



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Aplicação Industrial de Processos de Soldadura em Estado Sólido: Análise de Viabilidade

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

Autor

Rodrigo Horácio Rodrigues Rojas

Orientadora

Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues

Júri

Presidente	Professor Doutor Cristóvão Silva Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Orientadora	Professor Doutor Dulce Maria Esteves Rodrigues Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2014

Os trabalhos escolares são provas para o carácter, não para a inteligência. Quer se trate de ortografia, de poesia ou de cálculo, está sempre em causa aprender a querer.

Alain, em *Les Idées et les Âges*, 1927.

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento. A senhora doutora Dulce Rodrigues, por todo o apoio científico e académico, na sua nobre tarefa como orientadora. Os seus conselhos, dicas e críticas construtivas, foram sempre uma mais-valia para o trabalho desenvolvido, o meu muito OBRIGADA.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional durante estes anos, nos momentos bons e maus, e por me proporcionarem a melhor educação possível. A minha eterna GRATIDÃO.

A Vanessa Magalhães, por ser o meu porto seguro, a minha alavanca nos momentos maus e o meu maior catalisador nos momentos de alegria. Obrigada pela ajuda, apoio, dedicação, não só na realização deste estudo, mas também ao longo do meu percurso académico.

Agradeço os meus restantes familiares, que torceram sempre por mim e me incentivaram para ser cada vez melhor.

A todos os professores que durante o meu percurso académico, transmitiram com louvor os seus ensinamentos, e que sem eles, nada disto tinha sido possível.

Aos meus caros colegas, pelos momentos inesquecíveis que partilhamos.

A todos os meus mais sinceros agradecimentos.

Resumo

Nesta tese realiza-se uma análise técnico-económica das tecnologias *Friction Stir Welding* (FSW) e *Resistance Seam Welding* (RSEW), na ligação homogénea de chapas de alumínio e aço. De forma a atingir os objetivos propostos, na vertente da viabilidade técnica, serão apresentadas as diversas características dos processos, nomeadamente, as suas vantagens, limitações, tipos de juntas, aplicações industriais, soldabilidade dos materiais e interesse em termos científicos.

Na vertente económica, foi aplicado um modelo de custeio económico quantitativo, de natureza analítica, denominado *Breakdown Approach*. Com base neste modelo, foi obtido, para cada uma das tecnologias, o custo económico por metro de soldadura, durante e após o período de amortização dos equipamentos de soldadura, foi ainda realizada uma análise cuidada da distribuição de custos em função dos parâmetros que afetam o custo final da soldadura, sendo estes, a velocidade da soldadura, a potência do equipamento, a vida útil da ferramenta, o tempo de *handling* e o volume de produção.

A aplicação do modelo de custeio *Breakdown Approach* permitiu concluir que a tecnologia FSW apresenta um custo por metro de soldadura inferior, durante, e após o tempo de amortização do equipamento, para a ligação de ambos os materiais em estudo, comparativamente à tecnologia RSEW. Através da análise da distribuição de custos concluiu-se que as componentes com maior influência no custo por metro de soldadura são os custos laborais e os custos de investimento, exceto na soldadura de alumínio com a tecnologia RSEW. Com efeito, para esta tecnologia determinou-se que os custos energéticos são os que apresentaram maior peso no custo final da soldadura.

Relativamente à análise da influência dos parâmetros no custo final da soldadura, conclui-se que o tempo de *handling* e o volume de produção são os parâmetros mais influentes, havendo sempre a necessidade de minorar tanto quanto possível o tempo de *handling* e só aplicar a tecnologia quando a utilização dos equipamentos prevista seja elevada. A vida útil da ferramenta, a velocidade de soldadura e a potência do equipamento não apresentam grande influência no custo económico da soldadura, com exceção da

soldadura de alumínio, através da tecnologia RSEW, onde a potência apresenta um peso significativo no custo final da soldadura.

Com base no custo económico e nas potencialidades técnicas que a tecnologia FSW apresenta, concluiu-se que, para a aplicação em causa, esta é uma melhor solução, comparativamente à tecnologia RSEW.

Palavras-chave: *Friction Stir Welding*, Soldadura por Roletes, Modelo de Custeio, *Breakdown Approach*, Custo Económico da Soldadura, Componentes do Custo.

Abstract

In this thesis is carried out a technical-economic analysis of the technologies Friction Stir Welding (FSW) and Resistance Seam Welding (RSEW) on the welding of aluminum and steel thin sheets. In order to achieve the objective, an analytical quantitative economic costing model, called Breakdown Approach, was applied. Based on the model, the economic cost, per meter of welding, was obtained, during and after the amortization period, as well as an analysis of costs distribution. It is also analyzed the most important parameters affecting the final welding cost, such as the welding speed, the power of the equipment, the life of the tool, the handling time and the production volume.

The application of the Breakdown Approach model enabled to conclude that, for the application under study, the FSW technology offers a lower cost per meter of welding, during, and after, the equipment amortization period, compared to RSEW technology. The analysis of the cost distribution enabled to conclude that the most influential components were the labor costs and the investment costs, which are only surpassed in RESW aluminum welding, where energy costs were those with greater weight in the final cost of the weld.

Regarding the analysis of the influence of the cost parameters on the final cost of welding, the main conclusion is that the handling time and the production volume are the most influential parameters, being advisable to reduce the handling time and maximize equipment usage. It was also concluded that the tool life and the welding speed don't have a great influence on the welding costs. However, the weight of the power, in the final cost of welding by RSEW in aluminum, was high.

Based on the economic cost analysis and on the technical potential, it can be concluded that the FSW technology is a better solution for the envisaged application than the RSEW technology.

Keywords Friction Stir Welding, Resistance Seam Welding, Cost Estimation Model, Breakdown Approach, Economic Cost of Welding, Cost Component.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA	3
2.1. Soldadura por <i>Friction Stir Welding</i> (FSW).....	3
2.1.1. Descrição do processo	3
2.1.2. Tipos de Juntas	4
2.1.3. Materiais de base (MB)	5
2.1.4. Vantagens e Limitações.....	6
2.1.5. Campos de aplicação	8
2.1.5.1. Indústria Naval	9
2.1.5.2. Indústria automóvel.....	11
2.1.5.3. Indústria aeroespacial	14
2.1.5.4. Indústria ferroviária.....	15
2.1.5.5. Outras Aplicações	16
2.2. Soldadura por Resistência Elétrica	17
2.2.1. Soldadura de resistência por roletes (RSEW).....	19
2.2.1.1. Tipo de junta.....	20
2.2.1.2. Materiais de base (MB)	21
2.2.1.3. Vantagens e limitações.....	22
2.2.1.4. Campos de aplicação	23
3. MODELOS DE CUSTEIO.....	25
3.1. Modelo de custos Breakdown Approach	27
4. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÓMICA.....	29
4.1. Análise do custo por metro de soldadura.....	32
4.1.1. Processo de soldadura por FSW	32
4.1.1.1. Soldadura de aço	32
4.1.1.2. Soldadura de alumínio.....	35
4.1.2. Processo de soldadura por RSEW	37
4.1.2.1. Soldadura de aço	37
4.1.2.2. Soldadura em alumínio.....	40
4.2. Evolução do custo por metro de soldadura	42

4.2.1.	Soldadura de aço	42
4.2.1.1.	Velocidade da soldadura	42
4.2.1.2.	Potência do equipamento	43
4.2.1.3.	Vida útil da ferramenta	44
4.2.1.4.	Tempo de <i>handling</i>	45
4.2.1.5.	Volume de produção	45
4.2.2.	Soldadura de alumínio.....	46
4.2.2.1.	Velocidade de soldadura	46
4.2.2.2.	Potência do equipamento	47
4.2.2.3.	Vida útil da ferramenta	48
4.2.2.4.	Tempo de <i>handling</i>	48
4.2.2.5.	Volume de produção	49
5.	ANÁLISE DE VIABILIDADE	51
6.	CONCLUSÕES.....	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquemática do processo FSW [1].....	4
Figura 2.2. Tipo de Juntas Utilizadas no Processo FSW: (a) junta topo-a-topo, (b) junta topo-a-topo a 90°, (c) junta topo-a-topo em T tripartida, (d) juntas sobrepostas, (e) junta sobrepostas múltiplas, (f) junta topo-a-topo em T bipartida, (g) junta topo-a-topo em angulo. [4]	5
Figura 2.3. Licenças emitidas pelo TWI ao longo do tempo [13].....	8
Figura 2.4. Número de estudos de investigação realizados para a tecnologia FSW, desde 1994 até 2012	9
Figura 2.5. Painel soldado por FSW para câmaras de congelação em barcos pesqueiros [11]	10
Figura 2.6. Pré-fabricados em alumínio utilizados em plataformas petrolíferas [11]	10
Figura 2.7. Adaptação da tecnologia FSW por parte da Donovan Group [11]	11
Figura 2.8. Componentes da indústria automóvel soldados na atualidade por FSW [14]... ..	12
Figura 2.9. Painel central em Tailored Blanks para o Audi R8 [11]	12
Figura 2.10. Porta traseira do Mazda RX8 soldada por FSW [11].....	13
Figura 2.11. Sistema de reboque desenvolvida pela Fontaine Trailer [11]	14
Figura 2.12. Soldadura realizada por FSW para aeronave Eclipse 500 [11].....	15
Figura 2.13. Painéis do A-Trains sendo soldados por FSW [11]	16
Figura 2.14. Esquemática gráfica da soldadura por pontos (RSW) [16].	17
Figura 2.15. Esquemática gráfica da soldadura por bossa (RPW) [20].	18
Figura 2.16. Esquemática gráfica da soldadura de topo por resistência (UW) [17].	18
Figura 2.17. Esquemática gráfica da soldadura por roletes (RSEW) [20].....	19
Figura 2.18. Tipos de juntas utilizadas na soldadura por roletes (RSEW): A-Junta sobreposta, B- Junta topo-a-topo, C-Juntas sobreposta por esmagamento. [17]... ..	21
Figura 2.19. Evolução dos estudos realizados para resistência por roletes (RSEW) e resistência por pontos (RSW).....	23
Figura 3.1. Modelos de custeio presentes na literatura	25
Figura 4.1. Aplicação do modelo económico Breakdown Approach	29
Figura 4.2. Distribuição dos custos associados ao cálculo do custo por metro soldadura durante o período de amortização a tecnologia FSW aplicada em aço.	34
Figura 4.3. Distribuição dos custos associados ao cálculo do custo por metro de soldadura após o período de amortização para a tecnologia FSW aplicada em aço.....	34

Figura 4.4 Distribuição dos custos associados ao cálculo económico por metro de soldadura durante o período de amortização a tecnologia FSW aplicada em alumínio.	36
Figura 4.5 Distribuição dos custos associados ao cálculo por metro de soldadura após o período de amortização para a tecnologia FSW aplicada em alumínio.	37
Figura 4.6 Distribuição dos custos associados ao cálculo por metro de soldadura durante o período de amortização para a tecnologia RSEW aplicada em aço.	39
Figura 4.7 Distribuição dos custos associados ao cálculo por metro de soldadura durante o período de amortização para a tecnologia RSEW aplicada em alumínio.	39
Figura 4.8 Distribuição dos custos associados ao custo por metro de soldadura durante o período de amortização.	41
Figura 4.9 Distribuição dos custos associados ao cálculo económico da soldadura durante o período de amortização.	42
Figura 4.10 Influência da velocidade de soldadura no custo por metro de soldadura aplicado em aço.	43
Figura 4.11 Influência da potência no custo por metro de soldadura aplicado em aço.	44
Figura 4.12 Influência da vida útil da ferramenta no custo por metro de soldadura aplicado em aço.	44
Figura 4.13 Influência do tempo de handling no custo por metro de soldadura aplicado em aço.	45
Figura 4.14 Influência do volume de produção no custo por metro de soldadura aplicado em aço.	46
Figura 4.15 Influência da velocidade de soldadura no custo por metro de soldadura aplicado em alumínio.	47
Figura 4.16 Influência da potência do equipamento no custo por metro de soldadura aplicado em alumínio.	47
Figura 4.17 Influência da vida útil da ferramenta de no custo por metro de soldadura aplicado em alumínio.	48
Figura 4.18 Influência do tempo de handling no custo económico da soldadura aplicado em alumínio.	49
Figura 4.19 Influência do tempo do volume de produção no custo económico da soldadura aplicado em alumínio.	50
Figura 5.1 Análise técnico-económica das tecnologias FSW e RSEW.	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Parâmetros envolvidos no cálculo do custo por metro de soldadura de chapas de aço por FSW.	33
Tabela 4.2. Custo por metro de soldadura durante e após o período de amortização para a tecnologia FSW aplicada em aço.	33
Tabela 4.3. Parâmetros envolvidos no cálculo do custo por metro de soldadura de chapas de alumínio por FSW.	35
Tabela 4.4. Cálculo do custo por metro de soldadura durante e após o período de amortização para a tecnologia FSW aplicada em alumínio.	36
Tabela 4.5. Parâmetros envolvidos no cálculo do custo económico da soldadura de chapas de aço por RSEW.	38
Tabela 4.6. Cálculo do custo por metro de soldadura durante e após o período de amortização para a tecnologia RSEW.	38
Tabela 4.7. Parâmetros envolvidos no cálculo do custo por metro de soldadura de chapas de alumínio por RSEW.	40
Tabela 4.8. Cálculo por metro de soldadura durante e após o período de amortização para a tecnologia RSEW aplicada em alumínio.	41

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Cms – Custo por metro de soldadura

Ceq – Custo de investimento

Cen – Custo energéticos

Cfe – Custo da ferramenta

Clab – Custos laborais

Cma – Custos de manutenção

Inv – Investimento

Pa – Período de amortização

Msa – Metros de soldadura realizados por ano

Pd – Número de peças produzidas por dia

Da – Dias de trabalho por ano

Nps – Número de passes de soldadura

Pot – Potência do equipamento

Tesm – Tempo efetivo de soldadura

Ce – Tarifa da energia

Efi – Eficiência elétrica do equipamento

Pc – Potência contratada

Tc – Tarifa da potência contratada

Thp – Tarifa da potência em hora de ponta

Cf – Custo de aquisição unitário da ferramenta

Vu – Vida útil da ferramenta

Ord – Ordenado mensal por operário

Nord – Ordenados pagos pela entidade empregadora

Nop – Operários afetos à operação

Siglas

FSW – *Friction Stir Welding*

TWI – *The Welding Institute*

RSEW – *Resistance Seam Welding*

RW – *Resistance Welding*

RPW – *Resistance Projection Welding*

RSW – *Resistance Spot Welding*

UW – *Upset Welding*

MB - Material de Base

1. INTRODUÇÃO

Tal como o nome da tese indica, este trabalho consistiu em realizar um estudo comparativo entre tecnologias de soldadura em estado sólido tecnologia *Friction Stir Welding* (FSW), e a tecnologia *Resistance Seam Welding* (RSEW). O objetivo desta dissertação reside em determinar, com base numa análise técnico-económica, para a ligação de chapas longas, com 1 mm de espessura, em alumínio ou aço, destinadas à construção de painéis, pela empresa Coolheaven.

Nesta dissertação, numa primeira fase, será apresentada uma abordagem teórica para ambas as tecnologias, sendo abordada a soldabilidade dos materiais de base, os tipos de juntas com que as tecnologias operam, as suas aplicações industriais mais importantes e o interesse científico que estas apresentam. A principal razão desta abordagem, será determinar a viabilidade técnica das tecnologias em estudo. Seguidamente serão apresentados os modelos de custeio identificados na literatura, os quais podem ser classificados como quantitativos ou qualitativos. O modelo escolhido, para efetuar a análise de custo pretendida, foi o modelo *Breakdown Approach* de natureza quantitativa, uma vez que é o que apresenta melhores características, para o cálculo do custo por metro de soldadura.

Nos últimos capítulos é realizada a análise de viabilidade económica, através da aplicação do modelo de custeio selecionado, no cálculo do custo por metro de soldadura, durante e após o período de amortização do equipamento. Seguidamente é apresentado um estudo da distribuição de custos, de forma a determinar qual as parcelas do custo total da operação de soldadura com maior influência no custo final da soldadura. Para completar a análise de viabilidade económica, será ainda realizada uma análise detalhada da evolução do custo por metro de soldadura, através da variação dos parâmetros mais importante que afetam os custos. Os parâmetros analisados serão a velocidade de soldadura, a potência dos equipamentos, a vida útil da ferramenta, o tempo de *handling* e o volume de produção.

Finalmente, depois de realizada a análise de viabilidade técnica e a análise de viabilidade económica, será seleccionada a tecnologia que, em termos técnicos, e em termos económicos, representa a melhor solução para a fabricação do painel proposto.

2. ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

Neste capítulo será realizada uma descrição das tecnologias de soldadura *Friction Stir Welding* e *Resistance Welding*, com maior ênfase na vertente *Resistance Seam Welding*, de forma a efetuar uma análise comparativa da viabilidade técnica das duas tecnologias. Neste estudo de viabilidade serão considerados fatores tais como a soldabilidade dos materiais base, os tipos de juntas passíveis de serem soldados por cada processo, as suas vantagens, as suas limitações e respetivo campo de aplicação industrial.

2.1. Soldadura por *Friction Stir Welding* (FSW)

A tecnologia *Friction Stir Welding* foi desenvolvida em 1991, por Wayne Thomas, no *Welding Institute*, sediado em Cambridge no Reino Unido. É um processo de ligação em estado sólido que permite produzir soldaduras com elevada qualidade, alta resistência e baixa distorção.

A soldadura por FSW pode ser aplicada na ligação topo-a-topo ou em juntas sobrepostas, para uma grande variedade de espessuras e materiais [1]. As suas maiores vantagens são a capacidade em soldar materiais normalmente considerados não soldáveis ou dificilmente soldáveis, tal como o alumínio, a não emissão de radiações e gases nocivos para a saúde e a economia de energia inerente ao processo. Embora seja uma tecnologia recente, encontra-se fortemente implementada em diversos sectores industriais, onde permitiu contornar problemas típicos, dos processos de soldadura por fusão [1].

2.1.1. Descrição do processo

O conceito básico da tecnologia FSW é muito simples. Como se mostra na Figura 2.1, uma ferramenta não consumível constituída por uma base e um pino, animada de rotação, é inserida na linha de interface entre as chapas a unir, sujeita a uma força de compressão axial, e movimentada ao longo dessa linha. A ferramenta tem duas funções principais: aquecer o material de base e movimenta-lo de forma a promover a soldadura. O calor gerado, pela fricção da ferramenta na superfície dos componentes a ligar, amacia o

material de base que rodeia o pino. A combinação entre a rotação e a translação da ferramenta, leva à movimentação do material da parte da frente para a parte de atrás do pino, tendo como resultado uma mistura homogênea, dando assim origem a uma soldadura em estado sólido [10].

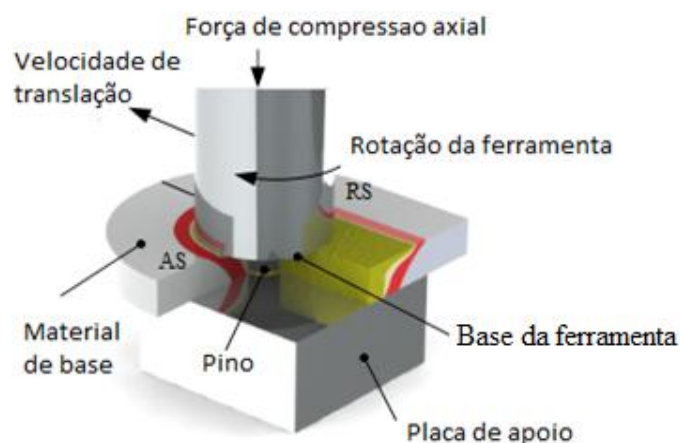


Figura 2.1. Esquemática do processo FSW.

Como se mostra na Figura 2.1 a ferramenta da tecnologia FSW é constituída por uma base e um pino. A escolha adequada de uma ferramenta com a geometria e dimensões certas é importante para assegurar a viabilidade do processo [3].

De forma a obter uma soldadura com as características técnicas desejadas é ainda necessário, a escolha acertada dos parâmetros de soldadura. Os parâmetros mais importantes que influenciam diretamente a qualidade da soldadura são a força de compressão axial, quando a soldadura é realizada em controlo de força, a penetração do pino, quando a soldadura é realizada em controlo de posição, a velocidade de rotação da ferramenta, a velocidade de translação, o ângulo de ataque e a geometria da ferramenta [2].

2.1.2. Tipos de Juntas

As juntas mais utilizadas neste tipo de tecnologia são as juntas topo-a-topo e as juntas sobrepostas. Na Figura 2.2 são apresentados os diversos tipos de configuração de juntas plausíveis de serem soldadas com este processo. Independentemente do tipo de junta, é necessário ter em atenção o sistema de fixação, pois as forças envolvidas no

sistema são elevadas, o que pode provocar a separação das chapas, e conseqüentemente, inviabilizar a soldadura [4].

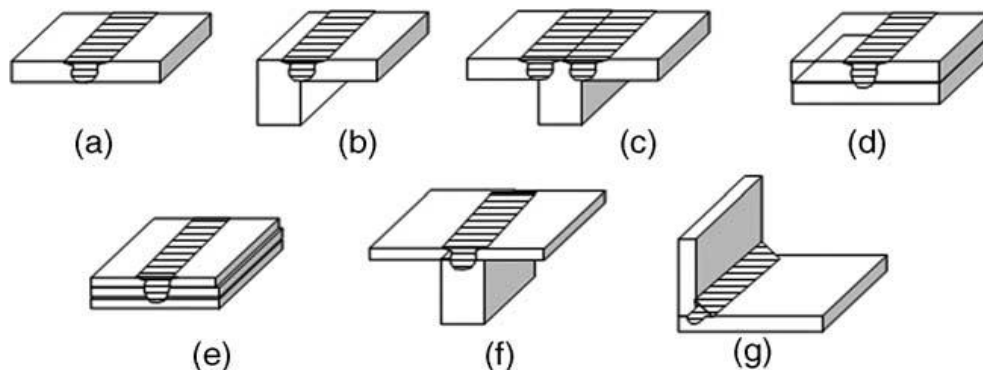


Figura 2.2. Tipo de Juntas Utilizadas no Processo FSW: (a) junta topo-a-topo, (b) junta topo-a-topo a 90°, (c) junta topo-a-topo em T tripartida, (d) juntas sobrepostas, (e) junta sobrepostas múltiplas, (f) junta topo-a-topo em T bipartida, (g) junta topo-a-topo em angulo. [4]

2.1.3. Materiais de base (MB)

Neste item serão analisados os materiais base soldados com sucesso por aplicação da tecnologia FSW, sendo de maior interesse a soldadura de alumínio e de aço. As ligas de alumínio correspondem a 99% das aplicações industriais que utilizam a tecnologia FSW [6]. A aplicação deste processo, permite soldar chapas de 0,5 a 65 mm de espessura, com velocidades que podem ir dos 400 mm/min até aos 2000 mm/min [3]. Embora a tecnologia tenha sido desenvolvida para a soldadura em alumínio, ficou demonstrado que as vantagens associadas à utilização deste processo podem ser transpostas para outros tipos de materiais, tais como aços, ou ligas de titânio, magnésio ou cobre [4]. Teoricamente, a tecnologia FSW poderá ser aplicada em qualquer tipo de material metálico, sendo no entanto necessário garantir a correta seleção dos parâmetros de soldadura e a escolha da ferramenta com composição e geometria ideal.

Para a soldadura de aço ao carbono, a aplicação da tecnologia FSW ainda se encontra em desenvolvimento, devido ao elevado desgaste da ferramenta, causado pelas elevadas temperaturas atingidas durante o processo (superiores a mil graus centígrados) [7]. No entanto, devido às baixas temperaturas a que o MB se encontra sujeito, a soldadura através da tecnologia FSW, permite realizar ligações em aço com baixos níveis de distorção e

excelentes propriedades mecânicas [8]. É de notar que todos os tipos de aços são passíveis de ser soldados por esta tecnologia [6].

Embora as ligas de cobre sejam muito utilizadas em aplicações industriais, este material apresenta uma elevada difusão térmica, que pode ser 10 a 100 vezes superior à do níquel e de alguns aços. Esta propriedade faz com que a soldadura deste material seja de difícil execução, através dos métodos convencionais de soldadura por fusão [9]. Devido às características técnicas da tecnologia FSW, a soldadura de cobre já é bem-sucedida em chapas até 50 mm de espessura [6], embora seja necessário realizar a soldadura com baixa velocidade de translação, de forma a minimizar a dissipação térmica [9].

Em virtude das características deste processo tecnológico, um crescente interesse tem vindo a surgir na indústria automóvel para a soldadura de ligas de magnésio, já que estas ligas apresentam uma baixa densidade, relativamente a outros materiais, reduzindo assim o peso dos automóveis, e consequentemente, o consumo de combustíveis e a emissão de gases com efeito de estufa [6]. Devido ao elevado coeficiente de expansão térmica do magnésio, a escolha da tecnologia FSW revela-se acertada de forma a evitar distorções nas soldaduras. No entanto, estudos realizados demonstraram que é necessário garantir uma elevada velocidade de rotação e uma baixa velocidade de translação para a soldadura apresentar resultados satisfatórios em termos de propriedades mecânicas [9,10].

Devido a baixa condutividade térmica das ligas de titânio, estas são as mais difíceis de soldar através da tecnologia FSW. A baixa condutividade térmica desta liga leva a que o calor gerado na ferramenta seja difícil de dissipar. Ainda, aliado a este fenómeno, a gama de temperaturas para a mistura eficiente deste material é muito estreita, o que dificulta ainda mais o processo. A forma mais utilizada para contornar este problema reside na diminuição do diâmetro da base da ferramenta, de forma a facilitar a diminuir a geração do calor [8,6].

Esta tecnologia também permite soldar com facilidade ligas dissimilares, apresentando boas propriedades mecânicas. A soldadura de ligas dissimilares é um dos grandes trunfos deste processo tecnológico [8].

2.1.4. Vantagens e Limitações

A tecnologia FSW, sendo uma tecnologia de soldadura em estado sólido, apresenta inúmeras vantagens, quer metalúrgicas, quer ambientais e energéticas,

relativamente às tecnologias de soldadura convencionais por fusão, justificando assim a sua utilização. Seguidamente serão enunciadas as vantagens de maior destaque para esta tecnologia.

- A união dos materiais ocorre a temperaturas inferiores à temperatura de fusão, o que leva à isenção de defeitos típicos dos processos de soldadura por fusão e solidificação, tais como a formação de fissuras, porosidades e volatilização de elementos de liga [4].
- Para algumas ligas, as juntas soldadas através da tecnologia FSW apresentam excelentes propriedades mecânicas, nomeadamente, elevada resistência à fadiga e elevada resistência à tração [4].
- Os níveis de distorção são reduzidos [4].
- A preparação de junta desnecessária [4].
- Permite soldar em todas as posições, tornando o processo extremamente versátil [4].
- Permite soldar ligas de alumínio, em variadas espessuras, de difícil soldadura por métodos convencionais [4].
- Não é necessária a aplicação de material de adição, e em apenas algumas situações, é necessária proteção gasosa [4].
- Não gera fumos ou radiações ultravioletas prejudiciais à saúde [4].
- Apresenta uma elevada eficiência energética comparativamente aos processos de soldadura por fusão. [10].
- O processo pode ser automatizado, garantindo elevada robustez, repetibilidade e reprodutibilidade [10].

Embora seja um processo tecnológico com inúmeras vantagens, a tecnologia FSW apresenta também algumas limitações, quer no plano tecnológico, quer no plano económico, que podem inviabilizar ou tornar menos apetecível a sua utilização. Referem-se de seguida algumas destas limitações.

1. Tratando-se de uma tecnologia recente, necessita ainda de algum desenvolvimento para a ligação de materiais com alto ponto de fusão [4].

2. O elevado custo comercial do equipamento e da licença emitida pela TWI, torna a implementação da tecnologia FSW, em pequenas empresas inviável, a menos que o volume de produção, ou a taxa de utilização do equipamento for elevado [6].
3. Devido às enormes forças envolvidas no processo, torna-se necessário um sistema de fixação rígido dos componentes a ligar, de forma a eliminar potenciais danos provocado pelo desalinhamento das peças [4].

2.1.5. Campos de aplicação

Desde a sua invenção em 1991, inúmeras empresas de diferentes partes do mundo têm implementado a tecnologia FSW nos seus processos produtivos, sendo que grande parte das aplicações encontram-se concentradas na indústria de produção de componentes em alumínio para a indústria naval, automóvel, aeroespacial e ferroviária [11]. De referir que a primeira aplicação industrial do processo foi datada no ano 1995. Na Figura 2.3, onde se mostra a evolução do número de licenças emitidas pelo TWI até 2012, conclui-se que o número de licenças emitidas tem vindo a aumentar ao longo dos anos, o que demonstra o elevado interesse que este processo de soldadura tem vindo a despertar, devido às suas múltiplas potencialidades.

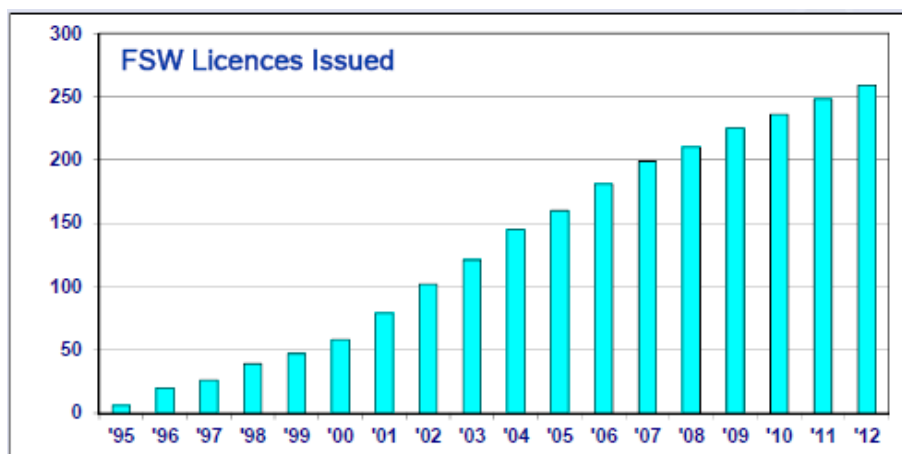


Figura 2.3. Licenças emitidas pelo TWI ao longo do tempo [13].

Embora o número de licenças apresentado na Figura 2.3 tenha vindo a aumentar, o seu número ainda é relativamente reduzido. Isto deve-se não só ao elevado

custo comercial do equipamento, mas também, ao elevado custo da licença emitida pelo TWI. Pequenas e médias empresas têm vindo a adiar o processo de implementação da tecnologia FSW, à espera que a patente principal do TWI expire em 2015. Com efeito, o requerimento da licença, corresponde a uma enorme barreira financeira, que dificulta em termos económicos a implementação do processo [6].

Com o objetivo de evidenciar o interesse científico que tecnologia FSW desperta em investigadores em todas as parte do mundo, foi realizada uma extensa pesquisa sobre os estudos de investigação publicados no Google académico, desde o ano de 1994 até 2014. Com base na informação recolhida, foi elaborada a Figura 2.4, onde é possível concluir, que o número de estudos de investigação realizados é muito vasto, e tem vindo a aumentar substancialmente desde o ano 2004. O elevado interesse científico desta tecnologia, garante o seu contínuo desenvolvimento tecnológico, e desta forma, o aumento do número de aplicações industriais no futuro.

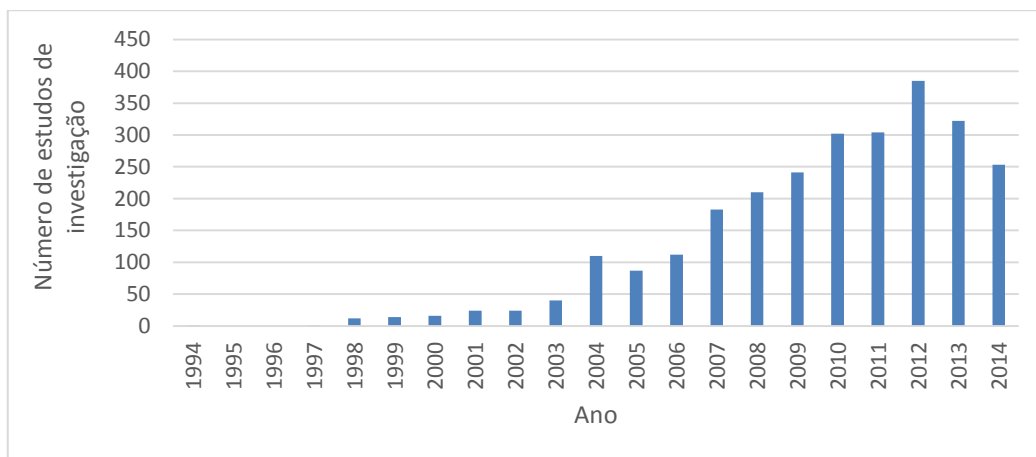


Figura 2.4. Número de estudos de investigação realizados para a tecnologia FSW, desde 1994 até 2012

Seguidamente, neste item, será realizada uma abordagem mais aprofundada sobre as aplicações da tecnologia FSW, numa vasta gama de indústrias.

2.1.5.1. Indústria Naval

A utilização da tecnologia FSW teve a sua primeira aplicação comercial na indústria naval, em 1996, através da empresa Sueca SAPA. Esta empresa adotou a tecnologia FSW, no seu processo produtivo, para a soldadura de painéis de alumínio, com

4,5 mm de espessura, para câmaras de congelação utilizadas em barcos pesqueiros. Na Figura 2.5 é apresentado um exemplo destes painéis [11].

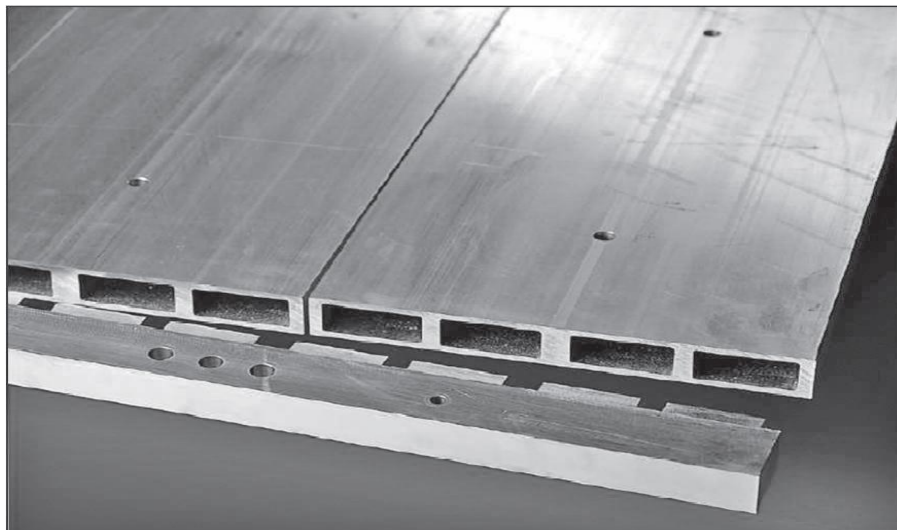


Figura 2.5 Painel soldado por FSW para câmaras de congelação em barcos pesqueiros [11]

Paralelamente, no mesmo ano, a *Marine Aluminium*, situada na Noruega, também adotou a tecnologia FSW para a fabricação dos painéis pré-fabricados, em alumínio, que podem ser vistos na Figura 2.6. Estes painéis são utilizados para a produção de navios e plataformas petrolíferas. A implementação desta tecnologia permitiu ao fabricante reduzir consideravelmente os tempos da montagem dos componentes [11].



Figura 2.6 Pré-fabricados em alumínio utilizados em plataformas petrolíferas [11]

Finalmente, em 2004, a tecnologia FSW começa a ser implementada no Japão, para a soldadura de painéis de alumínio utilizados na construção de cascos de navios. A implementação da tecnologia foi justificada pela elevada resistência mecânica apresentada pela soldadura, a qual garante com satisfação todos requisitos de segurança impostos pela indústria de construção naval [11]. Ainda em 2004, a marinha Australiana, em parceria com a marinha da Nova-Zelândia, apresentou um projeto para a aquisição de um conjunto de navios patrulheiros. O projeto foi adjudicado pela empresa Donovan Group, que teve que alterar o seu processo produtivo, de forma a passar a utilizar máquinas de FSW em larga escala, pois tinha sido estipulado em projeto uma enorme porção de painéis a serem soldados com FSW. Na Figura 2.7 encontra-se representada implementação da tecnologia FSW no processo produtivo da Donovan Group [11].



Figura 2.7. Adaptação da tecnologia FSW por parte da Donovan Group [11]

2.1.5.2. Indústria automóvel

A indústria automóvel fornece um desafio perfeito para a aplicação da tecnologia FSW. Todos os componentes de alumínio dos automóveis são plausíveis de serem soldados com esta tecnologia, desde componentes estruturais a peças do motor. No entanto, apenas é aplicada em peças de pequenas dimensões [3,14]. Na Figura 2.8 estão representados esquematicamente os componentes atualmente soldados por FSW.

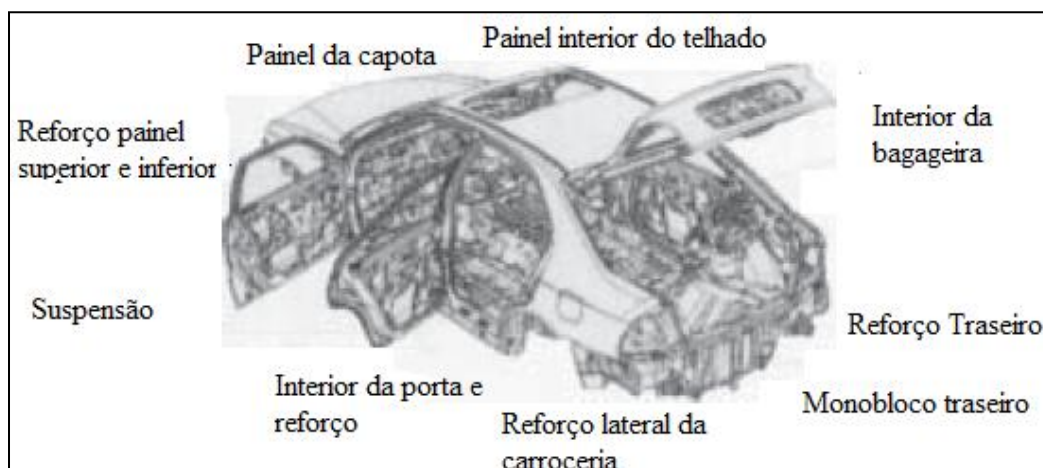


Figura 2.8. Componentes da indústria automóvel soldados na atualidade por FSW [14]

Em 1998 o TWI começou a realizar os primeiros estudos sobre a aplicação da soldadura por FSW em *Tailored Blanks* para a indústria automóvel. Isto serviu de catapulta para a utilização da tecnologia em uma vasta série de componentes em todo o mundo [11]. Devido à excelente resistência à fadiga apresentada pelas soldaduras FSW, a *Tower Automotive*, situada na América, começou a soldar por FSW as ligações das suspensões dos automóveis Lincoln [11]. A empresa de consultoria Alemã *Riftec*, desde 2006, que tem também vindo a oferecer a aplicação da tecnologia FSW para a soldadura de *Tailored Blanks*. A primeira aplicação surgiu na soldadura do Painel central do Audi R8, que se mostra na Figura 2.9. A utilização da tecnologia FSW permitiu uma poupança de 20% no material utilizado, (aproximadamente 1 kg por automóvel) e, conseqüentemente, ganhos económicos importantes [11].

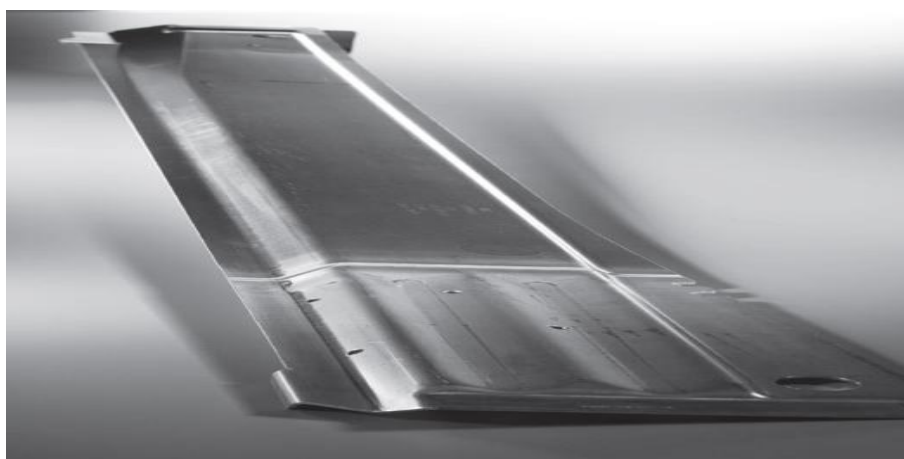


Figura 2.9. Painel central em *Tailored Blanks* para o Audi R8 [11]

Outra aplicação de relevo na indústria automóvel consiste na soldadura de painéis extrudidos, em alumínio, para os assentos desdobráveis dos automóveis Volvo V-70, produzidos pela empresa SAPA [11]. Do mesmo modo, a empresa Norte-americana Ford utiliza a tecnologia FSW para a soldadura do túnel central do seu modelo Ford GT. A soldadura deste componente permitiu um aumento da rigidez do chassis. Finalmente, a empresa Mazda no Japão utiliza a soldadura por FSW para unir as portas traseiras e parte do chassis do modelo RX8, conforme apresentado na Figura 2.10. A aplicação da tecnologia permitiu uma redução significativa dos custos de energia em relação à soldadura por pontos utilizada anteriormente [11].

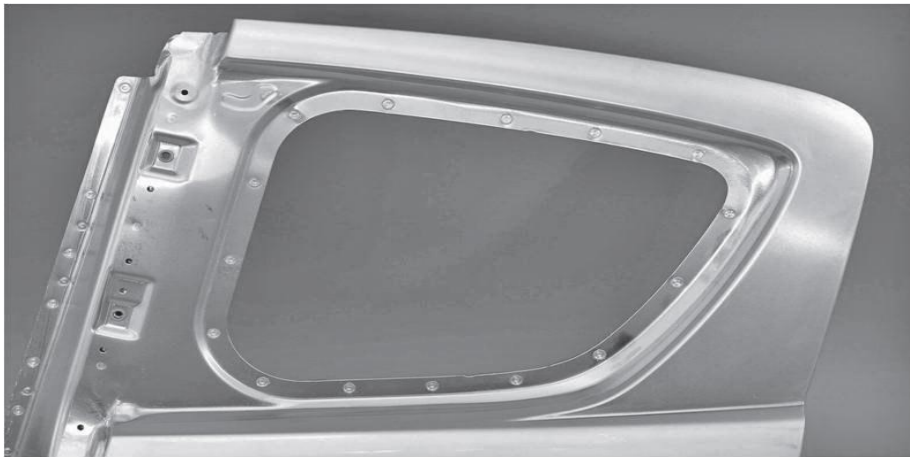


Figura 2.10. Porta traseira do Mazda RX8 soldada por FSW [11]

Para além das aplicações tradicionais, a empresa Pierburg, desenvolveu um novo conceito para *coolers* de recirculação dos gases de combustão interna utilizando a tecnologia FSW. Este componente revolucionário, permite reduzir significativamente a emissão de óxidos nitrosos. O *cooler* é produzido em alumínio e toda a interface interna é soldada por FSW [11]. Outro exemplo de sucesso da aplicação da tecnologia FSW, tem sido para a fabricação de jantes. Esta nova técnica de produção consegue reduzir entre 20 a 25% o peso das mesmas [11].

No entanto, a aplicação da tecnologia FSW não se resume apenas à produção de componentes para veículos ligeiros. A *Fontaine Trailer* encontra-se, atualmente, a comercializar um inovador sistema de reboque, apresentado na Figura 2.11,

com apenas 1,22 metros de comprimentos e 3 toneladas de peso, que consegue carregar até um máximo de 27 toneladas. A tecnologia FSW tem sido utilizada para soldar os painéis de carga, com consequências positivas na resistência mecânica da soldadura. A adoção da tecnologia FSW possibilitou um aumento significativo na capacidade de carga [11].



Figura 2.11. Sistema de reboque desenvolvida pela *Fontaine Trailer* [11]

2.1.5.3. Indústria aeroespacial

Na indústria aeroespacial, a aplicação da tecnologia FSW permite agora construir depósitos a partir de ligas de alumínio de difícil soldabilidade. A primeira aplicação desta tecnologia na indústria aeroespacial, surgiu em 1999, e recentemente foi aprovada a aplicação na construção de jatos comerciais [11].

A empresa *Boeing* utilizou a tecnologia FSW, para a soldura dos módulos do foguete Delta II, lançado em 1999. Em 2001 foi lançada a sonda *Mars Odyssey* acoplada ao foguete Delta II, o que veio a demonstrar a elevada qualidade e resistência da soldadura, capaz de suster os três depósitos de combustíveis incorporados. Embora o ganho ao nível de propriedades mecânicas tenha sido notável, a implementação desta tecnologia, também permitiu reduzir os tempos de produção de 23 para 6 dias e consequentemente diminuir os custos económicos [11].

Em termos de aviões comerciais a primeira aplicação desta tecnologia em componente não estruturais, surgiu na fabricação das rampas de carga para as aeronaves *Boeing C17*. Em 2004 a empresa *AST-Inc* recebeu um contrato para produção de 10

rampas de carga. Em 2005 ainda não tinham sido detetadas nenhuma falhas estruturais e as primeiras 136 aplicações passaram à primeira nos testes não destrutivos [11].

Depois de aprovada a utilização da tecnologia FSW em componentes estruturais, a empresa *Eclipse Corporativo* decidiu implementar a tecnologia FSW no seu processo produtivo. A implementação da tecnologia FSW possibilitou substituir o processo de rebite e outras formas de ligação tradicionais. Isto permitiu à empresa a redução de 7000 parafusos e rebites na aeronave Eclipse 500, exemplificada na Figura 2.12, atenuando assim consideravelmente os tempos de montagem e os custos de produção [11].

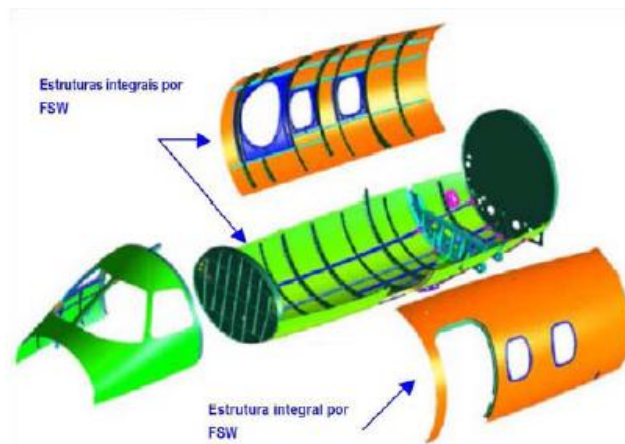


Figura 2.12. Soldadura realizada por FSW para aeronave Eclipse 500 [11]

A empresa *Airbus* também tem demonstrado um elevado interesse por esta tecnologia tendo investido em diversos laboratórios para explorar aplicações FSW em chapas finas e espessas. Até a data a tecnologia encontra-se aplicada na soldadura das asas e fuselagem das suas aeronaves [11].

2.1.5.4. Indústria ferroviária

A tecnologia FSW tem vindo a desempenhar um importante papel, na forma como a indústria ferroviária esta a construir os seus comboios [12]. Tal como na indústria naval, diversos fornecedores da indústria ferroviária em todo o mundo, têm vindo a explorar o fornecimento de painéis pré-fabricados de grandes dimensões, em ligas de alumínio, o que permite reduzir o peso dos comboios, e consequentemente o seu consumo de energia [12]. O caso de maior sucesso encontra-se no Japão, no denominado projeto A-Trains, concebido pela *Hitachi Rail System*. O conceito inovador A-Trains consiste na montagem modular dos vagões, cujos painéis externos são ligados através da tecnologia

FSW, tal como apresentado na Figura 2.13 [4]. No entanto, a aplicação da tecnologia FSW, na indústria ferroviária, encontra-se difundida em outras partes do mundo, nomeadamente na Alemanha e no Reino Unido, onde utilizam a tecnologia para a soldadura de painéis pré-fabricados, em alumínio, nos seus comboios [11].



Figura 2.13. Painéis do A-Trains sendo soldados por FSW [11]

2.1.5.5. Outras Aplicações

Embora o campo de aplicação principal do FSW sejam indústrias que trabalham com alumínio, existem outras indústrias que têm vindo a aplicar o processo com sucesso. A implementação de *pipelines* produzidos em aço, têm sido uma peça chave na distribuição dos recursos petrolíferos. A soldadura deste componente com a tecnologia FSW, oferece vantagem técnico-económicas relativamente às soldaduras clássicas de fusão, nomeadamente, na redução de custos de aproximadamente 25%, em soldaduras realizadas *offshore*, e de 7%, em soldadura realizadas *inshore*. Em termos técnicos, a soldadura com esta tecnologia apresenta excelentes propriedades mecânicas, embora, apresente algumas dificuldades na penetração do pino nos materiais a unir [24].

Outra aplicação importante, regista-se na fabricação de contentores de cobre, destinados para o depósito de resíduos nucleares [9].

2.2. Soldadura por Resistência Elétrica

A soldadura por resistência elétrica (RW) surgiu em 1884, através do professor Helio Thomson, do *The Franklin Institute*. A sua descoberta foi realizada, enquanto apresentava uma palestra prática sobre os novos campos de aplicação da energia elétrica. Atualmente a soldadura por resistência elétrica é mais conhecida como soldadura por pontos (RSW). No entanto, existem outras variantes deste processo, com interesse industrial como a soldadura por bossas (RPW), a soldadura por roletes (RSEW) e a soldadura topo-a-topo por resistência (UW) [15].

Na soldadura por pontos, apresentada na Figura 2.14, dois eléctrodos cilíndricos aplicam pressão e fornecem corrente elétrica num ponto localizado da junta. O calor necessário à soldadura é produzido pelo efeito de Joule, provocado pela resistência do MB à passagem da corrente elétrica, gerando uma fusão localizada na região de contacto entre as peças. Com a interrupção da corrente elétrica, a temperatura cai rapidamente, devido à dissipação de calor para o restante material de base, e zona fundida solidificada, formando assim um ponto de soldadura. Este processo é utilizado em chapas com espessura inferior a 3 mm, em juntas sobrepostas, onde a estanquicidade não é muito importante. A utilização desta tecnologia encontra-se maioritariamente centrada, na indústria automóvel, na soldadura das chapas do chassis [17].

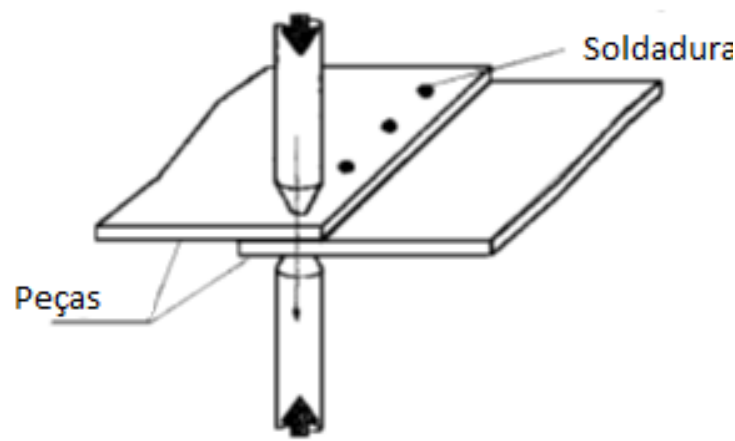


Figura 2.14. Esquematização gráfica da soldadura por pontos (RSW) [16].

No que concerne, à soldadura por bossas, apresentada na Figura 2.15, tal como a variante anterior, é utilizada para unir chapas metálicas sobrepostas. Esta é uma

tecnologia de soldadura entra peças em que pelo menos uma, possui pequenas saliências (bossas), as quais permitem realizar, utilizando apenas um par de eléctrodos, um número pontos de soldadura igual ao número de bossas existentes. Esta técnica é utilizada em chapas finas de aço ou níquel, com espessuras de 0,5 a 3 mm [17,20,27].

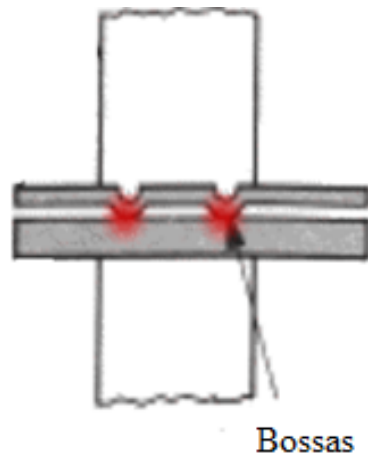


Figura 2.15. Esquemática gráfica da soldadura por bossa (RPW) [20].

Contrariamente as variantes apresentadas anteriormente, a soldadura topo-a-topo por resistência, apresentada na Figura 2.16, não se aplica em juntas sobrepostas. Este processo consiste em colocar os componentes a unir um contra o outro, pressioná-los com o auxílio de duas garras e fazer passar corrente elétrica. Esta técnica é limitada a peças com reduzida superfície de contacto e geometrias pouco complexas. As suas aplicações industriais mais importantes são a ligação de tubos, arames e anéis com secções transversais semelhantes [17].



Figura 2.16. Esquemática gráfica da soldadura de topo por resistência (UW) [17].

Finalmente, o processo de soldadura por roletes (RSEW) é semelhante ao da soldadura por pontos, diferindo apenas nos eléctrodos utilizados, que neste caso são em

forma de roletes [20]. Esta variante do processo será o foco do estudo a ser realizado, e por isso, é analisada em detalhe no item que se segue.

2.2.1. Soldadura de resistência por roletes (RSEW)

A tecnologia *Resistance Seam Welding* (RSEW), conhecida na língua Portuguesa como soldadura por roletes, é similar à soldadura por pontos, no entanto, como, se pode verificar na Figura 2.17, a forma da soldadura obtida é do tipo costura. A soldadura é levada a cabo utilizando roletes fabricados em cobre, que fornecem a energia eléctrica e exercem pressão nos materiais a unir. [17]

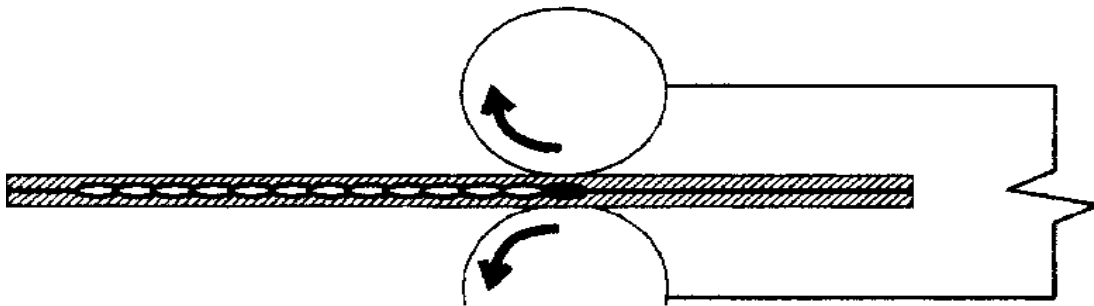


Figura 2.17. Esquemática gráfica da soldadura por roletes (RSEW) [20].

A soldadura por roletes permite soldar chapas com espessuras que variam entre 0,04 mm e 6 mm, e com velocidades que podem variar de apenas alguns cm/min até 2,40 m/min [16]. Os parâmetros de soldadura mais importantes envolvidos no processo, e que determinam a qualidade da soldadura, são a intensidade da corrente (kA), a força de aperto dos roletes (kN) e a velocidade de soldura (m/min) [21].

Dependendo da aplicação, esta tecnologia utiliza um ou dois roletes. Existem três tipos de roletes, da classe I, II e III. A diferença entre as classes de roletes reside na condutibilidade eléctrica, que permite assim a soldadura de diferentes tipos de materiais. Segundo o IACS (*International Annealed Copper Standard Unit*), uma condutividade eléctrica de 100%, corresponde 1.72 microhms por centímetro cúbico. Os roletes da classe I são utilizados para a soldadura de ligas de alumínio, magnésio, aço galvanizado e *Ternaplate* e

a sua condutividade elétrica mínima é de 85%. Já os roletes de classe II, fabricados em cobre e tratados termicamente, são utilizados para a soldadura de aço e possuem uma condutividade elétrica mínima de 75%. No que concerne aos roletes da classe III, utilizados para soldar aços inoxidáveis, ligas de monel e nícrômio, estes possuem baixa condutividade elétrica, por volta de 45% [17].

2.2.1.1. Tipo de junta

Em termos práticos, as juntas utilizadas neste processo tecnológico resumem-se a juntas topo-a-topo, sobrepostas e topo-a-topo por esmagamento. O tipo de junta mais utilizado na indústria, para este processo, é a junta sobreposta, esquematizada na Figura 2.18.A. no entanto, as juntas topo-a-topo por esmagamento, têm vindo a ganhar uma crescente popularidade, nomeadamente na indústria automóvel, onde são utilizadas na fabricação de *Tailored Blanks*. Este tipo de junta é caracterizado pela deformação em compressão de duas chapas sobrepostas, conforme representado na Figura 2.18.B. A relação de espessura entre as chapas não deve ultrapassar 1:2. A sobreespessura resultante da aplicação deste processo pode variar entre 5 a 25 % [17].

No que concerne a utilização de juntas topo-a-topo, representada na Figura 2.18.C, a soldadura por roletes pode ser classificada como autógena ou exógena. A soldadura autógena é um tipo especial de soldadura em que as duas extremidades das chapas são aquecidas e levemente forjadas uma de encontro à outra. No caso da soldadura exógena, é adicionado um material de adição na superfície dos materiais a unir. Este material é adicionado através de folhas ou arame, sendo o objetivo principal promover a melhoria da resistência mecânica da soldadura. Com efeito, o material de adição atua como uma ponte que permite a distribuição mais uniforme da corrente de soldadura, assim como a sua concentração na junta. Fornece ainda material, para formar um cordão de soldadura, o qual promove o aumento da resistência mecânica [17].

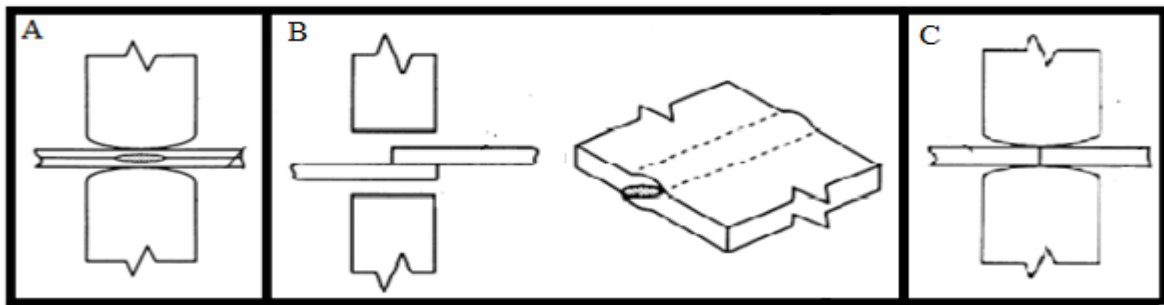


Figura 2.18. Tipos de juntas utilizadas na soldadura por roletes (RSEW): A-Junta sobreposta, B- Junta topo-a-topo, C-Juntas sobreposta por esmagamento. [17]

2.2.1.2. Materiais de base (MB)

A soldabilidade e a espessura dos materiais de base são fatores bastante importantes que determinam se pode, ou não, haver soldadura. Materiais como os aços ao carbono, de baixa liga, os aços revestidos e os aços inoxidáveis, apresentam propriedades que permitem realizar solduras por resistência, com excelente qualidade, em chapas com espessura de 0,04 mm até 6 mm, com velocidades de soldadura que podem ir até 2 m/min, e utilizando apenas 30 KVA de potência. No entanto, existe a probabilidade da formação de martensite, fragilizando metalurgicamente a soldadura. No aço inoxidável é ainda necessário ter em atenção o tempo de soldadura, para evitar a precipitação de carbonetos, quando o teor de carbono é alto.

As ligas de alumínio também podem ser soldadas por resistência, contudo, é necessário a utilização de potências da ordem de 100 kVA. A utilização de intensidade de correntes elevadas pode conduzir a crescimento elevado do tamanho de grão, mesmo quando o tempo de soldadura é reduzido. Isto pode provocar alterações nas propriedades mecânicas dos elementos a unir, tais como a redução da resistência mecânica e da resistência à corrosão. Peças em zinco também podem ser soldadas com relativa facilidade por resistência, com baixa perda da resistência mecânica, no entanto, haverá uma redução na ductilidade. A soldadura por roletes também permite a ligação em configurações dissimilares com relativa qualidade, nomeadamente, em materiais de base com alto ponto de fusão, tais como monel com níquel. [17,19]. As ligas de cobre, por outro lado, apresentam soldabilidade nula com esta tecnologia.

2.2.1.3. Vantagens e limitações

A soldadura de resistência por roletes, apresenta inúmeras vantagens, as quais tornam esta tecnologia a escolha ideal para determinadas aplicações. As vantagens que este processo oferece são as seguintes:

- Garante a estanquicidade das juntas [17];
- As soldaduras podem ser realizadas a grande velocidade. Estas podem ir até 2,4 m/min, o que permite elevadas taxas de produção [16].
- A ferramenta utilizada nesta tecnologia pode ser considerada barata, quando comparada com outros processos tecnológicos [17];
- Permite a soldadura de aços revestidos, devido a contínua remoção do revestimento. No entanto, pode tornar o processo moroso, devido à contínua necessidade, de limpar os roletes. [17];
- Não é necessária preparação de junta [17];
- Em condições normais, não requer material de adição [17];
- Pode ser facilmente automatizada e apresenta elevada repetibilidade [17];
- Não é necessário operários qualificados para operar a máquina, comparativamente à soldadura por arco elétrico [17];

Apesar das vantagens anteriormente citadas, esta tecnologia, possui desvantagens que podem tornar a sua utilização pouco atrativa. Essas desvantagens são as seguintes:

- A soldadura deve ser realizada em planos simples ou em superfícies curvas uniformes [17];
- Obstruções físicas ao longo do trajeto da soldadura, devem ser evitadas, ou compensadas, através do *design* dos roletes.
- Pode ser necessária a utilização de água para a refrigeração dos roletes, em soldadura a elevadas velocidades. Este processo tem um custo adicional devido à necessidade de implementação de um sistema para a armazenagem e remoção da água após a soldadura [17].
- Dificuldade técnicas para a soldadura de alumínio.

2.2.1.4. Campos de aplicação

A soldadura por roletes é uma tecnologia que já apresenta uma certa maturidade no mercado. Devido à maior vantagem deste processo ser a estanquicidade que apresenta a soldadura, esta tecnologia, apenas é utilizada quando é necessária garantir a estanquicidade na junta, sendo assim mais comum a utilização da soldadura por pontos. Tal como a para a tecnologia FSW, foi realizada uma pesquisa no Google académico sobre os estudos de investigação publicados, tanto para a soldadura por pontos, como para a soldadura por roletes. Na Figura 2.19, mostra-se a evolução do número de estudos de investigação realizados ao longo dos anos com vista ao desenvolvimento destas duas tecnologias. Facilmente é perceptível que o estudo da soldadura por roletes é quase nulo, devido ao pouco interesse que esta tecnologia apresenta. Isto é facilmente justificado, devido a limitação desta tecnologia em realizar soldaduras em planos complexos. Já na soldadura por pontos, o número de trabalhos realizados tem vindo a crescer devido à crescente necessidade de soldar alumínio em aplicações industriais e a dificuldade técnica que esta tecnologia apresenta na soldadura de alumínio.

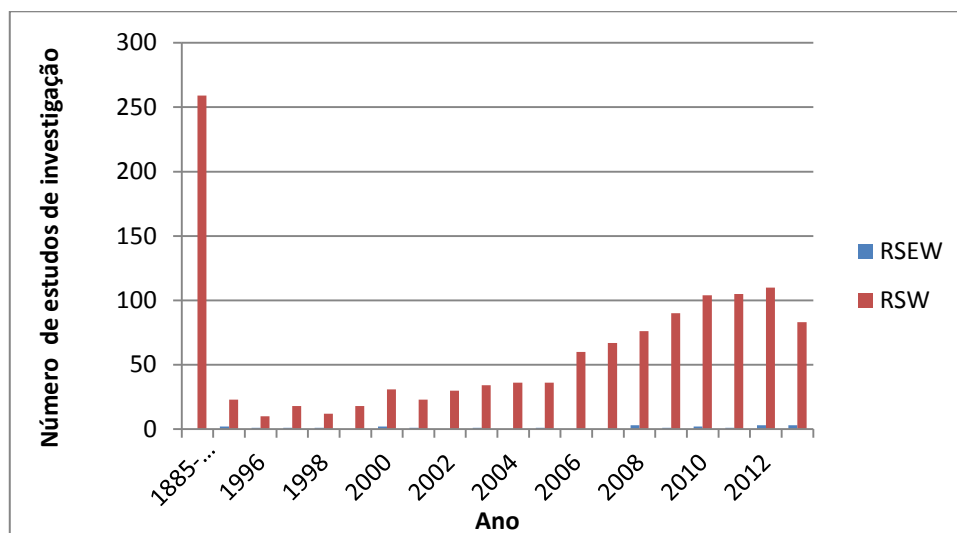


Figura 2.19. Evolução dos estudos realizados para resistência por roletes (RSEW) e resistência por pontos (RSW)

As aplicações mais correntes desta tecnologia encontram-se na indústria automóvel, sendo utilizada na soldadura de depósitos de gasolina, catalisadores, radiadores

e tejadilhos e, mais recentemente em algumas aplicações em *Tailored Blanks*. Esta tecnologia é também vastamente utilizada para soldar todo o tipo de depósitos, latas, tubos, permutadores de calor, assim como para a soldadura de fogões e frigoríficos, entre outros equipamentos domésticos [17,22]

3. MODELOS DE CUSTEIO

A correta determinação de custos, seja para um produto, seja para uma tecnologia de produção, é essencial para determinar a sua viabilidade económica. Com efeito, a correta aplicação de modelos de custeio, permite não só obter um maior controlo sobre os custos dos produtos, assim como, obter vantagens competitivas sobre os concorrentes. Na literatura são identificados diversos modelos de custeio. Como se mostra na Figura 3.1, estes modelos podem ser divididos em modelos qualitativos e modelos quantitativos [24].

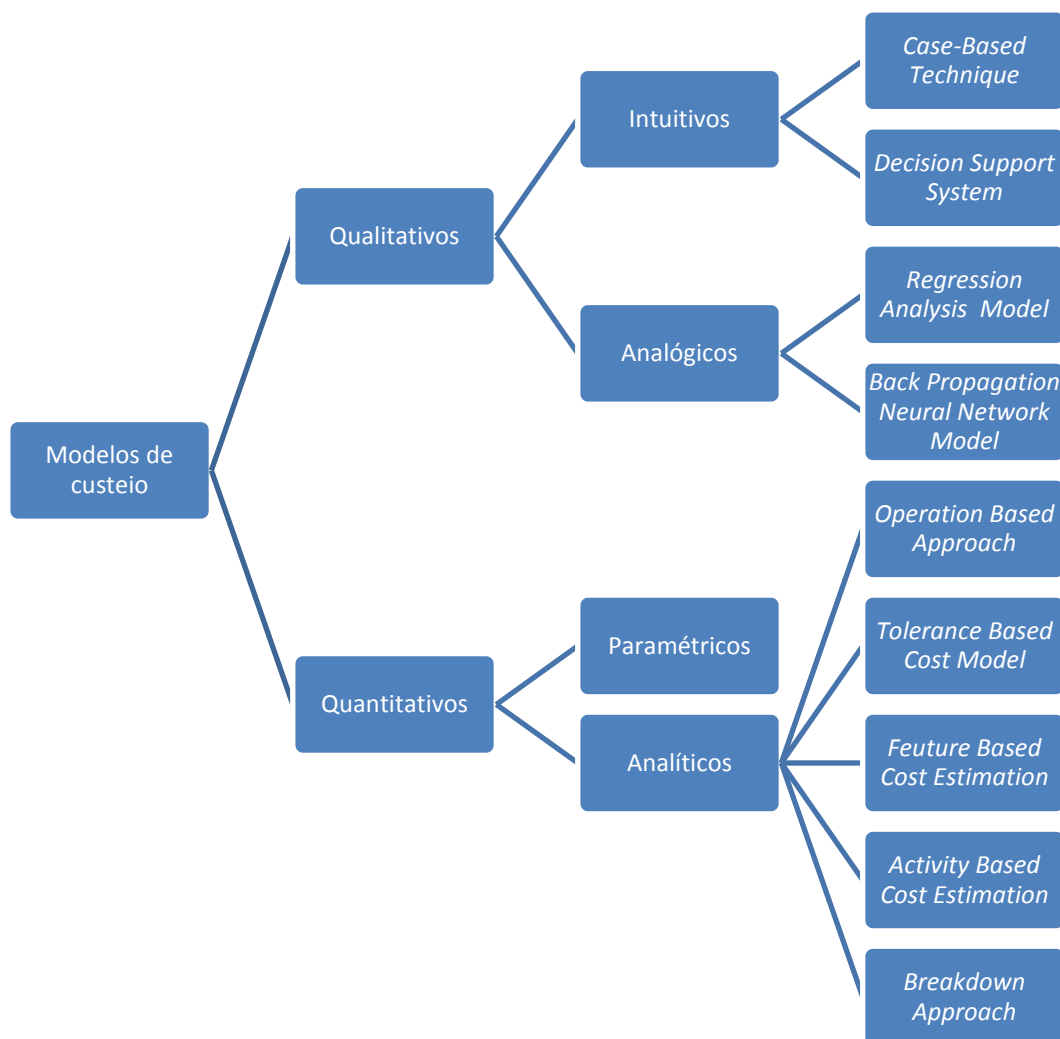


Figura 3.1. Modelos de custeio presentes na literatura

Os modelos qualitativos baseiam-se principalmente numa análise comparativa dos custos de um novo produto, relativamente a um produto que já foi produzido anteriormente. As semelhanças identificadas ajudam a incorporar dados passados na análise económica do novo produto, e desta forma reduzir o risco na estimativa de custos. Estes modelos podem ser aplicados com base em estimativas intuitivas e analógicas. Estimativas de custos intuitivas são baseadas no conhecimento de um ou vários especialistas que são utilizados sistematicamente para gerar estimativas de custos. Esta abordagem pode ser ainda dividida em subcategorias, sendo estas: *Case-Base Technique* e *Decision Support System*. A abordagem *Case-Based Technique*, utiliza informações de projetos anteriores que se encontram relacionadas com o novo projeto. No caso da abordagem *Decision Support System*, este é um modelo de apoio à decisão, que permite gerar e avaliar os diferentes níveis da estimativa de custo. Neste modelo, é necessário recorrer à inteligência artificial para utilizar e representar o conhecimento do especialista.

Ainda nos modelos qualitativos, os modelos analógicos baseiam-se na utilização de dados de custos conhecidos para um determinado produto e encontram-se agrupados em métodos denominados *Regression Analysis Model* e *Back Propagation Neural Network*. O método *Regression Analysis Model* estabelece relações lineares entre os parâmetros e o custo, com base em dados passados, sendo utilizados para prever o custo de um novo produto. Por outro lado, os modelos *Back Propagation Neural Network* utilizam rede neuronais, formadas para armazenar conhecimentos, de forma a dar resposta a situações que ainda não tenham sido confrontadas. Este é um modelo particularmente útil em condições de incerteza e adaptável em situações onde não existe uma linearidade bem definida [25].

Os modelos quantitativos, em contraste aos modelos qualitativos, em vez de recorrerem a dados económicos passados, são baseados numa análise detalhada das principais variáveis económicas de um projeto. Estes modelos são divididos em modelos paramétricos e modelos analíticos. Os modelos paramétricos fazem utilização de metodologias estatísticas, expressando os custos em função das variáveis estatísticas. Esta técnica é extremamente eficaz quando as variáveis são facilmente identificáveis. No que concerne aos modelos analíticos, estes requerem a decomposição de um produto em unidades elementares, operações e atividades que representam os diferentes recursos

consumidos durante o ciclo de produção. O custo total é obtido através do somatório de todos esses componentes. Esta metodologia encontra-se dividida em métodos denominados *Operation Based Approach*, *Tolerance Based Cost Model*, *Feature-Based Cost*, *Activity Based Costing* e *Breakdown Approach*. A abordagem *Operation Based Approach* é normalmente aplicada nas etapas finais dos projetos e é uma das primeiras estimativas para o custo de fábrica. Esta abordagem permite a estimativa do custo de fábrica, como um somatório dos custos associados ao produto, tempos de operação, tempos não produtivos e tempos de *Setup*. Já o modelo *Tolerance Based Cost Model* é baseado na modelação de tolerâncias ótimas e consequente criação de regiões de aceitação, para as variáveis do projeto. O Objetivo principal deste modelo é selecionar o processo e projetar as variáveis que minimizam a função de custo. No que respeita ao modelo *Feature-Based Cost*, este tem como objetivo a identificação dos custos de um produto tendo por base os custos de um produto semelhante. Para aplicar este método é necessário realizar uma extensa pesquisa, de forma a identificar e quantificar as principais características do produto, tais como os materiais, detalhes geométricos, e as tecnologias utilizadas, que contribuem no custo final do produto. O modelo *Activity Based Costing* concentra-se no cálculo dos custos de produção de um produto. Este método é muito útil para distribuir os custos de *overhead* em proporção por todas as atividades envolvidas no processo. Os *overhead* são custos que não estão associados diretamente ao produto, tais como o aluguer do espaço fabril, custos de engenharia, e custos administrativos. No que toca à metodologia *Breakdown Approach*, esta estima o custo total do produto pela soma de todos os custos incorridos durante o ciclo de produção, incluindo custos de montagens e *overhead*. A correta utilização deste método, exige informações detalhadas sobre os recursos consumidos durante a produção do produto [25].

Sendo um dos principais objetivos deste estudo o cálculo do custo por metro de soldadura, e não o cálculo do custo de um produto, o modelo de custeio mais adequado é o *Breakdown Approach*. Com efeito, este modelo tem a grande vantagem de ser facilmente implementado e adaptável à situação em estudo [24].

3.1. Modelo de custos Breakdown Approach

Tal como referido anteriormente, o método *Breakdown Approach* estima o custo total do produto ou processo produtivo (C_m), através da soma de todos os custos

associados ao ciclo de produção, sendo necessárias informações detalhadas sobre todos os recursos consumidos [24]. Um modelo genérico foi desenvolvido, para o cálculo dos custos associados a uma determinada máquina [24]. O qual é traduzido pelas equações

$$Cm = \text{Custos Utilitarios} + \text{Custos de manutenção} + \text{custos de reparação} + \text{seguro} + \text{custo de propriedade} \quad (2.1)$$

$$Cm = (C_u \times T_m + C_{mt} \times T_{mt} + C_r \times T_r + a \times F_k + b \times F_k) \cdot \quad (2.2)$$

Onde C_u representa o custo da máquina por unidade tempo, T_m o tempo de utilização dos equipamentos, C_{mt} o custo de manutenção, T_{mt} o tempo total de manutenção, C_r o custo de reparação por unidade tempo, T_r o tempo total de reparação, a os custos associados com o seguros dos equipamentos, F_k o investimento inicial nos equipamentos e b o imposto sobre a propriedade. De referir que este modelo pode ser adaptado de acordo com as características económicas pretendidas, nomeadamente, através da introdução ou remoção de parâmetros considerados necessários [25].

De acordo com a referência [25], em estudos de custeio económico realizados para a tecnologia FSW, os parâmetros mais importantes que influenciam o custo total por metro de soldadura são: a vida útil da ferramenta, o preço da ferramenta a velocidade de soldadura, e o custo de investimento realizado no equipamento. Sendo a tecnologia RSEW, um processo em estado sólido, tal como a tecnologia FSW, estes parâmetros também podem ser considerados, como os mais influentes no custo final da soldadura.

4. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÓMICA

Neste capítulo será apresentada a aplicação do modelo económico *Breakdown Approach* para a determinação do custo económico por metro de soldadura para as tecnologias FSW e RSEW. O modelo será aplicado na determinação dos custos da soldadura de chapas de alumínio e de aço, durante o período de amortização do equipamento, e no período após a amortização do mesmo. Para a correta aplicação do modelo é necessária a escolha correta de todas as variáveis de custo que afetam o custo por metro de soldadura. Para este caso, as componentes de custo para as tecnologias FSW e RSEW encontram-se apresentadas na Figura 4.1.

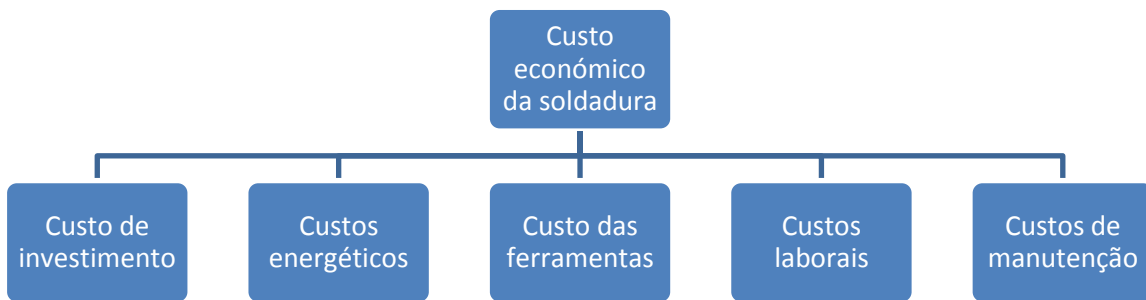


Figura 4.1 Aplicação do modelo económico *Breakdown Approach*.

O custo por metro de soldadura, durante o período de amortização, é obtido através do somatório de todas as componentes de custo apresentadas na Figura 4.1, seja para a tecnologia FSW, seja para a tecnologia RSEW. Ou seja o custo por metro de soldadura (C_{ms}) é calculado através da equação

$$C_{ms} = C_{inv} + C_{en} + C_{fe} + C_{lab} + C_{ma} , \quad (3.1)$$

onde C_{inv} corresponde ao custo de investimento, C_{en} ao custo energético, C_{fe} ao custo da ferramenta, C_{lab} aos custos laborais e C_{ma} ao custo da manutenção. Neste estudo, não foram tomados em conta, os custos de *overhead*, nomeadamente, os custos relacionados com o espaço ocupado pelo equipamento, por falta de informação. Custos afetos ao equipamento

necessário ao manuseamento dos MB e produtos finais, também foram desprezados, visto que todas essas operações serão realizadas manualmente.

Seguidamente serão apresentadas as equações que permitem determinar os valores para as componentes de custos que influenciam o custo por metro de soldadura.

O custo de investimento é obtido através da equação

$$C_{eq} = \frac{Inv}{Pa \times Msa} \quad (3.2)$$

Onde *Inv* corresponde ao investimento realizado na aquisição do equipamento, *Pa* ao período de amortização pretendido para o equipamento e *Msa* à quantidades de soldaduras realizadas por ano, expresso em m/ano. O valor para o *Msa* é obtido através da equação

$$Msa = \frac{Pd \times Da}{Csp \times Pds} \quad (3.2)$$

Nesta equação *Pd* corresponde ao número de peças produzidas por dias, *Da* aos dias de trabalho por ano, *Csp* a comprimento da soldadura por peça e *Pds* o número de passes de soldadura para cada peça.

Já para o cálculo do custo energético é utilizada a equação

$$C_{en} = \frac{(Pot \times 0,8) \times Tesm \times Ce}{60 \times Efi} + \frac{(Pc \times (Tc + Thp)) \times 12}{Msa} \quad (3.3)$$

Em que *Pot* representa a potência do equipamento em kVA, *Tesm* o tempo efetivo de soldadura em min/m, *Ce* o custo da energia consumida pelo equipamento em kWh, *Efi* a eficiência energética do equipamento, *Tc* a tarifas para a potência contratada e *Thp* a tarifa da potência contratada em hora de ponta. O fator 0.8 é utilizado para garantir a conversão de kVA para kW.

Para a obtenção do custo da ferramenta (*Cfe*) é utilizada a seguinte equação

$$C_{fe} = \frac{Cf}{Vut} \quad (3.4)$$

Nesta equação, *Cf* corresponde ao preço unitário de cada ferramenta e *Vut* à vida útil da ferramenta utilizada. Para o caso da tecnologia RSEW, em que são utilizados dois roletes, o custo será duplicado.

No que concerne ao cálculo dos custos laborais, estes são obtidos através da equação

$$C_{lab} = \frac{Ord \times Nord \times Nop}{Msa} \quad (3.5)$$

na qual o parâmetro *Ord* representa o ordenado mensal do operário, *Nord* o número de ordenados pagos pela entidade empregadora e *Nop* o número de operários afetos à operação.

Finalmente, para o cálculo do custo de manutenção, este é obtido através da equação

$$C_{ma} = \frac{Cm \times Nm}{Msa}, \quad (3.6)$$

em que o *Cm* representa os custos mensais associados com a manutenção do equipamento e *Nm* o número de meses de trabalho por ano.

O custo por metro de soldadura, após o período de amortização, é obtido de forma semelhante ao custo durante ao período de amortização, apenas sendo necessário suprimir a componente de custo associada ao investimento. Sendo assim o custo económico da soldadura é obtido através da seguinte equação

$$C_{es} = C_{eq} + C_{en} + C_{fe} + C_{lab} + C_{ma} \cdot \quad (3.7)$$

Na determinação do custo económico por metro de soldadura, para ambas as tecnologias, assumem-se as seguintes condições:

- A operação da soldadura será realizada entre chapas de alumínio, ou aço, com 3 metros de comprimento, sendo necessário realizar 2 passes de soldadura para a execução completa de cada componente.
- O equipamento utilizado na tecnologia FSW trata-se de uma adaptação de uma fresadora CNC, o que em termos de custo de investimento, é consideravelmente inferior, a um equipamento comercial da tecnologia FSW.
- A velocidade de soldadura aplicada na tecnologia FSW será de 1,2 m/min, para a soldadura de aço, e 1,5 m/min, para a soldadura de alumínio. Para a tecnologia RSEW a velocidade de soldadura aplicada será de 1,2 m/min para os dois materiais.
- A empresa trabalha 230 dias por ano, em turnos diários de 8 horas de trabalho.
- O tempo total de *Handling* é igual para ambas as tecnologias, sendo este de 10 minutos para o posicionamento dos materiais de base e 10 minutos para a remoção do componente soldado.
- O número de operários é igual para as duas tecnologias e o ordenado a ser pago será de 600€/mês.

- O período de amortização pretendido será de 10 anos, e igual para as duas tecnologias.
- As máquinas de soldadura para FSW e RSEW apresentam eficiências energéticas da ordem dos 95%.
- A tarifa da energia elétrica consumida é considerada de “média tensão” para a tecnologia de FSW e “alta tensão” para a tecnologia RSEW, em regime de curtas utilizações, sendo a utilização de 32% em horas de ponta e 68% em horas de vazio.
- A licença emitida pelo TWI, já não é aplicável para o caso em estudo.

4.1. Análise do custo por metro de soldadura

4.1.1. Processo de soldadura por FSW

Neste item será abordado o custo económico da soldadura para a tecnologia FSW. Tal como referido na explicação do modelo económico, o cálculo do custo por metro de soldadura será aplicado para o período de amortização e após amortização. Seguidamente apresenta-se uma análise da distribuição dos custos afetos à operação da soldadura.

4.1.1.1. Soldadura de aço

Na Tabela 4.1 mostram-se os parâmetros envolvidos na determinação do custo por metro de soldadura em aço produzidas pela tecnologia FSW.

Tabela 4.1. Parâmetros envolvidos no cálculo do custo por metro de soldadura de chapas de aço por FSW.

Custo económico da soldadura	
Dados de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • 14720 Metros de soldadura por ano • 2454 Painéis produzidos por ano
Custo do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento realizado de 70000 € • Período de amortização de 10 anos
Custo de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento com 10 kVA de potência • Equipamento com 95 % de eficiência • Potência contratada 10 kW/mês • Tarifa potência contratada 0,580 €/kW.mês • Tarifa potência horas de ponta 14,259 €/kW.mês • Tarifa da energia elétrica 0.140€/kWh • Tempo efetivo de soldadura 0,83 min/m
Custo da ferramenta	<ul style="list-style-type: none"> • Custo da ferramenta de 432 € • Vida útil da ferramenta 2000 metro
Custo laborais	<ul style="list-style-type: none"> • Ordenado bruto mensal de 600 € • 14 Ordenados anuais • 2 Operários
Custo de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de manutenção assumido de 50€/mês

Os custos obtidos para a tecnologia FSW, durante, e após o período de amortização, apresentam-se na Tabela 4.2. O custo por metro de soldadura como seria de esperar, é maior durante o período de amortização, visto que se encontra ainda influenciado pelo custo do equipamento.

Tabela 4.2. Custo por metro de soldadura durante e após o período de amortização para a tecnologia FSW aplicada em aço.

Período	Custo económico da soldadura
Durante o período de amortização	3,38 €/Metro
Após o período de amortização	2,43 €/Metro

A distribuição dos custos, durante o período de amortização, mostram-se na Figura 4.2. De acordo com a figura, as variáveis que influenciam maioritariamente a determinação do custo, são as correspondentes aos custos laborais e aos custos de investimento, com uma percentagem de 56% e 28%, respetivamente. Estas duas

componentes de custos, totalizam 84% do custo total da soldadura, representando o comportamento típico de qualquer tecnologia de soldadura. As restantes componentes apresentam uma influência residual no custo por metro de soldadura, de apenas 16%, devido ao baixo consumo de energia associado à tecnologia, ao facto de a ferramenta ter um período de vida útil considerável e um preço competitivo, e ainda, ao facto de não existirem elevados custos associados à manutenção do equipamento, devido à sua elevada fiabilidade.

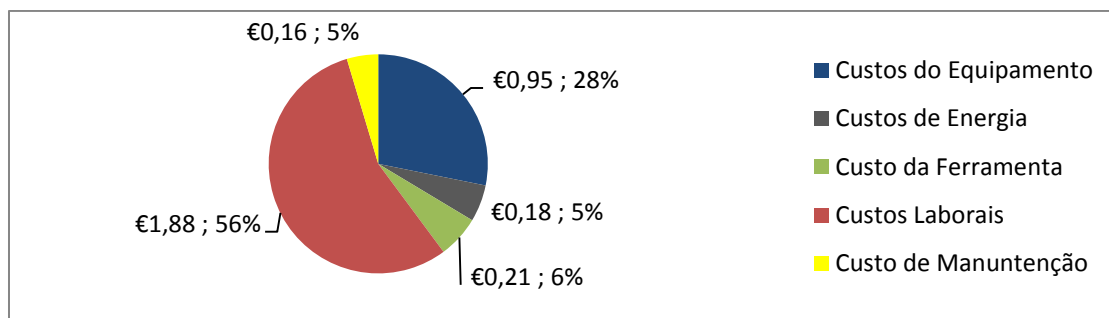


Figura 4.2 Distribuição dos custos associados ao cálculo do custo por metro soldadura durante o período de amortização a tecnologia FSW aplicada em aço.

Analisando a distribuição dos custos, após o período de amortização, apresentada na Figura 4.3, é possível concluir que esta apresenta um comportamento semelhante ao anterior, nomeadamente, pode observar-se uma enorme influência dos custos laborais, com uma percentagem de 77%, no custo por metro de soldadura. As restantes componentes do custo, apesar de apresentarem um ligeiro incremento na sua influência sobre os custo final da soldadura, de 16% para 23%, continuam a ser residuais.

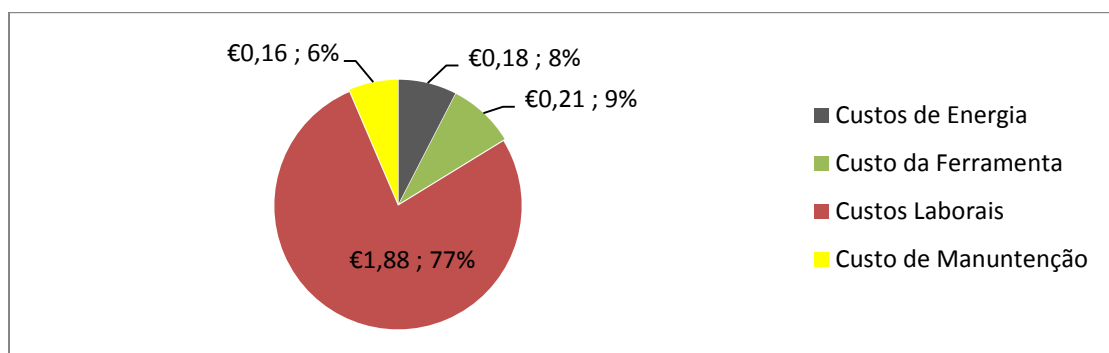


Figura 4.3 Distribuição dos custos associados ao cálculo do custo por metro de soldadura após o período de amortização para a tecnologia FSW aplicada em aço.

4.1.1.2. Soldadura de alumínio

Os parâmetros utilizados no cálculo dos custos de ligação por FSW de chapas de alumínio mostram-se na Tabela 4.3. Comparativamente ao caso anterior, estes parâmetros apenas diferem no custo unitário da ferramenta, que é substancialmente inferior, passando de 432 € para 61 €, e no incremento da velocidade da soldadura, que passou de 1,2 m/min para 1,5 m/min. Como consequência do aumento da velocidade da soldadura, verifica-se também um aumento da produtividade de 14720 metros de soldadura por ano para 15054 metros de soldadura por ano.

Tabela 4.3. Parâmetros envolvidos no cálculo do custo por metro de soldadura de chapas de alumínio por FSW.

Custo económico da soldadura	
Dados de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • 15054 Metros de soldadura por ano • 2454 Painéis produzidos por ano
Custo do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento realizado de 70000 € • Período de amortização de 10 anos
Custo de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento com 10 kVA de potência • Equipamento com 95 % de eficiência • Potência contratada 10 kW/mês • Tarifa potência contratada 0,580 €/kW. Mês • Tarifa potência horas de ponta 14,259 €/kW. Mês • Tarifa da energia elétrica 0.140€/kWh • Tempo efetivo de soldadura 0,66 min/m
Custo da ferramenta	<ul style="list-style-type: none"> • Custo da ferramenta de 61.5 € • Vida útil da ferramenta 2000 metro
Custo laborais	<ul style="list-style-type: none"> • Ordenado bruto mensal de 600 € • 14 Ordenados anuais • 2 Operários
Custo de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de manutenção assumido de 50€/mês

Na Tabela 4.4 apresentam-se os custos por metro de soldadura, antes e após a amortização do equipamento. Como esperado, o custo por metro de soldadura é superior durante o período de amortização do equipamento. Comparativamente à soldadura em aço, verifica-se uma diminuição no custo da soldadura de alumínio antes e após o período de amortização, passando de 3,38€/m para 3,15 €/m, durante o período de amortização, e de 2,43 €/m para 2,22 €/m, após o período de amortização. Esta diminuição no custo é

justificada, não só pela diminuição do custo unitário da ferramenta, mas também por esta apresentar uma vida útil semelhante à da ferramenta anterior, assim como o aumento da produtividade provocado pelo incremento da velocidade da soldadura.

Tabela 4.4. Cálculo do custo por metro de soldadura durante e após o período de amortização para a tecnologia FSW aplicada em alumínio.

Período	Custo económico da soldadura
Durante o período de amortização	3,15 €/Metro
Após período de amortização	2,22 €/Metro

Com base na Figura 4.4, podemos concluir que as componentes com maior influência sobre o custo por metro de soldadura são os custos laborais, com uma percentagem de 58% e os custos do equipamento, com uma percentagem de 29%, totalizando assim uma percentagem de 87%. As restantes componentes do custo representam apenas 13% do custo final obtido.

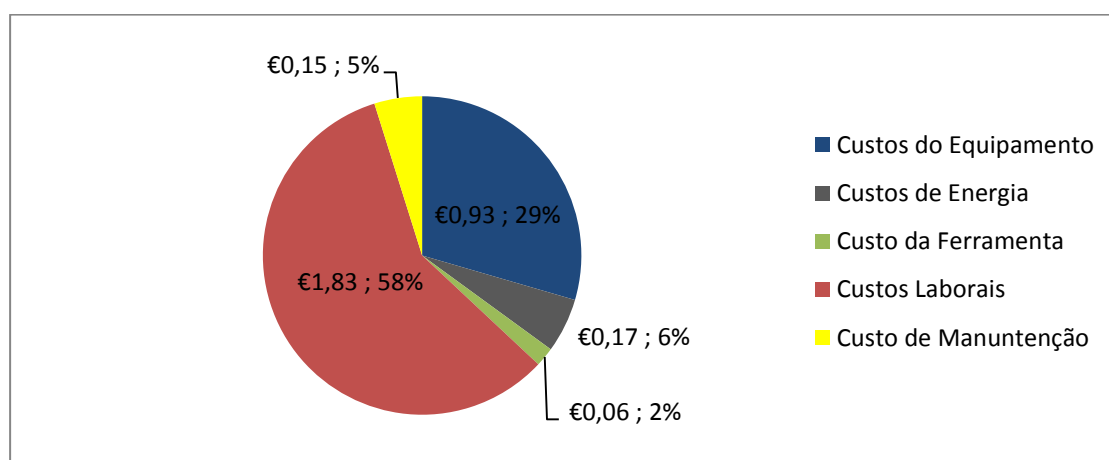


Figura 4.4 Distribuição dos custos associados ao cálculo económico por metro de soldadura durante o período de amortização a tecnologia FSW aplicada em alumínio.

No que concerne a análise de distribuição de custos, após o período de amortização, apresentada na Figura 4.5, é possível observar o comportamento típico esperado. Após o período de amortização, os custos laborais são elevados no custo por metro de soldadura, com uma percentagem de 82%, as restantes componentes de custos apresentam um ligeiro aumento, de 13% para 18%. No entanto, continuam a apresentar, como esperado, um peso residual sobre o custo final da soldadura.

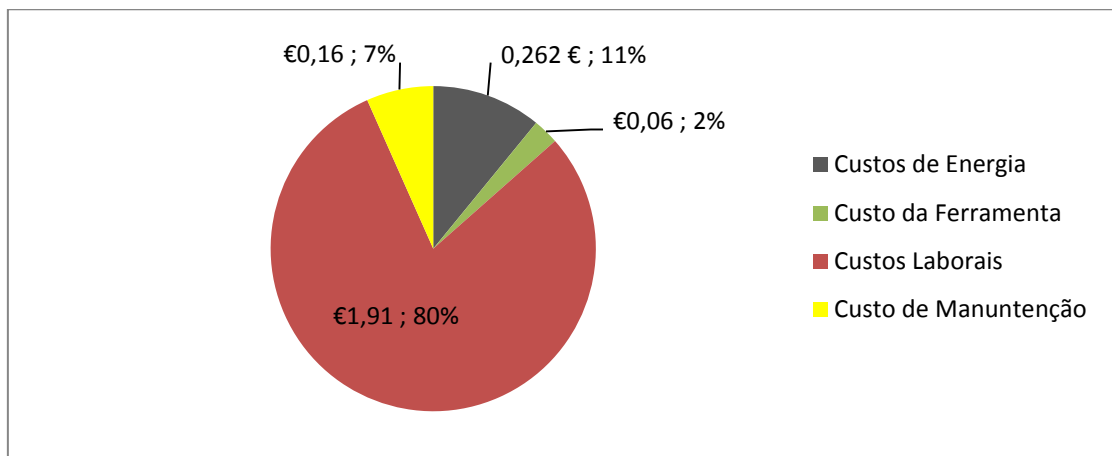


Figura 4.5 Distribuição dos custos associados ao cálculo por metro de soldadura após o período de amortização para a tecnologia FSW aplicada em alumínio.

4.1.2. Processo de soldadura por RSEW

Neste item serão apresentados os custos económicos para a tecnologia RSEW. De forma análogo ao efetuado para a tecnologia FSW, apresentada no item anteriormente, será apresentado o custo por metro de soldadura para chapas de aço e alumínio, durante e após o período de amortização, será também analisada a distribuição dos custos.

4.1.2.1. Soldadura de aço

Os parâmetros utilizados na avaliação do custo por metro da soldadura de aço pela tecnologia RSEW apresentam-se na Tabela 4.5. De notar que esta é uma tecnologia que requer corrente de alta tensão devido à potência com que estas máquinas operam.

Tabela 4.5. Parâmetros envolvidos no cálculo do custo económico da soldadura de chapas de aço por RSEW.

Custo económico da soldadura	
Dados de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • 14720 Metros de soldadura por ano • 2454 Painéis produzidos por ano
Custo do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento realizado de 100000 € • Período de amortização de 10 anos
Custo de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento com 30 kVA de potência • Equipamento com 95 % de eficiência • Potência contratada 30 kW/mês • Tarifa potência contratada 0,478 €/kW. Mês • Tarifa potência horas de ponta 11,834 €/kW. Mês • Tarifa da energia elétrica 0.119€/kWh • Tempo efetivo de soldadura 0,83 min/m
Custo da ferramenta	<ul style="list-style-type: none"> • Custo da ferramenta de 500 € • Vida útil da ferramenta 20000 metro
Custo laborais	<ul style="list-style-type: none"> • Ordenado bruto mensal de 600 € • 14 Ordenados anuais • 2 Operários
Custo de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de manutenção assumido de 50€/mês

O custo económico da soldadura obtido para esta tecnologia utilizando os parâmetros da Tabela 4.5 encontram-se representados na

Tabela 4.6. Apresentando um custo por metro de soldadura superior, durante o período de amortização como seria esperado.

Tabela 4.6. Cálculo do custo por metro de soldadura durante e após o período de amortização para a tecnologia RSEW.

Período	Custo económico da soldadura
Durante o período de amortização	3,94 €/Metro
Após período de amortização	2,58 €/Metro

Da avaliação da distribuição de custos para o período de amortização, apresentado na Figura 4.6, é possível concluir que os custos laborais com uma percentagem de 48% e os custos do equipamento com uma percentagem de 34%, são os que apresentam um maior peso no custo final da soldadura. Como seria de esperar, a influência dos custos energético no custo por metro de soldadura é acentuada, o que é

justificado pelo aumento da potência requerida pela máquina de RSEW. As restantes variáveis apresentam pouca influência no custo devido à elevada vida útil da ferramenta e ao seu baixo preço. Assim como os reduzidos custos associados à manutenção do equipamento.

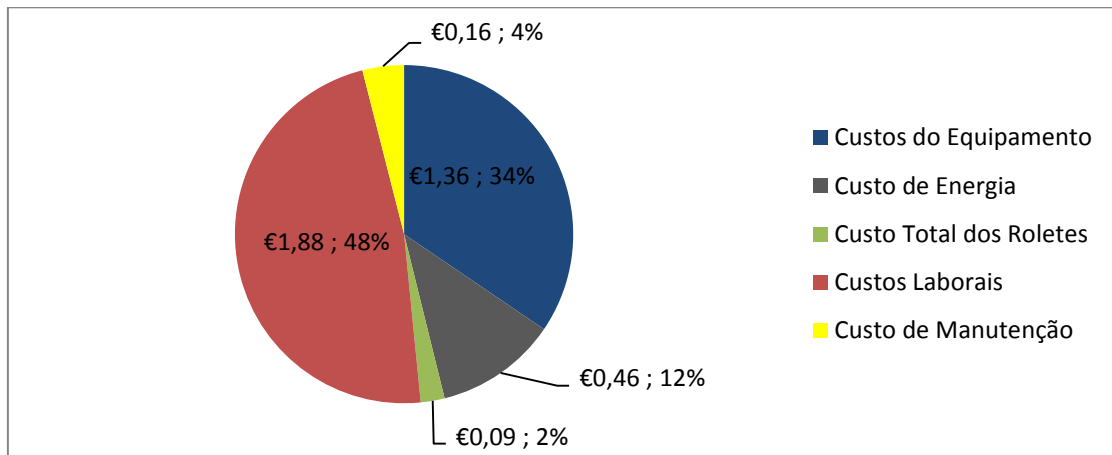


Figura 4.6 Distribuição dos custos associados ao cálculo por metro de soldadura durante o período de amortização para a tecnologia RSEW aplicada em aço.

No que concerne à análise da distribuição dos custos, após o período de amortização, apresentado na Figura 4.7, é possível concluir que os custos laborais e os custos de energia com 73% e 18% respetivamente, são os que apresentam uma maior influência no custo por metro de soldadura. As restantes variáveis, apresentam pouco impacto no custo final da soldadura.

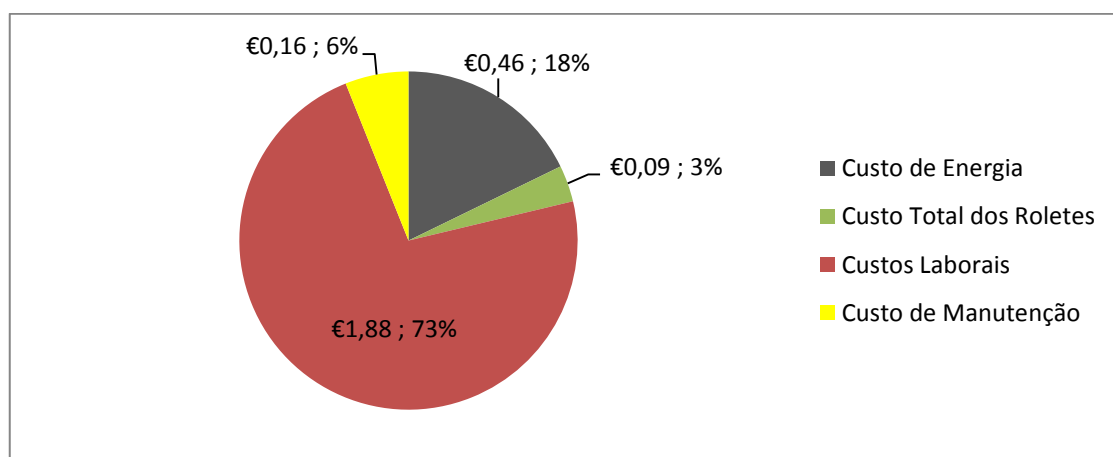


Figura 4.7 Distribuição dos custos associados ao cálculo por metro de soldadura durante o período de amortização para a tecnologia RSEW aplicada em alumínio.

4.1.2.2. Soldadura em alumínio

Finalmente, para o cálculo do custo por metro de soldadura de alumínio, os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 4.7. Comparativamente à soldadura em aço, a potência necessária para a soldadura de alumínio é consideravelmente superior, sendo necessárias potências da ordem dos 100 kVA, o que na prática se traduz num considerável aumento dos custos energético.

Tabela 4.7. Parâmetros envolvidos no cálculo do custo por metro de soldadura de chapas de alumínio por RSEW.

Custo económico da soldadura	
Dados de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • 14720 Metros de soldadura por ano • 2454 Painéis produzidos por ano
Custo do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento realizado de 100000 € • Período de amortização de 10 anos
Custo de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento com 110 kVA de potência • Equipamento com 95 % de eficiência • Potência contratada 110 kW/mês • Tarifa potência contratada 0,478 €/kW. Mês • Tarifa potência horas de ponta 11,834 €/kW. Mês • Tarifa da energia elétrica 0.119€/kWh • Tempo efetivo de soldadura 0,83 min/m
Custo da ferramenta	<ul style="list-style-type: none"> • Custo da ferramenta de 500 € • Vida útil da ferramenta 20000 metro
Custo laborais	<ul style="list-style-type: none"> • Ordenado bruto mensal de 600 € • 14 Ordenados anuais • 2 Operários
Custo de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de manutenção assumido de 50€/mês

O custo por metro de soldadura obtidos, apresentados na Tabela 4.8. Comparativamente à soldadura em aço, verifica-se um aumento no custo por metro de soldadura, durante e após o período de amortização, passando de 3,94 €/m para 5,47 €/m, para o período de amortização, e de 2,58 €/m para 4,11 €/m, para o período após a amortização Embora o equipamento utilizado para soldar aço ou alumínio seja o mesmo, a potência requerida para a soldadura de alumínio é muito superior, o que implica um aumento considerável nos custos energéticos, justificando assim a diferença no custo da soldadura final.

Tabela 4.8. Cálculo por metro de soldadura durante e após o período de amortização para a tecnologia RSEW aplicada em alumínio.

Período	Custo económico da soldadura
Durante o período de amortização	5,47 €/Metro
Após período de amortização	4,11 €/Metro

Na Figura 4.8 mostra-se a distribuição de custo para o período de amortização. Nesta figura, contrariamente ao caso anterior, não são os custos laborais os mais influentes, mas sim os custos energéticos, com uma percentagem de 36 %. Isto demonstra o enorme impacto no custo final da soldadura, provocado pelo aumento da potência requerida pelo equipamento. As outras componentes de custo relevantes, são os custos laborais, com uma percentagem de 34% e o custo de equipamento com uma percentagem de 25%. Os custos relacionados com os roletes são residuais, devido à boa relação preço/vida útil. Os custos de manutenção são também pouco significativos.

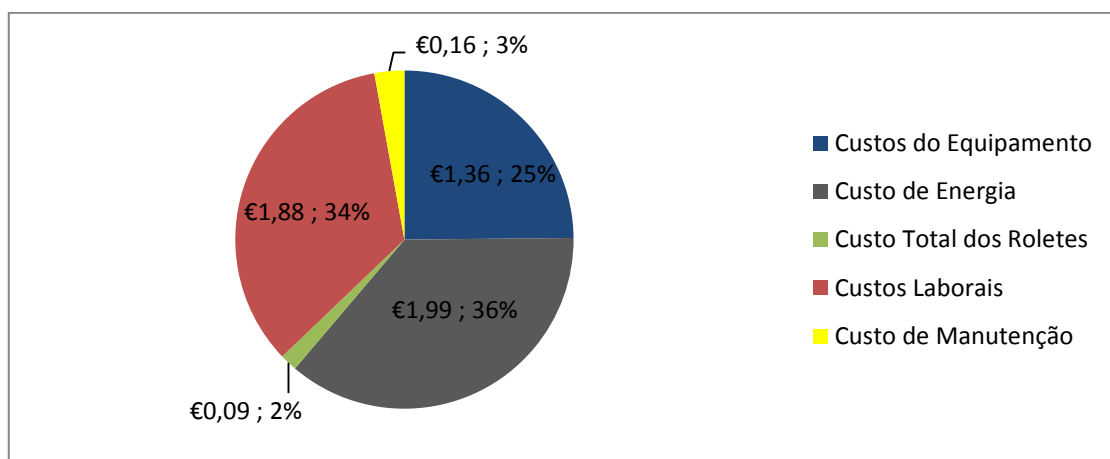


Figura 4.8 Distribuição dos custos associados ao custo por metro de soldadura durante o período de amortização.

Finalmente, na Figura 4.9, apresenta-se a distribuição de custos para o período após amortização. Analisando a figura, como esperado, as componentes, com maior peso são os custos energéticos com uma percentagem de 48 % e os custos laborais com uma percentagem de 46%. As restantes componentes de custo continuam a apresentar pouco impacto no custo por metro de soldadura.

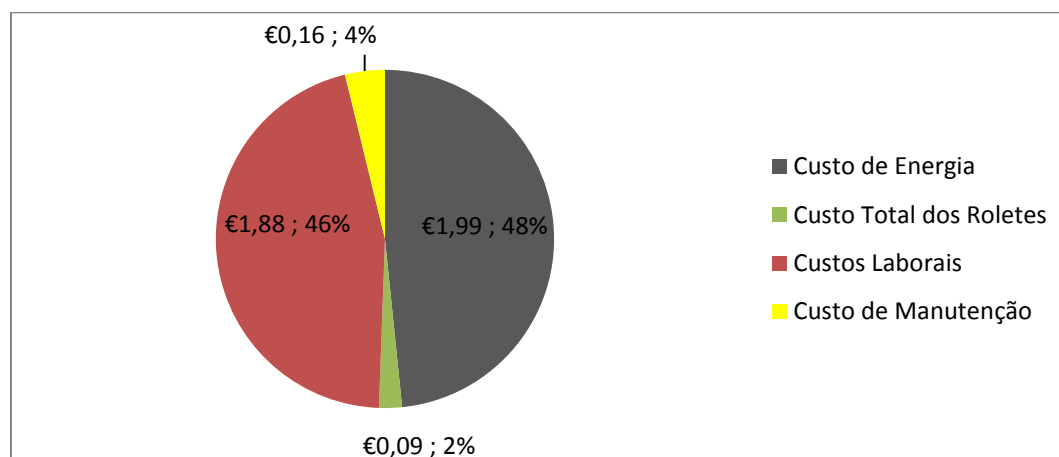


Figura 4.9 Distribuição dos custos associados ao cálculo económico da soldadura durante o período de amortização.

4.2. Evolução do custo por metro de soldadura

Neste item será apresentada a influência da variação dos parâmetros mais importantes no custo por metro de soldadura. Os parâmetros analisados são, a velocidade da soldadura, a potência do equipamento, vida útil da ferramenta, o tempo de *handling* e o volume de produção, para as tecnologias FSW e RSEW, durante e após o período de amortização do equipamento. A análise da variação destes parâmetros, permite determinar a variação do custo por metro de soldadura, e sua correspondente viabilidade económica, numa elevada gama de condições

4.2.1. Soldadura de aço

Seguidamente será analisada a influência dos parâmetros anteriormente mencionados para a soldadura em aço.

4.2.1.1. Velocidade da soldadura

Na Figura 4.10 mostra-se a influência da velocidade de soldadura no custo por metro de soldadura para as duas tecnologias. Analisando a figura é possível concluir que, quanto maior for a velocidade da soldadura, menor será o custo final. No entanto, verifica-se que diferença na curva de custo entre as duas tecnologias é superior durante o período de amortização do equipamento. Isto deve-se ao facto deste parâmetro ainda se encontrar sob influência do custo de investimento- Após o período de amortização do equipamento verifica-se uma maior proximidade no custo por metro de soldadura em ambas as

tecnologias. No caso da aplicação em causa, a variação deste parâmetro pode ser considerado pouco influente, visto que para as duas tecnologias as soldaduras serão realizadas com velocidades sempre superiores aos 0,75 m/min, não havendo uma variação acentuada no custo por metro de soldadura.

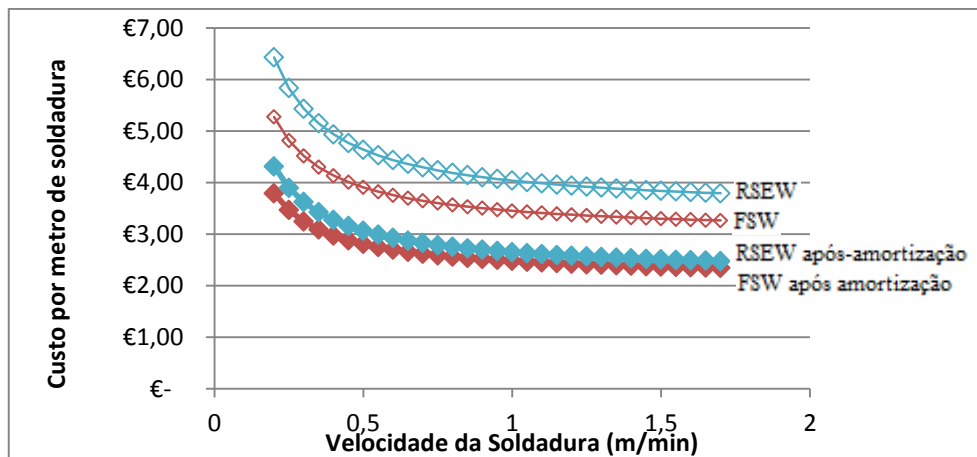


Figura 4.10 Influência da velocidade de soldadura no custo por metro de soldadura aplicado em aço.

4.2.1.2. Potência do equipamento

Com base na Figura 4.11, é possível concluir que a influência da potência do equipamento no custo por metro de soldadura diminui linearmente com a diminuição da potência. No entanto, a variação deste parâmetro, pode ser considerada pouco importante para o custo por metro de soldadura para os períodos analisados. Embora as potências requeridas pelos equipamentos de ambas as tecnologias sejam diferentes, estas potências são relativamente baixas, não apresentando um peso significativo no custo por metro de soldadura quer no período antes, quer no período após amortização. Durante ambos os períodos o custo por metro de soldadura será sempre superior na tecnologia RSEW.

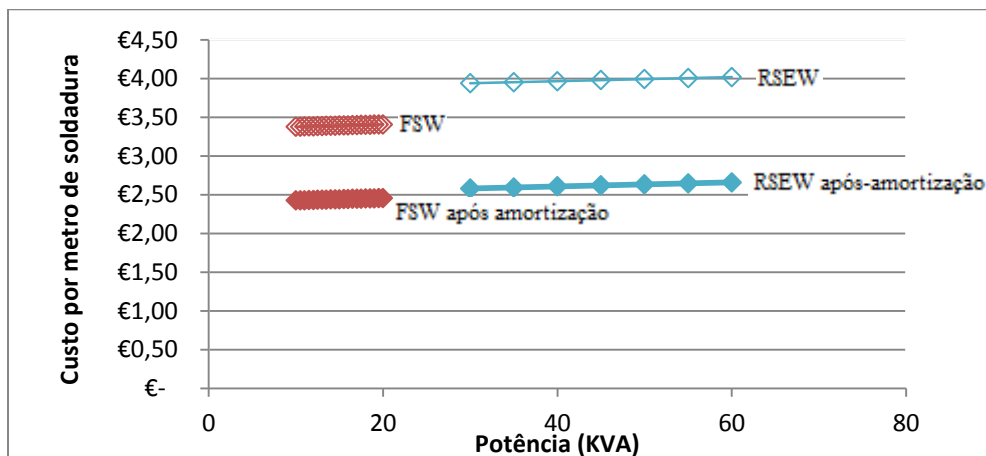


Figura 4.11 Influência da potência no custo por metro de soldadura aplicado em aço.

4.2.1.3. Vida útil da ferramenta

A influência da vida útil da ferramenta no custo por metro de soldadura, mostra-se na Figura 4.12. De acordo com a figura, o custo final da soldadura diminui com o aumento da vida útil da ferramenta. No entanto, o peso exercido no custo da soldadura é superior na tecnologia FSW comparativamente à tecnologia RSEW. Este comportamento é justificado pela melhor relação preço/vida útil que apresentam os roletes, devido a ostentarem uma vida útil superior e um preço de custo unitário similar ao da ferramenta FSW. Embora a influência da vida útil da ferramenta no custo por metro de soldadura seja superior na tecnologia FSW, o custo por metro de soldadura, quer durante, quer após o período de amortização, será sempre superior na tecnologia RSEW.

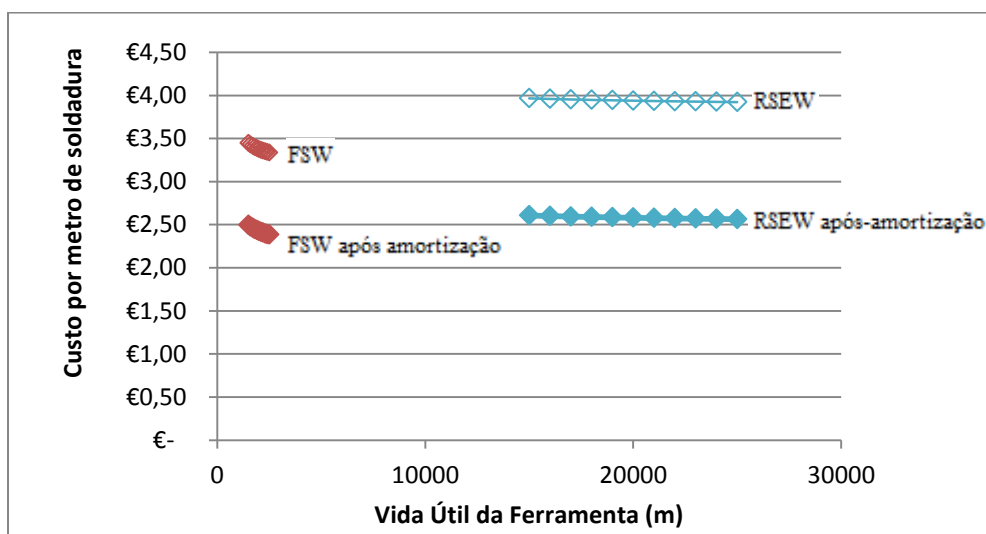


Figura 4.12 Influência da vida útil da ferramenta no custo por metro de soldadura aplicado em aço.

4.2.1.4. Tempo de *handling*

Em relação ao tempo de *handling*, apresentado na Figura 4.13, é possível concluir que, quanto menor for o tempo de *handling*, menor será o custo final da soldadura. Embora o no período de amortização a diferença entre as curvas de custo seja superior, devido ao custo por metro de soldadura estar sob influência do custo de investimento, comparativamente ao período após amortização, este parâmetro apresenta uma enorme influência podendo encarecer consideravelmente o custo final da soldadura, ou mesmo tornar completamente inviável a sua aplicação em determinados casos. Deste modo é necessário a otimização desta variável. A elevada influência deste parâmetro no custo da soldadura é justificada pela relação direta com a produtividade: quanto maior o tempo de *handling*, menor a quantidade de soldadura realizada por ano (Msa), e conseqüentemente, maior é o custo final da soldadura. O tempo de *handling* não deverá ultrapassar os 20 minutos em ambas as tecnologias, de forma a não as tornar economicamente inviáveis.

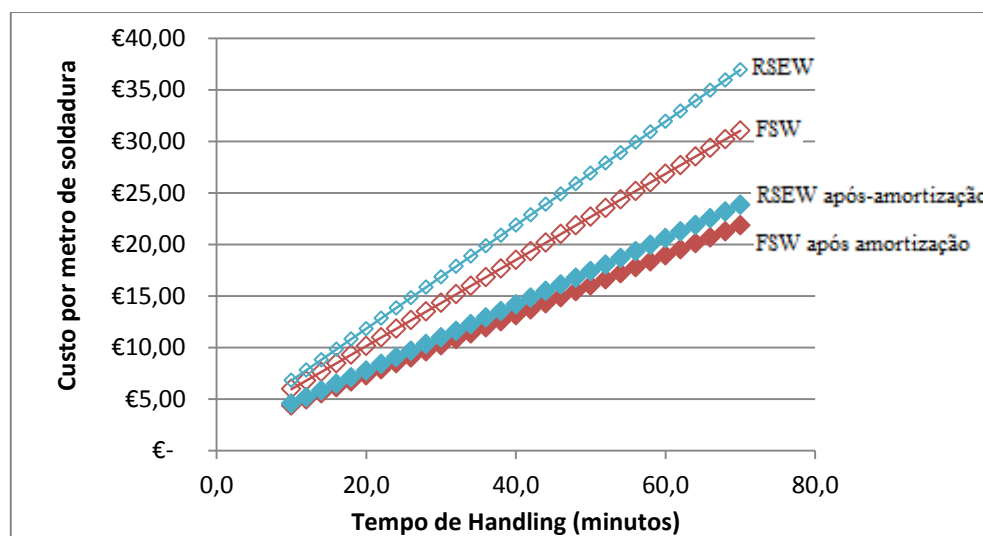


Figura 4.13 Influência do tempo de *handling* no custo por metro de soldadura aplicado em aço.

4.2.1.5. Volume de produção

Na Figura 4.14 mostra-se a influência do volume de produção durante e após o período de amortização, sobre o custo final da soldadura. Com base nesta mesma figura, pode concluir-se que, quanto maior o volume de produção, menor o custo por metro de soldadura. Este comportamento verifica-se em ambos os períodos, embora a influência seja mais acentuada durante o período de amortização. A enorme influência deste parâmetro no custo é devido à sua relação direta com as componentes de custo apresentadas na Figura

4.1. Com efeito, quanto maior o volume de produção, maior a quantidade de metros de soldadura realizada por ano (Msa) por ano, e conseqüentemente, menor será o custo por metro de soldadura. Este parâmetro revela que estas tecnologias só devem ser aplicadas caso o volume de produção previsto seja elevado. Neste estudo o volume de produção anual deverá ser sempre superior a 1000 peças.

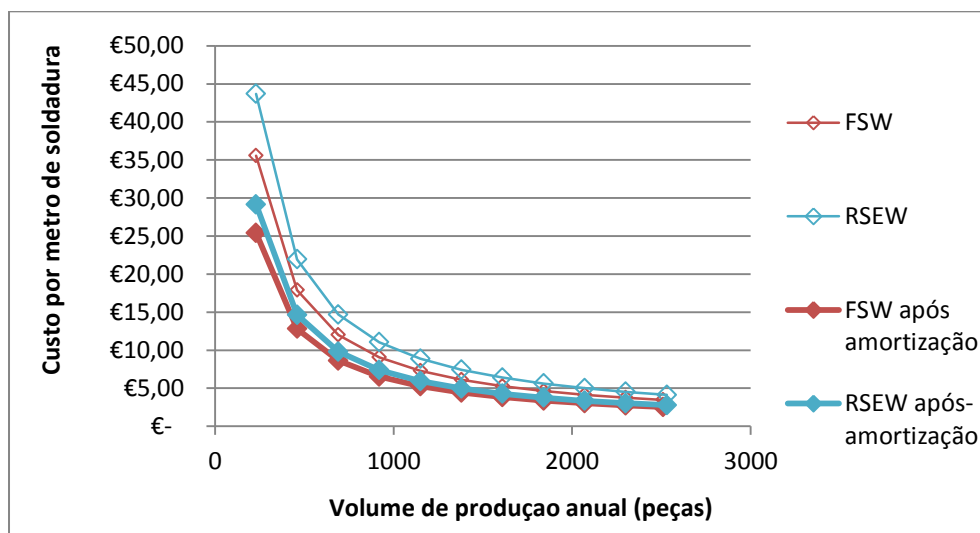


Figura 4.14 Influência do volume de produção no custo por metro de soldadura aplicado em aço.

4.2.2. Soldadura de alumínio

De forma análoga ao caso anterior, neste item será apresentada a influência dos diversos parâmetros que influenciam o custo final da soldadura em alumínio.

4.2.2.1. Velocidade de soldadura

A Figura 4.15 apresenta a influência da velocidade no custo final da soldadura de alumínio. Com base na figura, verifica-se, como seria de esperar, uma diminuição do custo com o aumento da velocidade da soldadura, apresentando, como no caso anterior, menor influência durante o período após amortização. No entanto, este parâmetro pode ser considerado pouco influente, pois a soldadura deste material, em condições normais, pode ser realizada a grandes velocidades. Comparativamente à soldadura em aço, este parâmetro também apresenta pouca influência no custo final da soldadura. No entanto, após o período de amortização, a diferenças das curvas de custo, para a soldadura de aço e alumínio, apresentam um maior desfasamento, devido ao encarecimento provocado pelos custos energéticos, na soldadura de alumínio por RSEW.

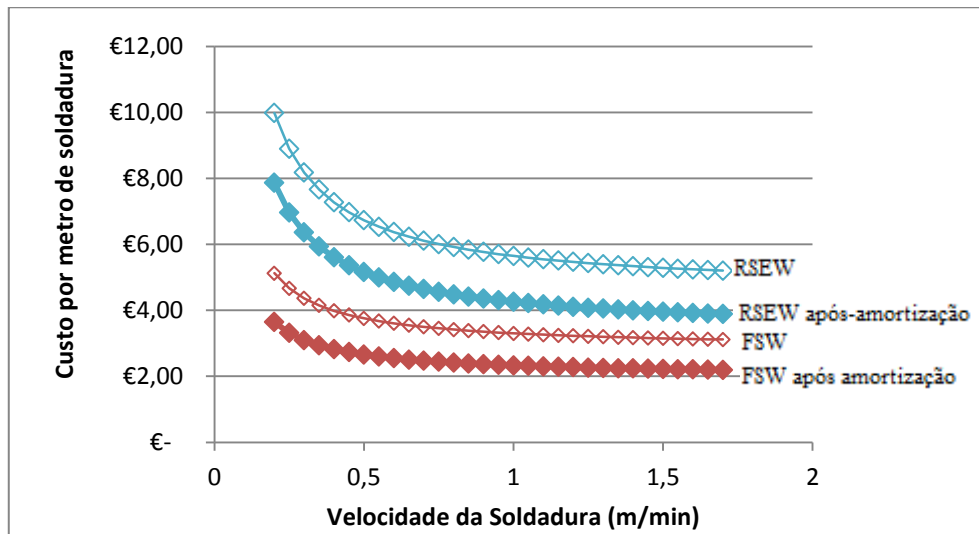


Figura 4.15 Influência da velocidade de soldadura no custo por metro de soldadura aplicado em alumínio.

4.2.2.2. Potência do equipamento

Na Figura 4.16 mostra-se a influência da potência do equipamento no custo por metro de soldadura. É possível concluir que, para este caso, a influência da potência é superior na tecnologia RSEW, durante, e após o período de amortização, devido à necessidade deste equipamento operar com potências mais elevadas e pelo tarifário da energia elétrica ser diferente. Para este caso, o custo por metro de soldadura, em ambos os períodos analisados, será sempre superior na tecnologia RSEW, qualquer que seja a potência utilizada. Comparativamente à soldadura em aço, este parâmetro apresenta maior influência no custo da soldadura, devidas as razões anteriormente referida.

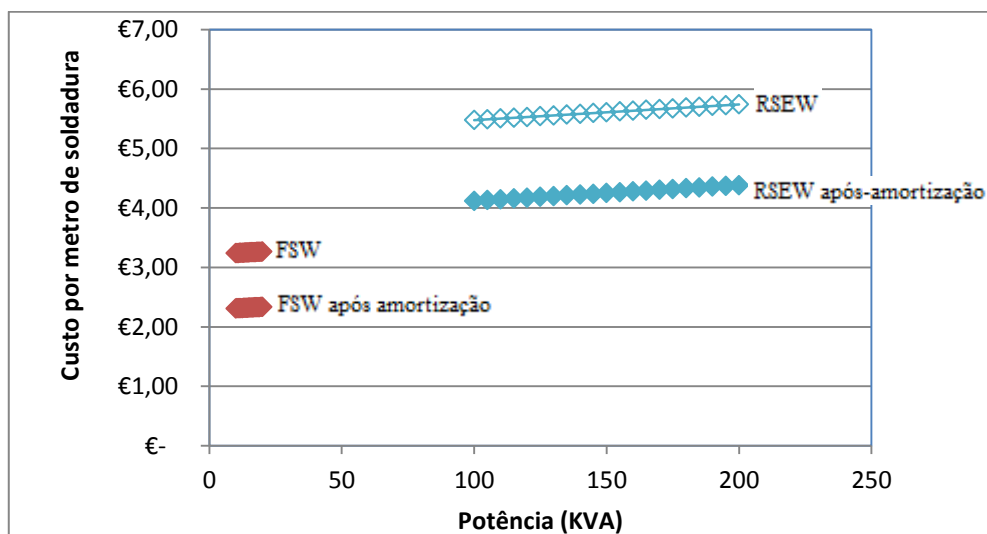


Figura 4.16 Influência da potência do equipamento no custo por metro de soldadura aplicado em alumínio.

4.2.2.3. Vida útil da ferramenta

Analisando a influência da vida útil da ferramenta apresentada na Figura 4.17, verifica-se uma diminuição do custo por metro de soldadura com o aumento da vida útil da ferramenta, quer durante, quer após o período de amortização. Em ambas as tecnologias existe pouca variação no custo final da soldadura, podendo-se assim considerar este parâmetro como pouco importante. Analogamente à soldadura em aço, neste caso a tecnologia FSW apresenta uma menor influência no custo por metro de soldadura, devido à melhoria na relação preço/vida útil, pois é uma ferramenta substancialmente mais barata, quando comparada com a ferramenta utilizada na soldadura em aço.

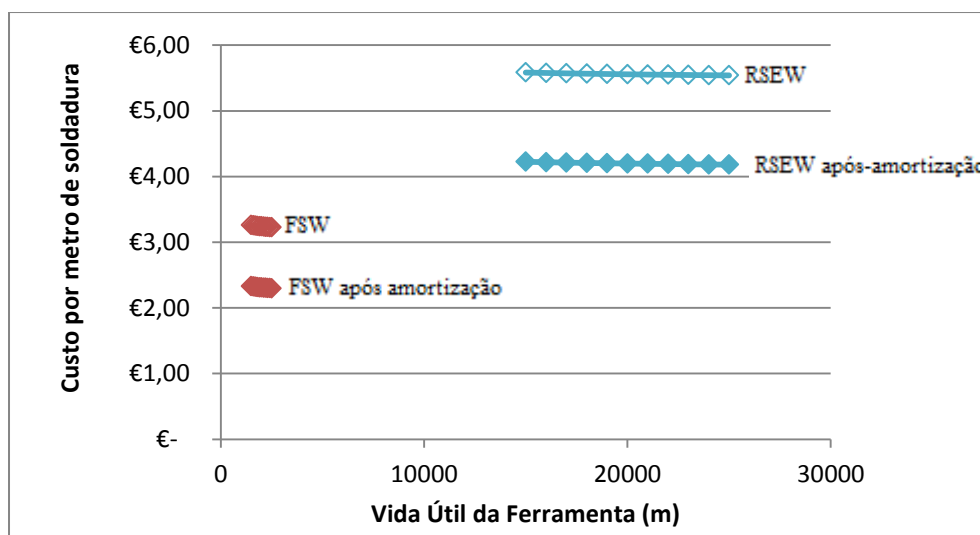


Figura 4.17 Influência da vida útil da ferramenta de no custo por metro de soldadura aplicado em alumínio.

4.2.2.4. Tempo de *handling*

Na Figura 4.18 encontra-se apresentada a influência do tempo de *handling* no custo final da soldadura. De acordo com a figura, o tempo de *handling* apresenta um elevado impacto no custo, durante e após o período de amortização, em ambas as tecnologias. Em termos de custo por metro de soldadura, a tecnologia RSEW será sempre mais cara, em ambos os períodos analisados. Comparativamente à soldadura em aço, esta apresenta o mesmo comportamento, sendo obrigatória a otimização deste parâmetro, para a diminuição do custo económico da soldadura e consequente viabilidade económica do processo. Embora o comportamento deste parâmetro na soldadura de aço e alumínio seja

semelhante, na soldadura de alumínio as curvas de custo apresentam um maior desfasamento, particularmente mais acentuado no período após amortização. Este comportamento é justificado pelo custo final da soldadura de alumínio ser superior, comparativamente a soldadura de aço, devido ao encarecimento dos custos energéticos.

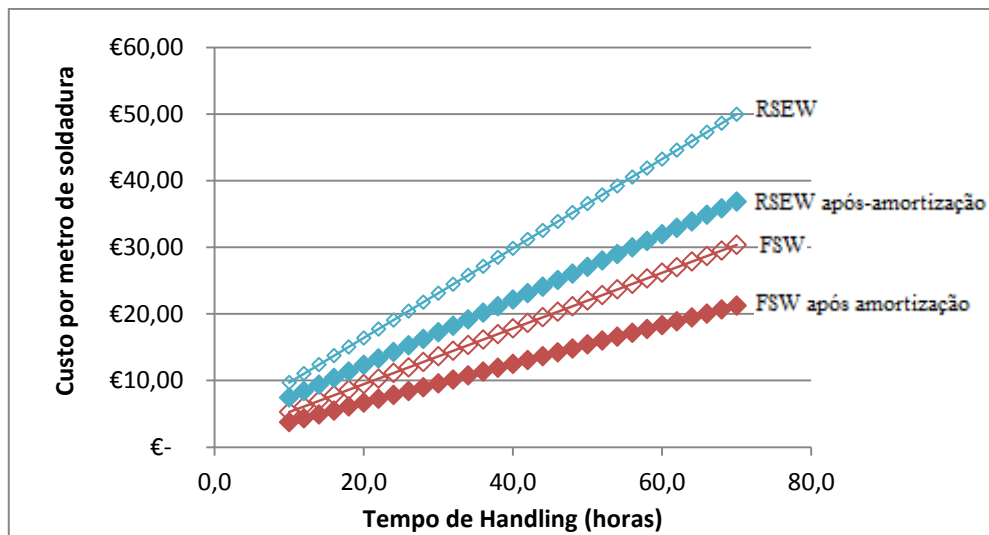


Figura 4.18 Influência do tempo de *handling* no custo económico da soldadura aplicado em alumínio.

4.2.2.5. Volume de produção

Com base na Figura 4.19, pode concluir-se que a influência do volume de produção apresenta um peso elevado sobre o custo por metro de soldadura para ambas as tecnologias. Da mesma forma que para a soldadura em aço, estas tecnologias só devem ser implementadas caso esteja prevista uma elevada utilização, pois são tecnologias que requerem avultados investimentos que devem ser amortizados o mais rapidamente possível, embora seja necessário um maior volume de produção para a tecnologia RSEW, devido a apresentar um custo por metro de soldadura superior em ambos os períodos. O volume de produção para a viabilidade económica da soldadura deverá ser sempre superior as 1200 unidades para a tecnologia RSEW e de 1000 unidades para a tecnologia FSW. Comparativamente a soldadura de aço, o comportamento deste parâmetro é semelhante, havendo apenas um maior desfasamento entre as curvas de custo na soldadura de alumínio, provocado pelo aumento do custo da soldadura na tecnologia RSEW.

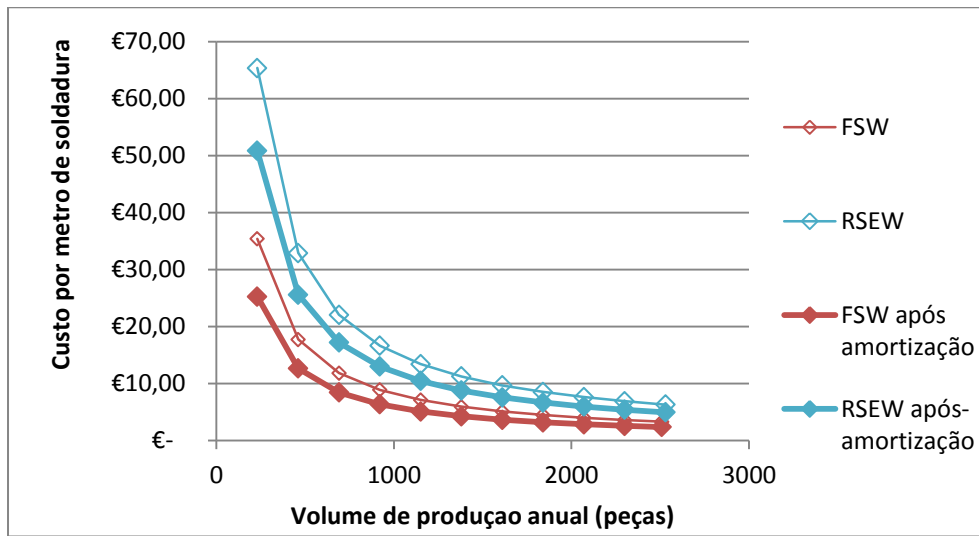


Figura 4.19 Influência do tempo do volume de produção no custo económico da soldadura aplicado em alumínio.

5. ANÁLISE DE VIABILIDADE

Neste capítulo será apresentado uma análise de viabilidade técnico-económica para as tecnologias FSW e RSEW. Esta análise permite determinar qual a tecnologia que apresenta melhores características técnico-económicas.

Na Figura 5.1, mostra-se um gráfico em forma de aranha, com as características mais importantes para o estudo da viabilidade técnico-económica. As características consideradas são o custo económico inerente às tecnologias, a sua versatilidade, as suas limitações, os seus campos de aplicação e o seu desenvolvimento futuro. Estas características são quantificadas de 1 a 5, sendo 5 o valor mais positivo. Com base na figura é possível concluir que a tecnologia FSW é a melhor aposta, em termos técnico-económicos, para o caso em estudo. Em termos de custo económico, de acordo com os cálculos efetuados no capítulo anterior, é possível concluir que, a tecnologia FSW apresenta um custo por metro de soldadura, quer para o aço, quer para o alumínio, inferior, não só pelo investimento em equipamento ser inferior, mas também pela baixa potência com que o equipamento opera, não encarecendo de forma considerável os custos energéticos associados ao equipamento.

Em termos técnicos, a tecnologia FSW apresenta também uma versatilidade superior à da tecnologia RSEW, devido ao facto de permitir soldar uma maior gama de materiais. No que concerne às limitações destas tecnologias, não existem grandes discrepâncias, sendo a maior limitação na tecnologia FSW a necessidade de um sistema rígido de fixação, para o correto posicionamento dos MB. Para a tecnologia RSEW, a maior limitação deste processo, prende-se na necessidade da soldadura ser realizada apenas em planos simples e uniformes.

A tecnologia FSW, apesar de recente, é utilizada em inúmeras indústrias, nomeadamente a ferroviária, a automóvel, a aeroespacial e a naval, onde veio a ter um impacto positivo e uma crescente procura na sua aplicação, embora a utilização desta tecnologia tenha sido um pouco limitada a grandes empresas, devido ao elevado custo da licença emitida pela TWI e à necessidade de financiar todo o trabalho de desenvolvimento do procedimento de soldadura e caracterização mecânica da soldadura. No que concerne a

tecnologia RSEW, esta já se encontra numa fase madura da sua utilização, no entanto, não apresenta um campo de aplicação tão vasto como a tecnologia anterior.

Em termos de desenvolvimento futuro, a tecnologia FSW, continuará a crescer, não só pela crescente necessidade de soldar novos materiais e oferecer novas soluções às indústrias, mas também pelo elevado interesse científico que esta tecnologia desperta, garantindo assim o seu desenvolvimento. Analogamente, a tecnologia RSEW, não apresentará grande desenvolvimento no futuro, não só pelo limitado campo de aplicação, mas também pelo pouco interesse em termos de estudos de investigação que apresenta.

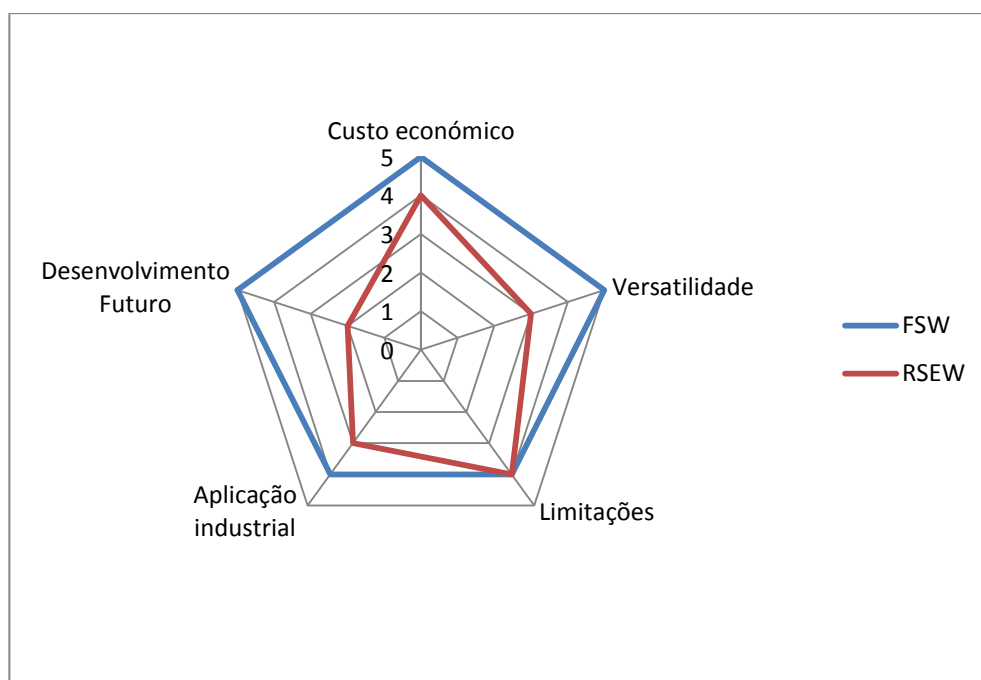


Figura 5.1 Análise técnico-económica das tecnologias FSW e RSEW.

6. CONCLUSÕES

A realização deste estudo permitiu determinar o custo por metro de soldadura, para as tecnologias FSW e RSEW, na ligação de chapas de alumínio ou aço, durante, e após o tempo de amortização do equipamento e realizar uma análise de viabilidade técnica.

O custo final da soldadura obtido para a tecnologia FSW, na ligação de aço, foi de 3.48 €/m, durante o período de amortização, e 2.43 €/m, para o período após amortização. Na ligação de alumínio, o custo final da soldadura obtido foi de 3.15€/m e 2.22 €/m, para o período antes e após amortização, respetivamente. A diferença no custo final da soldadura do aço, relativamente à do alumínio, deve-se à disparidade no custo da ferramenta, que passou de 432€ para a soldadura de aço para 61.5€ para a soldadura de alumínio, apresentando ainda vidas úteis semelhantes. No entanto, a ferramenta utilizada para a soldadura de aço trata-se de um protótipo, sendo que a compra em lote irá reduzir consideravelmente o seu custo unitário, e consequentemente o custo final da soldadura. Outra causa é a maior velocidade de soldadura na ligação de alumínio, que permite obter uma maior taxa de produtividade.

No que concerne ao custo por metro das soldaduras efetuadas com a tecnologia RSEW, na ligação de aço, foi obtido um custo de 3.94 €/m, no período de amortização, e 2.58 €/m, no período após a amortização. Na ligação do alumínio, o custo final da soldadura obtido foi de 5.47€/m, para o período de amortização, e 4.11€/m, para o período após amortização. O maior custo na ligação de alumínio, deve-se à maior potência requerida pelo equipamento, para viabilizar a soldadura, encarecendo assim consideravelmente o seu custo final.

Em termos de custos por metro de soldadura, em ambos os períodos analisados, a tecnologia RSEW, apresentou um custo final superior. Isto deve ao investimento em equipamento e ao consumo energético serem superiores, encarecendo assim a soldadura. No entanto, considera-se que o equipamento da tecnologia FSW resultará da adaptação de uma fresadora CNC, o que em termos de custo de investimento, é consideravelmente inferior a um equipamento comercial da tecnologia FSW. Em termos teóricos, o aumento

deste custo, encarecia no período de amortização, o custo por metro da soldadura na ligação quer do aço, quer do alumínio.

Com base na análise da distribuição de custos realizada para estas tecnologias, concluiu-se que, para o período de amortização, as variáveis típicas com maior influência foram os custos laborais e os custos relacionados com o investimento no equipamento. As restantes componentes de custos apresentaram influência residual no custo final da soldadura. Durante o período após a amortização, o comportamento foi semelhante, diferindo apenas na exclusão da componente do investimento. Este comportamento apenas não se verificou na soldadura de alumínio, com a tecnologia RSEW, onde os custos energéticos são dominantes, devido à elevada potência requerida pelo equipamento, que encarecem a soldadura e os custos relacionados com a energia.

Através da análise da influência dos parâmetros mais importantes que afetam o custo final da soldadura, concluiu-se que o tempo de *handling* e o volume da produção são os que apresentam maior influência. O custo final da soldadura diminui com a diminuição de tempo de *handling*, sendo necessária a otimização deste parâmetro, de forma a tornar o custo da soldadura o mais competitivo possível. O aumento do volume de produção também diminui o custo por metro de soldadura. Com este parâmetro foi possível concluir que, estas tecnologias apenas apresentam viabilidade económica, quando a taxa de utilização do equipamento prevista seja elevada, caso contrario, é considerado um investimento com uma rentabilidade nula. A vida útil da ferramenta demonstrou pouca influência no custo da soldadura, devido à excelente relação preço/vida útil que esta apresenta para qualquer das tecnologias. De igual forma, a velocidade da soldadura apresenta pouca influência no custo por metro de soldadura, devido à capacidade de soldar os materiais com elevada velocidade na aplicação em causa neste trabalho. No que concerne ao parâmetro da potência, este apenas revelou um peso significativo na soldadura por RSEW de alumínio, devido à potência requerida pelo equipamento ser elevado.

Em suma, de acordo com os cálculos efetuados, a tecnologia FSW apresenta um custo final de soldadura inferior ao da tecnologia RSEW, e em termos de viabilidade técnica também representa uma melhor solução, ou seja, esta tecnologia permite soldar qualquer tipo de material metálico, quer em configurações similares, quer em configurações dissimilares. Esta última possibilidade é, de facto, um dos maiores trunfos associados à aposta industrial. Esta tecnologia não deve ser vista apenas como uma solução

do presente, mas também como uma solução tecnológica do futuro, capaz de acompanhar as necessidades que as indústrias irão desencadear no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TWI Global, “*Friction Stir Welding*” [Online]. Available: <http://www.twi-global.com/technologies/welding-surface-engineering-and-material-processing/friction-stir-welding/>. [Accessed: 3-Mar-2014]
- [2] F. Caldeira, “Ligação por Friction Stir Welding de chapas finas em juntas sobrepostas,” Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências E Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2013.
- [3] S. Shag and S. Tosonoglu, “*Friction Stir Welding: Current State of The Art and Future Prospects*”, The 16th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, 2012.
- [4] A. Fioravanti, “Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA2024-T3 E AA7075-T6”, Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- [5] C. Fuller, “*Friction Stir Tool: Tool Materials and Design*”, in *Friction Stir Welding and Processing*, pp 7-29.
- [6] B. Gibsona,, D.H. Lammleinb, T.J. Praterc, W.R. Longhurstd, C.D. Coxa, M.C. Balluna, K.J. Dharmaraja, G.E. Cooka, A.M. Straussa, “*Friction stir welding: Process, automation, and control*” in *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 16, 2014, pp. 56–73.
- [7] H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maedac, K. Nakata, K. Nogi, “*Friction stir welding of carbon steels*” in *Materials Science and Engineering*, vol. 429, 2006, pp 50–57.
- [8] K. Colligan, “*The friction stir welding process: an o overview*” in *Friction stir Welding From basics to applications*, pp 15-38.
- [9] W. Lee, S. Jung, “*The joint properties of copper by friction stir welding*”, in *Materials Letters*, vol. 58, 2004, pp. 1041– 1046.
- [10] R. Mishra, Z. Ma, “*Friction stir welding and processing*” in *Materials Science and Engineering*, vol. 50, 2005, pp. 1–78.
- [11] S. W. Kallee, “*Industrial applications of Friction Stir Welding*”, in *Friction Stir Welding From basics to applications*, pp 118-163.
- [12] T. Kawasaki, T. Makino, K. Masai, H. Odba, Y. Ina, M, Ezumi. “*Application Of Friction Stir Welding to Construction of Railway Vehicles*” In *JSME International Journal, Serie A*, Vol 7, nº43, 2004.
- [13] Documento fornecido pelo TWI.
- [14] H Hori & H Hino, “*Application of friction stir welding to the car body*”, *Welding International*, 2003, pp 287-292,

- [15] A. Peixoto, “Estudo de Parâmetros de Soldadura por Resistência, variantes” Relatório de projeto para a obtenção de Grau de Mestre em Engenharia e por pontos Gestão industrial, Universidade de Aveiro.
- [16] “*Welding Workbook: Resistance Seam*” in Resistance Welding Manual, revised 4th edition.
- [17] D. Beneteau, “*Resistance Seam Welding*”, in ASM Metal Handbook, Vol 6.
- [18] Catalogo SPOTWELD Incorporated.
- [19] “Resistance Welding Manual” by Ruukki.
- [20] K. Wesman, “*Pressure Welding Methods*” in Welding Process Handbook, pp 80-92.
- [21] M. Gene, “*Resistance welding processes*”, in The welding of aluminium and its alloys, pp 166- 180
- [22] TWI Global, “*Resistance Welding*” [Online]. Available:
<http://www.twi-global.com/technologies/welding-surface-engineering-and-material-processing/resistance-welding> [Accessed: 23-Mar-2014]
- [23] P. Tipaji, “*E-Design Tools For Friction Stir Welding: Cost Estimation Tool*”, dissertação para a obtenção de grau de mestre em Engenharia de processos, University of Missouri, 2007.
- [24] A. Niazi and J. Dai, “*Product Cost Estimation: Technique Classification And Methodology Review*”, in Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, 2006, pp. 563.
- [25] A. Toumpis, A. Galloway, S. Cater, L. Molter, “*A techno-economic evaluation of friction stir welding of DH36 steel*”
- [26] M. Mahoney, S. Sanderson, S. Larsen, R. Steel, Z. Feng, A. Wasson, D. Fairchild, S. Packer, D. Fleck, “*Methods to Friction Stir Weld Onshore and Offshore Steel Linepipe with Consistent Full Penetration*” in 10th International Symposium on Friction Stir Welding Beijing, China, 2014, pp. 20-22.
- [27] J Santos and L. Quintino, “Soldadura por Resistência” in Processo de Soldadura, Vol II.