



# ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE BRASAGEM EM METAL DURO

**PEDRO RAFAEL LOPES PEREIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO  
PORTO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

---

<b>CANDIDATO</b>	Pedro Rafael Lopes Pereira	<b>Código</b> 201206107
------------------	----------------------------	-------------------------

---

<b>TÍTULO</b>	ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE BRASAGEM EM METAL DURO	
---------------	---	--

---

<b>DATA</b>	13 DE JULHO DE 2017	
-------------	---------------------	--

---

<b>LOCAL</b>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Sala F106 – 14:00h	
--------------	---	--

---

<b>JÚRI</b>	<b>Presidente</b> Professor Doutor Manuel Fernando Gonçalves Vieira	DEMM/FEUP
-------------	---	-----------

---

	<b>Arguente</b> Doutor Filipe José Alves de Oliveira	CICECO/UA
--	--	-----------

---

<b>Orientador</b>	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira	DEMM/FEUP
-------------------	--	-----------

---

<b>Coorientador</b>	Professor Doutor Joaquim Manuel da Graça Sacramento	ESTGA/UA
---------------------	---	----------

---

## Agradecimentos

O trabalho descrito nesta dissertação não poderia ter sido concretizado sem a colaboração de diversas pessoas e instituições, às quais devo o meu sincero agradecimento.

Primeiramente, gostaria de agradecer à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, na pessoa do professor Doutor Luís Filipe Malheiros, pelo estabelecimento dos primeiros contactos que possibilitaram a realização desta Dissertação em ambiente empresarial e ao acompanhamento, dedicação e proximidade que este efetuou para o sucesso do mesmo. Quero também agradecer ao Engenheiro Manuel Valente e ao Dr. Flausino Silva pela oportunidade concedida para a elaboração deste trabalho nas instalações da DURIT.

Gostaria de deixar uma palavra de agradecimento aos meus coorientadores, Doutor Joaquim Sacramento e Engenheiro António Homem por todo o apoio científico, conselhos e confiança que me endereçaram. Muito obrigada pelo profissionalismo, pela sincera amizade e total disponibilidade que sempre revelaram para comigo. O vosso apoio foi determinante na elaboração desta Dissertação. Gostaria também de agradecer ao Doutor Eduardo Soares pelo acompanhamento efetuado durante a fase inicial deste projeto.

Aos engenheiros e funcionários da DURIT, um sincero obrigada por todo o auxílio prestado. Os ensinamentos transmitidos baseados na experiência profissional foram preponderantes para a elaboração deste trabalho.

Um agradecimento à Universidade de Aveiro, em particular ao Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, pela total disponibilidade que me concederam para a utilização do equipamento para a realização de ensaios de corte e pelo o apoio prestado durante os testes.

Finalmente, só posso agradecer aos meus pais, ao meu irmão e demais familiares, a quem tudo devo. Obrigado por todo o apoio prestado durante todo o meu percurso de formação e pelas palavras de incentivo em diversos momentos. À minha querida Rita pela compreensão, pelo companheirismo e pela ajuda durante esta etapa do meu percurso académico.



## Resumo

Os processos de união representam uma família de tecnologias de grande relevo na engenharia e manufatura de ferramentas industriais, nomeadamente no caso da união de metal duro a componentes de aço. Esta união, frequentemente efetuada por brasagem, permite a redução do peso das ferramentas e a maquinagem de sistemas de apoio e fixação. O principal desafio deste processo de ligação reside na diminuição das tensões residuais que são induzidas na área de união.

Neste trabalho são apresentadas as características dos principais tipos de metal duro utilizados, bem como as principais ligas, fluxos e técnicas de brasagem que podem ser aplicadas. Para além disso, são abordados diversos aspetos relacionados com o controlo metalográfico e determinação das propriedades físicas e mecânicas dos metais duros utilizados.

Constata-se que os processos de brasagem por indução e sob vácuo se afiguram de capital relevância na brasagem de componentes cada vez mais complexos e com propriedades finais cada mais exigentes. Permitem realizar um aquecimento mais uniforme dos componentes, diminuindo assim a tendência para a criação de tensões residuais.

Por sua vez, o processo de brasagem por tocha oxiacetilénica continua a ser bastante utilizado; no entanto, promove um aquecimento bastante irregular dos componentes. Contudo, um controlo apertado da espessura da junta brasada permite atingir as propriedades mecânicas finais pretendidas.

## Palavras-chave

Metal duro; Ligas de brasagem; Brasagem sob vácuo; Brasagem por indução; Brasagem por tocha oxiacetilénica; Microestrutura; Resistência ao corte;

## Abstract

The joining technologies represent a family of very important technologies in engineering and manufacturing of industrial tools, particularly in the union of hard metals to steel components. This union, often processed by brazing methods, allows the reduction of the weight of tools and machining support systems and fixing. The main challenge of this binding process lies in the reduction of residual stresses that are induced in the union area.

In this work are presented the main characteristics of the hard metals used, as well as the main alloys, fluxes and brazing techniques that can be applied. In addition, several aspects related to the metallographic control and determination of the physical and mechanical properties of the hard metals used are discussed.

It has been observed that induction and vacuum processes seem to be great relevance in the brazing of ever more complex components and with more demanding final properties. They allow a more even heating of the components, thus reducing the tendency for the creation of residual stresses.

In turn, the process of brazing by oxyacetylene torch continues to be widely used; however, it promotes a very irregular heating of the components but, by a tight control of the thickness of the brazed joint the desired final mechanical properties can be achieved.

## Keywords

Hard metal; Brazing alloys; Vacuum brazing; Induction Brazing; Brazing by oxyacetylene torch; Microstructure; Shear resistance;

## Índice

Índice de figuras .....	x
Índice de tabelas .....	xiii
1. Introdução .....	1
2. Revisão bibliográfica .....	2
2.1. Processo produtivo .....	3
2.1.1. Controlo metalográfico e das propriedades físicas .....	5
2.2. Metas experimentais .....	9
3. Materiais e métodos experimentais .....	10
3.1. Amostras de metal duro .....	10
3.1.1. Caracterização das amostras de metal duro .....	11
3.2. Amostras de aço .....	12
3.3. Ligas de brasagem .....	14
3.4. Fluxos de brasagem .....	15
3.5. Preparação das amostras a brasar .....	16
3.5.1. Preparação das superfícies dos materiais a brasar .....	16
3.5.2. Molhabilidade e espalhamento .....	17
3.6. Brasagem .....	18
3.6.1. Brasagem por tocha oxiacetilénica .....	18
3.6.2. Brasagem por indução .....	19
3.6.3. Brasagem sob vácuo .....	20
3.7. Preparação das amostras após brasagem .....	21
3.8. Controlo da qualidade e da espessura da junta brasada .....	22
3.9. Medição de microdureza .....	22
3.10. Análise microestrutural .....	23
3.11. Ensaio de resistência ao corte .....	23
4. Apresentação e discussão de resultados .....	25
4.1. Caracterização das amostras de metal duro e de aço .....	25
4.1.1. Metal duro .....	25

4.1.2. Aço .....	28
4.2. Perfis de temperatura .....	29
4.3. Qualidade e espessura da junta brasada .....	33
4.4. Perfis de microdureza .....	39
4.5. Ensaios de resistência ao corte.....	44
4.5.1. Análise das superfícies de fratura .....	51
5. Conclusões.....	54
6. Propostas de trabalhos futuros.....	56
Bibliografia .....	57
Anexo.....	- 1 -
1. Revisão da Literatura .....	- 1 -
1.1. Carbonetos cementados ou metais duros .....	- 1 -
1.1.1. Classificação e aplicações.....	- 1 -
1.1.2. Estrutura cristalográfica e equilíbrio de fases .....	- 2 -
1.2. Brasagem .....	- 7 -
1.2.1. Molhabilidade, capilaridade e espalhamento .....	- 8 -
1.2.2. Métodos de preparação das superfícies dos materiais para brasagem .....	- 9 -
1.2.3. Fluxos .....	- 10 -
1.2.4. Influência da geometria e dimensões da junta de união .....	- 10 -
1.2.5. Ligas de brasagem.....	- 12 -
1.2.6. Processos de brasagem .....	- 15 -

## Índice de figuras

Figura 1 - Etapas do processo de produção de metal duro na DURIT [3].	3
Fig. 2 - Evolução da contração de um compacto em verde de metal duro. Adaptado de:[7].	4
Fig. 3- Ciclo de sinterização do tipo SinterHIP usado na produção.	5
Fig. 4 - a) Microestrutura típica de uma amostra de metal duro; b) fase- $\eta$ ; c) grafite; d) lagos de Co.	5
Fig. 5 - Curva de histerese magnética [9].	6
Fig. 6 - Esquema representativo do ensaio de dureza Vickers [12].	8
Fig. 7 - Geometria e dimensões (mm) das amostras de metal duro.	10
Fig. 8 - Geometria e dimensões (mm) das amostras de aço.	14
Fig. 9 - Montagem das amostras a brasar.	14
Fig. 10 - Rugosidade das amostras de metal duro: a) após polimento e b) polido e decapado.	16
Fig. 11 - Rugosidade das amostras de aço: a) após retificação e b) retificado e decapado.	17
Fig. 12 - Evolução do comportamento da liga de brasagem 4900, num ensaio de molhabilidade.	17
Fig. 13 - Ciclo térmico registado durante o ensaio de molhabilidade da liga 4900 sobre o aço 1.1191.	18
Fig. 14 - a) Máquina de indução; b) indutor desenvolvido.	19
Fig. 15 - Sequência de preparação das amostras para brasagem sob vácuo.	20
Fig. 16 - Ciclos térmicos aplicados no processo de brasagem sob vácuo.	21
Fig. 17 - a) Componentes após brasagem, e b) componentes após retificação.	21
Fig. 18 - Exemplo de medição da espessura de uma junta brasada.	22
Fig. 19 - Interface de amostras brasadas.	23
Fig. 20 - a) Dispositivo desenvolvido para ensaio de corte, e b) posicionamento das amostras.	24
Fig. 21 - Microestrutura característica de uma amostra de metal duro GD10.	25
Fig. 22- Microestrutura característica de uma amostra de metal duro GD20.	27
Fig. 23 - Microestrutura dos aços: a) 1.1191, e b) 1.2738.	28
Fig. 24 - Ciclos térmicos dos processos de brasagem sobre substrato de aço 1.1191: a) tocha oxiacetilénica (4900); b) tocha oxiacetilénica (49/Cu); c) indução (4900), e d) indução (49/Cu).	30

Fig. 25 - Ciclos térmicos dos processos de brasagem sobre substrato de aço 1.2738: a) tocha oxiacetilénica (4900); b) tocha oxiacetilénica (49/Cu); c) indução (4900), e d) indução (49/Cu).....	31
Fig. 26 - Diagrama de equilíbrio do sistema binário Ag-Cu [15]. .....	32
Fig. 27 - Imagens da junta brasada: a) observação em lupa; b) observação em microscópio ótico; c) interface aço-liga de brasagem; d) interface metal duro-liga de brasagem. ....	33
Fig. 28 - Imagens da junta brasada: a) observação em lupa; b) observação em microscópio ótico; c) liga de brasagem Cu-Ag; d) interface liga de brasagem-metal duro; e) interface aço-liga de brasagem. ....	34
Fig. 29 - Imagens da junta brasada: a) observação em lupa; b) observação em microscópio ótico; c) interface liga de brasagem-metal duro; d) interface liga de brasagem-aço. ....	35
Fig. 30 - Imagens da junta brasada registadas em microscópio ótico. ....	36
Fig. 31 - Imagens da junta de brasada: a) observação em lupa; b) observação em microscópio ótico; c) interface liga de brasagem-aço; d) interface metal duro-liga de brasagem. ....	36
Fig. 32 - Imagens da junta brasada registadas em microscópio ótico. ....	37
Fig. 33 - Imagens da junta brasada registadas em microscópio ótico. ....	37
Fig. 34 - Perfis de microdureza (HV 0,5) obtidos sobre as amostras GD10/1.1191, brasadas pelos três processos disponíveis na DURIT.....	40
Fig. 35 - Perfis de microdureza (HV 0,5) obtidos sobre as amostras GD20/1.1191, brasadas pelos três processos disponíveis na DURIT.....	40
Fig. 36 - Perfis de microdureza (HV 0,5) obtidos sobre as amostras GD10/1.2738, brasadas pelos três processos disponíveis na DURIT.....	41
Fig. 37- Perfis de microdureza (HV 0,5) obtidos sobre as amostras GD20/1.2738, brasadas pelos três processos disponíveis na DURIT.....	42
Fig. 38 - Curvas de $F_{máx.}$ vs. deslocamento registadas nos ensaios de resistência ao corte das amostras de metal duro GD10 brasadas sobre substratos de aço 1.1191. ....	44
Fig. 39 - Curvas $F_{máx.}$ vs. deslocamento registadas nos ensaios de resistência ao corte das amostras de metal duro GD20 brasadas sobre substratos de aço 1.1191. ....	45
Fig. 40 - Resistência ao corte das amostras brasadas sobre substratos de aço 1.1191 vs. espessura da junta de união. ....	46
Fig. 41 - Curvas de $F_{máx.}$ vs. deslocamento registadas nos ensaios de resistência ao corte das amostras de metal duro GD10 brasadas sobre substratos de aço 1.2738. ....	47
Fig. 42 - Curvas de $F_{máx.}$ vs. deslocamento registadas nos ensaios de resistência ao corte das amostras de metal duro GD20 brasadas sobre substratos de aço 1.2738. ....	47

Fig. 43 - Resistência ao corte das amostras brasadas sobre substratos de aço 1.2738 vs. espessura da junta de união. ....	49
Fig. 44 - Resistência ao corte das amostras brasadas vs. espessura da junta brasada. ....	49
Fig. 45 - Resistência ao corte das amostras brasadas vs. liga de brasagem utilizada. ....	50
Fig. 46 - Resistência ao corte das amostras brasadas vs. processo de brasagem utilizado. .	50
Figura 47 - Superfície de fratura de algumas amostras: a) poros; b) restos de fluxo e c) sucção da liga de brasagem. ....	53

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Composição química, propriedades físicas e mecânicas dos graus mais utilizados. .....	8
Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas e composição química do aço 1.2738. ....	13
Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas e composição química do aço 1.1191. ....	13
Tabela 4 - Propriedades e composição química das ligas de brasagem utilizadas, segundo dados do fabricante. ....	15
Tabela 5 - Características dos fluxos de brasagem utilizados [13]. ....	15
Tabela 6 - Propriedades das amostras de metal duro GD10. ....	25
Tabela 7 - Composição química (% pond.) das amostras de metal duro GD10. ....	26
Tabela 8 - Propriedades das amostras de metal duro GD20. ....	27
Tabela 9 - Composição química (% pond.) das amostras de metal duro GD20. ....	28
Tabela 10 - Propriedades e composição química dos aços utilizados. ....	28
Tabela 11 - Nomenclatura adotada na identificação das amostras. ....	29
Tabela 12 - Espessura da junta de união das amostras brasadas com as ligas 49/Cu e 64/Cu sobre substratos de aço 1.2738. ....	38
Tabela 13 - Espessura da junta de união das amostras brasadas com as ligas 4900 e 6488 sobre substratos de aço 1.2738. ....	38
Tabela 14 - Espessura das juntas de união das amostras brasadas com as ligas 49/Cu e 64/Cu sobre substratos de aço 1.1191. ....	39
Tabela 15 - Espessura das juntas de união das amostras brasadas com as ligas 4900 e 6488 sobre substratos de aço 1.1191. ....	39
Tabela 16 - Propriedades das amostras de metal duro antes e após brasagem sobre substratos de aço 1.2738. ....	43
Tabela 17 - Propriedades das amostras de metal duro antes e após brasagem sobre substratos de aço 1.1191. ....	43
Tabela 18 - Resistência ao corte das amostras brasadas sobre substratos de aço 1.1191, espessura da junta de união, força aplicada para promover a rotura e identificação da zona em que ocorreu. ....	45
Tabela 19 - Resistência ao corte das amostras brasadas sobre substratos de aço 1.2738, espessura da junta de união, força aplicada para promover a rotura e identificação da zona em que ocorreu. ....	48
Tabela 20 - Superfícies de fratura das amostras brasadas pelos diferentes processos, sobre substratos de dois tipos de aços. ....	52

## Glossário

CFC - Estrutura cúbica de faces centradas

HC - Estrutura hexagonal compacta

HC - Força coerciva

$F_{\text{máx.}}$  - Força máxima

MD - Metal duro

FG - Percentagem de ferrite

Rc - Resistência ao corte

$\sigma_m$  - Saturação magnética



## 1. Introdução

O metal duro constitui uma classe de materiais de engenharia de elevado valor, sendo aplicados no fabrico de ferramentas de corte e de componentes resistentes ao desgaste, para uma vasta gama de processos industriais. O metal duro, na sua versão mais simplista, é composto por partículas cerâmicas de carboneto de tungsténio (WC), incorporadas numa matriz metálica, tradicionalmente de cobalto (Co), originando um material com elevada dureza e com uma tenacidade razoável [1].

Diversas propriedades, características dos metais duros, são bastante diferentes das apresentadas pela maioria dos materiais de engenharia pelo que o conhecimento dessas propriedades é de extrema importância. A união de metal duro a diferentes substratos tem sido alvo de estudo uma vez que a combinação destes diferentes materiais permite a redução do peso dos componentes, a redução do seu custo e a melhoria das suas propriedades finais. O aço é facilmente maquinado para roscas e outros elementos de fixação. O metal duro apresenta um excelente comportamento à compressão, motivo pelo qual as fieiras são embutidas em cilindros de aço. De entre os diferentes processos de união viáveis, os mais comumente utilizados a nível industrial são a brasagem e a embutidura. Contudo, a obtenção de juntas brasadas, com propriedades mecânicas aceitáveis, não é facilmente alcançada. É comum o aparecimento de algumas microfissuras e inclusões na interface, entre o metal duro e a liga de brasagem, que afetam significativamente o tempo de vida das ferramentas. Deste modo, têm sido desenvolvidos estudos de particular interesse no âmbito das tecnologias de brasagem de metal duro e da microestrutura da junta brasada [1].

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito de uma parceria entre a empresa DURIT - Metalurgia Portuguesa do Tungsténio, L.<sup>da</sup> e a FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A DURIT é a principal empresa portuguesa produtora de componentes em metal duro, nomeadamente os mais variados componentes de desgaste, de elevada precisão, e ferramentas para aplicações específicas.

O tema deste trabalho, proposto pela empresa, foi desenvolvido, essencialmente em ambiente industrial, constituindo uma oportunidade estratégica para a DURIT de reforçar o seu *know-how*. Com o desenvolvimento constante dos

componentes produzidos pela empresa e devido à exigência requerida ao nível das propriedades finais dos produtos obtidos, a necessidade da realização do processo de brasagem com maior rigor e precisão é cada vez maior. Uma vez que o processo de brasagem por tocha oxiacetilénica proporciona um aquecimento dos componentes não uniforme, podendo dar origem a defeitos no produto final, é necessário recorrer a processos mais refinados na tentativa de colmatar estes problemas, nomeadamente através do processo de brasagem por indução e sob vácuo. Com a realização desta dissertação pretendeu-se conhecer as principais vantagens e limitações dos processos de brasagem mais utilizados na DURIT, nomeadamente tocha oxiacetilénica, indução e vácuo.

## 2. Revisão bibliográfica

Uma grande diversidade de metal duro, com diferentes propriedades, encontra-se atualmente disponível no mercado sobretudo devido às diferentes composições, microestruturas e tecnologias de fabrico disponíveis [1]. O metal duro é comumente utilizado para o fabrico de diversas ferramentas de corte, desgaste ou perfuração. O que se verifica é que estas ferramentas sob condições de operação severas fraturam, comprometendo o desempenho dos componentes. Assim, a união do metal duro a aços estruturais é bastante recorrente, sendo que o processo de brasagem é dos mais utilizados para a realização desta união.

Existem diversos processos de brasagem de metal duro que podem ser utilizados com uma panóplia de ligas de brasagem, dependendo da aplicação pretendida. A brasagem por tocha oxiacetilénica, por indução e vácuo são os processos que assumem maior protagonismo quando se pretende realizar este tipo de uniões.

No âmbito da unidade curricular de Seminário, foi desenvolvido um detalhado estudo, de índole bibliográfica, sobre o estado de arte dos principais tópicos de maior relevância para a realização deste trabalho. Esse trabalho resultou na elaboração de uma monografia [2] que foi alvo de apresentação/discussão pública no semestre precedente. Apresenta-se em anexo a este trabalho uma súmula dos aspetos considerados mais relevantes dessa monografia.

## 2.1. Processo produtivo

Neste subcapítulo será apresentado o processo produtivo da DURIT para a produção de componentes em metal duro. Nesta descrição serão abordados diversos conceitos relacionados com a produção de pós, prensagem, bem como a sua influência sobre a contração do material e sinterização. Por fim, serão ainda referidos alguns aspetos de controlo intermédio através da avaliação das propriedades físicas após sinterização.

O fluxograma apresentado na Fig. 1 esquematiza as diversas etapas do processo de obtenção de componentes em metal duro desde as matérias-primas até ao produto final, de acordo com a linha de produção da DURIT.

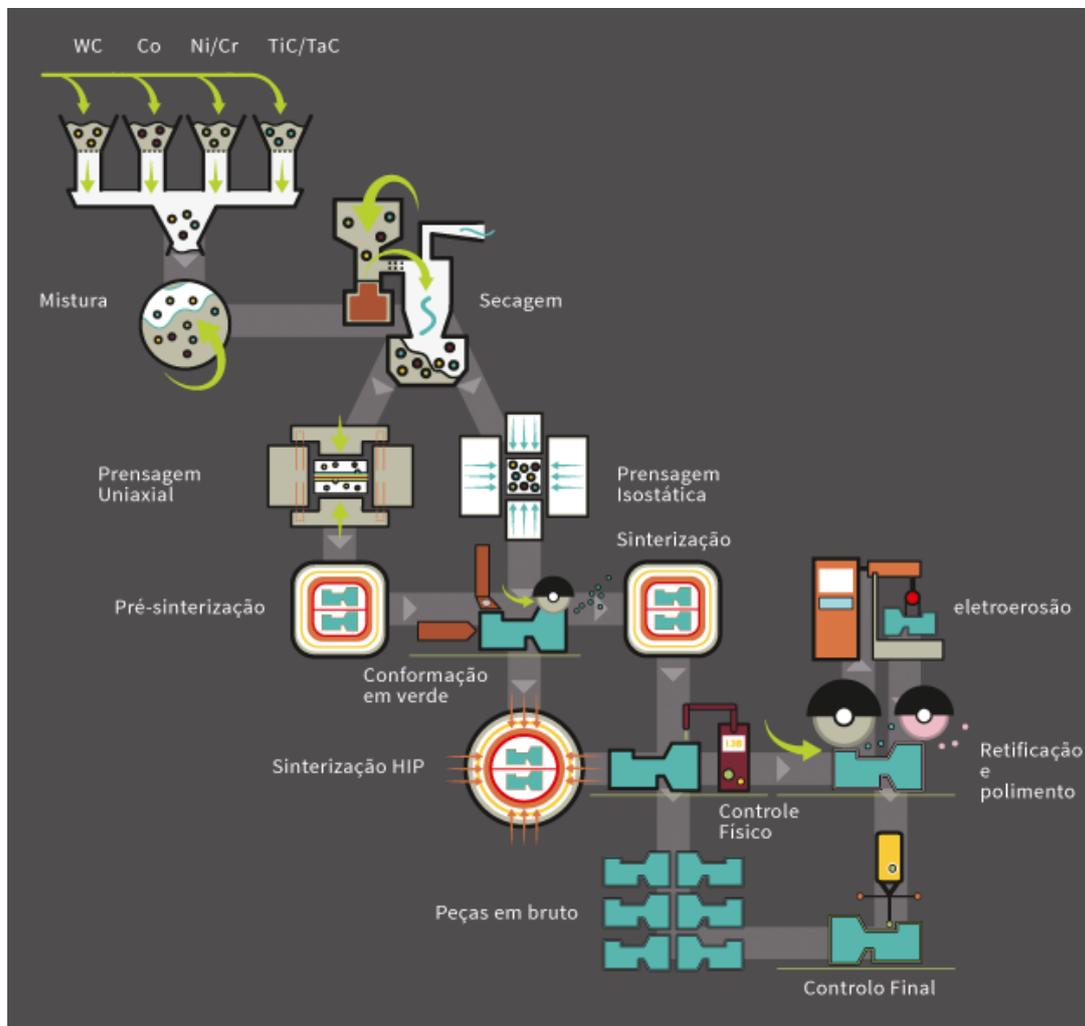


Figura 1 - Etapas do processo de produção de metal duro na DURIT [3].

O processo de produção inicia-se com a preparação das misturas dos pós que envolve as etapas de moagem e de granulação por rotação ou por atomização. Posteriormente, procede-se à prensagem, desparafinação, pré-sinterização e

maquinação dos compactos prensados. Em seguida, os componentes acabados são sinterizados, sob vácuo ou argon (a uma pressão entre 10 e 30 bar). É importante salientar que a sinterização é a etapa mais relevante na indústria pulverometalúrgico [4-6].

A sinterização em metal duro envolve normalmente a combinação da sinterização no estado sólido e no estado líquido devido à ocorrência de uma reação eutética numa gama de temperaturas (Fig. 5 (b) em anexo). Ao submeter os compactos em verde a uma temperatura de aproximadamente 1455 °C, ocorre a formação de uma ligação química entre os grãos. O processo de sinterização desenrola-se em diversas etapas, conforme ilustrado na Fig. 2.

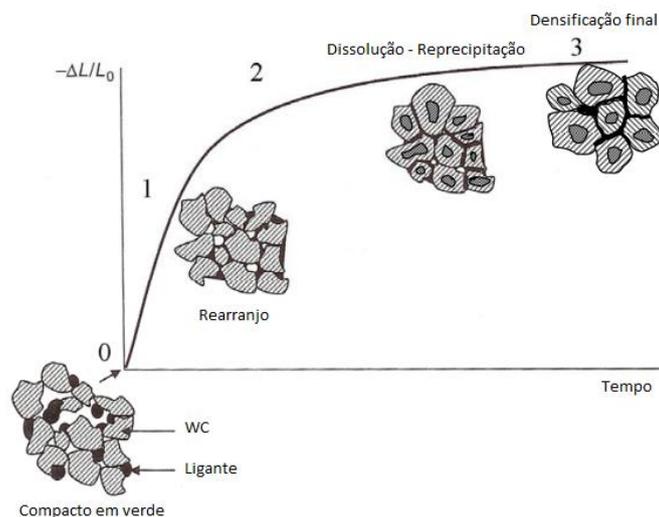


Fig. 2 - Evolução da contração de um compacto em verde de metal duro. Adaptado de:[7].

Os ciclos de sinterização devem ser ajustados aos compactos em verde. Em função da forma e dimensão dos compactos, poderá haver ser necessidade de utilizar ciclos de sinterização, taxas de aquecimento e diversos patamares de sinterização distintos. De salientar que, no processo de sinterização, as amostras sofrem uma contração linear de aproximadamente 22 % [4, 5].

Na Fig. 3 encontra-se esquematizado o ciclo de sinterização genérico do tipo *SinterHIP* utilizado na produção.

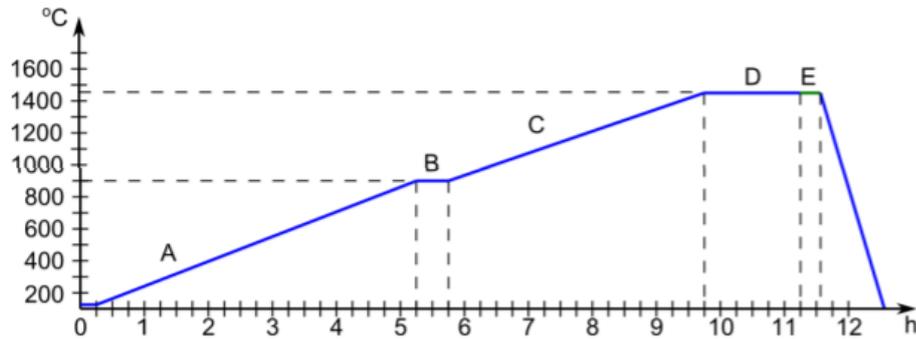


Fig. 3- Ciclo de sinterização do tipo *SinterHIP* usado na produção.

Pela análise da figura é possível verificar que as rampas de aquecimento (A e C) possuem taxas de aquecimento relativamente baixas (aproximadamente  $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ). Os patamares B e D têm como função promover o aquecimento uniforme e uma densificação adequada dos compactos. O patamar D corresponde ao patamar de sinterização ao qual se segue a injeção de argon sob pressão (E) [5].

#### 2.1.1. Controlo metalográfico e das propriedades físicas

Posteriormente, os sinterizados são sujeitos a um controlo das propriedades físicas e metalúrgicas antes de serem maquinados.

A análise microestrutural tem como principal objetivo a identificação da potencial presença de fases indesejáveis que, devido à sua fragilidade característica, colocam em causa o desempenho dos componentes. A presença destas fases na microestrutura está muito associada ao teor em carbono das amostras [5, 8]. A observação da microestrutura tem ainda como objetivo a análise do tamanho de grão, bem como a deteção da potencial formação de bolsas de ligante e porosidade.

Na Fig. 4 são apresentadas imagens da microestrutura típica de um metal duro bem como os defeitos microestruturais referidos.

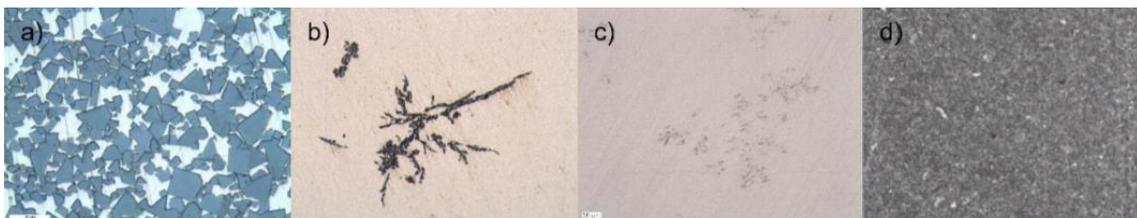


Fig. 4 - a) Microestrutura típica de uma amostra de metal duro; b) fase- $\eta$ ; c) grafite; d) lagos de Co.

A qualidade do metal duro está fortemente ligada às suas propriedades físicas e mecânicas, nomeadamente à força coerciva ( $H_c$ ), à percentagem de ferrite (FG), à saturação magnética, à densidade e à dureza.

- Força coerciva

A medição da força coerciva, para além de permitir uma avaliação relativamente à potencial presença de fase- $\eta$  na microestrutura, também permite avaliar o tamanho médio de grão. A determinação da força coerciva é efetuada através da aplicação de um campo magnético sobre a amostra de modo a promover a sua total magnetização. Posteriormente, inverte-se o campo magnético. Como os dipolos magnéticos do material (previamente alinhados) necessitam de um período de tempo mais longo para inverter a polaridade, obtém-se uma curva de histerese magnética (Fig. 5).

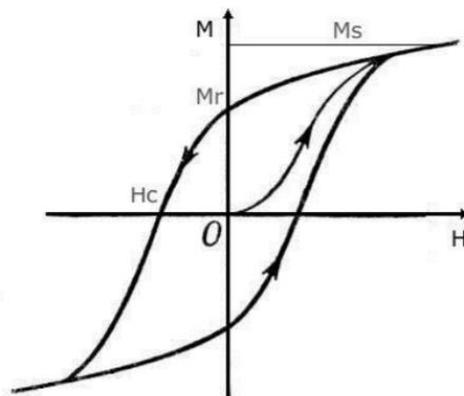


Fig. 5 - Curva de histerese magnética [9].

A força coerciva corresponderá à diferença entre a magnetização remanescente (magnetização da amostra quando o campo magnético aplicado é nulo -  $M_r$ ) e a coercividade (valor do campo magnético quando a magnetização da amostra é nula -  $H_c$ ) [8, 10, 11].

- Percentagem de ferrite

A percentagem de ferrite é uma medida do grau de ferromagnetismo apresentado pela amostra, comparativamente a um padrão 100% ferromagnético. A medição do FG tem como objetivo avaliar a potencial presença de fase- $\eta$  pois o seu valor permite averiguar a quantidade de tungsténio dissolvido na fase ligante, comparativamente a um padrão [8].

- Saturação magnética

A medição da força com que uma amostra magnetizada é atraída por um campo magnético é designada por saturação magnética, sendo o seu valor proporcional à quantidade de Co da amostra. É ainda importante referir que os elementos que se dissolvem no ligante vão influenciar esta propriedade. Comparando o valor obtido com o valor do Co puro (161 emu/g) é possível avaliar a potencial presença de fase- $\eta$  ou de grafite na microestrutura bem como a qualidade metalúrgica da amostra [8].

- Densidade

A medição da densidade permite inferir sobre a composição química do material. Uma baixa densidade indicia um baixo teor de WC, pois há uma diferença significativa entre os pesos específicos do WC e do Co, que são 19,0 g/cm<sup>3</sup> e 8,9 g/cm<sup>3</sup>, respetivamente. A medição da densidade é efetuada com base no princípio de Arquimedes e assenta na seguinte equação:

$$\rho_{amostra} = \frac{m}{m - m_a} \times \rho_{líquido} \quad (1)$$

onde  $m$  corresponde à massa da amostra no ar,  $m_a$  à massa aparente da amostra e  $\rho_{líquido}$  à densidade do líquido utilizado [5].

- Ensaio de dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers é realizado sobre vários tipos de materiais, sendo um método fácil de aplicar e de baixo custo. O indentador utilizado neste tipo de ensaio é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de abertura de 136° entre as faces opostas. Após a aplicação da carga, a indentação obtida tem a forma de um losango regular e procede-se à medição das duas diagonais ( $d_1$  e  $d_2$  - Fig. 6) perpendiculares entre si. A dureza Vickers é, então, obtida a partir da seguinte expressão:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2} \quad (2)$$

onde  $F$  corresponde à pressão exercida e  $d_1$  e  $d_2$  ao comprimento das diagonais da indentação.

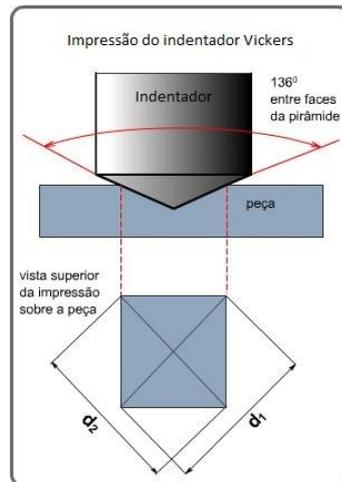


Fig. 6 - Esquema representativo do ensaio de dureza Vickers [12].

Por fim, todos os componentes de metal duro acabados são submetidos a um rigoroso controlo das tolerâncias dimensionais antes de serem embalados e enviados para o cliente. [4].

Os graus do sistema WC-Co são categorizados em função do teor em Co e o tamanho de grão, face à sua influência sobre a ductilidade e a dureza dos componentes. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades físicas e mecânicas bem como a composição química de alguns graus de metal duro mais comuns na DURIT.

Tabela 1 - Composição química, propriedades físicas e mecânicas dos graus mais utilizados.

ISO	DURIT	WC (%)	Co (%)	Hc (Oe)	FG (%)	Dureza (HV 30)	Densidade
KD10	GD05	94,50	5,50	250±30	4,0±0,5	1700±30	14,95±0,1
KD20	GD10	94,00	6,00	200±20	5,0±0,5	1600±30	14,95±0,1
KD40	GD20	90,00	10,00	150±25	9,5±1,0	1350±30	14,50±0,1
-	GD30	85,00	15,00	125±25	15±1,0	1150±30	14,00±0,1

## 2.2. Metas experimentais

O desenvolvimento contínuo dos componentes produzidos pela DURIT e a exigência requerida ao nível das propriedades dos produtos finais, têm vindo a impor um maior rigor e precisão dos processos de brasagem. A brasagem por tocha oxiacetilénica é o processo mais utilizado na empresa. Entretanto, a utilização de processos mais refinados, nomeadamente a brasagem por indução e sob vácuo, tem vindo a captar maior interesse nos últimos tempos. Deste modo, neste trabalho pretende-se conhecer as principais vantagens e limitações de cada um destes processos.

### 3. Materiais e métodos experimentais

#### 3.1. Amostras de metal duro

As amostras de metal duro selecionadas para este estudo pertencem aos graus GD10 e GD20 que têm um teor de Co de 6 e 10 % (pond.), respetivamente. Estes graus são considerados como referência na indústria de metal duro. O GD20, como apresenta um teor de Co mais elevado, tem uma soldabilidade superior à do GD10.

A geometria das amostras ensaiadas é bastante simples e consiste em cilindros cujas dimensões são apresentadas na Fig. 7.

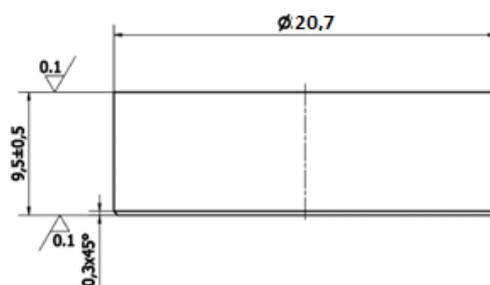


Fig. 7 - Geometria e dimensões (mm) das amostras de metal duro.

As amostras de metal duro foram obtidas por prensagem uniaxial numa prensa mecânica, tendo sido aplicada uma pressão de 110 MPa. Estas amostras foram torneadas, cortadas e retificadas em equipamento convencional (tornos e máquinas de corte).

A sinterização das amostras processou-se num forno industrial *SinterHIP*, à temperatura máxima de 1460 °C, durante 1,5 h, sob uma pressão isostática de argon de 30 bar, a essa temperatura nos últimos 20 minutos do patamar de sinterização. De seguida, ocorreu o seu arrefecimento de acordo com a inércia térmica do forno [8].

Após sinterização, efetuou-se a caracterização das amostras, tendo-se começado por determinar as propriedades magnéticas e a densidade. Após esta caracterização, procedeu-se à preparação metalográfica, à determinação da dureza e à análise microestrutural, em microscopia ótica. Nesta análise, foram avaliados diversos parâmetros, nomeadamente: porosidade, potencial presença de carbono livre ou fase  $\eta$ , homogeneidade da distribuição de fases e tamanho de grão. Algumas das amostras foram reaproveitadas de amostras provenientes da aprovação de banhos, tendo sido igualmente controladas.

### 3.1.1. Caracterização das amostras de metal duro

Todas as amostras de metal duro utilizadas no processo de brasagem foram caracterizadas da mesma forma e de acordo com o que é estabelecido para o controlo de qualidade do metal duro na DURIT.

- Força coerciva ( $H_c$ )

Com o auxílio de um coercímetro *FOERSTER Koerzimat 1.097 HCJ*, mediu-se a força coerciva, segundo a norma ISO 3326. Para a realização da medição, colocaram-se as amostras de metal duro numa régua de suporte e introduziram-se no interior da bobine do coercímetro. Com recurso ao *software* de medição da força coerciva - *Koerzimat CS 2.02* - obteve-se o valor da força coerciva ( $O_e$ ).

- Percentagem de ferrite (%FG)

Para a determinação da percentagem de ferrite (%FG) utilizou-se um *ferrometer Ferritgehaltmesser 1.054*, tendo-se efetuado previamente a sua calibração. Com o auxílio da sonda, colocada na vertical relativamente à superfície, mediu-se o FG da amostra sinterizada. O valor obtido é equivalente à percentagem de ferrite num determinado volume de peça.

- Saturação magnética ( $\sigma_m$ )

Para a determinação do valor da saturação magnética, procedeu-se à pesagem da amostra numa balança *Mettler Toledo* ( $\pm 0,0001g$ ). O valor obtido foi multiplicado pelo teor de Co da amostra e introduzido no fator de escala do multímetro magnético - *LDJ Model 702*. De seguida, a amostra foi colocada no porta amostras e, posteriormente, no interior do indutor magnético - *LDJ Model SM - 8100*. Simultaneamente realizou-se o *RESET* no multímetro magnético e retirou-se a amostra da cavidade. O multímetro magnético mede um valor (emu/g) que corresponde à saturação magnética da amostra.

- Densidade

De acordo com a norma ISO 3369, determinou-se a densidade das amostras através do método de Arquimedes. O valor da densidade foi obtido com uma balança *Mettler Toledo*.

- Preparação metalográfica

As amostras foram retificadas, com mós de diamante, e polidas com pasta de diamante de 7 e 3  $\mu\text{m}$ , para posterior observação metalográfica e medição de dureza.

- Dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers foi efetuado sobre a superfície das amostras polidas com recurso a um durómetro *Amsler Otto Wolpert - Werke GMBH*, com um indentador Vickers e uma carga de 30 kgf. Com o auxílio de um microscópio *Leica DMLM*, com um *software* incorporado, foram obtidos os valores de dureza Vickers HV 30.

- Análise metalográfica

Com o objetivo de determinar a macro e microporosidade e a eventual presença de carbono livre, observou-se a superfície das amostras polidas num microscópio ótico *Leica DMLM* (100x; 1000x). As imagens obtidas foram classificadas de acordo com a norma ISO 4505.

As amostras foram posteriormente atacadas com reagente de Murakami, durante 30-40 s. Procedeu-se à sua observação no microscópio ótico para detetar a eventual presença de fase- $\eta$  (grosseira, fina ou dispersa) e/ou de lagos de Co, bem como a controlar a homogeneidade da microestrutura, tamanho e distribuição dos grãos de WC.

- Composição química

Com recurso a um equipamento de fluorescência de raios-X, *Thermo SCIENTIFIC - Niton XL2 GOLDD*, determinou-se a composição química das amostras de metal duro. As amostras foram colocadas, individualmente, no interior de uma câmara de proteção e analisadas durante aproximadamente 15 s.

### 3.2. Amostras de aço

Foram utilizados dois tipos de aço como substrato para a realização da brasagem do metal duro GD10 e GD20: o aço 1.2738 e o 1.1191.

O aço 1.2738 é pré-tratado e bastante utilizado pela empresa no processo de brasagem dos graus GD10 e GD20, sendo utilizado para o fabrico de cortantes e de buris. Como aço integral, é aplicado em ferramentas de estampagem, engrenagens e em veios.

A Tabela 2 apresenta a composição química e as propriedades físicas e mecânicas desse tipo de aço.

Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas e composição química do aço 1.2738.

Propriedades	Densidade		Coef. de dilatação térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	Módulo de Young (GPa)	Dureza HRC
		7,8		$14,6 \cdot 10^{-6}$	205 GPa
Composição química	C	Si	Mn	Cr	Mo
	0,35-0,45	0,2-0,4	1,3-1,6	1,8-2,1	0,15-0,25

Por sua vez, o 1.1191 é um aço ao carbono. Este aço pode ser aplicado no estado recozido ou após tratamento térmico. Apresenta uma vasta gama de aplicações como, por exemplo, em parafusos, porcas, peças para automóveis, entre outras. Na DURIT é bastante utilizado na brasagem de componentes de metal duro devido à sua elevada soldabilidade, nomeadamente em tacos, mandris, feiras e martelos.

Na Tabela 3 é apresentada a composição química e as propriedades físicas e mecânicas do aço 1.1191.

Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas e composição química do aço 1.1191.

Propriedades	Densidade		Coef. de dilatação térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	Módulo de Young (GPa)	Dureza HRC
		7,84		$14,7 \cdot 10^{-6}$	200 GPa
Composição química	C	Si	Mn	P	S
	0,42-0,5	0,4 (máx.)	0,5-0,8	0,035 (máx.)	0,035 (máx.)

A preparação dos substratos de aço ocorreu em diferentes etapas, compreendendo o corte, torneamento e retificação plana. Para facilitar o processo de brasagem e garantir o assentamento da superfície metal duro/aço e uma junta de

brasagem de espessura uniforme, foi efetuado um pequeno chanfro nos substratos de aço, a 45°, com 0,5 mm de profundidade (Fig. 8).

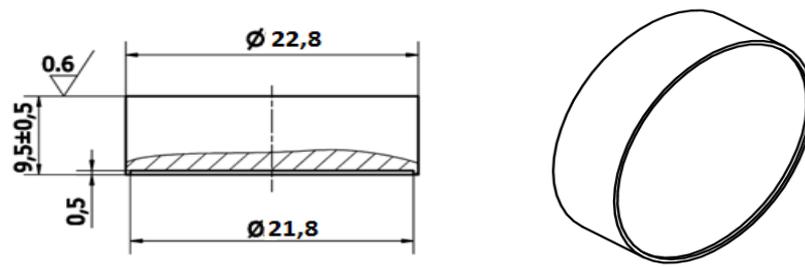


Fig. 8 - Geometria e dimensões (mm) das amostras de aço.

A Fig. 9 apresenta o esquema de montagem das amostras a brasar. Esta geometria das amostras de metal duro e de aço foi pensada tendo em vista os ensaios de resistência ao corte a realizar após a brasagem.

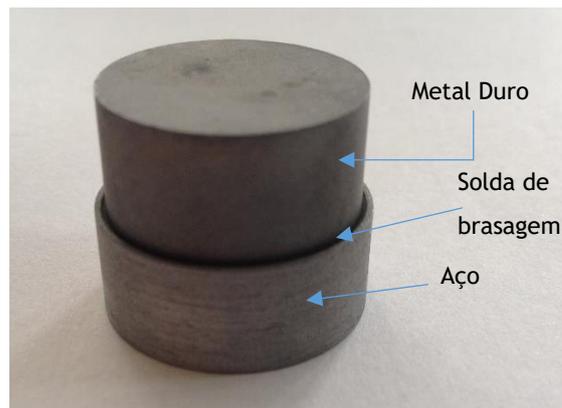


Fig. 9 - Montagem das amostras a brasar.

### 3.3. Ligas de brasagem

As ligas de brasagem utilizadas nos ensaios têm a designação 49/Cu, 4900, 64/Cu e 6488, sendo produzidas pela empresa *BrazeTec*. A Tabela 4 apresenta a composição química e as propriedades das ligas aplicadas, segundo dados do fabricante.

Tabela 4 - Propriedades e composição química das ligas de brasagem utilizadas, segundo dados do fabricante.

Liga de brasagem	Intervalo de fusão (°C)	Temperatura de brasagem (°C)	Resistência ao corte (MPa)	Forma
4900	680-705	690	> 150	Vareta
49/Cu	670-720	710	> 150	Folha (0,3mm)
6488	730-780	770	> 150	Folha (0,2mm)
64/Cu	730-780	780	> 150	Folha (0,3mm)
Composição	Ag	Cu	Zn	Ni
4900	49	16	23	4,5
49/Cu	49	27,5	20,5	2,5
6488	64	26	-	2
64/Cu	64	26		2

A liga de brasagem 4900 é a liga mais comumente utilizada, sendo considerada uma liga de aplicação generalizada. A liga 49/Cu apresenta uma camada intermédia de Cu, visando o amortecimento das tensões residuais produzidas durante o processo.

As ligas de brasagem 6488 e 64/Cu, utilizadas no processo de brasagem sob vácuo, são muito semelhantes às ligas 4900 e 49/Cu, respetivamente, não contendo obviamente Zn na sua composição.

### 3.4. Fluxos de brasagem

Os fluxos de brasagem utilizados são produzidos pela empresa SOPORMETAL, e as suas características estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características dos fluxos de brasagem utilizados [13].

Fluxo de brasagem	DIN EN 1045	Cor	Temperatura de trabalho (°C)
SOPOR - FLO	FH 10	Branca	550-850
SOPOR Special HD	FH 21	Castanha	750-1050

O fluxo FH 10 foi utilizado no processo de brasagem por tocha oxiacetilénica. Este tipo de fluxo é utilizado em superfícies largas e para ciclos de brasagem curtos. Apresenta excelentes propriedades de espalhamento, sendo utilizado sob a forma de pó.

O fluxo FH 21 é aplicado sob a forma de pasta e é o mais comumente utilizado na brasagem de componentes de metal duro. Este fluxo foi utilizado no processo de brasagem por indução.

### 3.5. Preparação das amostras a brasar

#### 3.5.1. Preparação das superfícies dos materiais a brasar

Antes de iniciar o processo de brasagem, procedeu-se à decapagem, por jato de areia, dos substratos de aço e das amostras de metal duro de modo a remover os filmes de óxidos e a conferir rugosidade às superfícies. A seguir, limpou-se a superfície das amostras e da liga de brasagem com acetona.

Com o intuito de tornar os ensaios de brasagem reprodutíveis, mediu-se a rugosidade da superfície dos substratos de aço e das amostras de metal duro, antes e após decapagem. A rugosidade do metal duro, antes e após decapagem, é apresentada nos gráficos da Fig. 10.

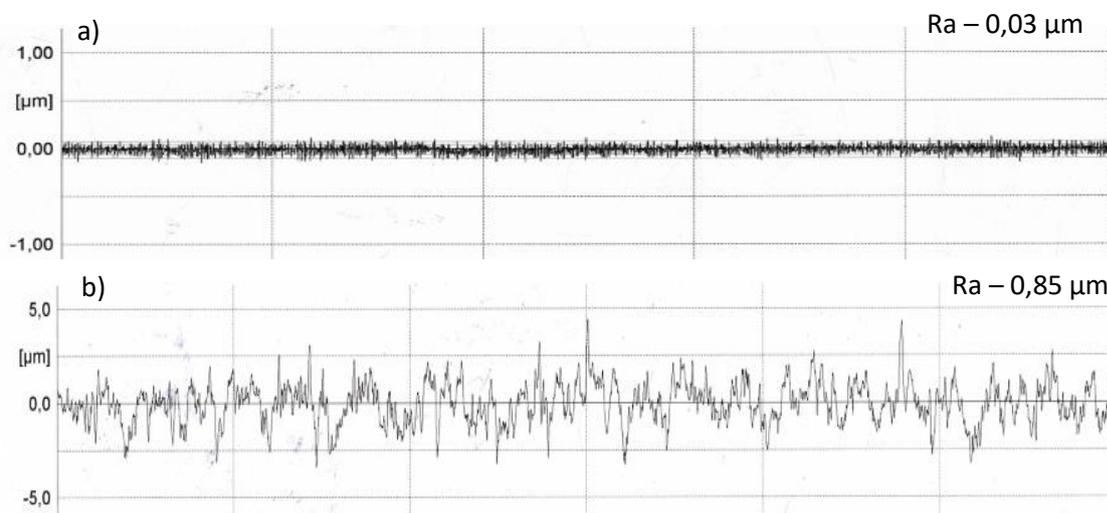


Fig. 10 - Rugosidade das amostras de metal duro: a) após polimento e b) polido e decapado.

A rugosidade das amostras de metal duro após a decapagem é  $\approx 0,85 \mu\text{m}$ , superior à rugosidade após polimento ( $0,03 \mu\text{m}$ ), como era expectável.

A rugosidade dos aços também foi determinada, antes e após decapagem, e os seus valores são apresentados nos gráficos da Fig. 11.

A rugosidade das amostras de aço, após decapagem, é de  $3,59 \mu\text{m}$ , inferior à rugosidade após retificação ( $4,47 \mu\text{m}$ ).

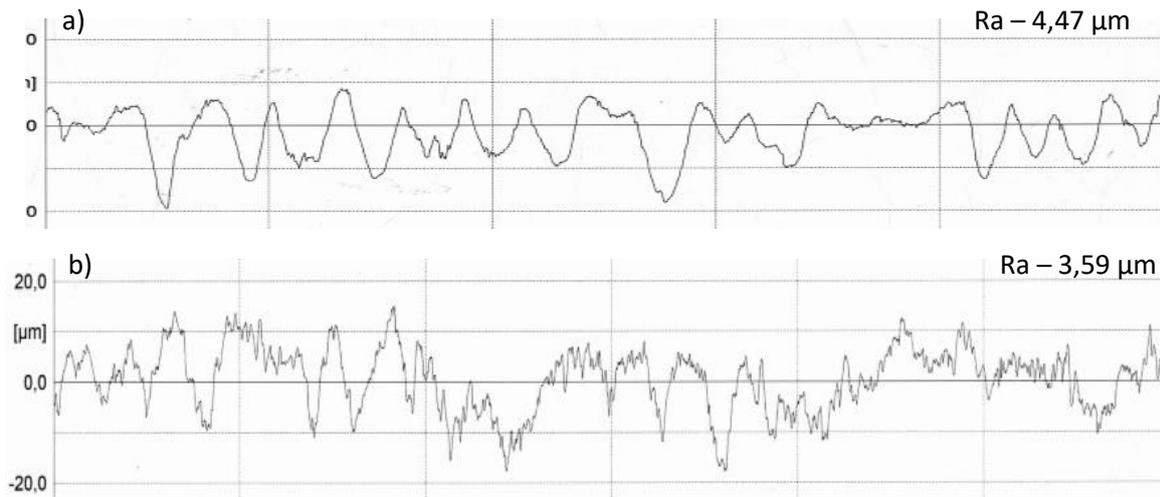


Fig. 11 - Rugosidade das amostras de aço: a) após retificação e b) retificado e decapado.

### 3.5.2. Molhabilidade e espalhamento

Para garantir que a preparação da superfície era a adequada, foi realizado um ensaio para verificar se existia uma correta molhabilidade e espalhamento da liga de brasagem sobre as superfícies a brasar. O ensaio foi realizado com o auxílio da máquina de indução ASEA, tendo-se utilizado, como liga de brasagem, a liga 4900 e, como substrato, o aço 1.1191.

Na Fig. 12 são apresentadas três imagens que ilustram o comportamento da liga de brasagem face ao aquecimento do substrato.



Fig. 12 - Evolução do comportamento da liga de brasagem 4900, num ensaio de molhabilidade.

Na Fig. 12 verifica-se que existe uma correta molhabilidade e espalhamento da liga de brasagem em toda a superfície a brasar.

Durante este ensaio, procedeu-se ao registo do ciclo térmico (Fig. 13), com o auxílio de um pirómetro ótico conectado a um computador.

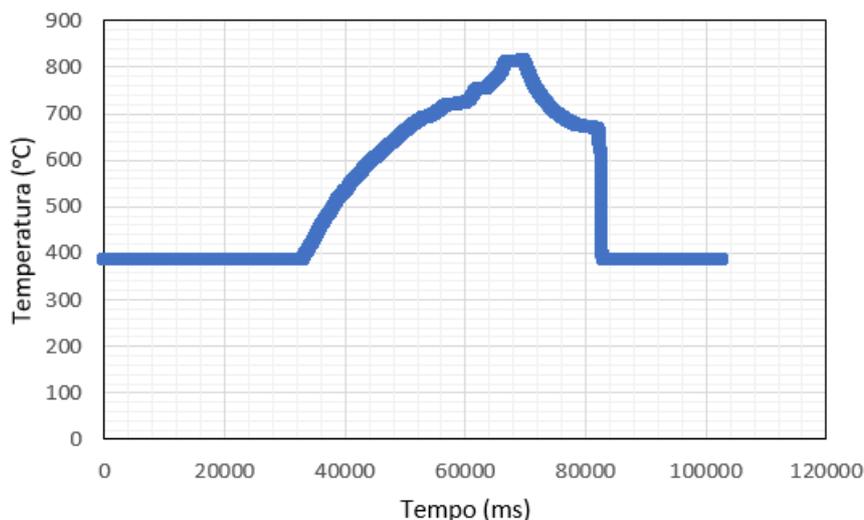


Fig. 13 - Ciclo térmico registado durante o ensaio de molhabilidade da liga 4900 sobre o aço 1.1191.

Pela análise do gráfico, verifica-se que inicialmente ocorre o aquecimento da amostra até uma temperatura de, aproximadamente, 820°C, seguindo-se o seu arrefecimento.

### 3.6. Brasagem

A brasagem das amostras foi efetuada por três processos distintos: tocha oxiacetilénica, indução e vácuo.

Nos processos de brasagem por indução e por tocha oxiacetilénica, procedeu-se à medição da evolução da temperatura em função do tempo, com recurso a um pirómetro *Optris - infrared thermometers*. Este equipamento encontra-se conectado a um computador que permite o registo dos ciclos térmicos. Na brasagem sob vácuo, é o próprio utilizador que estabelece o ciclo térmico a aplicar num dos controladores do forno.

#### 3.6.1. Brasagem por tocha oxiacetilénica

Utilizou-se uma tocha convencional (*SAF FRO VANAC 400c*), tendo a brasagem sido executada por soldadores com larga experiência. Os débitos de oxigénio e acetileno foram ajustados às dimensões dos componentes a brasar, de acordo com o *know-how* da empresa.

Sobre as superfícies do substrato de aço e da amostra de metal duro foi colocado o fluxo decapante com o objetivo de remover os óxidos e contaminantes

da superfície e promover a obtenção de uma junta brasada isenta de defeitos. Posteriormente, iniciou-se a brasagem com o aquecimento do substrato de aço. Ao atingir a temperatura de brasagem, colocou-se a amostra de metal duro sobre o substrato e, simultaneamente, foi-se adicionando algum fluxo para remover os óxidos e contaminantes remanescentes. Durante a brasagem exerceu-se, manualmente alguma pressão (carga  $\approx 130$  g) sobre o metal duro para promover uma união adequada, até a solidificação estar finalizada. Os componentes foram então colocados num forno, à temperatura de  $300^{\circ}\text{C}$ , para proporcionar o seu arrefecimento lento.

O arrefecimento lento dos conjuntos brasados é de extrema importância uma vez que inibe a possibilidade de tensionamento residual e a formação de fissuras, decorrentes da diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais brasados.

### 3.6.2. Brasagem por indução

O processo de brasagem por indução foi realizado num equipamento de indução *ASEA IEC 34-1* (Fig.14 a)). Antes da brasagem, procedeu-se à preparação do conjunto (aço/metal duro) bem como à seleção do indutor mais indicado, tendo em conta a geometria do conjunto a brasar (Fig.14 b)).



Fig. 14 - a) Máquina de indução; b) indutor desenvolvido.

O indutor, em cobre ( $\varnothing=10$  mm), foi preparado com a forma e dimensões ajustadas à geometria dos componentes.

Inicialmente procedeu-se à aplicação do fluxo, com o auxílio de um pincel, sobre a superfície do aço e do metal duro, de modo a cobrir a área a brasar. De seguida, colocou-se a liga de brasagem, com a geometria pretendida, sobre a área

do aço a brasar. Ao atingir-se a temperatura de brasagem, pressionou-se e deslizou-se ligeiramente a amostra de metal duro sobre o substrato, com o auxílio de uma espátula. Esta operação tem como objetivo garantir que a liga de brasagem se espalhe por toda a área a brasar.

Após a brasagem, desligou-se o equipamento de indução, tendo-se mantido a pressão (carga  $\approx 130$  g) sobre a amostra até completar a solidificação. Os componentes foram colocados no forno à temperatura de  $300^{\circ}\text{C}$ , tal como no processo de brasagem por tocha oxiacetilénica.

### 3.6.3. Brasagem sob vácuo

O ensaio de brasagem sob vácuo foi realizado num forno *SUPER VII - Vacuum Industries*, com resistências em grafite. Este forno possui um controlador *Honeywell* que permite definir previamente o ciclo térmico que se pretende implementar. Para além disso, tem também acoplado vários sensores que permitem o controlo da pressão no seu interior.

Após as operações de preparação das superfícies a brasar, procedeu-se à montagem do conjunto (Fig. 15) que foi colocado no forno. Este processo de brasagem é realizado em vácuo ( $10^{-2}$  torr), não havendo necessidade de utilizar fluxos de decapagem.

As amostras de metal duro foram posicionadas sobre o substrato de aço, tendo sido colocada, na interface, a liga de brasagem, com a geometria adequada. De seguida, foram igualmente colocados pesos (carga  $\approx 130$  g) sobre estas amostras. Os conjuntos assim preparados foram colocados no interior de uma caixa de grafite e, logo de seguida, no forno de vácuo (Fig. 15).



Fig. 15 - Sequência de preparação das amostras para brasagem sob vácuo.

Antes de iniciar o ciclo térmico, efetuou-se vácuo até atingir os  $5 \times 10^{-2}$  torr. A seguir, deu-se início ao ciclo térmico, previamente programado e ajustado aos

componentes a brasar. No gráfico da Fig. 16 são apresentados os diversos ciclos térmicos aplicados.

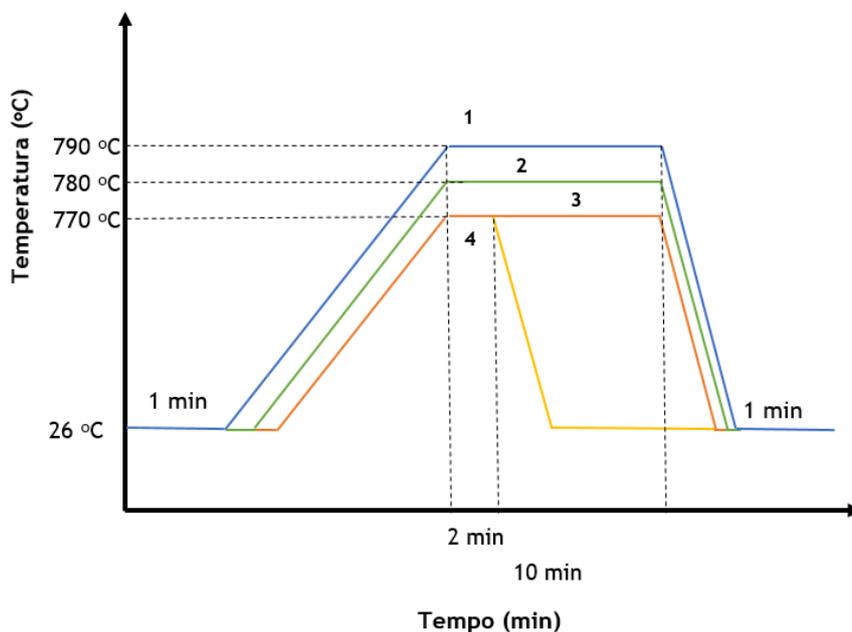


Fig. 16 - Ciclos térmicos aplicados no processo de brasagem sob vácuo.

O arrefecimento das peças processou-se de acordo com a inércia térmica do forno, tendo demorado, aproximadamente, 4 h.

### 3.7. Preparação das amostras após brasagem

Após brasagem, os componentes foram granalhados tendo-se seguido a sua retificação (Fig. 17a)) para as dimensões pretendidas para o ensaio de corte ( $\phi=20,20 \pm 0,01$  mm).

Foram igualmente maquinadas, lateralmente, duas faces planas na (Fig. 17b)) para permitir o controlo da qualidade e da espessura de solda bem como a análise metalográfica da junta brasada em microscopia ótica.

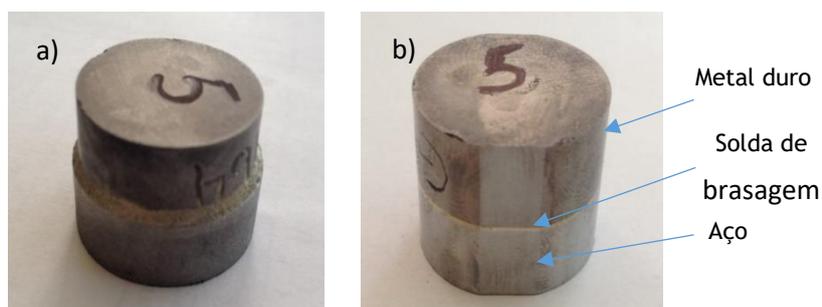


Fig. 17 - a) Componentes após brasagem, e b) componentes após retificação.

Estas faces foram maquinadas em duas etapas: inicialmente, procedeu-se ao desbaste com uma mó D.126 e, a seguir, ao seu acabamento com uma mó D.15. O bom acabamento concebido às amostras teve como objetivo facilitar a medição da espessura de solda e o controlo da qualidade da junta brasada. Para além disso, este acabamento também facilita a etapa de polimento, necessária para a análise metalográfica, realizada à *posteriori*.

### 3.8. Controlo da qualidade e da espessura da junta brasada

Nesta fase procedeu-se à visualização e controlo de todos os conjuntos brasados numa lupa *LEICA DMS 1000*. Esta visualização foi realizada com o objetivo de fazer uma análise preliminar aos conjuntos brasados e de medir a espessura, a uniformidade e a qualidade da junta brasada, nomeadamente ao nível da potencial presença de defeitos visuais e regularidade da junta obtida. Efetuou-se a medição (Fig. 18) da espessura da solda nas tais faces laterais que tinham sido previamente maquinadas, recorrendo a um *software* associado ao equipamento.

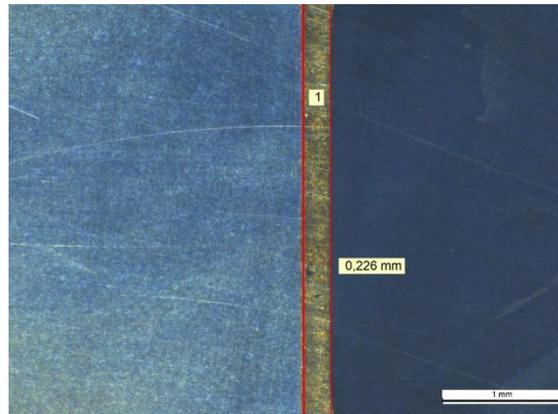


Fig. 18 - Exemplo de medição da espessura de uma junta brasada.

### 3.9. Medição de microdureza

Após a observação das amostras na lupa, procedeu-se à determinação da microdureza Vickers (HV 0,5). Este ensaio teve como objetivo avaliar a variação da dureza ao longo de toda a interface (aço/liga de brasagem/metal duro - Fig. 19) e confrontar os valores obtidos com os valores base do aço e do metal duro brasados.

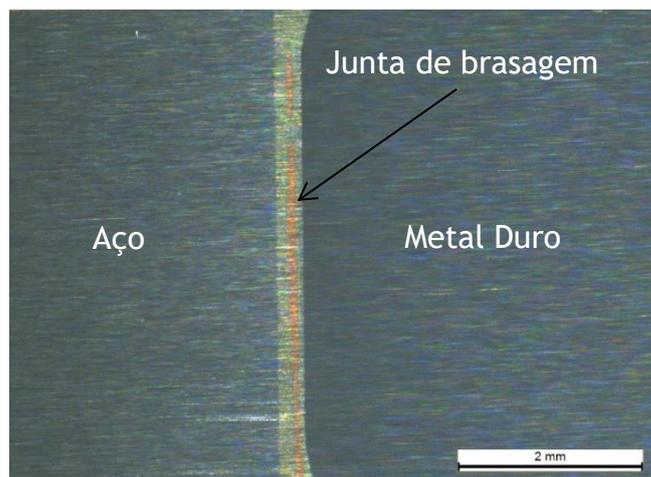


Fig. 19 - Interface de amostras brasadas.

Os ensaios foram realizados num equipamento *DURAMIN STRUERS*, tendo-se aplicado uma carga de 500 g.

### 3.10. Análise microestrutural

As superfícies a analisar foram alvo de preparação metalográfica: desbaste, seguido de polimento com pastas de diamante de 7 e 3  $\mu\text{m}$ ; procedeu-se posteriormente à sua observação num microscópio ótico *Leica DMLM*.

A análise microestrutural foi realizada ao longo de toda a interface (aço/liga de brasagem/metal duro) com o objetivo de avaliar a ligação entre os diferentes materiais e a respetiva microestrutura.

### 3.11. Ensaio de resistência ao corte

Com recurso a um dispositivo (Fig. 20 a)) desenvolvido especificamente para a realização deste tipo de ensaios, foram realizados ensaios de resistência ao corte sobre os componentes brasados pelos três processos utilizados. Procedeu-se ao correto posicionamento (Fig. 20 b)) das amostras no equipamento de modo a garantir que o punção atuasse paralelamente à junta brasada, evitando ao máximo a componente de flexão. O dispositivo foi acoplado a uma máquina de tração/compressão, *Shimadzu Autograph AG - 25 TA*, tendo sido aplicada uma força a uma velocidade constante de 2 mm/min.

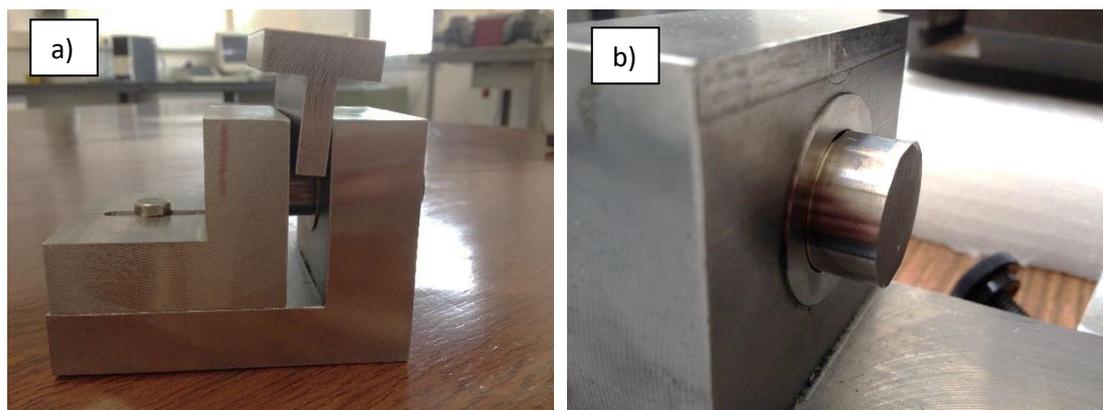


Fig. 20 - a) Dispositivo desenvolvido para ensaio de corte, e b) posicionamento das amostras.

Após os ensaios de corte, efetuou-se uma análise das superfícies de fratura com a lupa *LEICA DMS 1000*.

## 4. Apresentação e discussão de resultados

### 4.1. Caracterização das amostras de metal duro e de aço

#### 4.1.1. Metal duro

Na Tabela 6 são apresentados os valores relativos as propriedades físicas e à dureza das amostras de metal duro (GD10) utilizadas no processo de brasagem, sendo possível verificar que os valores apresentados se encontram na gama de valores padrão este grau.

Tabela 6 - Propriedades das amostras de metal duro GD10.

Nº	Ref <sup>a</sup>	Ø(mm)	Hc (Oe)	FG (%)	Densidade	Saturação magnética (emu/g)	Dureza, HV 30	Porosidade	Microestrutura
1	GD10-I49	20,65	226	5,3	14,82	145	1659	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
2	GD10-J41	20,7	185	5,5	14,88	150	1625	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
3	GD10-G31	20,6	218	5,1	14,83	148	1623	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
4	GD10-G53	20,7	210	5,3	14,85	148	1628	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
5	GD10-H54	20,7	193	4,8	14,83	147	1598	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
6	GD10-I60	20,7	219	4,7	14,87	136	1646	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
7	GD10-H64	20,7	203	5,5	14,81	147	1583	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
8	GD10-G32	20,7	226	4,7	14,79	136	1654	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
9	GD10-G72	20,8	201	5,6	14,81	143	1581	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
10	GD10-G57	20,7	204	5,7	14,81	151	1634	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
11	GD10-G19	20,6	240	4,7	14,96	138	1647	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
12	GD10-I4	20,7	205	5,6	14,84	148	1632	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
13	GD10-I53	20,7	214	5,2	14,86	144	1656	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
14	GD10-L13	20,8	217	5,1	14,88	142	1629	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
15	GD10-L13	20,8	214	5,2	14,86	147	1589	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
16	GD10-L13	20,8	203	4,9	14,79	141	1635	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
17	GD10-L13	20,8	209	5,3	14,81	145	1617	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea

Na Fig. 21 é apresentada a microestrutura representativa das amostras de metal duro (GD10) analisadas.

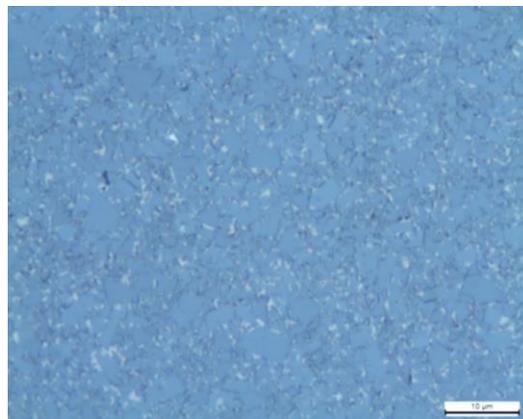


Fig. 21 - Microestrutura característica de uma amostra de metal duro GD10.

No que diz respeito à microestrutura, é possível observar que a mesma se encontra isenta de fase eta bem como de grafite, apresentando um tamanho de grão bastante uniforme. As restantes amostras de metal duro apresentavam microestruturas semelhantes e igualmente isentas de defeitos.

Na Tabela 7 são compilados os resultados de análise química das amostras de metal duro (GD10) utilizadas nos ensaios.

Tabela 7 - Composição química (% pond.) das amostras de metal duro GD10.

Ref <sup>a</sup>	W	Co	Ni	Nb	Fe	V
GD10-I49	92,44	6,57	0,376	0,079		
GD10-J41	92,19	7,11	0,329	0,082		
GD10-G31	92,31	6,85	0,372	0,087		
GD10-G53	92,59	6,58	0,346	0,087		0,167
GD10-H54	92,19	6,83	0,345	0,067	0,087	
GD10-I60	92,33	6,7	0,394	0,069		0,18
GD10-H64	92,37	6,63	0,532	0,067	0,069	
GD10-G32	92,45	6,17	0,595	0,086		
GD10-G72	92,35	6,34	0,697	0,073		0,167
GD10-G57	92,31	6,85	0,381	0,066	0,058	
GD10-G19	92,81	6,01	0,591	0,063		
GD10-I4	92,41	6,5	0,441	0,081	0,11	0,215
GD10-I53	93,15	6,25	0,374	0,069		
GD10-L13	93,03	6,46	0,365	0,073		
GD10-L13	92,97	6,48	0,379	0,082		
GD10-L13	93,30	6,51	0,371	0,091		
GD10-L13	92,95	6,47	0,412	0,065		

Constata-se que os valores se encontram dentro da gama de valores padrão para os graus em questão.

A Tabela 8 apresenta os valores correspondentes às propriedades físicas e à dureza das amostras de metal duro GD20 utilizadas nos ensaios de brasagem.

Tabela 8 - Propriedades das amostras de metal duro GD20.

Nº	Ref <sup>a</sup>	Ø(mm)	HC (Oe)	FG (%)	Densidade	Saturação magnética (emu/g)	Dureza, HV30	Porosidade	Microestrutura
1	GD20-F30	20,7	164	10	14,44	141	1413	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
2	GD20-I5	20,9	154	10,2	14,45	136	1403	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
3	GD20-I14	20,85	176	8,7	14,49	133	1419	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
4	GD20-G22	20,85	161	10	14,46	140	1415	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
5	GD20-H36	20,85	147	9,5	14,43	143	1366	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
6	GD20-H42	20,85	137	10,5	14,43	143	1358	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
7	GD20-H15	20,65	135	9,8	14,43	143	1368	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
8	GD20-J30	20,7	127	9,9	14,45	144	1380	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
9	GD20-G37	20,75	159	9,2	14,46	141	1381	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
10	GD20-H12	20,65	160	9,4	14,4	140	1393	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
11	GD20-J3	20,75	161	10	14,47	135	1349	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
12	GD20-I26	20,8	149	9	14,47	138	1362	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
13	GD20-H35	20,85	138	9,7	14,4	141	1402	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
14	GD20-L5	20,8	140	10,3	14,42	148	1410	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
15	GD20-L5	20,8	141	10,4	14,41	147	1408	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
16	GD20-L5	20,8	139	9,8	14,39	140	1394	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea
17	GD20-L5	20,8	142	10,2	14,43	145	1402	A <sub>00</sub> B <sub>00</sub> C <sub>00</sub>	Homogénea

Na Fig. 22 é apresentada a microestrutura representativa das amostras de metal duro (GD20) analisadas. Constata-se que a microestrutura não apresenta precipitados de fase- $\eta$  nem de grafite. As restantes amostras de GD20 analisadas apresentavam uma microestrutura semelhante.

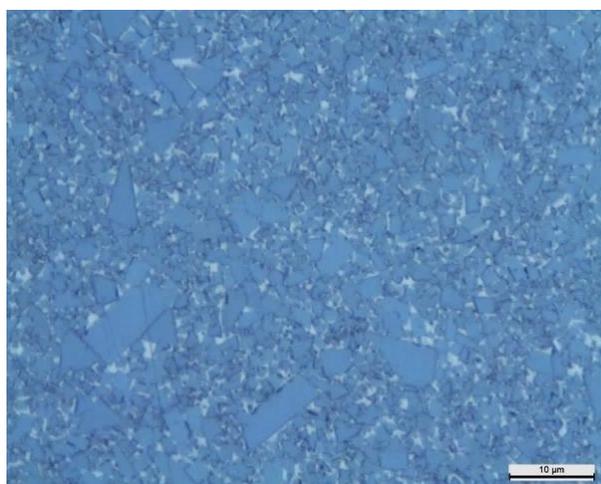


Fig. 22- Microestrutura característica de uma amostra de metal duro GD20.

Os valores relativos à análise química das amostras de metal duro (GD20) utilizadas nos ensaios de brasagem são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química (% pond.) das amostras de metal duro GD20.

Ref <sup>a</sup>	W	Co	Ni	Nb	Fe	Cr	V
GD20-F30	88,68	10,35	0,46	0,063			
GD20-I5	88,39	10,27	0,652	0,073	0,094	0,119	
GD20-I14	88,79	10,35	0,393	0,073	0,064		
GD20-G22	88,5	10,33	0,511	0,067	0,055		0,178
GD20-H36	88,43	9,86	0,936	0,075			
GD20-H42	88,64	10,57	0,49	0,057			
GD20-H15	88,3	10,46	0,621	0,083	0,066		
GD20-J30	88,48	10,61	0,545	0,064	0,086		
GD20-G37	88,1	10,74	0,451	0,097			
GD20-H12	88,25	9,9	1,61	0,056			
GD20-J3	88,63	10,05	0,811	0,086	0,069		
GD20-I26	88,65	10,41	0,487	0,065	0,078		
GD20-H35	88,17	10,69	0,64	0,055			
GD20-L5	88,64	10,63	0,59	0,068			
GD20-L5	88,73	10,58	0,67	0,072			
GD20-L5	88,67	10,35	0,46	0,063			
GD20-L5	88,96	10,46	0,73	0,081			

#### 4.1.2. Aço

Na Tabela 10 é apresentada a dureza e a densidade dos aços utilizados no processo de brasagem bem como a respetiva composição química.

Tabela 10 - Propriedades e composição química dos aços utilizados.

Aço	Dureza (HRC)	Densidade	Composição química (% pond.)							
			Cr	Mn	Ni	Si	Mo	Cu	Fe	S
1.1191	18	7,84	0,351	0,706	-	0,541	-	-	97,53	0,037
1.2738	29	7,80	1,83	1,46	0,983	0,384	0,185	0,074	94,99	-

Verifica-se que as propriedades e a composição química dos aços, estão de acordo com os valores da bibliografia (EN ISO 4957) [14].

Na Fig. 23, são apresentadas as microestruturas dos aços 1.2738 e 1.1191.

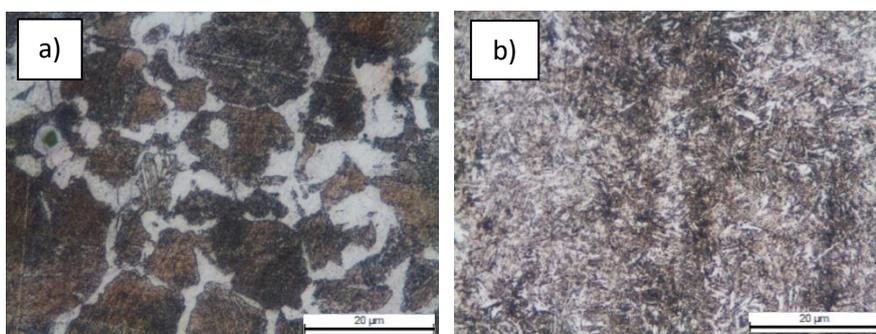


Fig. 23 - Microestrutura dos aços: a) 1.1191, e b) 1.2738.

A microestrutura relativa ao aço 1.1191, em que se identifica perfeitamente a ferrite (cor clara) e a perlite (cor mais escura), é típica de um aço ao carbono recozido. Relativamente ao aço 1.2738, regista-se a presença de martensite, característica de um aço pré-tratado.

A fim de facilitar a designação das amostras durante a restante apresentação e discussão dos resultados será adotada uma designação que permite identificar o processo de brasagem/metal duro/aço/liga de brasagem, com base na nomenclatura apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Nomenclatura adotada na identificação das amostras.

Processo de brasagem	Metal duro	Aço	Liga de brasagem
Tocha oxiacetilénica - T	GD10	1.1191	4900
			49/Cu
Indução - I	GD20	1.2738	6488
Vácuo - V			64/Cu

Assim, por exemplo, a identificação de uma amostra de metal duro GD10, brasada por tocha oxiacetilénica, sob um substrato de aço 1.1191, com a liga de brasagem 4900 será a seguinte: T/GD10/1.1191/4900.

#### 4.2. Perfis de temperatura

O registo dos parâmetros de brasagem (temperatura e tempo) tinha como principal objetivo o controlo dos ciclos térmicos dos processos de brasagem por tocha oxiacetilénica e indução; os gráficos da Fig. 24 ilustram os ciclos térmicos então registados durante a brasagem das amostras de metal duro sobre o aço 1.1191, utilizando duas ligas de brasagem distintas (4900 e 49/Cu).

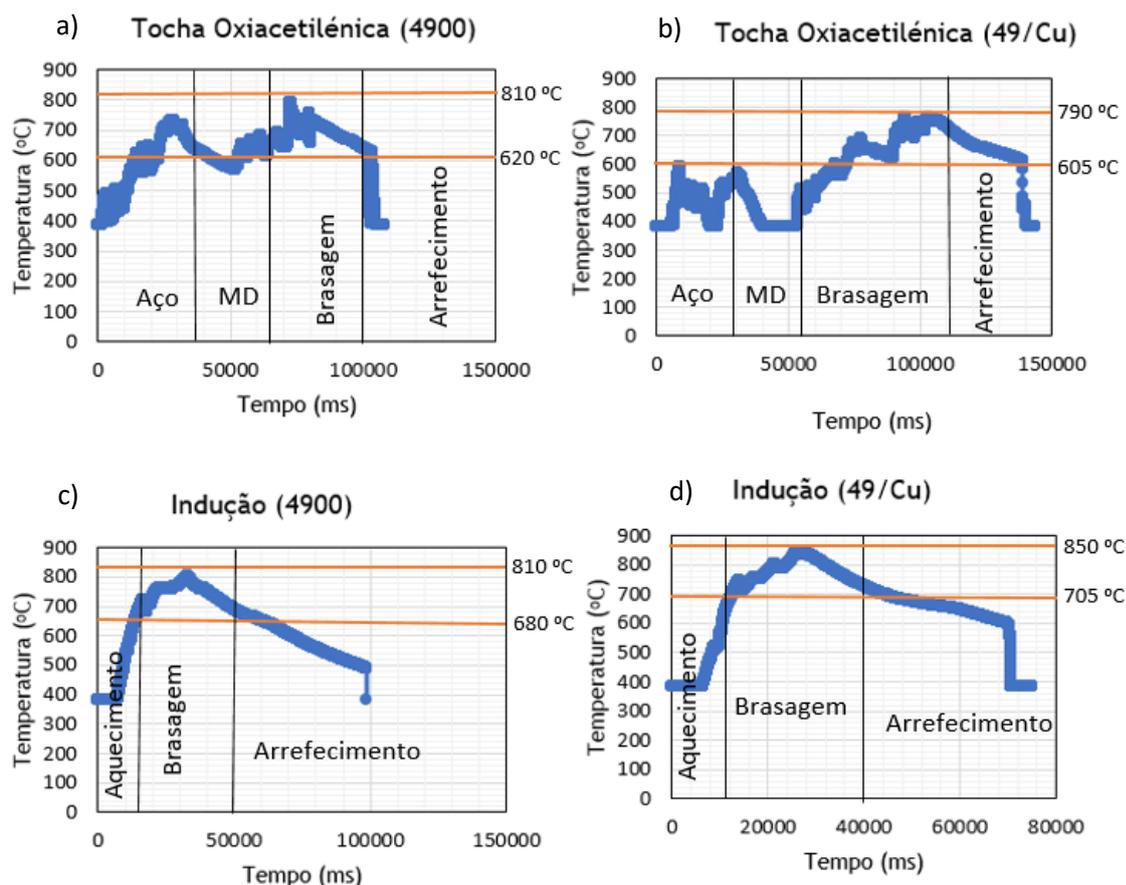


Fig. 24 - Ciclos térmicos dos processos de brasagem sobre substrato de aço 1.1191: a) tocha oxiacetilénica (4900); b) tocha oxiacetilénica (49/Cu); c) indução (4900), e d) indução (49/Cu).

Da análise destes gráficos é possível verificar que, na brasagem por tocha oxiacetilénica, o aquecimento inicial do substrato de aço é bastante heterogéneo e irregular, havendo constantes oscilações de temperatura. Este aquecimento heterogéneo e irregular deve-se ao facto de durante o processo de brasagem o operador movimentar a tocha em redor da amostra. Posteriormente, regista-se uma descida de temperatura mais significativa, relativa ao aquecimento da amostra de metal duro que, nesta fase, ainda não se encontra em contacto com o substrato. De seguida, verifica-se uma nova subida da temperatura devido à união das amostras, atingindo-se então o valor máximo de temperatura. Durante a brasagem, a temperatura oscila entre os 605°C e os 810°C, aproximadamente.

Na brasagem por indução, é possível verificar que os perfis de temperatura são bastante mais homogéneos. Para além disso, o aquecimento é mais rápido e as oscilações de temperatura que se registam são menores. Neste caso, a temperatura oscila, ao longo da operação, entre os 720°C e os 850°C, aproximadamente.

De realçar que os ciclos térmicos obtidos para cada um dos processos de brasagem são semelhantes, independentemente da liga de brasagem utilizada.

Na Fig. 25 são apresentados os ciclos térmicos registados nos processos de brasagem por tocha oxiacetilénica e por indução, de amostras de metal duro sobre substrato de aço 1.2738, utilizando igualmente as ligas de brasagem 4900 e 49/Cu.

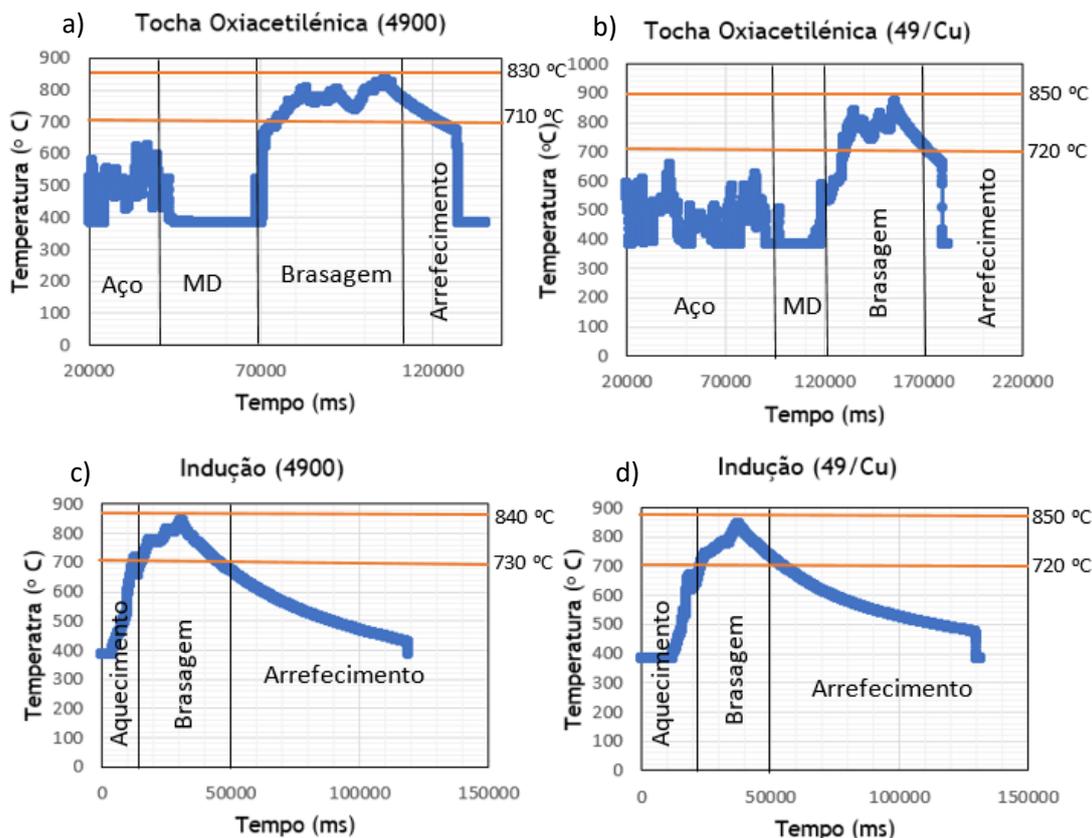


Fig. 25 - Ciclos térmicos dos processos de brasagem sobre substrato de aço 1.2738: a) tocha oxiacetilénica (4900); b) tocha oxiacetilénica (49/Cu); c) indução (4900), e d) indução (49/Cu).

Verifica-se que os perfis de temperatura registados na brasagem por tocha oxiacetilénica são mais heterogéneos, e com mais oscilações, do que os dos ensaios de brasagem por indução. Na brasagem por tocha oxiacetilénica, a temperatura de brasagem oscila entre os 710°C e os 850°C, aproximadamente. Por sua vez, na brasagem por indução, a temperatura oscila entre os 720°C e os 850°C, aproximadamente.

De salientar ainda que o aquecimento do aço 1.1191 se processa mais rapidamente do que o do aço 1.2738, devido à diferença entre as suas condutividades térmicas. O registo da temperatura durante a realização dos ensaios de brasagem é de particular interesse nestes processos pois permite ter um maior controlo do

processo, conferindo-lhe um carácter mais técnico-científico. De realçar que, até ao momento e na maior parte dos casos, estes processos são realizados de forma empírica, tendo apenas como base a experiência do soldador.

A Fig. 26 apresenta o diagrama de equilíbrio do sistema binário Ag-Cu, onde é assinalada a composição básica, *i.e.*, em termos dos dois elementos que se apresentam em teores mais elevados, das ligas de brasagem utilizadas bem como as suas temperaturas de trabalho. De salientar que a análise que possa ser feita a partir deste diagrama é bastante simplista e tem apenas como objetivo prever o comportamento das ligas durante a brasagem. Uma análise mais profunda teria que incidir sobre diagramas de equilíbrio ternários, e até mesmo de ordem superior, praticamente inexistentes nas revistas de maior acessibilidade.

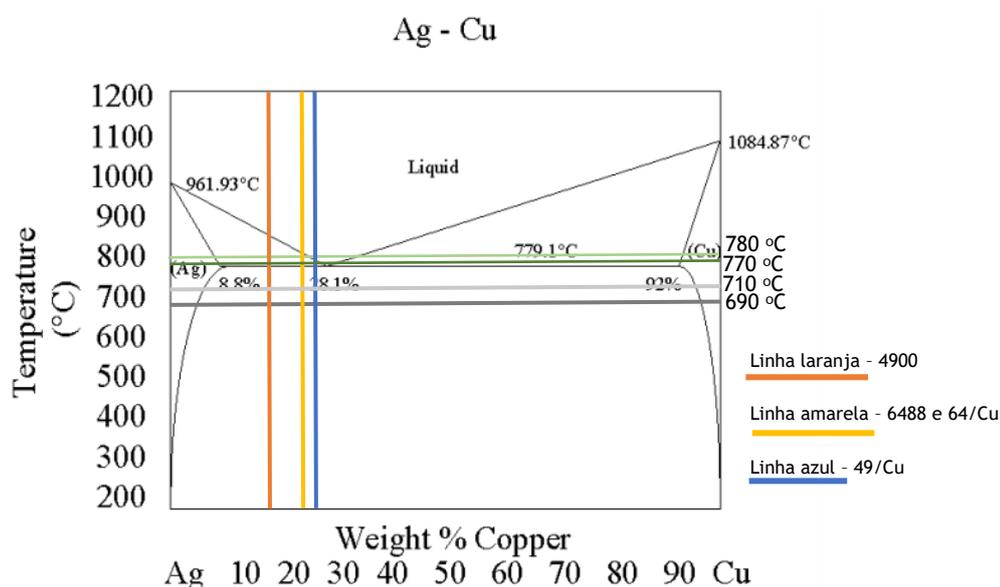


Fig. 26 - Diagrama de equilíbrio do sistema binário Ag-Cu [15].

Para a liga 4900, tendo em consideração as temperaturas máximas registadas durante o processo de brasagem (Figs. 24 e 25) e a temperatura de trabalho da liga ( $\approx 690^\circ\text{C}$ ), verifica-se, de acordo com o diagrama de equilíbrio, que, à temperatura de brasagem, se está na zona sólido/líquido. Neste ponto, a liga deve possuir a consistência necessária para permanecer na junta e não escorrer. Se a liga de brasagem estivesse completamente líquida, haveria uma maior fluidez e a permanência na junta de brasagem seria difícil.

As ligas 6488 e 64/Cu, utilizadas na brasagem sob vácuo, têm temperaturas de brasagem de, aproximadamente,  $770^\circ\text{C}$  e  $780^\circ\text{C}$ , respetivamente. Estas temperaturas estão situadas muito próximo da linha de liquidus do diagrama. Nestas

condições é muito importante um controlo muito apertado da temperatura de brasagem para que a liga se mantenha na junta sem escorrer, dando origem a espessuras de solda variáveis e a fenómenos relacionados com a dissolução/precipitação do filme de Cu (64/Cu).

Por sua vez a liga 49/Cu, tem uma temperatura de brasagem de  $\approx 710^{\circ}\text{C}$ , campo solidus no diagrama. No entanto, a brasagem desta liga ocorreu à temperatura de  $790^{\circ}\text{C}$  e  $850^{\circ}\text{C}$  com tocha oxiacetilénica e por indução, respetivamente. A esta temperatura de trabalho, as ligas estão completamente líquidas o que dificulta a sua permanência na junta. Contudo, este efeito será atenuado pela rapidez do processo.

### 4.3. Qualidade e espessura da junta brasada

O controlo da qualidade e da espessura da junta brasada foi efetuado sobre todas as amostras obtidas. Neste capítulo, apresentam-se apenas alguns exemplos, referentes a cada um dos processos de brasagem utilizados.

A Fig. 27 apresenta um conjunto de imagens da junta de brasada relativa à amostra T/GD20/1.1191/49Cu.

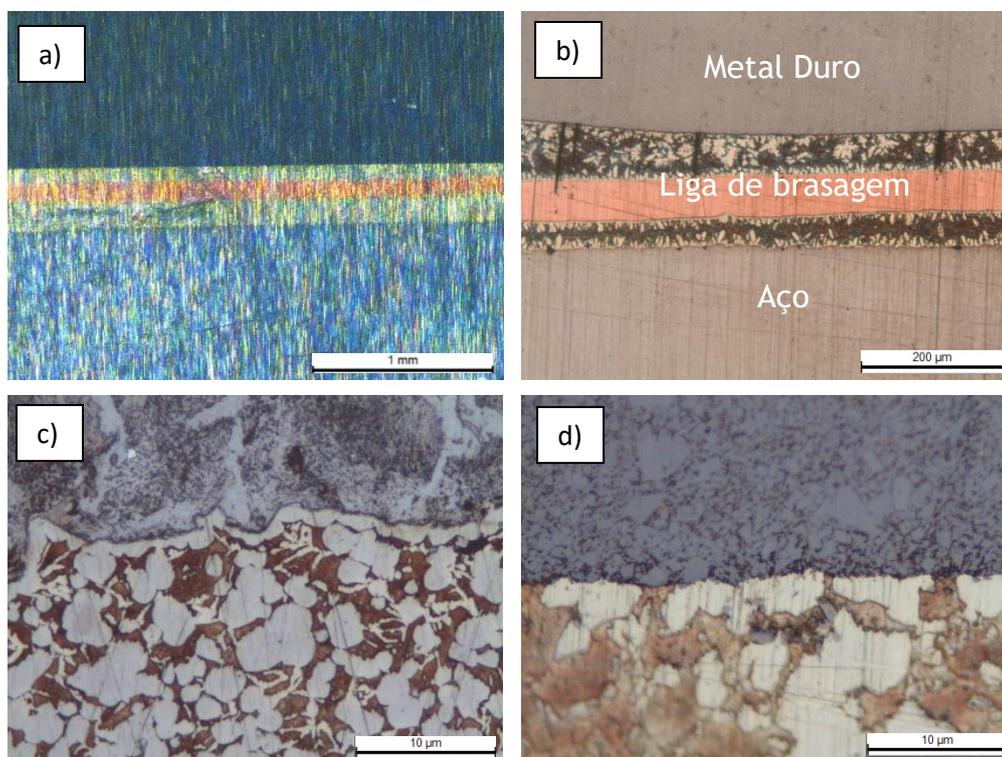


Fig. 27 - Imagens da junta brasada: a) observação em lupa; b) observação em microscópio ótico; c) interface aço-liga de brasagem; d) interface metal duro-liga de brasagem.

Pode-se observar que a espessura da junta brasada é bastante uniforme e regular. Para além disso, identifica-se perfeitamente a camada intermédia de Cu, característica deste tipo de liga. Constata-se ainda que existe uma correta união da liga de brasagem com os materiais adjacentes.

Na Fig. 28 são apresentadas diversas imagens relativas à amostra I/GD10/1.2738/49Cu.

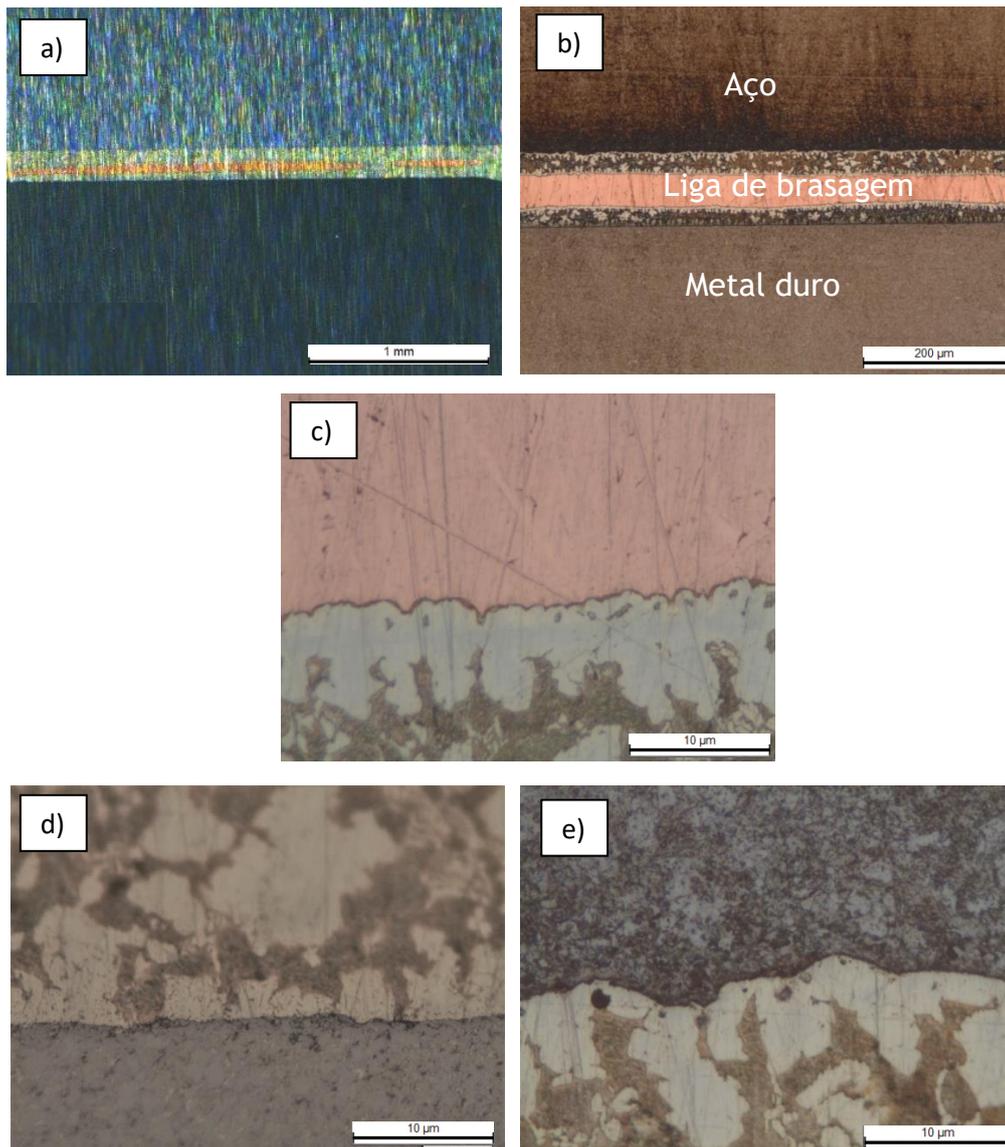


Fig. 28 - Imagens da junta brasada: a) observação em lupa; b) observação em microscópio ótico; c) liga de brasagem Cu-Ag; d) interface liga de brasagem-metal duro; e) interface aço-liga de brasagem.

Pela análise da Fig. 28 a) é possível observar que a junta brasada se apresenta regular, de espessura constante, e, aparentemente, isenta de defeitos. As restantes imagens permitem verificar a presença da camada de Cu bem definida, característica

do tipo de liga de brasagem utilizada, bem definida, e uma correta ligação entre a liga de brasagem e os materiais adjacentes.

Na Fig. 29 são apresentadas um conjunto de imagens respeitantes à amostra V/GD20/1.2738/6488.

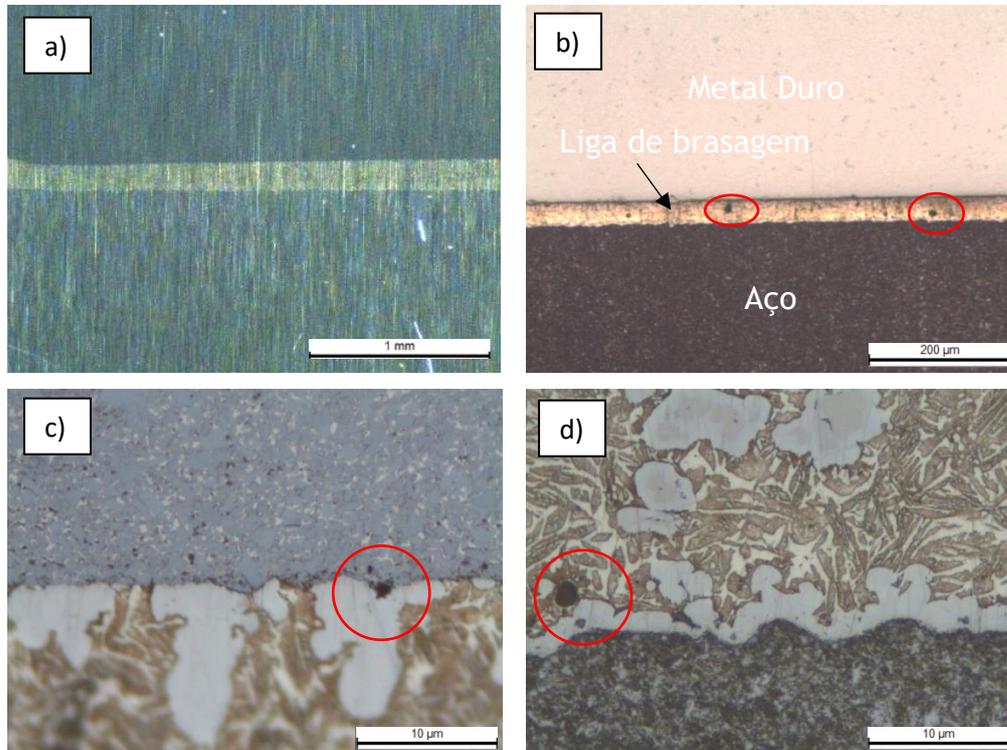


Fig. 29 - Imagens da junta brasada: a) observação em lupa; b) observação em microscópio ótico; c) interface liga de brasagem-metal duro; d) interface liga de brasagem-aço.

É possível verificar que a junta brasada é bem definida e uniforme. Numa primeira observação à lupa (Fig. 29 a)), a junta brasada aparenta estar isenta de defeitos e porosidades. No entanto, após a observação no microscópio ótico a diferentes ampliações, é notória a presença de alguns poros, devidamente assinalados nas imagens (Figs. 29 c) e 29 d)).

Na Fig. 30 são apresentadas imagens da amostra V/GD10/1.1191/64Cu, alvo de brasagem a 790° C durante 10 min.

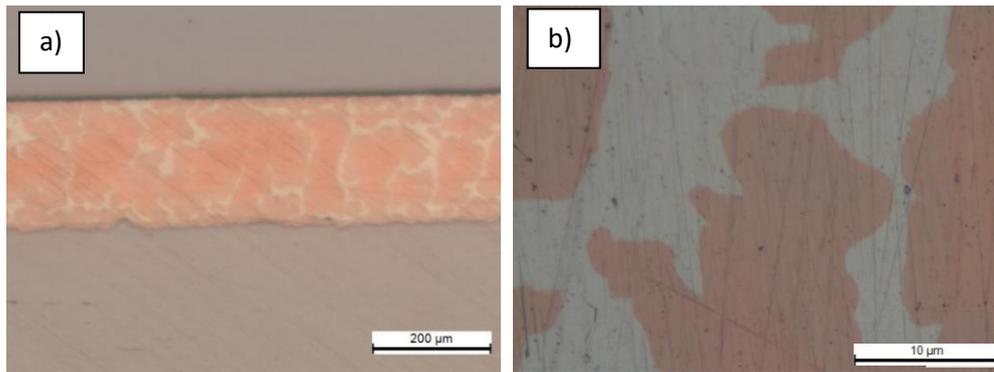


Fig. 30 - Imagens da junta brasada registadas em microscópio ótico.

Nestas imagens verifica-se que, ao contrário do que seria expectável, o Cu da camada intermédia da liga de brasagem não se apresenta segundo uma faixa bem definida. Consequentemente, as eventuais tensões térmicas que possam surgir não serão aliviadas tão facilmente. Este fenómeno deve-se, eventualmente, à temperatura/tempo de brasagem excessivo, provocando uma dissolução, difusão e precipitação do Cu, o que destrói a faixa inicial deste metal [16, 17].

Foi então efetuado um novo ensaio, aplicando uma temperatura de brasagem mais baixa (780 °C). Na Fig. 31 são apresentadas imagens relativas à microestrutura da amostra V/GD10/1.1191/64Cu, obtidas após este ensaio.

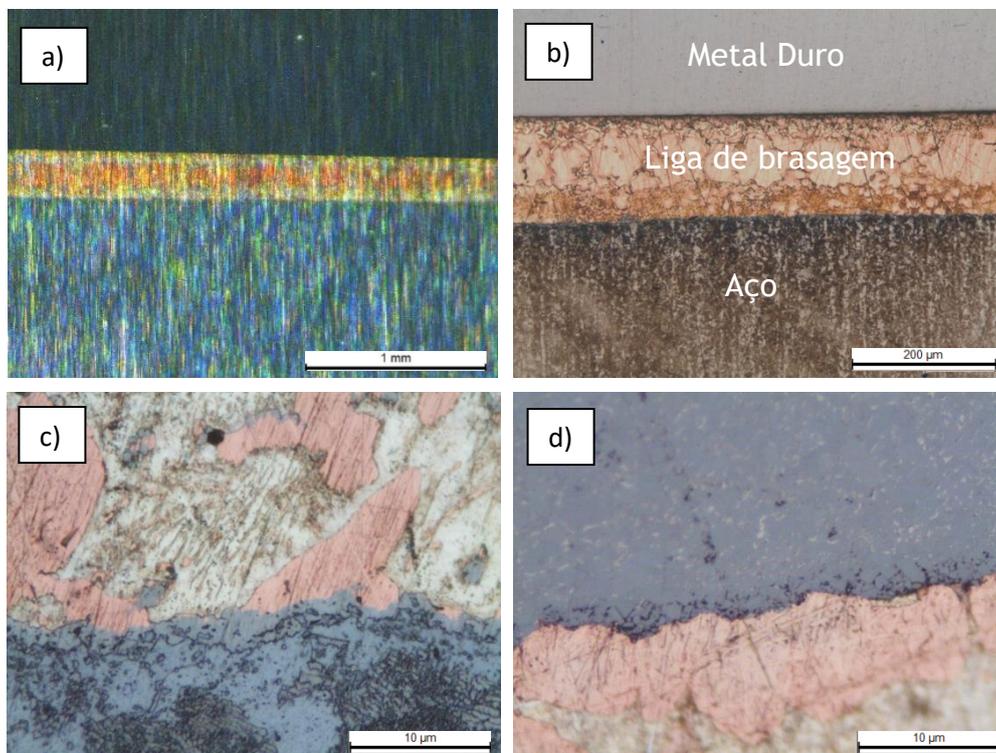


Fig. 31 - Imagens da junta de brasada: a) observação em lupa; b) observação em microscópio ótico; c) interface liga de brasagem-aço; d) interface metal duro-liga de brasagem.

Da análise das imagens, constata-se que ocorreu novamente a dissolução e difusão do Cu ao longo da junta brasada, e a sua posterior precipitação sob a forma de dendrites.

Como consequência do resultado anterior, decidiu-se realizar um novo ensaio, utilizando uma temperatura de brasagem ainda mais baixa ( $770^{\circ}\text{C}$ ) tendo-se mantido a duração do ciclo (10 min). Na Fig. 32 são apresentadas as microestruturas então obtidas referentes à amostra V/GD10/1.1191/64Cu.

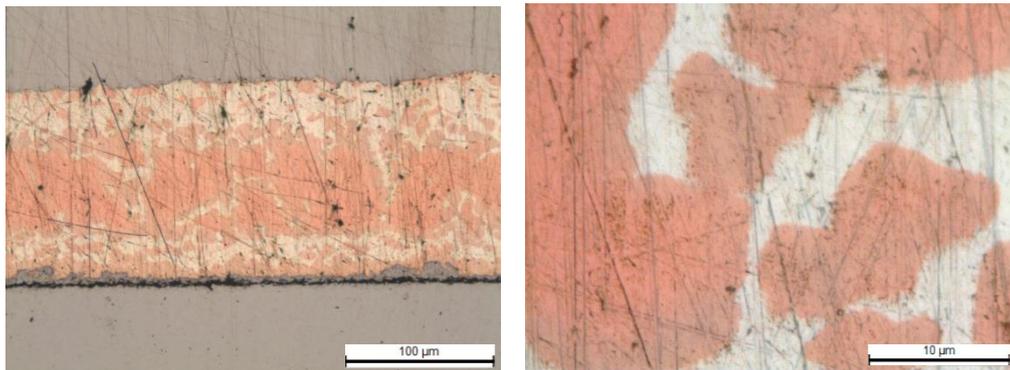


Fig. 32 - Imagens da junta brasada registadas em microscópio ótico.

Novamente verificou-se ter ocorrido a dissolução e difusão do Cu. Face aos resultados obtidos, realizou-se um último ensaio à mesma temperatura de brasagem ( $770^{\circ}\text{C}$ ), mas encurtando o ciclo para 2 min.

Na Fig. 33 são apresentadas as microestruturas relativas à amostra submetida a este ciclo.

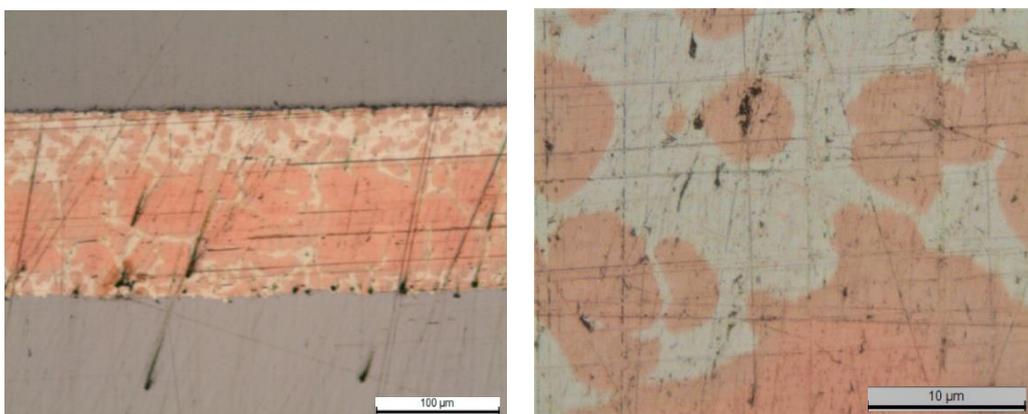


Fig. 33 - Imagens da junta brasada registadas em microscópio ótico.

A diminuição do tempo de brasagem não evitou a ocorrência da dissolução e difusão do Cu. Verifica-se que existe um menor crescimento do cobre que se difunde

para as interfaces (aço-liga e metal duro-liga). Deste modo, pode-se então inferir que para evitar a ocorrência deste fenómeno ter-se-ia de utilizar uma temperatura de brasagem ainda mais baixa.

A Tabela 12 apresenta os valores relativos à espessura da junta de união das amostras brasadas pelos diferentes processos de brasagem, utilizando as ligas 49/Cu e 64/Cu, sobre substratos de aço 1.2738.

Tabela 12 - Espessura da junta de união das amostras brasadas com as ligas 49/Cu e 64/Cu sobre substratos de aço 1.2738.

Amostra	Espessura da junta (mm)
T/GD10/1.2738/49Cu	0,21 ± 0,07
T/GD20/1.2738/49Cu	0,37 ± 0,01
I/GD10/1.2738/49Cu	0,19 ± 0,01
I/GD20/1.2738/49Cu	0,22 ± 0,01
V/GD10/1.2738/64Cu (790°C)	0,27 ± 0,01
V/GD10/1.2738/64Cu (780°C)	0,28 ± 0,01
V/GD20/1.2738/64Cu (780°C)	0,29 ± 0,01

Por sua vez, a Tabela 13 apresenta os valores de espessura da junta de união das amostras brasadas pelos diferentes processos de brasagem, sobre substrato de aço 1.2738, utilizando as ligas 4900 e 6488.

Tabela 13 - Espessura da junta de união das amostras brasadas com as ligas 4900 e 6488 sobre substratos de aço 1.2738.

Amostra	Espessura da junta (mm)
T/GD10/1.2738/4900	0,08 ± 0,02
T/GD20/1.2738/4900	0,05 ± 0,01
I/GD10/1.2738/4900	0,05 ± 0,02
I/GD20/1.2738/4900	0,10 ± 0,01
V/GD10/1.2738/6488 (790°C)	0,10 ± 0,01
V/GD10/1.2738/6488 (780°C)	0,06 ± 0,01
V/GD20/1.2738/6488 (780°C)	0,16 ± 0,01

Da análise das Tabelas 12 e 13 verifica-se que a espessura das juntas brasadas varia entre os 0,05 e os 0,37 mm. Os valores obtidos são mais próximos do que é considerado ideal (0,1-0,25 mm) quando a liga de brasagem é aplicada sobre a forma de folha, nomeadamente com as ligas 49/Cu e 64/Cu. O mesmo não se verifica com a liga 4900, que é aplicada sob a forma de vareta, pelo que o controlo da espessura da junta torna-se mais difícil pois, o preenchimento da junta ocorre capilaridade, existem maiores oscilações de temperatura e não é possível controlar a força manual que é aplicada durante a solidificação.

Por outro lado, na brasagem sob vácuo, as ligas de brasagem (6488 e 64/Cu), são aplicadas sob a forma de folha de 0,2 e 0,3 mm de espessura, respetivamente, o que garante a uniformidade da espessura da solda.

Na Tabela 14 são apresentados os valores relativos à espessura das juntas de união das amostras brasadas com as ligas 49/Cu e 64/Cu sobre substratos de aço 1.1191.

Tabela 14 - Espessura das juntas de união das amostras brasadas com as ligas 49/Cu e 64/Cu sobre substratos de aço 1.1191.

Amostra	Espessura da junta (mm)
T/GD10/1.1191/49Cu	0,27 ± 0,07
T/GD20/1.1191/49Cu	0,25 ± 0,01
I/GD10/1.1191/49Cu	0,16 ± 0,01
I/GD20/1.1191/49Cu	0,23 ± 0,01
V/GD10/1.1191/64Cu (780°C)	0,30 ± 0,01
V/GD20/1.1191/64Cu (780°C)	0,29 ± 0,01

A Tabela 15 apresenta os valores da espessura da junta de união para as amostras brasadas com as ligas 4900 e 6488 sobre substratos de aço 1.1191.

Tabela 15 - Espessura das juntas de união das amostras brasadas com as ligas 4900 e 6488 sobre substratos de aço 1.1191.

Amostra	Espessura da junta (mm)
T/GD10/1.1191/4900	0,09 ± 0,02
T/GD20/1.1191/4900	0,08 ± 0,01
I/GD10/1.1191/4900	0,05 ± 0,01
I/GD20/1.1191/4900	0,17 ± 0,01
V/GD10/1.1191/6488 (780°C)	0,14 ± 0,01
V/GD20/1.1191/6488 (780°C)	0,13 ± 0,01

Pela análise das Tabelas 14 e 15, verifica-se que a espessura das juntas de brasagem varia entre os 0,05 e os 0,30 mm. Tal como referido, as espessuras das juntas brasadas aproximam-se mais do que é considerado ideal quando se utilizam ligas de brasagem sob a forma de folha, nomeadamente com as ligas 49/Cu e 64/Cu.

#### 4.4. Perfis de microdureza

Foram traçados perfis de microdureza em três zonas correspondentes a: substrato de aço, liga de brasagem e metal duro.

Os gráficos das Figs. 34 e 35 apresentam, respetivamente, os perfis de dureza obtidos sobre as amostras de metal duro GD10 e GD20 brasadas, pelos três processos disponíveis na empresa, sobre substratos de aço 1.1191.

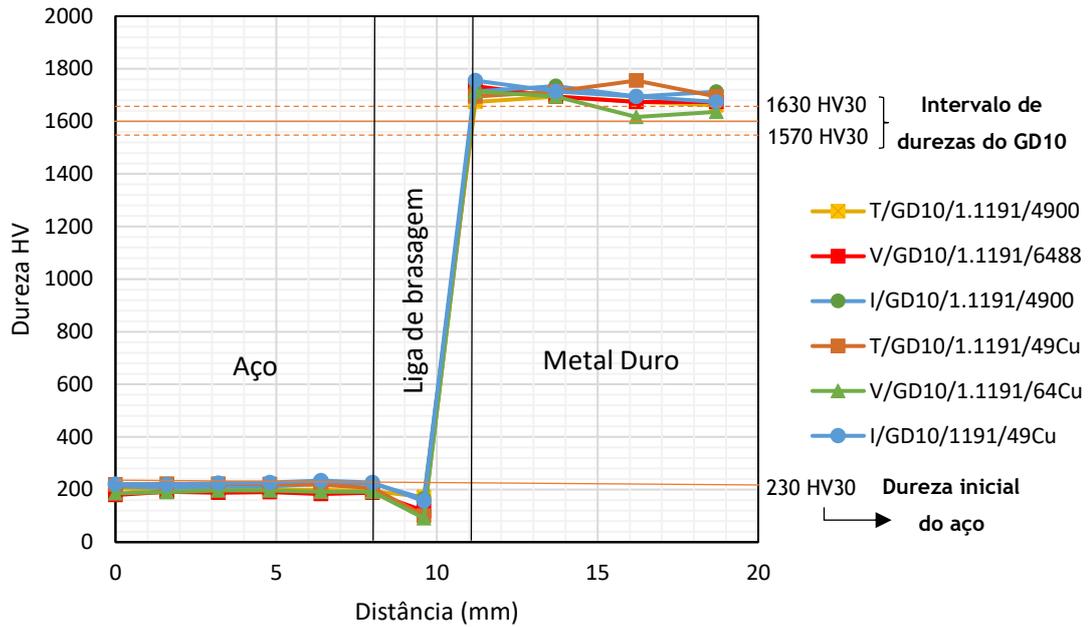


Fig. 34 - Perfis de microdureza (HV 0,5) obtidos sobre as amostras GD10/1.1191, brasadas pelos três processos disponíveis na DURIT.

No que diz respeito às amostras GD10/1.1191, os valores obtidos permitem identificar perfeitamente as três zonas anteriormente referidas, não sendo de registar desvios significativos relativamente aos valores de dureza iniciais de cada um dos materiais utilizados no processo.

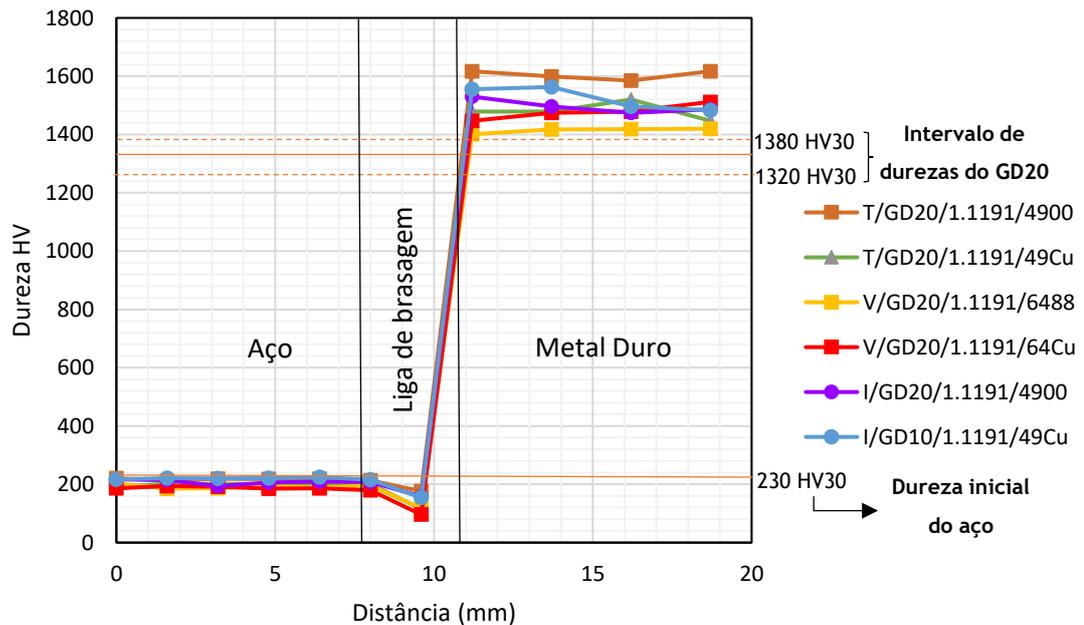


Fig. 35 - Perfis de microdureza (HV 0,5) obtidos sobre as amostras GD20/1.1191, brasadas pelos três processos disponíveis na DURIT.

Tal como no gráfico da figura anterior, são perfeitamente identificáveis três zonas com valores de microdureza distintos. De realçar que, na zona correspondente ao metal duro, se registaram oscilações de valores de microdureza entre as diferentes amostras; para além disso, obtiveram-se valores superiores aos inicialmente determinados para o grau GD20.

Finalmente, os gráficos das Figs. 36 e 37 apresentam, respetivamente, os perfis de dureza das amostras de metal duro GD10 e GD20 brasadas, pelos três processos disponíveis na empresa, sobre substratos de aço 1.2738.

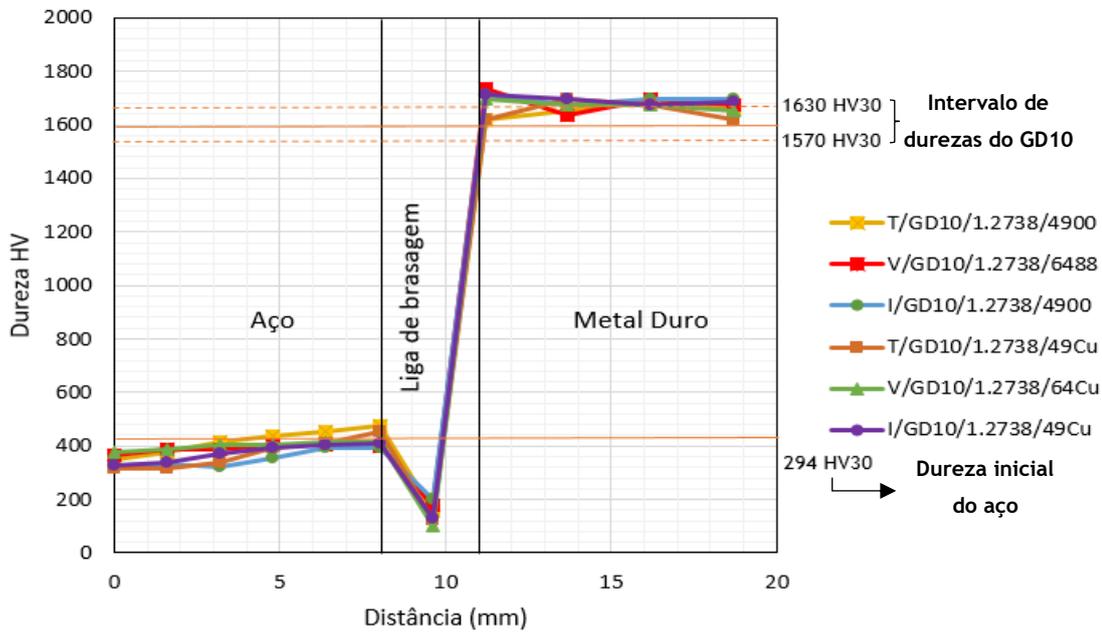


Fig. 36 - Perfis de microdureza (HV 0,5) obtidos sobre as amostras GD10/1.2738, brasadas pelos três processos disponíveis na DURIT.

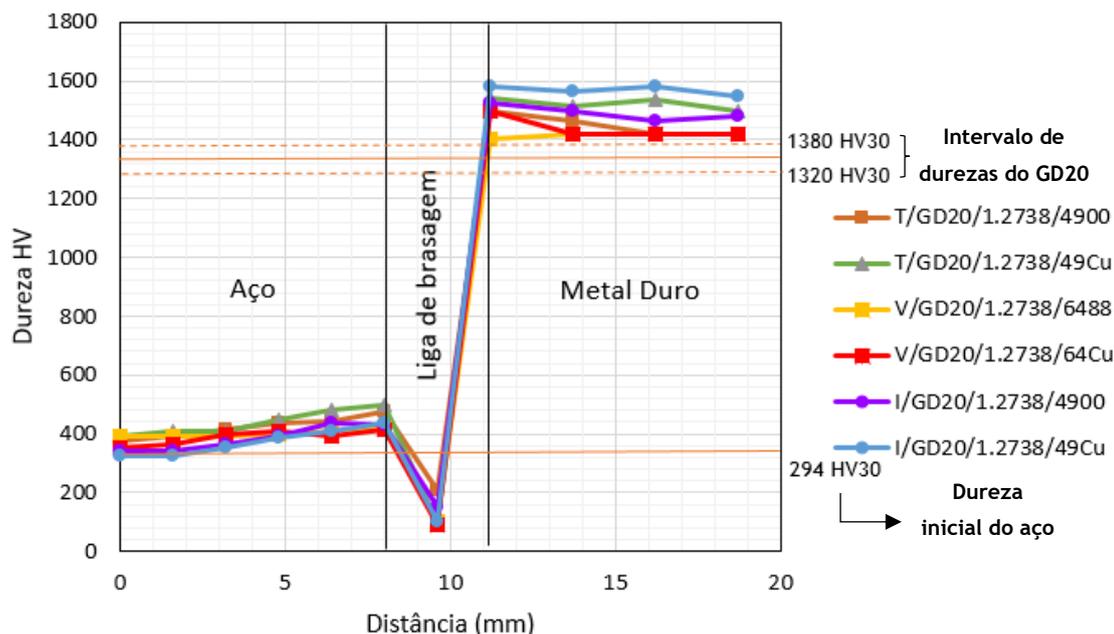


Fig. 37- Perfis de microdureza (HV 0,5) obtidos sobre as amostras GD20/1.2738, brasadas pelos três processos disponíveis na DURIT.

As conclusões a tirar da análise das Figs. 36 e 37 são muito semelhantes às tecidas relativamente às Figs. 34 e 35, no entanto, verifica-se um aumento da microdureza do aço à medida que se avança para a junta brasada. Este aumento está muito provavelmente associado a um efeito térmico resultante do processo de brasagem, que requer um estudo em profundidade.

A fim de tentar descortinar o aumento de microdureza que se observa nas amostras de metal duro, sobretudo nas do grau GD20, decidiu-se reavaliar as propriedades, após brasagem, de algumas amostras. No caso da dureza Vickers, optou-se por repetir os ensaios, utilizando uma carga de 30 kgf, procurando-se assim minimizar o efeito de carga associado às cargas mais baixas. Os valores obtidos são apresentados nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Propriedades das amostras de metal duro antes e após brasagem sobre substratos de aço 1.2738.

Amostra	HC (Oe)	FG (%)	Densidade	Sat. mag. (emu/g)	Dureza
GD10-G31 Inicial	218	5,1	14,83	148	1623 HV 30
T/GD10/1.2738/4900 Após-brasagem	212	4,9	14,84	148	1657 HV 0,5 1605 HV 30
GD10-I60 Inicial	219	4,7	14,87	136	1646 HV 30
V/GD10/1.2738/64Cu Após -brasagem	214	4,5	14,87	133	1674 HV 0,5 1570 HV 30
GD20-I14 Inicial	176	8,7	14,49	133	1419 HV 30
T/GD20/1.2738/49Cu Após -brasagem	167	8,4	14,46	132	1522 HV 0,5 1414 HV 30
GD20-G22 Inicial	161	10	14,46	140	1415 HV 30
I/GD20/1.2738/4900 Após -brasagem	154	8,9	14,44	139	1491 HV 0,5 1408 HV 30

Tabela 17 - Propriedades das amostras de metal duro antes e após brasagem sobre substratos de aço 1.1191.

Amostra	HC (Oe)	FG (%)	Densidade	Sat. mag. (emu/g)	Dureza
GD10-L13-C Inicial	203	4,9	14,79	141	1635 HV 30
T/GD10/1.1191/49Cu Após -brasagem	173	5,2	14,71	140	1714 HV 0,5 1514 HV 30
GD10-L13-A Inicial	214	5,2	14,86	144	1656 HV 30
V/GD10/1.1191/6488 Após -brasagem	172	5,2	14,83	144	1694 HV 0,5 1550 HV 30
GD20-G37 Inicial	159	9,2	14,46	141	1381 HV 30
T/GD20/1.1191/49Cu Após -brasagem	149	9	14,45	140	1481 HV 0,5 1350 HV 30
GD20-L5 Inicial	140	10,3	14,42	148	1410 HV 30
I/GD20/1.1191/4900 Após -brasagem	134	9	14,38	139	1497 HV 0,5 1328 HV 30

Da análise das tabelas anteriores, constata-se que os valores das propriedades físicas baixaram ligeiramente após brasagem, nomeadamente a força coerciva (Hc) e a saturação magnética ( $\sigma_m$ ).

Verifica-se ainda a obtenção de valores de dureza das amostras de metal duro, quando determinados com uma carga de 30 kgf, carga essa utilizada na caracterização inicial. Nestas amostras, em que foi novamente medida a dureza com uma carga de 30 kgf (HV30), verifica-se que a dureza se aproxima dos valores iniciais embora se obtenham valores sistematicamente inferiores. Esta diminuição está em perfeita consonância com a diminuição registada nos valores de HC e  $\sigma_m$ .

A temperatura atingida durante os processos de brasagem é bastante próxima da temperatura de recristalização do cobalto e do carboneto de tungstênio [18, 19]. A ocorrência deste fenômeno pode estar na origem da diminuição da dureza (HV30) das amostras de metal duro antes e após brasagem. Esta diminuição de dureza poderá também estar associada à proporção das fases alotrópicas do cobalto (HC ou CFC) presentes nas microestruturas finais [20].

#### 4.5. Ensaio de resistência ao corte

As Figs. 38 e 39 ilustram os gráficos relativos aos ensaios de resistência ao corte realizados com amostras de metal duro GD10 e GD20, respectivamente, brasadas sobre substratos de aço 1.1191.

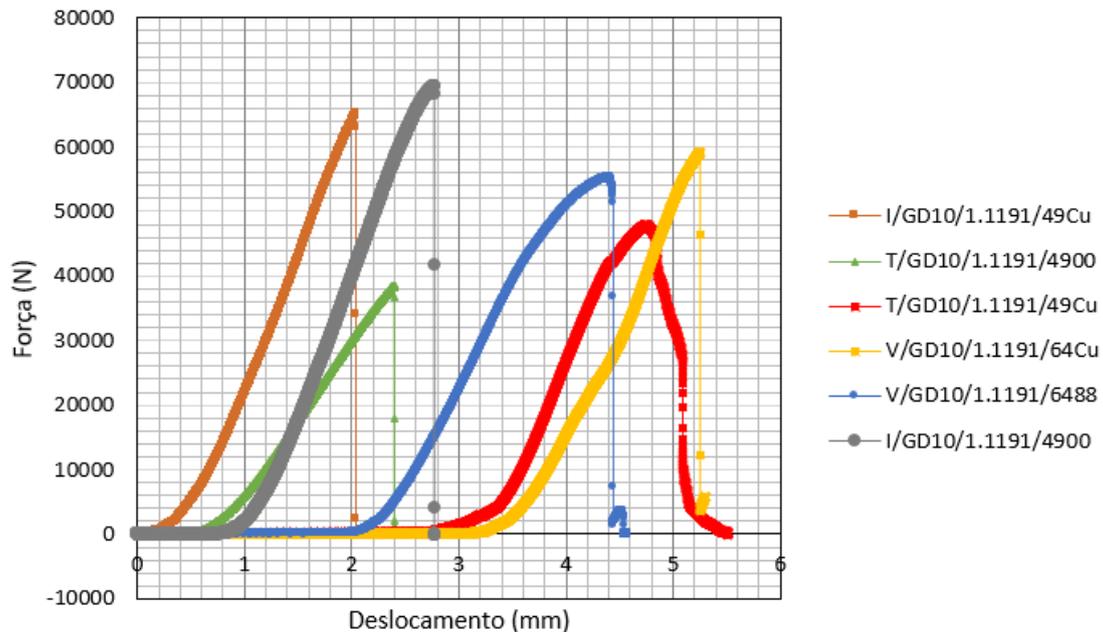


Fig. 38 - Curvas de  $F_{\text{máx.}}$  vs. deslocamento registradas nos ensaios de resistência ao corte das amostras de metal duro GD10 brasadas sobre substratos de aço 1.1191.

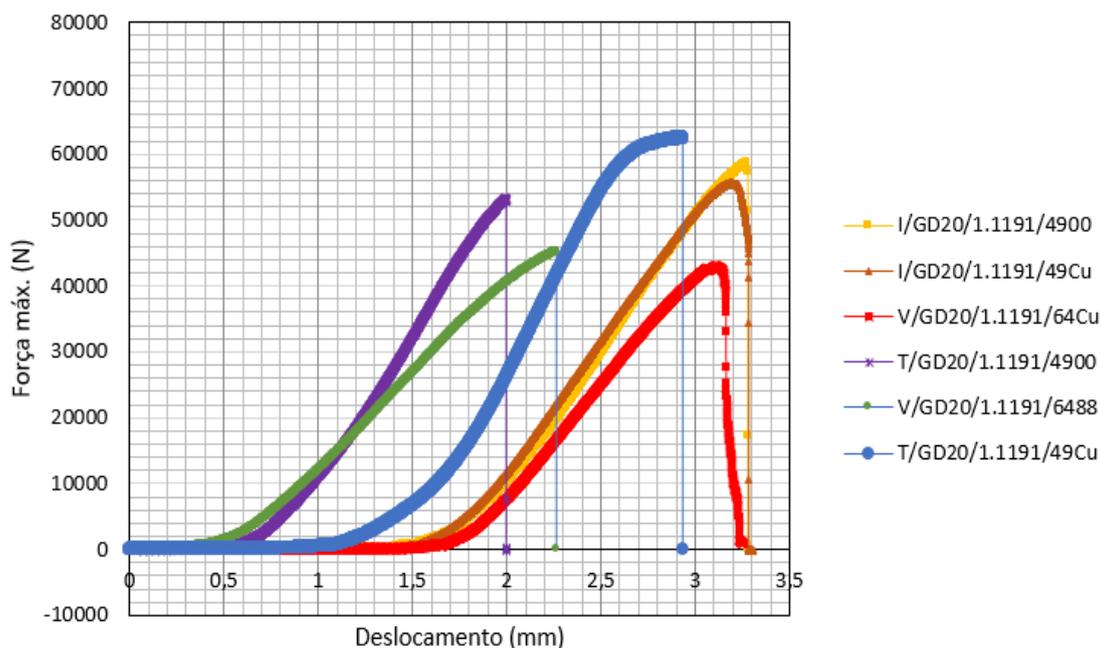


Fig. 39 - Curvas  $F_{m\acute{a}x.}$  vs. deslocamento registradas nos ensaios de resist\ecancia ao corte das amostras de metal duro GD20 brasadas sobre substratos de a\c7o 1.1191.

Por sua vez, na Tabela 18 s\ao apresentados os valores de resist\ecancia ao corte ( $R_c$ ) das amostras basadas sobre substratos de a\c7o 1.1191, da espessura da junta de uni\ao e da for\c7a aplicada para promover a rotura das amostras, bem como a identifica\c7\ao da zona em que ocorreu a rotura.

Tabela 18 - Resist\ecancia ao corte das amostras brasadas sobre substratos de a\c7o 1.1191, espessura da junta de uni\ao, for\c7a aplicada para promovr a rotura e identifica\c7\ao da zona em que ocorreu.

Amostra	Espessura da junta (mm)	For\c7a m\acute{a}xima (N)	Resist\ecancia ao corte (MPa)	Zona de rotura
T/GD10/1.1191/49Cu	0,27	47988	151	Solda
T/GD10/1.1191/4900	0,09	38537	121	Solda; MD*
T/GD20/1.1191/49Cu	0,20	63163	198	Solda; MD*
T/GD20/1.1191/4900	0,08	43302	135	Solda
I/GD10/1.1191/49Cu	0,16	67884	213	Solda; MD*
I/GD10/1.1191/4900	0,15	69369	218	Solda; MD*
I/GD20/1.1191/49Cu	0,23	54704	172	Solda
I/GD20/1.1191/4900	0,22	56916	179	Solda
V/GD10/1.1191/64Cu (780°C)	0,25	59198	186	Solda; MD*
V/GD10/1.1191/6488 (780°C)	0,14	55274	174	Solda
V/GD20/1.1191/64Cu (780°C)	0,29	44692	140	Solda
V/GD20/1.1191/6488 (780°C)	0,13	45304	142	Solda; MD*

\*Solda; MD - A rotura teve in\ecio na junta de uni\ao (solda) propagando-se posteriormente pelo metal duro.

Assumindo como limite inferior o valor de refer\ecancia (150 MPa) indicado pelo fabricante (Tabela 4), os resultados obtidos poder\ao ser agrupados do modo seguinte:

- Espessura da junta brasada < 0,14 mm:
  - $R_c < 150$  MPa;
  - Zona de rotura: metal duro (MD)-solda.
- 0,14 mm < espessura da junta brasada < 0,27 mm:
  - $R_c \geq 150$  MPa;
  - Zona de rotura: predominantemente, junta brasada (solda).
- Espessura da junta brasada > 0,27 mm:
  - $R_c < 150$  MPa;
  - Zona de rotura: metal duro (MD)-solda.

O gráfico da Fig. 40 representa a variação da resistência ao corte das amostras, constantes da Tabela 18, em função da espessura da junta brasada.

De destacar que a curva obtida apresenta uma configuração muito semelhante à Fig. 8, em anexo.

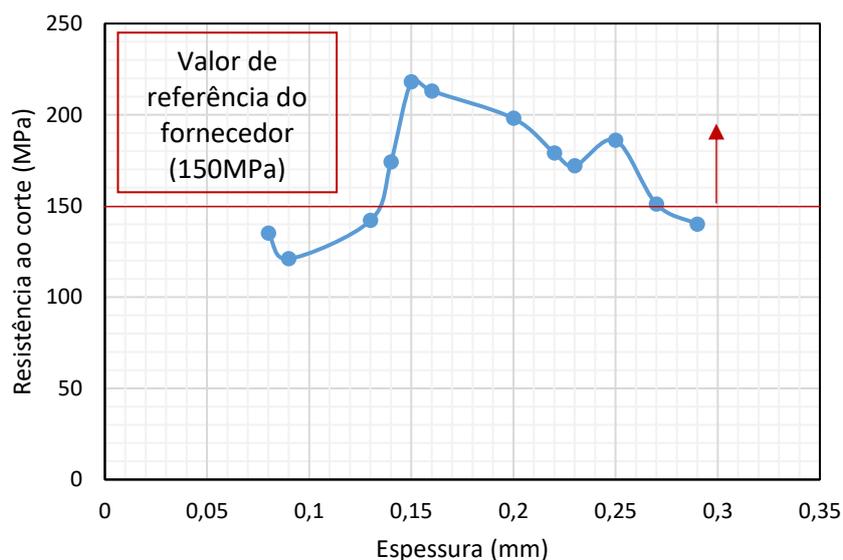


Fig. 40 - Resistência ao corte das amostras brasadas sobre substratos de aço 1.1191 vs. espessura da junta de união.

Pela análise do gráfico, para espessuras de solda reduzidas a resistência ao corte é mais baixa, isto porque a força exercida pelo punção durante o ensaio irá atuar mais sobre o conjunto aço/metal duro. Como o metal duro é mais frágil, a amostra acaba por fraturar pelo metal duro. Por outro lado, quando a espessura de solda é maior, a força de corte vai exercer-se sobre o conjunto aço/liga de brasagem/metal duro, rompendo pelo material de menor resistência. Por isso é importante que a junta de soldadura tenha uma espessura intermédia.

Por sua vez, nas Figs. 41 e 42 são apresentados os gráficos relativos aos ensaios realizados com as amostras de metal duro GD10 e GD20, respectivamente, brasadas sobre substratos de aço 1.2738.

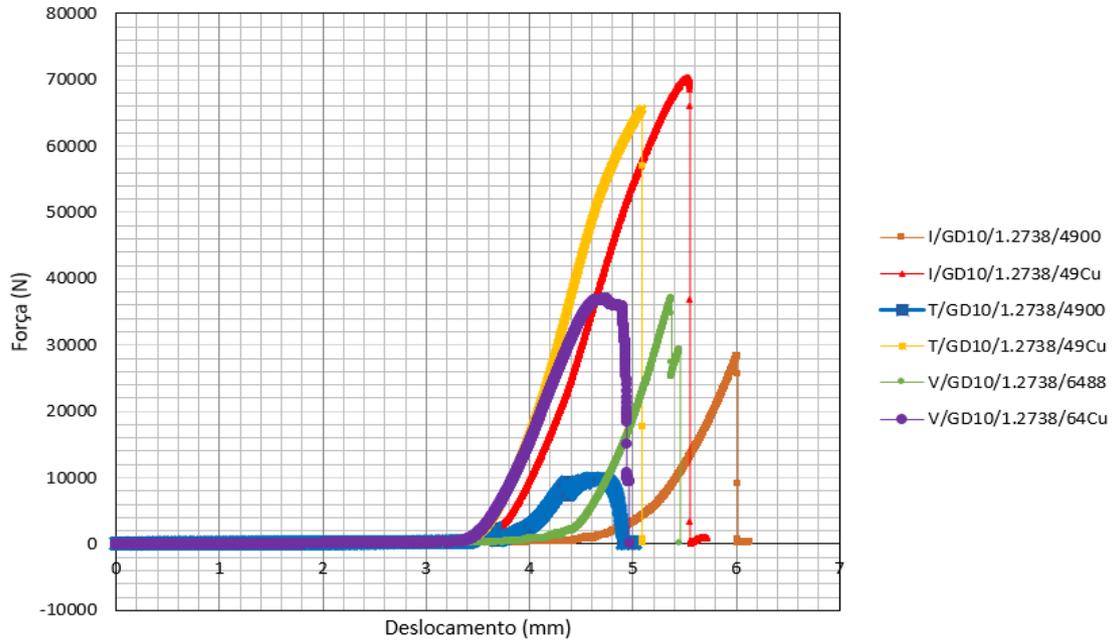


Fig. 41 - Curvas de  $F_{\text{máx.}}$  vs. deslocamento registadas nos ensaios de resistência ao corte das amostras de metal duro GD10 brasadas sobre substratos de aço 1.2738.

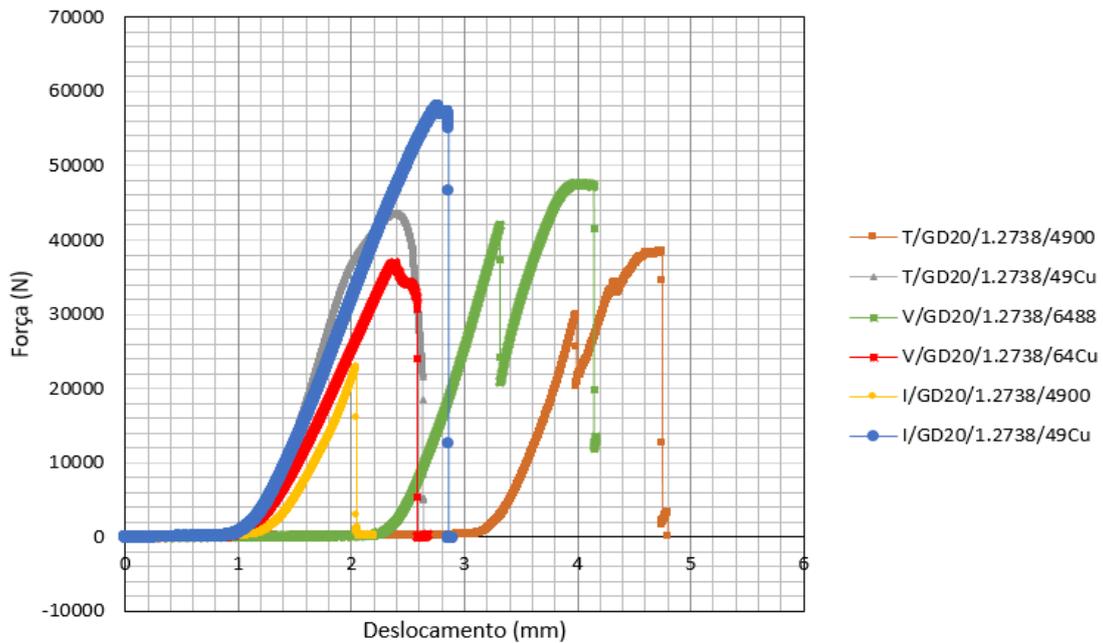


Fig. 42 - Curvas de  $F_{\text{máx.}}$  vs. deslocamento registadas nos ensaios de resistência ao corte das amostras de metal duro GD20 brasadas sobre substratos de aço 1.2738.

A Tabela 19 apresenta os valores de resistência ao corte ( $R_c$ ) das amostras brasadas sobre substratos de aço 1.2738, da espessura da junta de união e da força aplicada para promover a rotura das amostras, bem como a identificação da zona em que ocorreu a rotura.

Tabela 19 - Resistência ao corte das amostras brasadas sobre substratos de aço 1.2738, espessura da junta de união, força aplicada para promover a rotura e identificação da zona em que ocorreu.

Amostra	Espessura da junta (mm)	Força de máxima (N)	Resistência ao corte (MPa)	Zona de rotura
T/GD10/1.2738/49Cu	0,21	65693	206	Solda; MD*
T/GD10/1.2738/4900	0,08	9959	31	MD
T/GD20/1.2738/49Cu	0,27	43686	137	Solda; MD*
T/GD20/1.2738/4900	0,05	38446	121	Solda; MD*
I/GD10/1.2738/49Cu	0,19	70367	221	Solda
I/GD10/1.2738/4900	0,05	28306	89	MD
I/GD20/1.2738/49Cu	0,22	58051	182	Solda
I/GD20/1.2738/4900	0,10	22787	72	Solda; MD*
V/GD10/1.2738/64Cu (790°C)	0,07	36603	115	Solda
V/GD10/1.2738/6488 (790°C)	0,10	34521	108	Solda; MD*
V/GD10/1.2738/64Cu (780°C)	0,28	37014	116	Solda; MD*
V/GD10/1.2738/6488 (780°C)	0,06	37005	116	MD
V/GD20/1.2738/64Cu (780°C)	0,29	36974	116	Solda
V/GD20/1.2738/6488 (780°C)	0,16	47698	150	Solda; MD*

\*Solda; MD - A rotura teve início na junta de união (solda) propagando-se posteriormente pelo metal duro.

Assumindo como limite inferior o valor de referência (150 MPa) indicado pelo fabricante (Tabela 4), os resultados obtidos poderão ser agrupados do modo seguinte:

- Espessura da junta brasada < 0,17 mm:
  - $R_c < 150$  MPa;
  - Zona de rotura: metal duro (MD)-solda.
- 0,17 mm < espessura da junta brasada < 0,25 mm:
  - $R_c \geq 150$  MPa;
  - Zona de rotura: predominantemente, junta brasada (solda).
- Espessura da junta brasada > 0,25 mm:
  - $R_c < 150$  MPa;
  - Zona de rotura: metal duro (MD)-solda.

O gráfico da Fig. 43 representa a variação da resistência ao corte das amostras, constantes na Tabela 19, em função da espessura da junta brasada.

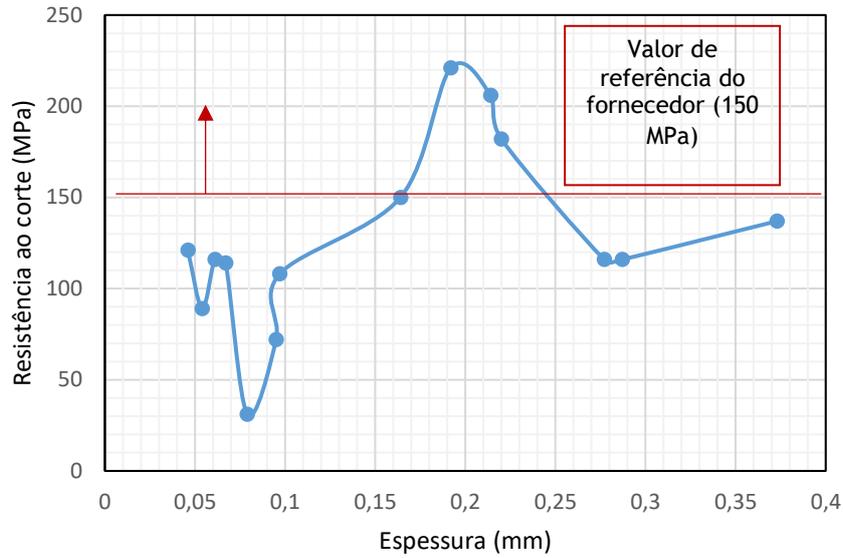


Fig. 43 - Resistência ao corte das amostras brasadas sobre substratos de aço 1.2738 vs. espessura da junta de união.

As conclusões a tirar da análise da Figs. 43 são muito semelhantes às tecidas relativamente à Fig. 40.

Tendo por objetivo uma análise mais expedita dos resultados obtidos nestes ensaios, foram traçados os gráficos das Figs. 44, 45 e 46 relativos à variação da resistência ao corte das várias amostras em função da espessura da junta brasada, da liga de brasagem e do processo de brasagem aplicado, respetivamente.

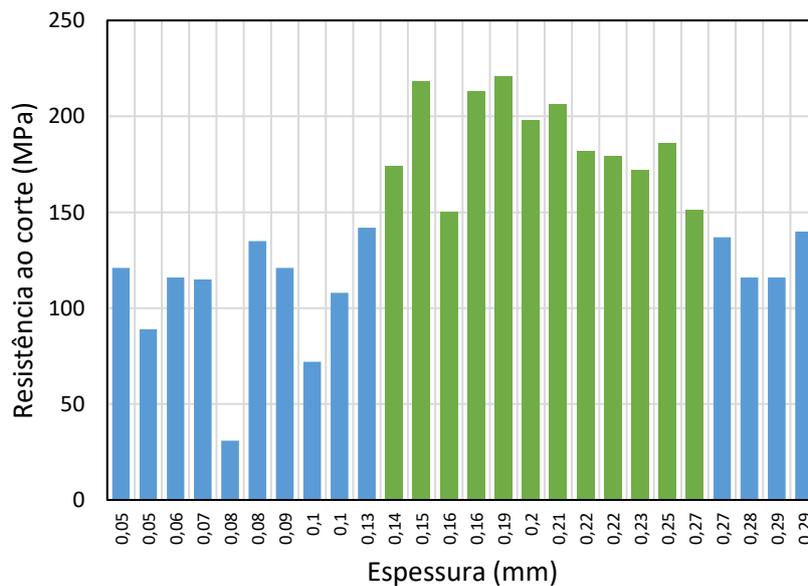


Fig. 44 - Resistência ao corte das amostras brasadas vs. espessura da junta brasada.

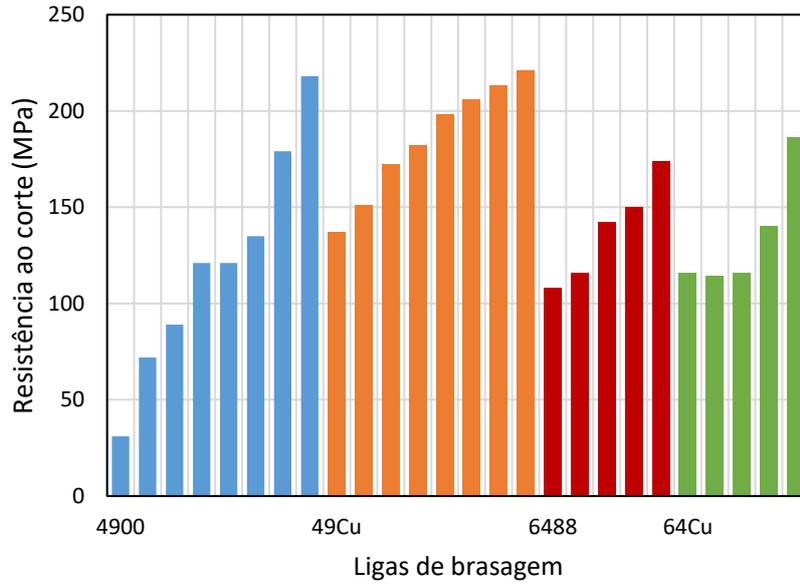


Fig. 45 - Resistência ao corte das amostras brasadas vs. liga de brasagem utilizada.

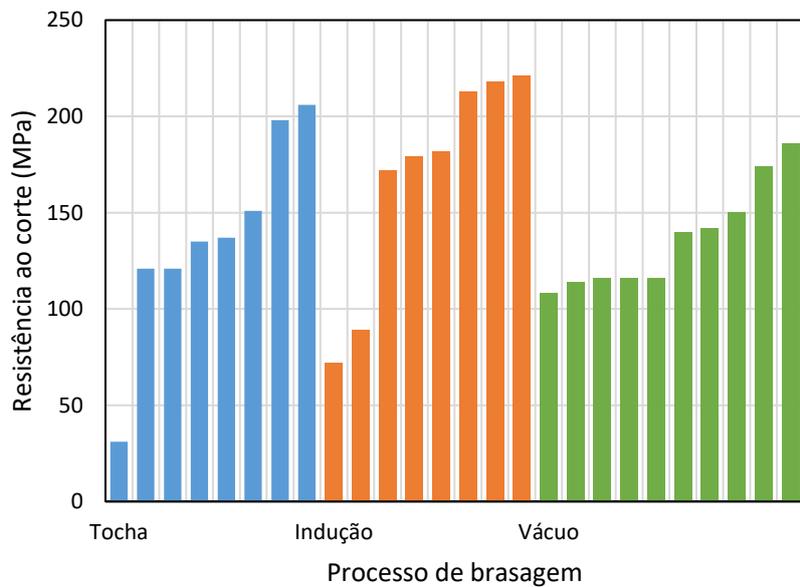


Fig. 46 - Resistência ao corte das amostras brasadas vs. processo de brasagem utilizado.

A análise destes gráficos permite tirar as seguintes conclusões:

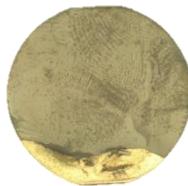
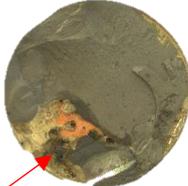
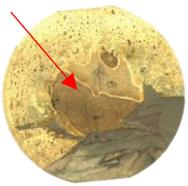
- Os valores mais elevados, e superiores a 150 MPa, de resistência ao corte foram obtidos em amostras cuja junta de brasagem apresenta uma espessura dentro do intervalo 0,14-0,27 mm, em perfeita consonância com os valores propostos pela literatura para a folga da junta (ver 1.2.4.2 em anexo);
- A liga de brasagem 49/Cu foi a que permitiu atingir, num maior número de amostras, resistências ao corte superiores a 150 MPa;

- A geometria da liga de brasagem tem uma influência significativa no processo, potenciando a influência da destreza do soldador sobre a qualidade e propriedades da junta brasada;
- Não parece existir grande influência do tipo de aço do substrato sobre o processo de brasagem;
- A brasagem por indução afigura-se como o processo mais adequado para a brasagem de metal duro sobre substratos de aço, muito embora o processo de brasagem sob vácuo se afigure bastante promissor, caso se consiga assegurar a obtenção, com regularidade, de juntas brasadas com espessuras dentro do intervalo indicado na literatura, e que estes ensaios vieram corroborar.

#### 4.5.1. Análise das superfícies de fratura

Na Tabela 20 são apresentadas as imagens, resultantes da observação à lupa, das superfícies de fratura das amostras ensaiadas. A sua disposição na tabela permite associá-las com facilidade ao processo de brasagem, liga de brasagem, grau de metal duro e tipo de aço do substrato; acresce a inserção do valor da resistência ao corte de cada amostra bem como da zona onde ocorreu a rotura.

Tabela 20 - Superfícies de fratura das amostras brasadas pelos diferentes processos, sobre substratos de dois tipos de aços.

		Aço 1.2738		Aço 1.1191	
		GD10	GD20	GD10	GD20
		1-31 MPa - MD	2-121MPa - MD	3-121 MPa - Solda; MD	4-135 MPa - Solda
Tocha Oxiacetilénica	4900				
		5-206 MPa - Solda; MD	6-137 MPa - Solda; MD	7-151 MPa - Solda	8-198 MPa - Solda
	49/Cu				
		9-221 MPa - Solda	10-182 MPa - Solda	11-213 MPa - Solda; MD	12-172 MPa - Solda
Indução	49/Cu				
		13-89 MPa - MD	14-72 MPa - Solda; MD	15-218 MPa - Solda	16-179 MPa - Solda
	4900				
		17-116 MPa - Solda	18-150 MPa - Solda; MD	19-174 MPa - Solda	20-142 MPa - Solda; MD
Vácuo	6488				
		21-116 MPa - Solda; MD	22-116 MPa - Solda	23-186 MPa - Solda; MD	24-140 MPa - Solda
	64/Cu				

Constata-se que a fratura das amostras nem sempre ocorreu pela mesma zona; algumas amostras romperam pela solda, outras pelo metal duro, e ainda outras em que a fratura teve início na junta de união, propagando-se posteriormente pelo metal duro.

O tipo de fratura depende sobretudo da espessura da junta brasada e da presença de defeitos. Normalmente, quando a espessura da junta brasada é inferior ao limite considerado ideal (0,15-0,25 mm) a fratura ocorre pelo metal duro, material mais frágil, obtendo-se assim valores de resistência ao corte mais baixos. Quando a espessura da junta brasada se encontra dentro dos limites aceitáveis a fratura ocorre pela solda.

Para além disso, são visíveis em algumas imagens poros (12, 15) e vestígios de fluxo (devidamente assinalados nas imagens 7, 11), cuja presença poderá comprometer seriamente a resistência ao corte.

Finalmente, há ainda a referir que, em algumas amostras obtidas por brasagem sob vácuo, sobre substrato de aço 1.2738, não foi detetada a presença de liga de brasagem no meio das amostras (assinalado nas imagens da Tabela 20 - 17, 18 e 21). Esta falha poderá estar relacionada com o facto da bomba de vácuo permanecer ligada após o patamar de brasagem, contribuindo para o arrastamento da liga de brasagem para a periferia.

Na Fig. 47 são apresentadas algumas imagens que ilustram os defeitos enunciados anteriormente, de forma mais destacada.

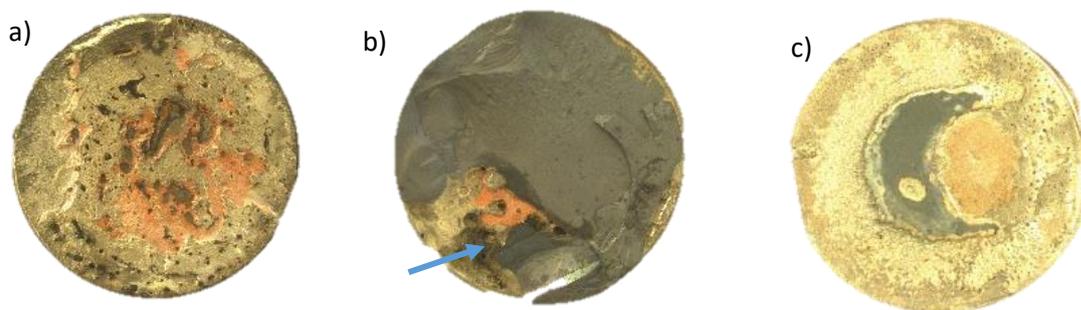


Figura 47 - Superfície de fratura de algumas amostras: a) poros; b) restos de fluxo e c) sucção da liga de brasagem.

## 5. Conclusões

Este trabalho visou o estudo e caracterização do processo de brasagem de metal duro em aço por três processos: tocha oxiacetilénica, indução e vácuo. Tendo em consideração a constante evolução ao nível dos componentes produzidos pela empresa DURIT, bem como ao nível da exigência requerida às propriedades finais dos produtos obtidos, impõe-se realizar o processo de brasagem desses componentes com maior rigor e precisão.

Para a realização deste trabalho foram seleccionados os graus GD10 (10% Co) e GD20 (20% Co) que apresentam diferentes soldabilidades. Foram também utilizados como substratos dois tipos de aço com soldabilidades distintas: o aço 1.1191, que é um aço ao carbono (0,45%C), e um aço pré-tratado 1.2738. Como ligas de brasagem, utilizaram-se as ligas 4900, 49/Cu, 6488 e 64/Cu. Foi utilizado um pirómetro ótico com aquisição de dados que permitiu registar a evolução da temperatura durante a brasagem.

As principais conclusões do trabalho realizado são as seguintes:

- 1- O aquecimento que se verifica no processo de brasagem por tocha oxiacetilénica é mais heterogéneo e irregular, devido à movimentação da tocha durante o aquecimento, à temperatura máxima de trabalho comparativamente com os processos de brasagem por indução e sob vácuo. Na brasagem por indução e sob vácuo o aquecimento é mais uniforme e não se verificam oscilações de temperatura significativas;
- 2- O controlo da espessura da junta brasada é mais facilitado quando a liga de brasagem se encontra sob a forma de folha (49/Cu, 6488 e 64/Cu). A liga 4900 é utilizada sob a forma de vareta e atua por capilaridade, pelo que o controlo da espessura é mais dificultado, principalmente quando se utiliza a tocha oxiacetilénica. Na brasagem por indução, quando se utiliza a liga 4900, o controlo da espessura da junta é mais facilitado graças ao aquecimento mais uniforme que este processo proporciona;
- 3- A brasagem sob vácuo é um processo que permite um aquecimento bastante homogéneo dos componentes. Contudo, quando se utiliza como liga de brasagem a liga 64/Cu a ocorrência da dissolução e precipitação do Cu leva à destruição desta faixa e anula o objetivo da sua presença. Isto deve-se ao facto de, durante o patamar de brasagem, facilmente se atingir a fase líquida

o que deve facilitar este efeito. Deste modo, há ainda a necessidade de afinar alguns parâmetros de processamento, nomeadamente a temperatura e o tempo;

- 4- A resistência ao corte das amostras testadas é fortemente influenciada pela espessura da junta brasada. Quando a espessura da junta brasada se situa entre os 0,14 e os 0,27 mm, obtêm-se valores de resistência ao corte superiores a 150 MPa. Por outro lado, quando a espessura da junta é inferior a 0,14 mm e superior a 0,27, registam-se resistências ao corte inferiores a 150 MPa;
- 5- Quando a espessura da junta se encontra entre os 0,14 e os 0,25mm ou superior a 0.25 mm a fratura ocorre pela solda. Para espessuras de solda inferiores a 0,1 mm, a fratura ocorre, normalmente, pelo metal duro;
- 6- A dureza das amostras de metal duro (HV30), o seu HC e FG, após o processo de brasagem, diminuem ligeiramente comparativamente aos valores iniciais. Esta diminuição necessita de ser comprovada, no entanto, pode também ser causada pela recristalização do cobalto ou do carboneto de tungsténio. Esta variação de poderá também estar associada à proporção de fases alotrópicas do cobalto (HC e CFC) presentes na microestrutura final;
- 7- Na brasagem sob vácuo, observa-se que, a permanência da bomba de vácuo ligada durante o patamar de brasagem, provoca a sucção da liga de brasagem para a periferia da amostra, causando a ausência de liga no centro.

Como conclusão geral, poder-se-á afirmar que os processos de brasagem por indução e sob vácuo assumem-se de capital importância na brasagem de componentes cada vez mais complexos e com propriedades finais cada mais exigentes. Permitem realizar um aquecimento mais uniforme dos componentes, diminuindo assim a tendência para a criação de tensões residuais. No entanto, com um controlo da espessura da junta brasada no processo de brasagem por tocha oxiacetilénica conseguem-se atingir as propriedades finais pretendidas.

## 6. Propostas de trabalhos futuros

Em termos de trabalhos futuros, existem diversos tópicos a propor, no seguimento desta dissertação:

- Desenvolvimento um método que permita o controlo da espessura da junta brasada de forma mais eficaz, quando é aplicada a liga 4900, sobretudo na brasagem por tocha oxiacetilénica;
- Utilização de temperaturas mais baixas, na brasagem sob vácuo, visando evitar a ocorrência de solubilização da camada intermédia de Cu, da liga 64/Cu;
- Realização da brasagem por tocha oxiacetilénica e por indução a temperaturas inferiores às atualmente utilizadas, e mais próximas da temperatura sugerida pelo fornecedor como mais conveniente.

## Bibliografia

- [1] B. GmbH, "Brazing of Cemented Carbides," BrazeTec.
- [2] P. Pereira, "Estudo e caracterização do processo de brasagem em metal duro", Trabalho desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Seminário, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, fevereiro 2017.
- [3] D. H. GMBH. (2016, 15 de março). *RESISTENTE AO DESGASTE, PRECISO, RENTÁVEL*. Available: <http://www.durit.com/pt/tecnologia/>, Acedido em:15/03/2017.
- [4] J. M. M. d. Silva, "Atomização de suspensões de metal duro em etanol", Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2011.
- [5] F. W. P. Rodrigues, "Recuperação de componentes de metal duro por projeção térmica", Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2015.
- [6] R. M. O. Sousa, "Incorporação de metal duro em fundidos", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [7] R. M. German, P. Suri, and S. J. Park, "Review: liquid phase sintering", *Journal of Materials Science*, vol. 44, no. 1, pp. 1-39, 2009.
- [8] K. J. A. Brookes, *World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard Materials*. International Carbide Data, 1996.
- [9] I. O. o. Standardization. (2013). *Norma internacional ISO 3326:2013 (E) Hardmetals - Determination of (the magnetization) coercivity*.
- [10] G. S. Upadhyaya, *Cemented tungsten carbides: production, properties and testing*. William Andrew, 1998.
- [11] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*. Wiley New York, 2007.
- [12] C.-C. d. I. M. Mecânica. (2017, 2 de maio). *Teste de microdureza*. Available: [http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6560-teste-da-microdureza#.WT6uo2jytPY](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6560-teste-da-microdureza#.WT6uo2jytPY), Acedido em:20/04/2017.
- [13] S.-b. technology. (2017, 15 de junho). *FLUXES*. Available: <http://www.sopormetal.com/sp/en/fluxes.html#>, Acedido em:15/06/2017.
- [14] I. O. o. Standardization. (1999). *EN ISO 4957:1999 - Tool steels*.
- [15] N. Saunders. *Calphad: calculation of phase diagrams: a comprehensive guide* / N. Saunders, A. P. Miodownik [Online].

- [16] J. Nowacki, "Brazing of 14-5 PH steel and WC-Co sinterson considerable dimension surfaces", *Archives of Materials Science*, vol. 174, p. 174, 2007.
- [17] R. Gilliland and C. ADAMS, "Improved brazing methods for tungsten carbide tool bits", *WELD J*, vol. 50, no. 7, p. 267, 1971.
- [18] S. Pu, J. Zhang, Y. Shen, and L. Lou, "Recrystallization in a directionally solidified cobalt-base superalloy", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 480, no. 1, pp. 428-433, 2008.
- [19] L. FAN, Z. SHANG, Z. HUANG, Y. LI, and J. HE, "Study on Recrystallization Annealing of Pure Cobalt", *Hot Working Technology*, vol. 4, p. 057, 2013.
- [20] E. Soares, "Industrial development of submicron to ultrafine WC-Co hardmetal grades", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.
- [21] G. S. Upadhyaya, "Materials science of cemented carbides—an overview", *Materials & Design*, vol. 22, no. 6, pp. 483-489, 2001.
- [22] B.-D. K. S.-B. J. W.-B. Lee, "Effect of bonding time on joint properties of vacuum brazed WC-Co hard metal/carbon steel using stacked Cu and Ni alloy as insert metal", *Materials Science and Technology*, vol. 20, pp. 1474-1478, 2004.
- [23] A. S. Kurlov and A. I. Gusev, *Tungsten Carbides: Structure, Properties and Application in Hardmetals*. Springer International Publishing, 2013.
- [24] H. Exner, "Physical and chemical nature of cemented carbides", *International metals reviews*, 2013.
- [25] S. Kim, S.-H. Han, J.-K. Park, and H.-E. Kim, "Variation of WC grain shape with carbon content in the WC-Co alloys during liquid-phase sintering", *Scripta Materialia*, vol. 48, no. 5, pp. 635-639, 2003.
- [26] M. Christensen, *Strength and stability of interfaces in cemented carbides*. Chalmers University of Technology, 2004.
- [27] A. Petersson, "Cemented carbide sintering: constitutive relations and microstructural evolution", 2004.
- [28] M. M. Schwartz, *Brazing*. ASM international, 2003.
- [29] M. H. Sloboda, "Design and Strength of Brazed Joints", *Johnson Matthey & Co Limited*, 1961.

- [30] J. D. Booker and K. G. Swift, *Seleção de processos de manufatura*. Elsevier Brasil, 2014.
- [31] S. S. P. Editora, *Soldagem*. SENAI-SP Editora, 2015.
- [32] A. J. R. Guedes, "Ligação de uma liga  $\gamma$ -TiAl por brasagem por difusão", Tese de Doutorado, Universidade do Minho, 2004.
- [33] A. H. Committee, *Metals Handbook: Welding, brazing, and soldering*. American Society for Metals, 1978.
- [34] J. PASK, "Ceram. Bull," vol. 66, p. 1597, 1987.
- [35] Z. Mirski and T. Piwowarczyk, "Wettability of hardmetal surfaces prepared for brazing with various methods", vol. 11, ed, 2011, p. 412.
- [36] D.-I. A. M. O. Dr. A.J. Battenbough, Dr. A.M. Staines, "Surface Preparation for High Vacuum Brazing", W. Colmonoy, Ed., ed. Pontardawe, UK, 2011.
- [37] W. TILLMANN, A. ELREFAEY, and L. WOJARSKI, *Brazing of cutting materials* (Advances in Brazing: Science, Technology and Applications). 2013, p. 423.
- [38] K. Thorsen, H. Fordsmand, P. Praestgaard, K. Thorsen, H. Fordsmand, and P. Praestgaard, "Explanation of wettability problems when brazing cemented carbides", *Welding Journal(Miami)*, vol. 63, no. 10, p. 308, 1984.
- [39] D. S. Max Schimpfermann, "Brazing in the Tool Manufacturing Industry", U. B. Technology, Ed., 1st ed. Germany, 2015.
- [40] L. Q. J. F. Oliveira Santos, T. d. I.-I. d. S. e. Qualidade, Ed. *Processos de Soldadura*, 2ª ed. 1998.
- [41] S. Zinn, "Induction Brazing and Soldering", *Induction Consultants*, 2010.
- [42] Y. Kato, "Recent Developments in Vacuum Brazing Furnace Technology", *ULVAC TECHNICAL JOURNAL*, p. 17, 2009.

## Anexo

### 1. Revisão da Literatura

#### 1.1. Carbonetos cementados ou metais duros

Os metais duros caracterizam-se pela sua elevada resistência e dureza (690 - 2000 HV 30) e são utilizados em componentes que requerem elevada resistência ao desgaste e elevada dureza. A maioria dos metais duros são quase exclusivamente compostos por partículas de carboneto de tungstênio e por Co, como ligante [1, 21].

Os metais duros representam uma grande família de materiais, sendo produzidos por pulverometalurgia.

##### 1.1.1. Classificação e aplicações

Estes materiais podem ser classificados em dois subgrupos: os graus de WC-Co (Ni) e os graus cúbicos ou *cermets* [20].

O primeiro grupo representa os carbonetos cementados básicos, que funcionam como ponto de partida para outros graus e que, normalmente, são designados por metais duros, carbonetos não ligados ou graus para desgaste. A fase dura (WC) é geralmente conhecida como a fase- $\alpha$  e o Co, fase ligante, como a fase-B. A proporção de fase dura varia, regularmente, na gama 70-97 %(pond.). A matriz de Co pode ser parcialmente ligada ou substituída por outros metais, nomeadamente Ni, Fe, Cr, Mo e suas ligas [1, 21]. Outros carbonetos podem ser adicionados, em pequenas percentagens, como inibidores de crescimento de grão ou para melhorar a resistência à corrosão e à oxidação [20].

Os graus cúbicos ou *cermets* apresentam, adicionalmente, um terceiro constituinte, denominado fase- $\gamma$ , uma combinação de carbonetos, como por exemplo TiC, TaC ou NbC, numa proporção máxima de 25 %(pond.) [22]. Estes são designados por graus de ferramentas de corte e representam a maioria da produção de carbonetos cementados a nível mundial [20].

Os carbonetos cementados podem também ser classificados de acordo com o tamanho de grão. A norma ISO 4499-2 estabelece a classificação dos carbonetos cementados de acordo com o tamanho de grão (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação dos carbonetos cementados de acordo com a norma ISO 4499-2:2008.

Nomenclatura	Dimensão de partícula ( $\mu\text{m}$ )
Nano	<0,2
Ultrafino	0,2-0,5
Submicrométrico	0,5-0,8
Fino	0,8-1,2
Médio	1,2-2,5
Grosseiro	2,5-6
Extra grosseiro	>6

Estes materiais podem ainda ser classificados tendo em conta o seu campo de aplicação bem como, embora não tão frequentemente, a sua composição e propriedades básicas. A classificação mais comum para os metais duros, de acordo com a sua aplicação, está dividida em: ferramentas de corte, ferramentas de perfuração e mineração, ferramentas de conformação de metais, peças de desgaste e componentes estruturais [20].

## 1.1.2. Estrutura cristalográfica e equilíbrio de fases

### 1.1.2.1. Carboneto de tungsténio

O carboneto de tungsténio pertence a um grupo de compostos que incluem os carbonetos, nitretos, boretos e silicetos de elementos de transição, e representa o carboneto mais relevante em termos de aplicação em metais duros. Este composto não apresenta qualquer alteração estrutural a temperaturas inferiores ao seu ponto de fusão (2750°C). O diagrama de fases do sistema binário W-C (Fig. 1) apresenta dois carbonetos estequiométricos ( $\text{W}_2\text{C}$  e  $\text{WC}$ ), de estrutura hexagonal, e um sub-estequiométrico ( $\alpha\text{-WC}_{1-x}$ ), com estrutura cúbica [20, 23].

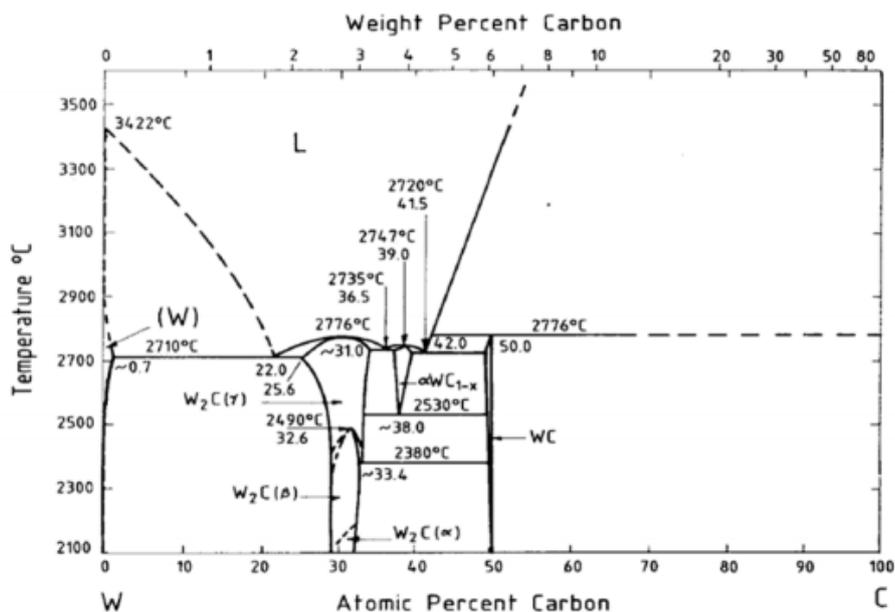


Fig. 1- Diagrama de fases do sistema binário W-C [24].

A produção do WC é preferencialmente realizada a partir da reação de pós de elevada pureza de W (>99,9 %) com carbono com baixo teor em cinzas. As partículas de WC grosseiras e policristalinas (>2  $\mu\text{m}$ ) são obtidas a partir de pós de W grosseiros (>6  $\mu\text{m}$ ) a temperaturas de carburação relativamente elevadas, aproximadamente 1600°C, enquanto que as partículas de WC finas e essencialmente monocristalinas (<1  $\mu\text{m}$ ) são obtidas a partir de pós de W submicrométricos (<100 nm) a temperaturas na gama 1350-1400°C. No entanto, outras técnicas, nomeadamente as que envolvem a reação do W com uma fase gasosa, são também utilizadas para a produção de pós de WC submicrométricos e ultrafinos [20, 21].

O carboneto de tungstênio é bastante estável e apresenta uma estrutura cristalográfica hexagonal, com dois átomos (W e C) por célula unitária (Fig. 2). A forma de prisma triangular dos cristais dos carbonetos cementados é unicamente obtida devido aos elevados teores de ligante e à atividade do carbono [25, 26].

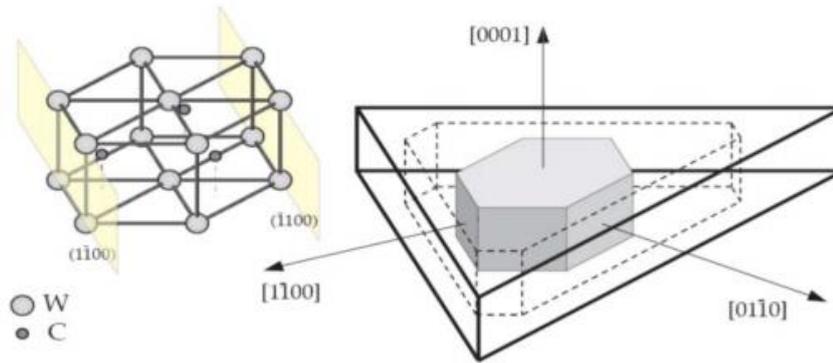


Fig. 2- Estrutura cristalográfica do carboneto de tungstênio [20].

Apesar do carboneto de tungstênio possuir diminuta estabilidade térmica e uma dureza anisotrópica e ligeiramente mais baixa, comparativamente com outros carbonetos de estrutura cúbica, apresenta outras propriedades que constituem uma vantagem [20, 21]. O módulo de elasticidade, extremamente elevado, aproximadamente 700 GPa, ultrapassado por exemplo pelo diamante e pelos nanotubos de carbono, e a elevada condutividade térmica ( $1,2 \text{ J cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) constituem vantagens de particular relevância deste tipo de materiais. Mais ainda, a resistência à fratura e a tensão de cedência das partículas de WC aumentam com a diminuição do seu tamanho. Outra vantagem bastante importante do WC é a sua elevada afinidade química para o Co, em comparação com outros carbonetos [23, 25, 26].

#### 1.1.2.2. Cobalto

O Co é o elemento mais utilizado como matriz ligante nos carbonetos cementados. Já surgiram algumas alternativas no mercado, muito devido às flutuações do preço do Co; no entanto, o seu sucesso a nível industrial tem sido substancialmente inferior. O Ni é também utilizado como matriz ligante nos carbonetos cementados, mas é utilizado em aplicações específicas e não como substituto do Co [20].

A preferência pela utilização do Co é suportada pela sua elevada molhabilidade e adesão às partículas de WC, promoção da ocorrência de uma reação eutética a temperaturas relativamente baixas ( $1275\text{-}1350^\circ\text{C}$ ), bem como pelas suas propriedades mecânicas [20, 21].

Os pós de Co podem ser produzidos por diferentes métodos. A redução dos óxidos de Co pelo hidrogénio ( $H_2$ ), a pirólise de carboxilatos e a redução sob pressão de iões de Co em solução aquosa com hidrogénio são os métodos com maior aplicação industrial, permitindo obter pós de Co com tamanhos de partículas entre 0,1 e 5  $\mu m$ , com morfologia esférica, e com baixo grau de aglomeração, como se pode observar na Fig. 3 [20].

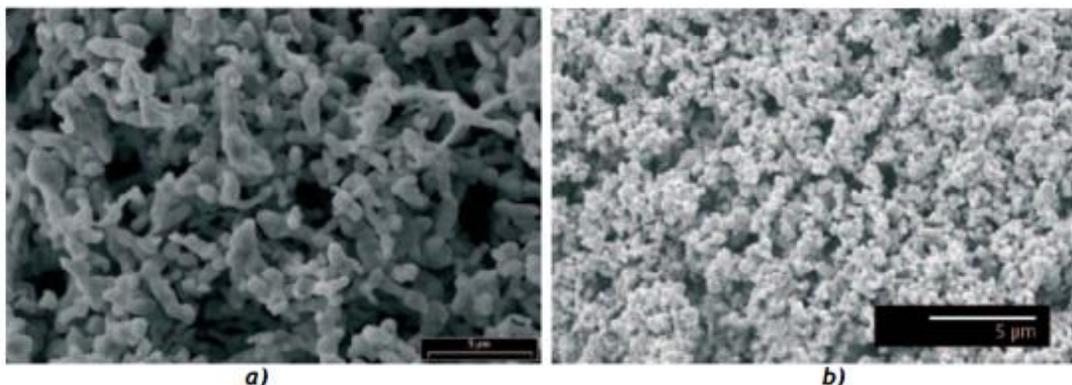


Fig. 3- Diferentes morfologias de pós de Co: a) tipo convencional alongado (1,5  $\mu m$ ); b) tipo esférico, submicrométrico (0,7  $\mu m$ ) [20].

O Co puro apresenta uma temperatura de fusão de 1495°C, um peso específico de 8,90 g/cm<sup>3</sup> e uma estrutura cristalográfica hexagonal, à temperatura ambiente. O Co sofre uma transformação alotrópica, de uma estrutura hexagonal compacta (HC) para cúbica de faces centradas (CFC), à temperatura de 417°C, e uma transição de ferromagnético para paramagnético a 1121°C [20]. Nos metais duros sinterizados, o Co está presente segundo uma combinação de fases CFC e HC. A estabilização da estrutura CFC, pela solubilização dos átomos de W e C ou pelas tensões internas resultantes da diferença de contração entre a fase dura e o ligante durante o arrefecimento, é ainda um tópico não totalmente compreendido. A tendência para o Co apresentar uma estrutura hexagonal a temperaturas baixas é suportada pela presença de inúmeras falhas de empilhamento na sua estrutura [20].

#### 1.1.2.3. Sistema ternário W-C-Co

Os metais duros (WC-Co) correspondem a fases de equilíbrio da secção vertical pseudo-binária WC-Co do sistema ternário W-C-Co, normalmente para um máximo de 25 %(pond.) Co.

A Fig. 4 apresenta a secção isotérmica a 1425°C e pode-se observar a região das composições WC-Co. Na Fig. 5a) parte da secção vertical do diagrama ternário W-C-Co para 10 %(pond.) Co. Na Fig. 5b) é ilustrada a secção pseudo-binária WC-Co [20, 21, 23].

A Fig. 5b) evidencia a ocorrência de uma reação eutética, no sistema W-C-Co, na gama de temperaturas 1275-1350°C.

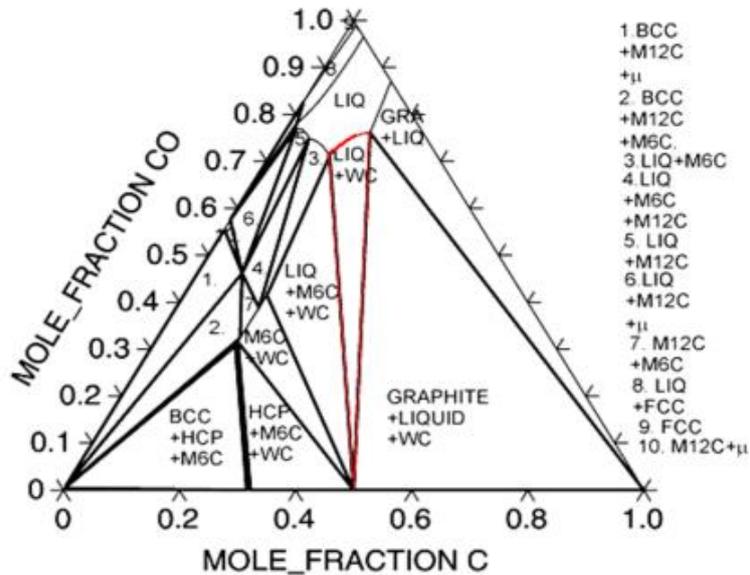


Fig. 4- Secção isotérmica, a 1425° C, do diagrama de fases ternário W-C-Co (Fonte: CALPHAD database) [20].

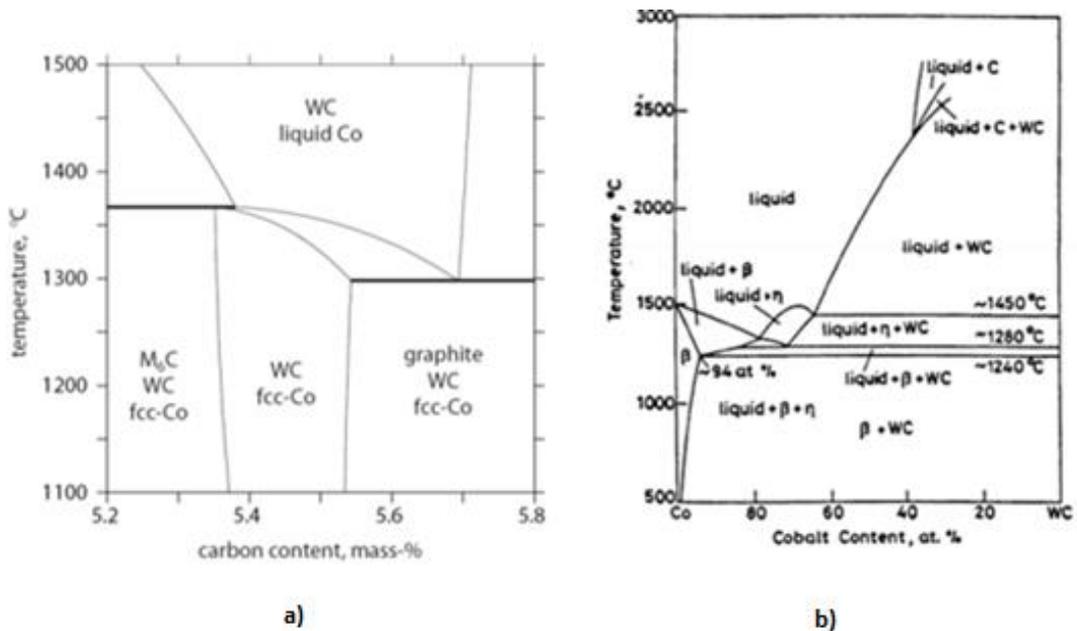


Fig. 5- Diagrama de fases do sistema W-C-Co: a) parte da secção vertical para 10 %(pond.) Co [27]; b) secção vertical pseudo-binária WC-Co [24].

Para baixos teores de carbono, um composto ternário, denominado fase- $\eta$ , pode tornar-se estável, co-precipitando com o WC. Dois tipos de fase- $\eta$  podem ser obtidos:  $M_{12}C$ , com uma composição quase estequiométrica, e  $M_6C$ , com uma composição que pode variar entre  $M_{3,2}W_{2,8}C$  e  $M_2W_4C$  ( $M = Co, Fe$ ) [23, 27]. Para teores de carbono elevados pode precipitar carbono livre. Estas fases são indesejáveis, uma vez que comprometem as propriedades do metal duro.

## 1.2. Brasagem

A brasagem é um processo de união de carácter químico, realizado sem que ocorra a fusão dos materiais/componentes a ligar. A ligação ocorre graças à fusão de um material de enchimento/adição, genericamente designado por liga de brasagem, previamente inserido entre os componentes a ligar, ocorrendo uma reação química entre a liga de brasagem fundida e os materiais de base, originando produtos de reação que permitem a ligação entre os componentes a ligar [28].

Como referido anteriormente, os carbonetos cementados são tipicamente utilizados no fabrico de ferramentas de perfuração e de corte ou de ferramentas de desgaste, devido à sua elevada dureza e resistência mecânica. Contudo, sob condições de operação severas, nomeadamente de vibração e de impacto, estes materiais fraturam. De modo a ultrapassar este problema, a união dos carbonetos cementados, nomeadamente WC-Co, a aços estruturais tem sido estudada recorrendo a várias técnicas de brasagem. Contudo, a obtenção de uniões de boa qualidade é particularmente complicada devido às fissuras e defeitos que surgem durante o processo de união ou durante a etapa de arrefecimento [8, 22].

A brasagem tornou-se uma ferramenta indispensável na engenharia de fabricação de componentes metálicos. Uma das principais vantagens deste processo de união é a sua versatilidade, associada a uma grande variedade de materiais e técnicas de brasagem disponíveis para os potenciais utilizadores. Mais ainda, a característica principal do processo de brasagem está relacionada com o facto da operação de união ocorrer sempre a temperaturas inferiores ao ponto de fusão dos materiais a unir [29-31].

Uma melhor compreensão dos princípios fundamentais do processamento de ligações por brasagem impõe uma revisão dos conceitos de capilaridade, molhabilidade e espalhamento.

### 1.2.1. Molhabilidade, capilaridade e espalhamento

A **molhabilidade** consiste, basicamente, na diminuição da energia livre de superfície sólido-gás por ação do líquido, *i.e.*, ocorre a substituição de uma interface sólido-gás por uma interface sólido-líquido, de menor energia. Esta propriedade é determinada pelas características relativas às fases sólida e líquida, que são avaliadas com base no valor do ângulo de contacto entre o líquido e o substrato sólido (ver Fig. 6) [28, 29, 32, 33].

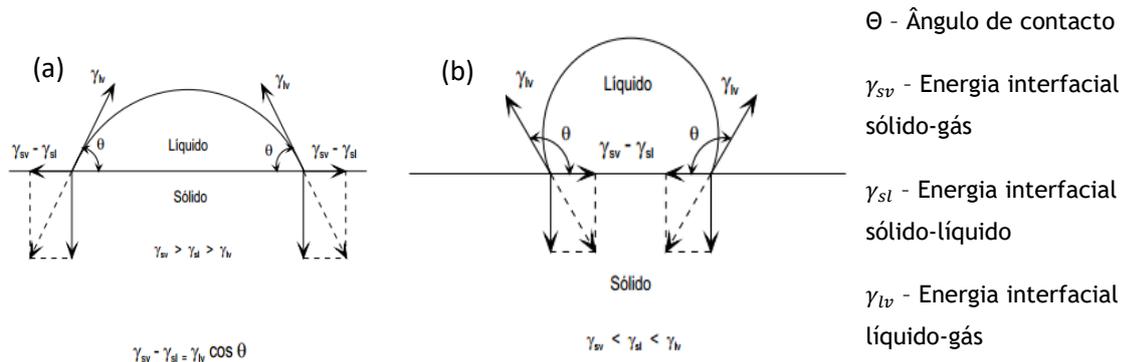


Fig. 6- Ângulo de contacto ente um gás, um sólido e um líquido: (a) elevada molhabilidade, (b) baixa molhabilidade [34].

Quando  $\theta < 90^\circ$ , há molhabilidade (Fig. 6 (a)), pelo que  $\gamma_{sv} > \gamma_{sl} > \gamma_{lv}$ . Contrariamente, para valores de  $\theta > 90^\circ$ , não há molhabilidade (Fig. 6 (b)), pelo que  $\gamma_{sv} < \gamma_{sl} < \gamma_{lv}$  [32].

A **capilaridade** constitui um fenómeno preponderante para a obtenção de ligações sãs. A atração capilar permite que o líquido preencha totalmente a zona da junta, evitando a ocorrência de porosidade ou de falta de material. A obtenção de junções estanques, através do processo de brasagem, está intimamente relacionada com este fenómeno [28, 29, 32, 33]. A Fig. 7 representa, de forma esquemática, esse fenómeno.

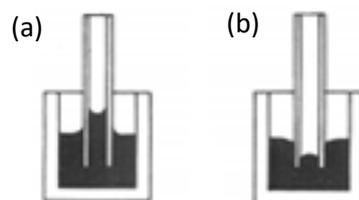


Fig. 7 - Esquema representativo do fenómeno da atração capilar: para líquidos com (a)  $\theta < 90^\circ$  e (b)  $\theta > 90^\circ$ . Adaptado de [29].

A molhabilidade de um líquido sobre a superfície de um sólido constitui condição necessária, mas não suficiente, para que ocorra o seu **espalhamento**. Para que ocorra o espalhamento de um líquido sobre a superfície de um sólido é necessário não só que ocorra a reação entre ambos como também que o sólido seja um interveniente ativo na reação, *i.e.*, ter-se-á que assistir sobretudo a uma alteração da composição química do sólido, pelo menos na interface [28, 32].

Deste modo, no processo de brasagem, é preponderante garantir que estes fenómenos mencionados anteriormente ocorram de forma a obter juntas brasadas com as características pretendidas

### 1.2.2. Métodos de preparação das superfícies dos materiais para brasagem

A preparação das superfícies dos materiais a serem unidos tem um efeito significativo sobre as propriedades mecânicas das juntas obtidas por brasagem pelo que, conseqüentemente, é necessário que esta seja realizada adequadamente e de acordo com os requisitos exigidos. As superfícies dos materiais a ligar devem estar isentas de qualquer sujidade e de filmes de óxidos ou compostos orgânicos. A remoção destes filmes é de particular importância uma vez que podem, eventualmente, participar nas reações que ocorrem na interface e, conseqüentemente, dar origem a produtos que podem comprometer a integridade da ligação [28, 32]. Esta limpeza deve ser efetuada imediatamente antes do processo de brasagem uma vez que a eficácia da preparação da superfície diminui com o tempo, sendo bastante afetada pelas condições de armazenamento dos componentes a serem unidos [28, 35, 36].

Vários métodos de preparação são aplicados com o intuito de garantir a molhabilidade e a coerência da superfície, nomeadamente em termos mecânicos, químicos, térmicos e eletroquímicos [35]. A limpeza por ultrassons constitui uma forma eficaz para a remoção de partículas soltas e alguns óleos orgânicos. Por sua vez, os contaminantes metálicos podem ser removidos por imersão em ácidos diluídos, seguida de uma lavagem com uma solução neutralizante. Para além disso, as superfícies dos carbonetos cementados devem ser granalhadas de modo a remover a camada superficial obtida na sinterização [36-38].

Deste modo, a preparação das superfícies dos componentes a serem ligados inclui, essencialmente, duas categorias (química e mecânica) de processos [28, 35]:

- A limpeza química constitui o método mais eficaz para a remoção de óleos e gorduras;
- A granalhagem das superfícies a serem brasadas permite a remoção de filmes de óxidos e confere rugosidade às superfícies.

### 1.2.3. Fluxos

Os fluxos são uma mistura de sais inorgânicos cuja função é exclusivamente promover a decapagem química das superfícies a serem brasadas e encapsular a liga de brasagem de modo a evitar a contaminação da junta pelo meio envolvente. Para que tal se verifique, é necessário que permaneçam no estado líquido até às temperaturas desejadas, se espalhem adequadamente ao longo da superfície e sejam facilmente deslocados pela liga de brasagem [39].

A norma DIN EN 1045 estabelece duas classes de fluxos: os FH e os FL. Os fluxos FH são fundamentalmente utilizados para metais de elevada densidade (aços, aços inoxidáveis, Cu e suas ligas, Ni e suas ligas, metais preciosos, Mo e W) enquanto os fluxos da classe FL são utilizados na brasagem de Al e suas ligas. Contudo, é importante salientar que estes agentes contêm, muito frequentemente, compostos de B e/ou F, higroscópicos, que terão de ser removidos após o processo de brasagem, devido à sua natureza corrosiva [39].

Os fluxos utilizados no processo de brasagem são normalmente comercializados sob a forma de pós, pasta ou líquido. A forma selecionada depende dos requisitos individuais de cada componente e da técnica de brasagem [1]. Os fluxos existentes para diferentes áreas de aplicação variam de acordo com a temperatura de trabalho, a capacidade de dissolução dos óxidos de um metal específico e a sua consistência [28].

### 1.2.4. Influência da geometria e dimensões da junta de união

#### 1.2.4.1. Geometria da junta de união

A geometria da junta de união deve ter em consideração alguns fatores de particular importância como: a resistência mecânica e à corrosão pretendidas, a condutividade elétrica e térmica necessárias, os materiais a serem unidos, o modo de aplicação da liga de brasagem e as inspeções a realizar após o processo de união. É ainda necessário ter em conta outros parâmetros, nomeadamente a ductilidade do

material base, as tensões a que a junta vai estar sujeita e o movimento relativo das duas superfícies durante o processo de brasagem [28, 29, 33].

Por fim, importa lembrar que o fluxo da liga de brasagem, à temperatura de brasagem, é determinado pela geometria da junta. As dimensões e a forma da junta podem sofrer alterações durante o aquecimento, devido à heterogeneidade da temperatura e/ou a diferentes coeficientes de expansão térmica. Estes fatores são bastante importantes, não só pelo seu possível efeito na resistência da junta, mas também devido às tensões internas a que são submetidos os componentes a ligar, como resultado de uma contração diferencial, podendo levar à rotura durante o arrefecimento ou até mesmo em serviço [28, 29, 33].

#### 1.2.4.2. Dimensões da junta de união

A velocidade média,  $v$ , do fluxo capilar entre superfícies horizontais paralelas, é calculada a partir da seguinte expressão [29]:

$$v = \frac{D\gamma\cos\theta}{6\eta s} \quad (1)$$

em que  $D$  corresponde à folga da junta de união,  $\gamma$  à tensão superficial da liga de brasagem,  $\eta$  à sua viscosidade,  $\theta$  ao ângulo de contacto, e  $s$  à distância percorrida pelo fluxo de metal. Não há limite para a distância a ser percorrida pelo fluxo da liga de brasagem, mas a sua velocidade média diminui com o aumento da distância ao ponto de alimentação. O tempo que a liga de brasagem demora a percorrer a distância  $s$  é dado por [29]:

$$t = \frac{3s^2}{D\gamma\cos\theta} \quad (2)$$

Se a folga da junta é muito pequena, a quantidade de fluxo presente pode não ser suficiente para dissolver os óxidos presentes ou, mesmo que tal se verifique, poderá registar-se uma dessincronização entre o avanço do fluxo e do cordão de brasagem e, até mesmo, o bloqueio desse avanço [29].

Como os fatores discutidos anteriormente afetam a dimensão ideal da folga da junta, são apresentados na Tabela 2 valores de folgas para as mais variadas aplicações de brasagem [29].

Tabela 2 - Valores de folga recomendados (mm) [29].

Liga de brasagem	Metal base					
	Cu	Ligas de Cu	Aços ao C	Aços inoxidáveis	Al e suas ligas	Ti
Cu	–	–	0,000±0,051	0,025-0,076	–	–
Cu-Zn	0,076-0,267	0,076-0,267	0,051-0,254	0,076-0,267	–	–
Cu-P	0,051-0,254	0,076-0,267	–	–	–	–
Ligas de Ag (Ag; Cu-Cd-Zn)	0,051-0,267	0,051-0,267	0,025-0,152	0,076-0,267	–	–
Ligas de Al	–	–	–	–	0,127-0,635	0,051-0,254
Ni-Cr	–	–	0,051-0,127	0,076-0,254	–	–
Ag-Mn	–	–	0,076-0,127	0,076-0,127	–	0,051-0,076
Ag-Mn-Pd	–	–	0,025-0,127	0,025-0,127	–	–

No gráfico da Fig. 8 é apresentada a variação da resistência à rotura ( $\sigma_R$ ) em função da folga da junta de união ( $D$ ).

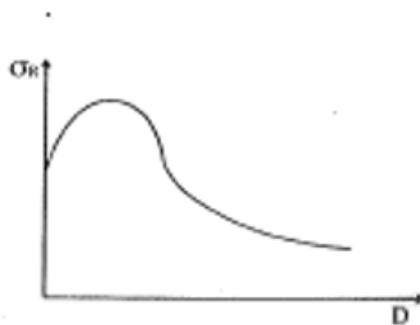


Fig. 8 - Resistência à rotura em função da folga da junta [40].

A folga da junta deve estar compreendida entre os 0,1 e os 0,25 mm para que se obtenham juntas brasadas de boa qualidade e, conseqüentemente, com maior resistência à rotura.

#### 1.2.5. Ligas de brasagem

Existe um conjunto de requisitos básicos a que deve obedecer qualquer metal de enchimento utilizado no processo de brasagem [41]:

- 1) A liga deve apresentar uma temperatura de fusão inferior à dos componentes a serem unidos;
- 2) A liga deve possuir a molhabilidade adequada face aos materiais a unir;
- 3) O fluxo do material de enchimento deve ser compatível com a folga da junta e ser capaz de utilizar a ação capilar para preencher a área de união;
- 4) A liga deve ser capaz de proporcionar a resistência mecânica e à corrosão da união, para a aplicação solicitada.

Uma das características mais importantes do metal de adição é o seu coeficiente de expansão térmica, que deverá ser semelhante ao dos materiais a serem brasados; quando existe uma diferença significativa entre os seus valores, podem ocorrer concentrações de tensões residuais que, em alguns casos, podem assumir valores elevados [41].

Após a operação de brasagem, o conjunto deve permanecer inamovível até a solidificação da liga estar concluída. Qualquer movimento durante a solidificação da liga de brasagem pode induzir a fragilização da junta de brasada [41].

Existem inúmeras ligas de brasagem, com composições distintas, utilizadas na brasagem de metal duro. Cada liga possui um uso específico e é adaptada para a aplicação pretendida [20].

As ligas de brasagem estão disponíveis numa grande variedade de formas e devem ser selecionadas de acordo com os requisitos do processo de união. Tipicamente estão disponíveis nas seguintes formas [41]:

- Folha;
- Pó;
- Lingote/grânulos;
- Vareta;
- Bobine;
- Pasta.

#### 1.2.5.1. Ligas à base de prata

As ligas de brasagem à base de Ag são caracterizadas pela sua baixa temperatura de *liquidus*, entre 600°C e 970°C, de acordo com a norma DIN EN ISO 17672. Uma vez que estas ligas permitem temperaturas de brasagem mais baixas, há uma menor exposição térmica dos materiais de base e, conseqüentemente, um nível inferior de tensões residuais nos componentes. Estas ligas de brasagem são utilizadas para a maioria dos metais ferrosos e não ferrosos e suas ligas, à exceção do Al e do Mg [28, 39].

Para além da Ag, estas ligas contêm, frequentemente Cu e Zn, e a adição de Ni e Mn melhora a molhabilidade dos carbonetos e de outros materiais de baixa molhabilidade, contribuindo para um aumento da rigidez da junta brasada. Normalmente, este tipo de ligas de brasagem pode ser aplicado em todos os métodos

de brasagem; contudo, é maioritariamente utilizado na brasagem por indução e por tocha oxiacetilénica, com a adição de fluxos [28, 39].

#### 1.2.5.2. Ligas à base de cobre

O grupo das ligas à base de Cu é caracterizado por apresentarem uma temperatura de *liquidus* entre 970°C e 1100°C, consideravelmente superior à das ligas de brasagem à base de Ag. Deste modo, as tensões térmicas induzidas são, notavelmente, superiores e podem levar à diminuição da resistência do conjunto [28, 39].

A adição de Ni proporciona um aumento da rigidez deste tipo de ligas. Por outro lado, a adição de Mn permite reduzir a temperatura de brasagem e melhorar a molhabilidade dos aços. A incorporação de P também é comum neste tipo de ligas. As ligas contendo P fundem a temperaturas inferiores (entre 645°C e 920°C) comparativamente às outras ligas à base de Cu. No entanto, este tipo de ligas não deve ser utilizado na brasagem de materiais que contenham Fe, Ni e outros materiais comumente utilizados na indústria de fabricação de ferramentas. O problema advém do facto do P se difundir durante a brasagem, dando origem, por exemplo, à formação de fosforetos de ferro na interface de união mais próxima do material de base. Como resultado, obtém-se uma junta bastante frágil, o que deverá ser evitado [28, 39].

#### 1.2.5.3. Ligas de brasagem tri-metálicas

As ligas de brasagem tri-metálicas são caracterizadas pela sua estrutura tipo *sandwich*, como ilustra a Fig. 9, e são bastante utilizadas na brasagem de ferramentas. Normalmente, este tipo de ligas combina a excelente ductilidade do Cu com a baixa temperatura de fusão das ligas de Ag.

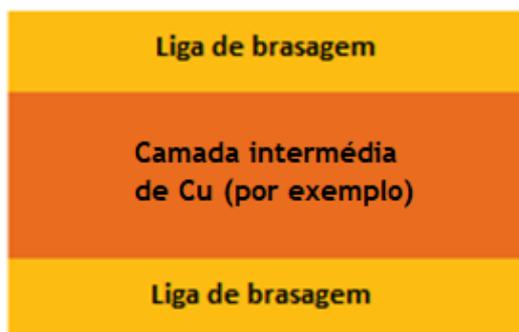


Fig. 9 - Esquema representativo das ligas de brasagem tri-metálicas [19].

Uma camada intermédia de Cu é revestida em ambos os lados por uma liga de Ag. A relação de espessura *standard* é 1:2:1 (metal de enchimento: camada intermédia: metal de enchimento); no entanto, outras relações de são também possíveis. A utilização de uma camada intermédia de Cu ou uma liga dúctil tem como principal objetivo absorver as tensões que possam eventualmente surgir durante o arrefecimento. Ou seja, no arrefecimento, após o processo de brasagem, as tensões são reduzidas devido à deformação plástica da camada intermédia que é relativamente mais dúctil que a liga de brasagem propriamente dita e o(s) metal(is) dos componentes a unir [28, 39].

#### 1.2.6. Processos de brasagem

Os requisitos para a obtenção de uma boa junta brasada são os seguintes [41]:

- Junta projetada corretamente, com ajuste e folgas adequadas;
- Limpeza da superfície dos metais a unir;
- Seleção e aplicação de fluxo;
- Seleção adequada da liga de brasagem;
- Alinhamento das superfícies a serem unidas;
- Aquecimento uniforme de ambas as partes a unir.

Existem diversos processos de brasagem para a união de metais cuja classificação varia de acordo com as fontes de calor utilizadas no processo.

O processo de brasagem é tipicamente efetuado por tocha oxiacetilénica ou num forno. Contudo, podem ser utilizados outros métodos como, por exemplo, a brasagem por indução. São vários os critérios adotados para selecionar a fonte mais adequada, entre os quais se destaca a velocidade de aquecimento, a zona termicamente afetada e a homogeneidade ou adaptabilidade do perfil de temperatura. A velocidade de aquecimento depende, sobretudo, da forma como o calor é transferido para o componente. A quantidade de calor transferida varia em função do método de aquecimento aplicado [39].

##### 1.2.6.1. Brasagem por indução

A brasagem por indução depende das correntes alternadas de alta frequência que fluem através das bobinas de indução (ver Fig. 10) para que seja criado um campo eletromagnético à volta da peça de trabalho.



Fig. 10- Brasagem por indução [1].

O calor, imediatamente gerado na peça de trabalho, permite obter taxas de aquecimento bastante elevadas, comparativamente às dos restantes processos, e assegurar a fusão do metal de adição [28, 39]. Normalmente, são utilizadas densidades de potência entre os 0,5 e os 1,5 kW/cm<sup>2</sup> [28].

O processo de brasagem por indução constitui uma técnica eficiente para processos automatizados, que podem ser controlados remotamente, e permite a utilização de uma variedade de fluxos. O facto do calor estar localizado na superfície da peça, ou imediatamente abaixo, constitui uma vantagem de particular importância quando se pretende unir componentes onde não são toleradas quaisquer alterações microestruturais ou que só permitem uma distorção mínima ou até mesmo nenhuma distorção [1, 28, 31, 39].

Na brasagem de componentes de metais dissimilares, como por exemplo aço/carbonetos cementados, os diferentes materiais vão responder de forma diferente ao aquecimento, *i.e.*, os materiais vão aquecer a velocidades distintas. No entanto, é possível alterar a geometria do indutor, o seu posicionamento ou mesmo a duração do processo de modo a contornar este problema [39].

A geometria dos indutores constitui uma limitação no que diz respeito à complexidade do componente que se pretende ligar. Por este motivo, a brasagem sob vácuo (ver secção 2.2.6.2.) constitui uma alternativa mais viável quando se pretende ligar componentes com uma geometria mais complexa. Relativamente à geometria da junta, esta deve ter em consideração a expansão térmica, devendo ser utilizadas folgas entre 0,05 e 0,13 mm; no entanto, folgas até 0,20 mm são também aceitáveis [28].

Outra das vantagens deste processo está relacionada com o facto de poder ser aplicado a uma grande variedade de materiais, incluindo cerâmicos e plásticos, sendo apenas necessário proceder a uma prévia metalização das superfícies antes de iniciar o processo [41]. Contudo, este processo requer um elevado investimento em equipamento [28].

#### 1.2.6.2. Brasagem sob vácuo

A popularidade da brasagem sob vácuo advém da adaptabilidade do forno (Fig. 11). Na presença de vários conjuntos a serem brasados, o próprio peso dos componentes é suficiente para mantê-los unidos. No caso de configurações complexas, o recurso a um ou dois blocos de metal é suficiente para garantir a fixação necessária [28, 42].



Fig.11- Forno de vácuo [1].

A brasagem sob vácuo é um processo adequado para grandes volumes de produção. Antes de inserir o conjunto a brasar no forno, há que colocar a liga de brasagem, cuja forma varia consoante a geometria do componente. Posteriormente, é criado o vácuo no interior do forno e procede-se ao seu aquecimento até uma temperatura superior à temperatura de *liquidus* da liga de brasagem e inferior à da fusão dos materiais de base. Finalmente, os componentes brasados são arrefecidos segundo ciclos bem delineados, por forma a provocar a mínima distorção possível e obter as propriedades pretendidas para o conjunto [28].

O processo de brasagem sob vácuo é muitas vezes tido como o mais adequado quando o substrato é um aço [31, 41]. Este processo é efetuado sob vácuo ou ainda sob atmosfera de um gás inerte, prevenindo-se assim a ocorrência de oxidação durante a brasagem. No entanto, apresenta a desvantagem de proporcionar o aquecimento de todo o componente durante o ciclo de brasagem. Para além de

afetar as características metalúrgicas do componente, este processo é demorado e requer um espaço físico considerável. Mais ainda, é caracterizado por consumir bastante energia [41].

A principal característica deste processo de brasagem prende-se com a homogeneidade da temperatura e a possibilidade de controlar a atmosfera. Isto facilita a monitorização e o controlo dos parâmetros do processo e permite a brasagem de diversos componentes num único ciclo [39, 42].

Outro fator a ter em consideração na brasagem sob vácuo é o facto de nem todas as ligas de brasagem poderem ser aplicadas devido às elevadas pressões de vapor de alguns dos elementos de liga (como por exemplo o Zn) que podem levar à contaminação da câmara do forno [39].

#### 1.2.6.3. Brasagem por tocha oxiacetilénica

Este processo de brasagem é o mais frequentemente utilizado para a realização de operações especiais ou para volumes de produção reduzidos. É amplamente utilizada devido, sobretudo, ao seu baixo custo, à sua portabilidade e versatilidade [28].

Este processo consiste, normalmente, no aquecimento dos componentes com uma chama de gás, através de uma tocha manual (Fig. 12) ou recorrendo a queimadores que se encontram incorporados numa máquina. A chama resulta da combustão de um gás combustível no seio de oxigénio. As configurações automáticas, que incorporam vários queimadores, podem chegar a produzir centenas de componentes por hora [28, 31]. Normalmente, para componentes de maiores dimensões, são utilizadas configurações que incorporam vários queimadores de modo a proporcionar um aquecimento mais homogéneo [39].



Fig. 12- Brasagem manual por tocha oxiacetilénica [1].

A brasagem por tocha oxiacetilénica apresenta algumas vantagens relativamente à brasagem por indução de componentes de aço/carboneto cementado na medida em que aquece diretamente o carboneto cementado, não dependendo do calor transmitido por condução. É mais rápida que a brasagem sob vácuo e pode também ser aplicada em zonas bem localizadas. No entanto, a área exposta ao calor é superior comparativamente à da brasagem por indução [28, 39]. É relativamente simples e de fácil execução, não requerendo grande tempo de aprendizagem [28].

Normalmente, a realização deste processo requer a utilização de fluxos; contudo, existem algumas exceções, nomeadamente a brasagem do Cu puro a uma liga de brasagem contendo P que reage com os óxidos da superfície, não sendo então necessário qualquer tipo de fluxo [28].

Na brasagem sob vácuo, os componentes são principalmente aquecidos por radiação, mas também por convecção e condução. A Tabela 3 ilustra que a brasagem sob vácuo transfere menos calor que a brasagem por tocha oxiacetilénica e a brasagem por indução, pelo que a brasagem sob vácuo é um processo mais demorado [39].

Tabela 3 - Transferência de energia nos diversos processos de brasagem [39].

Processo de brasagem		Transferência de energia (W/cm <sup>2</sup> )
Vácuo	Convecção	0,5
	Radiação	8
	Condução	20
Tocha oxiacetilénica		1000
Indução		30000