

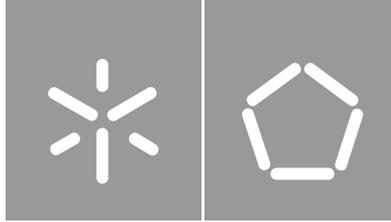


José Duarte Cação de Sousa

**Estudo de Adaptabilidade de um
Equipamento Oficial ao Processo de
Soldadura por Fricção**

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho

Escola de Engenharia

José Duarte Cação de Sousa

**Estudo de Adaptabilidade de um
Equipamento Ofical ao Processo de
Soldadura por Fricção**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Especialização em Tecnologias de Manufatura

Trabalho efetuado sob a orientação do

**Professor Doutor José Joaquim Carneiro
Barbosa**

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-Não Comercial

CC BY-NC

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

AGRADECIMENTOS

Num percurso académico que culmina com a realização desta dissertação, conta-se, inevitavelmente, com o apoio e incentivo de vários. Por isso, expresso aqui, os meus agradecimentos sinceros a todos eles que, direta e indiretamente, colaboraram na elaboração deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao corpo docente da Universidade do Minho que acompanhou a minha caminhada ao longo destes cinco anos e onde tive o privilégio de poder aprender com excelentes profissionais, entre eles, um especial agradecimento ao Professor Doutor Joaquim Barbosa, que prontamente aceitou orientar a minha dissertação, revelando uma disponibilidade total e uma enorme pertinência nas críticas e sugestões. Os seus conselhos e entusiasmo contagiante foram determinantes para o resultado final alcançado.

Ao Engenheiro Filipe, das Oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, que candidamente partilhou o seu conhecimento na área e prestou todo o auxílio necessário na realização dos ensaios práticos.

Porque o sucesso académico depende de uma sólida base emocional, é inevitável não agradecer a um conjunto de amigos que me acompanharam ao longo destes anos, quer festejando comigo todas as minhas vitórias, quer partilhando o sofrimento nos momentos mais difíceis e dando-me sempre a força que me faltava. Ao Américo, Cláudia, João, Pedro, Mariana, Magna e tantos outros que seria exaustivo mencionar, o meu muito obrigado. Todos eles sabem o quão importantes são para mim, e aqui reforço o agradecimento que lhes devo.

Deixo para o fim aqueles a quem todos os agradecimentos nunca serão suficientes e que jamais conseguirei pôr em palavras o quanto os admiro, o quanto me orgulho deles, e o quanto lhes agradeço por tudo o que fazem por mim e por todos os seus ensinamentos. A minha família, em especial aos meus pais e irmão. A eles agradeço por terem estado sempre e incondicionalmente ao meu lado, e por me terem dado a força que precisei para chegar até aqui.

A todos vós, o meu muito Obrigado!

Declaração de Integridade

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

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

ESTUDO DE ADAPTABILIDADE DE UM EQUIPAMENTO OFICINAL AO PROCESSO DE SOLDADURA POR FRICÇÃO

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a possibilidade de adaptação de um engenho de furar, como forma de averiguar se este seria capaz de desempenhar satisfatoriamente o processo de soldadura por fricção.

Numa fase inicial, começou por ser efetuado um levantamento bibliográfico acerca do processo de soldadura no estado sólido, das suas propriedades e características inerentes. Nesse seguimento, são apresentados alguns exemplos de processos de ligação e introduz-se o conceito de soldadura por fricção como um dos métodos que se insere nas técnicas de soldadura no estado sólido. Ainda sobre a soldadura por fricção, foram analisadas diversas tecnologias utilizadas atualmente na indústria, bem como as diferentes variáveis (tais como a pressão axial, par de materiais utilizados nos provetes e velocidade de rotação, para mencionar alguns) e os seus resultados práticos da sua aplicação no processo.

Foram realizadas as primeiras experiências de soldadura por fricção, usando sobretudo a máquina furadora. Com os resultados obtidos da ligação entre provetes de aço, alumínio, bem como entre provetes dos dois materiais (soldadura de pares de materiais dissimilares), o processo foi progressivamente aperfeiçoado e recolhidas as informações relativas ao comportamento do engenho de furar mediante as diferentes solicitações.

Com base nos comportamentos insatisfatórios registados pelo engenho de furar nas experiências mencionadas acima, é proposto um novo método de soldadura, desta vez partindo do uso do torno mecânico, que funcionando em simbiose com a criação de um módulo auxiliar, deverão ser capazes de realizar o processo de soldadura por fricção.

PALAVRAS-CHAVE: ESTADO SÓLIDO; FRICÇÃO; SOLDADURA.

EVALUATING THE ADAPTATION OF MECHANICAL EQUIPMENT TO PERFORM THE FRICTION WELDING PROCESS

ABSTRACT

This work is mainly focused on evaluating the possibility of adapting a drilling machine into correctly performing the friction welding process.

Firstly, a bibliographic research about the solid state welding was made, where includes its properties and characteristics. Some examples are mentioned and the friction welding process is introduced as part of a solid state welding process. Some of the friction welding technologies applied in industries nowadays are analysed and its different variables (such as axial pressure, used materials, velocity and others) were also discussed.

Having that in mind, the first set of friction welding experiments took place using the EFI-FG drilling machine. With the results obtained from the aluminium samples welding, steel samples and also from these two simultaneously (dissimilar materials welding), the process was continuously optimized and information was gathered regarding the behaviour of the drilling machine and operating under different loads.

With the knowledge mentioned above as a starting basis, a new method of friction welding is proposed. However, now using a lathe machine working in symbiosis with a specially designed equipment.

KEYWORDS: FRICTION; SOLID STATE; WELDING.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Símbolos, Abreviaturas e Acrónimos.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1 Breve nota histórica sobre a soldadura.....	3
1.1.1 Soldadura por fricção.....	3
1.2 Objetivos.....	5
1.3 Estrutura da dissertação.....	6
2. Estado da Arte.....	7
2.1 Soldadura no Estado Sólido.....	7
2.1.1 Coesão nos Metais.....	8
2.1.2 Contacto entre Superfícies.....	9
2.1.3 Requisitos para a Ligação de duas Superfícies em Estado Sólido.....	11
2.1.4 Efeito da Quantidade de Deformação nos Processos de Soldadura no Estado Sólido... ..	12
2.1.5 Efeitos dos Filmes Superficiais na Soldadura no Estado Sólido.....	14
2.1.6 Exemplos de Diferentes Técnicas de Soldadura no Estado Sólido.....	14
2.2 Soldadura por Fricção.....	17
2.2.1 Enquadramento Teórico.....	20
2.2.2 Soldadura por Fricção de Materiais Dissimilares.....	26
2.2.3 Exemplos de Componentes Soldados usando a Fricção.....	29
2.3 Tecnologias da Soldadura por Fricção.....	30
2.3.1 Método Convencional.....	31
2.3.2 Método de Ação por Inércia.....	33
2.3.3 Controlo de Qualidade na Soldadura.....	38
2.3.4 Vantagens e Desvantagens do Processo de Soldadura por Fricção.....	40

3.	Procedimentos Experimentais	41
3.1	Seleção do Equipamento a Utilizar.....	42
3.2	Preparação do Material Base para Criação dos Provetes	42
3.3	Metodologia do Processo Experimental de Soldadura	44
3.4	Ensaio Preliminares	46
3.5	Evolução dos Ensaio de Soldadura	50
3.5.1	Soldadura de Materiais Dissimilares: Aço/Alumínio	52
3.5.2	Soldadura de Provetes com Interface de Ø6 mm.....	58
3.6	Súmula	62
4.	Proposta de um Dispositivo de Soldadura por Fricção.....	64
4.1	Requisitos de um Equipamento de Soldadura por Fricção	64
4.2	Módulo Adaptador para o Torno Mecânico	66
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	74
5.1	Conclusões	74
5.2	Trabalhos Futuros	76
	Bibliografia	77
	Anexo I – Especificações Técnicas do Engenho de Furar	79
	Anexo II – Dados Técnicos da Máquina Rebarbadora	80
	Anexo III – Imagens microscópicas do provete	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipamento Americano de soldadura por fricção, com recurso a volante de inércia. Adaptado de [5].	4
Figura 2 – Forças de atrativas e repulsivas entre átomos de cobre. Adaptado de [7].	8
Figura 3 – Perfil de uma superfície (imagem à esquerda) e respetiva linha média do perfil, na imagem da direita. Nessa mesma imagem, é visível um contorno a vermelho, que não é mais do que curso obtido pelo apalpador de um determinado instrumento de medição. Adaptado de [8].	10
Figura 4 – Modelo de uma superfície irregular. As áreas a traço interrompido representam as áreas de contacto físico (real), S_k ; Enquanto a área nominal corresponde a $S_n=ab$. Adaptado de [9].	10
Figura 5 - Relação entre deformação necessária para a soldadura e temperatura. Adaptado de [6].	13
Figura 6 - Relação típica entre deformação e força axial para soldas realizadas à temperatura ambiente em metais. Adaptado de [6].	13
<i>Figura 7 – Estrutura da interface na soldadura por pressão. Adaptado de [6].</i>	15
<i>Figura 8 – Soldadura por explosão. Adaptado de [6].</i>	16
<i>Figura 9 – Parte de uma interface obtida com recurso à soldadura por explosão entre dois componentes de aço. Na imagem evidenciam-se zonas onde ocorreu a soldadura, e por vezes mostrando pequenos poros. Adaptado de [6].</i>	16
Figura 10 -Esquema ilustrativo dos passos fundamentais do processo convencional de soldadura por fricção. (a) Um dos componentes está provido de rotação, enquanto que o outro é mantido estacionário. (b) Os componentes são aproximados. É aplicada força axial para iniciar o processo de deformação. (c) A rotação é cessada e o processo de deformação é finalizado. Adaptado de [12].	18
Figura 11 – Métodos de soldadura por fricção (segundo Vill [9]).	18
Figura 12 – Curvas de Velocidade de rotação-binário durante as etapas de soldadura por fricção. Adaptado de [7].	21
Figura 13 – Caracterização da tensão de corte como função da pressão axial. Neste diagrama, a condição ideal de passagem entre a fase de deformação de asperidades e contacto plástico é mostrada com uma linha contínua, contudo, as condições reais são mais difíceis de definir e são aqui representadas pela curva tracejada. Adaptado de [13].	23
<i>Figura 14 – Esquema representativo das duas condições interfaciais que podem surgir na soldadura por fricção. (a) O contacto real é muito inferior ao contacto nominal e a deformação apenas ocorre nas</i>	

<i>asperidades. (b) Existe um contacto puramente plástico na interface, sendo a deformação igualmente distribuída por toda a sua periferia. Adaptado de [13].</i>	24
<i>Figura 15 -Zona termicamente afetada gerada pela soldadura por fricção num provete de aço.....</i>	24
<i>Figura 16 – Deformação plástica quantificada sob a forma de “taxa de encurtamento”. Na medição à esquerda regista-se um comprimento total nos provetes (não soldados) com cerca de 97 mm; na imagem à direita verifica-se um encurtamento em cerca de 4mm do provete soldado e a formação de um rebordo na periferia da interface.....</i>	25
<i>Figura 17 – Geometria de um varão soldado com recurso à fricção (Segundo Dickinson). Adaptado de [7].....</i>	26
<i>Figura 18 – Exemplo de formação típica de uma camada intermetálica na junção entre o alumínio (região mais clara) e o ferro (região mais escura). Adaptado de [18].....</i>	28
<i>Figura 19 - Ligação por soldadura por fricção das flanges ao corpo de uma válvula de elevada pressão utilizada na indústria petrolífera. Adaptado de [4].....</i>	29
<i>Figura 20 - Casos práticos de aplicação de soldadura por fricção. Adaptado de [11].....</i>	29
<i>Figura 21 – Válvulas de motores de combustão interna, soldadas com recurso à fricção. Adaptado de [11].....</i>	30
<i>Figura 22 – Esquema representativo de um equipamento de soldadura de fricção, preparado para reproduzir o método de ação direta. Adaptado de [12].</i>	31
<i>Figura 23 – Comportamento da Velocidade de Rotação, pressão axial e taxa de deformação/encurtamento em função do tempo relativo das três fases de soldadura no método de ação direta. Adaptado de [12].</i>	32
<i>Figura 24 - Esquema representativo de um equipamento de soldadura de fricção, preparado para reproduzir o método de ação por inércia. Adaptado de [12].</i>	33
<i>Figura 25 - Comportamento da Velocidade de Rotação, pressão axial e taxa de deformação/encurtamento em função do tempo relativo das três fases de soldadura no processo de ação inércia. Adaptado de [12].</i>	34
<i>Figura 26 – Esquema que traduz o efeito dos parâmetros de soldadura obtido na interface de dois metais similares usando o método de ação por inércia. (a) Energia do volante de inércia. (b) Velocidade periférica inicial. (c) Força axial. Adaptado de [12].</i>	37
<i>Figura 27 – Provette de Alumínio submetido ao ensaio de dobragem. Sublinhe-se que este não foi obtido em concordância com a norma supracitada.....</i>	39
<i>Figura 28 – Corte dos componentes em aço, com o auxílio da serra de disco.....</i>	43

<i>Figura 29 – Componentes de aço e alumínio. Na imagem à esquerda, os varões no seu comprimento original, antes de qualquer corte. À direita, com um comprimento final de 50 mm.</i>	43
<i>Figura 30 – Primeira fase do processo de soldadura por fricção – Fase de fricção.</i>	45
<i>Figura 31 – Primeiro ensaio de soldadura por fricção, realizado usando dois componentes de alumínio com 100 mm de comprimento e Ø15,6 mm.</i>	47
<i>Figura 32 – Soldadura dos componentes de aço. Na imagem à esquerda observa-se a radiação de calor na interface superior à do restante provete (encontra-se ao rubro). Imagem à direita demonstra o provete soldado do ensaio.</i>	48
<i>Figura 33 – Interface do provete de aço, após ter sido submetido ao ensaio de dobragem. Evidencia uma clara falta de ligação em grande parte da sua área.</i>	49
<i>Figura 34 – Provetes de Alumínio (imagem da direita) e Aço (à esquerda), produzidos usando componentes com 50 mm de comprimento.</i>	50
<i>Figura 35 – Provetes de aço (à esquerda) e alumínio (imagem à direita) depois de cortados longitudinalmente e polidos. As setas indicam os defeitos na interface que impossibilitaram uma ligação total da interface.</i>	51
<i>Figura 36 – Provetes resultantes do estudo exploratório entre materiais dissimilares Aço/Alumínio.</i>	52
<i>Figura 37 – Corte longitudinal em provete obtido usando a soldadura de materiais dissimilares Aço (material da porção superior do provete) e Alumínio (material da porção inferior do provete).</i>	53
<i>Figura 38 – Aspeto final do provete, após realizadas as etapas de polimento no laboratório de Metalurgia.</i>	53
<i>Figura 39 – Excerto da visualização obtida microscopicamente na interface de soldadura entre metais dissimilares, entre aço (porção de material superior) e alumínio (porção de metal mais abaixo). Na zona central da figura é notória uma delaminação na ligação (zona central entre os componentes, a negro), onde não ocorreu a ligação de material.</i>	54
<i>Figura 40 – Comportamento da velocidade periférica (v) ao longo da periferia de um varão. Adaptado de [13].</i>	55
<i>Figura 41 – Formação de uma possível camada intermetálica, identificada na seta a vermelho, entre o Aço (mais escuro) e o Alumínio (região mais clara).</i>	55
<i>Figura 42 – Região do provete que se demonstra bem soldada, tal como visível na intimidade entre os diferentes metais, evidenciada na ampliação microscópica presente na mesma figura.</i>	57
<i>Figura 43 – Resultados obtidos para os novos valores de diâmetro entre materiais similares. Na imagem à esquerda, encontra-se o provete de alumínio e na imagem da direita, o de aço.</i>	60

<i>Figura 44 – Encurvamento obtido num componente de alumínio, derivado da falta de coaxialidade quando aliada a uma carga axial elevada.</i>	61
Figura 45 – Dispositivo da empresa KUKA capaz de exercer uma força de forjagem de 450kN e soldar secções máximas de 3750mm ² . Adaptado de [23].	65
Figura 46 – Diferentes órgãos componentes de um dispositivo de soldadura por fricção. Adaptado de [25].	67
Figura 47 – Torno convencional mecânico EFI-DU 2515.	68
Figura 48 - Esquema ilustrativo dos passos fundamentais do processo de soldadura proposto. (a) Um dos componentes está provido de rotação, enquanto que o outro é mantido estacionário. (b) Os componentes são aproximados. É aplicada força axial para iniciar e concretizar parte do processo de deformação. (c) A rotação relativa é cessada, destravando o componente inicialmente estacionário e o processo de deformação é finalizado com a aplicação da pressão de forjamento.	69
Figura 49 – Órgãos constituintes do equipamento de soldadura por fricção. À esquerda, demonstram-se os componentes pertencentes ao torno mecânico, do lado direito, os do módulo auxiliar.	70
Figura 50 - Sistema de travagem. Na imagem à esquerda a correia permite a rotação do rolamento, estando, portanto, o sistema destravado. Na imagem da direita, a correia exerce uma pressão numa grande área de rotação da chumaceira, impedindo a sua rotação. Adaptado de [28].	71
Figura 51 - Esboço do modo de funcionamento do conjunto (torno EFI-DU 2515/módulo auxiliar) para execução da soldadura por fricção.	72
Figura 52 - Modelação do barramento do torno EFI-DU 2515.	73
Figura 53 - Zona 1. Imagem microscópica da zona mais à esquerda do provete.	81
<i>Figura 54 - Zona 2.</i>	82
<i>Figura 55 - Zona 3.</i>	83
<i>Figura 56 - Zona 4.</i>	84
<i>Figura 57 - Zona 5.</i>	85
<i>Figura 58 - Zona 6.</i>	86
<i>Figura 59 - Zona 7.</i>	87
<i>Figura 60 - Zona 8.</i>	88
<i>Figura 61 - Zona 9.</i>	89
<i>Figura 62 - Zona 10. Imagem microscópica da extremidade direita do provete.</i>	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compatibilidade do processo de soldadura por fricção entre os diversos metais. Adaptado de [11].....	27
Tabela 2 – Vantagens e Desvantagens da soldadura por fricção. Adaptado de [11].....	40

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

SÍMBOLOS

σ	Tensão Normal
ω	Velocidade Angular
μ	Coefficiente de Atrito
v	Velocidade Periférica
A	Área
F	Força
H	Energia Térmica
I	Momento de Inércia
L	Carga axial
P	Pressão
S_x	Área de contacto efetivo
S_n	Área de contacto nominal
m	Massa
n	Número de Rotações
r	Raio
\emptyset	Diâmetro

SIGLAS E ACRÓNIMOS

BWRA	British Welding and Research Association
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
TIG	Tungsten Inert Gas
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
ZTA	Zona Termicamente Afetada

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os produtos manufaturados, desde os mais simples, até aos utilizados em indústrias especializadas, são obtidos por diferentes etapas e métodos de fabrico que lhes conferem as características desejadas: forma, textura, resistência mecânica, etc. Assim sendo, torna-se evidente que a indústria necessita de estar provida de um vasto leque de processos que tornem possível as mais arrojadas das especificações da carteira de clientes.

Tome-se o exemplo das indústrias de construção metálica e metalomecânica. Esta indústria depende fortemente de tecnologias de manufatura para atingir os objetivos desejados e assim criar novos produtos. São variados e numerosos os processos de manufatura que permitem atingir os resultados necessários: desde a subtração de material, tal como a maquinagem que, através da remoção de aparas, torna possível retirar material até ser atingido o produto final; passando por métodos que não necessitam de alterar a quantidade de material disponível, apenas a sua transformação de forma a que seja conferida a forma desejada, como por exemplo a conformação (forjamento, estampagem e quinagem, para mencionar alguns). Na adição de material, a partir de formas normalizadas, é feita progressivamente a adição e união de formas simples, de onde resulta o produto final com o grau de complexidade desejado. É neste último grupo de processos que a soldadura está inserida e, assim sendo, onde o presente estudo será primariamente focado.

A soldadura pode ser classificada tendo em conta o estado do material de base e material de adição, o modo de proteção de proteção da soldadura e a fonte de calor utilizada. Existe uma grande variedade de processos de soldadura capazes de se adequar à maioria dos cenários. Não obstante, estas encontram-se sempre condicionadas pelos materiais a unir, pela espessura da ligação e pela geometria da peça.

Atualmente, a soldadura representa um importante método de produção e reparação de equipamentos mecânico. Devido ao desenvolvimento das suas técnicas de aplicação, tem sido cada vez mais utilizada, em detrimento de construções rebitadas, fundição e outras.

O desenvolvimento dos métodos e técnicas de soldadura têm por objetivo um balanço ótimo entre a qualidade da junção e o custo da mesma, o que, muitas vezes, representam objetivos antagónicos [1].

De facto, é sabido que estes processos representam uma elevada percentagem do custo do produto final e são responsáveis por criar grandes desafios aquando a sua realização, sendo várias as razões que explicam esta quota tão significativa no custo final do produto. O facto de existirem diversas variações de processos de adição/ligação (por parafuso, por união com adesivo, por fusão, brasagem, arco submerso,

etc.), implica um profundo conhecimento das várias disciplinas da engenharia para solucionar o problema de forma otimizada.

Outro cenário que deverá ser tomado em consideração, reside no facto de maior parte dos processos de ligação serem introduzidos, geralmente, no final do processo de manufatura. Nesta fase final do fabrico, os valores do prejuízo no aparecimento de um componente defeituoso é exponencialmente maior, relativamente ao custo que terá um defeito no início do processo de manufatura. De mencionar, também, a elevada percentagem de falhas estruturais nas zonas de união, por estarem, muitas vezes, localizadas zonas de elevadas concentrações de tensão ou por serem simplesmente localizadas em zonas estruturalmente mais frágeis.

Estatisticamente, maior parte dos processos de soldadura efetuada na indústria é realizado com recurso à soldadura por arco elétrico. Existem, porém, vários processos de soldadura no estado sólido que permitem obter soluções otimizadas para certos tipos de aplicações mais restritas e especializadas. De entre elas, quando o produto manufaturado em causa possui pelo menos uma geometria de rotação, é possível que o processo de ligação seja a soldadura por fricção (tal como para o caso de varões, tubos, válvulas de escape e de admissão de um motor de combustão interna, entre outros). Neste caso, uma das peças é colocada a girar sobre a outra, provocando atrito entre as faces em contacto. O calor daí resultante aquece a interface até uma temperatura próxima da fusão. Após ser atingida essa temperatura é exercida uma pressão axial que promove a união das peças.

Deste processo, importa salientar o crescente interesse nas várias áreas da indústria (automóvel, ferroviária, naval) justificado por inúmeras mais valias: processo facilmente implementável em chão de fábrica, de fácil automatização, não requer operadores altamente especializados (ao contrário da soldadura convencional), apresenta durações de soldadura baixas, bem como áreas de ZTA muito reduzidas e não utiliza material de adição.

Ainda assim, a implementação deste processo força a que sejam devidamente estudados, analisados e compreendidos os diferentes parâmetros, quer a nível metalúrgico, quer as condições de operação dos equipamentos.

O processo de soldadura por fricção implica a necessidade de equipamentos que mantenham em posição adequada ambos os componentes (um deles fixo e outro em rotação relativa), capazes de garantir a potência necessária para criar calor e atingir a temperatura adequada e, ainda, com capacidade para exercer a pressão axial necessária a unir as peças. Todas as etapas podem ser automatizadas ou parcialmente automatizadas com pequenos auxílios do utilizador, para assim garantir a execução do processo de uma forma eficaz com um resultado positivo.

1.1 Breve nota histórica sobre a soldadura

A soldadura começou a ser desenvolvida ainda na época pré-histórica, nomeadamente na Idade do Bronze (de 3300 a.C. – 700 a.C.). Nesta altura, pequenas caixas circulares de ouro eram construídas recorrendo à soldadura por pressão.

Posteriormente, durante a Idade do Ferro (1200 a.C. – 700 a.C.) os Egípcios, paralelamente aos povos mediterrâneos, conseguiram, pela primeira vez, ser bem-sucedidos a soldar peças de ferro.

Apesar dos progressivos avanços ao longo da história, é apenas no século XIX, alavancada pela revolução industrial, que a soldadura por arco elétrico foi descoberta. Anos depois, este eletrodo, que previamente era constituído por grafite, é substituído por um arame metálico e torna-se desta feita num dos métodos de soldadura mais populares, até aos dias de hoje.

Em 1907, foi patenteado o primeiro eletrodo revestido, contribuindo para um processo de soldadura mais estável. Em 1916, foi desenvolvida a primeira versão do processo de soldadura MIG.

Com o romper da Primeira Grande Guerra, a procura pelos materiais metálicos, pelas soluções e métodos de ligação aumentou. Este fenómeno contribuiu para um avanço na soldadura: quer nos seus processos, quer no aparecimento de novos tipos de eletrodos. Em 1935, é de sublinhar a importantíssima descoberta do processo de soldadura por Arco Submerso, conhecida pelo seu alto poder de deposição de material. Ainda na primeira metade do século foi desenvolvido o processo de soldadura usando eletrodos de tungsténio em atmosfera de gás inerte, comumente denominado como TIG. Na década de 40, os métodos de soldadura tomaram conta por completo da indústria naval com o aparecimento da soldadura MAG e com os sucessivos progressos na soldadura MIG, que utiliza um arco elétrico em atmosfera inerte [2][3].

1.1.1 Soldadura por fricção

Apesar da soldadura por fricção já ser utilizada para soldar termoplásticos desde o ano de 1945, a primeira patente que descreve o processo de soldadura por fricção de metais foi concebida por A.I. Chudikov na União Soviética, como era conhecida no ano de 1956. usando um torno mecânico e barras de metal cilíndricas como material de base. Após a publicação desta patente e de um trabalho de investigação realizado no ano seguinte pelo Instituto de Investigação de Equipamento de Soldadura da URSS que levou ao desenvolvimento da primeira máquina de soldadura por fricção, a MST-1. Depois desta, houve um aumento considerável do interesse acerca do processo da soldadura por fricção: quer na Europa, mais concretamente no Reino Unido, onde no decorrer do ano de 1958, a BWRA desenvolveu

com sucesso um protótipo de uma máquina de soldadura por fricção; quer nos Estados Unidos, onde a AMF Corp., Caterpillar e a Rockwell International também desenvolveram várias máquinas para este processo [3][4].

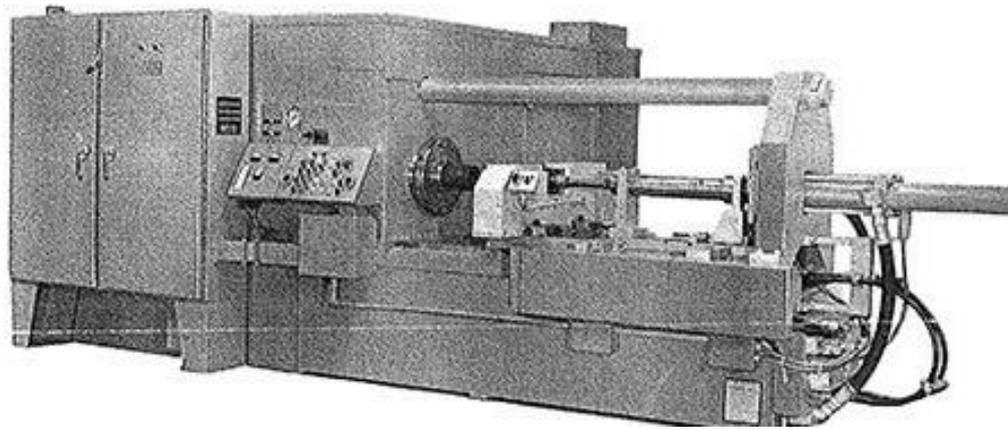


Figura 1 – Equipamento Americano de soldadura por fricção, com recurso a volante de inércia. Adaptado de [5].

1.2 Objetivos

Com a elaboração deste projeto, pretende-se integrar e aprofundar o conjunto de conhecimentos adquiridos ao longo do ciclo de estudos do curso do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Adicionalmente, a presente dissertação terá como principal objetivo a aquisição e validação de conhecimento acerca de um tema que se tem revelado de crescente interesse: a soldadura por fricção. Nesse sentido, são isolados vários objetivos que culminarão num todo coerente e bem estruturado, que se pretende que seja este trabalho. Por outras palavras, o escopo é uma apresentação dos capítulos individualmente, cada um com as suas diversas considerações sem que deixe de existir uma ligação lógica entre os vários assuntos.

De uma forma geral, os objetivos predefinidos para este trabalho, passaram, numa primeira fase, pela elaboração de uma aprofundada pesquisa bibliográfica sobre metodologias do processo de soldadura por fricção, reunião de dados e parâmetros sobre o processo, elaboração de testes experimentais e conceber/projetar alterações que permitam obter um dispositivo de soldadura por fricção que possa operar num ambiente académico, nas instalações do DEM.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação apresenta-se dividida em diversos capítulos, sendo que alguns deles apresentam ainda os seus respetivos subcapítulos para uma organização mais eficiente das ideias a expor.

No primeiro capítulo, é realizado um enquadramento geral acerca do trabalho: é apresentada a temática que motiva esta dissertação, feita uma introdução ao tema da soldadura por fricção e apresentados os objetivos da mesma.

No segundo dos capítulos, é abordado o tema na sua vertente bibliográfica. Recorrendo a autores de renome na área, explicitam-se as ideias fundamentais da soldadura no estado sólido. São apresentados os seus fundamentos, considerações e, ainda, exemplos de técnicas que utilizam a soldadura no estado sólido e, nesse seguimento, é num dos seus subcapítulos que se apresenta, igualmente, a soldadura por fricção.

De seguida, no terceiro capítulo, é descrita a atividade experimental da soldadura por fricção usando diversos componentes, de entre eles, componentes de materiais dissimilares. Observam-se e analisam-se os resultados. São discutidos alguns requisitos para o dimensionamento do dispositivo de soldadura por fricção.

O quarto capítulo apresenta as propostas para a concretização do dispositivo de soldadura, bem como algumas considerações e métodos de funcionamento dos mesmos.

Por fim, no quinto capítulo, revelam-se as conclusões a retirar desta dissertação e abordam-se aqueles que serão os trabalhos de interesse para uma realização *a posteriori*.

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica acerca do processo de soldadura, bem como algumas informações necessárias para uma compreensão mais aprofundada do tema que se apresenta: a soldadura por fricção.

Inicialmente será abordado o tema da soldadura com principal foco no seu estado sólido (quadro em que se insere a soldadura por fricção), de forma a posteriormente ser possível perceber melhor alguns dos conceitos relativos à soldadura por fricção.

De seguida, apresentam-se exemplos das técnicas empregues para a realização da soldadura no estado sólido.

Posto isto, é realizado um estudo mais pormenorizado acerca da soldadura por fricção e desmistificadas as etapas do processo. São, igualmente, introduzidos os conceitos por detrás das tecnologias que têm sido aplicadas no mercado e que são capazes de reproduzir este processo.

2.1 Soldadura no Estado Sólido

Para que se dê a soldadura no estado sólido entre dois componentes metálicos, é necessário fazer com que as superfícies (livres de qualquer tipo de resíduos) se aproximem o suficiente para que se crie uma ligação metálica entre ambos.

Para isso, existem várias técnicas em que a ideia fundamental passa por pressionar os componentes metálicos a soldar (quer seja a temperatura ambiente, quer a temperaturas mais elevadas), de modo a que haja uma deformação suficiente nas superfícies para garantir um contacto, parcial ou total, que exponha os dois materiais, sem a presença de nenhum filme óxido ou impureza. Apesar de parecer um processo relativamente simples, existem inúmeras considerações mecânicas, metalúrgicas e fenómenos complexos que é necessário ter em atenção, tais como dispersão dos filmes superficiais e difusão [6]. Tais tópicos serão abordados, em separado, mais adiante.

Primeiro, contudo, será necessário apresentar algumas breves considerações, acerca da coesão dos metais e dos mecanismos de ligação.

2.1.1 Coesão nos Metais

A coesão de um sólido com uma rede cristalina resulta da força atrativa entre os seus átomos constituintes. Normalmente, cada átomo ocupa uma posição de equilíbrio, na qual a força resultante sobre cada um deles é nula. Quando o sólido é submetido a cargas externas, os átomos movem-se além das suas zonas de equilíbrio e é criada uma tensão na estrutura cristalina do material. A contrariar esta carga externa, atua a força de atração entre os átomos, que aumenta consoante a sua separação, até que um certo ponto máximo de separação é atingido e a partir do qual a sua força de atração começa a perder intensidade, como demonstrado na Figura 2:

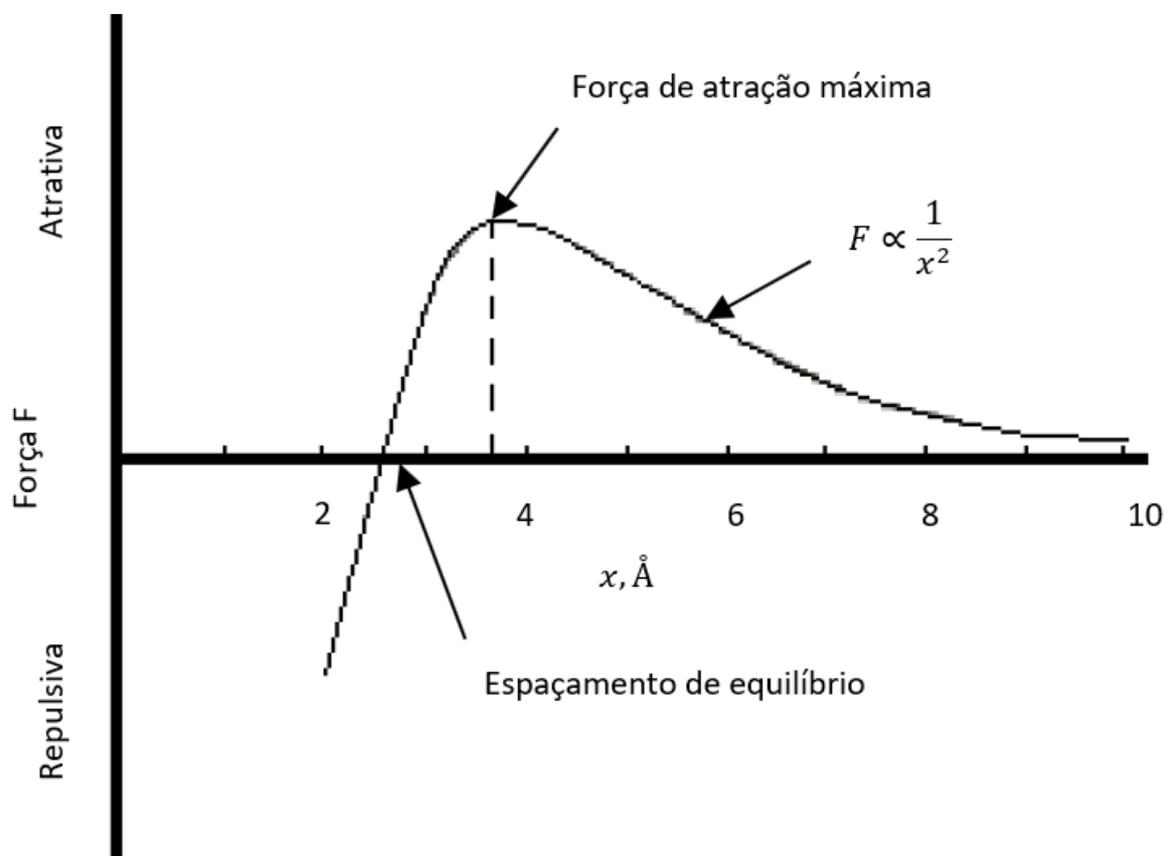


Figura 2 – Forças de atrativas e repulsivas entre átomos de cobre. Adaptado de [7].

Para metais que não possuam nenhuma má formação significativa na sua rede cristalina, e uma vez atingido este ponto de afastamento máximo, irá surgir um rompimento no plano cristalográfico onde as forças de interação interatómicas são mais fracas.

De uma forma teórica, seguindo este mesmo raciocínio, mas em vez de afastamento, tendo agora em conta uma aproximação superficial a nível interatómico (e assumindo que estas superfícies são desprovidas de qualquer tipo de rugosidades superficiais maiores do que a distância interatómica de

ambos os constituintes, livres de contaminantes e perfeitamente paralelas) as ligações metálicas entre ambas poderiam ocorrer espontaneamente, sem nenhum consumo de energia proveniente de uma fonte exterior. Estas ligações atômicas seriam, portanto, suficientes para produzir uma união das peças com a mesma resistência que as os seus dois componentes em separado [7]. Contudo, tais superfícies ideais não existem. De facto, as superfícies metálicas estão sempre cobertas por filmes de óxidos, contaminantes absorvidos (e adsorvidos), gases que impedem a ocorrência destas ligações metálicas e também porque não é possível atingir valores de rugosidade na ordem atômica de grandeza.

Mesmo em casos em que as superfícies se encontram cuidadosamente polidas, estes corpos sólidos estão repletos de rugosidades microscópicas: significa isto que, mesmo quando duas superfícies com estas características se aproximam uma da outra, na realidade o contacto inicial entre elas irá ocorrer de uma forma descontínua, contactando apenas em pontos dispersos, nos picos do perfil efetivo das superfícies, dependente, portanto, da rugosidade de cada par de superfícies [8].

Assim sendo, importa agora discutir o conceito de rugosidade superficial, abordado no tópico seguinte.

2.1.2 Contacto entre Superfícies

A rugosidade de uma superfície engloba as saliências e reentrâncias que nelas se encontram. Por outras palavras, são os desvios numa superfície quando comparada com uma superfície ideal, que seria, portanto, desprovida de rugosidade.

Este fator pode ter influência em diversas funcionalidades, tais como na qualidade do deslizamento (atrito seco e viscoso) e nas vibrações do sistema peça-ferramenta, para mencionar algumas.

Existem vários parâmetros que quantificam este fenómeno em função de uma linha de referência, disposta na direção do perfil e dividindo-o de tal forma que a soma das áreas acima é igual à soma das áreas abaixo: linha média [8] (Figura 3).

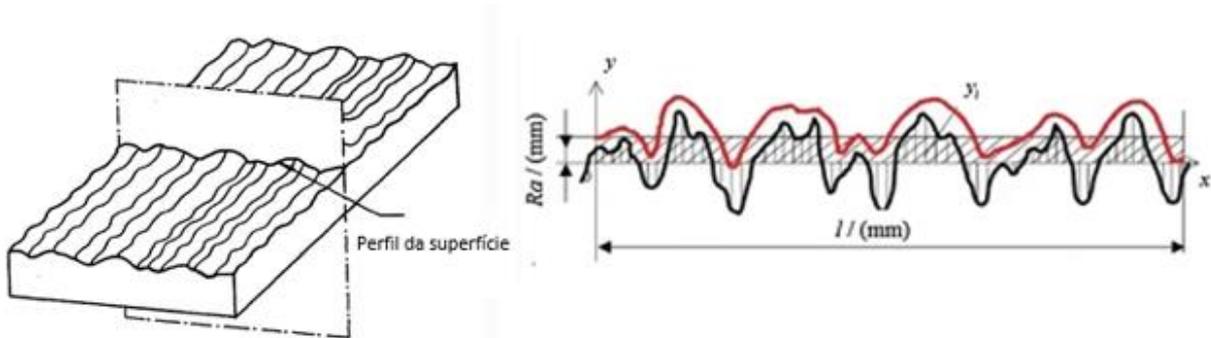


Figura 3 – Perfil de uma superfície (imagem à esquerda) e respetiva linha média do perfil, na imagem da direita. Nessa mesma imagem, é visível um contorno a vermelho, que não é mais do que curso obtido pelo apalpador de um determinado instrumento de medição. Adaptado de [8].

Tais perfis são compostos de picos (porções de material localizados acima da linha média do perfil) e por vales (ausência de material localizadas abaixo da linha média do perfil), Figura 3.

Com isto em mente, é perceptível que quando duas superfícies contactam, esta interação não será feita de um modo uniforme e bem distribuído. Em vez disso, o que acontece na realidade, são contactos pontuais entre os picos e vales do par de superfícies.

Importa, por isso, fazer a distinção entre a área de contacto nominal (geométrico) S_n , determinado pelas fronteiras externas da superfície em contacto; e S_r , que representa a área total da superfície que realmente está a efetuar um contacto físico (microprojeções) entre as superfícies [9] (Figura 4).

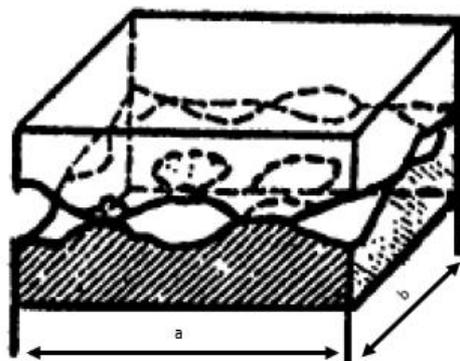


Figura 4 – Modelo de uma superfície irregular. As áreas a traço interrompido representam as áreas de contacto físico (real), S_r ; Enquanto a área nominal corresponde a $S_n=ab$. Adaptado de [9].

Quando aplicada uma carga externa capaz de ultrapassar um certo limite plástico localizado nos picos do material, estas microprojeções são comprimidas e, conseqüentemente a área S_k aumentará. Para além do módulo da carga aplicada, o aumento desta área, S_k , está sempre dependente das propriedades do material, da pureza das superfícies entre outros fatores. De facto, existe uma diferença muito significativa entre a área nominal de contacto, S_n e a área de contacto efetivo, S_k , sendo que esta última, por norma, apresenta valores de 100 a 100 000 vezes inferiores a S_n .

Tendo em consideração o rácio entre estas áreas, torna-se evidente, que a resistência destas ligações não poderá ser tão forte como os seus componentes em separado, pois mesmo quando aplicada uma certa pressão entre as superfícies, a proporção de área efetiva em contacto, S_k será reduzida e, ainda que promova a ligação entre elas, esta será sempre uma união com elevada fragilidade [9].

2.1.3 Requisitos para a Ligação de duas Superfícies em Estado Sólido

Tendo em consideração o rácio entre estas áreas, depreende-se que a resistência das ligações não poderá ser tão forte como os seus componentes em separado, pois mesmo quando aplicada uma certa pressão entre as superfícies, a proporção de área efetiva em contacto, S_k será reduzida e, ainda que se promova a ligação entre elas, esta será sempre uma união com elevada fragilidade.

Nesse sentido, para que se forme uma ligação de qualidade entre as superfícies, é necessário promover movimento lateral entre ambas. Assim, serão gerados esforços de corte, fazendo com que exista, não só um cisalhamento dos picos, como também as condições necessárias para a penetração dos picos de uma das superfícies nos vales da oposta, originando assim um aumento na área efetiva de contacto, S_k . Segundo Vill [9], a ligação entre dois corpos no estado sólido observa-se quando:

- Existe um aumento até perto do limite superior da área de contacto efetivo, S_k :

Como as microprojeções que cobrem as superfícies têm picos com diferentes formas e alturas, numa primeira instância a área efetiva em contacto, S_k , será reduzida. Sob a ação de forças externas, é criado um aumento na pressão que irá esmagar estas mesmas, progressivamente. Este fenómeno resulta no aparecimento de novas microprojeções com uma área de contacto efetivo maior, aproximando assim as superfícies uma da outra.

- Não se encontra nenhum vestígio de substâncias adsorvidas pelos componentes ou pelos filmes óxidos; as superfícies estão em contacto puro:

Apesar da soldadura se realizar no estado sólido, o calor gerado na interface tem uma grande importância nestes processos de soldadura, pois é responsável por aumentar a plasticidade do material, o que facilita

a destruição das camadas exteriores do material e, conseqüentemente, dos filmes óxidos contaminantes que nelas se encontram.

2.1.4 Efeito da Quantidade de Deformação nos Processos de Soldadura no Estado Sólido

Para tirar partido das forças atrativas interatómicas discutidas na secção 2.1.1, é necessário que o contacto, seja estabelecido o mais intimamente possível entre as duas superfícies.

Relativamente a este tópico, Vill [9] afirma que a ligação entre duas superfícies não é possível sem que exista uma deformação plástica do metal nas camadas superficiais das interfaces a unir.

Existe um valor mínimo de deformação para que se dê a soldadura e existe um outro valor crítico acima do qual a força da soldadura se torna tão resistente que equivale à resistência definida pelas propriedades do material.

O valor mínimo na deformação dos componentes é variável consoante uma série de fatores: varia por exemplo, consoante o material. Lancaster [6][10], observou que o aumento da temperatura reduz o valor crítico de deformação. Isto é, para temperaturas inferiores, é necessário que as taxas de deformação sejam consideráveis maiores (deformações nas dimensões do metal de 20% a 95%), ao passo que quando usadas temperaturas perto do ponto de fusão, esta deformação não precisa de ser tão significativa para que se dê a ligação das interfaces (deformações de cerca de 10%), Figura 5. De igual forma, quanto maior for o valor da temperatura na interface, menor será a pressão necessária para que se façam unir as duas, como se comprova na Figura 5.

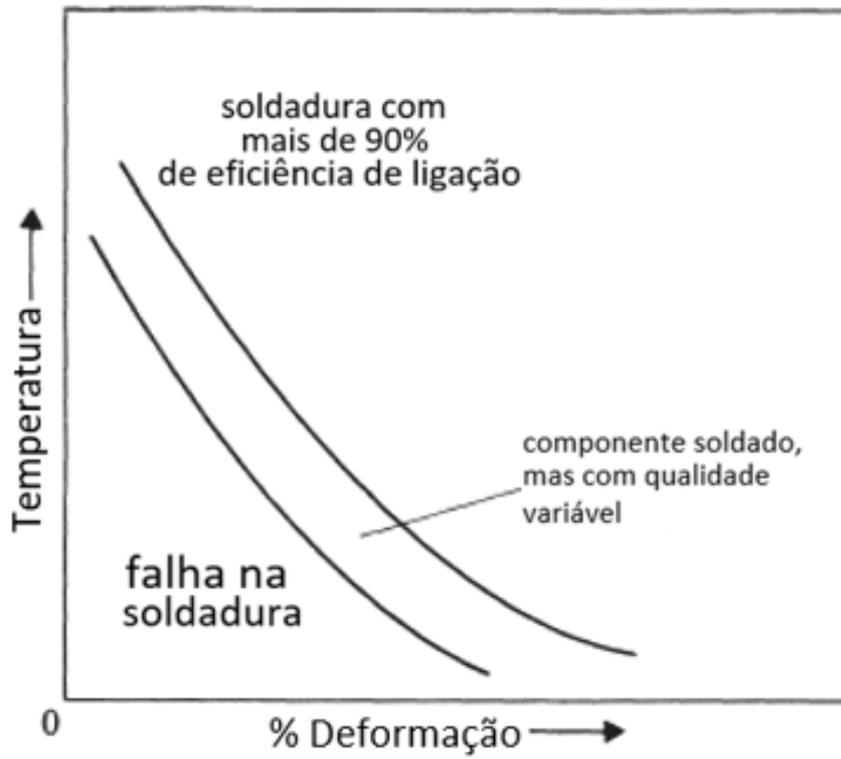


Figura 5 - Relação entre deformação necessária para a soldadura e temperatura. Adaptado de [6].

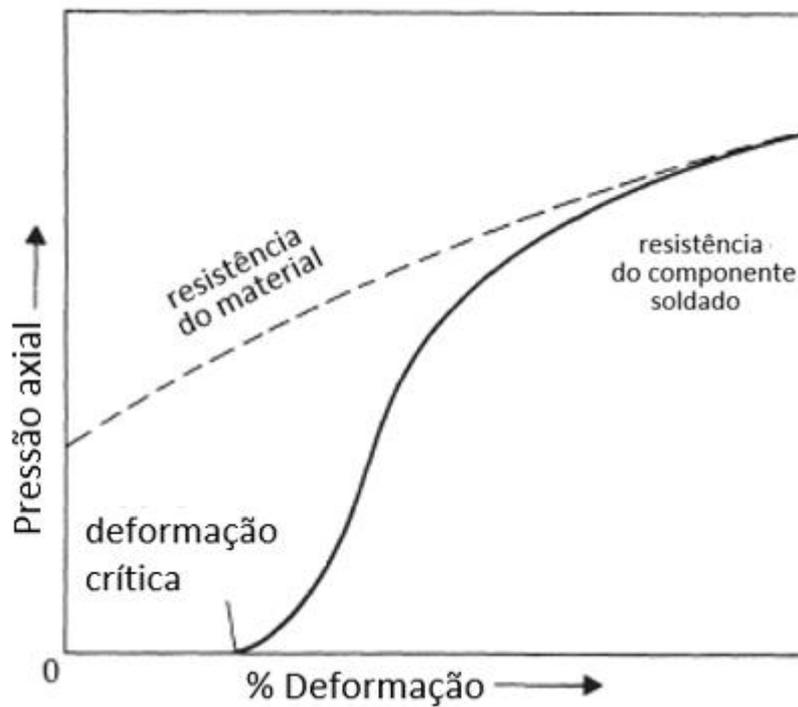


Figura 6 - Relação típica entre deformação e força axial para soldas realizadas à temperatura ambiente em metais. Adaptado de [6].

2.1.5 Efeitos dos Filmes Superficiais na Soldadura no Estado Sólido

Normalmente os metais estão revestidos por filmes cujas espessuras se encontram num intervalo entre 10^3 até $10^1 \mu\text{m}$. e que podem ser: filmes óxidos, gases adsorvidos, óleos contaminantes, gorduras, entre outras substâncias não metálicas. Em metais que não oxidem tão facilmente encontram-se camadas de oxigénio adsorvido, ou mesmo dissolvido [7].

A diferença entre estes dois grupos é que os óxidos normalmente apresentam-se relativamente frágeis e quebradiços, enquanto que os filmes adsorvidos são mais elásticos. Os dois tipos podem coexistir na mesma superfície.

Os filmes inibem, parcial ou totalmente, a soldadura no estado sólido quando a temperatura não atinge os valores necessários para que estes sejam destruídos.

Durante a deformação da superfície no processo de soldadura, os filmes óxidos são destruídos, áreas de metal puro são expostas e iniciam a ligação com a superfície oposta onde quer que as duas áreas de metal puro entrem em contacto. Neste tipo de soldadura feito sob pressão, os valores da tensão de cedência obtidos em ensaios de tração, são substancialmente superiores do que aqueles que seriam normalmente obtidos teoricamente. Este fenómeno pode ser explicado pela ocorrência de um endurecimento local combinado com uma inibição de escorregamento pela presença da rugosidade e descontinuidades no plano da interface.

A temperaturas elevadas, os óxidos são dispersados: alguns deles mecanicamente, e outra parte dispersados por solução no metal. Quantidades excessivas de oxigénio dissolvido causa soldaduras frágeis e este é um fenómeno recorrente quando o processo de soldadura não é bem efetuado [6].

2.1.6 Exemplos de Diferentes Técnicas de Soldadura no Estado Sólido

Existem vários tipos de soldadura no estado sólido. Apresentam-se agora alguns exemplos das técnicas de soldadura mais difundidas.

Soldadura a Frio por Pressão

Apesar da soldadura a frio por pressão ser usada desde há muitos milhares de anos [2], apenas nos anos 80 do século passado é que lhe foi conferido um maior protagonismo na indústria.

As soldaduras a frio são efetuadas realizando etapas de desengorduramento, escovagem das superfícies a ligar e depois, por fim, são forçadas, uma contra a outra, sob uma pressão que origine uma deformação substancial (geralmente num intervalo compreendido entre 50 a 95%). Se efetuada corretamente, a soldadura apresenta uma boa resistência, contudo, uma ductilidade relativamente baixa. Por isso

mesmo, a soldadura a frio por pressão é utilizada apenas em juntas onde a ductilidade não é um fator preponderante.

A etapa da escovagem das superfícies demonstra especial importância neste tipo de soldadura. Soldas feitas sem abordarem esta etapa preparatória convenientemente apresentam uma resistência relativamente baixa, mesmo quando sujeitas a deformações elevadas. Soldaduras a frio por pressão com uma baixa resistência nas ligações podem ser derivadas de dois fatores: pela formação de uma camada de óxido que vai aumentando na sua espessura, ou pela absorção de matéria estranha (água, vapores, gases) da atmosfera. Quando a superfície é escovada, para além de se remover o filme contaminante, e ainda se forma uma camada endurecida que dobra sobre si mesma. Estas camadas superficiais atuam como um filme frágil, e quando a área da interface aumenta, esta primeira fratura-se e expõe áreas puras do metal, que vão ligar a áreas igualmente expostas na interface oposta, Figura 7. A aplicação deste método pode ser encontrada na junção de vários materiais em engenharia e soldas longitudinais em alumínio e cobre [6].



Figura 7 – Estrutura da interface na soldadura por pressão. Adaptado de [6].

Soldadura por Explosão

A soldadura por explosão é, igualmente, um processo de ligação no estado sólido. Neste caso é usada uma elevada força de impacto, proveniente de uma detonação controlada, para gerar uma interação entre os metais a ligar. Esta é efetuada num intervalo de tempo reduzido, sem o uso de qualquer material de adição ou a necessidade de qualquer gás protetor, não se verificando, igualmente a necessidade de qualquer fonte de calor, o que acaba por ser benéfico para a microestrutura do metal base [11], Figura 8.

Isto pode ser conseguido com uma detonação direcionada dos explosivos ou usando um espaçador/separador com um determinado ângulo. Quando as condições de soldadura são as adequadas, um cordão de material plástico forma-se na interface onde as superfícies se unem. Normalmente este cordão fica preso entre as duas superfícies, por vezes, também com pequenas

quantidades de metal fundido o que dá origem a uma interface ondulada, característica deste processo, tal como visível na Figura 9.

A soldadura por explosão tem especial interesse na união de chapas, existindo mesmo a possibilidade de produzir chapas revestidas. Contudo, consoante o aumento da espessura das chapas, a ligação entre as faces torna-se menos consistente [6].

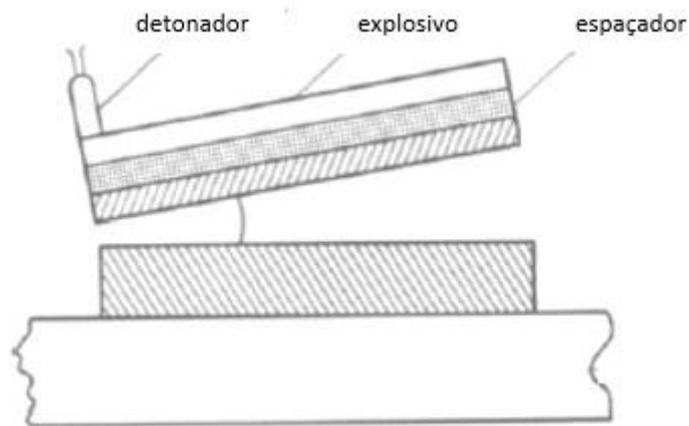


Figura 8 – Soldadura por explosão. Adaptado de [6].

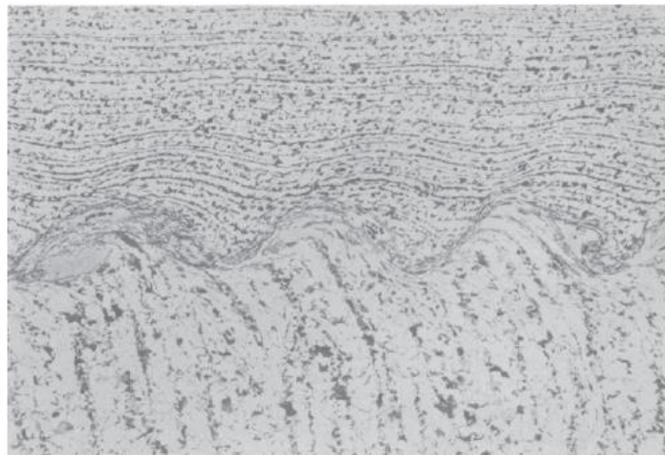


Figura 9 – Parte de uma interface obtida com recurso à soldadura por explosão entre dois componentes de aço. Na imagem evidenciam-se zonas onde ocorreu a soldadura, e por vezes mostrando pequenos poros. Adaptado de [6].

2.2 Soldadura por Fricção

A Soldadura por fricção é uma técnica de soldadura no estado sólido na qual o calor necessário para a soldadura é originado pelo movimento relativo das duas interfaces.

A conversão da energia mecânica em energia térmica, que acompanha sempre os processos de fricção, já é conhecido há muito tempo. Na grande maioria dos casos, esta conversão (que resulta na libertação de calor) é considerado um fenómeno indesejado na soldadura. Exceção feita na soldadura por fricção que é uma das poucas técnicas em que isso não acontece, sendo na verdade esta conversão de energia mecânica em energia térmica o principal agente responsável pela ligação da interface [9].

O método de soldadura por fricção depende, então, da conversão direta da energia mecânica em energia térmica (e do calor gerado por esta segunda) para criar a solda, sem necessidade da aplicação de calor proveniente de nenhuma outra fonte externa ou material de adição. Normalmente, não se verifica a fusão de metal na interface, nem em nenhum outro ponto dos componentes a ligar. Na Figura 10 está esquematizado um caso típico (e tido como convencional) de soldadura por fricção, onde o componente estacionário é mantido em contacto com um outro em rotação. A este contacto é submetida uma determinada pressão, constante ou aumentando gradualmente, até que a interface atinja a temperatura necessária a que ocorra a soldadura[12].

A velocidade de rotação, os valores de pressão axial e os tempos de soldadura são as principais variáveis a ter em consideração para que se forneçam as combinações de pressão e calor que formam a ligação. Estes parâmetros são ajustados de tal forma a que a interface alcance uma temperatura que permita que o material seja mais facilmente maleável, ou seja, num regime de temperatura que torne o metal plástico, onde a soldadura terá lugar. Uma vez fornecido o calor necessário à interface, é aplicada uma pressão axial que provoca um contacto mais íntimo entre a mesma. Durante esta fase do processo de soldadura, enquanto as interfaces estão em contacto, ocorre uma difusão atómica permitindo uma ligação metalúrgica entre os dois materiais [12].

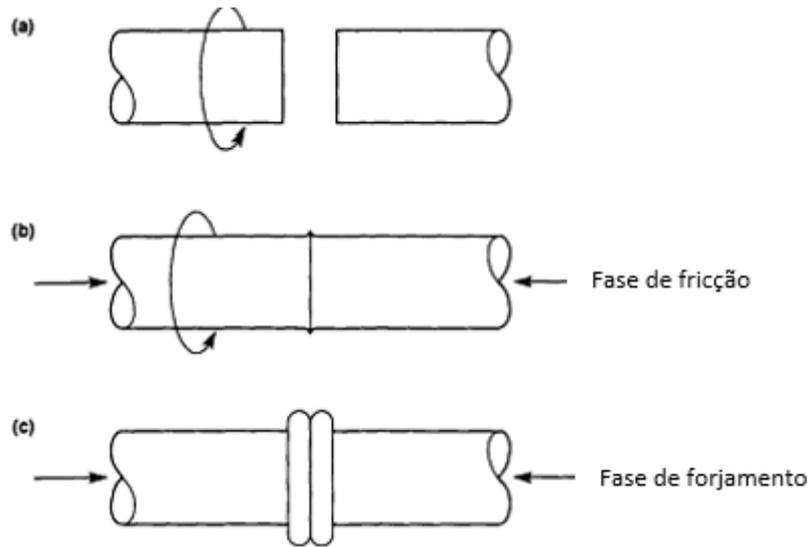


Figura 10 -Esquema ilustrativo dos passos fundamentais do processo convencional de soldadura por fricção. (a) Um dos componentes está provido de rotação, enquanto que o outro é mantido estacionário. (b). Os componentes são aproximados. É aplicada força axial para iniciar o processo de deformação. (c) A rotação é cessada e o processo de deformação é finalizado. Adaptado de [12].

Para além deste método, Vill [9] destaca também outros três, sendo cada um deles mais apropriado para diferentes conjuntos de cenários:

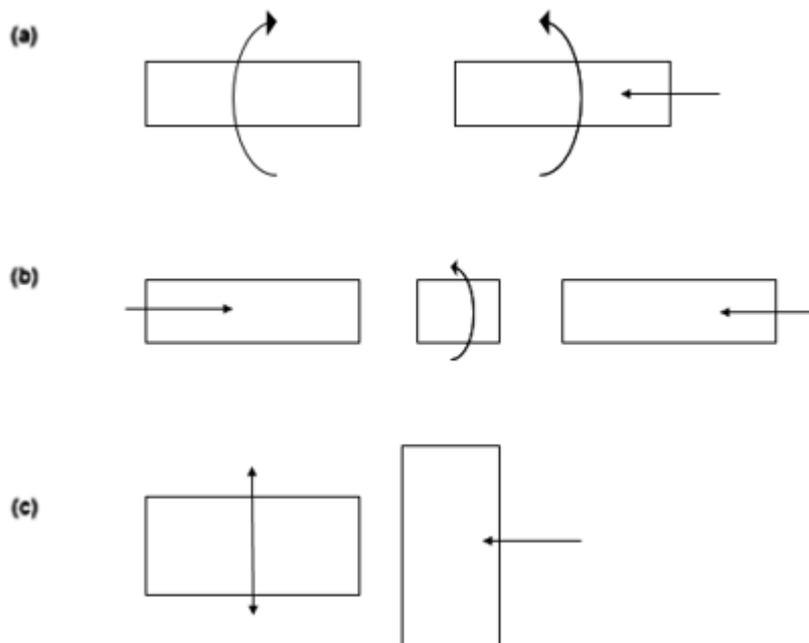


Figura 11 – Métodos de soldadura por fricção (segundo Vill [9]).

O primeiro método (a) da Figura 11 é usado quando se pretendem valores relativamente altos de velocidade periférica de rotação entre os componentes; O segundo caso (b) é de particular interesse na soldadura de varões ou tubos esbeltos, ou com um comprimento significativo. Pode ainda optar-se por fornecer um movimento relativo lateral entre as superfícies, em vez do movimento rotacional (c) [7].

A soldadura por fricção envolve a geração de calor via abrasão friccional, dissipação de calor, deformação plástica e interdifusão química. A relação que estes fatores têm entre si durante a soldadura por fricção constituem um enorme desafio no desenvolvimento de modelos numéricos computacionais capazes de prever com precisão o processo de soldadura por fricção. Contudo, de um ponto de vista qualitativo, este processo tem vindo a ser explorado e já foram realizados vários estudos, testados numa vasta gama de materiais diferentes. Dos estudos realizados, foram agrupados cinco fatores qualitativos diferentes que influenciam a qualidade da soldadura por fricção, sendo eles:

- Velocidade relativa das faces;
- Pressão aplicada entre as faces;
- Temperatura da interface;
- Propriedades dos materiais;
- Presença de filmes nas superfícies e condição das mesmas.

Os primeiros três fatores estão relacionados com parâmetros inerentes ao processo da soldadura por fricção, enquanto os últimos dois são dependentes dos materiais a ser soldados. Durante a soldadura por fricção, a velocidade relativa, a pressão aplicada e a duração da mesma são as variáveis a controlar. O efeito destas variáveis na qualidade da soldadura será discutido mais pormenorizadamente adiante, quando forem apresentados os conceitos sobre os métodos principais de aplicação da técnica de soldadura por fricção.

Analogamente às outras técnicas de soldadura no estado sólido, a temperatura da interface constitui um parâmetro de grande importância para assegurar uma boa soldadura. Assim sendo, uma ligação de qualidade depende quer das condições do processo, quer dos materiais a serem soldados. Mesmo quando a temperatura da interface não é medida, ou controlada diretamente, os efeitos de uma temperatura insuficiente (ou excessiva) são, geralmente, evidenciados com uma inspeção visual do produto final. As propriedades e condições dos materiais que serão ligados afetam tanto as forças friccionais presentes no processo como os parâmetros da fase de forjamento dos materiais [12] (fatores discutidos adiante).

2.2.1 Enquadramento Teórico

A teoria da fricção está desde logo ligada à lei de Amonton, na qual é afirmado que a força de fricção, F , é proporcional à carga axial, L :

$$F = \mu L \quad (1)$$

Onde μ corresponde ao coeficiente de fricção, que deveria ser constante sob qualquer carga axial. Contudo, Vill defende que este coeficiente varia, não só, de forma inversamente proporcional ao aumento da carga axial, como também é dependente dos valores da rotação relativos dos componentes. Vill sugere uma expressão do tipo:

$$F = \alpha S_k + \beta L \quad (2)$$

Onde S_k , tal como introduzido anteriormente, representa a área de contacto efetiva; α e β são constantes. Para um contacto ideal, em regime plástico e onde a área nominal, S_n e área contacto efetivo S_k , são iguais, pode ser considerado que:

$$\frac{L}{S_k (= S_n)} = \text{constante}$$

Sendo que, de facto, para altos valores de pressão axial, a lei de Amonton traduz corretamente uma parte da Equação 2, uma vez que $\beta \simeq \mu$.

Para além deste fenómeno, existem outras fontes na soldadura por fricção que irão gerar calor, tal como a deformação dos pontos de contacto. À medida que a temperatura aumenta, as camadas adsorvidas (ou absorvidas) irão evaporar e a fricção irá ser feita diretamente entre as duas interfaces de metal puro, que resulta num aumento de μ , que, por sua vez, se traduz num aumento da temperatura acompanhado por uma gripagem. Este fenómeno cria forças de resistência tangenciais entre os componentes a soldar, sem que seja necessário aplicar qualquer tipo de força axial (contrariando a Lei de Amonton). Pares de superfícies com grandes rugosidades apresentam um μ maior, devido a um “interbloqueio” dos picos e vales das superfícies; do mesmo modo, superfícies ideais com rugosidades (extremamente) baixas também apresentariam um μ elevado, derivado de uma maior presença de forças interatómicas [7].

Contudo, como anteriormente discutido, tais superfícies são impossíveis de obter noutra meio que vão além do foro teórico.

Na Figura 12, apresentam-se as curvas de velocidade e binário que, de uma forma geral, são características do processo de soldadura por fricção. Como se verá mais adiante, os diferentes métodos, também implicarão curvas ligeiramente diferentes das que apresentam nesta instância.

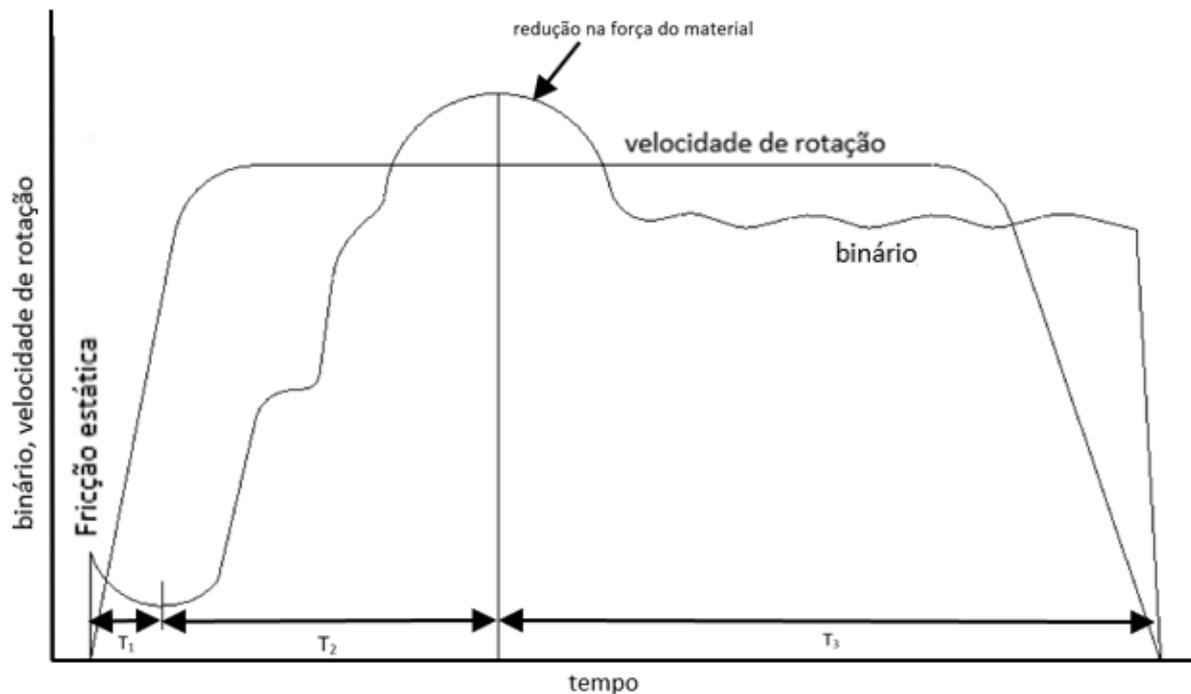


Figura 12 – Curvas de Velocidade de rotação-binário durante as etapas de soldadura por fricção. Adaptado de [7].

Numa primeira fase, é possível observar um pico nos valores do binário. Este traduz o instante em que se dá o primeiro contacto entre os componentes, onde a interface de ambos se encontra à temperatura ambiente (ou perto desses valores), pelo que a plasticidade dos componentes não foi afetada, ainda, pela temperatura. Ocorre então uma fricção estática na interface.

No momento em que esta fase inicial termina, maior parte dos óxidos adsorvidos já terão sido destruídos pelo calor e, na eventualidade de ainda existirem algumas quantidades desprezáveis, serão finalmente destruídas na fase de deformação plástica, T₂. Com a destruição destas camadas oxidadas, verifica-se um aumento rápido e oscilante nos valores do binário, evidenciados na subida da temperatura da interface. Existe a transição entre as fases da camada fronteira de fricção (onde $\mu = 0,1 - 0,2$) para uma fase de fricção pura ($\mu > 0,3$).

No caso dos aços com baixo teor em carbono, a gama de temperaturas no instante T_2 encontra-se num intervalo de temperaturas compreendidas entre os 100 e 200°C.

Sucedido este fenómeno, o processo entra numa fase em que o binário estabiliza em valores relativamente mais baixos, característico do facto de estar a acontecer cisalhamento do material num regime altamente plástico, mas agora com temperaturas de interface em intervalos compreendidos de 900 a 1100°C, em que o próprio metal amolecido atua como lubrificante. Para o caso da soldadura ser efetuada entre aços, é nesta fase que a interface dos componentes em fricção se encontra ao rubro. A rotação é então interrompida e é aplicada uma pressão de forjamento (ou vice-versa).

Durante as primeiras duas fases (T1 e T2), apenas é gerado 13% do calor total relativo à soldadura por fricção, deixando os restantes 87% para a fase final e mais importante, T3.

A energia térmica libertada por unidade de área durante o processo de soldadura, pode ser obtida por:

$$H = 2P \frac{K}{nR} \times 10^3 \text{ W/mm}^2 \quad (3)$$

Em que K varia consoante o material (por exemplo, para um aço com baixo teor em carbono, apresenta valores na ordem dos $8 \times 10^7 \text{ mm}^2/\text{min}^2$), n , as rotações por minuto (rpm), R é o raio (mm) e P a pressão em kg/mm^2 [7].

A Equação 3 assume a conversão das forças de cisalhamento num fornecimento de calor friccional para a interface e, apesar de ser uma equação útil para uma aproximação da transferência de calor na mesma, existem muitos mais fenómenos que não podem ser traduzidos recorrendo a uma equação linear: é necessário considerar o fenómeno da variação do gradiente de transferência de calor, quer no decorrer das três fases do processo, quer na secção da interface.

Outro grande constrangimento está na atribuição do valor usado para o coeficiente de fricção. De facto, existem uma série de fatores que têm peso na atribuição de um valor correto de μ , tais como a temperatura, a geometria de contacto, rugosidade superficial, a magnitude da velocidade de rotação entre outros. Consequentemente, é virtualmente impossível encontrar um valor exato para μ , sobretudo nas condições em que é realizada a soldadura por fricção.

A Lei de Amonton previamente mencionada, sendo ela baseada num contacto rígido entre as superfícies, não toma em consideração, portanto, as forças internas ou a deformação plástica. De facto, quando estão envolvidos elevados valores de deformação plástica, esta lei deixa de ser capaz de traduzir o fenómeno que está a acontecer na interface. Assim sendo, passa a ser mais razoável assumir que a fricção entre os dois corpos como função da pressão axial exercida no processo de soldadura, Figura 13.

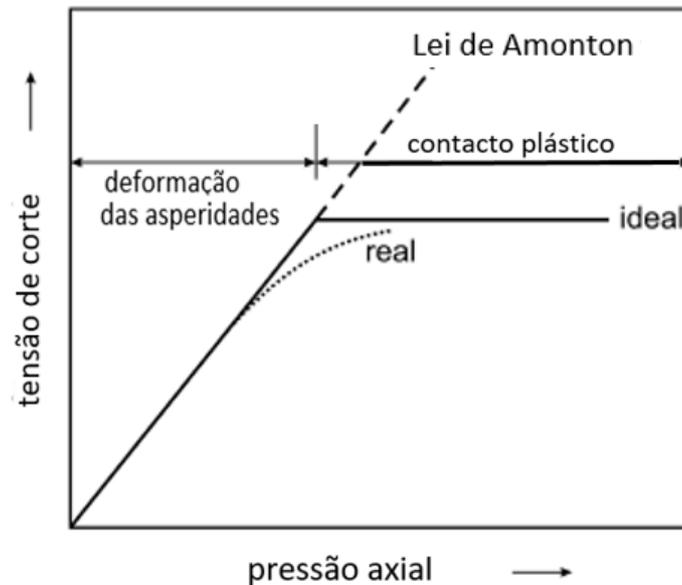


Figura 13 – Caracterização da tensão de corte como função da pressão axial. Neste diagrama, a condição ideal de passagem entre a fase de deformação de asperidades e contacto plástico é mostrada com uma linha contínua, contudo, as condições reais são mais difíceis de definir e são aqui representadas pela curva tracejada. Adaptado de [13].

Num nível microscópico, até a mais bem polida das peças, apresenta inúmeras irregularidades. Na primeira fase, como o contacto real (S_k) é muito inferior ao contacto nominal (S_n), o contacto é efetuado entre as asperidades das duas superfícies e o comportamento do provete obedece à Lei de Amonton (Figura 13 e Figura 14 (a)). Por outro lado, quando os valores de S_k e S_n são aproximadamente iguais, ocorre um contacto puramente plástico na interface (Figura 13 e Figura 14 (b)), onde a pressão axial e a tensão de corte se comportam tal como demonstrado na secção a traço interrompido da Figura 13 [13].

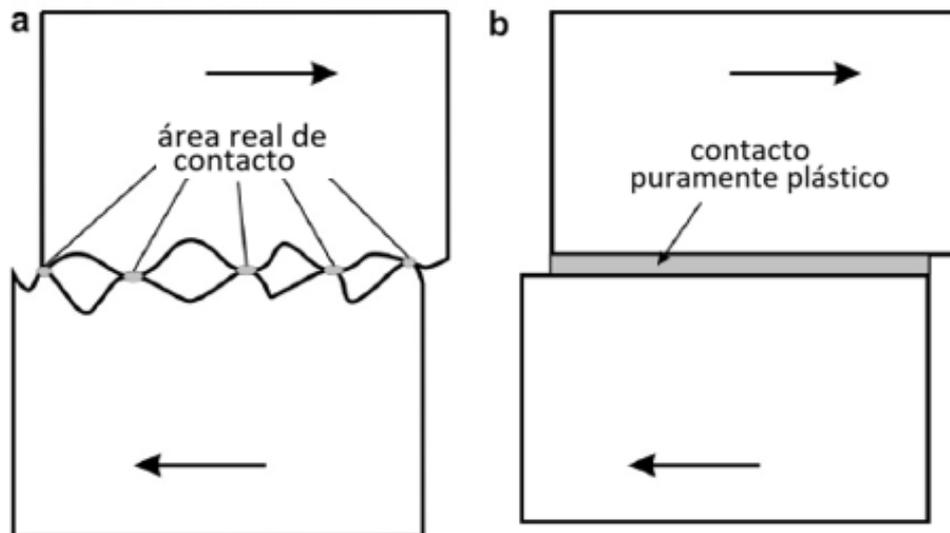


Figura 14 – Esquema representativo das duas condições interfaciais que podem surgir na soldadura por fricção. (a) O contacto real é muito inferior ao contacto nominal e a deformação apenas ocorre nas asperidades. (b) Existe um contacto puramente plástico na interface, sendo a deformação igualmente distribuída por toda a sua periferia. Adaptado de [13].

Uma das grandes vantagens associadas à soldadura por fricção está relacionada com o facto de esta gerar uma zona termicamente afetada muito reduzida comparativamente aos restantes métodos de soldadura. A ZTA é um fator que descreve a transferência de energia calorífica, por condução, na zona vizinha da soldadura. Convém que esta zona seja reduzida, pois caracteriza toda a região da vizinhança da soldadura onde as temperaturas atingidas foram superiores às necessárias para ocorrer uma transformação de caráter metalúrgico, podendo fazer com que esta zona se torne num elo mais fraco na soldadura [14] (Figura 15).

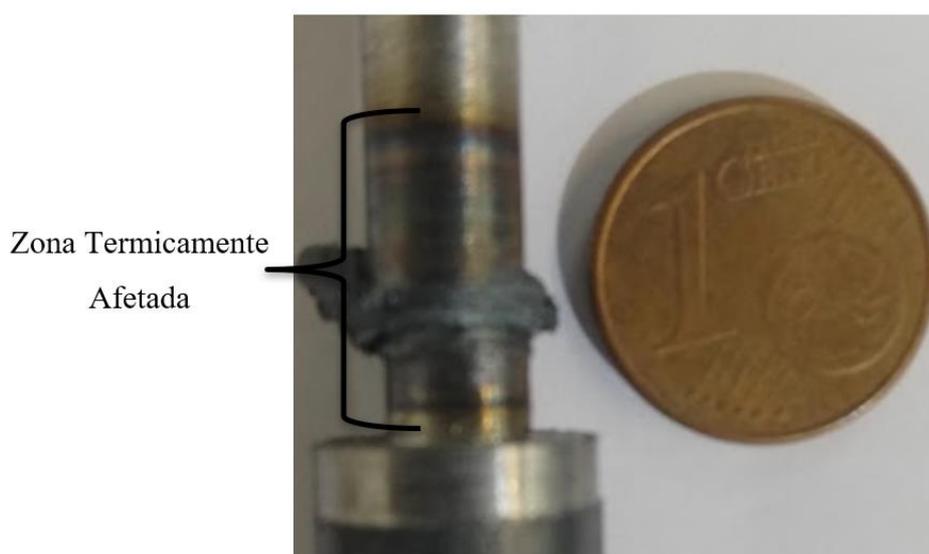


Figura 15 -Zona termicamente afetada gerada pela soldadura por fricção num provete de aço.

Ao contrário da ZTA, que se trata de um fenómeno transversal a todos os processos de soldadura, existe, na soldadura por fricção, um outro fenómeno que é inerente a esta técnica.

Como discutido anteriormente, é importante ter em conta que para ser produzida uma boa soldadura entre os componentes, é necessária uma deformação plástica acima de determinados valores (praticam-se, por exemplo, deformações entre 37 e 180% [7]). No caso da soldadura por fricção este nível de deformação plástica é comumente referido como “taxa de encurtamento”, (Figura 16).

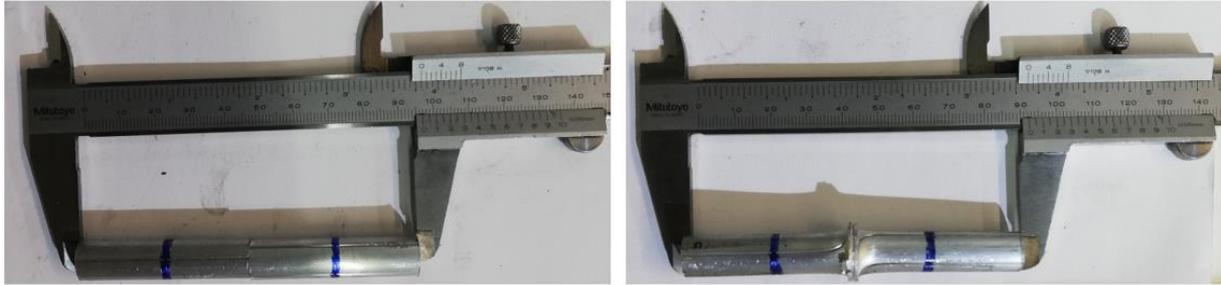


Figura 16 – Deformação plástica quantificada sob a forma de “taxa de encurtamento”. Na medição à esquerda regista-se um comprimento total nos provetes (não soldados) com cerca de 97 mm; na imagem à direita verifica-se um encurtamento em cerca de 4 mm do provete soldado e a formação de um rebordo na periferia da interface.

A taxa de encurtamento, traduz-se num aumento da área na interface, em detrimento do comprimento dos componentes. Esta é evidenciada na criação de um rebordo (Figura 16) que pode mais tarde ser removido recorrendo a uma operação de maquinagem. A taxa de encurtamento é tanto mais substancial quanto maior for o módulo da pressão axial e a plasticidade do material.

A taxa de encurtamento, U , para o caso de varões com secção circular é dada pela seguinte expressão:

$$U = \frac{R^2 - d^2}{d^2} \times 100\% \quad (4)$$

Onde os valores geométricos de R e d, podem ser retirados de medições efetuadas a componentes soldados recorrendo à soldadura por fricção, tal como demonstrado na Figura 17:

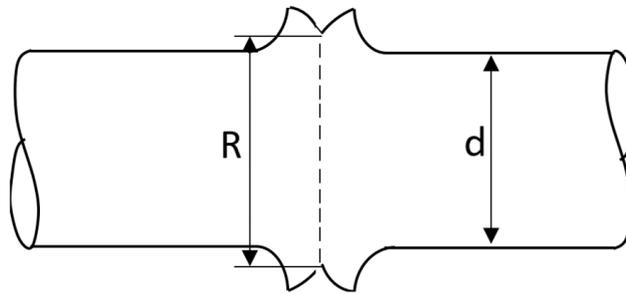


Figura 17 – Geometria de um varão soldado com recurso à fricção (Segundo Dickinson). Adaptado de [7]

De salientar que estes valores não expressam o encurtamento nas dimensões longitudinais, mas sim o aumento da área na secção transversal da interface [7].

Para o caso particular apresentado na Figura 16, onde das medições se obtém:

$$R = 15.5 \text{ mm}$$

$$d = 11.4 \text{ mm}$$

Então,

$$U = \frac{R^2 - d^2}{d^2} \times 100\% = \frac{15.5^2 - 11.4^2}{11.4^2} 100\% = 85\%$$

Para a mesma pressão axial, a quantidade de material deformado varia consoante as propriedades do material em questão e proporcionalmente com as temperaturas em jogo na interface no instante em que a pressão supracitada é aplicada. No caso dos varões em aço, a taxa de encurtamento praticada em maior parte dos casos ronda os 37%, enquanto para tubos do mesmo material são usadas taxas de encurtamento de 180% [7].

2.2.2 Soldadura por Fricção de Materiais Dissimilares

As técnicas de soldadura por fricção são capazes de unir provetes de materiais idênticos, como, de igual forma, também apresentam bons resultados para alguns pares de materiais dissimilares.

A soldadura de materiais dissimilares está a ter um interesse crescente em diversas aplicações de várias áreas na engenharia, tais como aeroespacial, naval, automóvel e ferroviária [15].

À semelhança da soldadura de componentes do mesmo material, a soldadura de materiais dissimilares implica uma conexão metalúrgica íntima entre os materiais a unir. Cada combinação específica de metais representa um desafio único, pelo que deve ser estudado e analisado individualmente de forma a garantir uma soldadura de qualidade [16]. Estes desafios metalúrgicos verificam-se em fatores como: temperaturas de fusão distintas, coeficientes, quer de condutividade, quer de expansão térmica diferentes [17].

Tabela 1 – Compatibilidade do processo de soldadura por fricção entre os diversos metais. Adaptado de [11].

	Ligas de Zircónio	Aços para válvulas de automóveis	Vanádio	Urânio	Carboneto de Tungsténio	Tungsténio	Liga de Titânio	Titânio	Tório	Tântalo	Aços para ferramentas	Aços inoxidáveis	Aço Microligado	Aço Maraging	Aço (facilmente maquinável)	Aço ao carbono	Liga de aço	Aço	Liga de prata	Prata	Liga de Nióbio	Nióbio	Nimonic	Liga de níquel	Níquel	Monel	Molibdénio	Liga de Magnésio	Magnésio	Chumbo	Ferro sinterizado	Cobre-níquel	Cobre	Colombio	Cobalto	Materiais Cerâmicos	Ferro Fundido	Carbonetos	Bronze	Latão	Liga de Alumínio	Alumínio								
Alumínio	Reconhecivelmente ligável																																																	
Liga de Alumínio																																																		
Latão																																																		
Bronze																																																		
Carbonetos																																																		
Ferro Fundido																																																		
Materiais cerâmicos																																																		
Cobalto																																																		
Colombio																																																		
Cobre	Reconhecivelmente ligável																																																	
Cobre-Níquel																																																		
Ferro sinterizado																																																		
Chumbo																																																		
Magnésio																																																		
Liga de Magnésio																																																		
Molibdénio																																																		
Monel																																																		
Níquel																																																		
Liga de Níquel																																																		
Nimonic																																																		
Nióbio																																																		
Liga de Nióbio																																																		
Prata																																																		
Liga de Prata																																																		
Aço																																																		
Liga de Aço																																																		
Aço ao carbono																																																		
Aço (facilmente)																																																		
Aços Maraging																																																		
Aço Microligado																																																		
Aços inoxidáveis																																																		
Aços para ferramentas																																																		
Tântalo																																																		
Tório																																																		
Titânio																																																		
Liga de Titânio																																																		
Tungsténio																																																		
Carboneto de Tungsténio																																																		
Urânio																																																		
Vanádio																																																		
Aços para válvulas de automóveis																																																		
Ligas de Zircónio																																																		

A indústria automóvel, por exemplo, tira partido das boas propriedades mecânicas do aço aliadas ao baixo peso específico e boa resistência à corrosão do alumínio. Contudo, a ligação aço/alumínio é bastante desafiante uma vez que existem profundas diferenças, no coeficiente de expansão térmica linear, por exemplo e na facilidade com que o alumínio oxida superficialmente. Soldar aço e alumínio recorrendo às técnicas convencionais de soldadura (tais como a MIG ou TIG) torna-se complexo, ou mesmo impossível, devido à formação de uma camada intermetálica extensa [18]. Esta camada é o fator que requer mais atenção pois quando presente numa espessura excessiva, está geralmente associada a comportamentos frágeis e quebradiços nas juntas de soldadura desenvolvidas (Figura 18) [15].

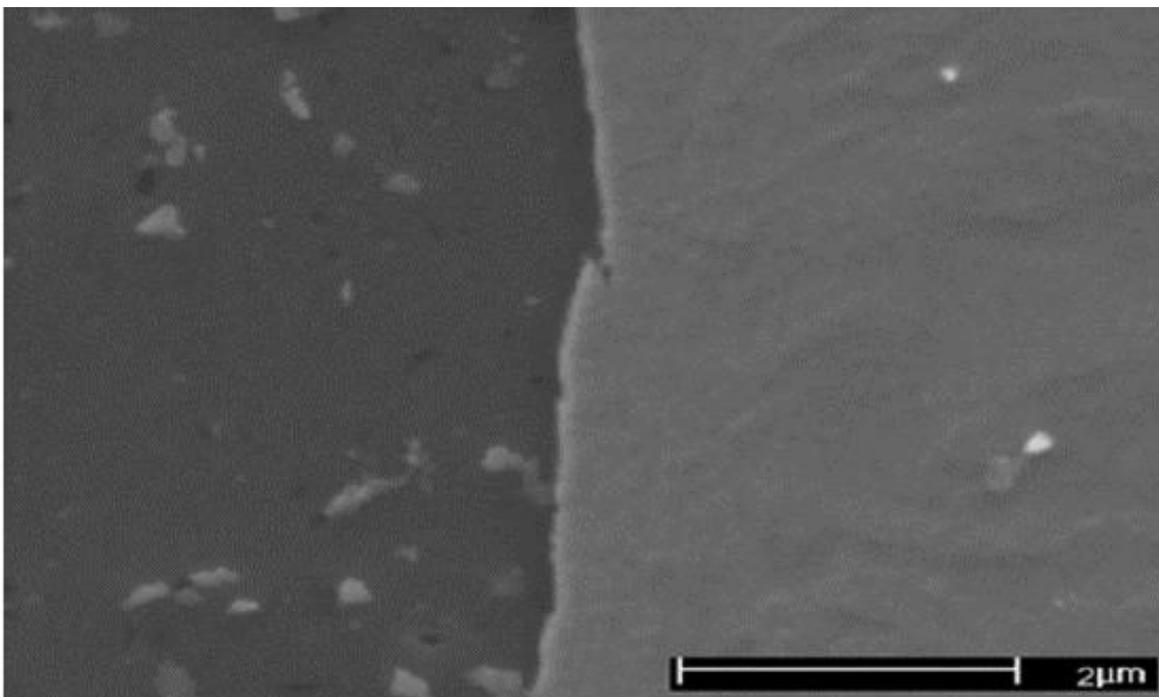


Figura 18 – Exemplo de formação típica de uma camada intermetálica na junção entre o alumínio (região mais clara) e o ferro (região mais escura). Adaptado de [18].

De seguida, serão estudadas várias ligações entre pares de alumínio e aço, que ainda é muito problemático na indústria atual. As altas temperaturas e o tempo de soldadura exagerados causam uma camada intermetálica entre os dois componentes que irão, por sua vez, causar fragilidade na junta; por outro lado, a ausência total desta camada intermetálica irá causar uma soldadura instável e igualmente frágil [15].

2.2.3 Exemplos de Componentes Soldados usando a Fricção

Como mencionado na secção anterior, para além de ser útil na junção de materiais dissimilares, este tipo de soldadura é bastante empregue em aplicações onde é necessária a junção de um veio com outra peça de geometria mais complexa e onde não se pretendem tensões elevadas nem deformações. É disso exemplo a exigente indústria petrolífera, onde a integridade e qualidade dos componentes soldados é uma necessidade pela qual as indústrias estão dispostas a pagar largas quantias de dinheiro [4].

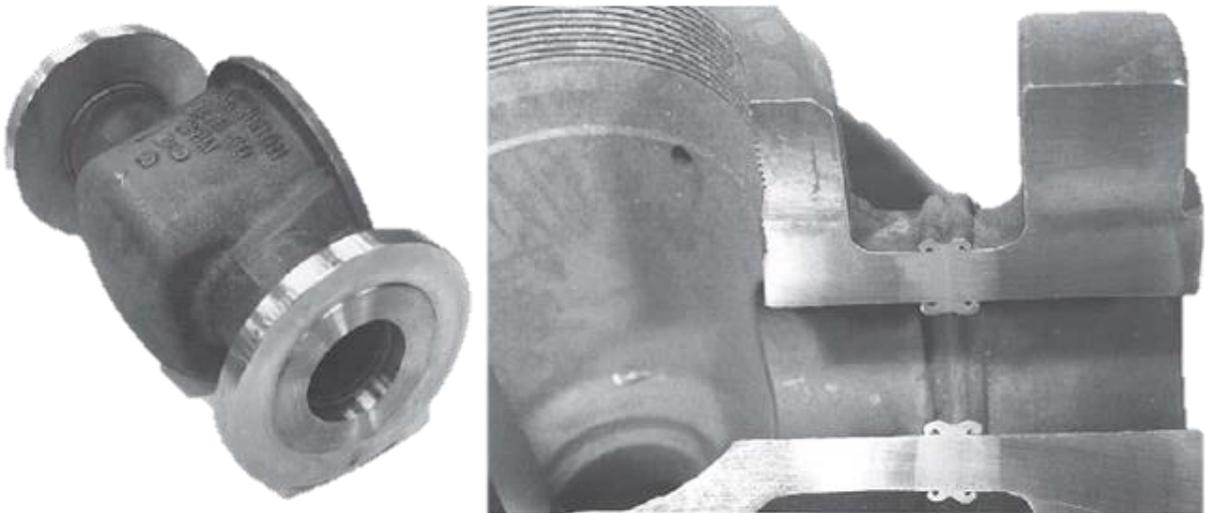


Figura 19 - Ligação por soldadura por fricção das flanges ao corpo de uma válvula de elevada pressão utilizada na indústria petrolífera. Adaptado de [4].

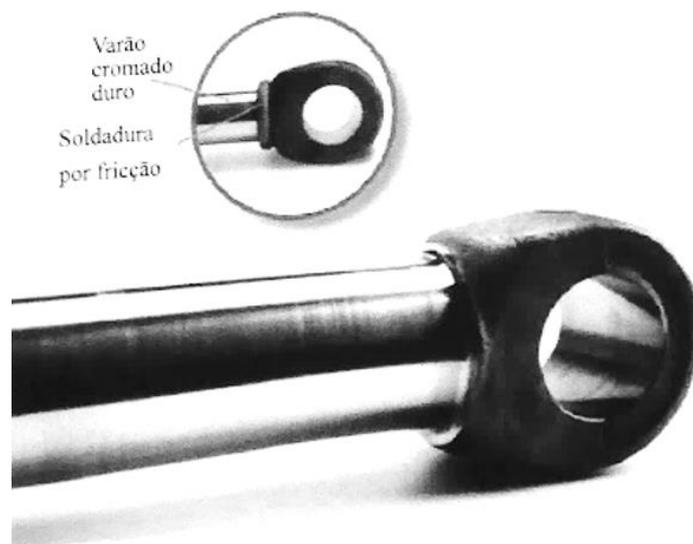


Figura 20 - Casos práticos de aplicação de soldadura por fricção. Adaptado de [11].

A indústria de cilindros hidráulicos para retroscavadoras usa, muitas das vezes, este processo para ligação dos componentes. Neste caso, para promover a ligação das cabeças às hastes dos cilindros. As válvulas para motores de combustão interna são outro grande campo de aplicação desta técnica, devido à necessidade de junção de dois materiais com requisitos bastante diferentes, e que se pretende que fiquem bem ligados e perfeitamente concêntricos (Figura 21) [11] [19] [4].



Figura 21 – Válvulas de motores de combustão interna, soldadas com recurso à fricção. Adaptado de [11].

2.3 Tecnologias da Soldadura por Fricção

Industrialmente, existem dois métodos principais que têm sido empregues industrialmente na execução da soldadura por fricção: o método convencional (*Direct-drive* ou *Continuous-drive*) e o método de ação por inércia (*Inertia-Drive*). O método convencional usa um motor a rodar a uma velocidade constante como fonte de energia para a soldadura. O segundo método usa a energia armazenada no volante de inércia para fornecer o *input* de energia à soldadura. Ambos os métodos têm efeitos inerentes e, conseqüentemente, produzem soldaduras metalurgicamente diferentes.

Tanto o método convencional como o método de ação por inércia podem ser aplicados usando diferentes formas de movimento relativo de forma a gerar o calor necessário para formar a soldadura, sendo que a forma mais comum apresentada na Figura 22, onde um componente cilíndrico é mantido como estacionário, enquanto o outro se apresenta em rotação. Contudo, existem outros métodos onde: ambos os componentes são rodados em direções opostas; ou dois componentes são mantidos em regime estacionário enquanto são empurrados de encontro a uma outra peça em rotação, no meio deles (tal como apresentado em 2.2) [12].

2.3.1 Método Convencional

Neste método, é utilizado um equipamento semelhante ao torno mecânico convencional. A diferença fundamental é que se encontra equipado com um travão, embraiagem, com um sistema capaz de aplicar e controlar a pressão axial e um controlador de deslocamento (Figura 22).

O processo de funcionamento do método convencional está decomposto em três fases principais: a fase de fricção, a fase de travagem e a fase de forjamento (Figura 23).

Na primeira fase, o calor friccional é gerado aliando a pressão axial à rotação relativa de um dos componentes em relação ao estacionário. Segue-se a fase de travagem, onde a rotação é terminada; e, finalmente, a fase de forjamento onde é aplicada uma pressão axial substancialmente superior à que terá sido usada até então, de forma a unir os componentes (Figura 23) [12].

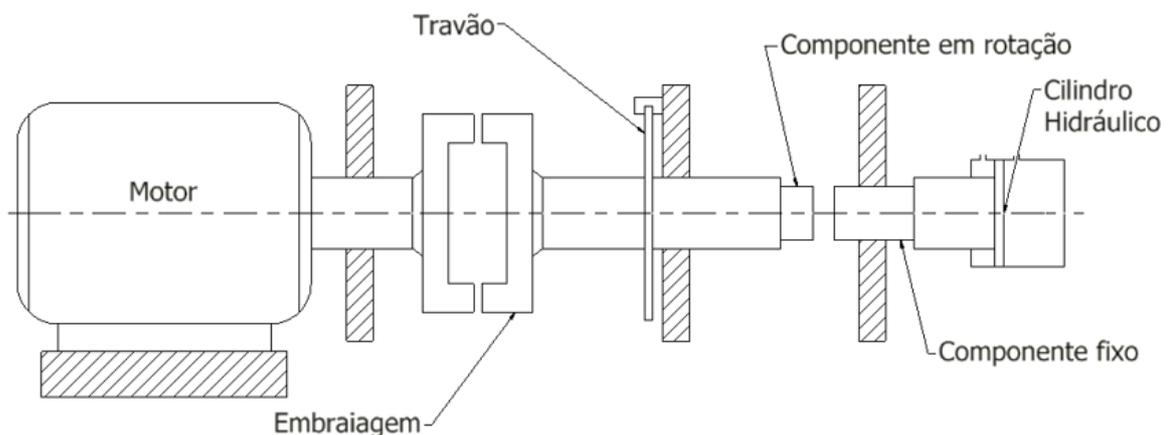


Figura 22 – Esquema representativo de um equipamento de soldadura de fricção, preparado para reproduzir o método de ação direta. Adaptado de [12].

As relações estabelecidas entre as variáveis do processo estão evidenciadas na Figura 23, que relaciona a velocidade de rotação e a pressão estabelecida axialmente na soldadura por fricção. O tempo de travagem necessário também é uma variável muito importante, visto que afeta diretamente a temperatura da soldadura e o momento em que será aplicada a força necessária para o forjamento dos componentes [12].

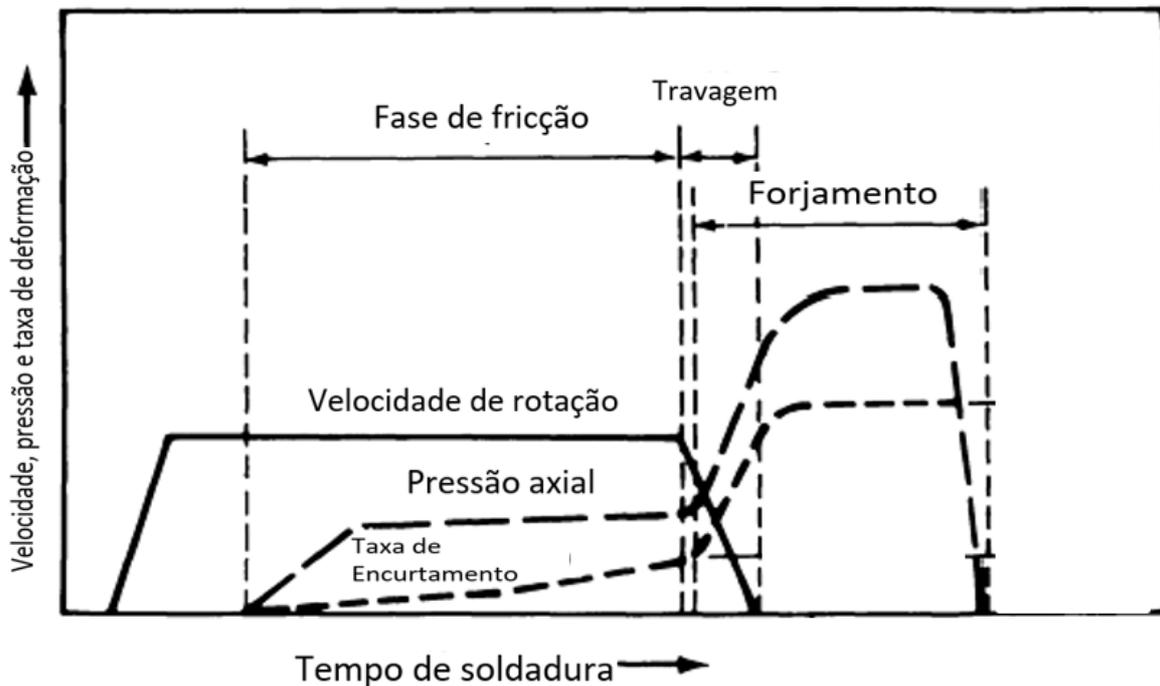


Figura 23 – Comportamento da Velocidade de Rotação, pressão axial e taxa de deformação/encurtamento em função do tempo relativo das três fases de soldadura no método de ação direta. Adaptado de [12].

A fase de forjamento tem início no instante em que a pressão mais alta é aplicada ao ciclo de soldadura. Assim sendo, é correto afirmar que a fase de forjamento começa ainda nos instantes finais da fase de travagem. Na generalidade dos equipamentos, a pressão máxima (para o forjamento) pode ser aplicada quando a bucha onde se encontra o componente em rotação está a desacelerar, mas ainda em rotação (a); ou, ((b)/Figura 23) quando a rotação já está completamente interrompida, no final da fase de travagem. A diferença entre estas duas formas de aplicação da pressão máxima é evidenciada na presença num segundo pico de fricção: no primeiro caso, a curva da força aplicada atinge um segundo pico antes de cair abruptamente, o que produz uma força de torsão. No segundo caso, especialmente quando a fase de travagem é muito curta derivada duma desaceleração rápida, o binário decresce no início da fase de forjamento. Neste caso, não há força torsional e o forjamento é apenas afetado pela pressão aplicada axialmente. A velocidade de rotação é o fator menos sensível das variáveis do processo e pode ser gerido com num intervalo mais amplo de valores, desde que o tempo de soldadura e força axial sejam devidamente controlados.

Para os aços, a velocidade periférica recomendada varia dos 110 aos 215 m/min [12]. Em geral, quanto maior a velocidade periférica, menores as temperaturas envolvidas na soldadura. A força de fricção é geralmente aplicada de uma forma gradual para ajudar o processo soldadura a ultrapassar o pico inicial de binário por contacto.

Para os aços ao carbono, é necessária uma pressão de, pelo menos 70 MPa, na interface para formar uma ligação de qualidade. Depois do motor ser desengatado da peça de trabalho, a força de forjamento é aplicada. Para este mesmo tipo de aços, usam-se forças axiais de compressão na ordem dos 140 MPa na interface da soldadura [12].

2.3.2 Método de Ação por Inércia

O método de ação por inércia utiliza uma máquina ferramenta muito semelhante ao método de ação direta, sendo que a principal diferença reside na existência de um volante de inércia ligado à bucha em rotação onde se fixa um dos componentes a soldar (Figura 24). Desta feita, o volante de inércia passa a ser o responsável por controlar o *input* de energia na soldadura, fazendo dele uma variável de fulcral importância neste tipo de soldadura. É controlado quer adicionando, ou removendo volantes de inércia, alterando assim a massa total do volante. Quando o sistema atinge a velocidade de rotação desejada, a embraiagem desengrena a rotação vinda do motor, deixando a rotação totalmente a cargo da massa do volante de inércia. Uma vez desengrenada, e tal como no método convencional, é aplicada uma força axial constante durante o processo da soldadura. Esta força axial traduz-se numa desaceleração na velocidade de rotação do sistema. Em alguns casos, quando deixa de haver rotação, ou a instantes disso acontecer, é aplicada uma pressão axial superior para efetuar o processo de forjamento [12].

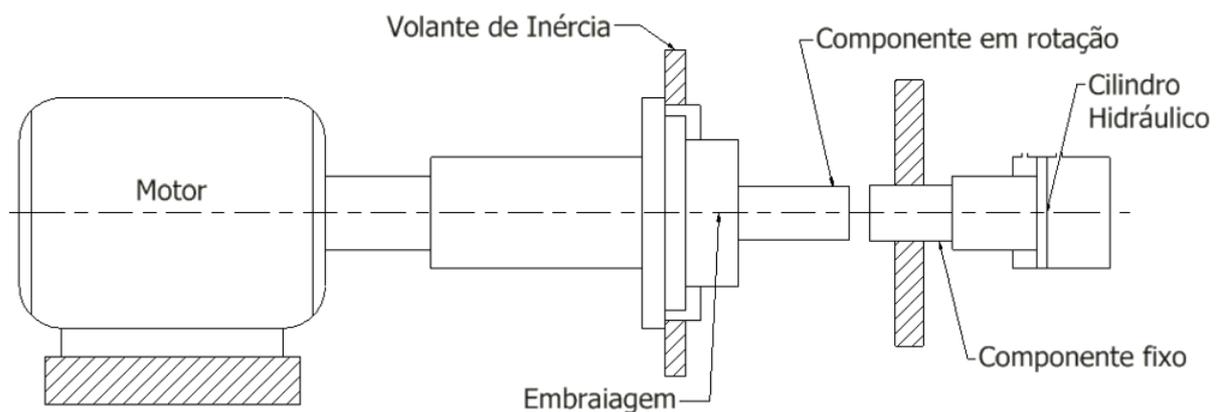


Figura 24 - Esquema representativo de um equipamento de soldadura de fricção, preparado para reproduzir o método de ação por inércia. Adaptado de [12].

A Figura 24 ilustra o processo de soldadura com recurso ao volante inércia.

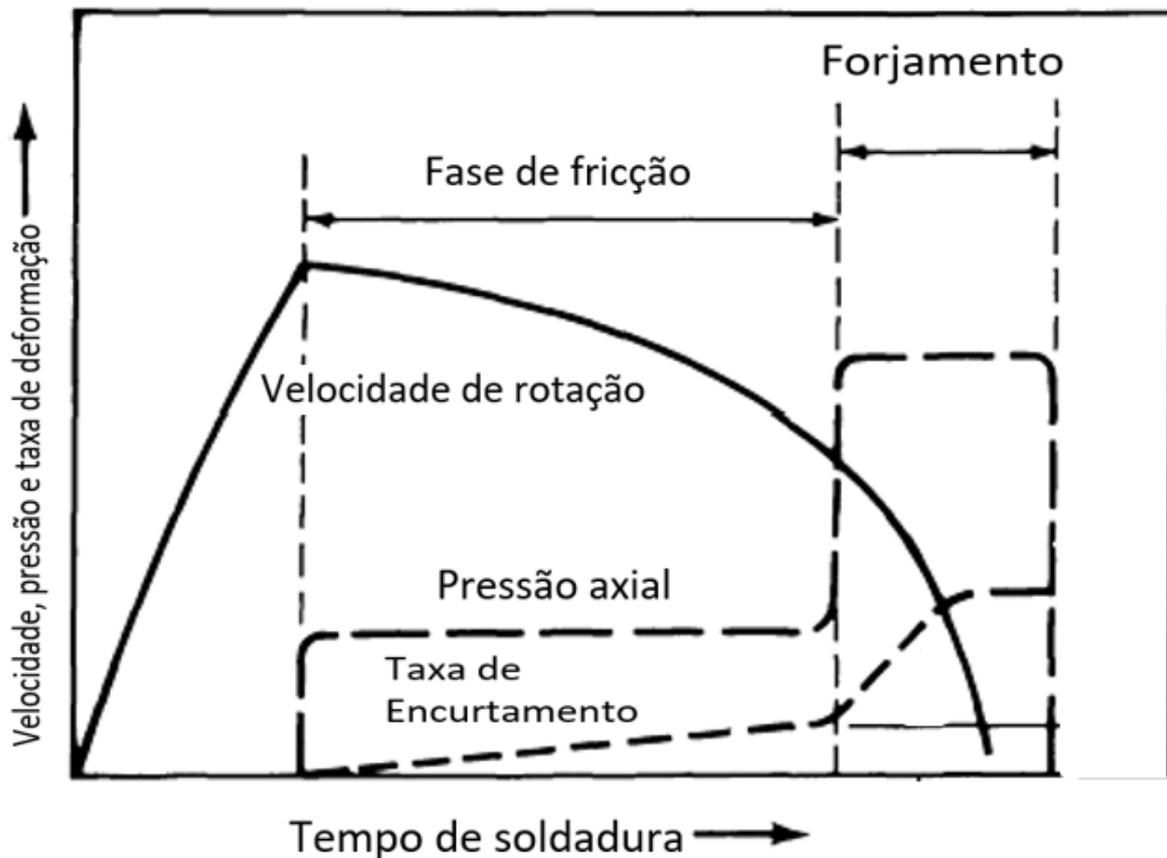


Figura 25 - Comportamento da Velocidade de Rotação, pressão axial e taxa de deformação/encurtamento em função do tempo relativo das três fases de soldadura no processo de ação inércia. Adaptado de [12].

A grande diferença entre o método convencional e o método de ação por inércia reside na velocidade de rotação na fase de fricção. No método de ação por inércia a velocidade de rotação nesta fase diminui continuamente, enquanto no método convencional a velocidade é constante. O calor gerado pela deformação plástica dos materiais na interface é o principal agente na fase de forjamento, uma vez que previne a diminuição rápida da temperatura na interface. As variáveis do processo que controlam as características de uma soldadura por fricção assistida por volante de inércia estão ligadas ao tamanho do volante de inércia e, conseqüentemente, do momento de inércia que dispõe; a velocidade de rotação do volante e a pressão axial. A energia disponível para produzir a soldadura é predefinida pelas duas primeiras variáveis.

É possível calcular a energia cinética no volante de inércia, para um determinado instante durante a soldadura, utilizando a seguinte equação:

$$E = \frac{S^2 I}{C} \quad (5)$$

Onde E é a energia (J), I é o momento de inércia (kg/m^2), S a velocidade de rotação do volante de inércia (rotações/min), e C é a constante de conversão, correspondente a 182.4 para unidades métricas.

A constante de conversão C é proveniente da equação:

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (6)$$

Onde m é a massa (kg) e v a velocidade de rotação (m/s).

Sendo que, neste caso, $v = \omega r$ e que $\omega = 2\pi S$, sendo ω a velocidade angular (rad/s) e r o raio do volante (m),

Então, $v = 2\pi S r$.

Substituindo na equação acima, temos que:

$$E = \frac{1}{2}m(2\pi)^2 S^2 r^2$$

$$E = \frac{1}{2}mr^2(2\pi)^2 S^2$$

Tendo agora em conta que $mr^2 = I$, então:

$$E = \frac{1}{2}I(2\pi)^2 S^2$$

Para aplicando as unidades do Sistema Internacional, a equação fica com a seguinte forma:

$$E = \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{S}^2} \right] = \frac{1}{2} (2\pi)^2 S^2 \left[\frac{1}{\text{min}^2} \right] l [\text{m}^2 \cdot \text{kg}] \left[\frac{\text{min}}{60\text{s}} \right]^2$$

$$E = \frac{1}{2} \frac{(2\pi)^2}{60^2} S^2 l$$

$$E = \frac{IS^2}{C} \quad (7)$$

Resolvendo, em ordem a C , a equação anterior:

$$C = \frac{2 \times 60^2}{(2\pi)^2} = \frac{60^2}{2\pi^2} = 182,378$$

A energia armazenada no volante de inércia é proporcional ao quadrado da velocidade de rotação, S , logo uma vasta gama de quantidades de energia pode ser obtida do mesmo volante, sem que haja necessidade de mudar o volante de inércia, sendo apenas necessário que se faça variar o parâmetro S . O momento de inércia do volante deve ser selecionado tendo em consideração a quantidade desejada de energia cinética para a soldadura e para a fase de forjamento. O forjamento resulta do aumento do binário que ocorre na interface da soldadura à medida a que o volante de inércia vai reduzindo a velocidade até, eventualmente, parar. Se a este binário se acrescentar também a pressão axial necessária, é produzido um forjamento de qualidade. Contudo, como a fase de forjamento irá começar num determinado ponto crítico de velocidade de rotação, a quantidade de forjamento depende diretamente da quantidade de energia ainda restante no volante de inércia, que pode ser expressa por uma função linear do momento de inércia do volante: volantes com maior massa, ainda que com velocidades de rotação menores, produzem mais energia de forjamento do que um volante de menor massa e velocidade de rotação superiores. Independentemente da massa do volante de inércia, todos produzem uma determinada quantidade de calor, contudo a quantidade de energia presente em cada um afeta em muito o tamanho e a forma da taxa de encurtamento da soldadura, tal como demonstrado na Figura 26(a) para soldadura usando os mesmo par de materiais componentes:

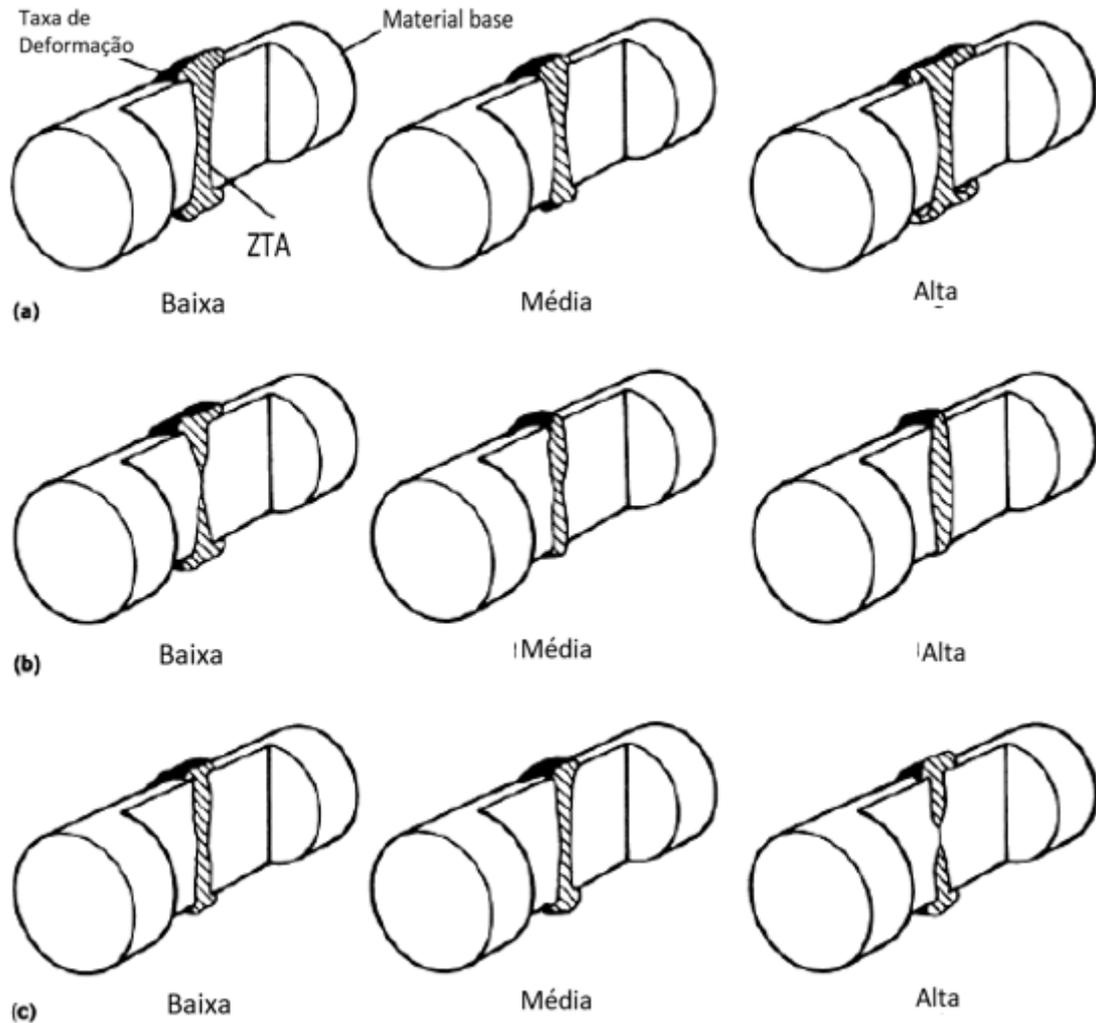


Figura 26 – Esquema que traduz o efeito dos parâmetros de soldadura obtido na interface de dois metais similares usando o método de ação por inércia. (a) Energia do volante de inércia. (b) Velocidade periférica inicial. (c) Força axial. Adaptado de [12].

Cada combinação de metais tem um intervalo recomendado de velocidade periférica. Por exemplo, para os aços, a velocidade periférica inicial (recomendada) varia entre os 110 e os 460 m/min. Apesar destes valores recomendados, já é possível efetuar soldadura a 85 m/min.

A Figura 26(b) demonstra o efeito da velocidade periférica inicial na forma da soldadura entre metais similares.

A variação da pressão axial tem o efeito oposto daquele verificado na variação da velocidade, isto é, soldaduras efetuadas com uma pressão axial baixa possuem semelhanças, com aquelas feitas com velocidades periféricas médias, no que toca à formação da taxa de encurtamento da soldadura e quanto às zonas termicamente afetadas (ZTA), tal como demonstrado na Figura 26(c). Uma força axial excessiva, traduz-se numa soldadura de fraca qualidade na zona próxima ao eixo de rotação da peça; idêntico ao fenómeno observado para uma velocidade periférica baixa [12].

2.3.3 Controlo de Qualidade na Soldadura

Tal como em qualquer processo de manufatura, mesmo na soldadura por fricção, o controlo, deve ser extremamente apurado. Isto com vista a que os defeitos sejam evitados ou, pelo menos, minimizados, identificados e reparados. Nesse sentido, este controlo deve ser, desde logo, iniciado pela verificação das condições necessárias à soldadura das peças em causa. Estas podem ser divididas em dois grupos: controlo antes e depois de realizada a soldadura.

- Verificação dos materiais base a utilizar na soldadura;
- Verificação dos equipamentos da soldadura;
- Os parâmetros da soldadura;
- A verificação do estado de limpeza.

No segundo grupo, no que toca à análise dos provetes logo após a soldadura, é conveniente também:

- Verificar o aspeto e dimensões da soldadura (inspeção visual);
- Acompanhar e registar os tratamentos térmicos após a soldadura;
- Acompanhar e registar todos os ensaios não destrutivos;
- Dotar o laboratório das condições necessárias para a realização dos ensaios.

Num contexto industrial, deverá existir um laboratório, ou departamento de controlo de qualidade para poder satisfazer alguns dos pontos mencionados.

Ainda neste segundo grupo, inserem-se os ensaios destrutivos. De entre eles, destacam-se o ensaio de tração e o ensaio de dobragem.

O primeiro, pretende garantir que as propriedades de resistência à tração oferecidas pela junta são iguais (ou se excedem) os valores patenteados pelo material de base. Dependendo da forma como os provetes são preparados e da forma que o ensaio é executado, tais valores deverão cumprir as normas internacionais em vigor, nomeadamente a EN ISO 5178 (no caso de um ensaio longitudinal), EN ISO 4136 (ensaio de tração perpendicular) [20] e EN ISO 9018 (ensaio de tração de juntas sobrepostas ou cruzadas).

O ensaio de dobragem é extremamente exigente para o provete, e tem como objetivo garantir que as peças soldadas, mesmo quando fortemente solicitadas não têm tendência a gerar fissuras. Neste teste, os provetes são dobrados conforme ilustrado na Figura 27, fazendo com que a junta fique situada exatamente sobre a zona onde o material é obrigado a fazer um ângulo de 180°. Na dobragem, a parte inferior fica sujeita à compressão, enquanto a parte exterior é tracionada. Assim, e considerando que a

junta possui comportamento idêntico ao do material base, apresentará um melhor comportamento à compressão do que à tração. Nesse sentido, e porque se pretende testar a junta nas condições mais adversas, deverá ser respeitado o posicionamento prescrito pela norma para cada situação, obrigando a junta a suportar esforços mais convenientes, tendo em conta a aplicação desejada.

Na realização destes ensaios, deverão ser tidas em consideração todas as recomendações e procedimentos referidos na norma EN ISO 5173, nomeadamente os cuidados referentes à extração e preparação das amostras para ensaio.

A norma refere ainda todos os procedimentos a efetuar após a dobragem. De facto, a dobragem é efetuada analisar para verificar qualquer rotura ou início de fissuração, não só no material de base, mas também na interface. Posteriormente, ambos devem ser cuidadosamente analisados recorrendo a técnicas não destrutivas [11].



Figura 27 – Provede de Alumínio submetido ao ensaio de dobragem. Sublinhe-se que este não foi obtido em concordância com a norma supracitada.

2.3.4 Vantagens e Desvantagens do Processo de Soldadura por Fricção

Tal como qualquer outro processo ou método, a soldadura por fricção apresenta vantagens e desvantagens quando comparada com as restantes técnicas de ligação.

Na Tabela 2 apresentam-se alguns destes pontos, considerados mais pertinentes para o presente estudo.

Tabela 2 – Vantagens e Desvantagens da soldadura por fricção. Adaptado de [11].

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<ul style="list-style-type: none">• Não necessita de materiais de adição, fluxos ou gases de proteção;• O processo não é poluente: não gera fumos, projeções ou arcos danosos para o meio ambiente;• A zona termicamente afetada (ZTA) é bastante reduzida;• Pode ser utilizada numa grande quantidade de ligas metálicas;• Permite a soldadura de materiais dissimilares;• Não depende da perícia dos soldadores;• O processo pode ser facilmente automatizado, para uma eventual produção em massa;• O tempo de execução da soldadura é bastante reduzido.	<ul style="list-style-type: none">• A geometria das peças deve favorecer o processo, permitindo rodar em torno do seu eixo;• A preparação e alinhamento das peças poderá ser um fator crítico, sobretudo para diâmetros superiores a 50mm;• O equipamento e acessórios necessários para o processo são dispendiosos;• Materiais não forjáveis não poderão ser enquadrados neste processo de soldadura;• Para peças longas são necessárias máquinas especiais;• Ligas facilmente maquináveis ou autolubrificantes são difíceis de soldar por este processo.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos e tarefas realizadas para o desenvolvimento dos ensaios experimentais.

Todas as decisões, tal como os seus propósitos, foram exploradas de forma a integrar e comprovar o maior número de considerações teóricas apresentadas anteriormente.

Nesta vertente prática, com o objetivo de extrair o máximo de informação possível acerca das variáveis do processo, foi estruturado um procedimento experimental, desde a preparação dos componentes, que mais tarde vêm a ser usados para criar os provetes, até ao ensaio das amostras por análise microscópica ou por via de ensaios destrutivos. Todo o procedimento experimental foi realizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho.

Para além da avaliação dos provetes em si, todos os ensaios foram minuciosamente acompanhados no que toca à resposta dada pelos equipamentos utilizados: seja pela maior ou menor dificuldade em operar sob certas condições, seja pelo nível de vibrações registado, entre outros. Com esta análise qualitativa, pretendeu-se reunir uma lista de fatores a ter em consideração quando, nos capítulos mais adiante, se abordar o desenvolvimento do equipamento de soldadura por fricção.

Assim sendo, o objetivo das experiências realizadas pode ser aglomerado no seguinte conjunto de pontos:

- Comprovar a viabilidade de implementação do processo;
- Avaliar a qualidade da soldadura produzida;
- Averiguar o efeito das variáveis referidas bibliograficamente;
- Analisar os parâmetros de velocidade, pressão axial e tempo decorrido no processo e observar o seu impacto no componente final;
- Obter dados que possam auxiliar o desenvolvimento de um equipamento de soldadura por fricção.

Nesse sentido, a realização da atividade experimental é dividida em cinco etapas principais:

- i. Estudo do equipamento a utilizar;
- ii. Preparação do material de base para criação de provetes;
- iii. Construção dos provetes por soldadura por fricção;
- iv. Análise dos provetes;
- v. Discussão de possíveis melhorias no processo e aplicação das mesmas, quando justificável.

As etapas ii, iii e iv são sucessivamente repetidas sempre que, dos provetes anteriores, eram obtidos dados de indicassem possíveis melhorias que pudessem beneficiar o processo e, conseqüentemente, trazer novos resultados.

3.1 Seleção do Equipamento a Utilizar

O equipamento utilizado neste processo é o engenho de furar, EFI-FG, presente nas Oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, cujas especificações podem ser consultadas no Anexo I – Especificações Técnicas do Engenho de Furar. Esta decisão justifica-se pelos valores de rotação necessários para produzir a soldadura em provetes com o diâmetro utilizado neste trabalho (mínimo de 2985 rpm, segundo medições executadas em ensaios anteriores [21]).

Em alternativa, é equacionada a possibilidade de o processo de soldadura por fricção ser executado usando um dos tornos mecânicos convencionais disponíveis nas Oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, sobretudo pelos altos valores de binário e pela robustez de construção. Contudo, o facto do contraponto se demonstrar bastante sujeito às vibrações do processo, é eliminatório quanto à sua seleção inicial.

Posteriormente, e tal como será mais pormenorizadamente discutido adiante, para que fosse possível diminuir os valores do diâmetro, sem comprometer substancialmente a velocidade de rotação relativa, foi utilizada uma máquina rebarbadora com velocidades de rotação na ordem dos 6000 rpm para executar a soldadura (Anexo II – Dados Técnicos da Máquina Rebarbadora).

3.2 Preparação do Material Base para Criação dos Provetes

Com o auxílio da serra de disco (Figura 28) foram cortados, numa primeira instância, componentes com 100 mm de comprimento de dois varões de metais distintos, sendo eles:

- Varão de alumínio comercial de Ø15,6 mm;
- Varão de aço macio de Ø11,9 mm.



Figura 28 – Corte dos componentes em aço, com o auxílio da serra de disco.

Após o corte, os componentes foram submetidos a um torneamento no torno mecânico convencional para que fosse executada uma operação de facejamento, com vista a garantir perpendicularidade das faces e melhorar o acabamento superficial, para que as vibrações durante o processo de soldadura pudessem ser reduzidas.

Após as primeiras tentativas de soldadura, as vibrações nos provetes continuavam a mostrar-se significativas e, nesse sentido, o comprimento dos provetes foi reduzido dos 100 mm iniciais para 50 mm (Figura 29). As operações de facejamento foram repetidas pelas mesmas razões mencionadas anteriormente.



Figura 29 – Componentes de aço e alumínio. Na imagem à esquerda, os varões no seu comprimento original, antes de qualquer corte. À direita, com um comprimento final de 50 mm.

Depois destas transformações, alguns dos provetes referidos anteriormente foram ainda torneados novamente de forma a reduzir o seu diâmetro na zona da interface, para realizar experiências de soldadura adicionais:

- Componentes de alumínio de $\varnothing 6$ mm;
- Componentes de aço de $\varnothing 6$ mm.

3.3 Metodologia do Processo Experimental de Soldadura

Depois de preparado, o componente foi colocado no engenho de furar (Figura 30). A abordagem para estes ensaios passou por tentar emular o método de soldadura por fricção convencional (também conhecido como método de ação direta, Figura 23), ou seja, reconstruir um sistema a partir do entendimento teórico do funcionamento do mesmo, de forma que o resultado fosse bastante semelhante aquele reproduzido industrialmente.

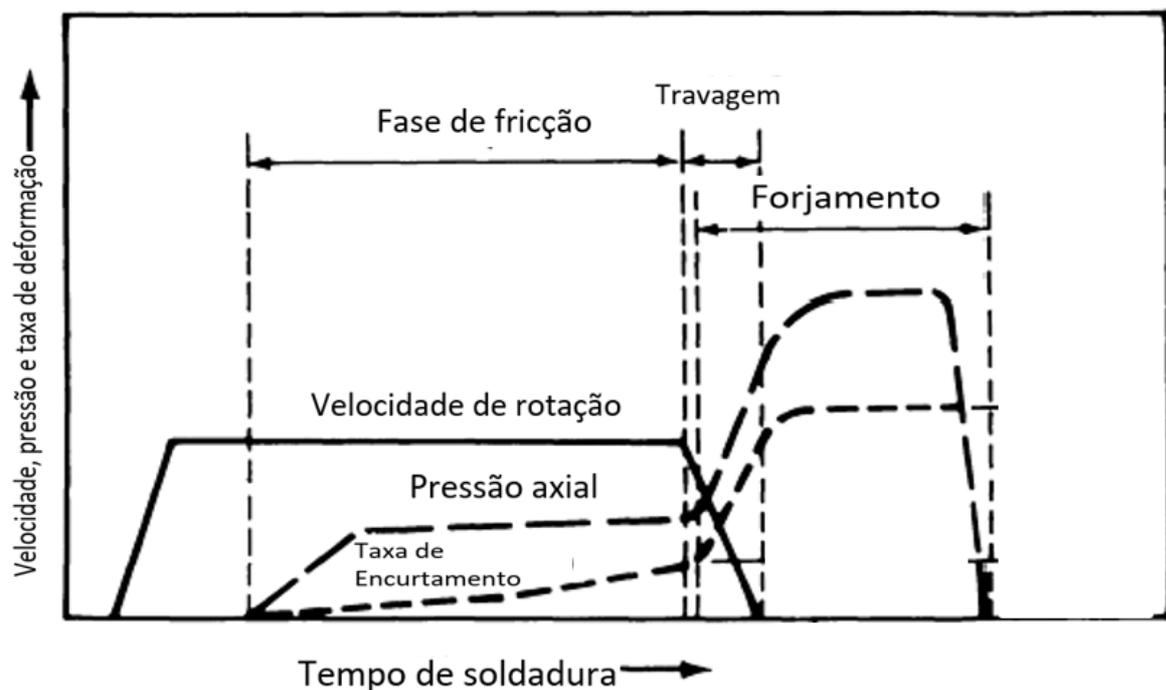


Figura 23 - Comportamento da Velocidade de Rotação, pressão axial e taxa de deformação/encurtamento em função do tempo relativo das três fases de soldadura no método de ação direta.

No entanto, o facto do engenho de furar não possuir um travão para parar imediatamente a rotação, nem uma embraiagem, faz com que a fase final, de forjamento, tivesse sido mais parecida com o método de soldadura por fricção por inércia (fase de forjamento da Figura 25).

Nesse sentido, um dos componentes do provete foi fixado e cuidadosamente apertado na bucha. Posteriormente, este componente foi submetido a uma rotação de 2985 rpm e, usando a alavanca manual do engenho de furar, pressionado contra o outro. Este segundo componente do provete, estacionário, foi apertado no grampo da mesa. O grampo tem a particularidade de estar equipado com calços desenhados especialmente para o propósito, visto que a máquina furadora não foi fabricada para reproduzir o processo de soldadura por fricção e nesse sentido, tornou-se necessário tomar medidas de precaução adicionais para salvaguardar a integridade do utilizador. Em adição, as ranhuras onde assenta o componente, servem de referência para que fosse garantida a perpendicularidade da interface de soldadura e a concentricidade do provete.

De seguida, foi necessário posicionar a mesa manualmente de forma a que as duas partes do provete ficassem em coaxialidade.



Figura 30 – Primeira fase do processo de soldadura por fricção – Fase de fricção.

Uma vez em rotação, a alavanca foi acionada e controlada manualmente. Inicialmente, foi provocado apenas um ligeiro contacto entre as faces e, até que se verificasse um aumento na temperatura da interface, Figura 30, a pressão axial foi mantida constante. O aumento da temperatura tornava o metal mais plástico nessa mesma zona e evidenciava-se no sistema pois era manifestada uma notória diminuição nas vibrações. Nessa fase, era seguro ir aplicando uma força axial sucessivamente superior, tal que fosse capaz de deformar plasticamente tanto o material da interface, como o que se encontrava mais próximo desta. A maior taxa de encurtamento no provete foi verificada nesta fase.

Findada a etapa anterior, com a interface nos valores máximos de temperatura, a rotação era interrompida manualmente e aplicada uma pressão axial substancialmente superior às aplicadas anteriormente, também conhecida como pressão de forjamento. Esta carga axial foi mantida até que o provete arrefecesse e até que fosse possível proceder ao desaperto do provete soldado em segurança.

Numa última instância, e apenas para os provetes de $\varnothing 6$ mm, foi também utilizada uma máquina rebarbadora com capacidade para atingir valores de rotação na ordem dos 6000 rpm. Esta foi fixada com a ajuda dos grampos da mesa. O restante processo é análogo ao anteriormente descrito, com a diferença de que agora o componente estacionário se encontrava montado na bucha do engenho de furar.

3.4 Ensaios Preliminares

Com estes primeiros ensaios, foram efetuadas as soldaduras entre os componentes de alumínio de $\varnothing 15,6$ mm e entre os componentes de aço de $\varnothing 11,9$ mm

O desconhecimento prático das variáveis deste processo levou à realização destes primeiros testes, de forma a avaliar, não só a prestação dos provetes soldados, mas também o desempenho funcional do engenho de furar.

Mais concretamente, os parâmetros a testar nesta primeira fase, foram os seguintes:

- i. Capacidade de as pinças do grampo segurarem os componentes de metal, face às forças axiais e de corte durante as três fases do processo de soldadura;
- ii. Capacidade de estabilidade do engenho de furar e do grampo em manter os componentes alinhados axialmente durante as três fases do processo de soldadura;
- iii. Potência do engenho de furar e capacidade para manter o componente a velocidades de rotação aceitáveis durante as três fases do processo de soldadura;

- iv. Quantidade de força axial, aplicada por parte do operador, mediante cada uma das fases do processo de soldadura.

Relativamente aos tópicos *iii* e *iv*, foi feito um esforço por tentar aproximar as curvas de velocidade, binário e, sobretudo pressão axial, apresentadas na Figura 23 através do manuseamento cuidadoso da alavanca do engenho de furar.

Para dar início aos testes, foram submetidos ao processo de soldadura dois componentes de alumínio. A decisão de começar por testar este material está relacionado com as suas propriedades físicas, tal como a plasticidade e ponto de fusão mais baixo, que comparadas com o aço comercial, poderiam facilitar o desenvolvimento do processo com maior segurança e obter melhores resultados, Figura 31.



Figura 31 – Primeiro ensaio de soldadura por fricção, realizado usando dois componentes de alumínio com 100 mm de comprimento e $\varnothing 15,6$ mm.

Efetuada o primeiro ensaio de soldadura por fricção, verificou-se que, efetivamente, existe uma ligação entre os provetes e que o processo cumpre os requisitos de mínimos de segurança para com o operador. Nada obstante, foi notório que o processo foi acompanhado por um nível de vibrações substancial em todo o sistema que se traduziu num desvio da coaxialidade dos componentes soldados. De mencionar também que a taxa de encurtamento do provete (visível no rebordo gerado), não se aproxima sequer dos valores mencionados bibliograficamente [7][22].

O ensaio foi repetido nas mesmas condições para os componentes de aço de $\varnothing 11,9$ mm.

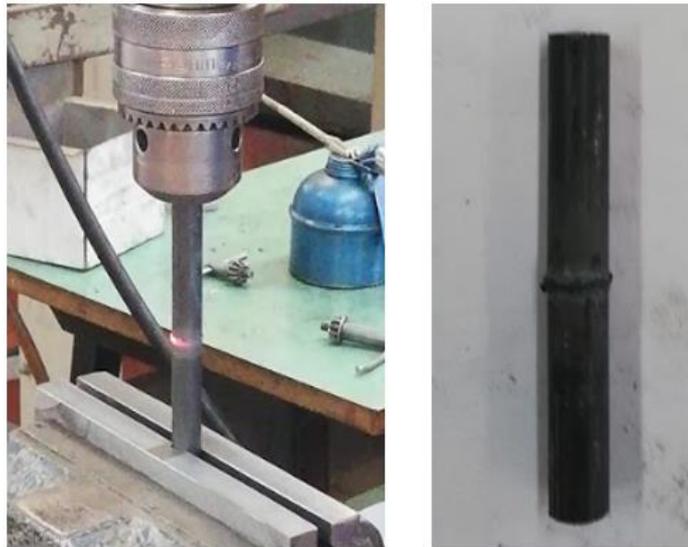


Figura 32 – Soldadura dos componentes de aço. Na imagem à esquerda observa-se a radiação de calor na interface superior à do restante provete (encontra-se ao rubro). Imagem à direita demonstra o provete soldado do ensaio.

As conclusões retiradas desta segunda experiência são semelhantes às da primeira: foram registados níveis de vibração elevados e taxas de encurtamento insuficientes. Em adição, foi também observado, por breves segundos ($\approx 2s$), que a interface dos componentes de aço se encontrava ao rubro, como demonstrado na Figura 32. Nesta mesma imagem, é possível identificar que existiu um alinhamento incorreto, pois tal como é visível, apenas um dos lados da zona periférica é que se encontra ao rubro; caso o alinhamento tivesse sido executado corretamente, seria de esperar que toda a periferia exibisse este tipo de radiação. Imediatamente após este breve fenómeno, o engenho de furar sofreu uma repentina “gripagem”, uma vez que este deixou de ter binário suficiente para prosseguir com a rotação dos componentes. O engenho foi imediatamente desligado no manípulo interruptor para que não existam danos no equipamento.

A duração dos ensaios de soldadura preliminares, para os dois casos, foi de aproximadamente 25 segundos.

Para analisar a qualidade da soldadura foi realizado um ensaio de dobragem, que demonstrou uma clara falta de soldadura na maior parte da zona de interface, Figura 33.



Figura 33 – Interface do provete de aço, após ter sido submetido ao ensaio de dobragem. Evidencia uma clara falta de ligação em grande parte da sua área.

Findados os testes preliminares, recorrendo a análises visuais dos provetes e do desempenho do equipamento, foram apontados como principais inconformidades os seguintes fatores:

- Falta de concentricidade entre os dois componentes do provete soldado;
- Geração insuficiente de rebordo/ Taxa de encurtamento reduzida;
- Níveis elevados de vibração do sistema;
- Binário do engenho de furar insuficiente para a concretização da última etapa da soldadura do provete em aço;
- Tempos de soldadura elevados;
- Processo potencialmente danoso para o engenho de furar.

O último ponto revelou-se bastante problemático, e chegou mesmo a pôr em causa a continuidade das atividades experimentais: quando ocorria o fenómeno de gripagem nos provetes, o intervalo de tempo desde o momento em que a gripagem acontece até ao instante em que a passagem de corrente elétrica que alimenta o engenho de furar fosse interrompido, provoca folgas nas engrenagens do engenho. A ocorrência deste fenómeno conduziu a várias paragens no processo e a várias intervenções de reparação, que resultaram num elevado de tempo de trabalho não aproveitado.

3.5 Evolução dos Ensaios de Soldadura

Tendo em conta a experiência adquirida nos ensaios preliminares de soldadura abordados anteriormente, foram realizados novos ensaios como forma de colmatar as inconformidades observadas nas experiências mencionadas anteriormente.

Com esse objetivo, e tal como já mencionado em 3.1, os componentes para os provetes foram cortados para um novo comprimento de 50 mm como forma de reduzir (ou, pelo menos, minimizar) os elevados níveis de vibração, Figura 34.



Figura 34 – Provetes de Alumínio (imagem da direita) e Aço (à esquerda), produzidos usando componentes com 50 mm de comprimento.

Nestes ensaios já foram sentidas melhorias no processo: a taxa de encurtamento observada no alumínio foi superior às denotadas anteriormente, sobretudo devido à melhoria a nível de vibrações registadas. O facto de as vibrações terem sido reduzidas face às experiências anteriores deram mais confiança para

que fosse aplicada uma maior força axial por parte do operador. Contudo, no caso do aço voltou a verificar-se o mesmo fenómeno de “gripagem” como no descrito no ensaio anterior.

Assim sendo, com este novo conjunto de ensaios, foram atenuadas algumas problemáticas observadas em 3.4, nomeadamente:

- Redução do nível de vibrações no sistema;
- Maior geração de rebordo no provete de Alumínio;
- Maior facilidade em garantir a concentricidade dos provetes.

Contudo, alguns dos parâmetros referidos anteriormente como insatisfatórios no processo continuaram a ser observados, sendo eles:

- Geração insuficiente de rebordo/ Taxa de encurtamento insuficiente no provete de aço;
- Binário do engenho de furar insuficiente para a concretização da última etapa da soldadura do provete em aço;
- Tempos de soldadura elevados;
- Processo potencialmente danoso para o engenho de furar.

De forma a obter mais informação sobre o estado da soldadura ao longo do perfil do provete foi efetuado um corte longitudinal que interceta o eixo de rotação do mesmo e procedidas as tarefas de polimento. Foram então evidenciados defeitos na interface que impossibilitaram uma soldadura total e homogeneidade da mesma, no alumínio, mas sobretudo no aço, Figura 35.

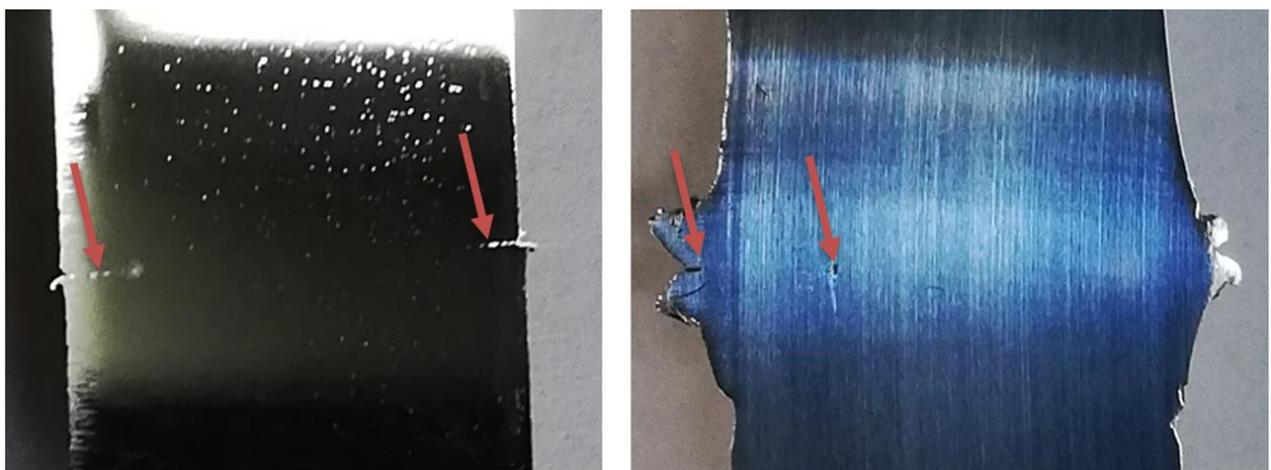


Figura 35 – Provetes de aço (à esquerda) e alumínio (imagem à direita) depois de cortados longitudinalmente e polidos. As setas indicam os defeitos na interface que impossibilitaram uma ligação total da interface.

A soldadura feita no provete de aço revela a importância da taxa de deformação no processo de soldadura por fricção: como estes valores foram insuficientes, é revelada uma clara falta de ligação nas zonas mais afastadas do eixo de rotação; o alumínio, por sua vez, obteve taxas de encurtamento superiores e por esse motivo, aparenta uma ligação de maior qualidade.

3.5.1 Soldadura de Materiais Dissimilares: Aço/Alumínio

Os indicadores positivos deixados pela soldadura do alumínio fizeram com que se pensasse, agora, em estudar a soldadura por fricção entre materiais dissimilares. Para esse efeito, foram usados os componentes de alumínio e aço nos seus diâmetros originais e para um comprimento de 5mm, como indicado na Figura 36. A soldadura destes componentes apresentou bons resultados a nível de vibrações e aspeto do provete em geral. O facto do alumínio ($\varnothing 15,6$ mm) ter um diâmetro superior ao aço ($\varnothing 11,9$ mm) está relacionado com o facto do rebordo gerado ser muito superior no componente de alumínio do que no aço (devido à diferença nas plasticidades de ambos). Em adição, a condutividade térmica do alumínio é quase 10 vezes superior à do Aço, pelo que se irá verificar um arrefecimento mais rápido do provete quando uma área superior de alumínio (que ocorre durante a formação do rebordo) está exposta à temperatura ambiente. Se o contrário for feito, a transferência calor seria mais significativa na superfície longitudinal do alumínio do que na transversal, o que poderia conduzir a um tempo de soldadura superior e fazer com que a zona termicamente afetada se expanda, ou que migre para zonas mais afastadas da interface de soldadura [18].



Figura 36 – Provetes resultantes do estudo exploratório entre materiais dissimilares Aço/Alumínio.

Desta vez, todos os provetes fabricados cumpriram os requisitos mínimos no que toca à inspeção visual. Para averiguar a qualidade da soldadura dos provetes aço/alumínio, analogamente à prática já realizada com os outros provetes, foi selecionado aleatoriamente um dos provetes da Figura 36 e efetuado um corte longitudinal que intercetava o eixo de rotação do mesmo, Figura 37.



Figura 37 – Corte longitudinal em provete obtido usando a soldadura de materiais dissimilares Aço (material da porção superior do provete) e Alumínio (material da porção inferior do provete).

Depois deste corte, para que fosse possível fazer uma recolha de imagens no microscópio digital, foram realizadas etapas adicionais, e mais cuidadosas, de polimento no polidor do Laboratório de Metalurgia do DEM (Figura 38).



Figura 38 – Aspeto final do provete, após realizadas as etapas de polimento no laboratório de Metalurgia.

Submetendo a amostra da Figura 38 à inspeção microscópica, o objetivo principal passou por visualizar a zona da interface em todo o seu raio recorrendo à microscopia ótica.

Com o auxílio do microscópio eletrónico, a amostra supracitada foi analisada de forma a que possam ser retiradas conclusões acerca da qualidade da soldadura.

Nesse sentido, foram captadas várias imagens ao longo do diâmetro do provete, para que fosse analisada a qualidade da ligação obtida, Figura 39.

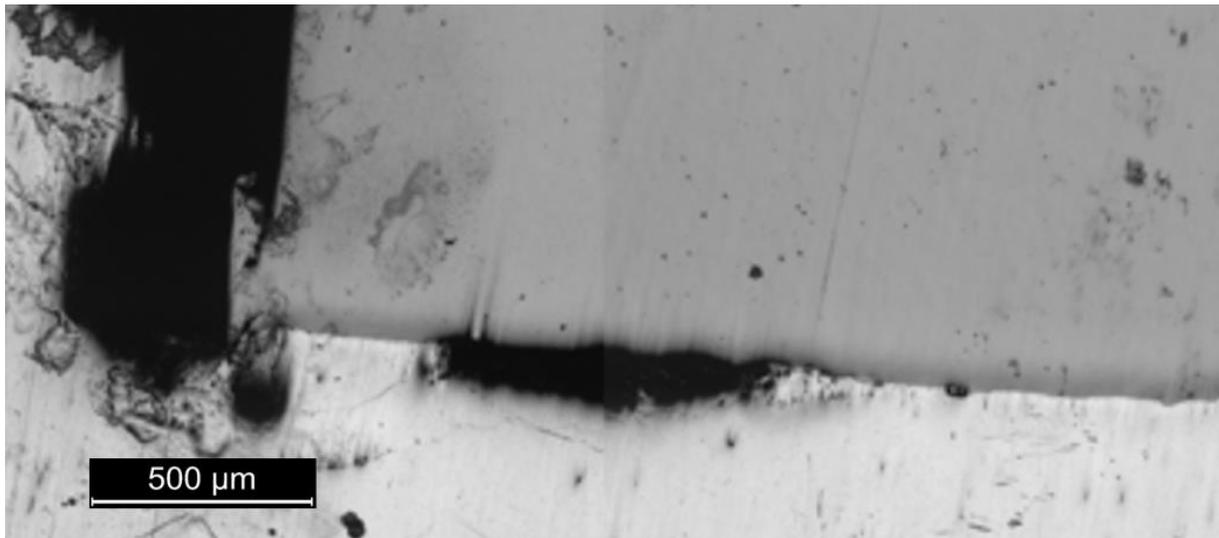


Figura 39 – Excerto da visualização obtida microscopicamente na interface de soldadura entre metais dissimilares, entre aço (porção de material superior) e alumínio (porção de metal mais abaixo). Na zona central da figura é notória uma delaminação na ligação (zona central entre os componentes, a negro), onde não ocorreu a ligação de material.

Na zona periférica da peça, apesar de ser onde a velocidade de rotação relativa dos componentes é superior, verifica-se uma falha na ligação entre o alumínio e o aço. Este fenómeno acaba por ir de acordo ao mencionado na bibliografia, quando é referido que a pressão axial assume o papel mais importante de entre as variáveis do processo de soldadura por fricção. Na Figura 40, é demonstrada a variação da velocidade relativa desde o eixo de rotação, onde a velocidade relativa de rotação é zero, até à periferia, onde a velocidade de rotação relativa entre os componentes é máxima.

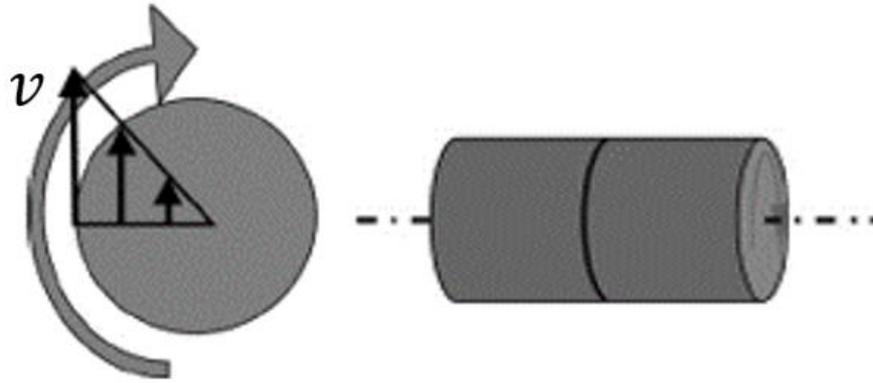


Figura 40 – Comportamento da velocidade periférica (v) ao longo da periferia de um varão. Adaptado de [13].

A delaminação no provete verificada na Figura 39, não é mais do que uma zona onde não ocorreu a ligação entre os metais, quer devido a uma pressão axial insuficiente na fase de forjamento ou a um tempo de soldadura baixo. Existe também a possibilidade dos óxidos/impurezas terem sido centrifugados para estas regiões no exterior do rebordo, acentuando este fenómeno.

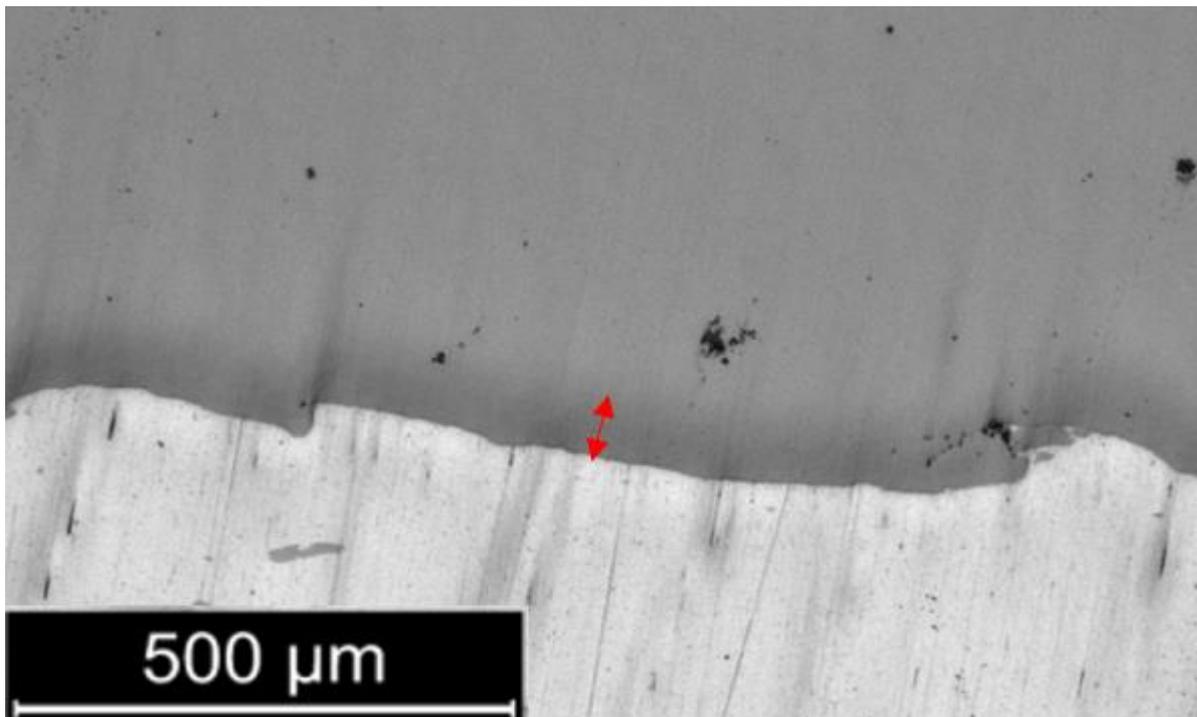


Figura 41 – Formação de uma possível camada intermetálica, identificada na seta a vermelho, entre o Aço (mais escuro) e o Alumínio (região mais clara).

Na Figura 41, é visível uma tonalidade diferente dos metais base na zona da interface que, eventualmente, poderá corresponder a uma camada de compostos intermetálicos que se tenha formado entre o aço e o alumínio. Como mencionado anteriormente, esta camada é responsável por tornar a junta de soldadura frágil e quebradiça e é o fator que requer mais atenção para que seja efetuada uma soldadura de qualidade. Neste caso em concreto, a formação da camada intermetálica está relacionada com os tempos elevados de soldadura.

As restantes imagens obtidas pelo microscópio podem ser consultadas no Anexo III – Imagens microscópicas do provete.

Apenas foram realizadas imagens de microscopia ótica, pelo que não foi possível caraterizar com precisão o tipo de interface que se obteve. Estava prevista a utilização de microscopia eletrónica para caraterização de fases intermetálicas e respetiva composição química, mas devido às limitações relacionadas com o COVID 19, tal não foi possível.

Uma das formas de reduzir o tempo de soldadura entre as duas partes do provete, seria aumentar a quantidade de energia térmica fornecida à interface dos componentes, tal, de acordo com a Equação 3:

$$H = 2P \frac{K}{nR} \times 10^3 \text{ W/mm}^2 \quad (3)$$

Com esse intuito, tentou repetir-se a experiência usando agora uma pressão axial P superior às que tinham sido utilizadas até então, contudo, verificou-se que ao aplicar uma carga axial superior, existe um escorregamento axial dos componentes, quer do estacionário, quer o outro em rotação, fixado na bucha.

Terminada a terceira ronda de testes, desta vez realizados num par de materiais diferentes, os resultados devem ser considerados positivos, uma vez que em grande parte da periferia do provete existiu uma ligação de material, Figura 42.

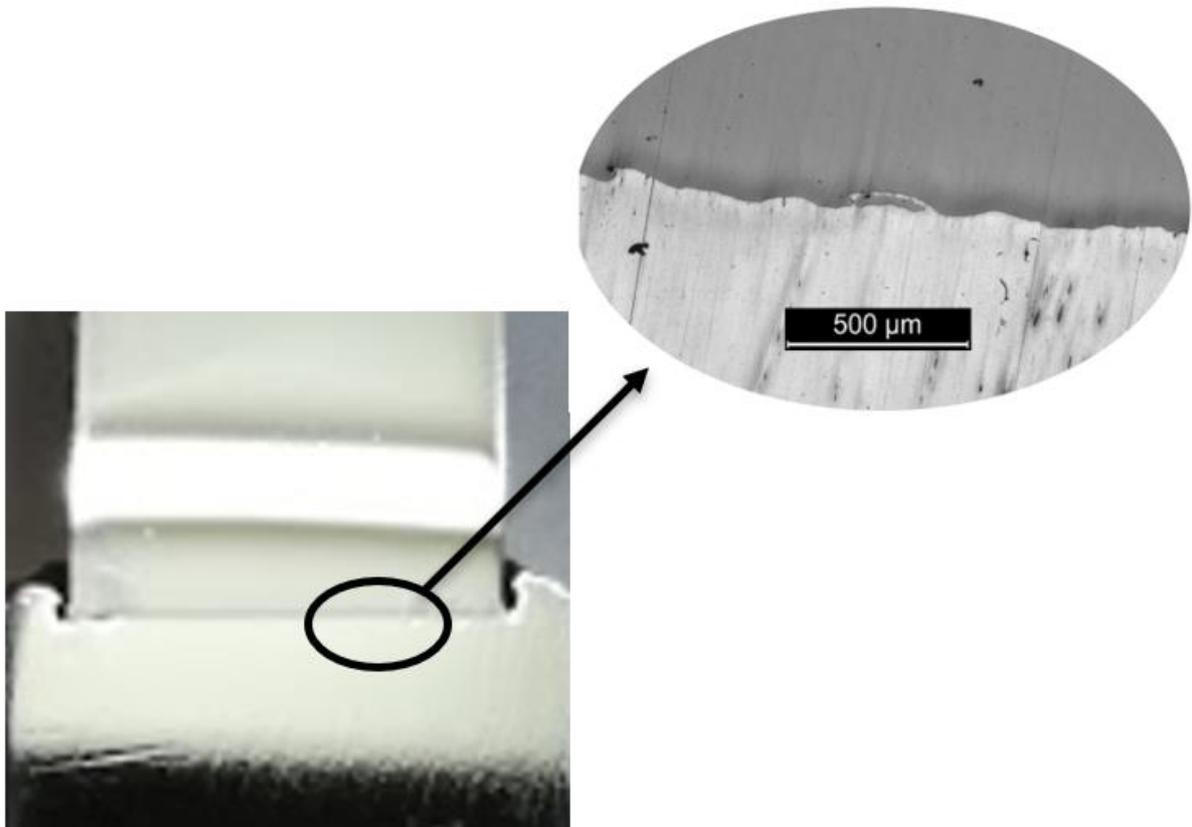


Figura 42 – Região do provete que se demonstra bem soldada, tal como visível na intimidade entre os diferentes metais, evidenciada na ampliação microscópica presente na mesma figura.

Uma vez mais, voltaram a ser observadas fragilidades conhecidas dos ensaios anteriores e são, adicionalmente, identificados novos pontos fracos no processo:

- Tempos de soldadura elevados, que geraram uma camada intermetálica extensa;
- Níveis elevados de vibração do sistema;
- Sistema de fixação foi insuficiente, evidenciado no escorregamento dos componentes quando se tentava aplicar mais força axial;
- Níveis elevados de vibração do sistema;
- Processo potencialmente danoso para o engenho de furar, apesar de desta vez não ter sido registado o fenómeno de gripagem.

3.5.2 Soldadura de Provetes com Interface de Ø6 mm

Mediante o fator limitativo no momento de exercer uma maior força axial na interface dos provetes sem que houvesse um escorregamento, tal como descrito no final de 3.5.1, foi necessário pensar noutras soluções que permitissem continuar o estudo das técnicas de soldadura por fricção. De facto, quando o operador acionava a alavanca de modo a exercer mais força sobre os componentes, existia um escorregamento dos mesmos. Isto é explicado pelo facto de tanto o componente estacionário, fixado nos grampos da mesa, como o componente em rotação apertado na bucha, terem sido apertados manualmente. Neste cenário, o nível de força axial aplicável sem que existisse escorregamento revelava-se muito reduzido, quando comparado a um aperto com acionamento hidráulico, por exemplo. Mesmo que se conseguisse corrigir o fenómeno de escorregamento entre os componentes do provete, a pressão axial continuaria a ser limitada, ainda, pelo facto do acionamento da furadora ter sido efetuado manualmente, com recurso a uma alavanca.

Tal como equacionado na Equação 8, uma forma de aumentar a quantidade de energia térmica presente na interface e assim chegar a um tempo de soldadura adequado, seria, ora por um lado, diminuir a velocidade de rotação periférica, ou então, e voltando ao problema supracitado, aumentar a pressão axial na interface. A diminuição da velocidade periférica não será recomendada neste caso, uma vez que a velocidade já se encontra nos níveis mais baixos daqueles que são recomendados para o aço (110 m/s) [7].

Atendendo à equação da tensão normal, dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Sendo que, segundo as Unidades do Sistema Internacional, a tensão, σ é dada por Pascal (Pa), a força, F , em Newton (N) e a área, A , (m^2).

Tornou-se então evidente que, procedendo à redução do diâmetro na interface de contacto dos dois componentes (e por relação direta, redução das suas áreas, A) seria possível aumentar os valores da pressão axial P da Equação 3 e, conseqüentemente, existiria um incremento na transferência de energia térmica para a interface de soldadura.

Contudo, com uma redução do diâmetro, ocorria também uma diminuição da velocidade periférica de rotação. Nos casos anteriormente ensaiados, para uma velocidade de rotação de 2985 rpm, os valores da velocidade angular seriam dados por:

$$\omega = \frac{\pi \times n}{30} \quad (9)$$

$$\omega = \frac{\pi \times 2985}{30}$$

$$\omega = 312,43 \text{ rad/s}$$

Onde ω , corresponde ao valor da velocidade angular expresso em radianos por segundo e a velocidade de rotação, n , é expressa em número de rotações por minuto.

Desta feita, para o componente de aço de $\varnothing 11,9$ mm, a velocidade de rotação periférica seria obtida da seguinte forma:

$$v = \omega \times r \times 60 \quad (10)$$

$$v = 312,43 \times 0,006 \times 60$$

$$v = 112,47 \text{ m/min}$$

Sendo a velocidade periférica de rotação, v , dada por m/minuto e o raio da secção da interface, r , em metros.

Da mesma forma, a velocidade periférica de rotação para o componente de alumínio com $\varnothing 15,6$ mm, vem como:

$$v = \omega \times r \times 60 = 312,43 \times 0,008 \times 60 = 149,76 \text{ m/min}$$

Sendo que a máquina rebarbadora iria fazer com que o componente em rotação apresente uma velocidade de 6000 rpm, o novo valor obtido para a velocidade angular será de:

$$\omega = \frac{\pi \times n}{30} = \frac{\pi \times 6000}{30} = 628,00 \text{ rad/s,}$$

De forma a que apenas a variável referente à pressão axial fosse alterada no decorrer das experiências, e assim obter resultados fidedignos, importa manter velocidade de rotação periférica com um valor

constante. Para isso foi determinado o valor do raio que os novos provetes necessitavam apresentar, mantendo a mesma velocidade periférica, ou seja:

$$v = \omega \times r \times 60 = 312,43 \times 0,006 \times 60 = 112,47 \text{ m/min},$$

Então:

$$112,47 = 628 \times r \times 60, \text{ isto é:}$$

$$r = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m}$$

De sublinhar ainda que a velocidade de rotação se encontrava mais próximo de um limite crítico inferior para o aço do que para o alumínio, pelo que foram os valores deste (aço) a ter em consideração. O diâmetro dos provetes na interface de soldadura tomou agora um valor de $\varnothing 6$ mm em ambos os varões. A soldadura foi realizada, mantendo a metodologia aplicada até então, sendo que a única diferença foi o uso da máquina rebarbadora no fornecimento de binário e rotação.

Os resultados obtidos encontram-se ilustrados na Figura 43.

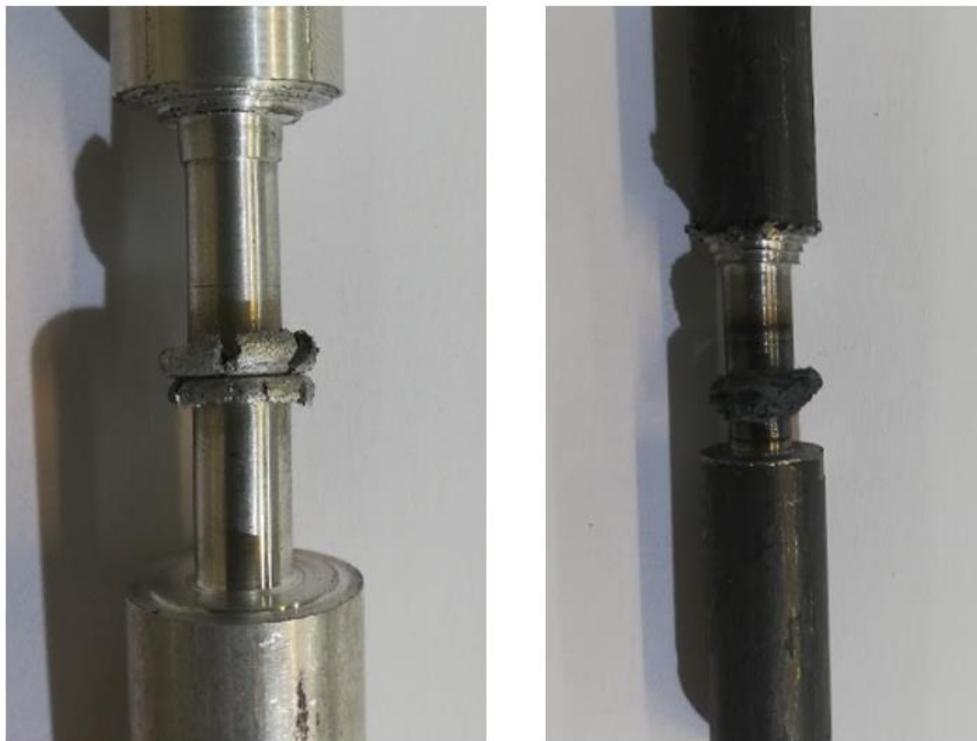


Figura 43 – Resultados obtidos para os novos valores de diâmetro entre materiais similares. Na imagem à esquerda, encontra-se o provete de alumínio e na imagem da direita, o de aço.

Neste grupo de ensaios foram obtidos os resultados mais satisfatórios da soldadura para os mesmos pares de materiais: Observou-se que a geração de rebordo nos componentes demonstrava boas características (ainda que no aço não se apresente tão simétrica como no alumínio). As vibrações registadas também foram substancialmente menores, em muito explicado pelo facto de a área de interface também ter sido mais reduzida. O ciclo de soldadura também foi completo muito mais eficientemente, sendo que se registaram reduções no tempo total de soldadura muito significativas: foi possível completar a soldadura num intervalo de tempo de aproximadamente 3 a 5 segundos (contrastando com os 20 a 25 segundos para ou outros ensaios)

Por outro lado, a soldadura dos pares de provetes de materiais dissimilares não foi bem-sucedida, tendo esta falhado em criar mesmo a mais pequena ligação entre ambos. Garantir a coaxialidade do provete continuou a ser dos fatores mais desafiantes de assegurar. Como neste caso, a zona da interface era menor, não havendo uma boa coaxialidade dos componentes, poderiam ser gerados defeitos estruturais quando aplicada a força axial (Figura 44).



Figura 44 – Encurvamento obtido num componente de alumínio, derivado da falta de coaxialidade quando aliada a uma carga axial elevada.

De uma forma geral, podem apontar-se os seguintes pontos de interesse:

- Quantidades de rebordo satisfatórias;
- Menores níveis de vibração do sistema;
- Maior facilidade em aplicar força axial.
- Menor tempo de soldadura.

Contudo, alguns dos parâmetros referidos anteriormente como insatisfatórios no processo continuaram a ser observados, sendo eles:

- Dificuldade em garantir a concentricidade;
- Falha em soldar pares de materiais dissimilares- Aço/Alumínio.

3.6 Súmula

Com os resultados obtidos nas experiências práticas e fazendo o cruzamento com os objetivos listados no início do capítulo, averigua-se que de facto se realizaram operações de soldadura satisfatórias, tal de como é exemplo a junção dos materiais dissimilares e dos provetes com o diâmetro mais reduzido.

Constata-se também que, das variáveis do processo, o módulo da pressão exercida na interface tem uma importância muito superior às outras variáveis (velocidade de rotação e tempo de soldadura), tal como referido por Tylecote [7]. Este fenómeno ficou evidenciado nos componentes de $\varnothing 6\text{ mm}$, quando se verificou o aumento da quantidade de rebordo gerado devido ao aumento da pressão na interface (e uma consequentemente melhoria da ligação obtida).

Todavia, de acordo com o que foi sendo documentado ao longo do processo experimental, não é possível comprovar a viabilidade da execução do processo no engenho de furar: na maioria das experiências realizadas foram encontrados fatores eliminatórios que afastam a máquina furadora de vir a reproduzir o processo de soldadura por fricção. Listam-se abaixo, resumidamente, os pontos adversos ao processo que foram encontrados:

- Dificuldade em garantir a concentricidade do provete;
- Taxas de encurtamento insuficientes;
- Processo potencialmente danoso para o engenho de furar;
- Impossibilidade de garantir a repetibilidade do processo;
- Tempos de soldadura elevados;
- Elevados níveis de vibração;
- Sistema de fixação insuficiente para evitar o escorregamento dos componentes;
- Binário de operação limitado;
- Força axial reduzida e difícil de mensurar;
- Processo controlado manualmente e dependente da habilidade do operador.

Os dados obtidos no decorrer do processo experimental constituem o cumprimento do objetivo listado no início do capítulo e deverão agora ser tidos em conta no desenvolvimento de um equipamento de soldadura.

4. PROPOSTA DE UM DISPOSITIVO DE SOLDADURA POR FRICÇÃO

Tendo como base a sensibilidade obtida ao longo do trabalho realizado (especial foco para o terceiro capítulo), pretende-se agora concretizar esse conhecimento extraído das observações na elaboração de um dispositivo específico para o propósito da soldadura por fricção. Com isto em mente serão, numa primeira abordagem, discutidos os requisitos que o dispositivo de soldadura por fricção deve apresentar. Num contexto industrial, estes equipamentos geralmente apresentam um grande custo e robustez. O mesmo não se pretende, contudo, no presente estudo. Como se trata de um projeto meramente académico, é forçoso que este se apresente com um custo reduzido e que seja facilmente integrável nas Oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho.

As modelações que se seguem são concretizadas usando o software *Autodesk Inventor Professional* e pretende-se, com elas, ilustrar o que mais tarde poderá vir a ser o protótipo destes equipamentos.

4.1 Requisitos de um Equipamento de Soldadura por Fricção

Com as conclusões retiradas no estudo da soldadura por fricção nas condições laboratoriais anteriormente descritas, é possível chegar a uma lista de requerimentos necessários para um equipamento que permita a soldadura por fricção.

Relativamente aos requisitos tecnológicos dos dispositivos, para uma dada combinação de materiais, o dispositivo de soldadura, segundo Vill [9], deverá ser capaz de:

- Fornecer as devidas pressões axiais às diferentes etapas do ciclo de soldadura;
- Um controlo preciso no que toca ao fornecimento de calor, seja este controlado pelo tempo de soldadura ou pela quantidade da taxa de deformação;
- Paragem imediata da rotação relativa assim que esta seja solicitada;
- Ciclos automáticos que permitam obter a mesma qualidade na junta de soldadura, sem que haja necessidade de um reajuste de qualquer parâmetro na máquina.

De entre os requisitos de *design*, Vill [9] defende que estes deverão garantir os seguintes pontos:

- Rotação relativa de um dos componentes a soldar em relação ao componente estacionário, enquanto decorre a aplicação da força axial;
- Robustez adequada para que as vibrações sejam amortecidas e as deslocações radiais nos provetes sejam eliminadas (capaz de garantir concentricidade);

- Sistema de fixação que garanta que os provetes não sofrem nenhum tipo de escorregamento, mesmo sob forças axiais consideráveis.

Alguns destes pontos vão de encontro às dificuldades que, efetivamente, se fizeram sentir no decorrer da atividade experimental descrita no terceiro capítulo e serão, obrigatoriamente, parâmetros a corrigir no dimensionamento deste novo dispositivo de soldadura.

Para além destes requisitos, será necessário implementar outros adicionais, intrínsecos ao facto deste estudo se realizar num ambiente meramente académico:

- A dimensão do equipamento deverá ser reduzida (comparativamente às máquinas ferramenta usadas industrialmente para este propósito), para que se adeque ao espaço que virá a integrar (Oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho): de facto, dependendo da dimensão das peças a ligar, os equipamentos industriais para soldadura por fricção poderão comportar grandes envergaduras para suportar as forças centrífugas, vibrações envolvidas e para manter a segurança e integridade física dos operadores e instalações [11].



Figura 45 – Dispositivo da empresa KUKA capaz de exercer uma força de forjagem de 450kN e soldar secções máximas de 3750mm². Adaptado de [23].

- Os custos de totais de fabrico e implementação, devem, igualmente, apresentar-se reduzidos;

Como se verá em seguida, será proposto o recondicionamento de uma das máquinas ferramenta, nomeadamente o torno convencional mecânico para a realização de soldadura por fricção, o que levanta uma outra cláusula:

- Qualquer modificação tomada a cabo na máquina ferramenta, ou qualquer módulo que lhe seja adicionado, não deve impossibilitar (ou sequer comprometer) o bom funcionamento na realização das tarefas para qual o equipamento foi originalmente desenhado.

4.2 Módulo Adaptador para o Torno Mecânico

Como já foi mencionado, os primeiros ensaios de soldadura por fricção foram realizados por A.I. Chudikov que, usou dois varões de aço com $\varnothing 30$ mm num torno mecânico convencional, sem que nenhuma modificação lhe tenha sido feita [9].

Podem, então, usar-se os mordentes da bucha para fixar o componente que atuará em rotação e usar o carrinho, onde geralmente se encontra o contraponto, para colocar o componente estacionário.

Apesar de parecer uma solução bastante desejável à primeira vista, existem vários fatores eliminatórios (condições de operação inerentes ao processo) que fazem do torno convencional um equipamento desaconselhado para produzir a soldadura por fricção:

- Incapacidade de exercer as diferentes forças axiais para as etapas de soldadura distintas, com especiais dificuldades em reproduzir pressões axiais elevadas;
- Incapacidade de controlar a elevada vibração radial no início do processo;
- Falta de uma embraiagem/travão que permita interromper a transmissão de movimento e parar de imediato o componente móvel.

Não obstante, mediante certas adaptações que colmatem estes defeitos, será possível usar o torno mecânico convencional para produção de componentes de soldadura por fricção. Normalmente, um equipamento de soldadura por fricção está munido com um sistema de travagem que lhe permite parar imediatamente a rotação e ainda um sistema hidráulico capaz de fornecer diferentes pressões axiais para as três etapas do processo de soldadura [24], Figura 46.

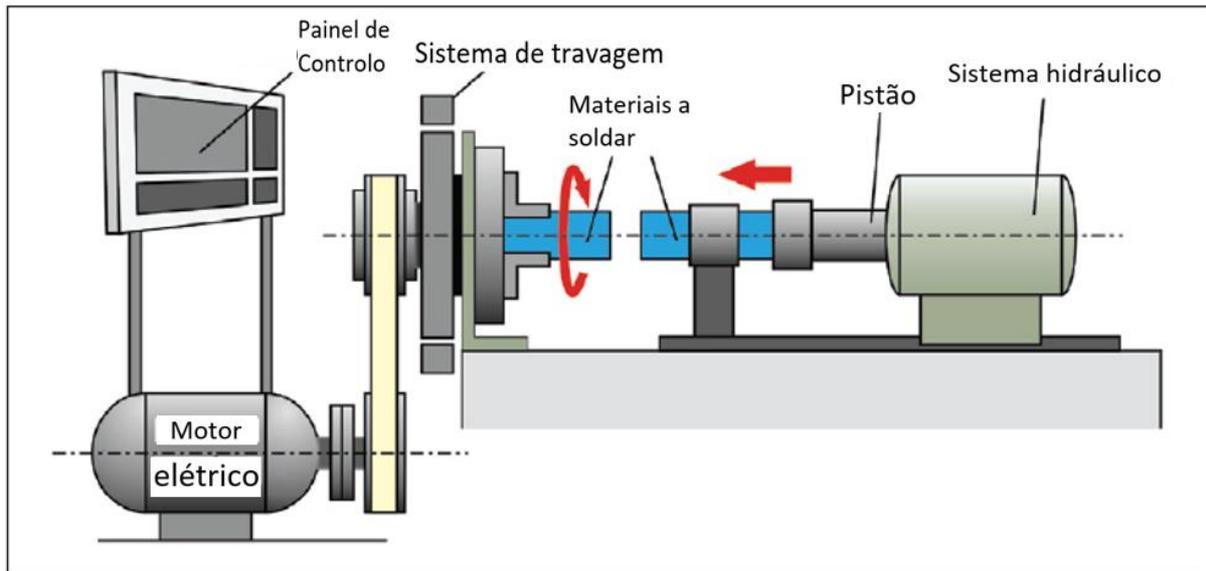


Figura 46 – Diferentes órgãos componentes de um dispositivo de soldadura por fricção. Adaptado de [25].

Na falta de um equipamento dotado de todas estas características, resta então, ter em consideração uma máquina ferramenta que possua o maior número de semelhanças às que se ilustram na Figura 46. Daqui em diante, então será tomado como exemplo o torno mecânico EFI-DU 2515, presente nas oficinas do DEM, que, pela sua robustez, *a priori*, se admite que será mais capaz no controlo das vibrações inerentes ao processo. Sublinhe-se que apesar de ser apresentada esta máquina ferramenta em específico (Figura 47), não implica que não possa ser adaptado a outro torno paralelo.



Figura 47 – Torno convencional mecânico EFI-DU 2515.

O mesmo nível de controlo, tal como representado na Figura 46, não se encontra num torno convencional, pelo que será necessário obter forma de contornar tais inconvenientes. De facto, num torno mecânico, existe um travão capaz de cessar o movimento de rotação. O seu grande inconveniente, como já foi mencionado, reside no facto de esta ser uma paragem progressiva, e não de uma forma imediata, como o processo requer.

Segundo Vill, é possível resolver este problema, criando um sistema de travagem artificial (travagem eletromagnética). Contudo, segundo o mesmo, este método de travagem provoca um desgaste excessivo no motor.

Por esse motivo, é necessário chegar a uma outra solução mais viável. Neste caso, essa solução passará por se proceder ao destravamento do componente, originalmente em regime estacionário, no final da fase T3 (onde se gera maior parte do calor e antes da fase de forjamento), fazendo assim com que o componente em rotação e o outrora estacionário rodem com a mesma velocidade, e, anulando assim, a velocidade relativa entre ambos (Figura 48).

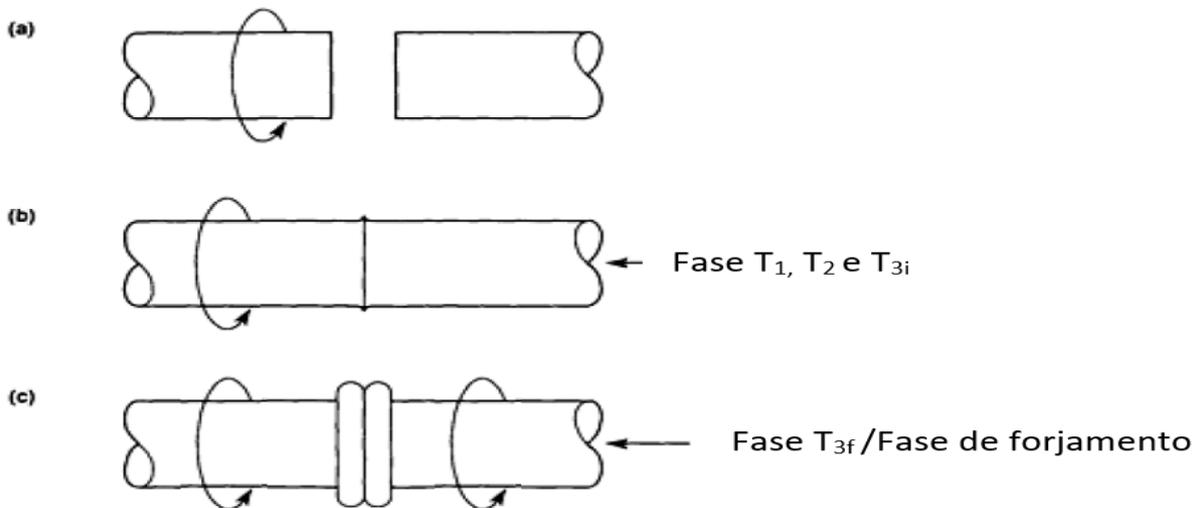


Figura 48 - Esquema ilustrativo dos passos fundamentais do processo de soldadura proposto. (a) Um dos componentes está provido de rotação, enquanto que o outro é mantido estacionário. (b) Os componentes são aproximados. É aplicada força axial para iniciar e concretizar parte do processo de deformação. (c) A rotação relativa é cessada, destravando o componente inicialmente estacionário e o processo de deformação é finalizado com a aplicação da pressão de forjamento.

Relativamente à Figura 48, a) o componente, apertado na bucha do cabeçote móvel do torno, roda com velocidade de rotação selecionada no volante de mudanças do torno, enquanto que o outro componente se encontra fixo no módulo auxiliar e desprovido de rotação; b), surge a aproximação do componente estacionário e dá-se o contacto sob determinada pressão axial e velocidade periférica de rotação, sendo assim efetuadas as diferentes etapas da soldadura por fricção (T1, T2 e T3 inicial). Na fase c) do processo, o componente originalmente estacionário é destravado, fazendo com que a velocidade relativa, entre este componente e o componente motor, deixe de existir. Pode agora ser aplicada a pressão de forjamento correspondente à etapa T3 final.

De forma a que a componente motora do torno não necessite de ser submetida às operações supracitadas, torna-se evidente a necessidade de criar um módulo adicional para a concretização do método de soldadura demonstrado na Figura 48. De facto, nenhum dos componentes móveis a atuar nas guias do torno (carro porta-ferramentas e cabeçote móvel) serão capazes de reproduzir a destravagem do componente na etapa c) da Figura 48: não só pela impossibilidade de criar a força axial requerida para as diferentes etapas, mas também porque não será possível desengrenar o componente estacionário.

Assim sendo, será necessário pensar um módulo auxiliar que funcione em simbiose com o torno, mas que confira estas qualidades adicionais ao processo, tal como ilustrado na Figura 49.

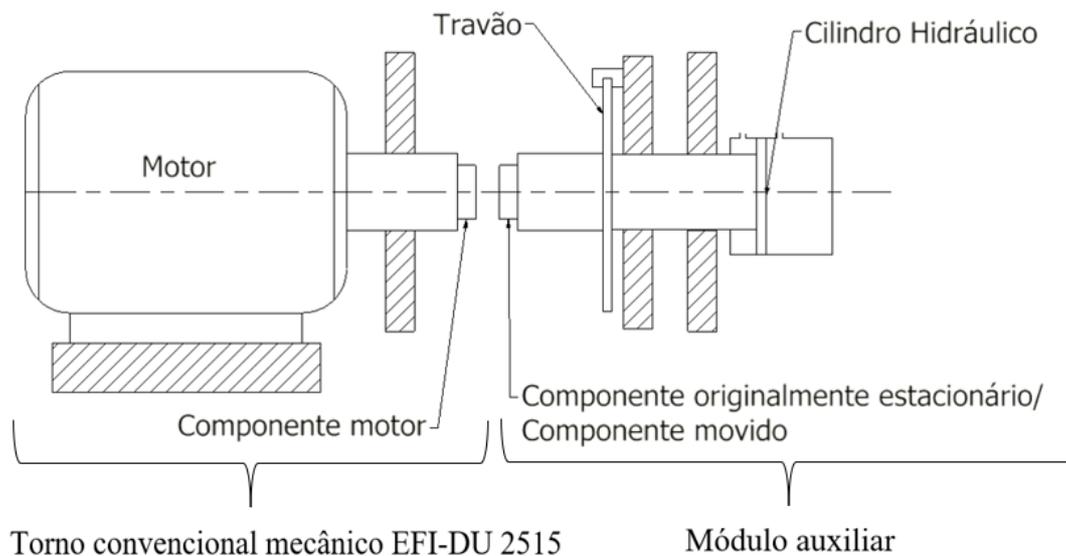


Figura 49 – Órgãos constituintes do equipamento de soldadura por fricção. À esquerda, demonstram-se os componentes pertencentes ao torno mecânico, do lado direito, os do módulo auxiliar.

Devido à robustez do torno mecânico, será expectável que o nível de vibrações que se encontram no processo (comparativamente ao engenho de furar) sejam muito inferiores, facilitando assim a repetibilidade e concentricidade dos provetes soldados.

Repare-se que, relativamente à componente motora do sistema mostrado na Figura 49, uma vez que a velocidade máxima de rotação no torno é de apenas 1800 rpm (em contraste com as 2985 rpm do engenho de furar), pela Equação 10, depreende-se que o diâmetro dos provetes terá de ser superior àqueles até então usados no engenho de furar para que se façam respeitar as velocidades de rotação mínimas para que se dê a soldadura.

Isto é, a velocidade angular, ω , que o torno mecânico é capaz de obter é dada usando a equação:

$$\omega = \frac{\pi \times n}{30} \tag{9}$$

$$\omega = \frac{\pi \times 1800}{30}$$

Assim sendo, a velocidade angular máxima no torno mecânico é de:

$$\omega = 188,49 \text{ rad/s}$$

Tomando o exemplo do aço utilizado anteriormente, onde a velocidade de rotação recomendada é de, no mínimo 110 m/s[7], o diâmetro do provetes deverá ser de pelo menos:

$$\begin{aligned}v &= \omega \times r \times 60 & (10) \\110 &= 188,49 \times r \times 60 \\r &= 0,009 \text{ m} \\ \varnothing &= 18 \text{ mm}\end{aligned}$$

Cálculos semelhantes deverão ser realizados para cada par de materiais.

Relativamente ao módulo auxiliar, este terá de ser dotado de um cilindro hidráulico que possa ser programado para conferir as pressões axiais necessárias às diferentes etapas do processo. Autores como Bayindir [26] e Nagaraj [27] apresentam vários estudos relativamente às diferentes possibilidades para controlar os cilindros no que toca à aplicação de força axial no sistema.

Tal como anteriormente referido, a destravagem do componente estacionário (na etapa c) da Figura 48), irá substituir a necessidade de criar um sistema de travagem eletromagnética (ou de fazer qualquer operação na componente motora do torno que emulasse este sistema) e que desta feita, poderia danificá-lo ou comprometer o normal funcionamento do mesmo. Um dos mecanismos de travagem passível de ser aplicado para eliminar esta necessidade, encontra-se representado na Figura 50.



Figura 50 - Sistema de travagem. Na imagem à esquerda a correia permite a rotação do rolamento, estando, portanto, o sistema destravado. Na imagem da direita, a correia exerce uma pressão numa grande área de rotação da chumaceira, impedindo a sua rotação. Adaptado de [28].

Para que esta solução seja viável, este módulo deverá ser capaz de assegurar a repetibilidade no processo, pelo que o instante de destravagem (apesar de poder ser construído para ser executado manualmente) deverá ser controlado automaticamente. Este mesmo instante de destravagem pode ser controlado, quer pela posição de avanço do cilindro, quer pelo tempo de soldadura decorrido, para isso, é conveniente que o travão esteja conectado na mesma unidade de controlo do cilindro hidráulico.

Desta feita, é garantido que o normal funcionamento do torno mecânico não será comprometido, podendo este continuar a efetuar as operações de torneamento para as quais foi originalmente desenhado.

Pressupõe-se então que a máquina ferramenta terá de ser capaz de atuar em dois modos diferentes: um modo em que desempenhe as suas funções originais, tal como demonstrado na Figura 47; e um outro onde inclua o módulo para a soldadura por fricção esquematizado na Figura 49 e representado na Figura 51.

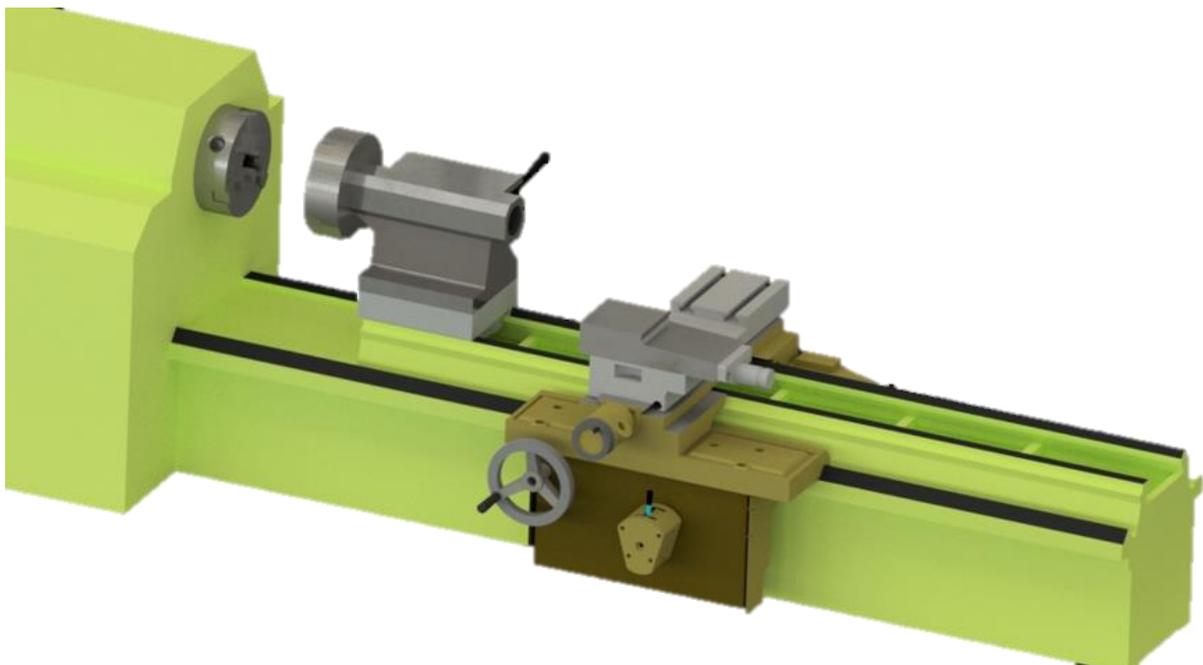


Figura 51 - Esboço do modo de funcionamento do conjunto (torno EFI-DU 2515/módulo auxiliar) para execução da soldadura por fricção.

Repare-se que neste modo de operação, o carro porta ferramentas deverá estar recuado (transversalmente) para que o módulo auxiliar seja montado à frente deste, tal como ilustrado na Figura 51. Desta forma, é possível ajustar a distância das buchas e obter assim uma maior gama de comprimentos para os provetes a soldar.

Outro órgão de grande importância nesta operação é o barramento. Este é responsável pela ligação e correto posicionamento de todos os principais constituintes do torno. Por esse motivo, deverá ser tao rígido quanto possível de forma a evitar flexões, não pondo em causa a qualidade da maquinagem (ou soldadura) da peça a ser produzida. Na Figura 52, está representada a modelação do barramento do torno EFI-DU.



Figura 52 - Modelação do barramento do torno EFI-DU 2515.

É também neste que estão localizadas as guias onde irá assentar o módulo auxiliar e, portanto, onde será pensado o modo de fixação entre estes dois.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, é relevante tecer as considerações tomadas como pertinentes acerca realização do presente trabalho. Fruto dessas conclusões, são propostas algumas tarefas que poderão ser aplicadas futuramente, de modo a aprimorar o que foi até então apresentado.

5.1 Conclusões

Finalizado o estudo, importa agora, não só analisar o que foi conseguido, como também desmistificar as razões pelas quais se verificaram alguns pontos de relativo insucesso, para que possam ser sobre eles retiradas as devidas conclusões.

Comparando os resultados obtidos com o desafio proposto no início do projeto, nomeadamente no que toca à adaptação do engenho de furar para realização de soldadura por fricção, resta afirmar que este não apresentou um *feedback* positivo quando submetido ao processo. Na verdade, tal como mencionado nos capítulos antecedentes, o engenho de furar evidencia vários fatores eliminatórios que o afastam da realidade de poder vir a ser adaptado com vista a dar uma resposta eficaz e reproduzir saudavelmente este processo: apesar de terem sido efetuadas várias ligações de componentes (com qualidade) utilizando a soldadura por fricção, este revela falhas no que toca à fixação dos componentes, gerando assim um elevado nível de vibrações e que é refletido, por exemplo, num elevado grau de incerteza no que diz respeito à concentricidade do provete soldado. Em adição, a falta de potência do engenho traduz-se em tempos de soldadura excessivos, provocando fases intermetálicas frágeis entre provetes obtidos por materiais dissimilares. O volume de experiências efetuadas no engenho também é afetado negativamente pelas várias manutenções corretivas que foram necessárias realizar na máquina. Este último deve-se, sobretudo, ao desenvolvimento de folgas entre as engrenagens, muitas vezes sentidas após o fenómeno de gripagem (recorrente na soldadura dos provetes de aço com um diâmetro superior a $\varnothing 6$ mm).

Por outra perspetiva, o somatório dos resultados conseguidos que proporcionam um valor acrescentado a este estudo, ultrapassam, quer em quantidade, quer em qualidade, os problemas mencionados no parágrafo acima. Efetivamente, numa primeira instância foram reunidas considerações teóricas de vários autores com relevância no tema. Estes conhecimentos são mais tarde integrados, com sucesso, nos procedimentos experimentais, onde se verificam progressivas melhorias, traduzidas na qualidade dos provetes soldados: é observada a evolução, desde os primeiros ensaios, nos quais se verificam ligações

muito deficientes nas interfaces e efeitos indesejados no processo, até a um último conjunto de provetes com boas taxas de deformação de material, tempos de soldadura reduzidos e ZTA reduzidas que em tudo levam a crer na qualidade exemplar das uniões obtidas.

Fundamentadas pela sensibilidade adquirida nas atividades experimentais e pela análise bibliográfica dos métodos de soldadura já patenteados no mercado, é também proposto um método inovador, que visa dar uma resposta às fraquezas demonstradas pelo engenho de furar, agilizando assim uma possível implementação dos processos de soldadura por fricção em ambiente académico, sem que seja posta em causa a integridade do binário ferramenta/utilizador. De facto, ao aliar a robustez do torno mecânico, que serve de base estrutural e como principal elemento motor no processo, a trabalhar em simbiose com um módulo auxiliar dotado de um cilindro hidráulico, conectado a alguma fonte que permita controlar a pressão axial exercida, bem como um travão que torne possível controlar a velocidade relativa entre ambos os componentes do provete tem potencial para ser uma solução viável e merecedora de uma futura discussão.

Num cômputo geral, apesar de não ter sido possível adaptar o engenho de furar ao processo de soldadura por fricção, deve afirmar-se que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos, com particular ênfase no que toca à pesquisa bibliográfica sobre metodologias do processo de soldadura por fricção, reunião de dados e parâmetros concretos sobre o mesmo, culminando numa abordagem inovadora sobre o tema.

5.2 Trabalhos Futuros

Ainda que tenham sido cumpridos os objetivos propostos no início do projeto, há algumas questões que podem ser complementadas futuramente.

Relativamente aos resultados conseguidos nos procedimentos experimentais, tanto os provetes realizados com aço, como os de alumínio, carecem de uma análise que permita identificar os diferentes componentes químicos, bem como as suas percentagens. Apesar de ser uma forma simples de acrescentar valor ao trabalho apresentado, este não se verificou possível devido à indisponibilidade do dispositivo designado pelo Laboratório de Metalurgia para este propósito. Ainda sobre os provetes obtidos experimentalmente, poderão ser realizados ensaios de tração para obtenção de dados que quantifiquem melhor os resultados conseguidos pelo processo. Estes provetes não puderam, contudo, ser tracionados no DEM pois este não está munido com amarras capazes lidar com os reduzidos diâmetros em causa.

Os principais esforços dos trabalhos futuros deverão recair, primeiramente, na criação e implementação do módulo auxiliar. Não obstante, antes do desenvolvimento de um equipamento é forçoso ter em consideração a necessidade de reunir algumas informações importantes relativamente ao projeto de máquinas e equipamentos, bem como conhecimentos sobre a teoria do projeto mecânico e de algumas técnicas e métodos habitualmente utilizados. Com isto em mente, deve ser então dimensionado um cilindro hidráulico capaz de fornecer ao sistema a força axial necessária; selecionado o sistema de travagem (ou, possivelmente, até uma embraiagem) que permita cessar o movimento de rotação relativo entre os componentes.

Caso fosse possível, seria igualmente interessante inserir uma unidade de controlo auxiliada por computador que permitisse controlar o sistema quer na pressão aplicada, tempo de soldadura e nível de deformação do provete [26][27].

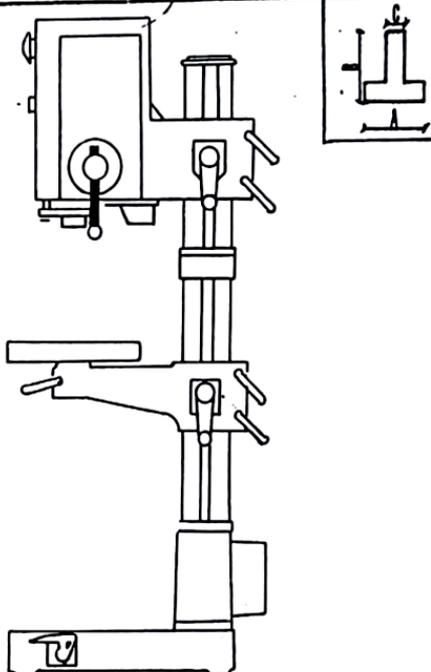
BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Barbosa, *Tecnologias de Fundição e Soldadura*. 2015.
- [2] Miller, “The History of Welding.” [Online]. Available: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding>. [Accessed: 02-Nov-2019].
- [3] T. Industries, “Izumi Machine Mfg.” [Online]. Available: <http://www.en.izumi-mfg.co.jp/fw/about/history.html>.
- [4] M. Manufacturing Technology, INC., “Friction welding,” *Weld. J. (Miami, Fla)*, vol. 78, no. 4, p. 56, 1999, doi: 10.22486/iwj.v10i3.148787.
- [5] I. MTI Manufacturing Technology, “MTI Manufacturing Technology.” [Online]. Available: <https://www.mtiwelding.com/timeline/>. [Accessed: 02-Nov-2019].
- [6] J. F. Lancaster, “Solid-phase Welding,” 1980.
- [7] R.F. Tylecote, “The Solid Phase Welding of Metals,” 1968.
- [8] João Manuel R. S. Tavares, *Indicação dos estados de Superfície - Apontamentos de CFAC (Concepção e Fabrico Assistidos por Computador)*. 2012.
- [9] V. V.I., *Welding Metals by Friction*, no. Outubro. 1972.
- [10] J. F. Lancaster, “The physics of welding,” *Phys. Technol.*, 1984, doi: 10.1088/0305-4624/15/2/I05.
- [11] F. J. G. Silva, “Tecnologia da Soldadura - Uma Abordagem Técnico-Didática,” 2016.
- [12] J. Song, R. Field, A. Clarke, Y. Fu, and M. Kaufman, *Metals HandBook - Welding, Brazeing and Soldering*, vol. 6. 1993.
- [13] M. Maalekian, E. Kozeschnik, H. P. Brantner, and H. Cerjak, “Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars,” *Acta Mater.*, vol. 56, no. 12, pp. 2843–2855, 2008, doi: 10.1016/j.actamat.2008.02.016.
- [14] P. T. Houldcroft, “Welding Process Technology.” .
- [15] E. Taban, J. E. Gould, and J. C. Lippold, “Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 5, pp. 2305–2311, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.12.010.
- [16] E. P. Alves, F. P. Neto, and C. Y. An, “Welding of AA1050 aluminum with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process,” *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol. 2, no. 3, pp. 301–306, 2010,

doi: 10.5028/jatm.2010.02037110.

- [17] A. Ambroziak, M. Korzeniowski, P. Kustroń, M. Winnicki, P. Sokołowski, and E. Harapińska, "Friction welding of aluminium and aluminium alloys with steel," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2014, no. April, 2014, doi: 10.1155/2014/981653.
- [18] D. Mani and D. Ananthapadmanaban, "Welding Mechanisms during Friction Welding of Aluminium with Steel," no. 7, pp. 53–55, 2017.
- [19] J. Martins, "Motores de Combustão Interna (Quinta Edição, revista e aumentada)," in *Motores de Combustão Interna*, 2016, pp. 122–125.
- [20] N. Vorwort, "Nationales Vorwort Nationaler Anhang NA (informativ)," no. 2, 2000.
- [21] Guilherme Botelho Simões, "Estudo Exploratório do processo de soldadura por fricção," Universidade do Minho, 2018.
- [22] S. Indumathi, G. Rajyalakshmi, and K. Rajasekhar, "Experimental Investigations on Friction Stir Spot Welding Process of Dissimilar Metals," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 12056–12061, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.180.
- [23] KUKA, "KUKA Genius." [Online]. Available: <https://www.kuka.com/pt-pt/produtos-serviços/máquinas-de-fabricação/máquinas-de-solda-por-fricção-rotativa/genius>. [Accessed: 23-Nov-2019].
- [24] B. Singaravel and T. Selvaraj, "Application of Taguchi Method for Optimization of Parameters in Turning Operation," *J. Manuf. Sci. Prod.*, vol. 16, no. 3, 2016, doi: 10.1515/jmsp-2016-0004.
- [25] P. V. Koushik and D. Avinash, "Experimental Investigations of Friction Welding Using Aluminum With Mild Steel," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 12, pp. 680–685, 2016.
- [26] R. Bayindir and H. Ates, "Comparison of the constructed control methods for a friction-welding machine," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 20, no. 2, pp. 131–146, 2005, doi: 10.1081/AMP-200041826.
- [27] N. R. J. Hynes, J. A. J. Sujana, and P. Nagaraj, "Controller for friction stud welding machine," *2013 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain. ICEETS 2013*, pp. 879–882, 2013, doi: 10.1109/ICEETS.2013.6533502.
- [28] Brembo Brakes, "1.1 Types of Breaking Systems," 2013. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=VdKqwZCWrdk>. [Accessed: 20-Dec-2019].

ANEXO I – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ENGENHO DE FURAR

ENGENHO DE FURAR		U.M. 83/84		
TIPO: VERTICAL	MODELO: FG 2	Nº-FABRICO:	CONSTRUCTOR: EFI	
CAPACIDADE DE FURAÇÃO (mm)				
AÇO	30			
FERRO FUNDIDO	30			
PRESSÃO MÁXIMA DE FURAÇÃO (Kg)				
PROFUNDIDADE MÁXIMA DE FURAÇÃO (mm)	170			
CABEÇOTE				
GAMA DE VELOCIDADES (r.p.m.)				
80	112	315	500	1100
160	224	630	710	2800
GAMA DE AVANÇOS (mm/rot.)				
RAIO DA ÁRVORE (mm)				
DISTANCIA DA ÁRVORE A (mm)	MÁX.	MIN.		
COLUNA	315	--		
MESA	720	--		
BASE	1 310	1 045		
CONE MORSE	3			
UNIDADES MOTRIZES				
MOVIMENTO DE CORTE		MESA	<input checked="" type="checkbox"/>	
POTENCIA (cv)	1,3/1,9	DIMENSÕES (mm): 410 x 410		
TRANSMISSÃO	Engrenagem	DIMENSÕES RASGOS T (mm) A: B: C:	<input checked="" type="checkbox"/>	
ELEVAÇÃO DO BRAÇO RADIAL		MESA DE COORDENADAS	<input checked="" type="checkbox"/>	
POTENCIA (cv)		DIMENSÕES (mm) 160 x 460		
TRANSMISSÃO		DIMENSÕES RASGOS T (mm) A: B: C:	<input type="checkbox"/>	
DIMENSÕES DA MÁQUINA (mm)		MESA EM CANTONEIRA	<input type="checkbox"/>	
ALTURA TOTAL	1 910	DIMENSÕES (mm)		
LARGURA	410	DIMENSÕES RASGOS T (mm) A: B: C:	<input type="checkbox"/>	
COMPRIMENTO	655	DISPOSITIVO DE ATARRAXAR	<input type="checkbox"/>	
MESA	410 x 410	AVANÇO MECANICO	<input type="checkbox"/>	
BASE	410 x 655	BRAÇO GIRATORIO	<input checked="" type="checkbox"/>	
DIAMETRO DA COLUNA	140	DISJUNTOR RELÉS TÉRMICO	<input type="checkbox"/>	
PESO (Kg)	356	INVERSAO DE MARCHA POR PEDAL	<input checked="" type="checkbox"/>	
ACESSÓRIOS		CASQUILHOS CONICOS MORSE 1, 2, 3	<input type="checkbox"/>	
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	<input checked="" type="checkbox"/>	PRENSA	<input checked="" type="checkbox"/>	
POTENCIA (cv)		DIST. MAX. ENTRE MORDENTES (mm) 100		
TIPO DE BOMBA	Directo	PRENSA ARTICULADA	<input checked="" type="checkbox"/>	
		DIST. MAX. ENTRE MORDENTES (mm) 75		
		BUCHA 2 GRAMPOS	<input type="checkbox"/>	
		BUCHA 3 GRAMPOS	<input type="checkbox"/>	
FICHA DE CARACTERÍSTICAS				

ANEXO II – DADOS TÉCNICOS DA MÁQUINA REBARBADORA

4. Dados técnicos

Tensão de rede:	230 V ~ 50 Hz
Potência absorvida:	2000 W
Rotações em vazio:	6.000 min ⁻¹
Máx. Ø do disco:	230 mm
Rosca do fuso de encaixe:	M14
Classe de protecção:	II / □
Peso:	4,7 kg

Ruído e vibração

Os valores de ruído e de vibração foram apurados de acordo com a EN 60745.

Nível de pressão acústica L_{pA}	87,8 dB(A)
Incerteza K_{pA}	3 dB
Nível de potência acústica L_{WA}	98,8 dB(A)
Incerteza K_{WA}	3 dB

Use uma protecção auditiva.

O ruído pode provocar danos auditivos.

Valores totais de vibração (soma vectorial de três direcções) apurados de acordo com a EN 60745.

Punho:

Valor de emissão de vibração $a_{hAG} = 5,3 \text{ m/s}^2$
Incerteza $K = 1,5 \text{ m/s}^2$

Aviso!

O valor de emissão de vibração indicado foi medido segundo um método de ensaio normalizado, podendo, consoante o tipo de utilização da ferramenta eléctrica, sofrer alterações e em casos excepcionais ultrapassar o valor indicado.

O valor de emissão de vibração indicado pode ser comparado com o de uma outra ferramenta eléctrica.

O valor de emissão de vibração indicado também pode ser utilizado para um cálculo prévio de limitações.

Reduza a produção de ruído e de vibração para o mínimo!

- Utilize apenas aparelhos em bom estado.
- Limpe e faça a manutenção do aparelho re-

- Desligue o aparelho, quando este não estiver a ser utilizado.
- Use luvas.

Cuidado!

Riscos residuais

Mesmo quando esta ferramenta eléctrica é utilizada adequadamente, existem sempre riscos residuais. Dependendo do formato e do modelo desta ferramenta eléctrica podem ocorrer os seguintes perigos:

1. Lesões pulmonares, caso não seja utilizada uma máscara de protecção para pó adequada.
2. Lesões auditivas, caso não seja utilizada uma protecção auditiva adequada.
3. Danos para a saúde resultantes das vibrações na mão e no braço, caso a ferramenta seja utilizada durante um longo período de tempo ou se não for operada e feita a manutenção de forma adequada.

5. Antes da colocação em funcionamento

Antes de ligar a máquina, certifique-se de que os dados constantes da placa de características correspondem aos dados de rede.

Aviso!

Retire sempre a ficha de alimentação da corrente eléctrica antes de efectuar ajustes no aparelho.

5.1 Montagem do punho adicional (figura 2)

- A rebarbadora não pode ser usada sem punho adicional (3).
- O punho adicional pode ser enroscado em três posições (A, B, C).

Lado do aparelho	Adequado para
Esquerda (pos. A / como indicado na figura)	Destro
Direita (pos. B)	Canhoto
Em cima (pos. C)	Utilização dos discos de corte

ANEXO III – IMAGENS MICROSCÓPICAS DO PROVETE

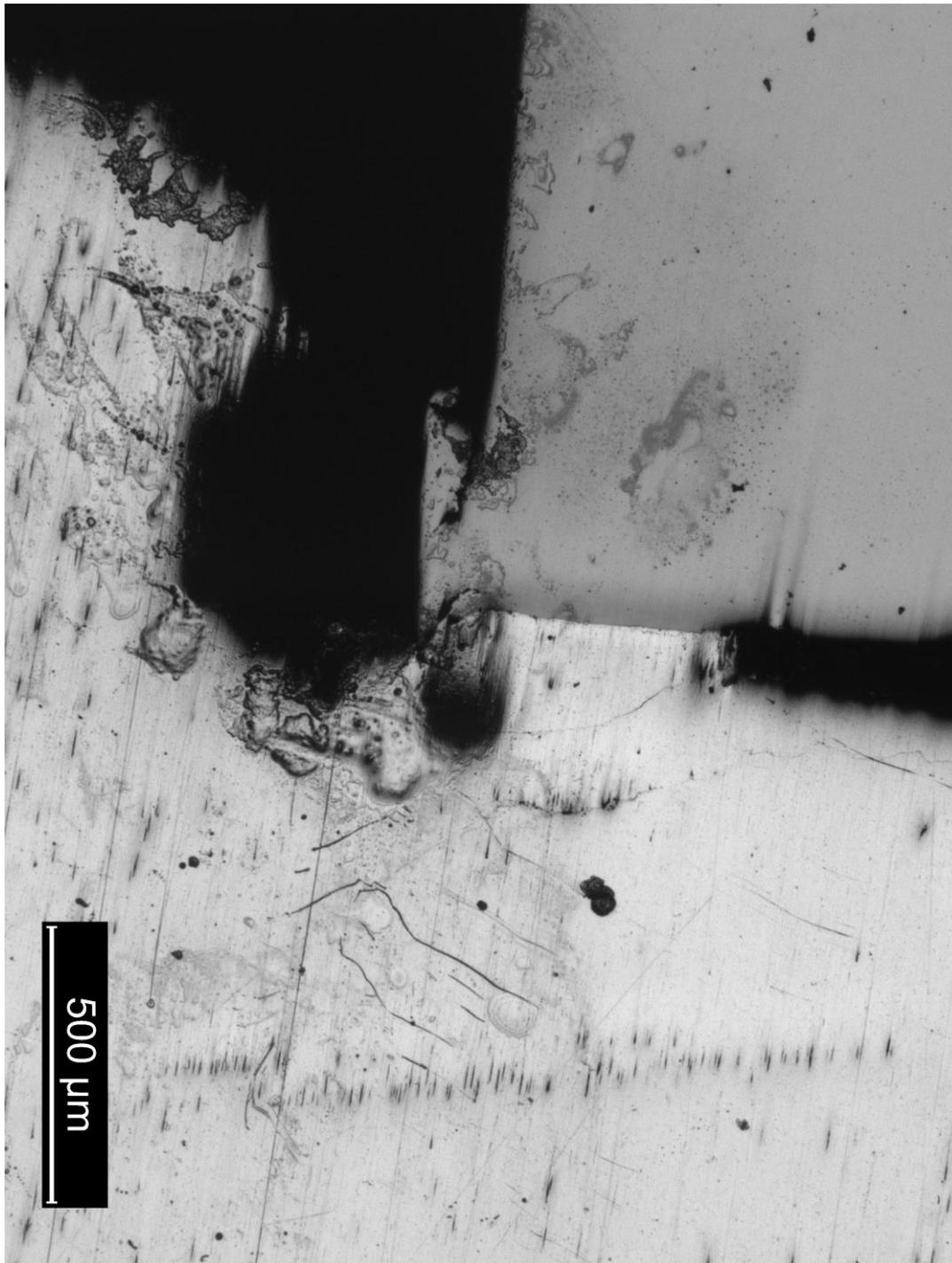


Figura 53 - Zona 1. Imagem microscópica da zona mais à esquerda do provete.

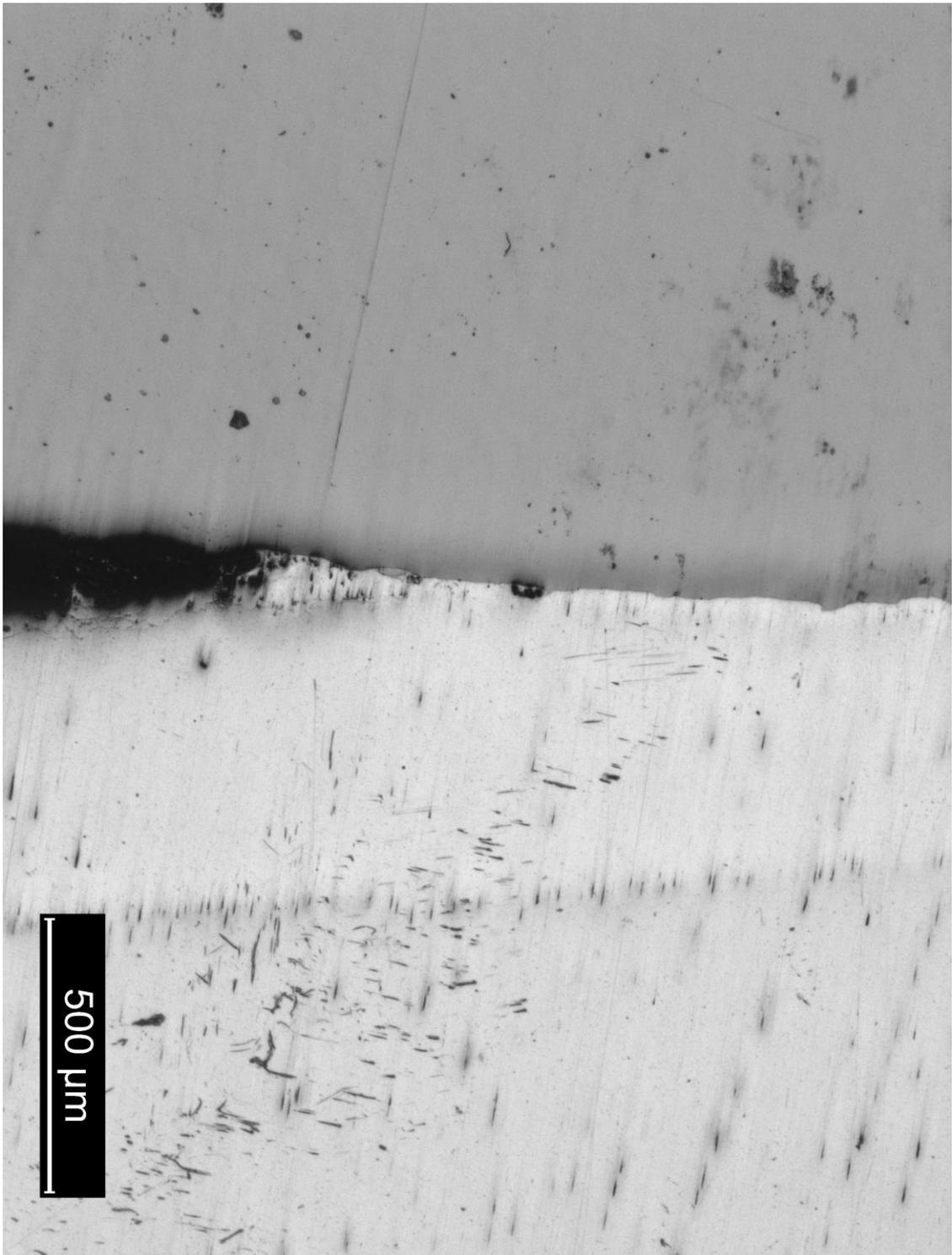


Figura 54 - Zona 2.

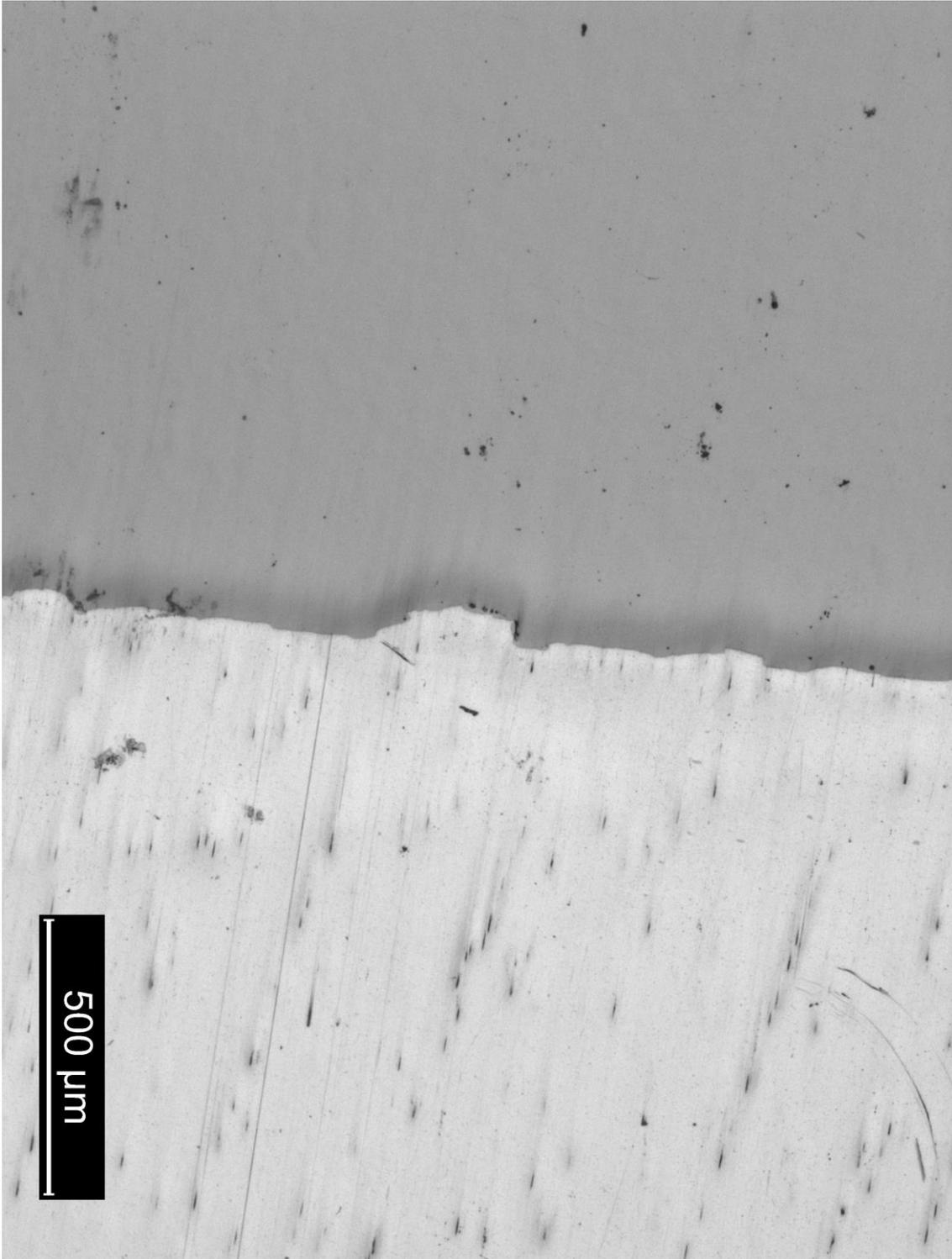


Figura 55 - Zona 3.

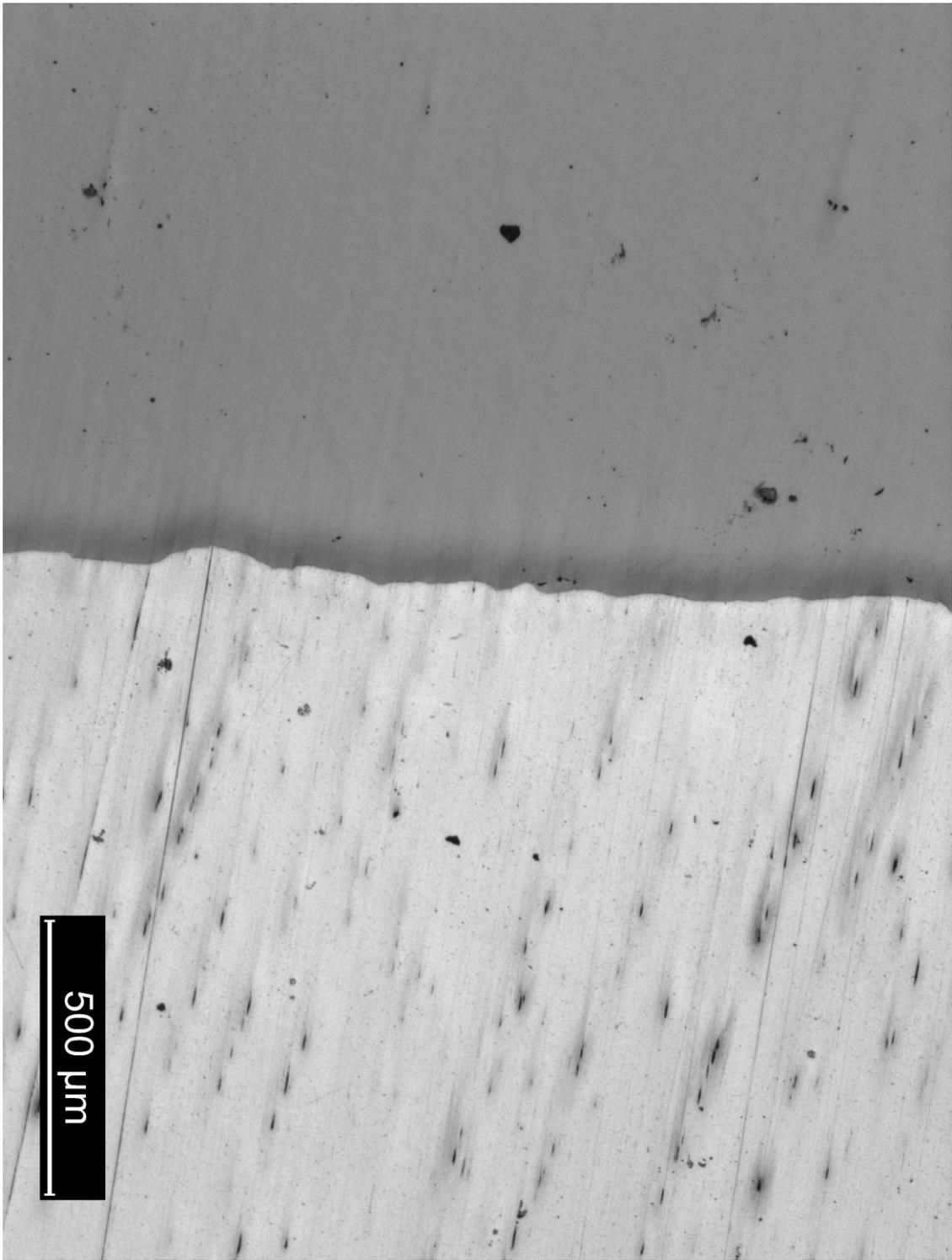


Figura 56 - Zona 4.

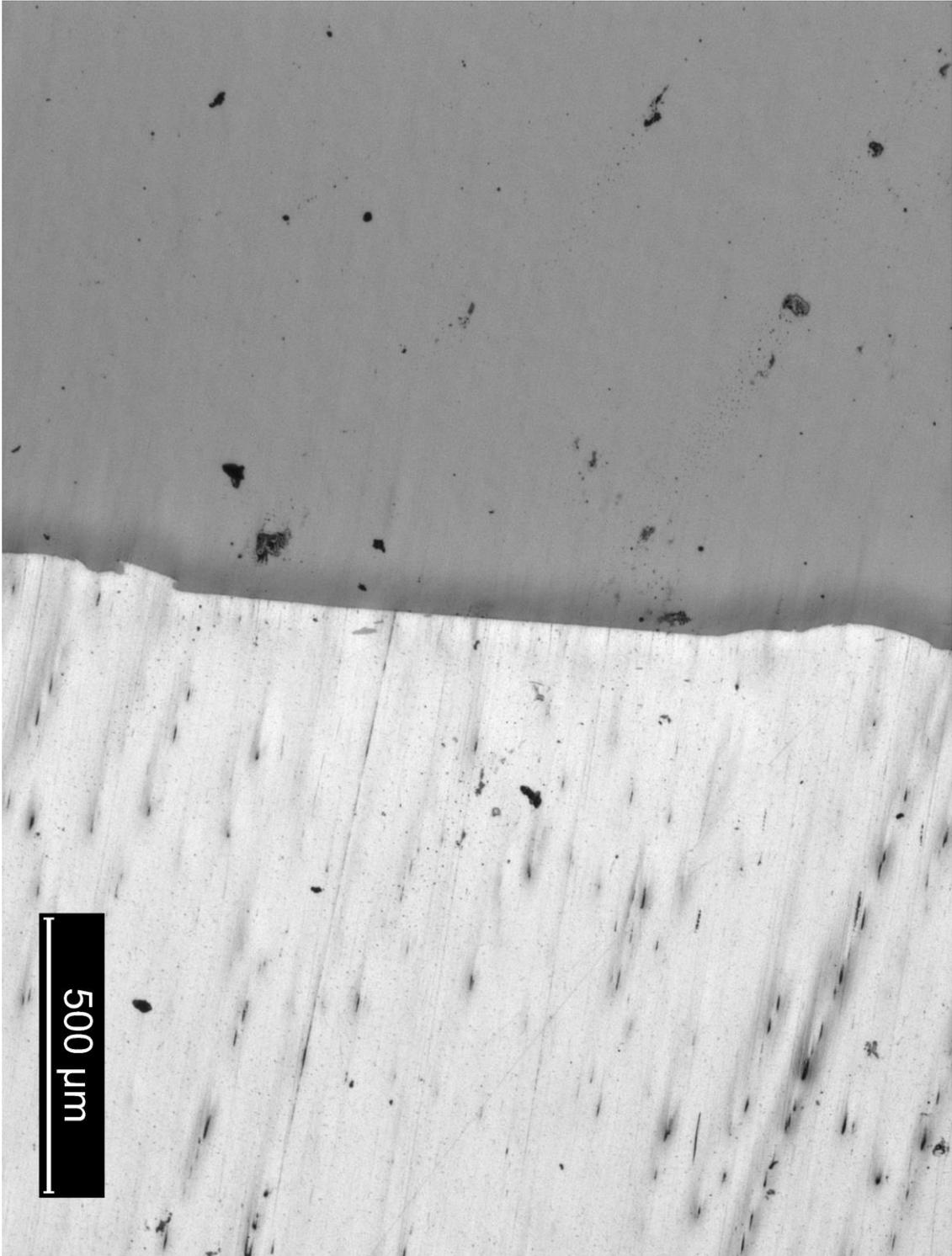


Figura 57 - Zona 5.

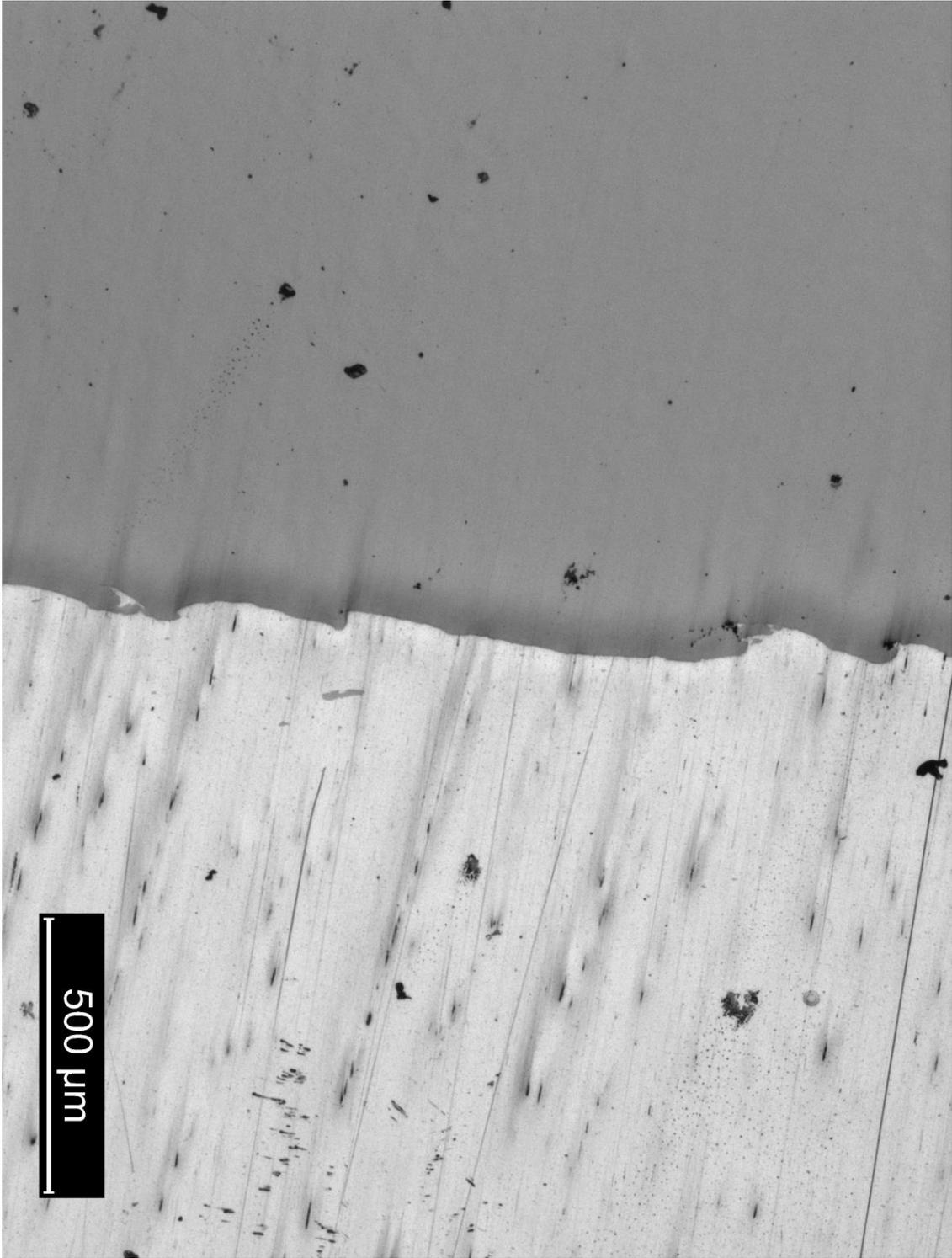


Figura 58 - Zona 6.

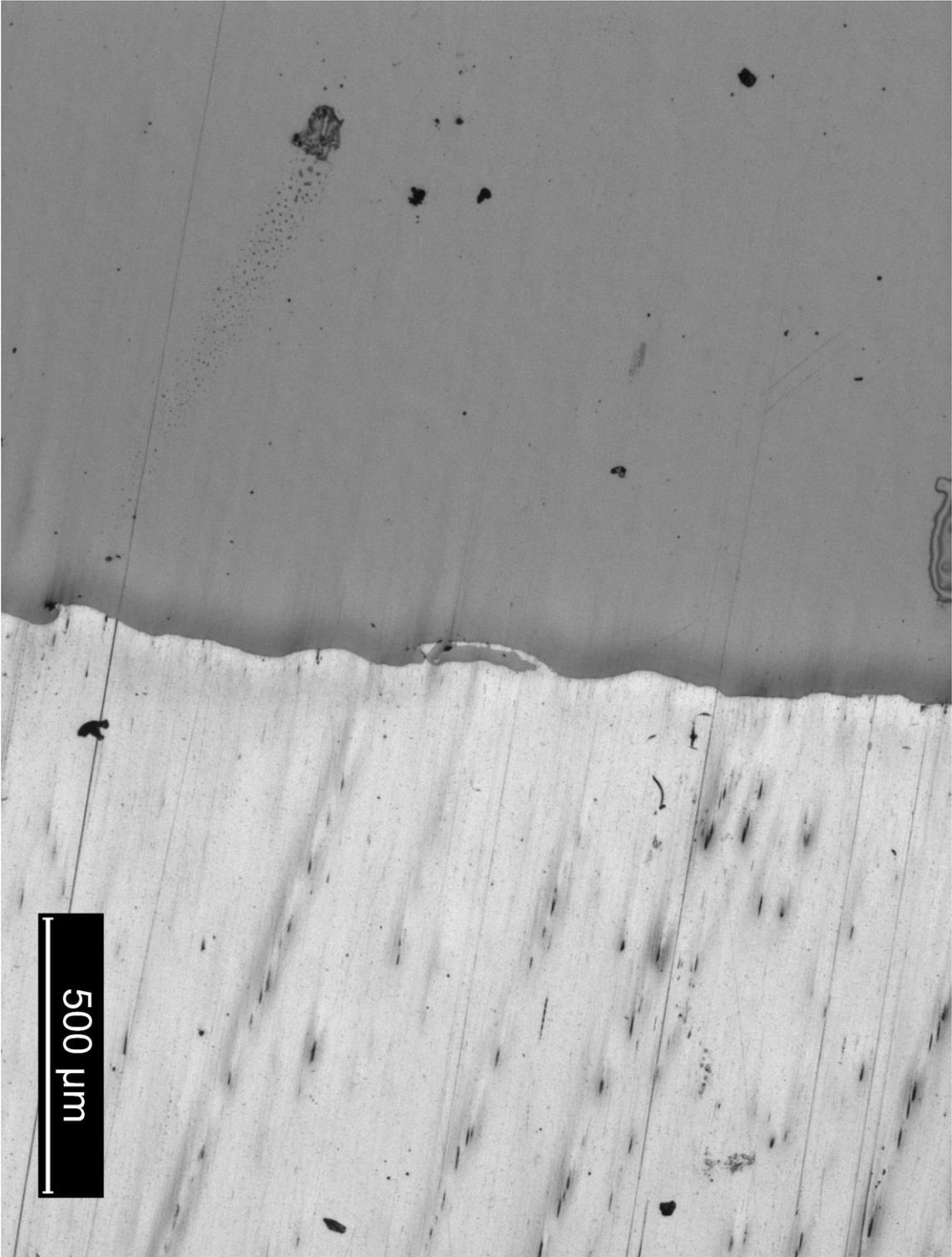


Figura 59 - Zona 7.

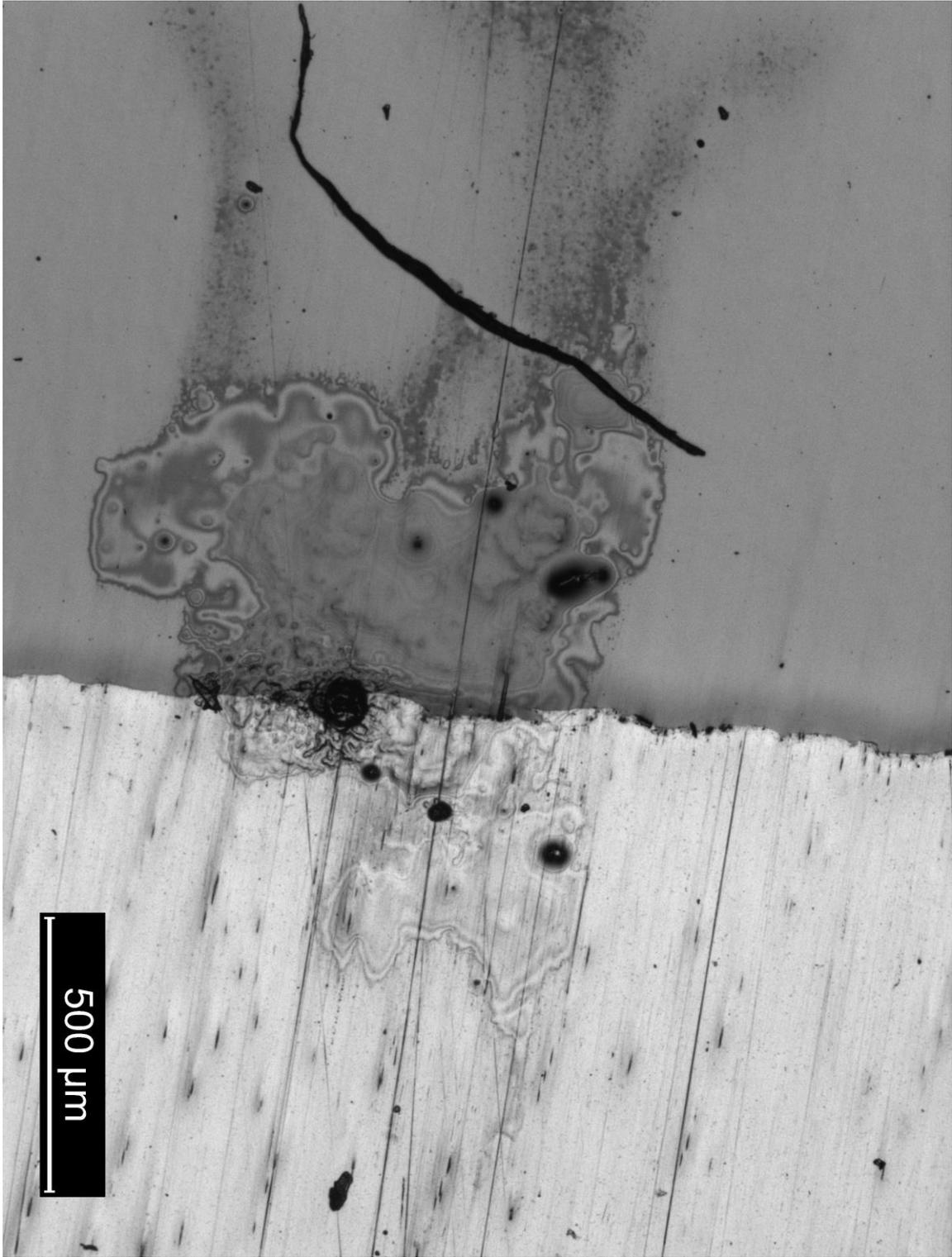


Figura 60 - Zona 8.



Figura 61 - Zona 9.

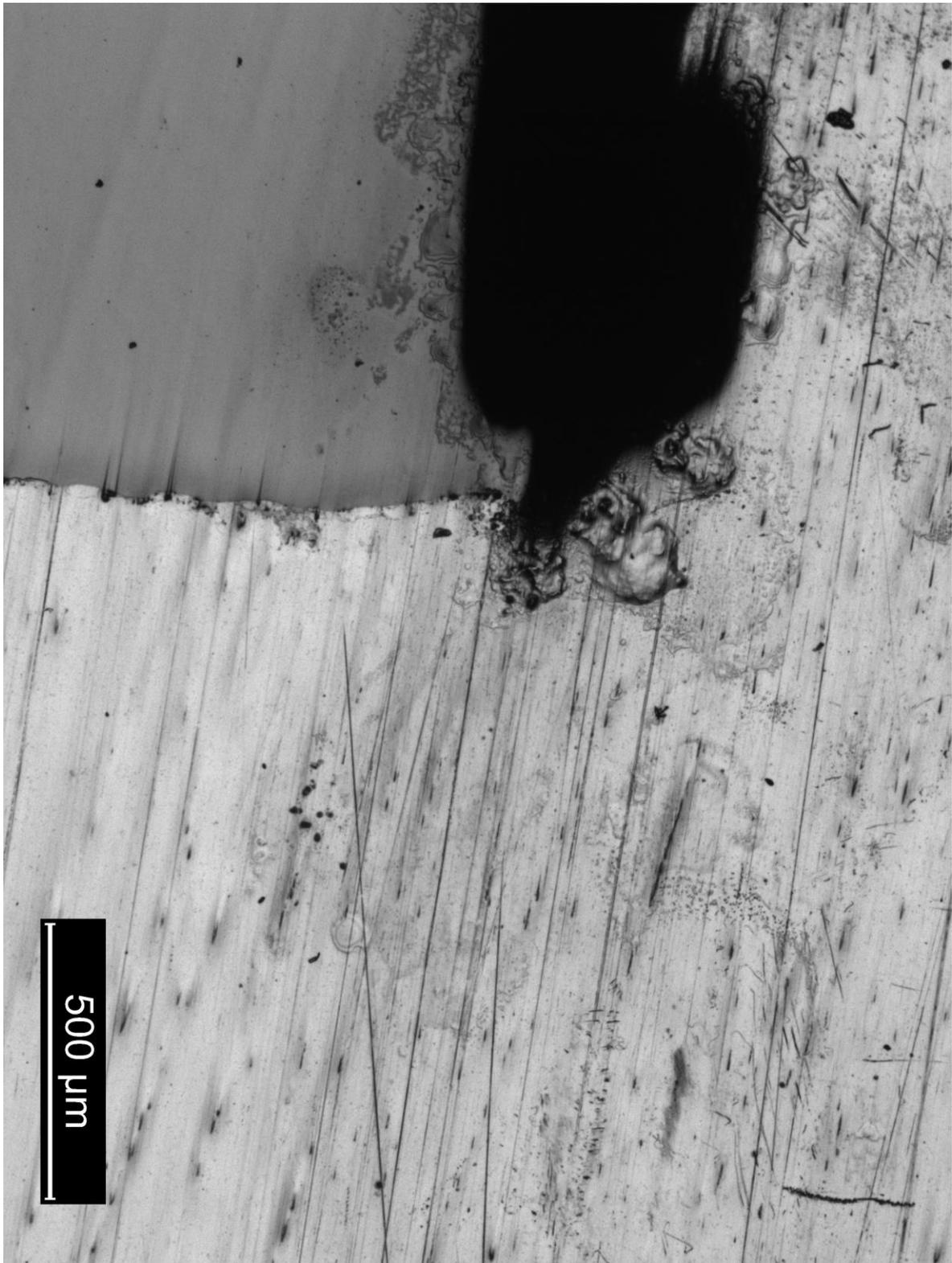


Figura 62 - Zona 10. Imagem microscópica da extremidade direita do provete.