



Estudo comparativo de utilização de SER, MIG/MAG e Friction Surfacing na reparação de braços de suspensão de VBTP-M113.

João Miguel Rebola Santo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Prof. Doutor Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Doutora Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida

Co-Orientador: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda

Vogal: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos

Vogal: Tenente Coronel Engenheiro de Material João Paulo Barreiros Pereira da
Silva

Setembro 2013

Agradecimentos

Quero agradecer à minha orientadora, Professora Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida, pelo apoio, empenho e partilha de conhecimentos que em muito contribuíram para a realização deste trabalho.

A minha coorientadora Professora Rosa Maria Mendes Miranda, um profundo agradecimento pela disponibilidade que sempre demonstrou na resolução de problemas que surgiram ao longo de todo este período, bem como pelos vastos conhecimentos partilhados sobre a fenomenologia dos materiais

Um agradecimento ao meu diretor de curso Tenente Coronel Material Pereira da Silva, que me sugeriu o tema para o trabalho muito aliciante e que foi o elo de ligação entre mim e as OGME.

Um profundo obrigado ao colega de mestrado e futuro doutorado João Pedro Machado da Gandra pela ajuda indispensável na produção dos revestimentos bem como na análise dos resultados.

Agradeço a Professora Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante pela assistência indispensável para a realização dos ensaios mecânicos bem como pela partilha de conhecimentos e ajuda prestada.

Ao Professor Rui Jorge Cordeiro Silva pelo apoio nas análises EDS.

Um sentido agradecimento às OGME, pela partilha de conhecimentos bem como por todo o apoio prestado ao longo deste projeto, onde realizei grande parte dos revestimentos testados.

Um agradecimento especial ao Sr. António Guinapo Campos e Paulo M. G. Magalhães por toda a assistência na resolução dos mais diversos desafios.

Aos meus colegas e futuros Mestres Nuno Ramos, Diogo Pereira e Tiago Almeida entre muitos outros que me acompanharam durante todo o curso e em especial na realização deste projeto um profundo obrigado pela amizade que se preservou e desenvolveu bem como pela ajuda prestada.

Por fim a minha família e amigos um agradecimento especial pelo apoio e incentivos permanentes que ajudaram ao bom desenvolvimento deste estudo.

Resumo

Nas últimas décadas Friction Surfacing despertou bastante interesse por permitir revestir metais no estado sólido desenvolvendo-se a temperaturas inferiores às de fusão, evitando assim as afetações que daí advêm.

No presente trabalho existem dois blocos principais, um primeiro onde se caracterizou o material do braço de suspensão do M113, e um segundo onde se produziram revestimentos recorrendo às três técnicas de revestimento em estudo (FS, Fios Fluxados e SER), com o objetivo de se proceder ao seu estudo e comparação.

No processo de caracterização do aço do braço, foram realizados diversos ensaios, dos quais se salientam os ensaios de durezas Vickers e os ensaios de faiscamento, concluindo-se que o aço que mais se assemelha com o do braço é o AISI 4140.

Para a caracterização dos revestimentos foram definidos diferentes tipos de ensaios, Metalúrgicos e Mecânicos, com a finalidade principal de abranger uma ampla gama de solicitações semelhantes às que são requeridas ao componente em serviço.

Nos ensaios Metalúrgicos foram avaliadas as ligações, a existência de defeitos, as ZTA e as alterações metalográficas.

A avaliação das propriedades mecânicas foi obtida através de ensaios de dureza, desgaste, flexão em três pontos e Push-Pull.

Da realização destes ensaios verificou-se que os revestimentos obtidos por FS apresentam melhores propriedades, tanto Metalúrgicas como Mecânicas

Por fim, foi elaborada uma avaliação dos custos operacionais envolvidos na realização da reparação de um braço de suspensão, concluindo-se que FS, apesar de apresentar os revestimentos com melhores propriedades, é ainda uma tecnologia pouco viável economicamente, fato que se deve á baixa eficiência apresentada.

Palavras chave

Revestimento

Desgaste

Durezas

Friction Surfacing

SER

Fios fluxados

Abstract

In the last decades, Friction surfacing arouse great interest by allowing the coating of solid state metals below the melting temperatures, thereby preventing damages.

In this work we aimed at identifying the material of the suspension arm test three coating techniques (FS, Fluxed cored wires and SMAW) in order to compare and study their performance.

Several tests were performed to properly characterize the steel of the arm, of which the most important were the Vickers hardness test and the spark test, both of them indicate that the steel that most resembles the arm is AISI 4140.

In order to characterize the different coatings it's necessary to use different testing procedures, metallurgical and mechanical, therefore being able to cover the wide range of requests similar to those required when the component is in service.

Metallurgical tests aimed to analyze the interface, the existence of defects, the ZTA and the structural modifications.

The mechanical properties were evaluated by testing the hardness, the wear, three point bending and Push-Pull.

The tests performed demonstrated that the coatings obtained by using the FS technic presented the best mechanical and metallurgical properties.

In conclusion, a review of the operational costs involved for the coating of one arm was presented, concluding that FS, despite producing coatings with improved properties, is still an economically unfeasible technology, due to the low efficiency demonstrated.

Keywords

Coatings

Wear

Hardness

Friction Surfacing

SMAW

Fluxed cored wires

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Palavras chave.....	ii
Abstract	iii
Keywords	iii
Índice de Tabelas.....	vii
Índice de Figuras.....	viii
Lista de acrónimos e siglas.....	xi
Lista de Símbolos.....	xii
Capítulo 1	1
1. Introdução.....	1
1.1. Definição do problema.....	1
1.2. Motivação e Objetivos	3
1.3. Estrutura da Dissertação	3
Capítulo 2.....	4
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Introdução	4
2.2. M113	4
2.2.1. História e Evolução.....	4
2.3. Processos de Revestimentos	6
2.3.1. Evolução dos Processos de Soldadura	6
2.3.2. Friction Surfacing.....	6
2.3.2.1. Processo Termomecânico	8
2.3.2.2. Evolução Microestrutural	9
2.3.2.3. Parâmetros do Processo	11
2.3.2.3.1. Influência dos Parâmetros no Processo.....	12
2.3.2.3.2. Força Axial.....	12
2.3.2.3.3. Velocidade de Rotação.....	13
2.3.2.3.4. Velocidade de Avanço	14
2.3.2.4. Diâmetro do Pino Consumível	15
2.3.2.5. Vantagens e Desvantagens de FS.....	16

2.3.3.	Estudo de Caso e Aplicações Industriais	17
2.3.4.	Revestimentos/ Soldaduras de Aço de Baixa Liga.....	19
Capítulo 3	.....	22
3.	Procedimento Experimental	22
3.1.	Introdução	22
3.2.	Caraterização do Material Base	22
3.2.1.	Ensaio de Dureza Vickers.....	22
3.2.2.	Ensaio de Macroscópica Eletrónica de Varrimento (EDS)	23
3.2.3.	Ensaio de Faiscamento	23
3.3.	Realização dos Revestimentos	23
3.3.1.	FS.....	24
3.3.1.1.	Medição da Temperatura com Termopar	26
3.3.2.	Fios Fluxados.....	27
3.3.3.	SER.....	28
3.4.	Avaliação dos Revestimentos.....	28
3.4.1.	Macro e Microscópica Ótica	28
3.4.2.	Ensaio de Dureza Vickers.....	28
3.4.3.	Ensaio de Desgaste	29
3.4.4.	Ensaio de Flexão em Três Pontos.....	31
3.4.5.	Ensaio Push-Pull.....	33
Capítulo 4	.....	34
4.	Resultados e Discussão	34
4.1.	Introdução	34
4.2.	Caracterização do Material Base.....	34
4.2.1.	Material Adquirido	35
4.3.	Friction Surfacing Análise de Parâmetros	36
4.4.	Caracterização dos Revestimentos	39
4.4.1.	Ensaio de Caraterização Metalográfica	39
4.4.1.1.	FS	39
4.4.1.1.1.	Análise da Temperatura Obtida em FS	43
4.4.1.1.2.	FS Multi Passe.....	44

4.4.1.2.	Fios Fluxados.....	45
4.4.1.3.	SER.....	47
4.4.2.	Caracterização Mecânica	48
4.4.2.1.	Ensaio de Desgaste	49
4.4.2.2.	Ensaio de Flexão em três pontos	51
4.4.2.3.	Ensaio Push-Pull.....	52
4.5.	Análise Energética	54
4.5.1.	FS.....	54
4.5.1.	Fios Fluxados.....	57
4.5.2.	SER.....	57
4.6.	Análise de Custos Operacionais por Cada Braço Reparado	57
4.6.1.	Análise de Custos Operacionais por Cada Braço Revestido	58
4.6.1.1.	FS	58
4.6.1.2.	Fios Fluxados.....	59
4.6.1.3.	SER.....	59
4.6.2.	Custos com a Maquinagem Após Revestimento.....	60
4.7.	Comparação de Resultados	60
4.8.	Conclusões	61
Capítulo 5	.....	62
5.	Conclusões	62
5.1.	Perspetivas de Trabalhos Futuros.....	64
Bibliografia	.....	65
ANEXO A	.....	67
ANEXO B	.....	68
ANEXO C	.....	70

Índice de Tabelas

Tabela 2-1 Efeito da massa sobre as propriedades típicas do aço AISI 4140 tratado termicamente, adaptado de [34]	20
Tabela 3-1 Parâmetros usados nos revestimentos por FS	25
Tabela 3-2 Parâmetros utilizados nos revestimentos com Fios fluxados.....	27
Tabela 3-3 Parâmetros usados nos ensaios de desgaste.....	30
Tabela 4-1 Resultados dos ensaios de faiscamento	35
Tabela 4-2 Comparação das composições químicas do aço do veio com aço AISI 4140 [21]	35
Tabela 4-3 Resultados das medições dos comprimentos revestidos vs. ligado	36
Tabela 4-4 Macrografias dos revestimentos teste com respetivo código.....	37
Tabela 4-5 Resultados dos ensaios de desgaste com os parâmetros de teste	49
Tabela 4-6 Valores médios para o coeficiente de atrito (regime estacionário)	50
Tabela 4-7 Cargas resultantes dos ensaios de flexão.....	51
Tabela 4-8 Cargas resultantes dos ensaios Push-Pull.....	53
Tabela 4-9 Resultados dos cálculos efetuados para a obtenção da eficiência do revestimento e respetiva eficiência.....	56
Tabela 4-10 Resultados obtidos para o consumo específico em FS	56
Tabela 4-11 Valor obtido para o consumo específico em Fios Fluxados e respetivos valores usados no seu cálculo.....	57
Tabela 4-12 Valor obtido para o consumo específico em SER e respetivos valores usados no seu cálculo.	57
Tabela 4-13 Dados económicos usados para os cálculos (valores com iva).....	58
Tabela 4-14 Estimativa de custos para cada braço revestido com FS, para um processo ideal e para um real.	58
Tabela 4-15 Estimativa de custos para cada braço revestido com Fios Fluxados.....	59
Tabela 4-16 Estimativa de custos para cada braço revestido com SER.....	59
Tabela 4-17 Parâmetros de torneamento e potência do torno	60
Tabela 4-18 Cálculos económicos do torneamento de desbaste/retificação	60
Tabela 4-19 Custos Operacionais por Cada Braço reparado.....	60
Tabela 4-20 Tabela resumo da pontuação obtida por cada processo de revestimento	61

Índice de Figuras

Figura 1-1 Desenho de um veio com a indicação de dimensões e as respectivas zonas a revestir.....	2
Figura 2-1 Evolução do M113 [38].....	5
Figura 2-2 Expansão da tecnologia da soldadura, adaptado de [37].....	6
Figura 2-3 Friction surfacing em AISI 4140 sobre AISI 4140 multipasse. (I) Início da rotação, (II) início do contacto, (III), deformação inicial, (IV) deposição.....	7
Figura 2-4 Desenvolvimentos termomecânicos em FS de aço. [11].....	9
Figura 2-5 Comparação entre (a) microestrutura original de um pino de H13 (b) microestrutura do depósito de FS com pino em AISI H13 sobre aço ferramenta, obtidas por SEM [15].....	10
Figura 2-6 Perfil de durezas Vickers na interface revestimento substrato [16].	11
Figura 2-7 Parâmetros e variáveis de FS.....	11
Figura 2-8 Efeito da força axila sobre a morfologia da secção transversal do revestimento e interface. FS de aço carbono sobre aço carbono. Com pino consumível de 10mm, com uma velocidade de rotação de 2500 rev/min e uma velocidade de avanço de 4,2 mm/s [14].....	12
Figura 2-9 Efeito da força axial sobre a espessura da ZTA [20].....	13
Figura 2-10 Efeito da velocidade de rotação na rugosidade e na largura da superfície depositada. FS de AISI H13 sobre aço macio. Pino consumível com 18 mm de diâmetro, força axial de 10 kN e 4 mm/s de velocidade de avanço [15].....	13
Figura 2-11 Efeito da velocidade de avanço em (a) largura ligada (b) espessura. FS de aço inox austenítico AISI 310 sobre aço de baixo carbono, usando um pino consumível de 18 mm de diâmetro, 10 kN de força axial e uma velocidade de rotação de 800 rev/min [21]....	14
Figura 2-12 Efeito da velocidade de avanço na resistência da ligação ao corte na deposição em (a) aço inox austenítico AISI 310 [21], (b) aço ferramenta de trabalho a quente AISI H13 sobre aço macio [15].....	14
Figura 2-13 Principais modos de falha à flexão encontrados na deposição de AISI H13 sobre aço macio. (a) no revestimento e (b) na interface [15].....	15
Figura 2-14 Efeito do diâmetro do pino consumível e da velocidade de avanço na austenitização. (a) relação analítica entre gasto no domínio austenítico a velocidade de avanço e o diâmetro do pino, (b) o efeito da distância ao centro (dc) de um pino com 32 mm de diâmetro, (c) efeito do diâmetro do pino [11].	15
Figura 2-15 Definição de revestimento utilizável e zona não ligada [24].....	17
Figura 2-16 Reparação de pás de turbinas por FS (a) Secção transversal de um depósito no gume de uma lamina e (b) lamina reparada.....	18
Figura 2-17 Método de formação de um bordo de fuga numa lamina de uma turbina a vapor (a) configuração do depósito e (b) vista da secção que evidencia a parte terminada.....	18

Figura 2-18 FS de aço inoxidável sobre cilindros de aço macio com um robot Tricep TR805 (a) instalação e sistema de fixação (b) depósito (c) através de uma secção macrográfica da camada.....	19
Figura 2-19 Diagrama de Graville mostrando a suscetibilidade de fissuração a frio pelo hidrogénio de um aço. [35]	20
Figura 3-1 Durometro usado para realizar os ensaios de dureza (Vickers)	22
Figura 3-2 Máquina de soldadura por fricção linear ESAB LEGIOTM3UL.....	24
Figura 3-3 Revestimentos realizados para a definição de parâmetros de FS.....	25
Figura 3-4 Esquema do pino consumível utilizado na realização dos revestimentos FS	25
Figura 3-5 Esquema da instalação do termopar.....	27
Figura 3-6 Máquina de ensaios de desgaste.....	29
Figura 3-7 Máquina usada para os ensaios de flexão, com pormenor.	31
Figura 3-8 Esquema de extração de provete para os ensaios de flexão com pormenor após retificação.....	32
Figura 3-9 Esquema de equipamento usado nos ensaios de Push-Pull.....	33
Figura 4-1 Resultados dos ensaios de EDS	34
Figura 4-2 Esquema de medição de comprimento revestido e ligado	36
Figura 4-3 Esquema de inclusões e alinhamento de óxidos nos ensaios S3 e S6 respetivamente.....	38
Figura 4-4- Localização das indentações de dureza na macrografia do depósito.	39
Figura 4-5 Perfil de durezas FS	40
Figura 4-6 Micrografia de FS, (I) Zona média depósito, (II) Zona da extremidade superior do depósito, (III) Zona de transição depósito substrato, (IV- V) Zona termicamente afetada, (VI) Substrato.....	40
Figura 4-7 Perfil de durezas FS no depósito e na ZTA	41
Figura 4-8 Transformações macroestruturais na realização de FS com o material base e o depositado AISI 4140. (I) Material base do pino, (II) Zona de refinamento do grão, (III) Zona termicamente afetada, (IV) ZTMA por efeito da compressão, (V) Microestrutura totalmente recristalizada, (VI-VII) ZTMA por efeito da torção, (VIII) Material depositado, (IX) Interface entre material depositado e material base.....	42
Figura 4-9 Temperaturas lidas aquando da realização dos revestimentos FS	43
Figura 4-10 Diagrama de arrefecimento contínuo para AISI 4140 adaptado de [34].....	43
Figura 4-11 Esquema das indentações em FS multi passe	44
Figura 4-12 Perfil de durezas FS multi passe.....	44
Figura 4-13 Transformações microestruturais nos revestimentos com Fios Fluxados. (I) Zona de transição material depositado material base, (II) Zona de material depositado, (III) Zona termicamente afetada.	45
Figura 4-14 Perfil de durezas Fios Fluxados	46
Figura 4-15 Perfil de durezas Fios Fluxados, no revestimento e na ZTA	46
Figura 4-16 Transformações microestruturais nos revestimentos SER	47

Figura 4-17 Perfil de durezas SER	48
Figura 4-18 Perfil de durezas SER no revestimento e na ZTA.....	48
Figura 4-19 Micrografias do revestimento com Fios Fluxados e do MB	49
Figura 4-20 Resultado dos ensaios de desgaste (coeficiente de atrito).....	50
Figura 4-21 Gráficos dos ensaios de flexão nos revestimentos e no MB	51
Figura 4-22 Fotos dos provetes testados à flexão após os ensaios.	52
Figura 4-23 Gráficos dos resultados dos ensaios Push-Pull nos revestimentos.....	53
Figura 4-24 Fotos dos provetes testados nos ensaios de Push-Pull após ensaio	54

Lista de acrónimos e siglas

AC	Antes de Cristo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCC	Cubica de Corpo Centrado
CFC	Cubica de Faces Centradas
EDS	Electronic Data Systems
ESAB	Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget
FCTUNL	Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
FS	Friction Surfacing
FSCV	Feire Support Combat Vehicle
HMI	Human-machine interface
HTLA	Heat-treatable low-alloy
IST	Instituto Superior Técnico
MAG	Metal Active Gás
MB	Material Base
MEV	Microscópio eletrónico de Varrimento
MIG	Metal Inerte Gás
OGME	Oficinas Gerais de Material de Engenharia
REV/MIN	Revoluções por minuto
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SEM	Scanning electron microscopy
SER	Soldadura por Eléctrodo Revestido
SI	Sistema Internacional
URSS	União das Republicas Socialistas Soviéticas
VBTP	Viatura Blindada de Transporte de Pessoal
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termomecânica Afetada

Lista de Símbolos

A_d	Área da secção transversal depositada	mm ²
A_r	Secção transversal	mm ²
C_{eq}	Carbono equivalente	%
$C_{eq\ total}$	Carbono equivalente total	%
CP	Consumo do pino	g/s
$CPvol$	Taxa volumétrica de pino consumida	m ³ /s
EC	Energia específica	kJ/g
ET	Entrega térmica	J/mm
F_x	Força de avanço	N
F_z	Força axial	N
I	Intensidade de corrente	A
L_d	Largura depositada	Mm
L_l	Largura ligada	Mm
P	Potência	kW
r	Raio do pino	mm
TD	Taxa de deposição	g/s
TD_{vol}	Taxa de deposição volumétrica	mm ³ /s
V	Tensão	V
v	Velocidade média de soldadura	m/min
V_p	Velocidade periférica	m/s
V_z	Velocidade de descida do pino	cm/min
\dot{W}_e	Energia mecânica	kJ/s
\dot{W}_r	Rotação do varão consumível	kJ/s
\dot{W}_x	Deslocamento segundo o eixo x	kJ/s
\dot{W}_z	Deslocamento segundo o eixo z	kJ/s
Δl	Comprimento de eléctrodo	mm
Δt	Intervalo de tempo	s
$\eta_{DEposição}$	Eficiência de deposição	%
$\eta_{fios\ fluxados}$	Eficiência de Fios Fluxados	%
$\eta_{Revestimento}$	Eficiência do revestimento	%
ρ	Densidade do pino	Kg/m ³
v	Velocidade de avanço	cm/min
ω_m	Velocidade angular do motor	rev/min
ω_p	Velocidade angular do prato	rev/min

Capítulo 1

1. Introdução

Cada vez mais se tem vindo a verificar na sociedade atual um crescente aumento do consumismo, a ideia do produto descartável. No entanto, em muitos casos, por motivos de diferentes ordens económica, tecnológica, entre outras, não nos é possível adquirir novos componentes e surge daí a necessidade de se ter que reparar, reconstruir. Apesar de existir esta tendência de fabrico de produtos com vida finita, grande parte da indústria ainda se baseia na reconstrução dos componentes danificados. Existe uma crescente propensão a recorrer a tecnologias de deposição, que permitam colmatar as dificuldades da deposição de materiais e ligas recorrendo a processos que envolvam fusão.

O caso em estudo é um dos exemplos (braço de suspensão de uma viatura blindada de transporte de pessoal M113) da dificuldade em adquirir novos componentes. Deste facto advém a necessidade de se proceder à sua reconstrução, operação esta que se baseia em tecnologias de revestimento. Com o objetivo de resolver o problema anteriormente referido, surge este trabalho de investigação, que visa colmatar os obstáculos encontrados na reparação dos braços de suspensão sujeitos a um desgaste de serviço. Do decorrer das dificuldades existentes aquando da utilização dos revestimentos, a partir de processos que envolvam a fusão do material, surgiu a ideia de se utilizar Friction Surfacing na produção dos revestimentos, sendo posteriormente comparados entre si. Para tal, foram realizados revestimentos sobre um substrato semelhante ao do braço, recorrendo aos três processos em estudo (MIG/MAG com Fios Fluxados, SER e FS), os dois primeiros estando já a ser utilizados pela entidade reparadora (OGME) e o terceiro sendo um processo inovador. Foram realizados diversos ensaios de caracterização, de entre os quais é de salientar os ensaios de desgaste, ensaios de resistência da ligação (Push-Pull) e flexão, tendo sido também dado ênfase aos efeitos metalúrgicos resultantes dos processos de revestimento aplicados.

A fim de completar a comparação dos três processos de revestimento, foi ainda feita uma análise de custos operacionais, dado que a vertente económica tem um peso muito significativo na validação de qualquer tecnologia.

1.1. Definição do problema

A necessidade de reparação dos braços de suspensão da VBTP M113 surge do desgaste acumulado em serviço, o que conduz à falha do componente em causa.

A viatura é sujeita a este tipo de reparação quando é alvo de intervenção de manutenção profunda (Manutenção de depósito). Nesta intervenção toda a viatura é desmontada e inspecionada, sendo se necessários, os 10 braços de suspensão sujeitos a reparação ou substituição. Esta reparação engloba um prévio processo de retificação, que tem como intuito obter um rebaixo, que irá posteriormente ser revestido, tendo esse revestimento uma área total média de 236 cm² por braço.

No que se refere ao nível de qualidade, não é exigido que este seja muito elevado, no entanto existe a necessidade de se garantir um revestimento livre de porosidades e imperfeições.

O material do braço a revestir é um aço de baixa liga que confere uma má soldabilidade uma vez que apresenta um carbono equivalente com elevado valor (0,763%). A geometria a revestir é circular tendo, um diâmetro de 75 mm (após rebaixada) e 100 mm de comprimento, como se pode ver na Figura 1-1. É de salientar a existência de 6 furos roscados M8 na extremidade a reparar, que induzem a possibilidade de um abatimento da parede existente entre os mesmo e a superfície a revestir que apresenta uma espessura de 1,83 mm após rebaixada. Os revestimentos são realizados em oficina, não obstante da existência de correntes de ar prejudiciais aos processos que usem gás de proteção. O rigor dimensional final é apertado, sendo também exigida uma boa qualidade de acabamento superficial, uma vez se tratar de braços (veios), que vão ser acoplados em casquilhos.

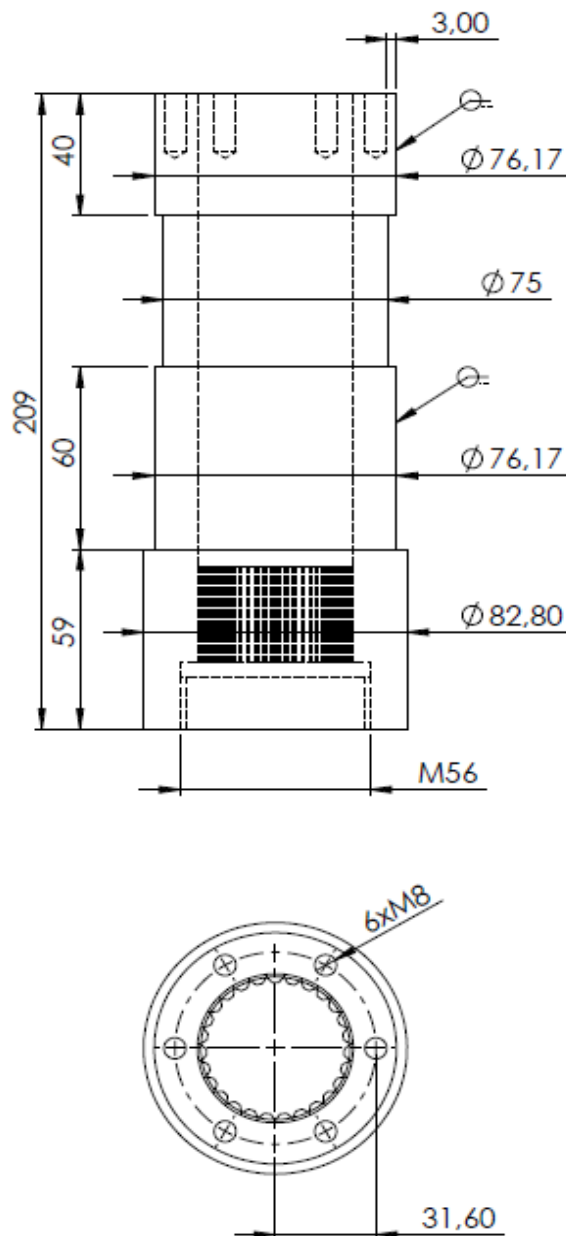


Figura 1-1 Desenho de um veio com a indicação de dimensões e as respetivas zonas a revestir

1.2. Motivação e Objetivos

Neste tipo de reparação é usual recorrer-se a soldadura por elétrodo revestido devido à sua versatilidade. Não obstante, trata-se de uma tecnologia que em muito depende das qualificações do operador, tendo sido também introduzido na reparação dos veios o processo de soldadura MIG/MAG com Fios Fluxados, que tem uma maior produtividade e possibilidade de ser automatizável. Este trabalho surge no seguimento da tentativa de otimização do processo, otimização essa que tem como base a introdução da Friction Surfacing na realização do caso prático. Esta comparação foi feita não com MIG/MAG convencional mas com MIG/MAG com Fios Fluxados, dado ser o processo em uso nas OGME, processo que resulta da evolução da anterior.

1.3. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos:

Capítulo 1, Introdução- Introdução e apresentação do tema dentro da sua envolvente institucional, definição do objetivo do trabalho e motivação para a sua realização.

Capítulo 2, Revisão Bibliográfica- Capítulo onde é feito o enquadramento do trabalho dentro da área científica, através da pesquisa e consulta de artigos científicos e obras publicadas, abordagem e desenvolvimento dos fundamentos teóricos que servem de alicerce às tecnologias de revestimento em estudo FS, MIG/MAG com Fios Fluxados e SER, dando ênfase a FS, analisando os comportamentos metalúrgicos esperados.

Capítulo 3, Procedimento Experimental- Destina-se a descrever os procedimentos experimentais adotados e os materiais e equipamentos envolvidos, que possibilitaram uma coesa e adequada comparação dos revestimentos.

Capítulo 4, Resultados e Discussão- Neste capítulo são apresentados, comparados e comentados os resultados obtidos, com recorrência auxiliar a elementos ilustrativos (gráficos e tabelas) no contexto do projeto efetuado, sendo ainda calculados os consumos específicos que posteriormente serviram de base para o cálculo de custos operacionais envolvidos na reparação de cada braço.

Capítulo 5, Conclusões- Síntese de todos os resultados obtidos ao longo do trabalho, com o objetivo principal de se eleger, de entre os três processos em estudo o que apresenta maiores vantagens aquando da reparação dos braços. São também apresentadas perspectivas para trabalhos futuros, com o propósito de dar continuidade ao estudo aqui desenvolvido.

Além disso, é de referenciar, na parte final, a **Bibliografia** e **Anexos**, onde são apresentados dados que se revelaram de extrema importância na realização de toda a pesquisa.

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

É sabido que a soldadura/revestimento de aços com elevado teor de carbono recorrendo a processos que envolvam fusão tem uma aplicabilidade de extrema complexidade, sobre o qual existe vasta experiência e uma panóplia de estudos efetuados. Na tentativa de colmatar os efeitos da fusão nesses tipos de processos, surge Friction Surfacing que é um processo de revestimento que apresenta bons resultados quando comparado com processos que envolvam fusão. No entanto, apesar de ser uma tecnologia bem estabelecida e com muitas aplicações industriais, tais como: produzir revestimentos, reparar peças desgastadas e fabricar materiais que apresentem gradações funcionais, a sua aplicabilidade a aços é um campo em que não existe um total domínio do processo, fato que conduz a que nos últimos anos tenha sido alvo de grande investigação.

Nesta secção, começa-se por apresentar a VBTP M113 e as suas variantes, faz-se também uma resenha histórica da evolução dos processos de soldadura. Em seguida apresentam-se os fundamentos do processo de revestimento FS, e as principais variáveis que o definem, terminando com os problemas metalúrgicos suscetíveis de ocorrer aquando da soldadura de aço de baixa liga, usando processos que envolvam fusão.

2.2. M113

2.2.1. História e Evolução

O M113 foi pela primeira vez apresentado em 1960, [1] desenvolvido a partir dos carros de combate M59 e M75, que tinham sido projetados pela *Ford Motor Company* e pela *Kaiser Aluminium and Chemical Co.*, nos finais dos anos 50. O M113 foi originalmente desenvolvido e produzido pela *Ford Machinery Corporation*, em San José, Califórnia preenchendo os requisitos para ser uma “Família de Veículos Blindados Aerotransportados Versátil” todo-o-terreno, para todos os fins, tal como planeou o General James M. Gavin, que era na altura o Chefe do Exército para a pesquisa e desenvolvimento, tornando-se o primeiro “táxi de combate” Americano da era moderna, desenvolvido para transportar pessoal. [2]

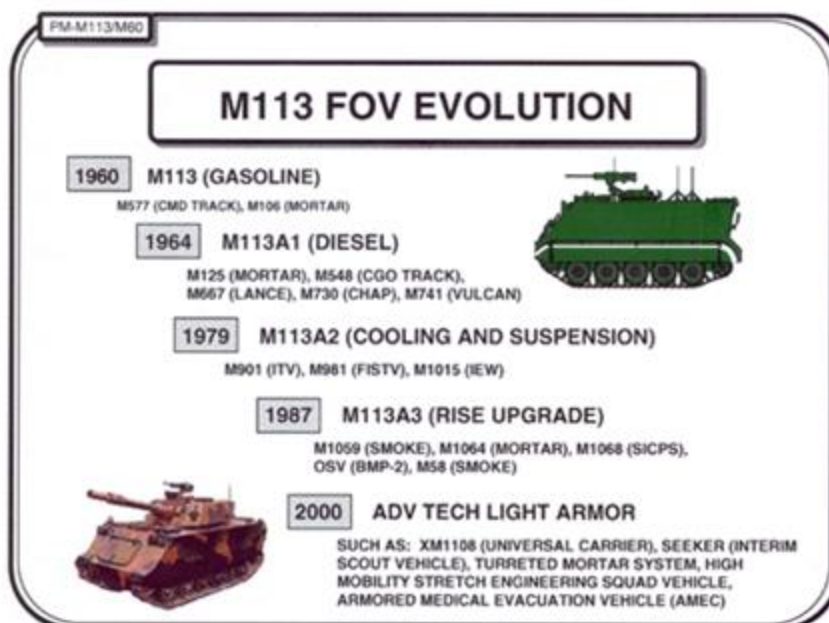


Figura 2-1 Evolução do M113 [38]

A família M113 é constituída por vários modelos diferentes de viaturas de lagartas que assentam basicamente no mesmo chassis. Cada modelo diferente surgiu para colmatar necessidades observadas ao desempenhar trabalhos específicos. O design e o equipamento instalado foram adaptados conforme o fim a que se destina. Assim, surgiram:

- M106 – viatura de lagartas adaptada ao transporte de morteiro 10,7;
- M125 – viatura adaptada ao transporte do morteiro 81mm;
- M132 – viatura com torre lança-chamas;
- M163 – viatura porta-metralhadoras;
- M548 – viatura de transporte de munições de artilharia;
- M577 – viatura de comando;
- M741 – viatura porta-Vulcan;
- M806 – viatura de recuperação ligeira
- M901 ITV – viatura equipada com sistema lança mísseis TOW.

Recentemente, surgiu uma viatura de apoio de combate denominada: FSCV (Fire Support Combat Vehicle) equipada com uma peça de 105 mm e que ao mesmo tempo serve para transporte de pessoal.

O M113 A1 é atualmente utilizado por mais de 40 países, entre os quais Portugal.

2.3. Processos de Revestimentos

2.3.1. Evolução dos Processos de Soldadura

A necessidade de estabelecer ligações entre metais remonta, segundo achados arqueológicos, ao séc. XII A.C., onde foram encontrados exemplos do uso de soldadura à forja e soldadura a estanho, no entanto, até aos finais do séc. XIX esta tecnologia de ligação não sofreu significativas inovações [3].

A descarga elétrica estável entre dois elétrodos foi observada e descrita, pela primeira vez, por volta de 1805 por Pétrov, Davy e Ritter. Apesar desta descoberta, só em 1885 é que Bernardos e Olszewski, nos Estados Unidos, patentearam na prática o primeiro processo de soldadura por fusão, tendo como fonte de energia um arco estabelecido entre o elétrodo de carvão e a peça a soldar. [3]. Uma vez descoberto o arco elétrico e conseguida a sua estabilidade, assistiu-se a uma escalada no sentido da evolução e do surgimento de novos processos de soldadura, como se pode ver na Figura 2-2.

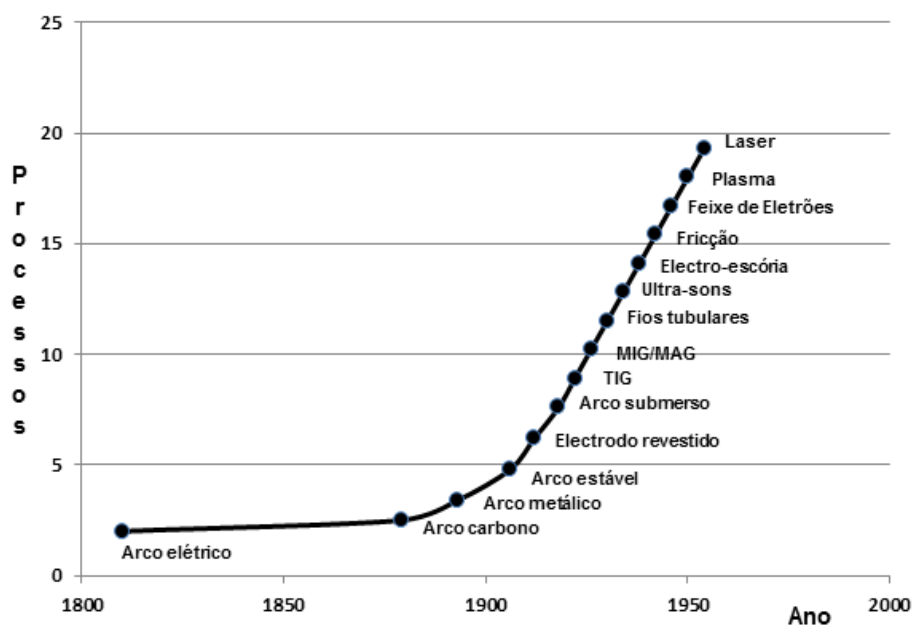


Figura 2-2 Expansão da tecnologia da soldadura, adaptado de [37]

2.3.2. Friction Surfacing

Friction surfacing é um processo de deposição de material baseado na deformação plástica de um varão metálico consumível.

Como se pode verificar na Figura 2-3I, um pino rotativo é pressionado contra o substrato com uma força axial, Figura 2-3II-III. Devido à fricção, é gerado um calor que origina uma camada viscoplastica de material na extremidade do pino.

As condições de pressão e temperatura levam a um processo de difusão, do qual resulta uma ligação metálica entre o substrato e o material em regime viscoplastico. O calor conduzido para o substrato permite que esta camada consolide perto da interface, formada entre o pino rotativo e a camada depositada. Aplicando um movimento de avanço contínuo, o material do pino (em estado viscoplastico) é depositado na superfície do substrato, Figura 2-3IV.

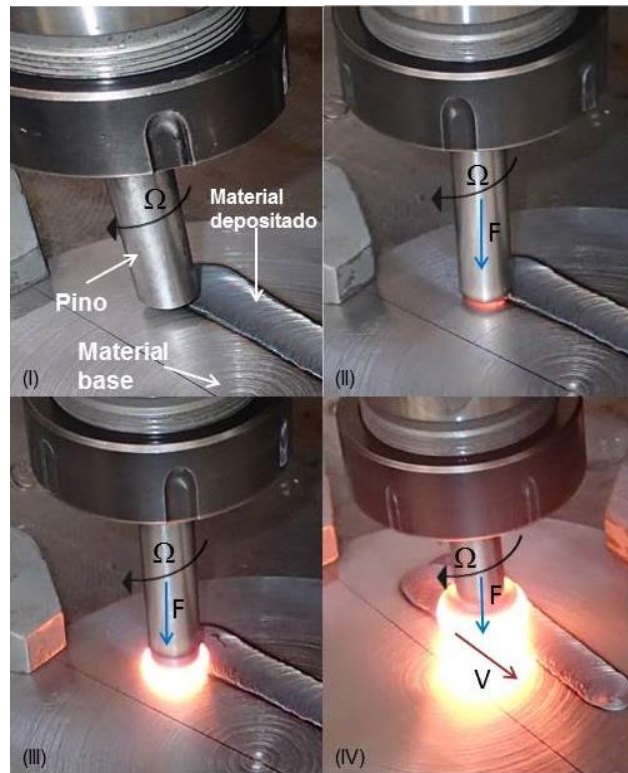


Figura 2-3 Friction surfacing em AISI 4140 sobre AISI 4140 multipasse. (I) Início da rotação, (II) início do contacto, (III), deformação inicial, (IV) deposição.

É de salientar que só com a conjugação da fricção interfacial e a deformação plástica como fontes de calor permitem o processamento do material a temperaturas abaixo das de fusão.

Com base no consumo progressivo do pino rotativo, deposita-se uma camada contínua, normalmente caracterizada por um refinamento do grão em relação ao material inicial.

Considerada como uma variante da Soldadura por Fricção, o conceito original do FS foi inicialmente concebido e patenteado por Klopstock em 1941 [4]. No entanto, existem indicações de que o processo foi também desenvolvido na URSS, nos anos 50 [5], apesar da investigação não ter evoluído significativamente nas décadas seguintes. Só nos anos 80 é que foi retomado o interesse pelo processo, seguido do crescente interesse pelos processos de ligação no estado sólido baseados na fricção [6].

A FS foi maioritariamente investigada para a produção de camadas homogêneas de grão fino que apresentam promissoras propriedades ao desgaste e à corrosão [7]. É conhecida a capacidade deste processo de favorecer a precipitação de carbonetos que incrementam a resistência mecânica dos revestimentos. Uma vez que os materiais a ligar não atingem o estado de fusão [6], é possível ligar materiais dissimilares, que seriam difíceis de ligar por processos baseados na fusão.

Tal como em outros processos de ligação no estado sólido, verifica-se uma menor afetação térmica do material base, o que se traduz em alterações de propriedades mecânicas menos significativas [8]. O facto de não ocorrer a fusão também resulta numa menor diluição e em níveis de tensões residuais menores, já que as contrações que ocorrem durante o arrefecimento são menos significativas [9].

Uma vasta gama de combinações de materiais tem sido depositada por FS, essencialmente, aço inox, aços ferramenta, aços rápidos e ligas à base de Cobre e Níquel. Têm também sido estudadas ligas de Alumínio, Magnésio e Titânio, assim como materiais compósitos.

Não obstante da sua descoberta, em 1941, a FS encontra-se atualmente em desenvolvimento, sendo por isso um foco de interesse científico.

2.3.2.1. Processo Termomecânico

FS envolve transformações de elevada complexidade, combinadas com elevadas temperaturas e princípios de ligação. Da mesma forma que, outras tecnologias de processamento baseadas em fricção, a região sólida que se encontra no estado viscoplastico é gerada e processada numa nova forma e condição metalúrgica.

Apesar desta região apresentar vestígios em estado sólido, apresenta ainda um padrão tridimensional de material que permite a junção de diferentes materiais. Este fenómeno é geralmente referido como o conceito da “*third body region*”, descrito por Thomas [10]. Esta região é caracterizada por uma baixa tensão e temperaturas acima da recristalização, mas abaixo da temperatura de fusão do material. Sendo determinado exclusivamente pela introdução da energia mecânica, o calor é proveniente do atrito interfacial e proveniente da deformação plástica.

Verifica-se assim, que o calor gerado por deformação plástica tende para zero quando o material se aproxima da temperatura de fusão. Consequentemente, um metal não consegue atingir o estado de fusão somente à custa da sua própria deformação plástica.

O calor resultante da fricção é também conduzido ao longo do pino consumível, estabelecendo um gradiente de temperaturas. É baseando-se neste gradiente que o material amacia, facilitando assim a deformação plástica resultante dos processos de torção/compressão que lhe são induzidos Figura 2-4. [11].

Fukakusa [12] propôs que o material em FS é transferido ao longo de um plano de contacto rotativo que desliza entre o pino e a camada depositada.

A diferença de velocidade entre o pino rotativo e a camada depositada promove o deslizamento viscoso. A distância entre o plano de contacto e a superfície do substrato vai determinar a espessura da camada produzida [13].

A partilha do material em estado viscoso na interface é considerada uma das mais significativas fontes de calor no processo, como é descrito por Gandra [14].

Através dos deslocamentos rotativos, o material na interface de fricção vai-se desenvolver, uma parte transforma-se em rebarba a restante será transferida para o substrato de forma laminar, arrefecendo e estabelecendo uma ligação.

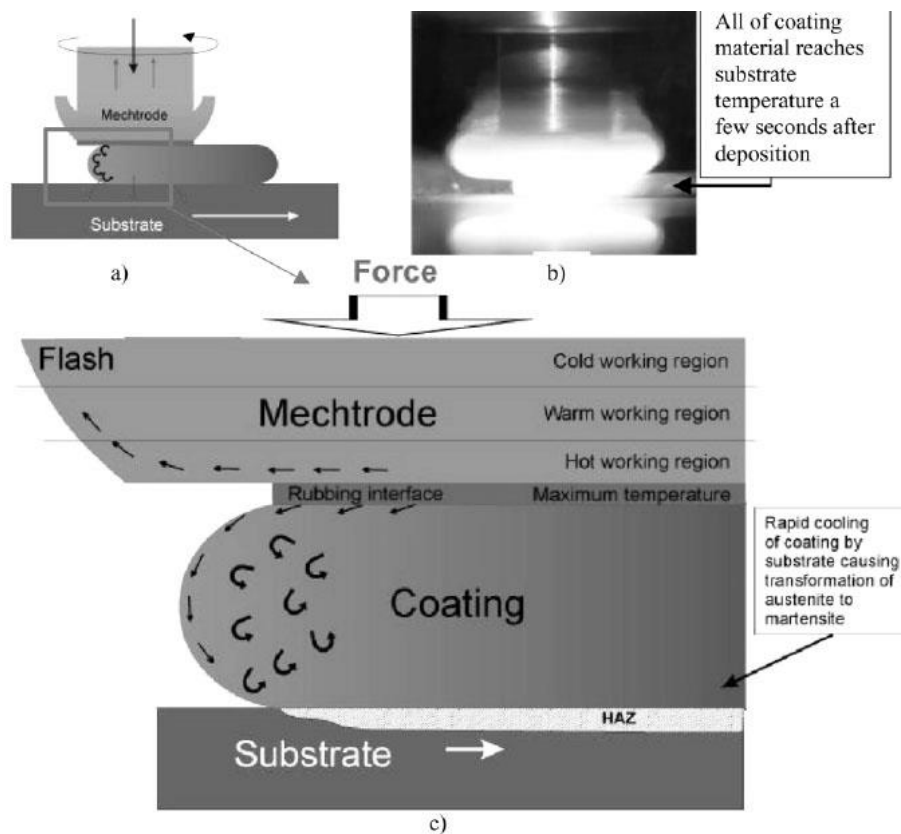


Figura 2-4 Desenvolvimentos termomecânicos em FS de aço. [11]

2.3.2.2. Evolução Microestrutural

Como descrito na secção anterior, a FS depende do processamento do material num estado viscoplastico, o que implica uma recristalização dinâmica. Uma vez depositado, o arrefecimento ocorre por convecção para o ambiente envolvente, e por condução para o substrato. Como relatado por Bedford [11], o processo de arrefecimento pode ocorrer em segundos, produzindo uma camada de grão fino homogénea. Consoante a constituição química do pino, outras transformações podem surgir derivadas dos efeitos térmicos ocorridos durante a FS, como sejam transformações de fase.

A FS de ligas de aço envolve a austenitização total, tal como a transformação de fase do ferro passando de cubico de corpo centrado (CCC) para cubico de faces centrado (CFC) sendo esta transformação necessária para obter o estado viscoplastico.

Apesar do refinamento do grão derivado da recristalização dinâmica, o endurecimento da camada será determinado pelo arrefecimento rápido, dependendo da quantidade de carbono, da composição da liga e da taxa de arrefecimento.

Bedford [11], apresentou um dos mais relevantes estudos sobre transformações, tendo o autor estudado os acontecimentos termo mecânicos sofridos pelo pino e pelo substrato na FS de aços rápidos, tais como BM2, BT15 e ASP30 sobre placas de aço carbono. O material na superfície de fricção atingiu temperaturas próximas dos 1020 °C, permitindo a austenitização total e a dissolução de carbonetos. Uma taxa de arrefecimento de cerca de 400 °C/s desencadeia a transformação martensitica dentro de poucos segundos. A magnitude do refinamento do grão também sugere outros efeitos, tais como, a fratura dos carbonetos e o refinamento mecânico dos grãos de austenite.

O efeito de FS leva à transformação numa microestrutura martensitica fina, que foi descrita por Rafi [15; 16] em FS de AISI H13 aço ferramenta de trabalho a quente sobre substratos de aços macios. Desde que o pino apresente na sua microestrutura um valor elevado de carbonetos, Figura 2-5a, a falta dos mesmos na deposição, indica a sua dissolução durante a austenitização. A taxa de arrefecimento rápido sofrida impede a reprecipitação. As camadas exibem uma fina microestrutura martensitica equiaxial e homogénea Figura 2-5b, com valores de dureza acima dos 740 HV, que se traduzem num aumento da dureza de 190%, quando comparado com o estado inicial do pino. A estrutura do grão do pino foi refinada de 50-60 µm para 2-10 µm durante a deposição. A Figura 2-6, mostra o perfil de dureza ao longo da interface da superfície da camada para o substrato afetado. A dureza é maior na superfície da camada e na interface, como foi observado nos tamanhos dos grãos ao longo das direções principais de dissipação de calor (condução para o substrato e convecção para a superfície da camada).

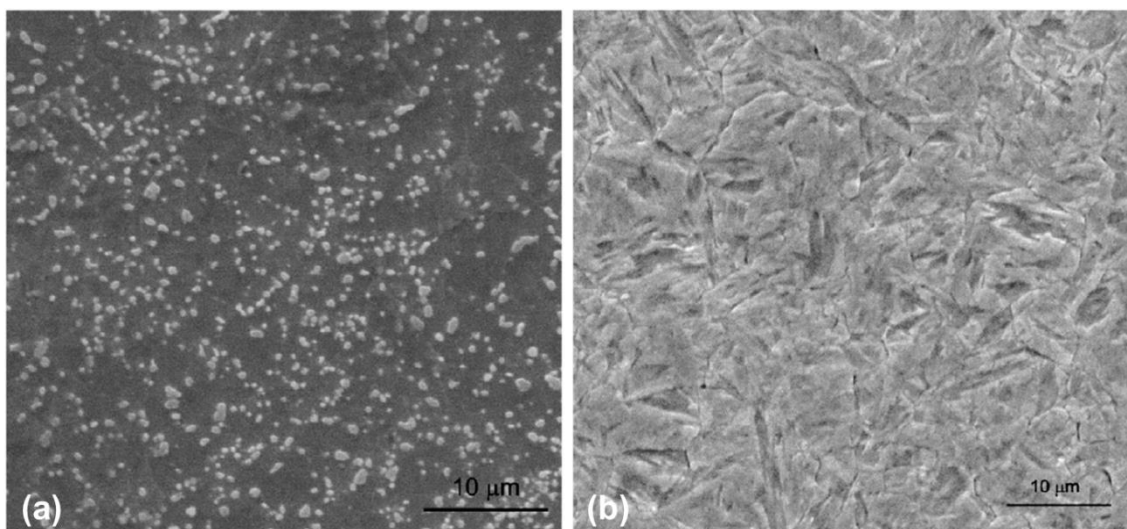


Figura 2-5 Comparação entre (a) microestrutura original de um pino de H13 (b) microestrutura do depósito de FS com pino em AISI H13 sobre aço ferramenta, obtidas por SEM [15]

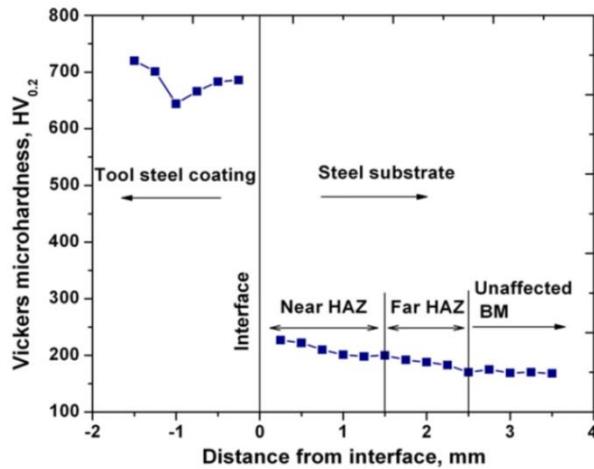


Figura 2-6 Perfil de durezas Vickers na interface revestimento substrato [16].

Macedo [17] estudou a viabilidade de recuperação de componentes em ABNT 8920, aço com elevado teor de carbono usando pinos de ABNT 8620, ABNT 4140 e aço inoxidável austenítico AISI 310. O depósito apresentou valores de dureza de 500, 680 e 200 HV, respectivamente. A ZTA apresentou valores de dureza de 800 a 900 HV, com uma profundidade de 1.5 mm, enquanto o seu teor de carbono elevado permite, maioritariamente, a geração de microestruturas martensíticas. A dureza do substrato inalterado é de 300 HV.

2.3.2.3. Parâmetros do Processo

Os revestimentos obtidos por FS, são avaliadas principalmente com base na espessura, largura e resistência que estão intimamente relacionados com os parâmetros do processo Figura 2-7.

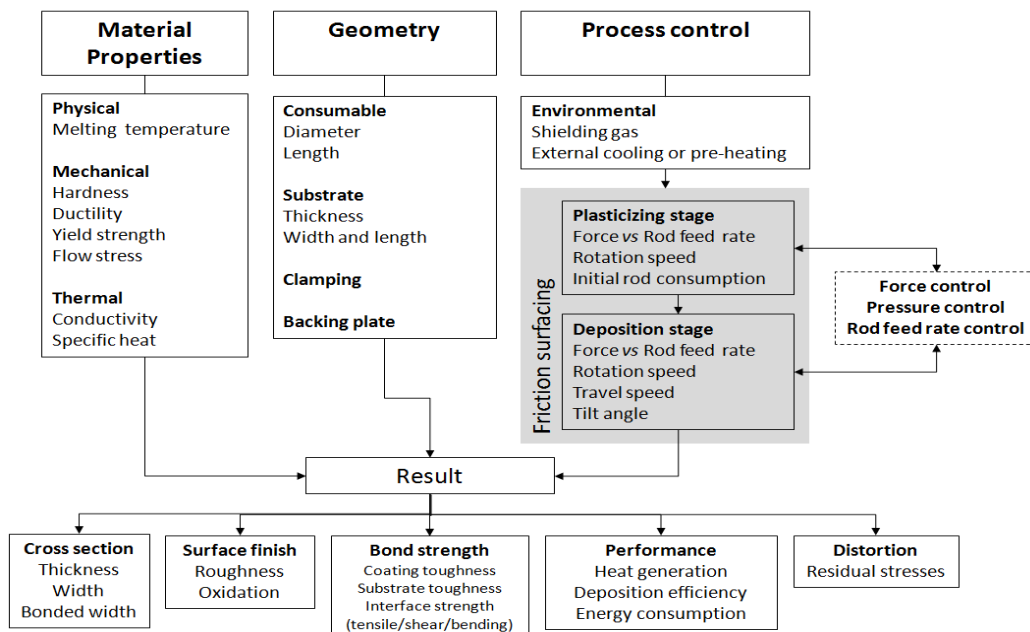


Figura 2-7 Parâmetros e variáveis de FS

Fatores como a espessura do substrato, o diâmetro do pino e as propriedades do material definem o sistema termomecânico, tendo um impacto direto no resultado obtido.

2.3.2.3.1. Influência dos Parâmetros no Processo

Neste processo, o calor é obtido pela combinação da fricção interfacial e da deformação viscoplásticas nos dois materiais em contacto. Contudo, a velocidade relativa entre o depósito e o substrato corta a interface de ligação, interrompendo e dificultando o processo de ligação por difusão contínua. Como tal, verificou-se que, em excesso, tanto a rotação como a velocidade de avanço podem deteriorar a ligação, diminuindo a largura da secção transversal [18]. Pode-se esperar que, pelo aumento da velocidade de rotação, que o aumento da fricção contribua para a produção de calor e haja sempre um efeito positivo na aderência. Contudo, alguns estudos mostram que para baixas rotações, a velocidade relativa baixa entre o depósito e o substrato pode por vezes permitir um processo de difusão mais eficaz e aumentar a área de contacto entre o pino e o depósito [14].

Os efeitos dos parâmetros do processo no resultado final são complexo e longe de serem lineares, estando fortemente dependente da combinação de materiais usados.

2.3.2.3.2. Força Axial

Verificou-se que a força axial melhorou eficazmente a largura ligada, conduzindo a depósitos mais amplos e finos [19]. Cargas excessivas resultam numa deposição não uniforme, com uma depressão a meio do depósito. Em oposição, forças axiais insuficientes resultam em interfaces fracamente consolidadas. Este efeito foi reportado por Gandra [14] na deposição de aços macios sobre aços macios, como mostrado na Figura 2-8.

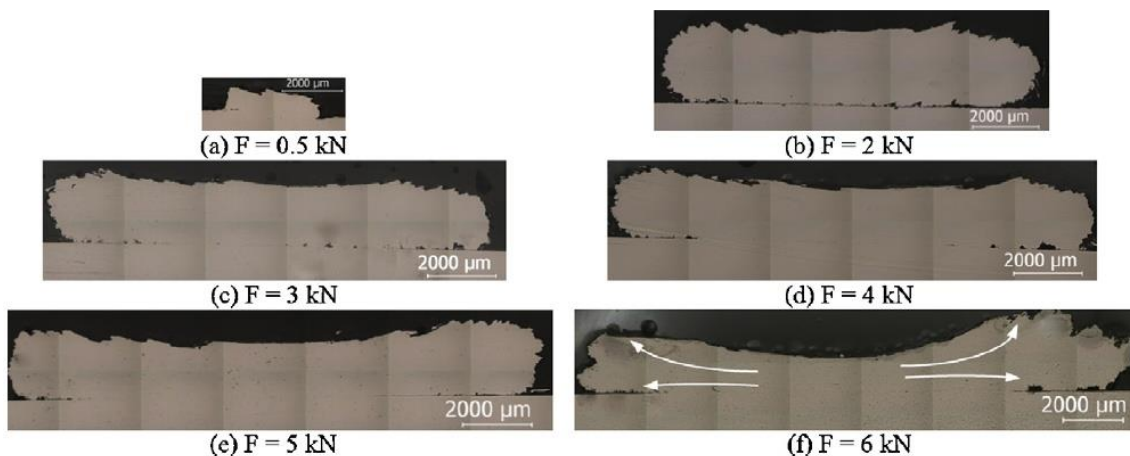


Figura 2-8 Efeito da força axial sobre a morfologia da secção transversal do revestimento e interface. FS de aço carbono sobre aço carbono. Com pino consumível de 10mm, com uma velocidade de rotação de 2500 rev/min e uma velocidade de avanço de 4,2 mm/s [14]

Foi observado que o aumento da força axial pode também conduzir a um aumento da espessura da ZTA, como demonstrado na Figura 2-9, descrevendo o processo de revestimento FS de aço inoxidável sobre aço macio [20].

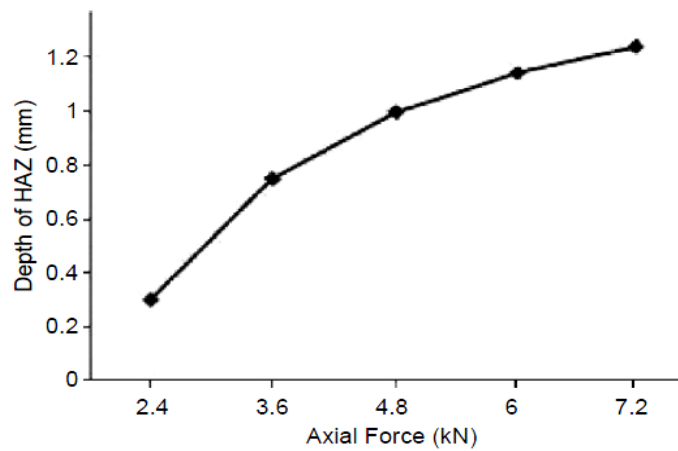


Figura 2-9 Efeito da força axial sobre a espessura da ZTA [20]

2.3.2.3.3. Velocidade de Rotação

A velocidade de rotação influencia a qualidade da ligação, a espessura das camadas e a rugosidade. Verificou-se que velocidades de rotação intermédias aumentam a qualidade da ligação, enquanto que a excessiva velocidade de rotação pode conduzir a uma redução da largura de ligação e a um aumento da zona de substrato termicamente afetada. Rafi [15] observou que uma elevada velocidade de rotação produz depósitos mais planos e regulares na FS de H13 sobre aço macio, com um efeito de forjamento mais eficaz na formação das camadas, ver Figura 2-10. Tipicamente, a largura das camadas diminui para velocidades de rotação maiores.

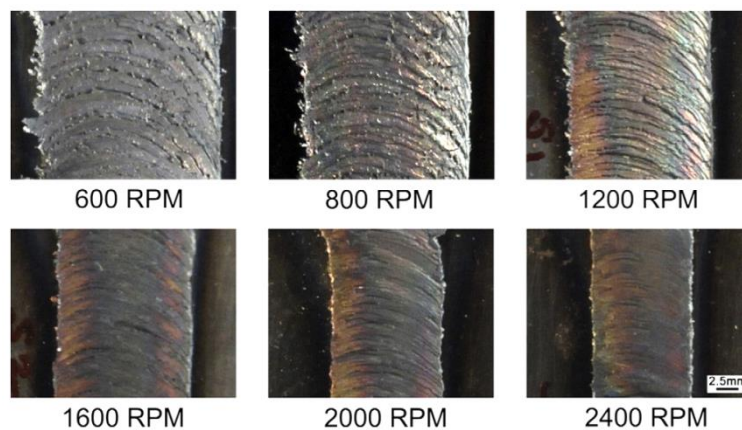


Figura 2-10 Efeito da velocidade de rotação na rugosidade e na largura da superfície depositada. FS de AISI H13 sobre aço macio. Pino consumível com 18 mm de diâmetro, força axial de 10 kN e 4 mm/s de velocidade de avanço [15]

2.3.2.3.4. Velocidade de Avanço

A velocidade de avanço influencia a espessura e largura do revestimento, uma vez que determina a taxa a que o material é depositado. Como tal, velocidades de deslocamento altas resultam tanto na redução da espessura com da largura, como foi reportado por Rafi [21] em FS de AISI 310 sobre aço de baixo teor de carbono Figura 2-11.

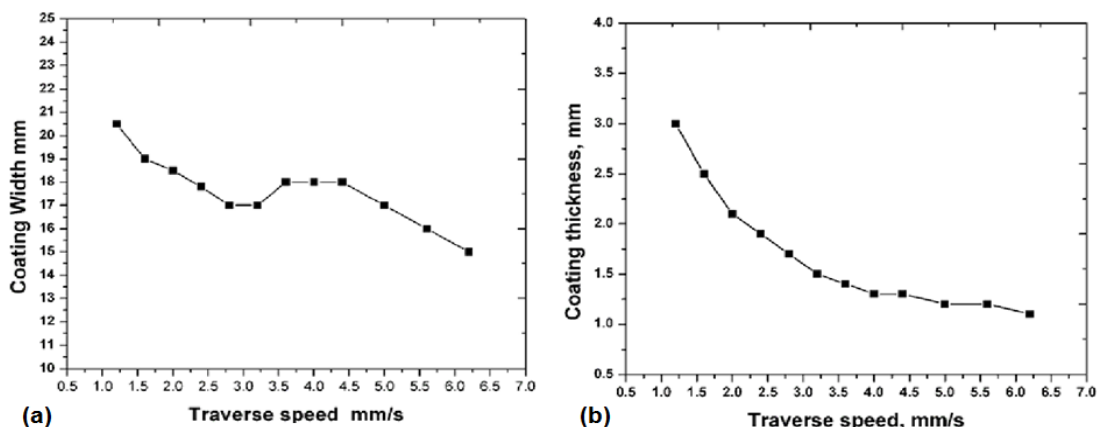


Figura 2-11 Efeito da velocidade de avanço em (a) largura ligada (b) espessura. FS de aço inox austenítico AISI 310 sobre aço de baixo carbono, usando um pino consumível de 18 mm de diâmetro, 10 kN de força axial e uma velocidade de rotação de 800 rev/min [21].

O aumento da velocidade de avanço, até um certo limite, conduziu a um aumento na resistência de ligação, como observado por Rafi [15; 21] na deposição de aço inoxidável austenítico AISI 310 e aço ferramenta de trabalho a quente AISI H13 sobre substratos de aço macio, Figura 2-12. Os autores referem dois tipos principais de mecanismos de falha no depósito de AISI H13 sobre aço macio, com base na camada ou na interface. Em camadas de maior espessura, obtidas a partir de velocidades de avanço baixas, foram observadas falhas na interface para tensões de corte inferiores. Para velocidades de avanço mais altas, as falhas encontradas ocorreram no revestimento para tensões de corte maiores.

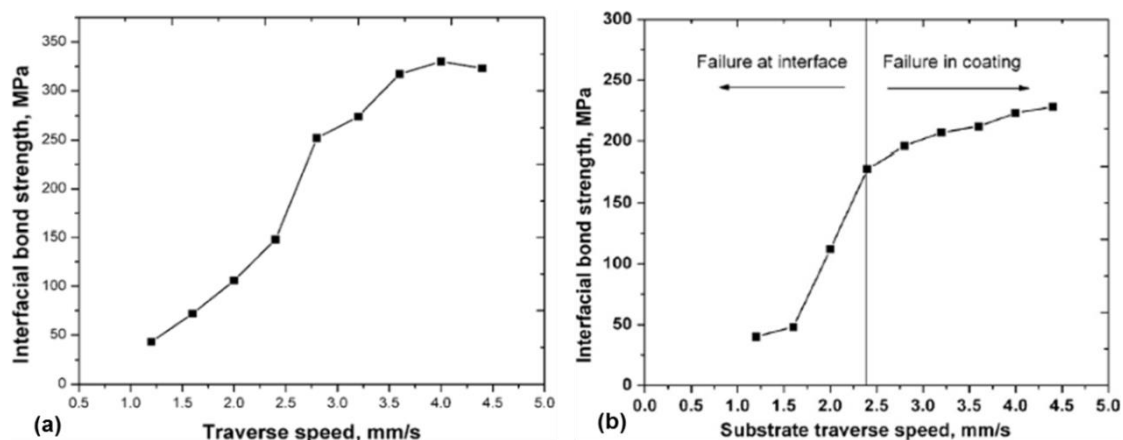


Figura 2-12 Efeito da velocidade de avanço na resistência da ligação ao corte na deposição em (a) aço inox austenítico AISI 310 [21], (b) aço ferramenta de trabalho a quente AISI H13 sobre aço macio [15].

Os ensaios de flexão também mostram o modo de falha de transição, como se pode ver na Figura 2-13. Resultados idênticos foram apresentados por Vitanov [18] na FS de vários tipos de aço inoxidável e Gandra [16] no depósito de aços macios.

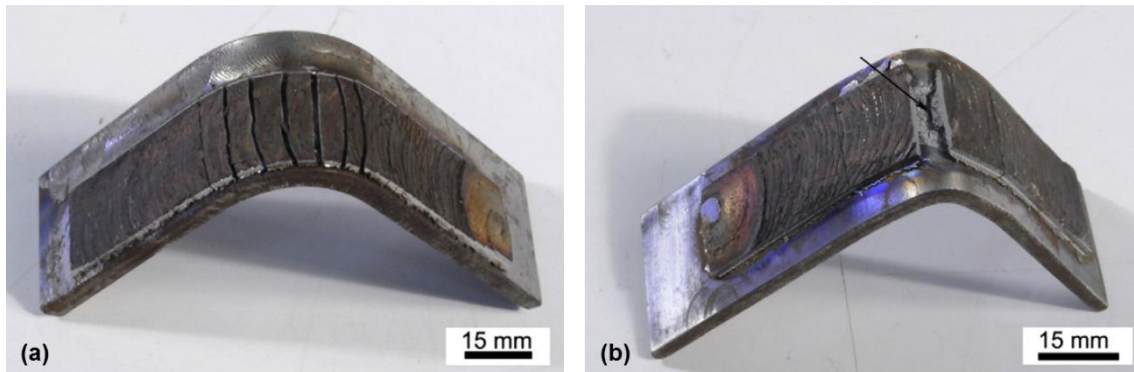


Figura 2-13 Principais modos de falha à flexão encontrados na deposição de AISI H13 sobre aço macio. (a) no revestimento e (b) na interface [15]

Velocidades de avanço maiores resultam numa redução tempo de exposição ao calor, o que tem como consequência um menor crescimento do grão [14; 15], originando também uma deposição mais fina, que detém uma taxa de arrefecimento superior.

2.3.2.4. Diâmetro do Pino Consumível

A influência do diâmetro do pino consumível na exposição ao calor do revestimento foi inicialmente apresentado por Bedford [11].

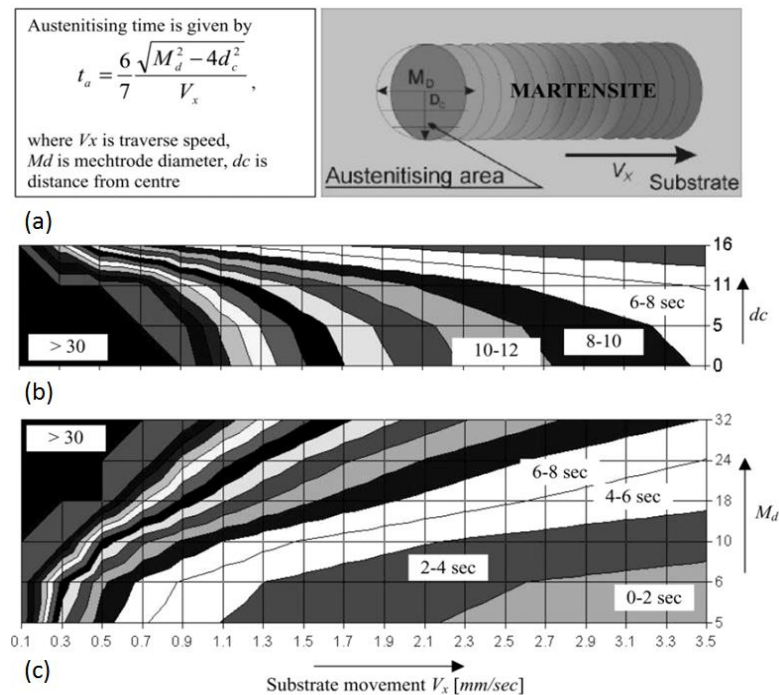


Figura 2-14 Efeito do diâmetro do pino consumível e da velocidade de avanço na austenitização. (a) relação analítica entre gasto no domínio austenítico a velocidade de avanço e o diâmetro do pino, (b) o efeito da distância ao centro (d_c) de um pino com 32 mm de diâmetro, (c) efeito do diâmetro do pino [11].

Empiricamente, observou-se que a atual superfície de atrito não é circular, mas antes elíptica, como ilustrado na Figura 2-14. Os autores apresentaram relações entre o tempo de exposição, o diâmetro do pino e a velocidade de avanço, Figura 2-14a. Em FS de aços, o diâmetro determinou o período de tempo em que o material do revestimento sofre austenitização antes de arrefecer. Por exemplo, considerando diâmetros de 10 a 32 mm e velocidades de avanço de 1 mm/s, a região abaixo do pino irá sofrer no máximo 10 a 32 segundos de temperatura de austenitização, Figura 2-14b e c.

Vitanov [22] estimou que o diâmetro da área de ligação é de aproximadamente 6/7 do diâmetro do pino consumível.

2.3.2.5. Vantagens e Desvantagens de FS

FS apresenta-se como sendo, o processo de revestimento mais adequado para aplicações que envolvam a união de materiais com problemas de compatibilidade, ou que sejam difíceis de processamento por processos de fusão. O processo assenta num forjamento a quente, que apresenta um significativo refinamento da microestrutura do material depositado. O depósito produzido apresenta uma intrínseca homogeneidade e boas propriedades mecânicas.

Por outro lado, e ao contrário de tecnologias de revestimento com base em processos de soldadura por fusão como revestimentos laser, soldaduras por arco elétrico ou plasma que comumente apresentam defeitos associados a mecanismo de fundição e exposição a altas temperaturas, FS não apresenta defeitos desta ordem. Uma vez que a sua deposição se baseia num mecanismo de deformação viscoplastica.

Friction Surfacing apresenta uma microestrutura mais fina e com valores de dureza relativamente mais altos, por outro lado, a ausência de uma estrutura de solidificação e a presença de uma homogeneidade química foram apresentados como vantagens associadas ao processo de FS. Foi ainda apresentado por Puli. [23], que FS demonstrou maior resistência à corrosão para aços inox AISI 316, quando comparado com revestimentos produzidos por arco elétrico.

A ausência de fusão, faz de FS uma técnica muito promissora, aquando do processamento de materiais com temperaturas de fusão baixas, como por exemplo alumínio e ligas de magnésio. A ausência de salpicos, de emissão de radiações e fumos, faz de FS uma tecnologia mais limpa e amiga do ambiente [17].

No entanto, FS debate-se com vários problemas técnicos e de produtividade, que contribuem para um número limitado de aplicações na engenharia. Uma das principais desvantagens apresentadas pelo processo, é a má ou por vezes falta de ligação nas extremidades laterais do revestimento, conduzindo este fato a que em muitos casos seja necessário proceder a operações subsequentes para as remover.

A largura de revestimento ligado, suscetível de ser usado, é inferior à largura do revestimento produzido, tal como descrito por Voutchkov [24], ver Figura 2-15.

Por outro lado a produção de rebarbas na ponta do pino consumível contribui para uma diminuição da eficiência de transferência de massa, uma vez que esse material não estabelece uma ligação com o substrato sendo desperdiçado.

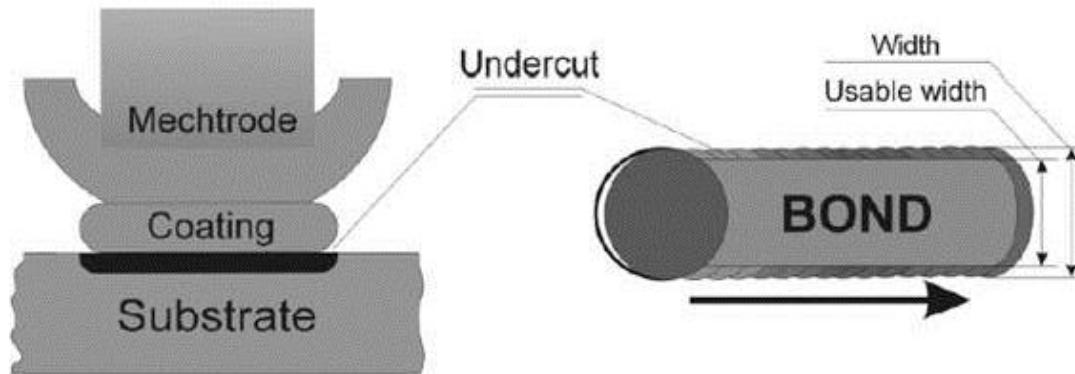


Figura 2-15 Definição de revestimento utilizável e zona não ligada [24]

FS apresenta também como desvantagem um limitado controlo da largura e da espessura depositada uma vez que a geometria do revestimento produzido é controlada por uma estreita gama de parâmetros.

Vários autores relatam a utilização de pinos consumíveis numa gama de 2 até 32 mm de diâmetro. Dependendo dos parâmetros do processo, do diâmetro do pino consumível e dos seus materiais as espessuras dos revestimentos obtidos por FS apresentam-se tipicamente entre 0,2 e 3 mm [11; 24].

2.3.3. Estudo de Caso e Aplicações Industriais

Desde o conceito original [4] existem vários relatos de estudos de caso, sobretudo na reabilitação de peças desgastadas ou danificadas, bem como, na produção de revestimentos resistentes ao desgaste e à corrosão [24; 25].

Nos anos 90, o processo viu a sua primeira aplicação comercial bem-sucedida, como uma tecnologia de produção de lâminas de corte. Este método particular FS foi patenteado por Bedford [26], um dos fundadores da empresa que atualmente explora esta aplicação, FRICTEC Ltd.

Outra aplicação consiste na produção de revestimentos duros para a reparação de turbinas a gás. Num caso estudado por Bedford [27], os revestimentos simples e com múltiplas camadas de Satellite 12 foram produzidos substratos estreitos de aço inoxidável AISI 316 para simular a deposição ao longo de uma aresta de uma lâmina (Figura 2-16).

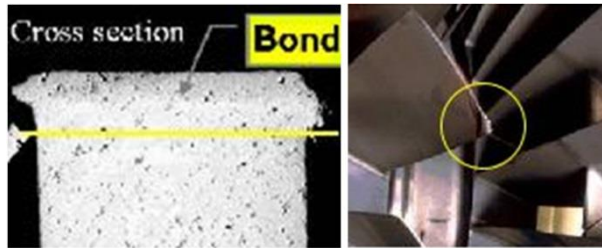


Figura 2-16 Reparação de pás de turbinas por FS (a) Secção transversal de um depósito no gume de uma lamina e (b) lamina reparada

Amos [28] propôs um procedimento similar para os revestimentos das lâminas de uma turbina a vapor, como é mostrado na Figura 2-17. Foster [29], descreveu um método para fazer depósitos em forma de circunferência, ao longo de discos ou cilindros, a partir dos quais vários compressores ou pás de turbinas podiam ser extraídos.

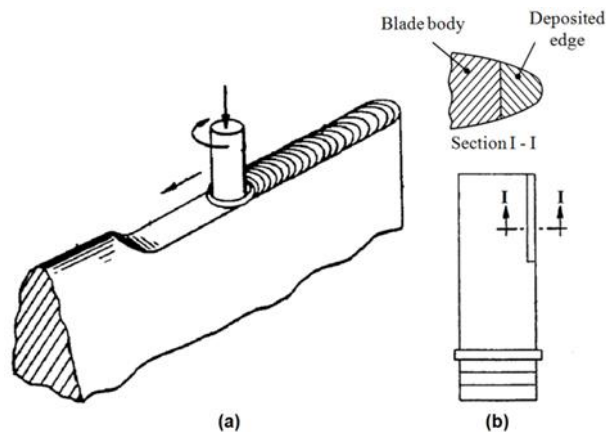


Figura 2-17 Método de formação de um bordo de fuga numa lamina de uma turbina a vapor (a) configuração do depósito e (b) vista da secção que evidencia a parte terminada

FS foi também aplicado no contexto da recuperação revestimentos em ambientes subaquáticos, tais como, tubagens e estruturas marinhas, como é mostrado por Li [30], que inclui a possibilidade do uso de FS em condições ambientais adversas.

Uma vez que operações subaquáticas costeiras ou em centrais nucleares apresentam ambientes perigosos para os operadores, a possibilidade de usar robots semi ou completamente automatizados é muito apelativa [20; 31; 32]. A Figura 2-18, mostra a simulação de uma peça cilíndrica com 400 mm de raio usando um robot Tricept TR 805 [32].

As pesquisas mostram que os depósitos tridimensionais estão de acordo com os resultados obtidos para os lineares horizontais. Este modelo particular de robot apresenta firmeza suficiente para suportar as forças envolvidas e garantir a estabilidade dinâmica do processo.



Figura 2-18 FS de aço inoxidável sobre cilindros de aço macio com um robot Tricep TR805 (a) instalação e sistema de fixação (b) depósito (c) através de uma secção macrográfica da camada

2.3.4.Revestimentos/ Soldaduras de Aço de Baixa Liga

Aço de baixa liga são aços que contêm baixas quantidades de elementos de liga, que induzem consideráveis melhorias nas suas propriedades. Nesta classe de aços, os elementos de liga são-lhes adicionados com o objetivo de melhorar as suas propriedades, como sejam aumentar a resistência mecânica e a tenacidade, alterar a sua resposta aos tratamentos térmicos e ainda minimizar e retardar os processos de corrosão. Os aços de baixa liga em geral apresentam um teor total de liga compreendido entre 1,5% e 5,0% [33], sendo de entre estes elementos os mais comuns o Manganês, Silício, Crómio, Níquel, Molibdénio e Vanádio, podendo conter na sua composição quatro ou cinco destes elementos em diversos teores. Estes aços possuem um maior limite de escoamento e de resistência quando comparados com aços macios ou aços carbono estruturais, apresentando também como umas das suas propriedades as elevadas relações resistência-peso. Recorrendo à sua utilização é possível reduzir o peso de carros, camiões, equipamentos pesados, estruturas, servindo este facto para justificar a sua elevada empregabilidade na indústria atual, nomeadamente na indústria petrolífera. AISI 4140 é um exemplo deste tipo de aços (usado como material base neste trabalho), apresentando um teor de carbono elevado quando comparado com aços estruturais.

A quantidade de carbono em conjugação com elementos de liga presentes num aço, é de extrema importância na determinação dos constituintes que serão formados em resposta a uma têmpera a partir da temperatura de austenitização.

A presença dos elementos de liga num aço permite o endurecimento a maiores profundidades, uma vez que conduz a transformações martensíticas com menores taxas de arrefecimento. No que se refere à velocidade de arrefecimento, o efeito da massa tem um significado elevado e consultando a Tabela 2-1, pode-se verificar que quanto maior o diâmetro da peça, menor a dureza atingida pelo aço AISI 4140, uma vez que se verifica um decréscimo da taxa de arrefecimento com o aumento do volume da material.

Tabela 2-1 Efeito da massa sobre as propriedades típicas do aço AISI 4140 tratado termicamente, adaptado de [34]

Diâmetro da barra (mm)	Resistência à Tração (MPa)	Dureza da Superfície (MPa)
25	1140	335
50	920	302
75	860	293

Os aços de baixa liga, ou por vezes designados de “Heat-treatable low-alloy (HTLA)”, são aços que, como anteriormente referido, tem um teor elevado de carbono, que quando conjugado com taxas de arrefecimento elevadas, é frequente surgimento de fissuração a frio ou fissuração pelo hidrogénio, como se pode constatar no pelo diagrama da Figura 2-19. O diagrama de Graville indica-nos a suscetibilidade de fissuração a frio de um aço em função do seu carbono equivalente que pode ser calculado pela equação (2-1), comparado com o teor real de carbono.

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \right) + \left(\frac{\%Cu + \%Ni}{15} \right) \quad (2-1)$$

O diagrama encontra-se dividido em três zonas, zona I onde os materiais nela inseridos tem uma combinação de um baixo teor de carbono, com baixas durezas, não sendo assim suscetível o surgimento de fissuras, a zona III que apresenta a conjugação de elevadas durezas com elevado teor de carbono, condições necessárias aquando da sua soldadura, para gerar microestruturas sensíveis à fissuração.

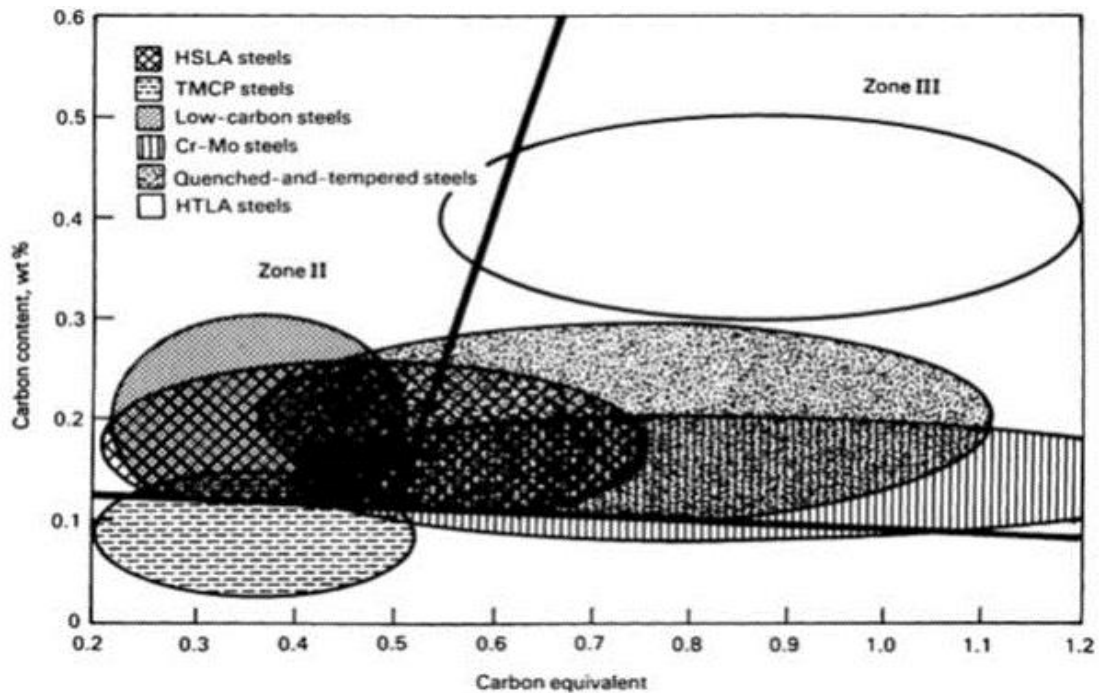


Figura 2-19 Diagrama de Graville mostrando a suscetibilidade de fissuração a frio pelo hidrogénio de um aço. [35]

. Para evitar a fissuração a frio neste aço o operador deve adotar procedimentos que baixem o nível de hidrogénio, são exemplos disso pré-aquecimentos e tratamentos térmicos após a realização das soldaduras. Por fim a zona II que apresenta maiores teores de carbono mas menores durezas, sendo possível nestes casos evitar as microestruturas suscetíveis de fissuração, restringindo as taxas de arrefecimento na ZTA, o que pode ser conseguido à custa de redução da entrega térmica ou com pré-aquecimento [35].

O pré-aquecimento consiste, como o próprio nome indica num aquecimento do metal a soldar antes de se realizar a respetiva soldadura, reduzindo assim a taxa de arrefecimento. Este pré-aquecimento pode tomar valores de 50 °C a 540 °C, sendo mais usual uma faixa de temperaturas de 150 °C a 200 °C [33].

Em suma, com o pré-aquecimento, podemos conseguir reduzir:

- o risco de fissuração pelo hidrogénio;
- tensões de contração;
- a dureza da zona termicamente afetada;

Os principais indicadores da necessidade de pré-aquecimento são o teor de carbono e dos elementos de liga, podendo também o constrangimento da junta a soldar e o processo usado influenciar a necessidade da sua realização.

Por outro lado, a necessidade de pré-aquecimento pode aumentar com os seguintes fatores:

- tamanho da peça;
- temperatura inicial;
- velocidade de soldadura;
- diâmetro do consumível;

Conhecida a composição do material base, podemos calcular a temperatura de pré-aquecimento a aplicar a um dado caso, um dos métodos frequentemente usados e de fácil cálculo é o do carbono equivalente, uma vez que a temperabilidade de um aço está diretamente ligada com o seu teor de carbono em conjugação com os elementos de liga. Quanto maior for o valor do carbono equivalente, maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida. A espessura e o tamanho do componente são dados necessários para o respetivo cálculo, que induzem um aumento do pré-aquecimento diretamente proporcional com o seu aumento.

Calculado o carbono equivalente (C_{eq}), pela equação(2-1), obtém-se o carbono equivalente total ($C_{eq\ total}$), usando a equação (2-2), valor este que irá entrar no cálculo da temperatura de pré-aquecimento, dada pela equação (2-3).

$$C_{eq\ total} = 0,005 * C_{eq} * \text{espessura (mm)} \quad (2-2)$$

$$\text{Temperatura de pré – aquecimento (}^{\circ}\text{C)} = 350 * \sqrt{C_{eq\ total} - 0,25} \quad (2-3)$$

Capítulo 3

3. Procedimento Experimental

3.1. Introdução

Neste capítulo são descritos os ensaios, os parâmetros, dimensões dos provetes, equipamentos e dispositivos usados para a sua realização.

3.2. Caracterização do Material Base

Para caracterizar material base foram retiradas amostras, montadas a frio em resina epóxi. O polimento mecânico foi realizado segundo técnicas de metalografia standard, com lixas de carbonetos de cilício, de granulometria 240, 320, 600, 1200, 2500 tendo como lubrificante a água corrente. O polimento fino foi feito com pasta diamantada com granulometria de 6 e 1 μm usando como lubrificante água destilada, com o objetivo de obter um polimento mais fino.

3.2.1. Ensaios de Dureza Vickers

Sobre as superfícies polidas realizaram-se ensaios de dureza Vickers usando um durometro, Mitutoyo HM-112 Micro-Vickers Hardness Testing (Figura 3-1), aplicando uma força de 9,8 N durante 10 s. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de caracterizar o material base. A resistência de um metal à penetração é uma medida da sua dureza e também uma indicação da sua resistência.



Figura 3-1 Durometro usado para realizar os ensaios de dureza (Vickers)

3.2.2. Ensaios de Macroscópica Eletrônica de Varrimento (EDS)

As amostras foram também caracterizadas por MEV-EDS, usando um microscópio eletrônico de varrimento (Zeiss DSM 962), com filamento de tungstênio convencional, e ainda elétrons secundários com os modos de imagem de elétrons retro difundidos.

Através da utilização de um espectrómetro com uma janela ultrafina (Oxford Instruments INCAx-sight EDS) foi possível a detecção de elementos de baixo número atômico, tendo sido também usada uma ponte condutora de carbono para evitar a acumulação de carga. As análises foram feitas numa câmara de vácuo com uma pressão compreendida entre 10^{-5} e 10^{-6} bar, com uma distância de trabalho de 25 mm, uma tensão de aceleração de 20 kV e 70 mA de corrente de emissão.

3.2.3. Ensaios de Faiscamento

Os ensaios de faiscamento são vulgarmente usados na quantificação da composição química dos aços, pela sua simplicidade e rapidez. O processo consiste na produção de um arco elétrico que faz saltar faíscas do material a analisar. O espectro emitido é comparado com padrões existentes, obtendo-se a composição química quantitativa do material.

3.3. Realização dos Revestimentos

Os revestimentos foram depositados sobre “bolachas” de material base previamente cortadas dum varão circular com 150 mm de diâmetro, e a sua superfície foi limpa e desengordura. Inicialmente, começou-se por revestir completamente as “bolachas”, por SER e MIG/MAG com Fios Fluxados, uma vez tratar-se de processos em que existia uma maior facilidade e disponibilidade para a sua realização. Contudo estes revestimentos eram de pouca utilidade, uma vez que para a realização dos diversos ensaios era necessário maquinar as superfícies completamente, tendo-se optado por fazer os revestimentos o mais próximo possível da configuração final pretendida.

3.3.1.FS

Para a realização dos revestimentos por Friction Surfacing foi utilizada uma máquina ESAB LEGIOTM3UL, disponível no Instituto Superior Técnico (IST) ilustrada na Figura 3-2.

A máquina é constituída por uma estrutura que incorpora uma cabeça de soldadura que se desloca segundo os eixos (X, Y, Z), como se mostra na Figura 3-2. Esta cabeça é composta por um cilindro hidráulico responsável pela aplicação da carga aquando da soldadura, um eixo rotativo onde se acopla uma pinça de suporte da ferramenta/pino consumível, por um sistema interno de refrigeração do eixo e por um conjunto de células e sistemas de recolha de dados fornecidos durante o processo, entre os quais se incluem a posição da ferramenta, o binário aplicado e a carga exercida. Uma vez registados são enviados para o sistema de pós-processamento de dados SCADA, permitindo assim uma constante monitorização do processo. A cabeça pode inclinar-se manualmente a ângulos que variam entre 0 e 5° e existe ainda uma interface homem-máquina (HMI), onde podem ser ajustados manualmente todos os parâmetros de processamento. Finalmente dispõe de uma mesa onde são acoplados os sistemas de fixação necessários à operação.



Figura 3-2 Máquina de soldadura por fricção linear ESAB LEGIO™3UL

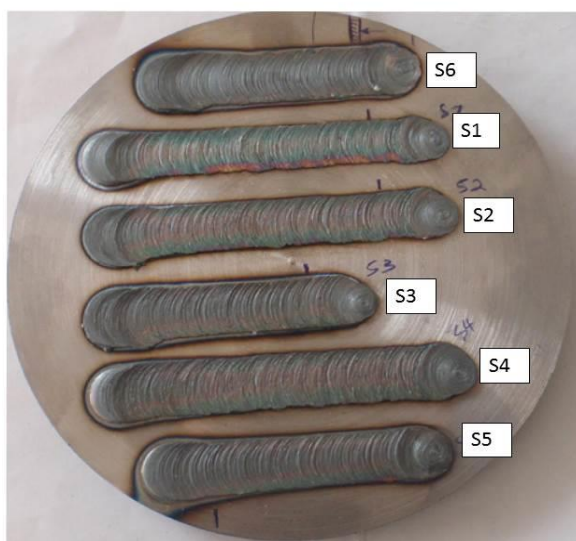


Figura 3-3 Revestimentos realizados para a definição de parâmetros de FS

Com o objetivo de se ajustar os parâmetros de revestimento por FS, foram realizados seis ensaios (Figura 3-3), com os parâmetros indicados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 Parâmetros usados nos revestimentos por FS

Código de ensaio/provete	Velocidade de rotação (rev/min)	Força axial (kN)	Velocidade de avanço (cm/min)	Consumo inicial do pino (mm)
S1	3000	9	35	2
S2	3000	9	25	1,5
S3	3000	9	15	1,5
S4	2500	9	25	2
S5	3000	12	25	1,5
S6	3000	15	25	1,5

Estes parâmetros foram definidos com base nos ensaios realizados por Macedo [17] e na experiência do grupo do IST. Utilizaram-se pinos de Aço AISI 4140 com diâmetro de 14 mm e um comprimento de 80 mm, em que uma das extremidades foi maquinado um chanfro com 45° de inclinação ver Figura 3-4

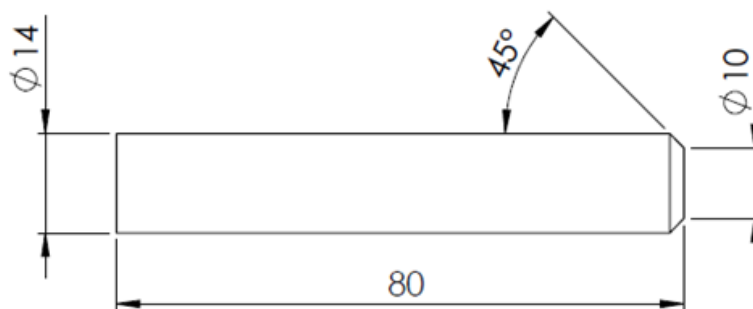


Figura 3-4 Esquema do pino consumível utilizado na realização dos revestimentos FS

Os parâmetros foram introduzidos no controlador HMI, existindo a necessidade de se fazer a substituição manual do pino consumível de ensaio para ensaio. Foi ainda definida a velocidade de descida do pino, aquando do início do processo tomando o valor de 0,2 mm/s. É necessário definir-se este parâmetro uma vez que o início do processo é definido não em tempo, mas em consumo inicial do pino. Todas as “bolachas” que serviram de material base foram previamente retificadas num torno mecânico para suprimir a ondulação característica dos cortes por serra de fita, e de seguida a superfície foi limpa com acetona para remover eventuais gorduras existentes.

Foram produzidos diversos revestimentos, em cordões simples e depois em áreas revestidas por cordões consecutivos. Para que existisse uma total sobreposição entre cordões tomou-se 10 mm como sendo o valor entre cada passagem, existindo assim 2 mm de sobreposição entre cordões consecutivos

3.3.1.1. Medição da Temperatura com Termopar

A medição de temperatura foi realizada por um termopar do tipo N, colocado num furo não passante realizado na parte inferior da bolacha a revestir, ficando uma espessura de 0,1 mm de material base por furar que serviu de proteção ao termopar (Figura 3-5). Com o objetivo de se obter uma leitura mais precisa, utilizou-se uma massa térmica, para minimizar a resistência térmica.

Os dados foram recolhidos e registados pelo sistema SCADA usado anteriormente, onde foi instalado um software próprio. No decorrer dos ensaios verificou-se que o termopar é empurrado para baixo cerca de 2,5 mm, deixando assim de estar em contacto com a superfície, tendo como consequência uma diminuição da temperatura lida. Da experiência do grupo, sabe-se que o uso de termopares é um dos melhores métodos para a monitorização do processo. Contudo, não foi possível, por motivos económicos, usar uma maior quantidade de sensores com maior precisão.

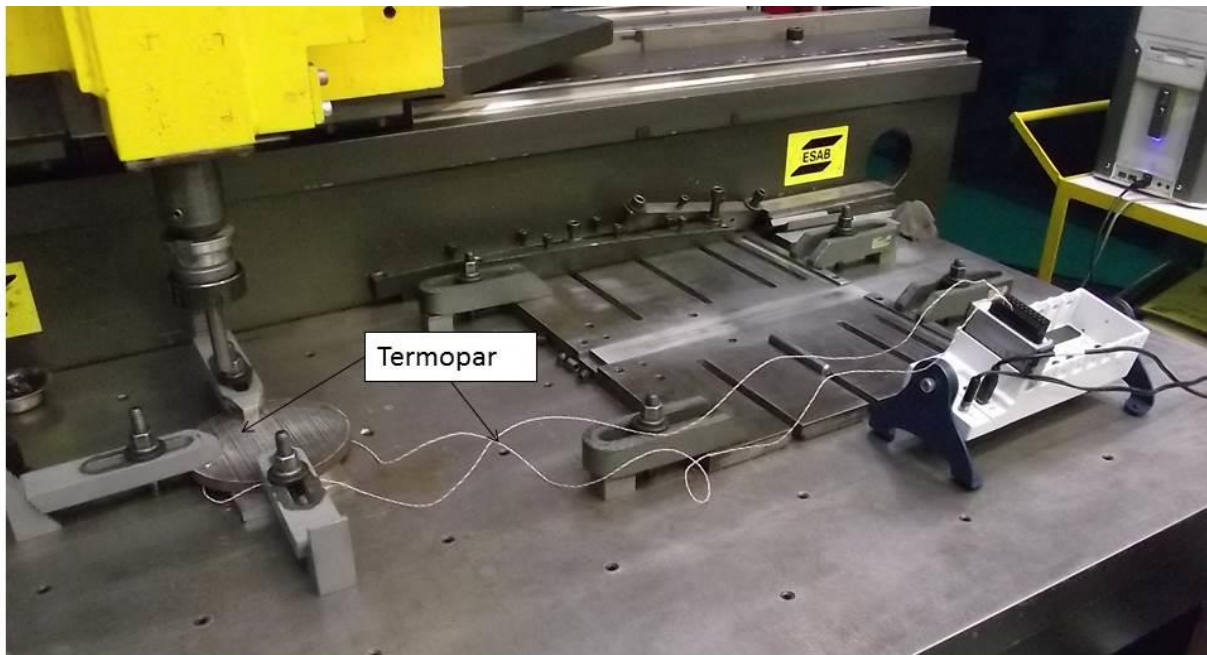


Figura 3-5 Esquema da instalação do termopar.

3.3.2.Fios Fluxados

Os revestimentos com o processo de soldadura MIG/MAG com Fios Fluxados foram realizados nas OGME, com o objetivo de produzir amostras o mais próximo possível das realizadas, na resolução de casos práticos, sendo realizadas pelo mesmo técnico, com os mesmos parâmetros e com os mesmos consumíveis Tabela 3-2

Para tal recorreu-se a uma unidade de soldadura com: fonte de alimentação Kemppi PS 5000, uma unidade de alimentação de fio Kemppi FU 200 e uma unidade de arrefecimento de água Kemppi WU 10

Foram usados como consumíveis, Fios Fluxados **Ok Tubrodur 15.60** da ESAB com 1,6 mm de diâmetro, tendo como gás de proteção uma mistura da Linde designada de “Cargon 18”, com 82% Ar e 18% CO_2 . A composição do fio fluxado é descrita no anexo A

Tabela 3-2 Parâmetros utilizados nos revestimentos com Fios fluxados

Intensidade media (A)	Velocidade de alimentação do fio (m/min)	Tensão media (V)	Caudal de Gás (l/min)	Velocidade média de soldadura (m/min)
125	4,3	15	11	0,14

Os revestimentos foram realizados em oficina, e a distribuição dos sucessivos cordões foi definida pelo técnico de modo a minimizar o empeno da bolacha de base. O arrefecimento foi feito ao ar livre, por limitações técnicas.

3.3.3.SER

Tal como referido anteriormente, os parâmetros operatórios foram definidos pelo técnico que realizou os revestimentos.

Foram utilizados elétrodos revestidos **OK 86.08 da ESAB** de 3,2 mm de diâmetro, ver propriedades no anexo B, com uma intensidade média de 125 A, uma tensão média de 24,9 V e uma velocidade média de soldadura da ordem de 0,18 m/min.

Estes revestimentos foram feitos recorrendo ao equipamento de soldadura Kemppi PS 5000.

3.4. Avaliação dos Revestimentos

Uma vez realizados os revestimentos com as três técnicas de revestimento em estudo procedeu-se à sua caracterização macro e microestrutural e mecânica.

3.4.1.Macro e Microscópica Ótica

As amostras polidas foram contrastadas com uma solução de Nital com uma concentração de 2%, durante 5-10 s.

A macro e microscopia óticas, foram realizadas recorrendo a um microscópio ótico Leica DMI 5000 M, para avaliar a ligação, a espessura da zona termicamente afetada e as transformações macro e microestruturais resultantes dos ciclos térmicos a que os materiais foram sujeitos.

3.4.2.Ensaio de Dureza Vickers

Os ensaios de dureza realizados nos revestimentos, foram executados com uma carga de 9,8 N, de acordo com o procedimento experimental anteriormente descrito. Foram feitas indentações não só com o objetivo de caracterizar os revestimentos produzidos mas também todas as zonas adjacentes como sejam: ZTA, ZTMA e material base.

3.4.3. Ensaio de Desgaste

Os ensaios de desgaste foram realizados numa máquina do tipo *pin-on-disk*, existente na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCTUNL), em que a amostra é animada de um movimento de rotação e sujeita ao desgaste originado por um pino de Tungsténio, com uma dureza de 1850 HV e com 5 mm de diâmetro, que se encontra estático, sujeito a uma carga aplicada.

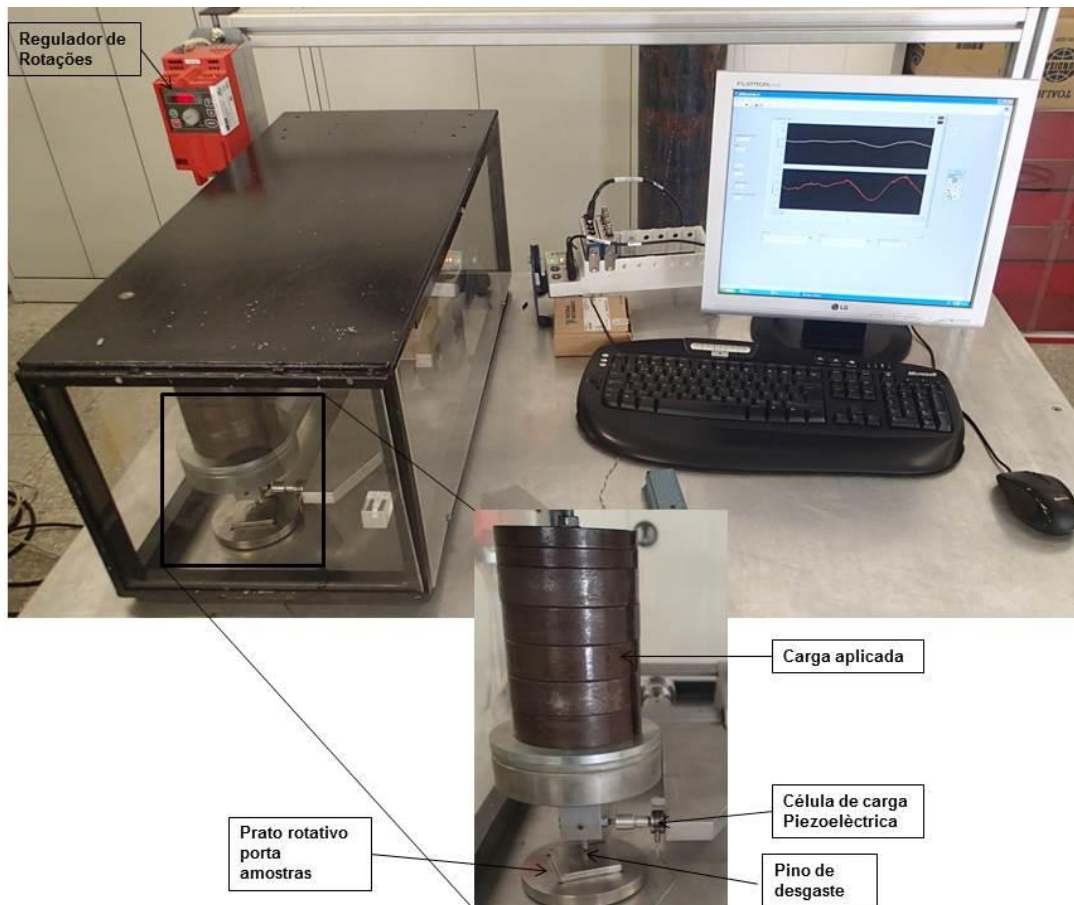


Figura 3-6 Máquina de ensaios de desgaste

Os testes foram realizados nos três tipos de revestimentos em estudo e no material base com o objetivo de possibilitar a comparação entre revestimentos. Inicialmente, foram usados os parâmetros apresentados na primeira linha da Tabela 3-3, selecionados com base na experiência do grupo, parâmetros esses que foram corrigidos face aos resultados obtidos nos primeiros ensaios. Definida a velocidade periférica (V_p), calculou-se a velocidade a impor ao motor de acionamento do prato porta amostras através da (3-1).

Tabela 3-3 Parâmetros usados nos ensaios de desgaste

	ω_m (rev/min)	ω_p (rev/min)	r (m)	V_p (m/s)	Relação de transmissão	Tempo de ensaio	Distancia percorrida (m)
Parâmetros preliminares	250	35,71	0,01	0,039	7	2h 7min 20s	300
Parâmetros de ensaio	200	28,57	0,01	0,0299	7	3h42min50s	400

$$V_p = \omega_p \times r \times \frac{2\pi}{60} \quad (3-1)$$

Em todos os ensaios de desgaste realizados, aplicou-se uma carga estática de 88,36 N. As amostras testadas foram previamente maquinadas a fim de se ajustarem à cavidade existente no prato de teste e retificadas com uma retificadora de mó abrasiva, de modo a obter uma superfície final próxima da encontrada em funcionamento. Após a preparação, as amostras foram limpas com álcool para remover eventuais sujidades e pesadas numa balança de precisão GR-200-EC da A & D instrumentos LTD, antes e após os testes de desgaste, para determinar a massa perdida. A balança tem uma precisão de 1 mg. Os dados provenientes dos ensaios, como sejam a força de atrito e o respetivo coeficiente de atrito, foram adquiridos por um programa LabVIEW produzido pelo grupo de trabalho para este tipo de ensaios.

3.4.4. Ensaio de Flexão em Três Pontos

Os ensaios de flexão foram realizados numa máquina de ensaios Instron 3369, (Figura 3-7), que dispõe de uma célula de carga com capacidade de carga de 50 kN, tendo sido imposta uma velocidade de descida do êmbolo de 5 mm/min, os ensaios foram feitos segundo a norma ASTM E 190.

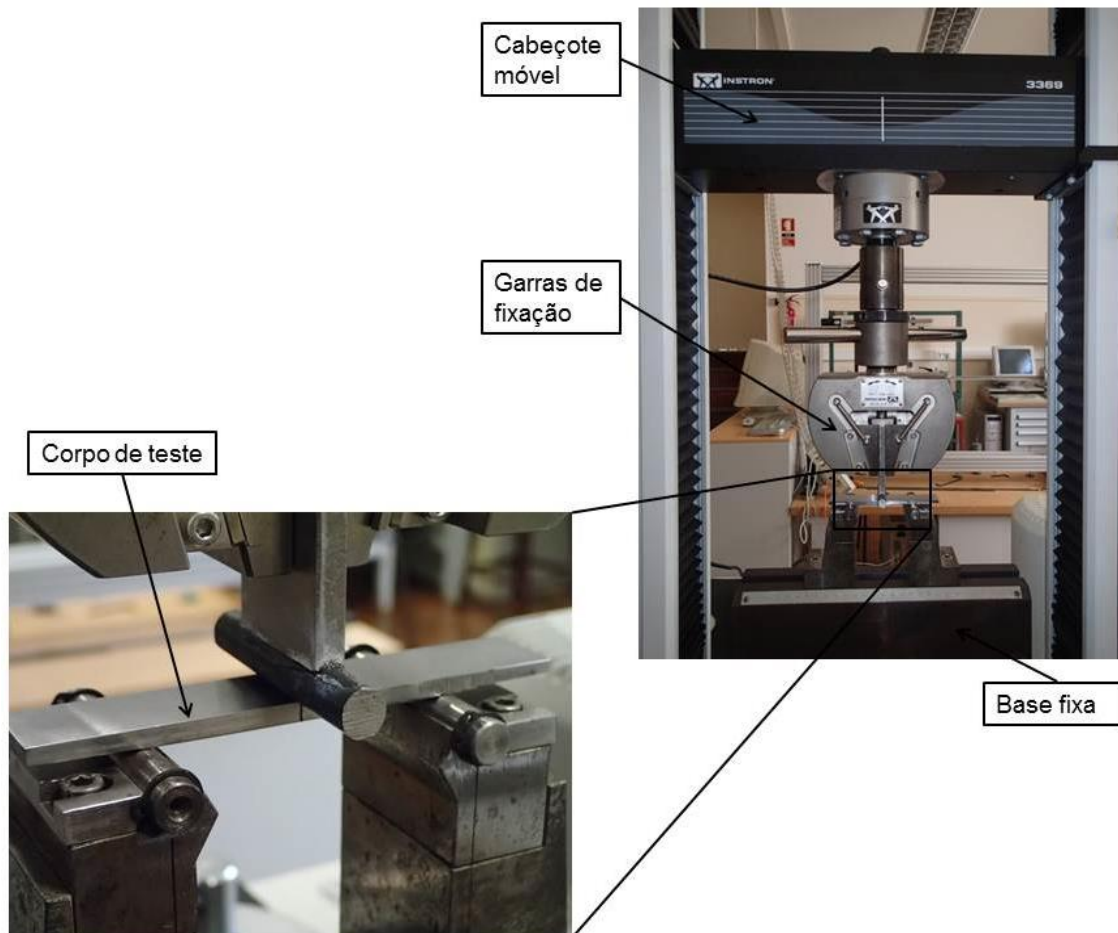


Figura 3-7 Máquina usada para os ensaios de flexão, com pormenor.

Os provetes para a realização dos ensaios de flexão foram retirados de bolachas anteriormente revestidas por cada um dos três processos de revestimento em estudo, sendo de seguida maquinadas e retificadas, como se pode ver na Figura 3-8.

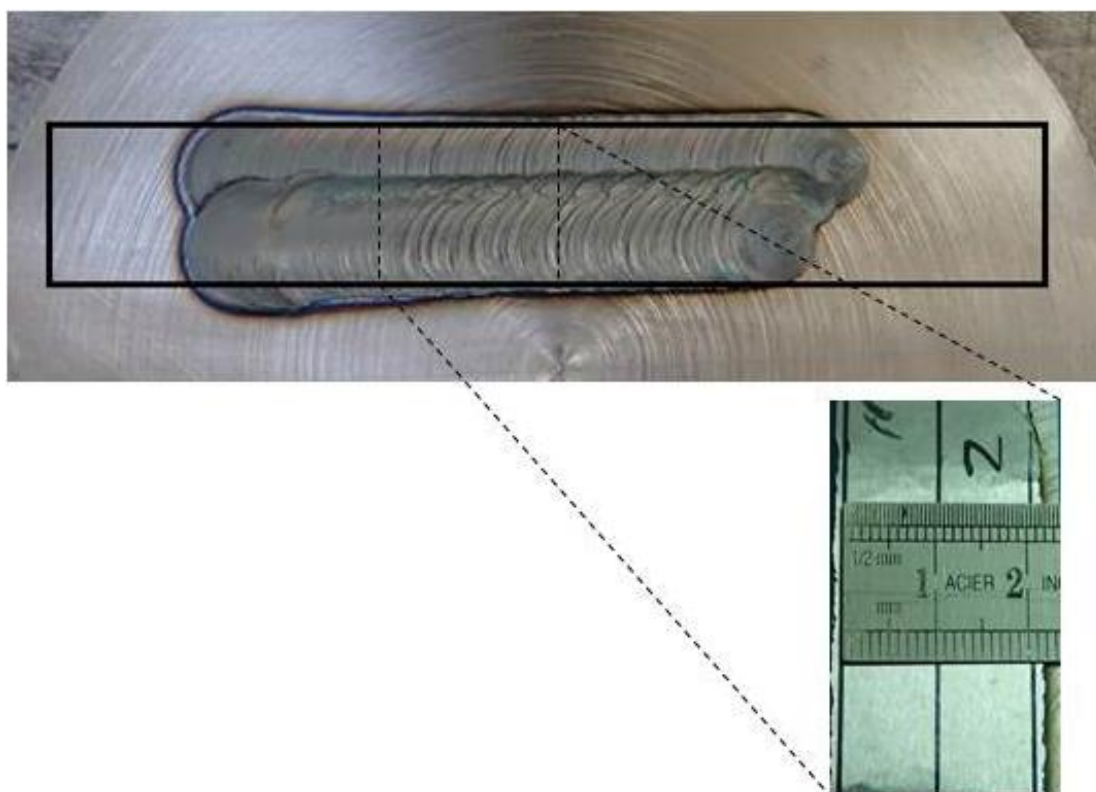


Figura 3-8 Esquema de extração de provete para os ensaios de flexão com pormenor após retificação

Os provetes tinham um comprimento de 130 mm, dos quais 80 mm eram revestidos, adotando-se uma distância entre apoios de 70 mm, evitando assim as zonas iniciais e finais do depósito. Relativamente à largura, considerou-se um valor 20,50 mm extraíndo assim as áreas laterais de cada cordão potencialmente não ligadas, estimadas em 1mm. Para a espessura considerou-se 4,5 mm, dos quais 12% são de revestimento, totalizando 0,5 mm.

3.4.5. Ensaio Push-Pull

Este tipo de ensaio, tem como objetivo testar a resistência da ligação entre o material base e o material depositado. Consistiram na aplicação de uma carga sobre o revestimento, usando um pino de um aço ferramenta com 6 mm de diâmetro. A carga foi aplicada com a máquina anteriormente usada para os ensaios de flexão, com uma velocidade de 2 mm/min (Figura 3-9).

Os provetes revestidos foram previamente maquinados, furados e retificados para garantir o mais possível as mesmas condições de ensaio para as três técnicas, tendo como área revestida um quadrado de 14 x14 mm.

A furação foi feita de modo a que só o substrato fosse removido, usando para tal numa primeira fase uma broca de 6mm e posteriormente uma fresa de topo para que se pudesse obter um furo com a extremidade inferior plana (retificada).

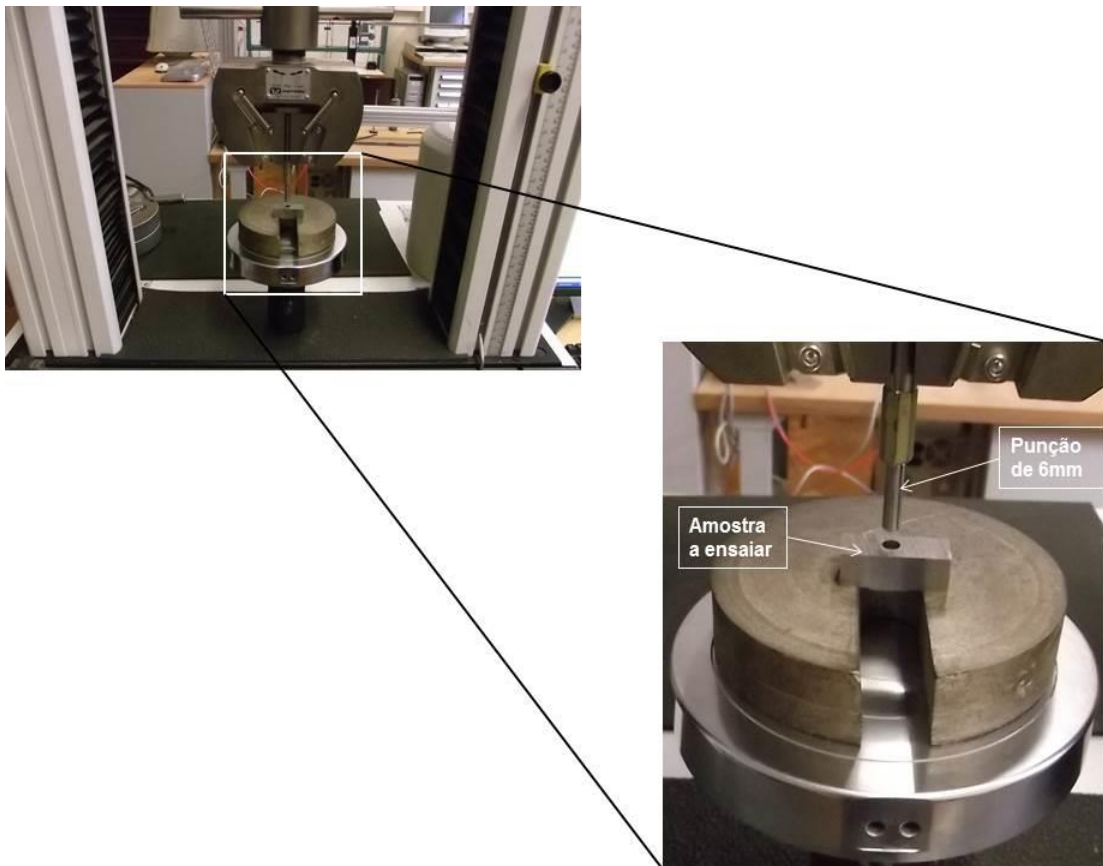


Figura 3-9 Esquema de equipamento usado nos ensaios de Push-Pull

Capítulo 4

4. Resultados e Discussão

4.1. Introdução

Começou-se por fazer uma caracterização metalográfica do material base do braço de suspensão, com o objetivo de se obter as propriedades mais relevantes, tendo em vista aquisição no mercado. Este material, uma vez adquirido, serviu de material base ao longo de todo o trabalho experimental. Numa segunda parte, foram analisados e caracterizados os revestimentos obtidos pelos três processos em estudo e comparados entre si.

Foi ainda feita uma análise de custos operacionais aquando da reparação de um braço, com cada uma das técnicas de revestimento em estudo.

4.2. Caracterização do Material Base

Um dos objetivos deste trabalho, foi obter um conhecimento sobre o aço usado no braço de suspensão do M113. Numa primeira abordagem, para se proceder à aquisição do mesmo que iria servir de material base nos revestimentos a realizar, e por outro lado para se poder prever o seu comportamento e proceder à seleção de parâmetros para realizar os revestimentos. A análise por EDS permitiu identificar como elementos de liga, Cr, Mn, Ni e Si. Contudo, esta análise é semi quantitativa, efetuando-se uma análise química por faiscamento que forneceu os valores indicados na Tabela 4-1.

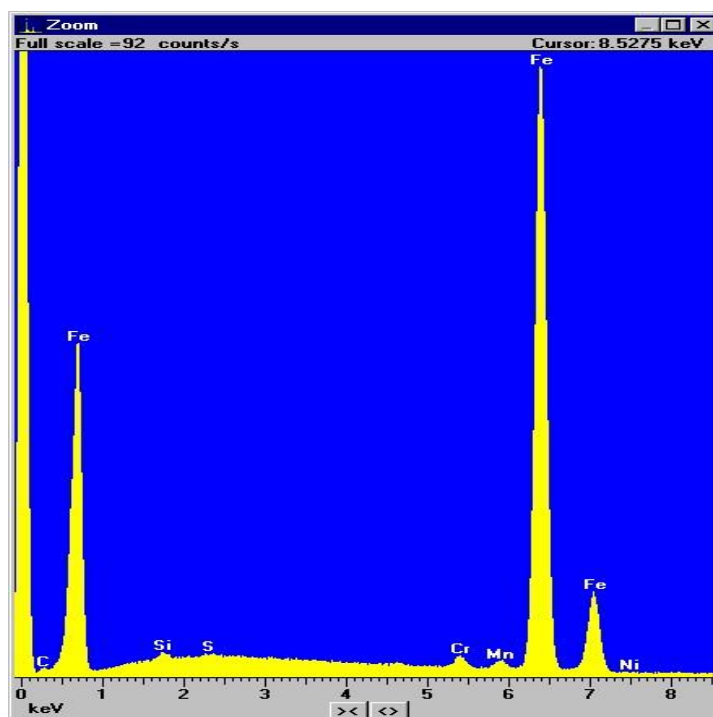


Figura 4-1 Resultados dos ensaios de EDS

Tabela 4-1 Resultados dos ensaios de faiscamento

%C	%Ci	%Mn	%S	%P	%Cr	%Ni	%Cu	%Mo
0,389	0,333	0,842	0,011	0,020	0,879	0,160	0,162	0,178

A dureza média obtida foi de 317 HV com um desvio padrão de 8 HV.

4.2.1. Material Adquirido

Como o trabalho a realizar surge no âmbito dos processos de ligação, neste âmbito para aquisição do material base, não só interessa a composição química, como o respetivo Carbono equivalente que em soldadura nos fornece uma indicação da soldabilidade do material e das precauções a tomar para evitar a fissuração a frio, como referido no capítulo II.

Com os resultados dos ensaios de faiscamento apresentados na Tabela 4-1, calculou-se o carbono equivalente usando a equação (2-1), tendo-se obtido um CE=0,763%.

Uma vez obtidos estes resultados, procedeu-se a uma pesquisa de potenciais aços existentes no mercado que satisfizessem estes requisitos, e que em simultâneo tenham os perfis requeridos (barra ou chapa para servir de material base e varão circular para usar como material de adição em soldadura por fricção linear).

Após a pesquisa, concluiu-se que o aço que mais se assemelhava é o AISI 4140, que tem uma composição muito idêntica á do material base do braço de suspensão, e um Carbono equivalente próximo do acima calculado, (CE=0,785%).

Tabela 4-2 Comparação das composições químicas do aço do veio com aço AISI 4140 [21]

Composição química (%)	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%S	%P	%Ni	%Cu
Material do veio	0,389	0,333	0,842	0,879	0,178	0,011	0,020	0,160	0,162
AISI 4140	0,38-0,43	0,15-0,35	0,75-1,00	0,8-1,10	0,15-0,25	Max 0,04	Max 0,03		

4.3. Friction Surfacing Análise de Parâmetros

Como anteriormente referido, para se poderem ajustar os parâmetros foram realizados seis revestimentos variando os parâmetros operatórios. Uma vez obtidos os revestimentos, foram realizadas macro e microscopia óticas com o objetivo de analisar a ligação entre o revestimento e o material base.

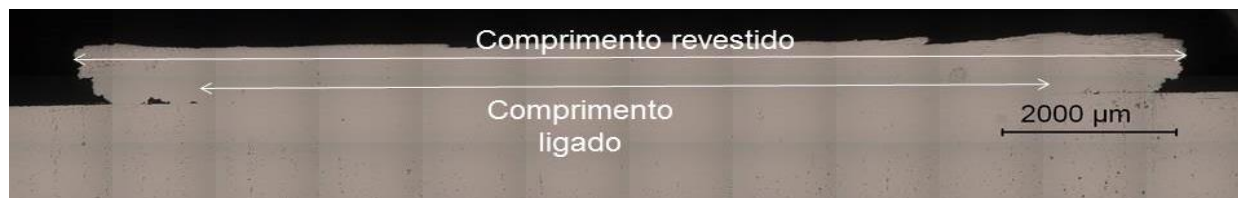



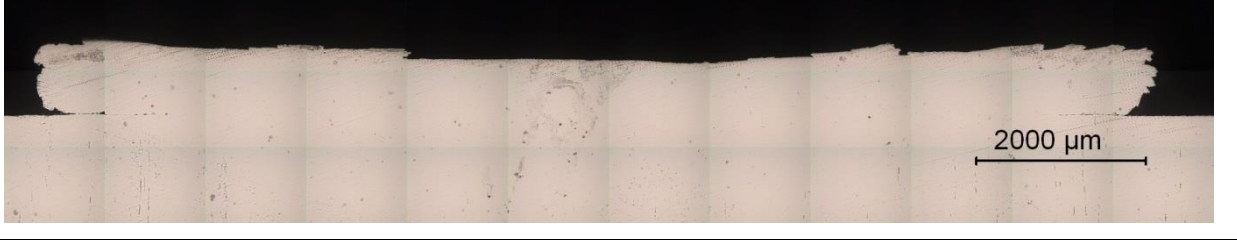

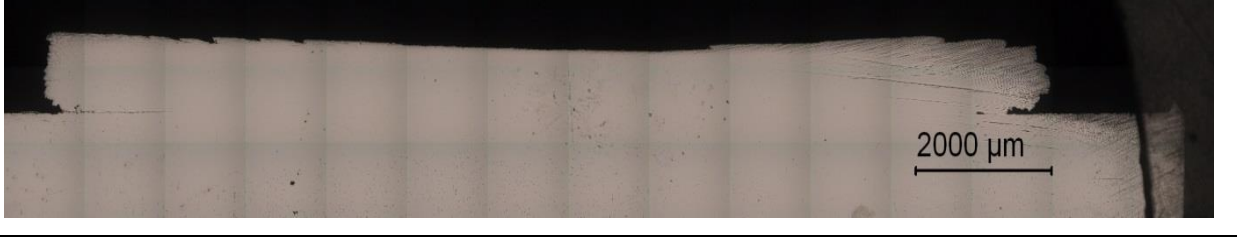
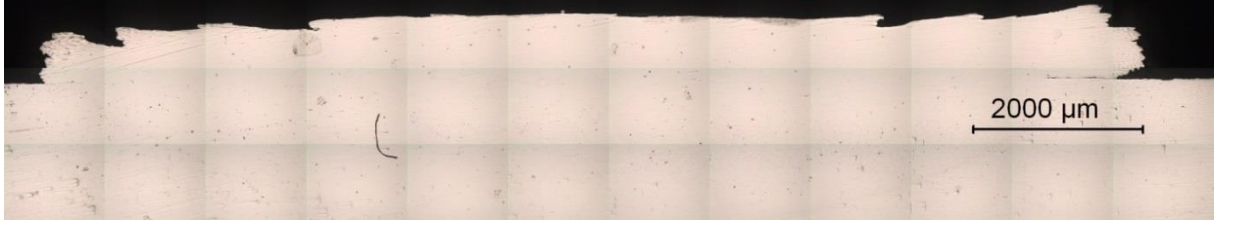
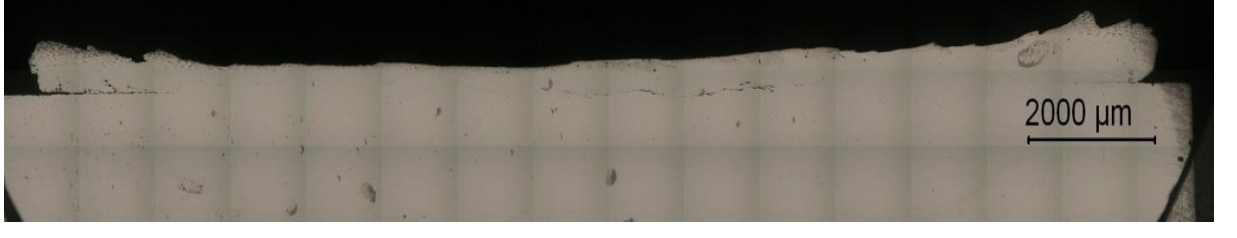
Figura 4-2 Esquema de medição de comprimento revestido e ligado

Nessa análise, deu-se principal ênfase às zonas não ligadas (percentagem de comprimento não ligado) e à existência de defeitos na ligação, tendo sido caracterizados e comparados entre si. A Figura 4-2 mostra como foram medidos os comprimentos na Tabela 4-3 e Tabela 4-4, apresentam-se os valores dos comprimentos medidos e as macrografias dos revestimentos em cada um dos ensaios, respetivamente.

Tabela 4-3 Resultados das medições dos comprimentos revestidos vs. ligado

Código de revestimento	Comprimento revestido (mm)	Comprimento ligado (mm)	% de comprimento não ligado	Existência de inclusões
S1	14,99	11,98	20,1	Não encontrado
S2	13,29	10,65	19,9	Não encontrado
S3	15,17	8,32	45,2	Encontrado
S4	14,62	11,64	20,4	Não encontrado
S5	12,95	11,15	13,9	Não encontrado
S6	13,18	10,07	23,6	Encontrado

Tabela 4-4 Macrografias dos revestimentos teste com respectivo código

Código de revestimento	
S1	 Macrograph of coating S1 showing a light-colored, textured surface with some darker spots. A scale bar in the bottom right corner indicates 2000 μm.
S2	 Macrograph of coating S2 showing a light-colored, textured surface with some darker spots. A scale bar in the bottom right corner indicates 2000 μm.
S3	 Macrograph of coating S3 showing a light-colored, textured surface with some darker spots. A scale bar in the bottom right corner indicates 2000 μm.
S4	 Macrograph of coating S4 showing a light-colored, textured surface with some darker spots. A scale bar in the bottom right corner indicates 2000 μm.
S5	 Macrograph of coating S5 showing a light-colored, textured surface with some darker spots. A scale bar in the bottom right corner indicates 2000 μm.
S6	 Macrograph of coating S6 showing a light-colored, textured surface with some darker spots. A scale bar in the bottom right corner indicates 2000 μm.

Analisando as macrografias, foram excluídos os revestimentos S3 e S6 uma vez que se verificou a existência de inclusões e alinhamentos de óxidos, potencialmente resultantes da contaminação da superfície do substrato aquando da realização dos revestimentos, como se pode ver na Figura 4-3.

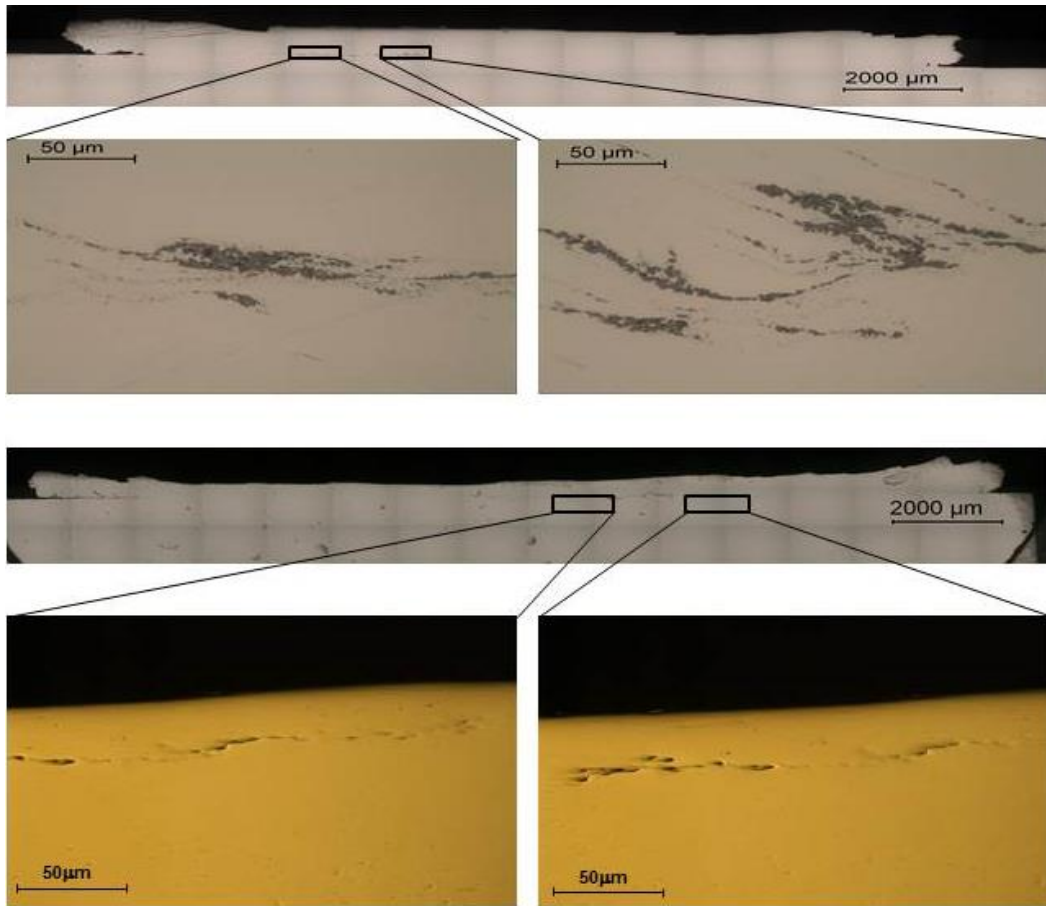


Figura 4-3 Esquema de inclusões e alinhamento de óxidos nos ensaios S3 e S6 respetivamente

Excluídos os ensaios S3 e S6 pela existência de porosidades/inclusões, compararam-se os restantes ensaios no outro item que tinha sido tomado na avaliação que era comprimento ligado. Selecionou-se assim o ensaio S5, que apresentou uma menor percentagem de comprimento não ligado, 12,6%, tendo sido os parâmetros do respetivo ensaio os utilizados nos revestimentos por FS nas restantes fases deste trabalho.

4.4. Caracterização dos Revestimentos

4.4.1. Ensaio de Caracterização Metalográfica

4.4.1.1. FS

Os resultados dos perfis de dureza para os ensaios de FS passagem única são apresentados nos gráficos da Figura 4-5. As indentações começaram no início do depósito e seguindo na direção do sentido decrescente do eixo dos X e a 0,4 mm do início do material base seguindo na direção crescente do eixo dos X, respectivamente para o perfil no depósito e na ZTA, (ver Figura 4-4).

No gráfico da Figura 4-5 podem ser identificadas três zonas distintas, a primeira zona que vai desde o início do MB até aproximadamente 10mm do gráfico, uma segunda zona correspondendo à ZTA que vai desde o fim da zona anterior até aproximadamente 11,5 mm (medindo a ZTA aproximadamente 1,5 mm) e uma terceira zona que corresponde ao material depositado, com uma espessura aproximada de 0,8 mm.

Na primeira zona, nota-se um decréscimo de aproximadamente 8% nas durezas do material base junto da ZTA, que se deve à existência de um amaciamento por ação do calor resultante do processo (FS).



Figura 4-4- Localização das indentações de dureza na macrografia do depósito.

Consultando o gráfico da Figura 4-5, podemos ver que a dureza do material depositado está compreendida entre 669 e 701 HV, tendo um valor médio de 689 HV e um desvio padrão de 6,6 HV.

Estes valores estão de acordo com resultados obtidos para um revestimento realizado por FS com o mesmo aço (AISI 4140) [17].

Perfil de durezas FS

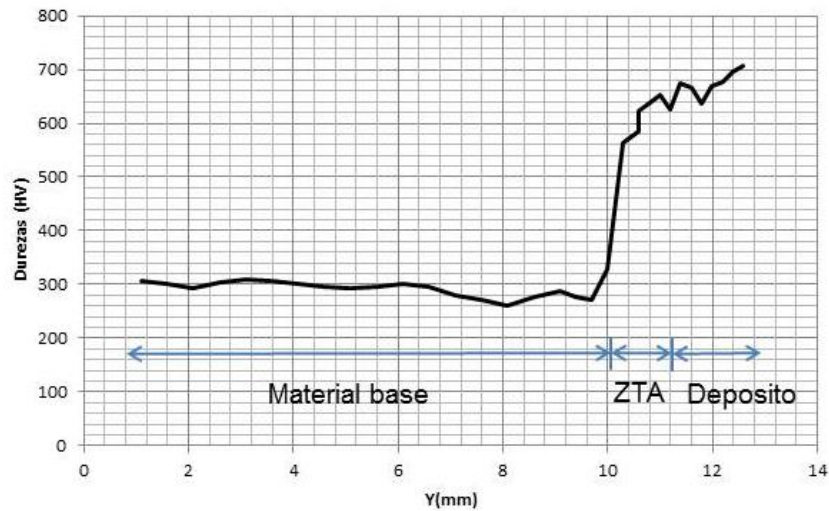


Figura 4-5 Perfil de durezas FS

Esta elevada dureza evidencia à presença de uma microestrutura predominante de martensite em ripas e carbonetos dos elementos de liga dissolvidos na matriz martensítica (Figura 4-6I), o que faz aumentar a dureza. Por outro lado, os fenômenos mecânicos envolvidos no processo deformam a estrutura contribuindo para o aumento da dureza.

Pode-se ainda constar pela Figura 4-6II, que assim como esperado o revestimento obtido por FS apresenta um grão fino.

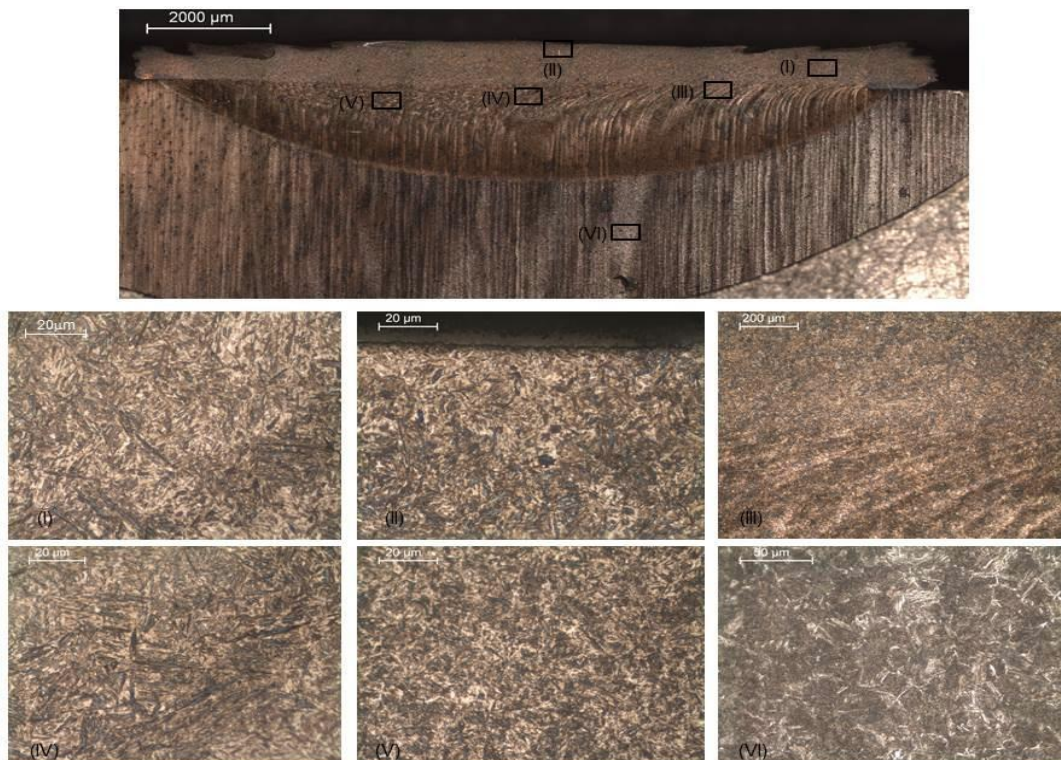


Figura 4-6 Micrografia de FS, (I) Zona média depósito, (II) Zona da extremidade superior do depósito, (III) Zona de transição depósito substrato, (IV- V) Zona termicamente afetada, (VI) Substrato.

No que se refere ao perfil de durezas ao longo da ZTA, pode-se verificar que fora da zona termicamente afetada a dureza não se alterou, tomando assim os mesmos valores que o material base original e que na ZTA propriamente dita as durezas são 5% inferiores às do depósito, variando entre 664 e 700 HV, com uma média de 656,2 HV e um desvio padrão de 16,7 HV.

Este decréscimo sugere que na ZTA ocorre um revenido da martensite apesar do tempo reduzido.

Este revenido pode ser devido à precipitação de carbonetos para a matriz, reduzindo a distorção da martensite e a dureza.

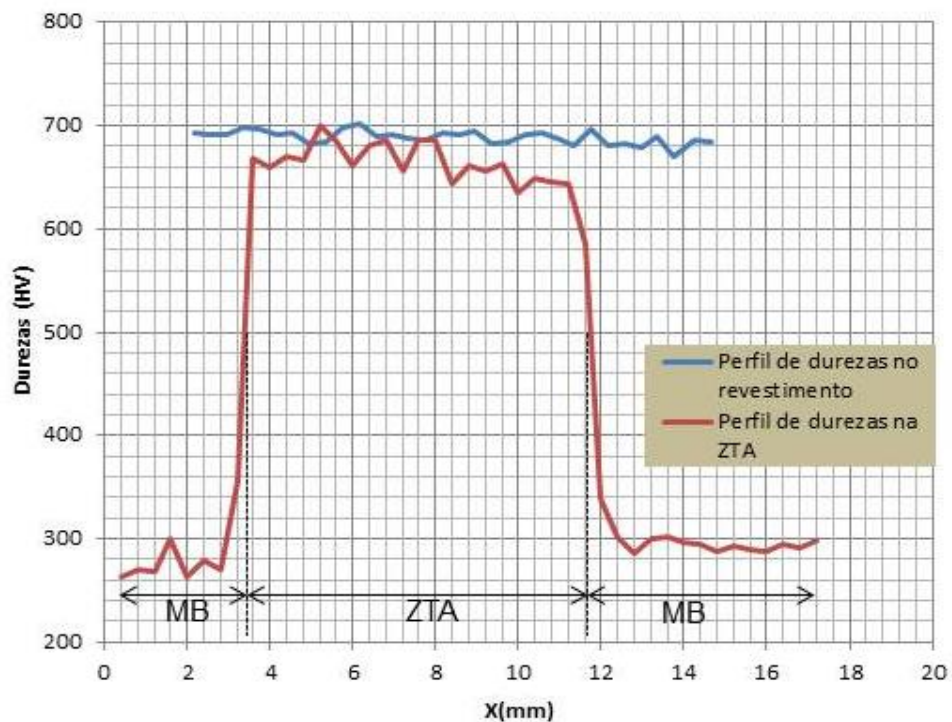


Figura 4-7 Perfil de durezas FS no depósito e na ZTA

Na Figura 4-8, podemos ver um esquema de um pino consumível após a realização de um revestimento. Nesse pino em forma de “cogumelo”, em que as abas laterais são constituídas por material que se deformou aquando do processo, não tendo sido depositado sobre o substrato. Podemos ainda ver que existe um refinamento do grão desde o estado inicial Figura 4-8I, até à Figura 4-8III, após a qual surgem as deformações mecânicas que em conjugação com a temperatura conduzem ao surgimento de uma estrutura martensítica Figura 4-8V, idêntica à do depósito Figura 4-8VIII.



Figura 4-8 Transformações macroestruturais na realização de FS com o material base e o depositado AISI 4140. (I) Material base do pino, (II) Zona de refinamento do grão, (III) Zona termicamente afetada, (IV) ZTMA por efeito da compressão, (V) Microestrutura totalmente recristalizada, (VI-VII) ZTMA por efeito da torção, (VIII) Material depositado, (IX) Interface entre material depositado e material base

4.4.1.1.1. Análise da Temperatura Obtida em FS

Analisando o gráfico da Figura 4-9, podemos constatar que foram atingidas temperaturas da ordem dos 950 °C, temperaturas estas que associadas a uma taxa de arrefecimento média de 130 °C/s são condições necessárias para o aparecimento de uma estrutura martensítica como se pode ver na Figura 4-10, como anteriormente se tinha evidenciado pelas macrografias e pelas durezas realizadas.

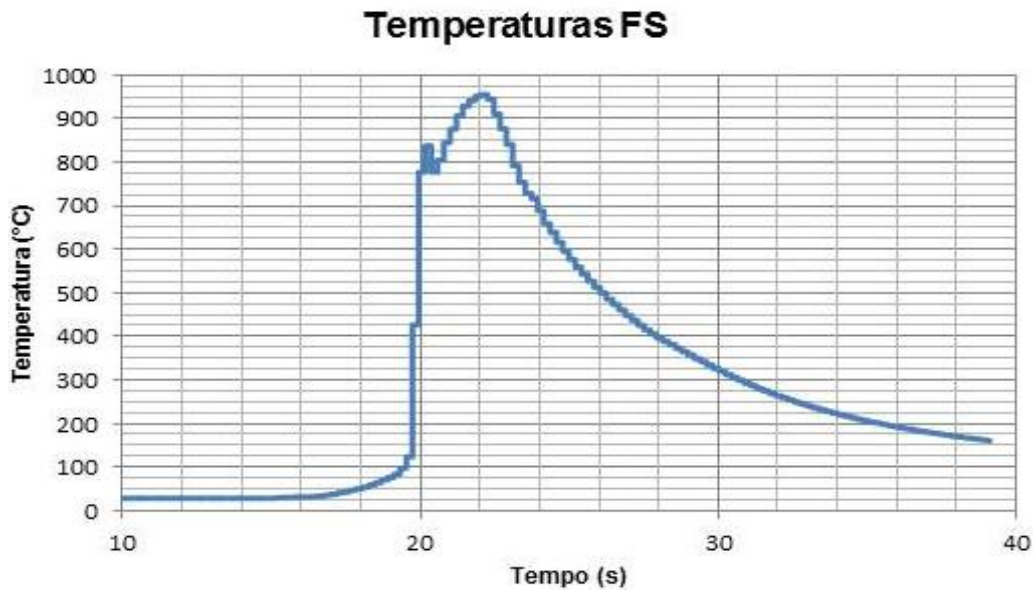


Figura 4-9 Temperaturas lidas aquando da realização dos revestimentos FS

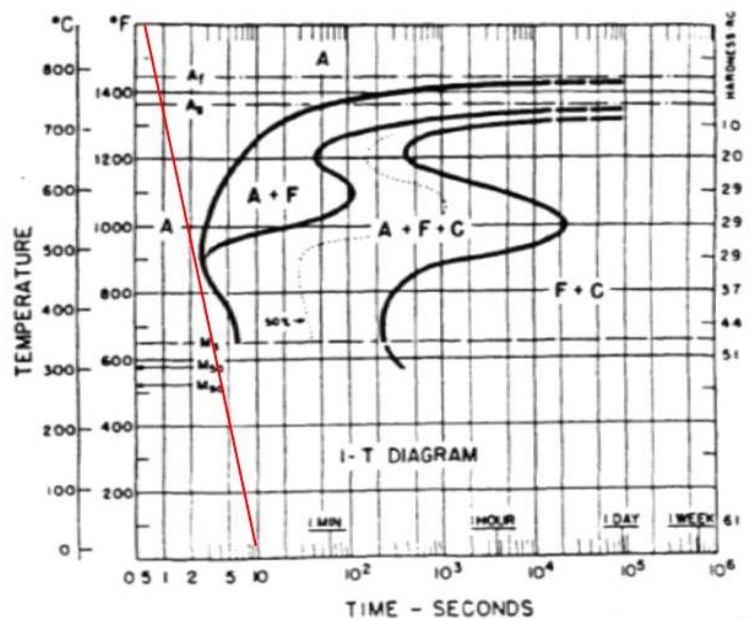


Figura 4-10 Diagrama de arrefecimento contínuo para AISI 4140 adaptado de [34]

4.4.1.1.2. FS Multi Passe

Podemos constatar a existência de uma zona onde ocorre um decréscimo das durezas (transição do primeiro para o segundo cordão). Este efeito deve-se ao facto de ter ocorrido, aquando da realização do segundo cordão, um amaciamento, tanto do revestimento produzido pelo primeiro passe como da respetiva ZTA, resultante do calor produzido pelo segundo passe (Figura 4-11 e Figura 4-12).



Figura 4-11 Esquema das indentações em FS multi passe

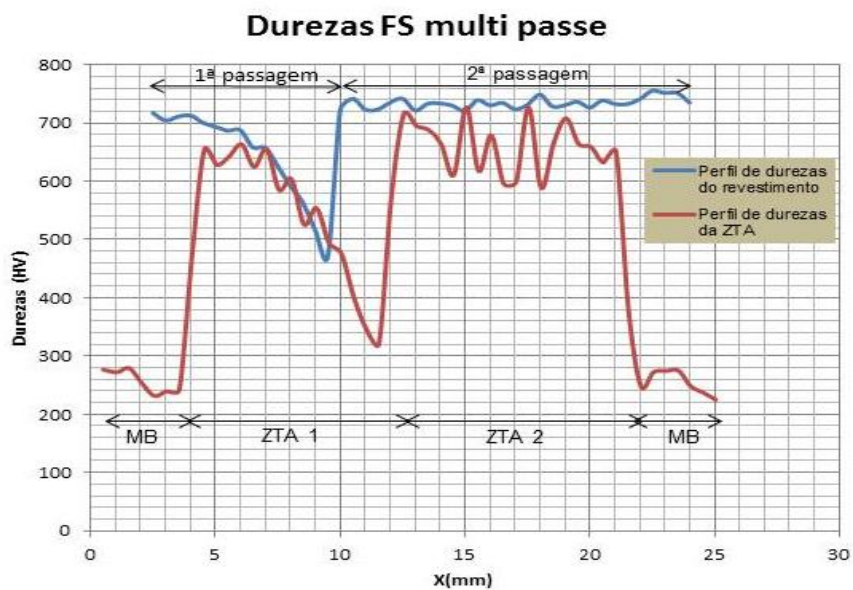


Figura 4-12 Perfil de durezas FS multi passe

4.4.1.2. Fios Fluxados

As indentações feitas em Fios Fluxados, seguem um padrão de distribuições semelhante ao de FS.

Nos revestimentos com Fios Fluxados, ao contrário de FS, não se verifica uma zona termicamente afetada bem delineada, facto que se deve aos sucessivos passes executados para obtenção dos revestimentos. Obteve-se com este processo um revestimento com uma espessura média de 2,5 mm. Na Figura 4-13 apresenta-se uma macrografia do revestimento e micrografia das diferentes zonas.

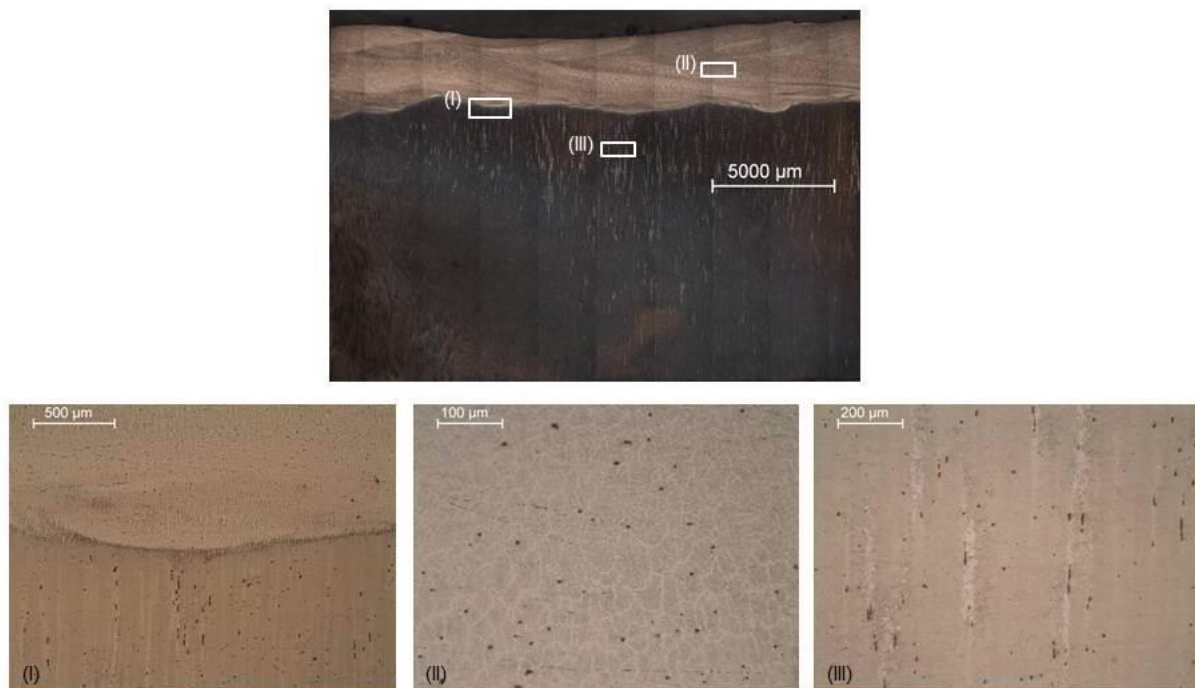


Figura 4-13 Transformações microestruturais nos revestimentos com Fios Fluxados. (I) Zona de transição material depositado material base, (II) Zona de material depositado, (III) Zona termicamente afetada.

Como se pode ver pelo gráfico da Figura 4-14, existe uma grande irregularidade no perfil de durezas, evidenciando que existe uma austenitização seguida de um revenido, devido aos diferentes ciclos térmicos originados nas múltiplas passagens.

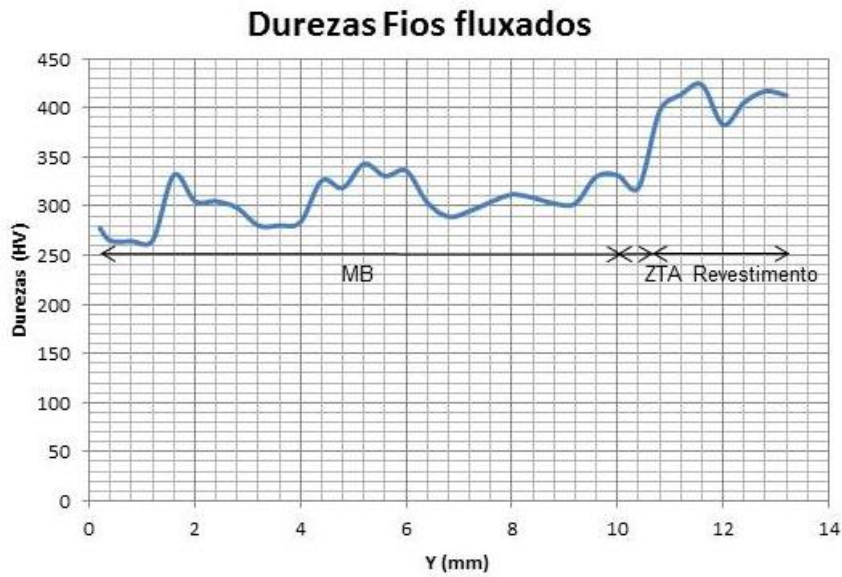


Figura 4-14 Perfil de durezas Fios Fluxados

Podemos ver na Figura 4-15, o perfil de durezas no revestimento (a azul) que apresenta uma dureza média de 386 HV, e um desvio padrão de 16,6 HV, valor que se apresenta 13% abaixo do valor indicado pelo fabricante para este depósito. Este fato que pode ser devido às condições operatórias e aos parâmetros adotados. No que se refere ao perfil de durezas na ZTA (a vermelho), podemos constatar uma grande oscilação. O fato resulta de uma ZTA irregular e ao serem realizadas as indentações, as mesmas são realizadas em zonas do depósito (martensite) que apresentam um valor mais elevado e em zonas onde existe martensite revenida pela ação do multipasse, logo menores durezas. O fato de as durezas terem sido feitas em linha leva a que se intersetem as zonas fundidas e ZTA dos diferentes passes, daí a variação de dureza medida.

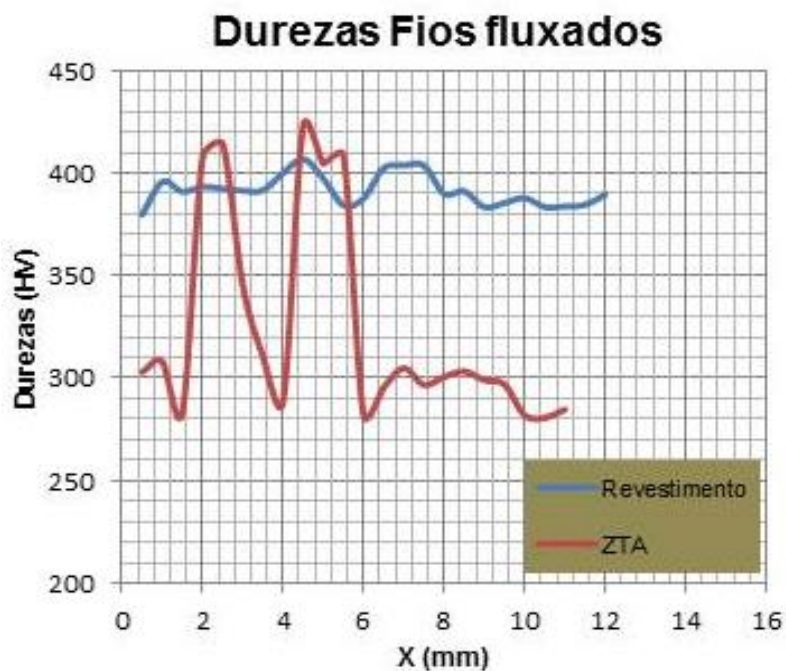


Figura 4-15 Perfil de durezas Fios Fluxados, no revestimento e na ZTA

Com os parâmetros utilizados na realização dos revestimentos, recorrendo ao processo Fios Fluxados calculou-se a entrega térmica usando a equação (4-1). O rendimento de MIG/MAG esta compreendido numa gama de 66 a 85% [36] para fios sólidos, já para Fios Fluxados com proteção gasosa, esse rendimento pode tomar valores entre 80 e 95% [37], variando com a potência usada, tendo sido tomado o valor médio de 88%.

$$ET = \eta_{fios\ fluxados} \cdot \frac{VI}{v} \quad (4-1)$$

Efetuando os cálculos, obteve-se o valor de 687,5 J/mm para a entrega térmica com o processo de Fios Fluxados.

4.4.1.3. SER

Da mesma forma que em Fios Fluxados as indentações feitas em SER seguem padrões de distribuição idênticos aos de FS.

Na Figura 4-16 podemos verificar que não existe uma ZTA bem definida, embora exista uma clara transição do material base para o depósito (Figura 4-17). É clara a presença de precipitados na zona de transição o que aumenta a dureza.

Analisando o perfil de durezas da Figura 4-18, podemos verificar que o valor das durezas obtidas no revestimento que apresenta valores de 237 HV, e um desvio padrão de 19,1 HV, é inferior ás do substrato, contudo estão dentro dos valores indicados pelo fabricante (anexo B) e que a camada de revestimento apresenta uma espessura média de 3,5 mm.

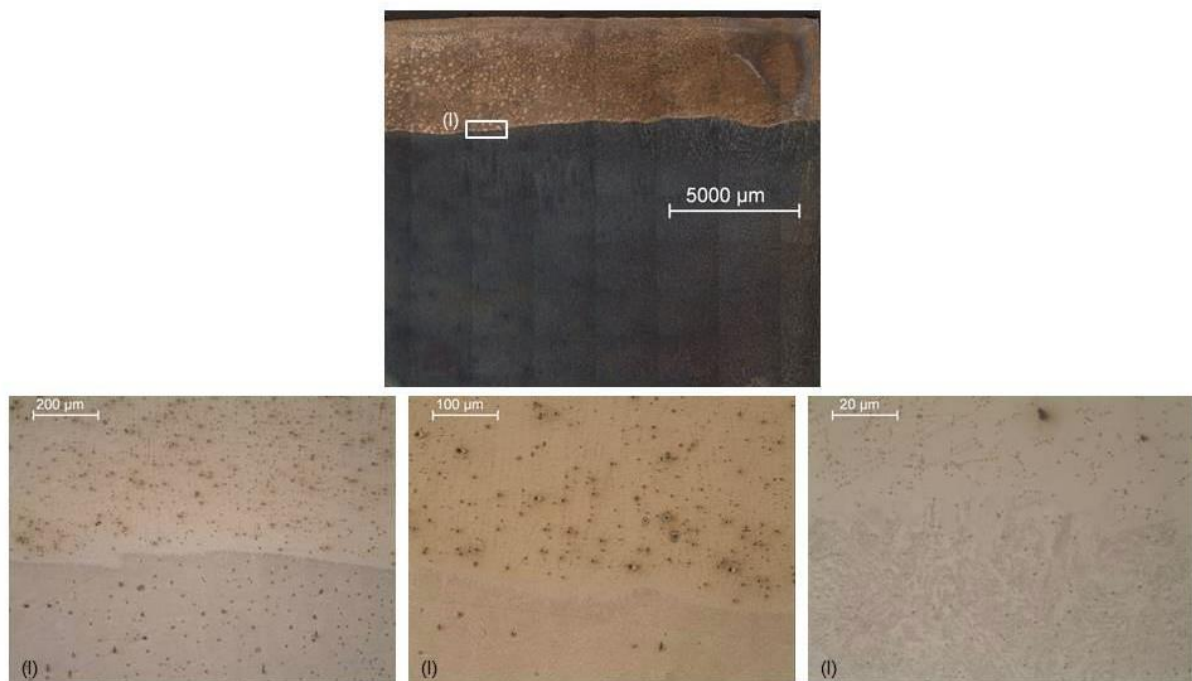


Figura 4-16 Transformações microestruturais nos revestimentos SER

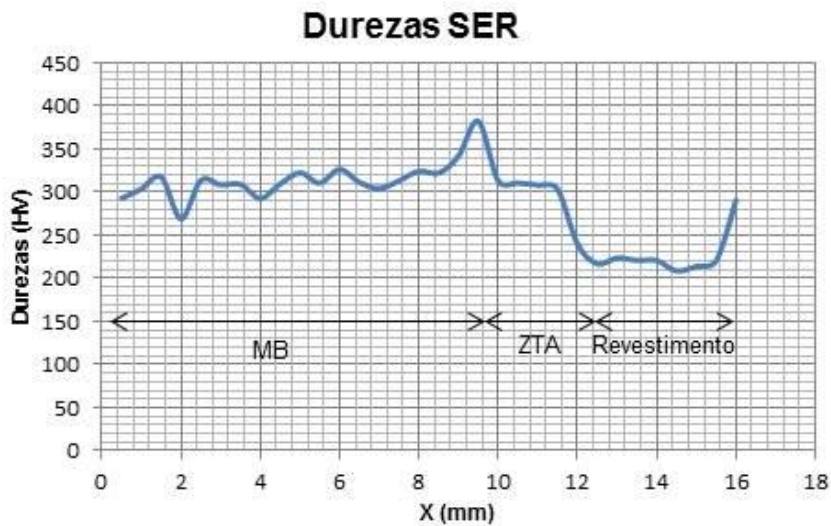


Figura 4-17 Perfil de durezas SER

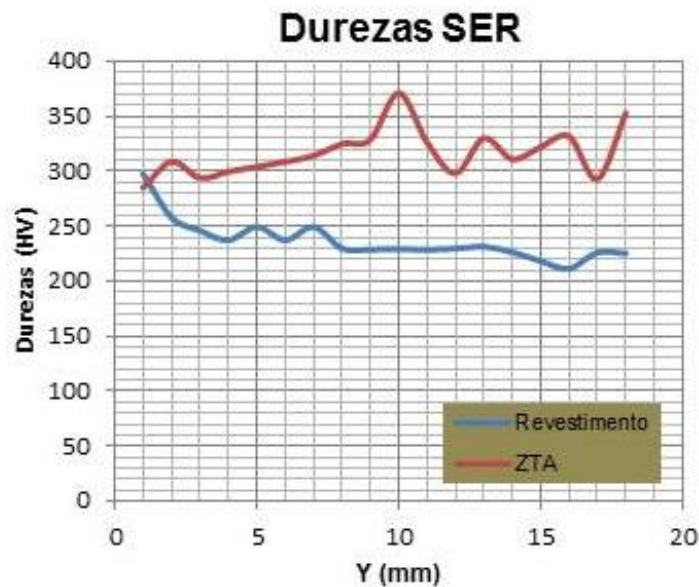


Figura 4-18 Perfil de durezas SER no revestimento e na ZTA

Do mesmo modo que se procedeu para calcular a entrega térmica para Fios Fluxados, calculou-se para SER, usando-se como valor para o rendimento 75%, tendo-se obtido o valor de 778,1 J/mm.

Comparando os valores obtidos para as entregas térmicas de Fios Fluxados e SER podemos verificar que SER apresenta um valor 11,6% superior ao de fios Fluxados, valor que justifica uma maior penetração do material de adição.

4.4.2. Caracterização Mecânica

Os ensaios de caracterização mecânica tem como objetivo, testar os revestimentos e as suas propriedades mecânicas. Para se proceder a esta caracterização foram realizados ensaios de desgaste, ensaios de flexão em três pontos e ensaios Push-Pull.

4.4.2.1. Ensaios de Desgaste

Analisando a Tabela 4-5, podemos verificar que os provetes revestido por FS exibiram um menor desgaste em comparação com os outros revestimentos (uma ordem de grandeza menor que Fios Fluxados e duas vezes menor que SER), resultado espectável uma vez tratar-se do revestimento que apresenta maior dureza superficial. Podemos também concluir que o revestimento obtido por Fios Fluxados, evidência um comportamento satisfatório comparado com o revestimento SER, apresentando uma menor redução de massa (uma ordem de grandeza inferior), correspondendo à respetiva diferença de durezas.

Tabela 4-5 Resultados dos ensaios de desgaste com os parâmetros de teste

	Peso perdido (g)	Volume perdido (mm^3)	Taxa de volume perdido ($10^{-2} mm^3/m$)	Taxa de desgaste (mg/m)
MB	$0,0007 \pm 0,000173$	0,089	0,0223	0,00175
FS	$0,0007 \pm 0,000208$	0,089	0,0223	0,00175
Fios Fluxados	$0,003 \pm 0,000115$	0,382	0,0955	0,0075
SER	$0,0205 \pm 0,000436$	2,608	0,652	0,0513

Comparando os revestimentos com a material base, é evidente que só o FS tem um comportamento semelhante ao do material base. Os Fios Fluxados, ao contrário do inicialmente esperado, apresenta um maior desgaste que o MB. Este resultado advém do facto de os revestimentos com Fios Fluxados apresentarem um tamanho de grão maior que o do material base, (Figura 4-19), o que facilita a propagação das fissuras, levando a uma maior taxa de remoção.

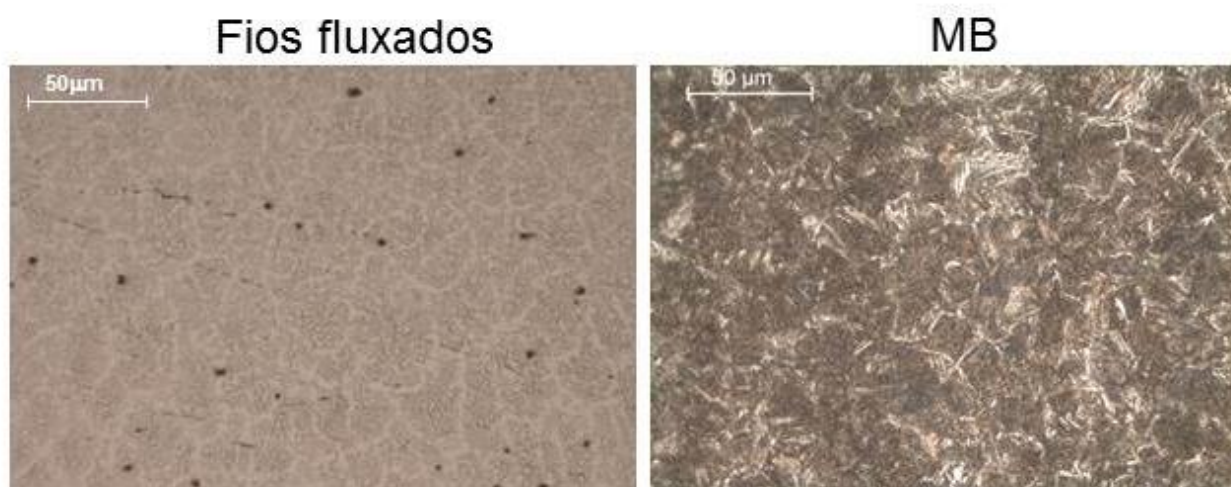


Figura 4-19 Micrografias do revestimento com Fios Fluxados e do MB

Podemos ver pelos gráficos da Figura 4-20, que não se obteve em todos os ensaios um regime perfeitamente estável, fenómeno que evidencia que existiu um aumento da área de contacto entre o pino de Tungsténio e o revestimento no decorrer do ensaio.

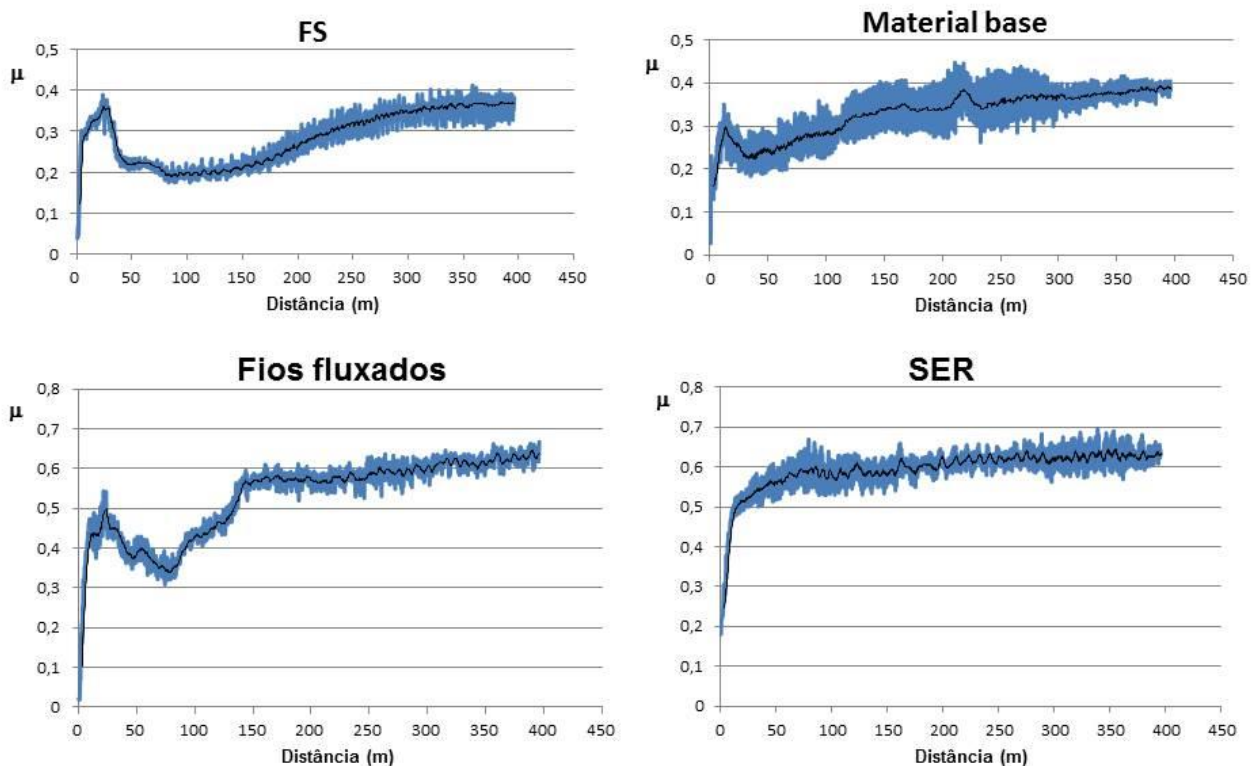


Figura 4-20 Resultado dos ensaios de desgaste (coeficiente de atrito)

Analisando os coeficientes de atrito médios em regime estacionário (

Tabela 4-6), podemos concluir que o revestimento obtido por SER apresenta um maior valor quando comparado com os restantes, com um o valor médio de $0,63 \pm 0,09$, seguindo-se-lhe o revestimento realizado por Fios Fluxados com o valor de $0,62 \pm 0,05$. Em oposição, o Friction Surfacing apresenta o valor mais baixo para o coeficiente de atrito dos três revestimentos testados, $0,37 \pm 0,02$, valor esse que se apresenta muito semelhante ao do material base $0,38 \pm 0,07$.

O valor do coeficiente de atrito é de extrema importância uma vez que quanto menor for o seu valor, menor será a zona plasticamente afetada, e conseqüentemente menor a remoção de material associado à propagação de uma fissura. Este parâmetro está também relacionado com a profundidade da nucleação das fissuras que vão sendo geradas durante o desgaste, sendo estas tanto menores quanto menor for o valor do coeficiente de atrito.

Tabela 4-6 Valores médios para o coeficiente de atrito (regime estacionário)

	Valor do μ
MB	$0,38 \pm 0,07$
FS	$0,37 \pm 0,03$
Fios Fluxados	$0,62 \pm 0,05$
SER	$0,63 \pm 0,09$

4.4.2.2. Ensaios de Flexão em três pontos

Nos gráficos da Figura 4-21, podem ser vistos os resultados dos ensaios de flexão aos três tipos de revestimentos e ao material base.

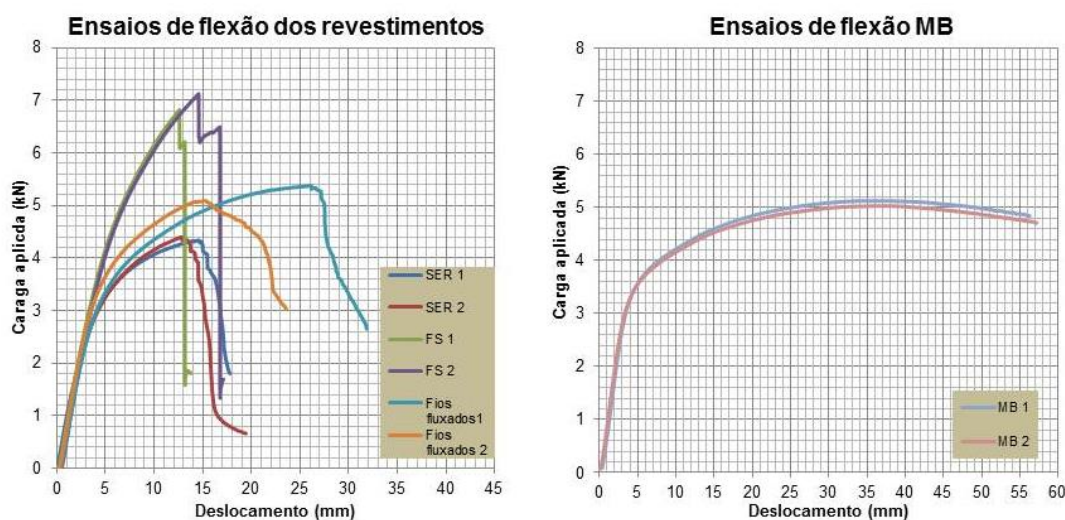


Figura 4-21 Gráficos dos ensaios de flexão nos revestimentos e no MB

Para uma melhor percepção das cargas máximas aplicadas em cada ensaio elaborou-se a Tabela 4-7, onde se pode ver que os revestimentos obtidos por FS suportam uma maior carga quando sujeitos à flexão até à cedência, apesar de uma vez atingida essa carga se verificar um acentuado decréscimo da mesma, o que evidencia uma fratura frágil.

Comparando as cargas máximas obtidas podemos verificar que a carga obtida para os revestimentos por FS se apresenta 37% maior que a dos revestimentos feitos com SER e 25% maior que a dos revestimentos feitos com Fios Fluxados. Fazendo a mesma comparação mas agora com o material base podemos verificar que a carga obtida para os revestimentos por FS é 27% maior que a do MB. Nos revestimentos com Fios Fluxados, a carga máxima apresentada é muito próxima da do material base é 16% acima da dos revestimentos com SER, que foi o revestimento onde se registou uma menor carga.

Tabela 4-7 Cargas resultantes dos ensaios de flexão

Revestimento por	Carga máxima no 1º ensaio (kN)	Carga máxima no 2º ensaio (kN)	Carga média (kN)
SER	4,33	4,40	4,37
FS	6,82	7,12	6,97
Fios Fluxados	5,37	5,09	5,23
MB	5,13	5,02	5,08

Analisando os provetes após os testes de flexão, ilustrados na Figura 4-22, podemos verificar que nos revestimentos por FS existe uma descontinuidade na propagação da fissura, descontinuidade essa que coincide com transição do primeiro para o segundo passe. Nos revestimentos obtidos por SER, verifica-se que as fissuras apresentam uma dispersão, o que evidencia a existência de imperfeições e uma fragilidade no revestimento. Com Fios Fluxados verifica-se a propagação de uma fissura começando numa extremidade e evoluindo para o centro do provete. No que concerne ao material base, não se verifica a existência de fissuras, verificando-se um alongamento contínuo com uma evidente estrição do provete.

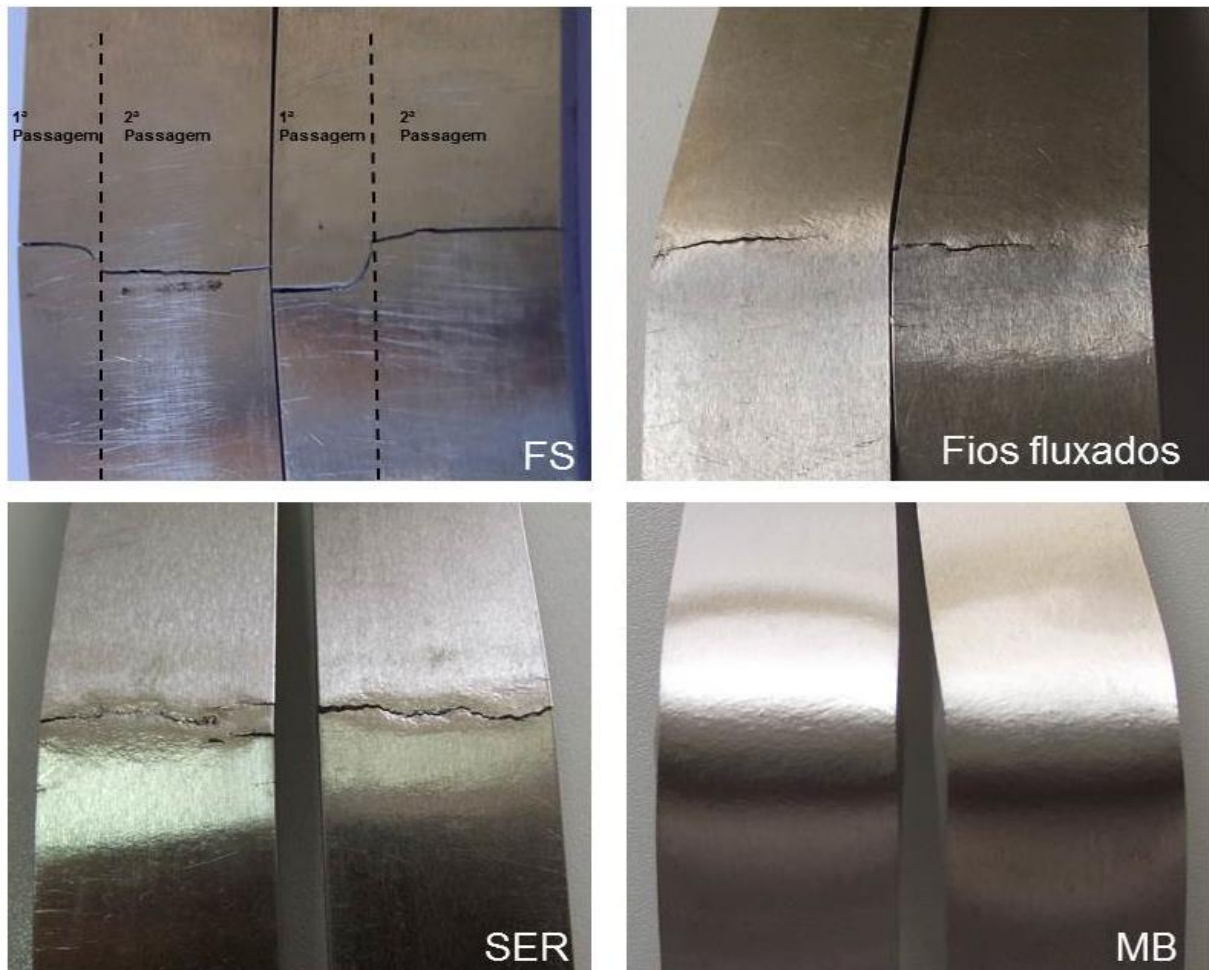


Figura 4-22 Fotos dos provetes testados à flexão após os ensaios.

4.4.2.3. Ensaios Push-Pull

É de salientar, que neste tipo de ensaios, o objetivo principal não é determinar a carga máxima suportada por cada revestimento, mas sim verificar se a falha ocorre por cedência do revestimento ou por falta de adesão do mesmo ao substrato.

As cargas dos ensaios não podem ser comparadas entre os diferentes revestimentos, uma vez que apesar de se ter definido a área a revestir, esta nem sempre foi cumprida por razões operacionais. Por outro lado, a espessura foi definida pela deposição apresentada em cada revestimento.

Dos resultados consultados nos gráficos da Figura 4-23 e transcritos para a

Tabela 4-8, podemos verificar que os revestimentos SER apresentam uma disparidade de resultados, o que evidencia uma falta de homogeneidade do revestimento, por oposição aos restantes revestimentos que apresentam uma boa uniformidade nas cargas máximas.

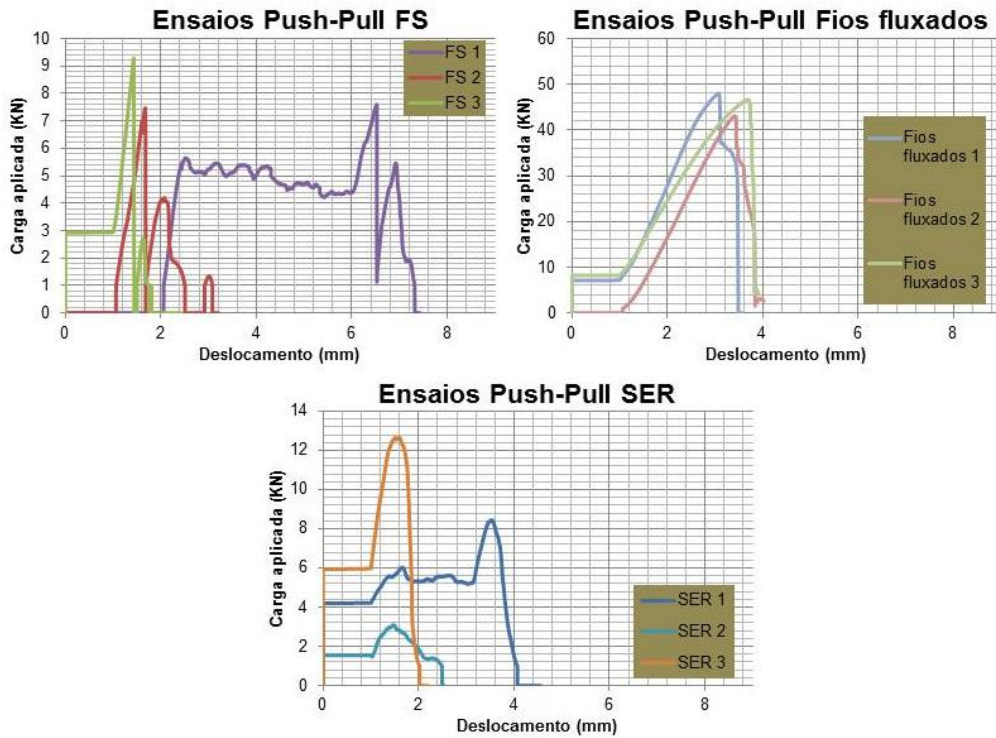


Figura 4-23 Gráficos dos resultados dos ensaios Push-Pull nos revestimentos

Esta homogeneidade pode ser comprovada pelo valor do desvio padrão da carga máxima para cada revestimento.

Tabela 4-8 Cargas resultantes dos ensaios Push-Pull

	Carga máxima do ensaio 1 (kN)	Carga máxima do ensaio 2 (kN)	Carga máxima do ensaio 3 (kN)	Carga média (kN)	Desvio padrão (kN)
FS	7,58	7,47	9,28	8,11	1,20
SER	8,45	3,06	12,65	8,04	2,97
Fios Fluxados	48,04	43,07	46,61	45,91	1,5

Como se pode ver na Figura 4-24, em nenhum dos provetes ocorreu o destacamento do revestimento do respetivo material base, o que evidencia que existe uma boa adesão revestimento/substratos.

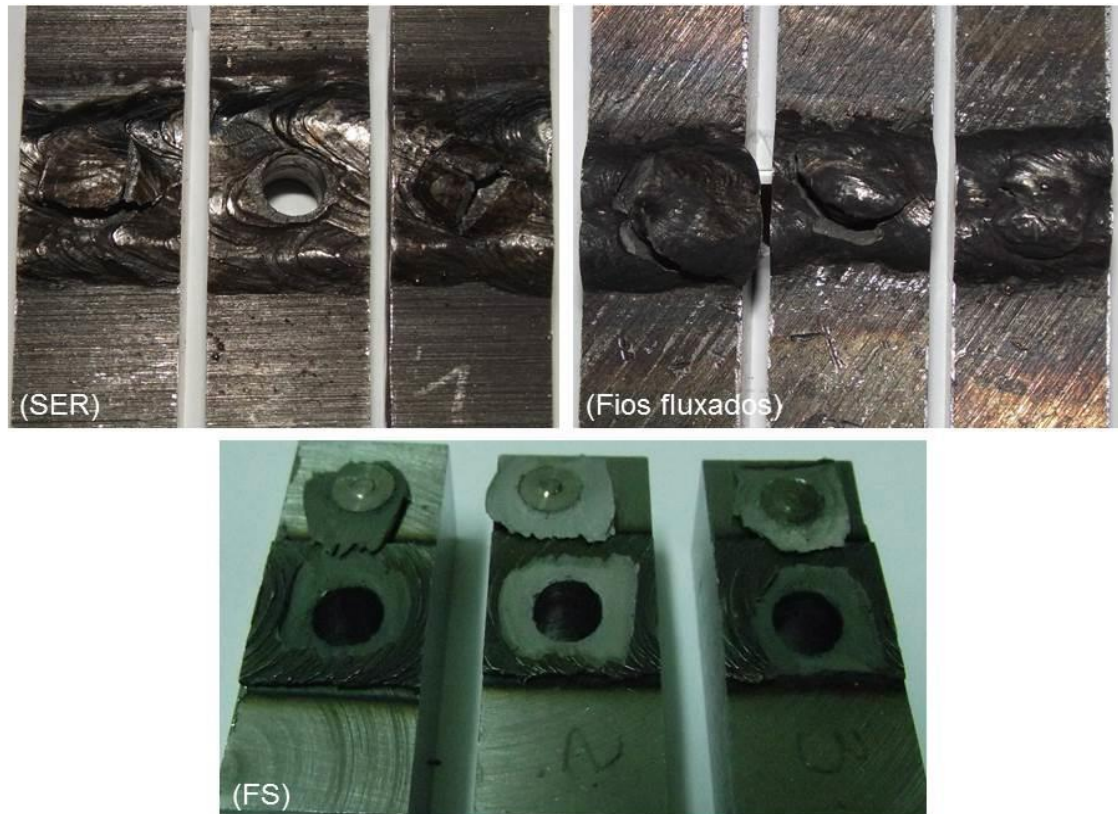


Figura 4-24 Fotos dos provetes testados nos ensaios de Push-Pull após ensaio

4.5. Análise Energética

4.5.1.FS

Para estimar os consumos energéticos, começou-se por calcular a eficiência do revestimento ($\eta_{revestimento}$), para FS. A eficiência do revestimento utilizável, dá-nos a relação entre a fração de pino que é consumido e o que é depositado eficazmente, uma vez que existem partes do depósito que não são ligadas e pode ser calculada pela equação (4-2).

$$\eta_{revestimento} = \eta_{deposição} \cdot \eta_{ligação} = \frac{A_d v}{\pi r^2 V_z} \cdot \frac{L_l}{L_d} \quad (4-2)$$

Para se obter a eficiência do revestimento, começou-se por calcular a taxa volumétrica de pino consumida (CP_{vol}), que é calculada multiplicando a velocidade de descida do pino (V_z), pela área da secção transversal (A_r), onde (r) é o raio do pino, obtendo-se a equação (4-3).

$$CP_{vol}[mm^3/s] = A_r V_z = \pi r^2 V_z \quad (4-3)$$

Da mesma forma, multiplicando a velocidade de avanço (v) pela área da secção transversal depositada (A_d), obtém-se a taxa de deposição volumétrica (TD_{vol}) durante o processo de FS, que é dada pela equação (4-4).

$$TD_{vol}[mm^3/s] = A_d v \quad (4-4)$$

Considerando a densidade do pino consumível (ρ), CP_{vol} e TD_{vol} podem ser reescritos em função da densidade a fim de expressar o fluxo de massa, pelas equações (4-5), (4-6).

$$CP[g/s] = CP_{vol} \cdot \rho \quad (4-5)$$

$$TD[g/s] = TD_{vol} \cdot \rho \quad (4-6)$$

Com o objetivo de se calcular a fração de material consumido que é depositado e o que é transformado em rebarbas, a eficiência da deposição ($\eta_{deposição}$) pode ser definida como a relação entre CP e TD usando a equação (4-7).

$$\eta_{deposição} = \frac{CP}{TD} \quad (4-7)$$

Como anteriormente referido, apenas uma porção de revestimento é ligado uma vez que existem regiões laterais não ligadas. Dado isto, a eficiência da ligação ($\eta_{ligação}$) é dada pela relação entre a largura ligada (L_l) e a largura depositada (L_d) e expressa pela equação (4-8).

$$\eta_{ligação} = \frac{L_l}{L_d} \quad (4-8)$$

Assim, e multiplicando a equação da eficiência do depósito pela de eficiência da ligação, obtém-se a equação (4-2) que nos dá a eficiência do revestimento. Na Tabela 4-9 podemos ver que a eficiência do processo é bastante baixa, em oposição à percentagem de rebarba produzida, que se encontra acima dos valores apresentados por Gandra et al [14], que representavam entre 40 a 60% do consumo global de varão consumível, na deposição de aço macio. Este facto evidencia que a eficiência do processo decresce com aumento da dureza do material a depositar e com o diâmetro do pino usado, uma vez que é necessário fornecer maior quantidade de energia ao processo para que este se desenrole.

Tabela 4-9 Resultados dos cálculos efetuados para a obtenção da eficiência do revestimento e respetiva eficiência.

Ensaio	L_l (mm)	L_d (mm)	$\eta_{ligação}$ (%)	CP (g/s)	TD (g/s)	$\eta_{deposição}$ (%)	Percentagem de rebarba (%)	$\eta_{revestimento}$ (%)
S5	11,50	12,95	86,10	6,08	0,30	4,98	90,02	4,28
S1	11,98	14,99	79,91	8,03	0,57	7,06	92,94	5,64
S2	10,65	13,29	80,08	4,31	0,33	7,53	92,47	6,03
S4	14,63	11,64	79,60	4,19	0,39	9,29	90,71	7,39

Calculada a eficiência do processo de revestimento FS procedeu-se ao cálculo do respetivo consumo de energia.

A energia mecânica fornecida pelo equipamento (\dot{W}_e) ao processo FS pode ser dividido em três contribuições principais: a rotação do varão consumível (\dot{W}_r), O deslocamento segundo eixo Z (\dot{W}_z) e o avanço segundo o eixo X (\dot{W}_x), e pode ser calculada pela equação (4-9).

$$\dot{W}_e [kJ/s] = \dot{W}_r + \dot{W}_z + \dot{W}_x = \frac{2\pi\Omega}{60} T + F_z V_z + F_x v \quad (4-9)$$

Calculada a energia mecânica fornecida pelo equipamento ao processo, podemos agora calcular o consumo de energia específica por unidade de massa depositada, usando a equação (4-10)

$$EC [kJ/g] = \dot{W}_e / TD \quad (4-10)$$

Na Tabela 4-10 resumem-se os consumos de energia específica para o processo FS em quatro dos ensaios realizados.

Tabela 4-10 Resultados obtidos para o consumo específico em FS

Ensaio	$\dot{W}_e [kW]$	$TD (g/s)$	$EC [kJ/g]$
S5	4,23	0,30	13,96
S1	3,73	0,57	6,57
S2	3,41	0,32	10,50
S4	3,50	0,39	9,00
Media	3,72	0,40	9,30

O valor médio obtido para o consumo específico em FS (9,30 kJ/g), é 63% a acima do obtido por Gandra [14], que apresenta valores entre 2,5 e 5 kJ/g. O mesmo autor apresenta taxas deposição de 0,5-1,6 g/s, que comparadas com as obtidas neste trabalho são 57,9% superiores.

4.5.1.Fios Fluxados

Nos cálculos efetuados, considerou-se que 85% do fio fluxado com 1,6 mm de diâmetro, consistia em metal e os restantes 15% eram fluxo (ESAB).

Nos cálculos do consumo efetuados em Fios Fluxados usando a (4-11), só se contabilizou a potência consumida da fonte de alimentação, no entanto existe uma unidade de alimentação de fio e um sistema de refrigeração.

$$P = VI. \quad (4-11)$$

Na Tabela 4-11, podem ser consultados os valores do consumo específico na obtenção dos revestimentos com Fios Fluxados.

Tabela 4-11 Valor obtido para o consumo específico em Fios Fluxados e respetivos valores usados no seu cálculo.

<i>TD(g/s)</i>	<i>Potencia(kW)</i>	<i>EC(kJ/g)</i>
0,96	1,88	1,96

4.5.2.SER

Com os parâmetros operatórios usados na realização dos revestimentos SER, calculou-se a potência consumida usando a equação (4-11), tendo-se obtido o valor de 3,11 kW.

Na realização dos cálculos apresentados na Tabela 4-12, considerou-se um comprimento consumido de eléctrodo Δl , que representa a fração de eléctrodo que é depositado do seu comprimento total (450 mm). Através das leituras obtidas aquando da realização dos revestimentos, estimou-se um tempo de 96 s para o consumo de um eléctrodo. Estes valores foram essenciais no cálculo da taxa de depósito.

Tabela 4-12 Valor obtido para o consumo específico em SER e respetivos valores usados no seu cálculo.

<i>ΔL(mm)</i>	<i>Δt(s)</i>	<i>TD(g/s)</i>	<i>Potencia(kW)</i>	<i>EC(kJ/g)</i>
350	96	0,23	3,11	13,50
375	96	0,25	3,11	11,05

4.6. Análise de Custos Operacionais por Cada Braço Reparado

A estimativa de custos operacionais por braço reparado, foi efetuada entrando em consideração com a energia consumida, os consumíveis gastos (revestimento) e a mão-de-obra. Nos cálculos efetuados foi desprezado o custo hora dos equipamentos, custo de aquisição e amortização do equipamento manutenção dos equipamentos, a área de implementação e necessidade de ministrar formação aos operários, uma vez que estes parâmetros seriam de difícil quantificação e sairiam fora do âmbito do trabalho.

Os custos associados a cada consumível, a parâmetros operatórios e à mão de obra resultaram de uma recolha de dados efetuada nas OGME, sendo apresentados na Tabela 4-13.

Tabela 4-13 Dados económicos usados para os cálculos (valores com iva).

Eletricidade (€/kWh)	Eléctrodos (€/kg)	Fios Fluxados (€/kg)	Gás de proteção (€/mm³)	Aço dos pinos (€/kg)	Mão-de-obra (€/h)
0,165	11,73	9,51	3,43	4,90	29,5

Para se efetuar os cálculos de custos, começou-se por determinar a área a revestir em cada braço de suspensão, usando como dados para os cálculos as dimensões apresentadas no desenho em anexo C, tendo-se obtido uma área a revestir de 236 cm².

4.6.1. Análise de Custos Operacionais por Cada Braço Revestido

4.6.1.1. FS

Na estimativa do custo por braço revestido com FS, consideraram-se duas hipóteses, a primeira considerando o processo como automatizado e contínuo (alimentação contínua do pino), não obstante de o comprimento de um pino (80mm), revestir a área anteriormente calculada. E uma segunda em que se contabilizou a área total revestida e o respetivo tempo de deposição (tempo de set-up e revestimento). No primeiro cálculo do tempo necessário para o revestimento de um braço com FS, foi multiplicado o tempo de revestimento utilizável de um pino pelo número de pinos necessários.

Tabela 4-14 Estimativa de custos para cada braço revestido com FS, para um processo ideal e para um real.

	FS o ideal	FS o real
Área média revestida por cada pino consumido (mm²)	344,36	344,36
Quantidade média de Aço necessária (kg)	6,68	6,68
Tempo despendido com a deposição (min)	10,41	260
Custo dos pinos (€)	32,73	32,73
Custo energético da deposição (€)	0,08	2,66
Custo da mão-de-obra (€)	5,12	127,83
Custo total (€)	37,93	163,22

Na situação real considerou-se que com um pino se consegue obter um comprimento revestido de 80 mm, dos quais 50 mm é entrada e saída do processo, não se podendo garantir a sua aplicabilidade.

Quanto ao tempo total estimado para a deposição, contabilizou-se o tempo de deposição e o tempo de troca de pino estimado em 2,5 min.

4.6.1.2. Fios Fluxados

No cálculo do custo de um braço revestido por Fios Fluxados, considerou-se um tempo de arco de 50%.

Tabela 4-15 Estimativa de custos para cada braço revestido com Fios Fluxados

4.6.1.3. SER

Área média revestida por metro de fio Fluxado (mm^2)	661
Quantidade média de Fio Fluxado necessária (kg)	0,464
Quantidade média de gás utilizada (dm^3)	88,55
Tempo medio despendido com a deposição (min)	16,1
Custo do Fio Fluxado/gás (€)	7,84
Custo energético da deposição (€)	0,042
Custo da mão-de-obra (€)	7,92
Custo total (€)	15,80

No cálculo do custo de um braço revestido por SER, considerou-se um tempo de arco de 30%.

Tabela 4-16 Estimativa de custos para cada braço revestido com SER

Área média revestida por cada elétrodo consumido (mm^2)	804,30
Quantidade média de elétrodos necessária (kg).	0,650
Tempo despendido com a deposição (min)	144,44
Custo dos elétrodos (€)	7,62
Custo energético da deposição (€)	0,37
Custo da mão-de-obra (€)	71.02
Custo total (€)	79,01

Comparando os custos obtidos por braço revestido para cada um dos três processos de revestimento, conclui-se que os Fios Fluxados é o processo que apresenta menor custo, 86,3% dos custos na FS referem-se aos pinos resultando numa baixa eficiência da deposição. Em oposição, a SER apresenta um elevado custo com mão-de-obra totalizando 90% do custo total, valor justificado com o baixo tempo de arco. Se se compararem os dados calculados para FS como processo não automatizado, com os outros processos, constata-se que o valor obtido é uma ordem de grandeza superior.

4.6.2.Custos com a Maquinagem Após Revestimento

Na realização destes cálculos, o avanço, a profundidades de corte, a rotação e potência do torno, foram fornecidos pelas OGME. Nos cálculos só foram contabilizadas as operações de desbaste/retificação grosseiros.

Tabela 4-17 Parâmetros de torneamento e potência do torno

Velocidade de rotação (rev/min)	Avanço (mm/rev)	Profundidade de corte (mm)	Potência do torno (kW)
169	1	1,25	15

Considerou-se, 15 min como sendo o tempo necessário para a preparação das operações de torneamento.

Tabela 4-18 Cálculos económicos do torneamento de desbaste/retificação

Processo	Tempo de operação (min)	Custos energéticos (€)	Custo com a mão-de-obra (€)	Custo total (€)
FS	17	0,08	8,36	8,44
Fios Fluxados	19	0,17	9,34	9,51
SER	21	0,25	10,33	10,58

Após obtidos os custos operacionais para os revestimentos e para os desbastes/retificação, fez-se uma contabilização total para cada braço reparado, com cada uma das três técnicas.

Tabela 4-19 Custos Operacionais por Cada Braço reparado

Processo	Custo do revestimento (€)	Custo do desbaste (€)	Custo total final (€)
FS o ideal	37,93	8,44	46,37
FS o real	163,22	8,44	171,66
Fios Fluxados	15,80	9,51	25,31
SER	79,01	10,58	89,59

4.7. Comparação de Resultados

Tabela 4-20 Tabela resumo da pontuação obtida por cada processo de revestimento

Parâmetros avaliados	Desempenho de cada processo				Pontuação máxima ¹
	FS o ideal	FS o real	Fios Fluxados	SER	
Performance Mecânica					50
Durezas	5	5	3	2	6
Espessura	6	6	5	4	8
Flexão	4	4	3	2	5
Desgaste	14	14	7	5	15
Push-Pull	6	6	7	5	10
<u>Subtotal</u>	<u>35</u>	<u>35</u>	<u>25</u>	<u>18</u>	
Análise Económica					50
Custo energético	4	4	6	7	8
Custo de consumíveis	15	8	16	11	17
Custo de Mão-de-obra	23	10	24	15	25
<u>Subtotal</u>	<u>42</u>	<u>22</u>	<u>46</u>	<u>33</u>	
Total	77	57	71	51	100

Analisando a Tabela 4-20, podemos concluir que o processo de revestimento FS o ideal se apresenta como a melhor solução para o caso em estudo, mas dadas as contingências atuais do processo (a não automatização), leva a que se apresente atualmente como a melhor solução para a reparação do veio, o processo de revestimento Fios Fluxados.

4.8. Conclusões

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios efetuados ao braço de suspensão do M113 com o objetivo de medir as propriedades mais relevantes.

Efetuar-se e analisaram-se seis revestimentos produzidos com FS, com a finalidade de selecionar os parâmetros a adotar na realização dos revestimentos realizados.

Compararam-se os revestimentos produzidos pelas três técnicas em estudo, a nível metalográfico e mecânico, para selecionar o processo que apresenta os melhores resultados. Procedeu-se ainda a um estudo comparativo dos consumos específicos de cada processo.

Foi ainda feita uma estimativa de custos operacionais envolvidos para a realização do revestimento de um braço.

¹ Os valores atribuídos tiveram em conta a comparação com o material base.

Capítulo 5

5. Conclusões

Este trabalho consistiu num estudo comparativo entre as três técnicas de revestimento, aplicadas a um caso prático, sendo de salientar que duas são executadas atualmente pelas OGME (Fios Fluxados e SER) e uma terceira que ainda se encontra em fase de investigação (FS).

Para se proceder à referida comparação de uma forma o mais consistente possível, tomaram-se vários pressupostos: pretendia-se que o material usado como substrato fosse o mais semelhante possível ao do braço de suspensão, os revestimentos com Fios Fluxados e SER fossem produzidos com os mesmos parâmetros, consumíveis e operador dos realizados atualmente nas OGME, e que os respetivos ensaios de caracterização efetuados representassem o mais possível a panóplia de solicitações a que o componente se encontra sujeito em serviço.

Na caracterização do aço dos braços foi dada ênfase a dois ensaios: faiscamento e de durezas Vickers, tendo-se constatado, a partir dos resultados obtidos, que de entre as inúmeras ofertas de aços existentes no mercado, o que mais se assemelhou foi o AISI 4140, que é um aço micro ligado.

Selecionado o aço que serviu como substrato ao longo deste trabalho, procedeu-se ao seu revestimento usando as três técnicas em estudo. Em FS, dado se tratar de uma técnica num processo contínuo de investigação e desenvolvimento, foi necessário definir e ajustar os parâmetros que conduzissem aos melhores revestimentos, dado não existirem até à data dados operatórios para este material. Nesta seleção dois fatores foram ponderados: a relação largura revestida vs. ligada e a existência de defeitos.

No que concerne à caracterização e comparação dos revestimentos, dois tipos de ensaios foram definidos, Metalográficos e Mecânicos. Nos ensaios metalográficos avaliaram-se as alterações metalúrgicas e as espessuras dos revestimentos, enquanto que nos ensaios mecânicos foram determinadas as durezas, a resistência ao desgaste e a flexão e testada a adesão entre o depósito e o material base.

Foi ainda feita uma análise energética que serviu de base a uma comparação económica, onde foram calculados os custos operatórios com o revestimento de um braço, para cada um dos três processos.

Em relação à estrutura metalográfica, FS apresenta uma matriz martensítica, onde são evidentes ripas de martensite e carbonetos dos elementos de liga dissolvidos, que juntamente com um tamanho de grão fino, resultante de uma recristalização dinâmica, justificam as elevadas durezas obtidas com o valor médio de 689 HV. Comparando os valores das durezas obtidas em FS com Fios Fluxados e SER, podemos constatar que se apresentam 44% e 66% superiores, respetivamente.

AS durezas apresentadas pelos dois processos de revestimento que envolvem a fusão do metal apresentam-se bastante inferiores às de FS, devido ao seu elevado tamanho de grão, resultante das elevadas temperaturas a que os metais são sujeitos, associado às reduzidas taxas de arrefecimento, que aumentam o tamanho de grão.

Avaliando as espessuras obtidas, constatou-se que tal como esperado, os revestimentos com Fios Fluxados e o SER conduzem a espessuras muito superiores às de FS, 72 e 80% respetivamente, facto que no presente caso em estudo não representa uma vantagem, dado que quanto maior for a espessura do revestimento, maior será a necessidade de se proceder a operações subsequentes de retificação.

Relativamente à caracterização mecânica, analisando e comparando os resultados do desgaste, verificou-se que FS apresentou um menor desgaste e coeficiente de atrito, quando comparado com as outras duas técnicas (uma ordem de grandeza inferior aos Fios Fluxados e duas ao SER), valores esses que se revelaram idênticos aos obtidos para o material base. Podemos constatar que estes valores são coerentes tendo em conta o tamanho de grão e durezas obtidas em cada um dos revestimentos. O tamanho de grão do revestimento é um dos fatores preponderantes para o desgaste, uma vez que quanto maior o seu tamanho mais fácil é a propagação das fissuras induzidas pela deformação plástica proveniente da abrasão do pino, o que conduz a uma maior taxa de remoção de material.

Dos valores apresentados para a carga máxima nos ensaios de flexão em três pontos pode-se verificar que os revestimentos por FS apresentam melhores resultados, seguindo-se-lhe Fios Fluxados o material base e só por fim SER. Relativamente ao tipo de fratura, os revestimentos por FS, apresentam uma fratura frágil, onde se denota uma descontinuidade na propagação de fissuras, descontinuidade essa que materializa na transição do primeiro para o segundo passe. No revestimento obtido com Fios Fluxados, verifica-se uma propagação contínua de uma fissura com início na extremidade do provete em direção ao centro, os depósitos com SER apresenta uma dispersão na propagação das fissuras, evidenciando a existência de imperfeições e fragilidades no revestimento. O material base apresenta um comportamento dúctil, sem que ocorra o surgimento de fissuras.

Os ensaios de Push-Pull, revelaram uma elevada dispersão nos resultados para SER, confirmando a existência de imperfeições e fragilidades do revestimento.

A análise energética foi elaborada com os dados registados aquando da realização dos respetivos revestimentos, tendo-se obtido valores para os consumos específicos de 9,30; 1,96 e 11,05 kJ/g, respetivamente para FS, Fios Fluxados e SER. A tecnologia de FS apresenta estes valores para o consumo específico, uma vez que tem uma baixa eficiência de revestimento (5,8%), originada por uma elevada formação de rebarba na realização do revestimento.

Analisando os custos operacionais envolvidos no revestimento e desgaste/retificação de um braço podemos concluir que FS o ideal é uma boa solução para o caso em estudo, contudo o processo ainda não se encontra otimizado a esse nível. Dados estes constrangimento atualmente Fios Fluxados apresenta-se como a melhor solução para o caso em estudo.

5.1. Perspetivas de Trabalhos Futuros

No seguimento deste tema, destaca-se como área de interesse o estudo exaustivo dos parâmetros de FS, mais concretamente associados a este caso, com a finalidade de aumentar a eficiência do revestimento.

Outra área de interesse está relacionada com a automação do processo de revestimento FS.

Bibliografia

1. **Garden, Christopher F Fosse and Terry J.** *Military vehicles and ground support equipment.* 1987.
2. **Trehwitt, Philip.** *Armoured Fighting Vehicles.* s.l. : Amber Books Ltd, 1999.
3. **Vilaça, P.** *Complementos de Tecnologia Mecânica.* 2010.
4. **H. Klopstock, A. R. Neelands.** *An improved method of joining or welding metals .* GB572789 UK, 1941.
5. **Bishop, E.** *Friction welding in the Soviet Union Welding and Metal Fabrication.* 1960. pp. 408- 410.
6. **Nicholas, E.D.** Friction processing technologies. *Welding in the World.* 47, 2003, pp. 2-9.
7. —. Friction Surfacing. [ed.] T. Siewert, S. Liu, G. Edwards D. Olson. *Welding Brazing and Soldering.* 1993, pp. 321-323.
8. **E.D. Nicholas, W.M. Thomas.** A review of friction processes for aerospace applications. *International Journal of Materials and Product Technology.* 13, 1998, pp. 45-55.
9. **G.M. Bedford, P.J. Richards.** On the absence of dilution in friction surfacing and later friction welding. *1st International Conference on Surface Engineering.* 1985, pp. 279-290.
10. **Thomas, W.M.** *An Investigation and Study into Friction stir Welding of Ferrous-Based Material.* s.l. : University of Bolton, 2009.
11. **G.M. Bedford, V.I. Vitanov, I.I. Voutchkov.** On the thermo-mechanical events during friction surfacing of high speed steels. 2001, 34-39.
12. **Fukakusa, K.** On the characteristics of the rotational contact plane - a fundamental study of friction surfacing. *Welding Internationala.* 10, 1996, pp. 524-529.
13. **Bedford, G.M.** *Friction surfacing a rotating hard metal facing material onto a substrate material with the benefit of positively cooling the substrate, US Patent. No. 5077081 A* 1991.
14. **J. GANDRA, R.M. MIRANDA, P. VILAÇA.** Performance analysis of friction surfacing. *Journal of Materials Processing Technology.* 212, 2012, pp. 1676-1686.
15. **H.K. Rafi, G.D.J. Ram, G. Phanikumar, K.P. Rao.** Friction surfaced tool steel (H13) coatings on low carbon steel: A study on the effects of process parameters on coating characteristics and integrity. *Surface and Coatings Technology 205.* 2010, pp. 232-242.
16. —. Microstructural evolution during friction surfacing of tool steel H13. *Materials and Design* 32. 2011, pp. 82-87.
17. **Kramer de Macedo, Márcio Levi , Pinheiro, Gustavo A. , dos Santos, Jorge F. and Strohaecker, Telmo.** Deposit by friction surfacing and its applications. [ed.] *Welding International.* 24, 2010, Vol. 24, pp. 422-431.
18. **V.I. Vitanov, I.I. Voutchkov, G.M. Bedford.** Decision support system to optimise the Frictec (friction surfacing) process. *Journal of Materials Processing Technology.* 2000, Vol. 107, pp. 236-242.
19. **T. Shinoda, Q. Li J, Y. Katoh, T. Yashiro.** Effect of process parameters during friction coating on properties of non-dilution coating layers. *Surface engineering* 14. 1998, pp. 211-216.

20. **Kalken, A.M.** *Friction surfacing of stainless steel on mild steel with a robot*, Master Thesis. Delft University of Technology : s.n., 2010.
21. **H.K. Rafi, G.D.J. Ram, G. Phanikumar, K.P. Rao.** Friction surfacing of austenitic stainless steel on low carbon steel: Studies on the effects of traverse speed. *World Congress on Engineering 2010, London*. 2010.
22. **V.I. Vitanov, I.I. Voutchkov.** Process parameters selection for friction surfacing applications using intelligent decision support. *Journal of Materials Processing Technology* 159. 2005, pp. 27-32.
23. **R. Puli, G.D. Janaki Ram.** Corrosion performance of AISI 316L friction surfaced coatings. *Corrosion Science* 62. 2012, pp. 95-103.
24. **I. Voutchkov, B. Jaworski, V.I Vitanov, G.M. Bedford.** An integrated approach to friction surfacing process optimisation. *Surface and Coatings Technology*. 141, 2001, pp. 26-33.
25. **Bedford, G.M.** Friction surfacing for wear applications. *Metals and materials Bury St Edmunds*. 6, 1990, pp. 702-705.
26. **G.M. Bedford, P.J. Richards.** *Method of forming hard facings on materials*. US Patent No. 4930675 A 1990.
27. **G.M. Bedford, R.J. Sharp, A.J. Davis.** Micro-friction surfacing in the manufacture and repair of gas turbine blades. *3rd International Charles Parsons Turbine Conference, Materials Engineering in Turbines and Compressors*. April 25-27, 1995, pp. 689-698.
28. **Amos, D.R.** *Method of forming a trailing edge on a steam turbine blade and the blade made thereby*. US Paten No. 5183390 A 1993.
29. **D.J. Foster, P.J. Gillbanks, K.C. Moloney.** *Integrally bladed disks or drums*. US Patent No. 5556257 A 1996.
30. **J.Q. Li, T. Shinoda.** Underwater friction surfacing. *Surface Engineering* 16. 2000.
31. **Maldonado-Zepeda, C.** *The effect of inter layers on dissimilar friction weld properties*. PhD Thesis, University of Toronto : s.n., 2001.
32. **M. Beyer, A. Resende, J.F.d. Santos.** Friction surfacing for multi-sectorial applications - FRICSURF. *Technical report*. s.l., GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH : Institute for Materials Research, 2003.
33. **Cleber Fontes, Welerson Araújo.** *Metalurgia da soldadura*. s.l. : ESAB, 2004.
34. **ASM International.** *ASM Handbook-Heating treating of Ultrahigh-Strength Steels*. s.l. : ASM International, 2001. pp. 500-504. Vol. 4.
35. —. *ASM Handbook-Welding brazing and soldering*. s.l. : ASM International, 1993. Vol. 6.
36. **ASM, Handbook.** *Welding Technology*. 8. s.l. : ASM Internetal. Vol. 1.
37. **JOSÉ F. OLIVEIRA SANTOS, LUÍSA QUINTINO.** *Processos de Soldadura*. 2. s.l. : ISQ tecnicas, 2006. pp. 246-247.
38. **Sherman, Robert.** M113A1 Armored Personnel Carrier. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/land/m113.htm>. [Online] fevereiro 5, 2000. [Cited: maio 22, 2013.]

ANEXO A



Product Data Sheet

OK Tubrodur 15.60

T 'Tubular cored electrode arc welding'

Signed by Neil Farrow	Approved by Neil Farrow/Christos Skodras	Reg no EN004924	Cancelling EN003683	Reg date 2009-07-15	Page 1 (1)
--------------------------	---	--------------------	------------------------	------------------------	---------------

REASON FOR ISSUE

Shielding gas standard updated

GENERAL

A self-shielded cored wire which may also be used with C1 shielding gas, intended for rebuilding 13% manganese steels.

Shielding Gas: None, C1 (EN ISO 14175)

Alloy Type: 13% manganese steel weld metal

Polarity: DC+

Fill Type: Slagforming, rutile

CLASSIFICATIONS Weld Metal

EN 14700 T Fe9

APPROVALS

Not applicable

CHEMICAL COMPOSITION

All Weld Metal (%)

	No shielding gas	
	Min	Max
C	0.7	1.0
Si		1.0
Mn	11.5	13.5
P		0.03
S		0.03
Ni	2.5	3.5
Al	0.2	0.8
Comments: Hardness = 200 - 250 Hv		

ECONOMICS & CURRENT DATA

Dimension (mm)	Current (A)		W	η		H		Feed		U	
	Min	Max		Nom	Nom	Min	Max	Min	Max	Min	Max
\emptyset											
1.6	150	260		85	2.5	3.2	2.0	4.2	24	30	
2.4	250	380		85	1.8	4.5	2.0	4.0	28	34	

W = Gas consumption (l / min)

η = Recovery, g weld metal / 100g wire (%)

H = Deposit rate (kg weld metal / hour arc time)

Feed = Feeding rate (m/min)

U = Arc voltage (V)

ANEXO B



Product Data Sheet

E 'Manual metal-arc welding'

OK 86.08

Signed by Claes Gillenius	Approved by Tapio Huhtala/Christos Skodras	Reg no EN005105	Cancelling EN004763	Reg date 2009-11-27	Page 1 (2)
------------------------------	---	--------------------	------------------------	------------------------	---------------

REASON FOR ISSUE

Sepro approval updated.

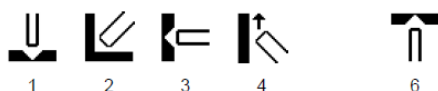
GENERAL

Austenitic manganese steel electrode for surfacing and building up manganese steel components exposed to severe impact and moderate abrasion. Applications include crusher plates and rolls, cones and mantles of rotary crushers etc.

Min AC OCV: 70
Polarity: AC, DC +

Alloy Type: Austenitic Mn steel
Coating Type: Lime Basic

WELDING POSITIONS



CLASSIFICATIONS Electrode

EN 14700 E Fe9

APPROVALS (SPECIFIC)

Sepro UNA 272581

CHEMICAL COMPOSITION

	All Weld Metal (%)	
	Min	Max
C	0.6	1.2
Si	0.5	1.1
Mn	11.1	14.9
P		0.05
S		0.01
Cr		0.1
Ni		0.1
V		0.1
Nb		0.1

MECHANICAL PROPERTIES OF WELD METAL

Properties	All Weld Metal	
	ISO	As welded
	Typ	
Rp0.2 (MPa)	480	
Rm (MPa)	780	
A5 (%)	20	
Z (%)	25	
Charpy V at 20°C (J)	70	
Charpy V at -20°C (J)	45	
Charpy V at -40°C (J)	35	
Charpy V at -60°C (J)	25	



Product Data Sheet

E 'Manual metal-arc welding'

OK 86.08

Signed by Claes Gillenius	Approved by Tapio Huhtala/Christos Skodras	Reg no EN005105	Cancelling EN004763	Reg date 2009-11-27	Page 2 (2)
------------------------------	---	--------------------	------------------------	------------------------	---------------

ECONOMICS & CURRENT DATA

Dimension (mm) Ø x Length	Current (A)		W	η	N	B	H	T	U	Welding Positions
	Min	Max								
3.2 x 450	95	135	4.7	105	0.60	36	1.1	95	23	1,2,3,4,6
4.0 x 450	130	180	7.1	105	0.60	24	1.4	109	23	1,2,3,4
5.0 x 450	170	230	11.0	105	0.60	15	1.8	132	25	1,2,3

- W** = Weight (kg / 100 electrodes)
η = Efficiency (g weld metal x 100 / g core wire)
N = Effective value (kg weld metal / kg electrodes)
B = Changes (number of electrodes / kg weld metal)
H = Deposit rate at 90% of max current (kg weld metal / hour arc time)
T = Fusion time at 90% of max current (s / electrode)
U = Arc voltage (V)

OTHER DATA

Recommendations for welding:

Austenitic manganese steels, in as cast condition or as weld metal, are sensitive to hot shortness and may crack if subjected to excessive heat.

Under normal conditions the base material should not be preheated. Interpass temperatures above 200 °C should be avoided. When welding outdoor in very cold weather, the base material should be preheated to 50-100 °C.

Weld metal hardness, (all weld metal):

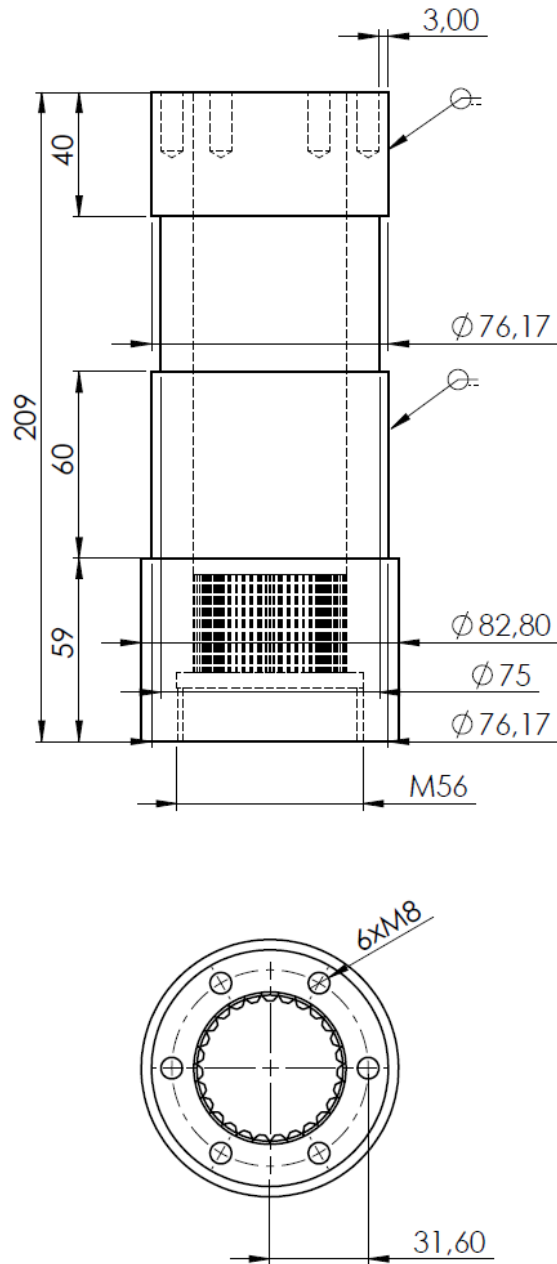
As welded.....180-200 HB (no preheat, interpass temperature 100-150 °C)

Workhardened...44-48 HRC (about 25 % degree of reduction)

Machinability: Grinding is normally applied. Overheating must be avoided.

Redrying the electrodes: 200 °C, 2 h.

ANEXO C



Desenha.	Set/13	João Santo N°72444	Instituto Superior Técnico	
Copiado			Departamento de Engenharia Mecânica - LEMAC	
Verific.				
Visto				
Escalas	1:2	Veio de suspensão2		
Toleran.				
			Substitui o des. n.º	
			Substituído por:	