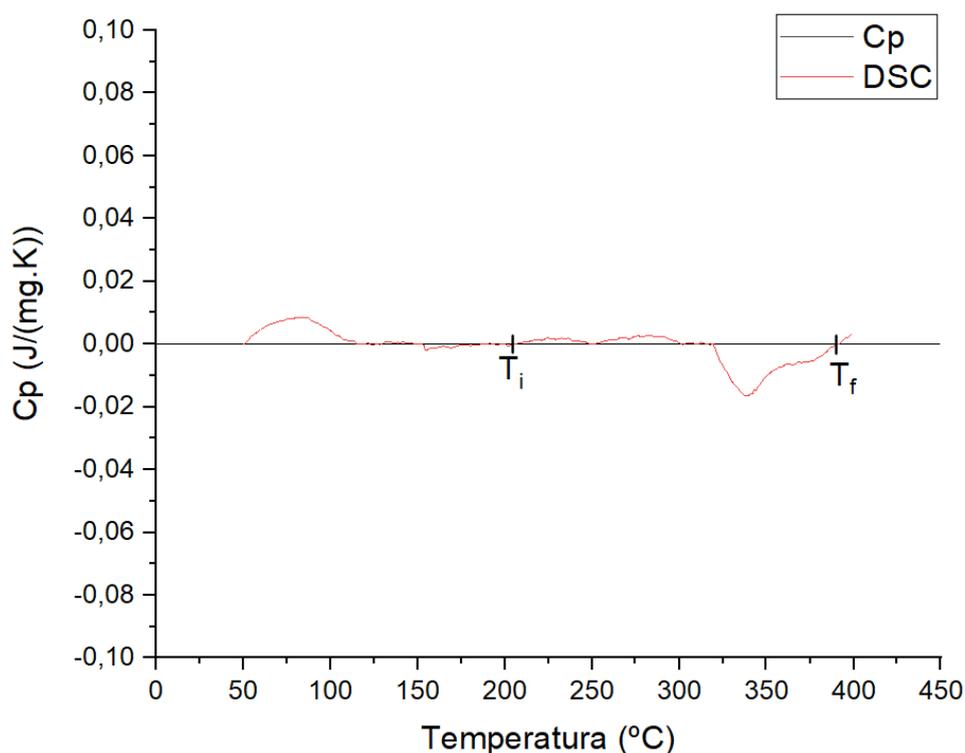


Gráfico 10 – Reações químicas- AW 5754 H111

Com a análise da curva de calor específico em função da temperatura, foi possível determinar as reações químicas presentes na transformação. Analisando as variações obtida, verifica-se dois picos exotérmicos e um pico endotérmico. Assim, a análise de calorimetria de ligas endurecidas, a precipitação de partículas corresponde a reações exotérmicas, isto é liberação de energia com a formação dos precipitados. Enquanto a solubilização de partículas corresponde a reações endotérmicas utilizando energia do sistema.

Desta forma, pode se concluir que ocorreram reações térmicas, no entanto estas são insignificantes uma vez que a percentagem de elementos de liga é muito reduzida e são estes que provocam as reações químicas.

4.5. RESULTADOS ENSAIO DE TRAÇÃO

Com a realização do ensaio de tração é possível caracterizar o material, através de determinadas propriedades mecânicas, tais como: tensão de cedência, tensão de rotura e alongamento. Desta forma, é possível relacionar temperatura máxima do tratamento térmico e comportamento mecânico.

Na imagem seguinte, podemos verificar visualmente os resultados do ensaio de tração:

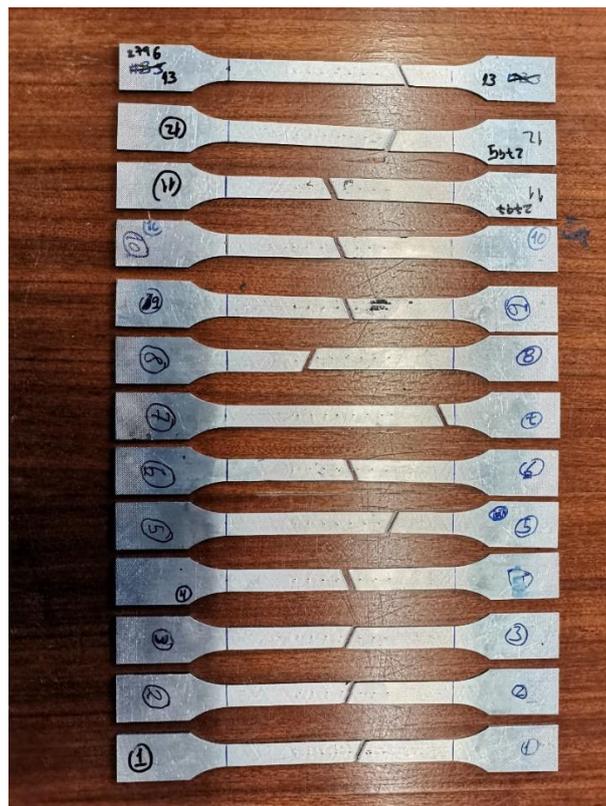


Figura 31 - Resultado do ensaio de tração

Pode-se verificar que os provetes 1 e 2 à temperatura de 250°C, 3 e 4 à temperatura de 300°C, 9 e 10 à temperatura de 430°C e 11 à temperatura de 400°C apresentam uma repetibilidade de fratura, que coincide com o centro de incidência do laser. Os restantes provetes apresentam fratura na zona útil, no entanto fora da zona termicamente afetada.

Após tratamento de dados, foi possível obter as curvas tensão- deformação que são apresentadas no gráfico seguinte. No qual é possível determinar a tensão de cedência e de rotura.

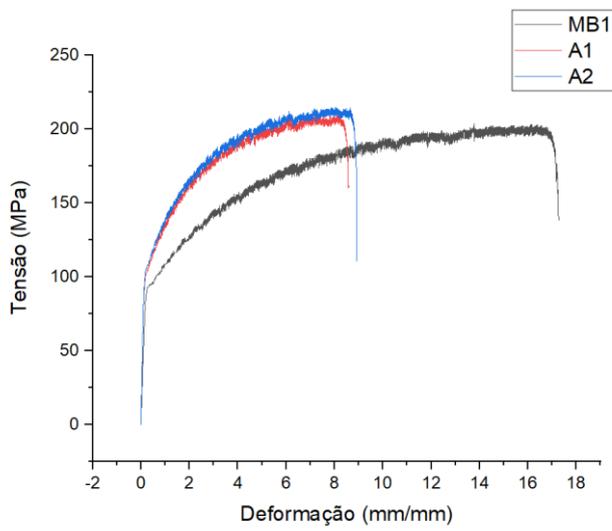


Gráfico 11- Tensão-Deformação - Provetes 250°C

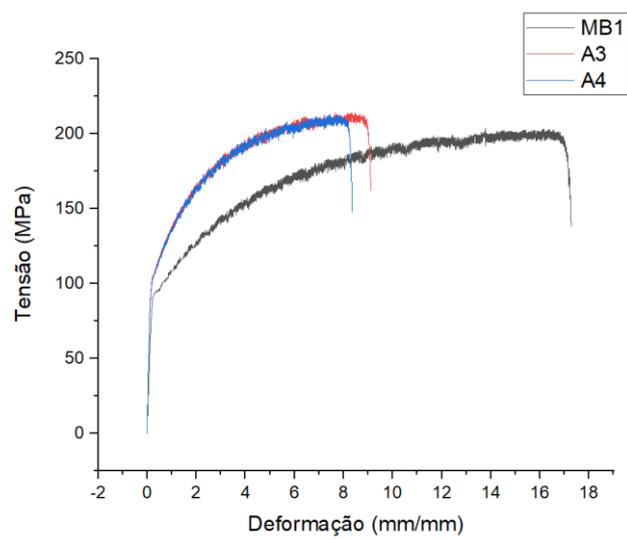


Gráfico 12- Tensão-Deformação - Provetes 300°C

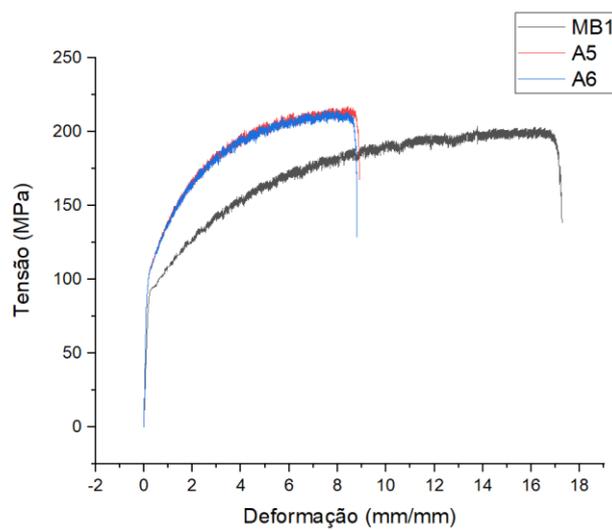


Gráfico 14- Tensão-Deformação - Provetes 350°C

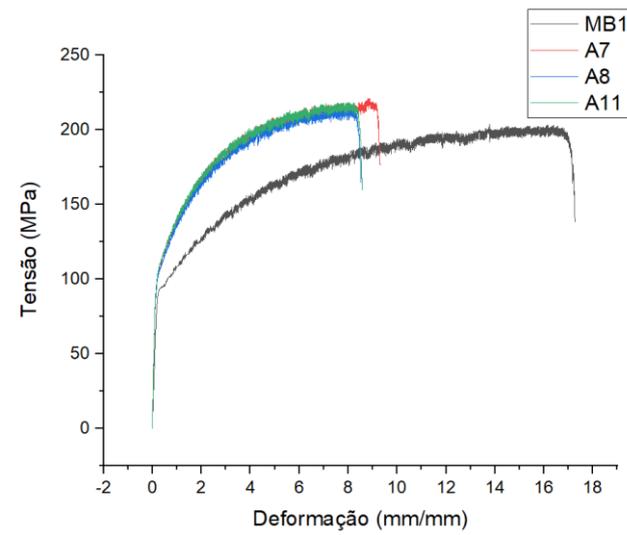


Gráfico 13- Tensão-Deformação - Provetes 400°C

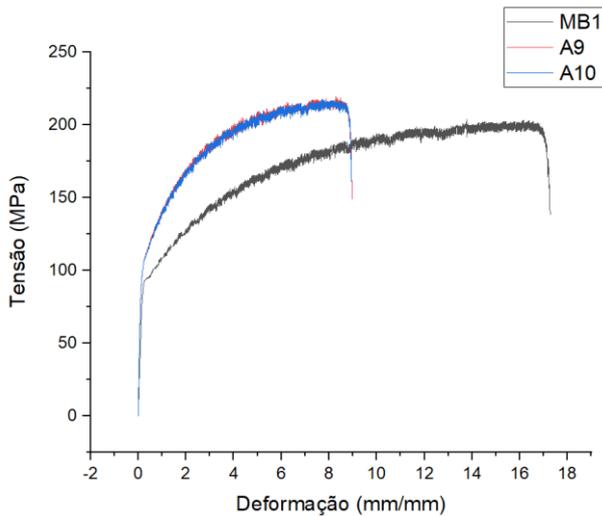


Gráfico 16- Tensão-Deformação - Provetes 430°C

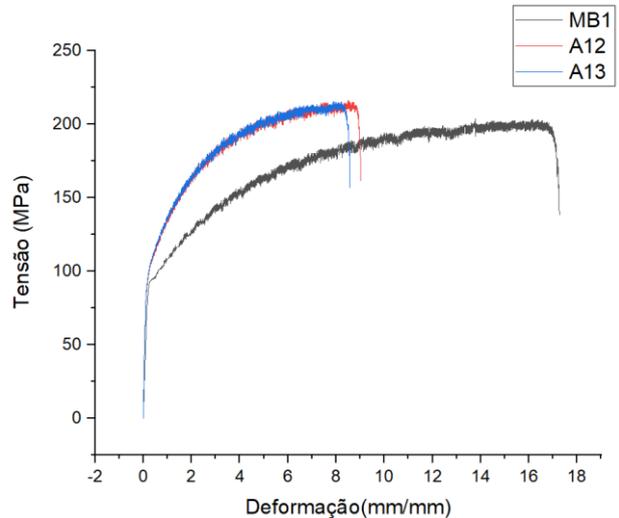


Gráfico 15- Tensão-Deformação - Provetes 450°C

Tal como descrito na Tabela 12, os provetes foram ensaiados para uma gama de temperatura de 250 a 450°C.

Os Gráficos 11, 12, 13, 14, 15 e 16 apresentam as curvas tensão – deformação de engenharia, demonstrando a correlação entre a temperatura de aquecimento e as propriedades mecânicas resultantes.

Estes resultados apresentam uma repetibilidade para as diferentes temperaturas em análise. Também se verifica um aumento da tensão de cedência em relação ao material de base, e uma redução drástica da deformação, concluindo-se que ocorreu um aumento de dureza.

Também se verificou visualmente e graficamente que a liga de alumínio AW5754 H111 apresenta o efeito *“Portevin-Le Chatelier”*, que está diretamente associado à deformação heterogênea da liga, resultante da conjugação de um efeito mecânico e um efeito metalúrgico. O efeito manifesta-se como um comportamento serrilhado nas curvas de tensão-deformação. Relacionados com as interações discordância-soluto e discordância-discordância (Hull; Bacon, 2011).[\[13\]](#)

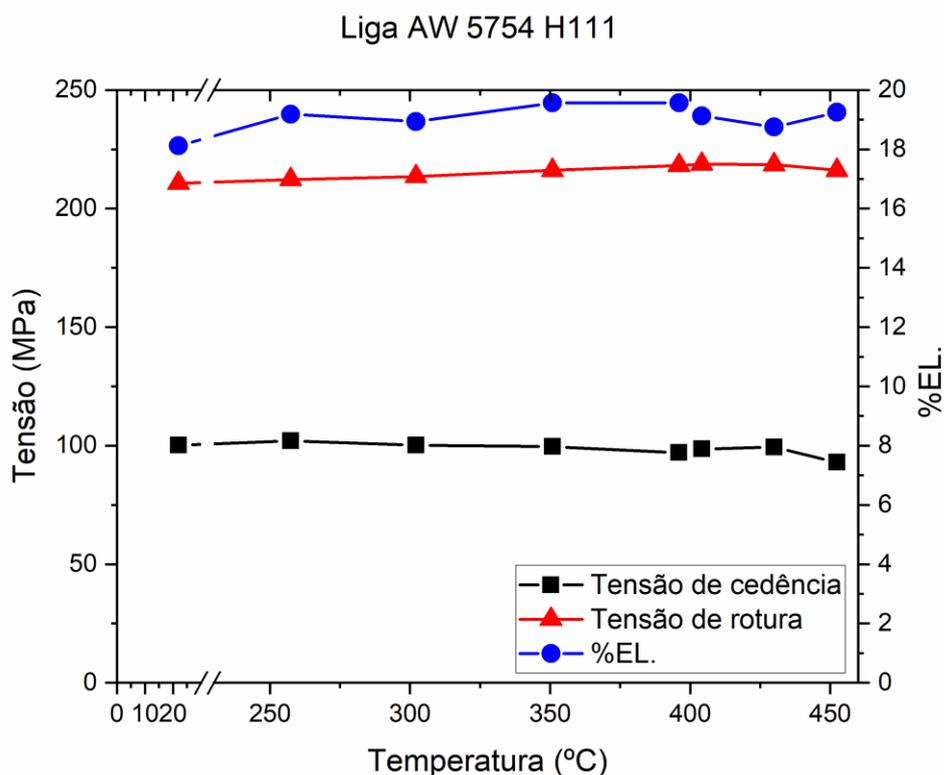


Gráfico 17 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW5754 H111 em função da temperatura máxima de tratamento térmico localizado via laser

Relativamente ao Gráfico 1, apresenta as curvas de tensão consoante a temperatura máxima utilizada. De acordo com os resultados apresentados, o tratamento térmico não foi eficiente no aumento da ductilidade.

4.6. AVALIAÇÃO GLOBAL DE RESULTADOS

Conclui-se a partir dos resultados obtidos para o aço DP 1000 a não correspondência da literatura revista. Os resultados de microdureza vão de encontro aos obtidos nos ensaios de dureza, demonstrando que o tratamento térmico não aumentou a ductilidade do material.

Na análise de resultado relativamente à liga de alumínio AW5754 H111, estes também não apresentam amaciamento significativo para que este material seja tratado termicamente. No entanto, os valores são realistas de acordo com a literatura revista. Esta liga pertence à série 5 e a qual é sempre referida como liga não tratável termicamente.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação, com a realização de todos os ensaios experimentais enunciados, demonstrou a importância dos mesmos na caracterização das ligas em estudo, determinando as propriedades mecânicas e químicas, avaliando assim a sua aplicabilidade em processos produtivos.

A liga de aço DP 1000 nesta dissertação, foi avaliada a nível de dureza e microdureza para duas amostras com tratamento laser de varrimento, no qual apresentam resultados contrários aos esperados. Verificou-se apenas uma ligeira diminuição da dureza na amostra 2, com um tratamento térmico laser a uma temperatura de 600 °C. Relativamente a amostra 3 ocorreu um elevado aumento de dureza. Concluindo-se assim, que o tratamento laser foi ineficaz no processo de tratamento térmico, uma vez que ocorreu um endurecimento das amostras, torna-se prejudicial ao processo de conformação. De referir também, que não foi possível acompanhar o processo de tratamento. Logo, poderão ter sido introduzidos inúmeros fatores de erro.

Relativamente à liga de alumínio AW 5754 H111, com a análise de calorimetria DSC, verificou-se que não existem mudanças na microestrutura. De mais, os restantes ensaios validaram o esperado, uma vez que estamos perante uma liga da série 5 referenciada na bibliografia por ser uma liga não tratável termicamente. Logo, esta liga não é aconselhável para tratamento térmico.

Em relação ao tratamento térmico laser, o estudo apenas foi realizado localmente, uma vez que os recursos são limitados, inviabilizando o estudo mais aprofundado da liga AW5754 H111.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como qualquer outra investigação, esta dissertação apresenta limitações que futuramente possam ser colmatadas por novos estudos, desta forma torna-se pertinente enunciar as mesmas.

No que diz respeito às limitações de execução, passa pela dificuldade financeira para realização dos tratamentos térmicos laser.

Como desenvolvimentos futuros, relativamente à liga de aço DP 1000, através do tratamento térmico laser, realizar novos ensaios com um controlo rigoroso e um curto espaço de tempo entre os mesmos, de forma a obter dados conforme bibliografia.

Relativamente à liga de alumínio, aumentar o estudo a novas ligas da série 5, bem como estudar possível substituição da série de alumínio para a mesma aplicação. De forma, a obter um amaciamento da resistência e um aumento da ductilidade do material.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] “ICCT’s coments and technical recommendations on future euro 7/ VII emission standasds”, mai. 2021 <https://theicct.org/sites/default/files/eu-commission-euro-7-and-vi-may2021.pdf> (Accessed: 6 April 2022).
- [2] R. Pereira, “*Modificação funcional de materiais e componentes metálicos por tratamento térmico localizado*”, Escola de Engenharia, UM, Guimarães, Portugal, dez. 2021
- [3] ACEA (2018) Vehicle sales mirror economic growth (2006-2019 trend) / ACEA – European Automobile Manufacturer’s Association Available at: <https://www.acea.be/statistics/article/vehicle-sales-mirror-economic-growth-2006-2019-trend> (Accessed: 6 April 2022).
- [4] DGAE “A Indústria Automóvel em Portugal” <https://www.dgae.gov.pt/comunicacao/destaques/cadernos-setoriais-o-setor-automovel-em-portugal-2010-2020.aspx> (Accessed: 15 April 2022).
- [5] CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Ed 5. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- [6] J. Lamas “*Industrialização de novos projetos e implementação da área de pré-série*” U.Aveiro, DEGEIT, 2017 (Accessed: 17 April 2022).
- [7] A Schaun, “*O que é carroceria com deformação programada*” <https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2019/09/o-que-e-carroceria-com-deformacao-programada.ghtml> Accessed: 25 April 2022).
- [8] Euro NCAP, “*Quais os carros mais seguros em 2021?*” <https://automoveis-online.com/euro-ncap-quais-os-carros-mais-seguros-em-2021/> Accessed: 25 April 2022).
- [9] Sakata, F.Y; Santo, A.M.E; Miyakawa, W; RIVA, R; Lima, M.S.F (2009) Influence of laser surface texturing on surface microstructure and mechanical properties of adhesive joined steel sheets. *Surface Enginnering*, V.25, n.3, p.180-186.
- [10] CHIAVERINI,V. *Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento*. 2ª ed., São Paulo, 1986ª. V. 3.

- [11] M. Geiger, M. Merklein, and U. Vogt, "Aluminum tailored heat treated blanks," *Production Engineering*, vol. 3, no. 4 – 5, pp. 401 –410, Jan. 2009, doi: 10.1007/s11740 – 009 – 0179 8.
- [12] M. Merklein and H. Nguyen, "Advanced laser heat treatment with respect for the application for Tailored Heat Treated Blanks," in *Physics Procedia*, 2010, vol. 5, no. PART2, pp. 233–242. doi: 10.1016/j.phpro.2010.08.049.
- [13] Hull, Bacon, "The Portevin-Le Chatelier effect: a review of experimental findings" 2011. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5090665/>
- [14] BUHA, J. – Materials Science And Engineering A (2008)
- [15] M. M. Quazi, M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb, F. Yusof, H. H. Masjuki, and A. Arslan, "Laser-based Surface Modifications of Aluminum and its Alloys," *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 41, no. 2, pp. 106
- [16] M. Geiger, M. Merklein, and U. Vogt, "Aluminum tailored heat treated blanks," *Production Engineering*, vol. 3, no. 4-5, pp. 401-410, Jan. 2009
- [17] P.H.O.M. Alves, M.S.F. Lima, D. Raabe, H.R.Z Sandim "Laser beam welding of dual-phase DP1000 steel" 2018
- [18] Wilson Ltd, "Aluminium Alloy- 5754-H111 Treadplate" https://www.laminazioneottile.com/en/catalogs?gclid=EAlaIqObChMIpMWrn8aY_AIVY41oCR0tWw03EAAYASABEgJ-sPD_BwE

