



FILIPE DE MELO ESTEVES

Licenciado em Engenharia Mecânica

MINORAÇÃO DO EMPENO EM CHAPAS SOLDADAS

RELATÓRIO DE ACTIVIDADE PROFISSIONAL
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Julho, 2022



MINORAÇÃO DO EMPENO EM CHAPAS SOLDADAS

RELATÓRIO DE ACTIVIDADE PROFISSIONAL
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

FILIPE DE MELO ESTEVES

Licenciado em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins,
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Arguente: Doutor João Pedro Sousa Oliveira,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Orientador: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins,
Professor Associado, FCT-NOVA

Minoração do empeno em chapas soldadas

Copyright © Filipe de Melo Esteves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar um agradecimento a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram e deram o seu contributo para a realização deste trabalho.

Primeiro, agradecer ao Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins e à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pela orientação, o apoio prestado, a disponibilidade permanente e os ensinamentos que muito contribuíram para realizar este trabalho.

Deixo também o meu agradecimento à empresa West-sea, nomeadamente ao Eng.º Marco Costa, ao Eng.º Alfredo Silva e ao Eng.º Hélder Gil, que proporcionaram as condições e os meios necessários para levar a cabo os ensaios feitos.

Um obrigado especial ao Eng.º João Areias pela constante disponibilidade e profissionalismo, contribuindo de forma muito significativa para enriquecer o meu conhecimento na área da soldadura.

Um agradecimento ao Eng.º Vítor Soares, por todo o apoio prestado em termos de projeto e pelo facto de sempre estar à disposição.

Por fim, agradeço à minha família, pois cada vez que assumo um novo desafio eles estão sempre presentes, sem nunca deixar de apoiar-me.

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da indústria naval, com base na adoção dos melhores métodos e estratégias para minoração da quantidade de desempenos em chapas causados por influência da entrega térmica transmitida pelas soldaduras e por outras práticas de preparação menos ajustadas, tais como sequências erradas de montagem e incumprimento das dimensões e geometria das juntas de soldadura, que também contribuem para este tipo de defeito.

Cada desempenho requer meios humanos e materiais para a sua execução, o que se traduz em custos e perdas de qualidade que podem ser minimizados ou até mesmo eliminados, se forem seguidas as normas e os procedimentos recomendados. Também por questões estéticas, nomeadamente no segmento dos navios de luxo, as imperfeições exteriores e visíveis no casco do navio deverão ser reduzidas ao máximo.

Neste contexto, são inúmeras as matérias a considerar para executar um trabalho de forma competente e profissional, com o fim de obter um produto de excelência e economicamente rentável. Desde a fase de projeto que devem ser considerados e estudados diversos fatores, tais como a seleção dos aços a aplicar, mediante as suas características mecânicas e metalúrgicas, as espessuras das chapas e tipos de perfis, assim como os processos de corte e soldadura utilizados. Da mesma forma, é de extrema importância respeitar as normas de construção que vão sendo atualizadas e melhoradas ao longo do tempo, assim como o seguimento dos procedimentos de soldadura mais adequados para cada união soldada, selecionando o processo mais adequado mediante o tipo de material e a espessura a soldar, definindo a geometria das juntas de soldadura e o rigor da sua preparação, os parâmetros a seguir e os tipos de consumíveis a utilizar.

Todos esses aspetos foram considerados para o desenvolvimento deste Relatório de Atividades, tendo servido como referência a construção do navio da categoria Polar (*World Seeker*), em construção nos estaleiros navais *West-Sea*.

Os resultados obtidos através de diversos ensaios permitiram concluir quais os processos mais eficazes para minorar a entrega térmica, reduzindo significativamente a necessidade de execução de trabalhos de desempenho, aumentando a produtividade e reduzindo os custos de produção.

Termos Chave: Deformação, Entrega Térmica, Soldadura, Parâmetros, Desempeno de chapas.

ABSTRACT

The present work was developed within the scope of the naval industry, based on the adoption of the best methods and strategies to reduce the amount of distortions in plates caused by the influence of the heat input by the welds and by other less adjusted assembly practices, such as incorrect assembly sequences and non-compliance with the dimensions and geometry in the welding joints preparation, that also contribute to this type of defect.

Each straightening requires human and material resources for its execution, which represents costs and quality losses that can be minimized or even eliminated, if the recommended standards and procedures are followed. Also, for aesthetic reasons, namely in the segment of luxury ships, the external and visible imperfections in the hull of the ship should be reduced to a minimum.

In this context, there are countless matters to consider in order to perform a job competently and professionally in order to obtain a product of excellence and economically profitable. From the design stage, several factors must be considered and studied, such as the selection of steels to be applied, based on their mechanical and metallurgical characteristics, the thickness of the sheets and types of profiles, as well as the cutting and welding processes used. Likewise, it is extremely important to respect the construction standards that are being updated and improved over time, as well as following the most suitable welding procedures for each welded joint, selecting the most appropriate process according to the type of material and the thickness to be welded, defining the geometry of the welding joints and the rigor of their preparation, the parameters to be followed and the types of consumables to be used.

All these aspects were considered for the development of this report, having served as a reference the construction of the ship of the Polar category (*World Seeker*), built in the *West-Sea* shipyards.

The results obtained through several tests allowed us to conclude which are the most effective processes to reduce heat input, significantly reducing the need to perform straightening work, increasing productivity, and reducing production costs.

Keywords: Distortion, Heat Input, Welding, Parameters, Plate straightening

ÍNDICE DE MATÉRIAS

ÍNDICE DE MATÉRIAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
SIGLAS E ACRÓNIMOS	XV
GLOSSÁRIO	XVII
1. OBJETIVOS, MOTIVAÇÃO E ESTRUTURA DO RELATÓRIO	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Motivação	2
1.3. Estrutura do Relatório de Atividades	3
2. RESUMO DA EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL	5
3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Aços estruturais.....	17
3.2 Soldabilidade dos aços	19
3.3 Processos de corte por fusão	19
3.3.1 Oxicorte.....	20
3.3.2 Arco Plasma	20
3.4 Soldadura	21
3.4.1 MMA - Manual Metal Arc Welding – Soldadura a elétrodo revestido	22
3.4.2 MIG/MAG - Soldadura semiautomática com gás inerte ou gás ativo	24
3.4.3 FCAW – Fluxe-cored Arc Welding – Soldadura por fio fluxado	29
3.4.4 SAW - Submerged arc welding – Soldadura por arco submerso	30
3.4.5 Designações dos processos de soldadura	33
3.4.6 Posições de soldadura	34
3.4.7 Geometria das juntas de soldadura.....	35
3.4.8 Nomenclatura da junta e da soldadura	36
3.4.9 Preparação dos bordos e tipos de soldadura.....	38
3.4.10 Cuidados a ter antes, durante e após a soldadura	39
3.4.11 Parâmetros de soldadura	40
3.5 Entrega Térmica.....	42
3.6 Fluxo de calor	43

3.7	Distorções e tensões residuais causadas pelas soldaduras	45
3.7.1	Tensões residuais nos aços de diferentes graus.....	46
3.7.2	Métodos de controlo das distorções	50
3.7.3	Tipos de deformações	56
3.8	Processos de desempenho	61
3.8.1	Desempeno através de processo térmico por chama.....	61
3.8.2	Desvantagens e limitações dos desempenos	65
3.8.3	Método alternativo para desempenos - Aquecimento por indução	65
3.9	Construção estrutural de um navio.....	66
3.9.1	Fase de estudo, design e projeto.....	67
3.9.2	Desenhos de peças e criação de CNC's para corte das mesmas	67
3.9.3	Corte de chapas e perfis	71
3.9.4	Enformação de chapas e perfis.....	71
3.9.5	Fabrico de blocos	72
3.9.6	Ligação de blocos em doca	77
4	MATERIAIS E MÉTODOS	81
4.1	Tratamento superficial do aço.....	81
4.2	Consumíveis de soldadura	82
4.3	Formação de painéis	82
4.4	Ensaio	83
4.4.1	Ensaio nº.1 – Formação de painel (posição PA, chapa com chapa).....	84
4.4.2	Ensaio nº.2 – Formação de painel (posição PB, chapa com barra)	93
4.4.3	Ensaio nº.3 – União de anteparas e divisórias (posição PF/PG, chapa com chapa).....	101
4.4.4	Ensaio nº.4 – União de blocos (posição PA, chapa com chapa)	110
5	RESULTADOS E SUA DISCUSSÃO	117
5.1	Análise dos resultados obtidos nos P.1 e P.2	117
5.2	Análise dos resultados obtidos nos P.11, P.12, P.13 e P.14.....	119
5.3	Análise dos resultados obtidos nos P.7, P.8, P.9, P.10 e P.10.1.....	121
5.4	Análise dos resultados obtidos nos P.15 e P.16	123
6	CONCLUSÕES	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Construção de Navio	5
Figura 2.2 - Transporte de grupo gerador (à esquerda) e grupos geradores montados (à direita)	6
Figura 2.3 – Sistema de óleo de lubrificação (à esquerda) e parque de tanques (à direita)	6
Figura 2.4 - Preparação de juntas de soldadura em aço de liga 13CrMO4	7
Figura 2.5 - Soldadura de aço de liga P91 com controlo de temperatura e tratamento térmico	7
Figura 2.6 - Montagem de peça de transição (à esquerda) e <i>casing</i> inferior da turbina (à direita)	7
Figura 2.7 - Montagem de rotor da turbina (à esquerda) e <i>casing</i> superior (à direita).....	8
Figura 2.8 - Montagem de tubagens no campo solar	8
Figura 2.9 - Montagem de tubos HCE em campo.....	8
Figura 2.10 - Montagem de tanques de armazenamento de combustível	9
Figura 2.11 - Central de geração de energia com nove grupos geradores canopiados.....	9
Figura 2.12 - Instalação de grupos geradores em zonas de difícil acesso.....	9
Figura 2.13 - Colocação de tubagens em vala através de <i>sidebooms</i>	10
Figura 2.14 - Inserção de tubagem sob auto-estrada.....	10
Figura 2.15 - Soldadura de tubagens (à esquerda) e maçarico rotativo de pré-aquecimento (à direita)11	
Figura 2.16 - Plataforma hidráulica para união de chapas e formação de virola	12
Figura 2.17 - Sequência de entrada de virolas. Primeira virola suspensa pelos elevadores e entrada de segunda virola	12
Figura 2.18 - Espessuras das virolas e respetivas sequências de montagem de um tanque	13
Figura 2.19 - Soldadura da base do tanque a arco submerso (à esquerda) e soldadura externa perimetral da união da base com a virola (à direita)	14
Figura 2.20 - Tanque estruturalmente concluído (à esquerda) e parque de tanques em construção (à direita).....	14
Figura 2.21 - Terminal de gás da <i>Fluxys</i>	15
Figura 2.22 - Montagem de compressores <i>IHI</i> (à esquerda) e aerorefrigeradores (à direita)	15
Figura 2.23 - Montagem de estruturas e equipamentos	16
Figura 3.1 - Ilustração de corte por plasma - [9] imagem adaptada.....	21
Figura 3.2 – Principais regiões de uma soldadura – [3] Imagem adaptada.....	22
Figura 3.3 – Soldadura MMA, elétrodo revestido – [10] Imagem adaptada	23
Figura 3.4 – Ilustração da soldadura MIG/MAG – [10] Imagem adaptada	25
Figura 3.5 – Transferência por curto-circuito [12].....	26
Figura 3.6 – Ciclos na transferência por spray [4].....	27
Figura 3.7 – Ilustração de transferência por spray – [10] Imagem adaptada	27
Figura 3.8 – Ciclo de funcionamento da transferência por arco pulsado [10]	28
Figura 3.9 – Ilustração da transferência por arco pulsado – [10] Imagem adaptada.....	28
Figura 3.10 – Ilustração da transferência globular – [10] Imagem adaptada.....	28
Figura 3.11 – Ilustração da soldadura por fio fluxado (FCAW) – [10] Imagem adaptada	30
Figura 3.12 – Soldadura por arco submerso, SAW – [10] Imagem adaptada.....	32
Figura 3.13 - Ilustração de pórtico SAW.OSW.FCuB, com um só passe para chapas de baixa espessura (fonte: West-sea).....	32
Figura 3.14 – Ilustração do processo de soldadura <i>NH-HISAW</i> [13].....	33
Figura 3.15 – Posições de soldadura segundo EN ISO 6947 - [10] Imagem adaptada.....	34

Figura 3.16 - Colocação de bloco (Impulsores) em doca (Fonte: West-sea)	78
Figura 4.1 - Vista em corte com identificação dos pisos (Fonte: West-sea).....	83
Figura 4.2 - Localização do bloco 106 no navio (Fonte: West-sea)	83
Figura 4.3 - B106 na posição de construção (invertido) e respectivas espessuras.....	84
Figura 4.4 - Pórtico de soldadura a arco submerso (<i>SAW.OSW.FCuB</i>).....	84
Figura 4.5 - Junta de soldadura topo a topo sem folga (Fonte: West-sea)	85
Figura 4.6 - Provetes P.1 e P.2.....	85
Figura 4.7 - Montagem de chapas de arranque	86
Figura 4.8 - Posicionamento da tocha para dar início à soldadura.....	87
Figura 4.9 - Sistema de arrefecimento através de ar comprimido.....	87
Figura 4.10 - Sentido da soldadura e posterior retorno do <i>trailing</i> à posição inicial	87
Figura 4.11 - Pontos de medição de temperatura A e B.....	88
Figura 4.12 – Termómetro utilizado para obtenção das leituras de temperatura	88
Figura 4.13 - Distorção angular (transversal) do P.1	89
Figura 4.14 - Deformação por encurvadura (longitudinal) do P.1	89
Figura 4.15 – Valor máximo obtido de encurvadura (longitudinal) no P.1	90
Figura 4.16 - Deformação angular (transversal) do P.2.....	91
Figura 4.17 - Deformação por encurvadura (longitudinal) do P.2.....	92
Figura 4.18 - Junta de soldadura de canto (Fonte West-sea)	93
Figura 4.19 - Sem distorção angular (transversal) do P.11	95
Figura 4.20 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.11	96
Figura 4.21 - Sem deformação por encurvadura da barra (na longitudinal) do P.11	96
Figura 4.22 - Proвете P.12	96
Figura 4.23 - Distorção angular (transversal) do P.12	97
Figura 4.24 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.11	97
Figura 4.25 - Sem deformação por encurvadura da barra (na longitudinal) do P.12	97
Figura 4.26 - Distorção angular (transversal) do P.13	98
Figura 4.27 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.13	98
Figura 4.28 - Sem deformação da barra (na longitudinal) do P.13	98
Figura 4.29 - Proвете P.14	99
Figura 4.30 - Distorção angular (transversal) do P.14	99
Figura 4.31 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.14	99
Figura 4.32 - Sem deformação por encurvadura da barra (na longitudinal) do P.14	100
Figura 4.33 - Junta de soldadura de canto (fonte: West-sea).....	101
Figura 4.34 - Sequência de cordões de soldadura no P.9 (Fonte: West-sea)	102
Figura 4.35 - Proвете P.7	103
Figura 4.36 - Distorção angular (transversal) do P.7	103
Figura 4.37 - Deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal) do P.7.....	104
Figura 4.38 - Deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.7.....	104
Figura 4.39 - Proвете P.8	105
Figura 4.40 - Distorção angular (transversal) do P.8	105
Figura 4.41 - Deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal) do P.8.....	105
Figura 4.42 - Deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.8.....	106
Figura 4.43 - Proвете P.9	106
Figura 4.44 - Distorção angular (transversal) do P.9	106

Figura 4.45 - Deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.9.....	107
Figura 4.46 - Deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal) do P.9.....	107
Figura 4.47 - Provete P.10	107
Figura 4.48 - Distorção angular (transversal) do P.10	108
Figura 4.49 - Deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.10.....	108
Figura 4.50 - Distorção angular (transversal) do P.10.1	108
Figura 4.51 - Sem deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.10.1.....	109
Figura 4.52 - Sem deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal) do P.10.1.....	109
Figura 4.53 - Vista da secção longitudinal do B106 e zona de ligação do B107 assinalada (Fonte West-sea).....	110
Figura 4.54 - Junta topo a topo (Fonte: West-sea).....	111
Figura 4.55 - Sequências de soldadura seguidas nos provetes P.15 e P.16 (Fonte: West-sea)	112
Figura 4.56 - Provete P.15	112
Figura 4.57 - Distorção angular (transversal) do P.15	113
Figura 4.58 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.15	113
Figura 4.59 - Provete P.16	113
Figura 4.60 - Distorção angular (transversal) do P.16	114
Figura 4.61 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.16	114
Figura 5.1 - Comparação de temperaturas atingidas no ponto A, pelos provetes P.1 e P.2.....	118
Figura 5.2 - Comparação de temperaturas atingidas no ponto B, pelos provetes P.1 e P.2	118
Figura 5.3 - Influência da velocidade de soldadura na entrega térmica.....	120
Figura 5.4 - Comparação da entrega térmica entre os processos semiautomático e mecanizado, na soldadura contínua	120
Figura 5.5 - Comparação da entrega térmica entre os processos semiautomático e mecanizado, na soldadura intermitente.....	121
Figura 5.6 - Influência da velocidade de soldadura na entrega térmica.....	122
Figura 5.7 - Influência da voltagem na entrega térmica.....	122
Figura 5.8 - Influência da intensidade de corrente na entrega térmica	123

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dimensões e pesos de diversas chapas aplicadas	13
Tabela 3.1- Comparação dos raios de entrega térmica, entre elétrodo e material base, mediante o tipo de corrente e polaridades aplicadas.....	24
Tabela 3.2 - Posições de soldadura segundo EN ISO 6947, comparadas com a norma Americana AWS A3.0M/A3.0:2010 [14]	35
Tabela 3.3 – Tipos de bordos e respectivas juntas soldadas [14]	38
Tabela 3.4 - Polaridade aplicada ao elétrodo nos principais processos de soldadura [10]	41
Tabela 3.5 - Fatores de eficiência térmica para cada processo de soldadura [10]	43
Tabela 4.1 - Espessuras por piso, de chapas e perfis aplicados em painéis	82
Tabela 4.2 - Parâmetros de soldadura e resultados obtidos (P.1).....	90
Tabela 4.3 - Tempos de espera e temperaturas obtidas (P.1).....	91
Tabela 4.4 - Parâmetros de soldadura e resultados obtidos (P.2).....	92
Tabela 4.5 - Tempos de espera e temperaturas recolhidas (P.2).....	93
Tabela 4.6 - Parâmetros utilizados e resultados obtidos (P.11, P.12, P.13 e P.14)	100
Tabela 4.7 - Parâmetros de soldadura e resultados obtidos (P.7, P.8, P.9, P.10 e P.10.1)	110
Tabela 4.8 - Parâmetros de soldadura e resultados obtidos (P.15 e P.16).....	115
Tabela 5.1 - Temperaturas médias nos pontos A e B dos provetes P.1 e P.2	117
Tabela 5.2 - Redução da temperatura média alcançada nos pontos A e B dos provetes P.1 e P.2, através da utilização de ar comprimido no arrefecimento da soldadura	117
Tabela 5.3 - Parâmetros obtidos nas soldaduras dos provetes P.11, P.12, P.13 e P.14.....	120
Tabela 5.4 - Parâmetros médios obtidos nas posições PF e PG.....	122
Tabela 5.5 - Parâmetros médios obtidos nos provetes P.15 e P.16.....	123

SIGLAS E ACRÓNIMOS

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CNC – *Computer Numeric Control* - Controlo numérico computadorizado

CW-GMAW – *Cold Wired Metal Arc Welding*

DWT – *Deadweight tonnage* (“toneladas de peso morto”)

EDA – Eletricidade dos Açores

FCAW – *Flux-cored arc welding*

FCuB – *Flux Copper Backing* – Cobrejunta em cobre para soldadura a arco submerso

GMAW – *Gas Metal Arc Welding* – Soldadura semiautomática

IACS - *International Association of Classification Societies*

MA – Material a mais (para cortar na fase de acerto)

MAN – *Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg* - Empresa de produção de motores

MIG/MAG – *Metal Inert Gas / Metal Active Gas* – Soldadura semiautomática

MMA – *Manual Metal Arc Welding* – Soldadura a eléctrodo revestido

NPO – Navio Militar de Patrulha Oceânica

OSW – *One-Side Welding* – Soldadura por um lado

RC - *Rockwell C* – Ensaio de dureza

SAW – *Submerged arc welding* – Soldadura a arco submerso

SMAW – *Shielded Metal Arc Welding* - Soldadura a eléctrodo revestido

TIG – *Tungsten Inert Gas* – Soldadura com Tungsténio não consumível e gás inerte

ZTA – Zona termicamente afetada

NH-HISAW - *High-speed One-side Submerged Arc Welding Process*

GLOSSÁRIO

CASING – Corpo/carcaça da turbina

NESTING – Processo de criação de padrões de corte para minimizar o desperdício de matéria-prima

WELD OVERLAY – Processo que consiste em reforçar a superfície de um material base através de uma ou mais camadas de cordões de soldadura, de modo a melhorar as suas propriedades, como por exemplo, aumentar a resistência à corrosão

1. OBJETIVOS, MOTIVAÇÃO E ESTRUTURA DO RELATÓRIO

1.1. Objetivos

Este Relatório de Atividades tem como principal objetivo demonstrar quais as melhores práticas e técnicas de montagem e soldadura utilizadas na construção naval, que permitem minorar a quantidade de desempenos em aço devido à entrega térmica.

Para isso, foram feitos estudos comparativos com foco nas zonas que habitualmente apresentam maiores empenos, nomeadamente nos painéis dos pisos e costados, anteparas e ligações de blocos. Os empenos mais relevantes destacaram-se nas chapas de aço Grau A, de menor espessura (principalmente 5 e 6 mm) e com vãos estruturalmente menos reforçados.

Com base nestes aspetos, fizeram-se provetes com o mesmo tipo de aço e diversas espessuras de chapas e perfis; seguiram-se diversas estratégias e procedimentos de montagem e soldadura e verificou-se quais foram aqueles que permitiram obter os melhores resultados.

Os objetivos específicos foram a realização de quatro tipos de ensaio:

Ensaio nº.1 – Formação de painel (soldadura topo a topo, chapa com chapa)

Consistiu no fabrico de dois provetes, utilizando chapas com espessuras de 5 mm, execução de soldaduras topo a topo no pórtico de soldadura *SAW.OSW.FCuB*, para simulação de união de chapas de formação do painel. Foram utilizados parâmetros de soldadura semelhantes em ambos os provetes, com uma voltagem média a rondar 33 V, corrente média de aproximadamente 587 A, e velocidade de soldadura de 666,67 mm/min. Ambos os provetes foram soldados de forma semelhante, com um único passe de soldadura, executado em 3min.

No primeiro provete P.1, foi feito um arrefecimento do cordão de soldadura através de sopro a ar comprimido sobre o mesmo, durante o decorrer da sua execução, e mantendo-se até ao retorno do *trailing* à posição partida (posição inicial de arranque da soldadura). O provete P.1 manteve-se fixo no pórtico hidráulico durante a execução da soldadura e respetivo processo de arrefecimento (6 min), e ainda por um período adicional de 20 min após a sua execução, até ser finalmente libertado do pórtico. O segundo provete P.2, não foi arrefecido com auxílio de ar comprimido, tendo arrefecido naturalmente até atingir a temperatura ambiente e foi libertado do pórtico de soldadura imediatamente após a recolha do *trailing* à sua posição de partida.

Em ambas as situações foram feitas diversas medições de temperatura, através de um termómetro de infravermelhos (pirómetro digital, modelo 566 da marca *Fluke*) com gama de temperaturas de -40 a 650 °C e resolução de 0,1 °C, devidamente calibrado pelo laboratório de calibrações da *TAP Maintenance & Engineering* e, por fim compararam-se os resultados obtidos, relativos aos tempos de arrefecimento e deformações inerentes a cada caso.

Ensaio nº.2 – Formação de painel (soldadura de canto, chapa com barra/perfil)

Fizeram-se quatro provetes em T, cada um constituído por uma chapa com 5 mm de espessura e uma barra com 7 mm de espessura, executaram-se as soldaduras de canto, contínuas e intermitentes, variando entre o processo semiautomático e mecanizado. Compararam-se os resultados obtidos, referentes às entregas térmicas e distorções causadas.

Ensaio nº.3 – União de anteparas e divisórias (soldadura de canto, chapa com chapa)

Foram elaborados cinco provetes em T, constituídos por chapas com 6 mm de espessura. Realizaram-se as soldaduras de canto, variando a posição (vertical ascendente/descendente) e parâmetros de soldadura. Foram obtidas e comparadas diferentes entregas térmicas e distorções.

Ensaio nº.4 – União de blocos (soldadura topo a topo, chapa com chapa)

Execução de dois provetes com juntas topo a topo, soldados de forma contínua e por sequências, com cobrejunta cerâmica, utilizando chapas com espessuras de 5 mm. Compararam-se os resultados baseados nas deformações obtidas.

1.2. Motivação

A minoração da quantidade de desempenos na construção naval é considerada de elevada importância devido a diversos fatores, tais como a alteração das propriedades dos aços após adição de calor para executar os desempenos, a redução das distorções e concentração de tensões acumuladas após o arrefecimento das soldaduras. Os desempenos requerem horas de mão-de-obra, meios de elevação e acessos, equipamentos e gases consumíveis que objetivamente produzirão custos acrescidos.

No segmento dos navios de cruzeiro de luxo, também por questões estéticas, as imperfeições exteriores, nomeadamente no casco do navio, deverão ser reduzidas ao máximo. Por vezes, para

disfarçar deformações que ficam visíveis e que persistem mesmo após os desempenos, são utilizadas massas de poliéster de acabamento superficial, que têm custos consideráveis, assim como a sua aplicação.

Também nos pisos do navio, nas zonas mais irregulares são normalmente feitos desempenos. Os empenos que persistam produzem posteriormente mais custos referentes à quantidade de materiais de nivelamento/revestimento, tais como massas (cimentos e autonivelantes), resinas, entre outros. Em casos extremos pode surgir a necessidade de corte, de modo a fazer as correções necessárias.

Note-se que estas aplicações adicionais contribuem inevitavelmente para um aumento do peso do navio.

De modo a minimizar as consequências negativas referidas anteriormente, foram estudados e levados a cabo os melhores processos de corte de aço, montagem e soldadura. Os resultados obtidos demonstraram que através dos métodos adequados e estratégias bem definidas, foi possível minorar a entrega térmica e obviamente a redução dos desempenos e respetivos custos.

1.3. Estrutura do Relatório de Atividades

Este relatório divide-se em 6 capítulos principais.

O primeiro capítulo introdutório descreve os objetivos, a motivação e a estrutura do mesmo.

No segundo capítulo relata-se a experiência profissional adquirida na indústria metalomecânica, em diversos contextos, dando destaque aos principais projetos onde foram utilizados métodos diversificados de soldadura e montagem mecânica. Consideram-se relevantes os conhecimentos anteriormente adquiridos, para o desenvolvimento deste trabalho.

O terceiro capítulo foi elaborado com base na pesquisa bibliográfica relacionada com os principais tipos de aços estruturais aplicáveis, processos de corte, técnicas de montagem e processos de soldadura mais utilizados na construção naval, que têm influência direta na entrega térmica transmitida aos aços e consequentes deformações e desempenos.

No quarto capítulo foi desenvolvida a matéria referente aos ensaios práticos levados a cabo. Foi selecionado um bloco do navio, suscetível ao surgimento de deformações e, uma vez sinalizadas as zonas mais críticas, fabricaram-se diversos provetes de ensaio, variando os processos e parâmetros de soldadura, obtendo diferentes entregas térmicas e deformações.

O quinto capítulo, referente aos parâmetros aplicados e dados recolhidos, permitiu fazer comparações entre processos, técnicas, sequências e parâmetros, discutindo os resultados obtidos.

Por fim, o sexto e último capítulo diz respeito às conclusões tiradas, sintetizando os aspetos positivos e mais assertivos, que devem ser considerados e aplicados na construção naval, e que de facto demonstraram que contribuem para minorar a entrega térmica e os empenos em chapas de aço de baixa espessura.

2. RESUMO DA EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL

Após cerca de 15 anos de experiência na direção de obras de construção mecânica, foram muitos os desafios superados, nomeadamente em termos de negociação com fornecedores de produtos e serviços, orçamentação e negociações para a adjudicação de novos contratos, fabricos e montagens onde se destacam as soldaduras de chapas, estruturas e tubagens, seguimento de normas de fabrico e montagem, gestão de pessoas e meios, cumprimento dos padrões de qualidade e segurança exigidos, sob a influência permanente de fatores ambientais, legais e culturais.

Após concluída a Licenciatura em Engenharia Mecânica na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico da Guarda, foi iniciado o percurso profissional na construção naval (Figura 2.1), com um estágio nos Departamentos de Soldadura, Encanamentos e Aprestamento dos antigos *Estaleiros Navais de Viana do Castelo*. Foram adquiridos conhecimentos referentes aos processos e sequências de soldadura mais utilizados na Indústria Naval, assim como foi elaborado um manual baseado nesses conhecimentos, destinado ao centro de formação de soldadores da empresa.



Figura 2.1 - Construção de Navio

Posteriormente seguiu-se um novo rumo na indústria metalomecânica, nomeadamente no fabrico e montagem de sistemas de tubagens, estruturas e tanques de armazenamento, assim como a instalação de diversos equipamentos mecânicos. Esta etapa foi iniciada na *Central Termoelétrica de Santa Bárbara*, ilha do Faial e, *a posteriori* na construção da nova *Central Termoelétrica da ilha das Flores*, sob controlo e exploração da *EDA – Eletricidade dos Açores*. As centrais, equipadas com grupos geradores *Caterpillar* e *MAN*, e possuindo praticamente todos os sistemas de fluídos fabricados em aço inoxidável AISI 316L, foram concebidas através da montagem de grupos geradores, chaminés para evacuação de gases de escape, tanques de armazenamento de combustível e óleos, assim como o fabrico e montagem de novos sistemas de tubagens, instalação de equipamentos mecânicos, tais como,

bombas, depuradoras de combustível e óleo de lubrificação, válvulas, contadores, filtros, vasos de expansão, aerorefrigeradores, redes de combate a incêndio, sistemas de tratamento de águas residuais, entre outros (Figura 2.2 e 2.3).



Figura 2.2 - Transporte de grupo gerador (à esquerda) e grupos geradores montados (à direita)



Figura 2.3 – Sistema de óleo de lubrificação (à esquerda) e parque de tanques (à direita)

O desafio seguinte consistiu na montagem de uma turbina a vapor de 150MW *Siemens AG*, na fábrica de papel *SAICA*, em Zaragoza, Espanha. Destacam-se as montagens de todos os elementos da turbina, do condensador e respetivos sistemas auxiliares, as soldaduras de diversos aços de liga resistentes a altas temperaturas, tais como P91, 13CrMO4, P11, P22, 16MO3, e aço inoxidável AISI 316L, bastante resistente à corrosão. Também a preparação das juntas de soldadura, pré-aquecimentos necessários, e quando aplicável, os controlos de temperatura e tratamentos térmicos específicos, destacando principalmente o aço P91 (Figura 2.4 e 2.5).

Por sua vez, a soldadura da peça de transição (espessura de 20 mm) que ligava o condensador ao *casing* inferior da turbina (espessura de 40 mm), teve o seu grau de dificuldade por ser realizada em espaço confinado e exigente em termos de procedimento e tempo de soldadura, uma vez que foi

requerida toda a sua execução a elétrodo revestido (SMAW/MMA) (Figura 2.6 e 2.7). Note-se que todas as soldaduras foram sempre executadas por soldadores devidamente certificados.



Figura 2.4 - Preparação de juntas de soldadura em aço de liga 13CrMO4



Figura 2.5 - Soldadura de aço de liga P91 com controlo de temperatura e tratamento térmico



Figura 2.6 - Montagem de peça de transição (à esquerda) e *casing* inferior da turbina (à direita)



Figura 2.7 - Montagem de rotor da turbina (à esquerda) e *casing* superior (à direita)

Por sua vez, na *Central Termosolar Extresol 3*, em Santa Marta de los Barros (Espanha), seguiu-se a supervisão dos fabricos em oficina e montagens em campo, de diversos sistemas de tubagens para a circulação de óleo. Tubagens essas, em aço carbono grau A (Figura 2.8) e aço inoxidável AISI 316L (tubos HCE constituídos por tubo interno em aço inoxidável e tubo externo em vidro, com vácuo entre ambos) (Figura 2.9).



Figura 2.8 - Montagem de tubagens no campo solar



Figura 2.9 - Montagem de tubos HCE em campo

Rumando até ao Continente Africano, seguiu-se a participação na criação e desenvolvimento de uma nova empresa, que foi crescendo e expandindo pelo território angolano, através de construções e revitalizações de diversas centrais de geração de energia em Angola, em parceria com a empresa *Caterpillar*. Instalaram-se grupos geradores (Figura 2.11 e 2.12), respetivos sistemas de armazenamento (Figura 2.10), abastecimento de combustível e outros, em diversas indústrias, tais como: instalações da *Halliburton* em Cabinda, Embaixada dos Estados Unidos em Luanda, fábrica têxtil da *Marubeni* no Cacuaco, fábrica *África Têxtil* em Benguela, entre outras.



Figura 2.10 - Montagem de tanques de armazenamento de combustível



Figura 2.11 - Central de geração de energia com nove grupos geradores canopiados



Figura 2.12 - Instalação de grupos geradores em zonas de difícil acesso

Com o objetivo de diversificar o conhecimento em diferentes áreas, dentro da mesma indústria, seguiu-se a instalação de gasodutos, nomeadamente em Espanha (Gasoduto de Palma de Mallorca-Inca-Alcúdia) (Figura 2.14) e em França (Gasoduto de Bayonne - Artère de L'Ádour) (Figura 2.13). Foram reforçados os conhecimentos em soldadura, trabalhando com diâmetros de tubagem de maior dimensão (10" a 16"), seguindo novos procedimentos, sequências e passes de soldadura, assim como o controlo de temperaturas, nomeadamente no arrefecimento, muitas vezes difícil de controlar pelo condicionamento das equipas de soldadura, face às condições ambientais existentes e a algumas avarias inesperadas de equipamentos (Figura 2.15). Sendo que cada equipa executava o seu passe de soldadura, e trabalhando diversas equipas em cadeia, umas a seguir às outras, avançando ao longo do gasoduto, de soldadura em soldadura. Se essa sequência falhasse, e a temperatura de arrefecimento não fosse devidamente controlada, poderia levar ao corte completo das soldaduras e os custos de produção seriam consideráveis.



Figura 2.13 - Colocação de tubagens em vala através de *sidebooms*



Figura 2.14 - Inserção de tubagem sob auto-estrada



Figura 2.15 - Soldadura de tubagens (à esquerda) e maçarico rotativo de pré-aquecimento (à direita)

Seguiu-se um novo desafio na América Latina, que consistiu na reconstrução do parque de tanques de armazenamento de combustíveis da *PDVSA – Petróleos de Venezuela*, na refinaria de Amuay (Figura 2.20). Nove tanques, de dimensões variadas (com diâmetros internos de 46 m a 75 m, e com aproximadamente 20 m de altura), foram construídos em chapas de aço S275J2 e S355J2 (EN10025-2:2004), com dimensões aproximadas de 12 m x 3 m e espessuras variando entre 6 e 41 mm, projetados segundo a Norma de construção de tanques API650 (Tabela 2.1).

As chapas eram cortadas em oficina através de corte por arco plasma, com as dimensões pretendidas, deixando em alguns casos MA (material a mais) para posteriormente cortar na fase de acerto (fase de montagem na refinaria). De seguida eram feitas as aberturas de chanfros nas extremidades das chapas e, uma vez transportadas para o local de montagem, estas eram colocadas por ordem e alinhadas em cima de uma plataforma hidráulica e, de seguida, unidas topo a topo através do processo de soldadura por arco submerso (SAW).

Uma vez unidas todas as chapas que formavam uma virola, a plataforma hidráulica permitia rodá-las 180°, todas em simultâneo, de modo a poder concluir as soldaduras das uniões na face oposta, obtendo assim as virolas que seriam montadas segundo uma sequência pré-definida. O processo de inserção de cada virola iniciava com o posicionamento da mesma na vertical e apoiada em roletes, sobre a plataforma hidráulica (Figura 2.16), sendo arrastada por um sistema de rolos arrastadores. Cada virola reta e plana que entrava ao longo do perímetro do tanque, adquiria a forma circular e ficava suspensa através de um sistema de elevadores hidráulicos, aguardando pela entrada da virola

seguinte (Figura 2.17). Primeiro eram inseridas as virolas de menor espessura (topo do tanque) e posteriormente as virolas de maior espessura (parte inferior do tanque) (Figura 2.18).

As uniões perimetrais internas e externas entre virolas, foram feitas através de carros de soldadura que se deslocavam sobre carris, munidos com os respectivos equipamentos de soldadura. As bases dos tanques também foram construídas através do mesmo tipo de aço e soldadas a arco submerso, seguindo as seqüências de soldadura recomendadas (Figura 2.19). De modo a evitar empenos consideráveis no fundo do tanque e compensar as tensões provocadas pela entrega térmica e posterior arrefecimento, foram colocados diversos pesos distribuídos estrategicamente sobre as chapas do fundo.



Figura 2.16 - Plataforma hidráulica para união de chapas e formação de virola



Figura 2.17 - Sequência de entrada de virolas. Primeira virola suspensa pelos elevadores e entrada de segunda virola

Tabela 2.1 - Dimensões e pesos de diversas chapas aplicadas

<i>Dimensões e peso das chapas</i>			
<i>Tipo de Material</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Dimensões (mm)</i>	<i>Peso (Ton)</i>
S275J2	6	2500 x 12000 x 6	1,413
S275J2	6	2800 x 12000 x 6	1,583
S275J2	7,5	3000 x 12000 x 7,5	2,120
S275J2	8	2485 x 12000 x 8	1,873
S275J2	8	2985 x 12000 x 8	2,249
S275J2	9	3000 x 12000 x 9	2,543
S275J2	10	2500 x 12000 x 10	2,355
S275J2	10	3000 x 12000 x 10	2,826
S275J2	11	3000 x 12000 x 11	3,109
S355J2	12	3000 x 12000 x 12	3,391
S275J2	12,5	3000 x 12000 x 12,5	3,533
S355J2	12,5	2350 x 12000 x 12,5	2,767
S275J2	13	3000 x 12000 x 13	3,674
S275J2	14	2700 x 11500 x 14	3,412
S275J2	14	3000 x 12000 x 14	3,956
S275J2	16	3000 x 12000 x 16	4,522
S355J2	17	3000 x 12000 x 17	4,804
S275J2	18	2000 x 10400 x 18	2,939
S275J2	19	3000 x 12000 x 19	5,369
S355J2	20	3000 x 12000 x 20	5,652
S355J2	23	3000 x 12000 x 23	6,499
S355J2	24	3000 x 12000 x 24	6,782
S355J2	26	2160 x 12000 x 26	5,290
S355J2	28	3000 x 12000 x 28	7,912
S355J2	33	2160 x 12000 x 33	6,715
S355J2	36	3000 x 12000 x 36	10,174
S355J2	41	2210 x 12000 x 41	8,535



Figura 2.18 - Espessuras das virolas e respectivas seqüências de montagem de um tanque



Figura 2.19 - Soldadura da base do tanque a arco submerso (à esquerda) e soldadura externa perimetral da união da base com a virola (à direita)



Figura 2.20 - Tanque estruturalmente concluído (à esquerda) e parque de tanques em construção (à direita)

O passo seguinte foi a gestão de uma obra de instalação de sistemas de tubagens, compressores industriais e aerorefrigeradores (Figura 2.22) no terminal de gás da *Fluxys*, em Zeebrugge, na Bélgica (Figura 2.21). Foi possivelmente o maior desafio, perante as exigências e rigor em termos de Procedimentos de Segurança, uma vez que todas as tarefas eram diariamente planeadas, explicadas em detalhe e debatidas em reuniões prévias ao início dos trabalhos, com a presença de todas as especialidades envolvidas. Relativamente à Qualidade, também se destacou pelo rigor nos procedimentos elaborados e no controlo em obra, uma vez que nenhuma soldadura era iniciada sem a presença de um Técnico de Qualidade por parte do Dono de Obra.



Figura 2.21 - Terminal de gás da *Fluxys*



Figura 2.22 - Montagem de compressores *IHI* (à esquerda) e aerorefrigeradores (à direita)

Posteriormente em Espanha, seguiram-se projetos com responsabilidades semelhantes na fábrica química da *BASF* em Tarragona e na fábrica de pasta de papel *ENCE* em Pontevedra.

Uma vez finalizados os projetos mencionados anteriormente, surge um novo repto que consistiu na instalação de equipamentos mecânicos na nova central de ciclo combinado, em Old Harbour, Jamaica (Figura 2.23). Os maiores desafios foram sem dúvida as questões logísticas e a obtenção dos meios e recursos locais necessários para a execução da obra.

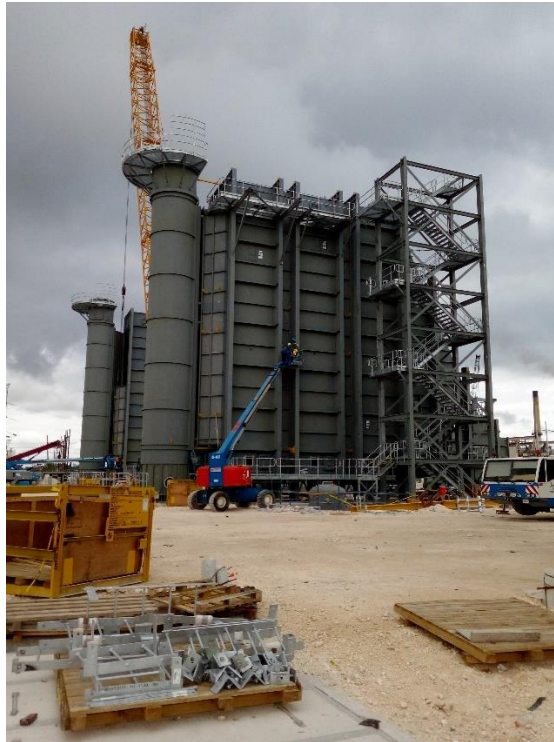


Figura 2.23 - Montagem de estruturas e equipamentos

Prosseguiu-se o percurso profissional com a realização de uma Pós-Graduação em Gestão de Projetos na *Universidad Nebrija*, em Madrid, e o regresso à construção naval em Viana do Castelo. A construção dos navios da categoria polar foram um desafio constante, quer em termos de qualidade de construção, quer em termos de prazos de execução exigentes. Este relatório foi desenvolvido em torno deste tipo de construções e com base nos conhecimentos anteriormente adquiridos.

3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A construção naval é uma indústria exigente e a produção de um navio ou embarcação deve ser executada mediante o desempenho e finalidade pretendidos, tais como a capacidade de carga e/ou número de passageiros e tripulação, tipo de propulsão e consumo energético, teatro de operações, ou seja, onde vai operar o navio e sob que condições, normas internacionais exigidas, entre outros.

São considerados inúmeros aspetos interdependentes, tais como a flutuabilidade do navio (capacidade de flutuação sem afundar), estabilidade (tendência para a posição direita após sofrer um adornamento no mar), navegabilidade (aptidão para suportar em segurança, o mau tempo), mobilidade (capacidade de se movimentar), manobrabilidade (facilidade de manobra) e habitabilidade (alojar convenientemente as pessoas) [1].

De modo a conseguir conjugar-se todas as características anteriormente referidas, e considerando também os custos de construção, assim como a sua manutenção, futuras reparações e respetiva possibilidade de abertura de acessos, um navio deve ser estruturalmente construído com materiais que assim o permitam.

Existe uma tendência global para a produção de navios cada vez mais leves, fabricados através de aços mais resistentes, permitindo a utilização de chapas de menor espessura, diminuindo o seu peso. No entanto, as chapas em aço de baixa espessura continuam a ter limitações devido às distorções provocadas pela entrega térmica proveniente dos processos de corte e soldadura. Também o encolhimento de painéis são um desafio em termos de controlo dimensional, muitas vezes aliada à falta de qualificação ou experiência dos trabalhadores [2].

3.1 Aços estruturais

Na atualidade, a construção estrutural de um navio ainda tem como material de referência o aço. O aço é uma liga metálica binária constituída essencialmente por ferro e carbono (0,003% a 2,06%), e menores quantidades de outros elementos (manganês, silício, fósforo e enxofre). De notar que o enxofre e o fósforo são considerados impurezas indesejáveis que tornam o aço menos resistente mecanicamente e mais quebradiço [3].

O minério de ferro existe na natureza, sob a forma de óxido de ferro e o carbono provem do carvão mineral ou vegetal. A sua junção e fusão são feitas com a ajuda de fundentes, posteriormente

no alto-forno, onde são fundidos a temperaturas que rondam os 1536°C, obtendo o ferro gusa com elevado teor de carbono. Através de outros processos, tais como tratamentos nos conversores com adição de sucatas e oxigênio puro, obtêm-se os aços pretendidos (mediante o teor de carbono removido e a quantidade de ligas adicionadas) [4].

Existem diferentes tipos de aço que diferem mediante determinadas características e propriedades, com tensões de rotura nos aços de construção mais utilizados que variam de 330MPa até 3300MPa em ligas de elevadíssima resistência, com maior ou menor resistência mecânica (tração, compressão, flexão), resistência à acidez e oxidação, de maior ou menor dureza, bem como de maior ou menor ductilidade e soldabilidade. Tais propriedades podem ser modificadas através de tratamentos químicos, mecânicos e térmicos, conseguindo obter, por exemplo, aços com maior capacidade de resistência à abrasão ou ao desgaste, melhores propriedades magnéticas e elétricas, entre outros [3].

São diversas as entidades certificadoras de classificação de aços navais, tais como: BV (*Bureau Veritas*); *Lloyd's Register of Shipping*; ABS (*American Bureau of Shipping*); DNV (*Det Norske Verita*); NKK (*Nippon Kaiji Kyokai*); DNV (*Stiftelsen Det Norske Veritas*), etc.

A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) é uma entidade que cria e publica normas que especificam as chapas de aço estrutural para a construção naval. Os aços ASTM A 131 (*Standard Specification for Structural Steel for Ships*), são considerados de média e alta resistência, e são divididos em três grupos, baseados na sua tensão de cedência (de 235MPa a 355MPa), sendo eles: graus A, A32 e A36. Em termos de tenacidade, para valores mínimos, os aços normais são divididos em quatro grupos: A, B, D e E, que se referem a propriedades de impacto (+20°C; 0°C; -20°C e -40°C) respetivamente. Os aços estruturais de alta resistência também são divididos em 4 grupos: graus AH, DH, EH e FH, que se referem a propriedades de impacto (0°C; -20°C; -40°C e -60°C) respetivamente [3].

Os aços mais utilizados na indústria naval são os de grau A (resistência à tração varia de 400 a 520MPa e tensão de cedência mínima de 235MPa), AH32 e DH32 (resistência à tração varia de 440 a 590MPa e tensão de cedência mínima de 315MPa), AH36 e DH36 (resistência à tração varia de 490 a 620MPa e tensão de cedência mínima de 355MPa), AH40 e DH40 (resistência à tração varia de 510 a 650MPa e tensão de cedência mínima de 390MPa), sendo laminados a quente, com boa soldabilidade e boa tenacidade à fratura.

3.2 Soldabilidade dos aços

A soldabilidade é uma característica que os aços possuem e que traduz o grau de facilidade com que um aço pode ou não ser soldado, garantindo maior ou menor eficácia na ligação. Metalurgicamente os aços podem ser classificados em função da sua soldabilidade, através do CE (*Carbono Equivalente*), da seguinte forma:

- Aços soldáveis a frio ($CE < 0,40$);
- Aços que requerem pré-aquecimento para serem soldados ($CE > 0,40$);
- Aços difíceis de soldar, mesmo pré-aquecidos ($CE > 0,70$).

A obtenção do CE é dada pela equação (3.1) e respectivas percentagens de ligas (C-Carbono; Mn-Manganês; Cr-Crómio; Mo-Molibdénio; V-Vanádio; Cu-Cobre e Ni-Níquel) presentes no aço [3].

$$CE = (\%)C + \frac{(\%)Mn}{6} + \frac{(\%)Cr + (\%)Mo + (\%)V}{5} + \frac{(\%)Cu + (\%)Ni}{15}$$

(Eq.1)

De referir que alguns elementos presentes no aço têm influência direta na soldabilidade. Por exemplo, impurezas como o enxofre e o fósforo, reduzem a soldabilidade. Por sua vez, o carbono, crómio, molibdénio, níquel, cobre e manganês, em quantidades elevadas, também contribuem para a redução da soldabilidade [3].

3.3 Processos de corte por fusão

Um dos processos de corte térmico que persiste como sendo dos mais utilizados na construção naval é o oxicorte e baseia-se essencialmente na fusão da zona de corte, através da elevada temperatura fornecida por uma chama criada pelo oxigénio e outro gás combustível, como por exemplo, o acetileno ou o propano (utilizado mais frequentemente para corte de espessuras elevadas, de 100 a 300 mm). A chama realiza um pré-aquecimento, elevando a temperatura até ao ponto de fusão do metal a ser cortado. O oxigénio puro combinado com o ferro a altas temperaturas dá resultado ao óxido de ferro, que surge por reação química (exotérmica) libertando energia calorífica. Os principais parâmetros e aspetos relevantes a ter em conta nestes processos são a atenção face ao tipo de aço a cortar e espessura, estado do acabamento superficial (se por exemplo, apresenta corrosão), seleção do tipo de bico a utilizar, a pressão dos gases e a velocidade de deslocamento do

maçarico de corte. Note-se que o oxigénio deve ter uma pureza mínima de 99,5%, caso contrário haverá um decréscimo da velocidade de corte e o consumo de oxigénio será superior [3;6;7].

Tal como nos processos de soldadura, no corte também existe uma zona termicamente afetada (ZTA), provocada pelo calor da chama. Normalmente a ZTA é mais ampla no topo da peça sobre a qual incide a chama pois é a primeira zona a fundir, e vai estreitando progressivamente até à face inferior da peça. A dimensão da ZTA é inversamente proporcional à velocidade de corte porque ao haver um aumento da velocidade, a energia calorífica que incide na peça é menor por unidade de medida. Por sua vez, a entrega térmica também reduz [8].

3.3.1 Oxicorte

Neste processo é normalmente utilizado um maçarico de corte (manual ou mecanizado), através do qual, e por intermédio de uma tocha com um bico de corte, o oxigénio e o acetileno (ou propano) formam uma chama que é elevada a altas temperaturas (aproximadamente 3.160°C utilizando o acetileno e 2.800°C utilizando o propano), à medida que vai sendo regulada a mistura. Normalmente as proporções de mistura de acetileno e oxigénio são de 1:5 respetivamente. Na linha de corte do metal, sobre a qual incide a chama, a energia térmica faz inicialmente um pré-aquecimento sucedido por um incremento gradual da temperatura até à fusão do metal. Em condições normais para execução do corte, os óxidos presentes no metal a ser cortado possuem um ponto de fusão mais baixo do que o do próprio metal. Assim sendo, fundem, permitindo a separação do metal em diferentes partes [3;9].

3.3.2 Arco Plasma

É comum designarem-se três estados da matéria, sendo eles o estado sólido, líquido e gasoso. No entanto, deve ter-se em conta aquele que é considerado o quarto estado – Plasma. A título de exemplo, pode considerar-se que se for fornecida energia térmica a um cubo de gelo, este derrete e passa ao estado líquido. De seguida, havendo um incremento de energia fornecida ao líquido, este passa ao estado gasoso. Por sua vez, se o gás receber ainda mais energia, ioniza e passa ao estado de plasma, adquirindo a capacidade de ser condutor elétrico [9].

No processo de corte em questão, a tocha do maçarico de corte possui um eletrodo (com polaridade negativa) e um bico (com polaridade positiva) através dos quais se dá uma ignição e é criado um arco elétrico que eleva a temperatura de tal forma (aproximadamente 28.000°C), ionizando

o gás. O rápido fluxo de plasma que incide sobre a zona do metal a ser cortado (com polaridade positiva), desencadeia um sopro, permitindo fazer cortes rápidos e praticamente limpos, quase sem escórias (Figura 3.1) [3;5;9].

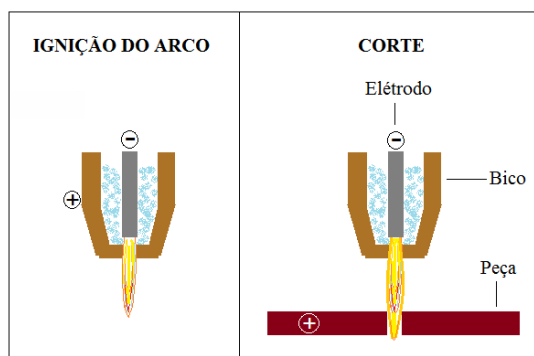


Figura 3.1 - Ilustração de corte por plasma - [9] imagem adaptada

O processo de arco plasma também pode ser feito através da adição de mais um gás, para externamente proteger o fluxo de plasma de potenciais perdas de eficiência no corte. Este processo de gás duplo admite combinar por exemplo, hidrogénio para o corte e argón para proteção, ou azoto com dióxido de carbono para o mesmo efeito. Outra possibilidade consiste na utilização de azoto para o corte e a utilização de água em vez de um segundo gás para proteção [3].

Trata-se de um processo que é reconhecido como sendo o mais económico e eficiente, que possibilita a utilização de ar comprimido e se dissocia devido à alta temperatura conferida pelo arco elétrico. Desta dissociação resultam iões de azoto e oxigénio que possibilitam uma boa eficiência de corte.

3.4 Soldadura

Quando se pretende unir dois elementos com materiais iguais ou diferentes, o que normalmente ocorre através da fusão dos mesmos, surge a necessidade de recorrer ou não à utilização de um material de adição compatível, que permita manter em segurança essa união, designando o processo por Soldadura (Figura 3.2).

Antes da execução de uma soldadura, devem ser tidos em conta fatores importantes, tais como, os tipos de metais a serem soldados e suas espessuras, os resultados que pretendem obter-se em termos das características do cordão de soldadura, tais como, os aspetos metalúrgicos (adição de

elementos de liga mediante o tipo de consumíveis utilizados, transformações de fase que ocorrem nos processos de aquecimento e fusão, assim como a solidificação mediante o tipo de arrefecimento), mecânicos (dureza, resistência à tração, compressão, torção e impacto) e qualitativos (aspeto visual, acabamento superficial, sem defeitos, boa fusão e penetração), assim como os custos associados.

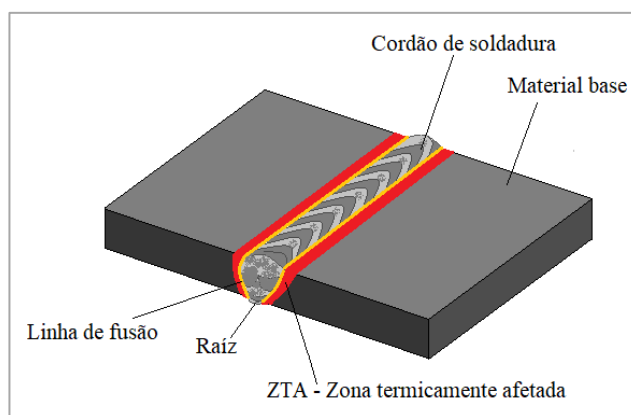


Figura 3.2 – Principais regiões de uma soldadura – [3] Imagem adaptada

Os quatro principais processos de soldadura mais utilizados na construção estrutural de um navio são:

3.4.1 MMA - Manual Metal Arc Welding – Soldadura a eléctrodo revestido

É o processo de soldadura mais versátil que existe, uma vez que permite executar soldaduras nas mais variadas posições, soldar metais ferrosos e não-ferrosos de diversas espessuras. Quando se forma o arco eléctrico entre o material base e o eléctrodo revestido, o banho de fusão atinge temperaturas na ordem dos 6.000°C. O revestimento do eléctrodo, após fundir, cria uma atmosfera gasosa e a escória, que protegem a soldadura de agentes contaminantes, tais como o oxigénio e o nitrogénio existentes na atmosfera circundante. Uma limitação deste processo de soldadura é o facto de que cada eléctrodo permite obter cordões curtos, uma vez que ao ser consumido, este deve ser substituído/reposto por um novo. A escória é removida pelo soldador após executar cada passe ou cordão de soldadura, e a sua remoção é outra limitação, uma vez que requer tempo para o fazer [10].

Neste processo de soldadura, a entrega térmica é diretamente influenciada pela corrente (fluxo de eletrões no circuito, medido em Amperes), voltagem (“pressão” necessária para o fluxo de corrente fluir ao longo do circuito, medida em Volts), polaridade (define a distribuição da energia calorífica do arco eléctrico), velocidade de soldadura (quantidade de comprimento de soldadura por unidade de tempo) e pelo tipo de eléctrodo consumível aplicado (Figura 3.3) [10].

Os principais tipos de eléctrodos revestidos são:

- **Celuloso:** contém elevada percentagem de celulose no revestimento e permite obter um arco elétrico profundo e rápida fusão do eletrodo consumível, proporcionando altas velocidades de soldadura. Tem como desvantagem a elevada quantidade de hidrogénio absorvido, o que muitas vezes provoca fissuração na ZTA, pelo facto de a difusão do mesmo ser difícil, e devido às tensões residuais acumuladas, associadas à formação de microestruturas frágeis e baixa temperatura (abaixo dos 300°C) [11];
- **Rutilo:** possui elevada taxa de óxido de titânio no seu revestimento, permitindo uma rápida ignição do arco elétrico e poucas projeções. A escória é de fácil remoção [11];
- **Básico:** composto por elevado teor de carbonato de cálcio que contribui para o controlo da basicidade da escória e diminui a sua viscosidade, permitindo um arrefecimento mais rápido nas posições “ao teto” e “vertical”. A remoção da escória é mais difícil do que nos casos anteriores e requer maiores amperagens e velocidade de soldadura. Este tipo de eletrodo também garante boas propriedades mecânicas e resistência à fissuração [11].

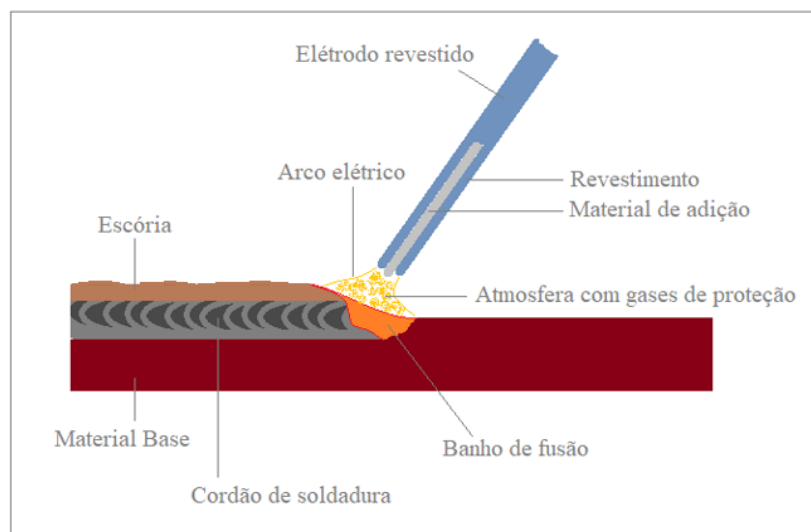


Figura 3.3 – Soldadura MMA, eletrodo revestido – [10] Imagem adaptada

Sabendo que os elétrons se deslocam do pólo negativo para o pólo positivo, a distribuição da entrega térmica nos diversos processos, em função da polaridade e corrente, é feita tal como indicado na tabela 3.1 [10]:

Tabela 3.1- Comparação dos rácios de entrega térmica, entre elétrodo e material base, mediante o tipo de corrente e polaridades aplicadas

		Polaridade		
		DC (+ ve)	DC (- ve)	AC
Localização da Entrega Térmica	Material Base	1/3	2/3	1/2
	Elétrodo	2/3	1/3	1/2

(DC) Corrente Contínua;

(AC) Corrente Alternada;

(+ ve) Elétrodo com polaridade positiva;

(- ve) Elétrodo com polaridade negativa

3.4.2 MIG/MAG - Soldadura semiautomática com gás inerte ou gás ativo

No processo de soldadura MIG/MAG, é criado um arco elétrico entre a ponta do fio consumível e o material base, criando o banho de fusão. Este é protegido da atmosfera circundante, através do fluxo de um ou mais gases, ativos ou inertes. O tipo de gás ou mistura de gases aplicados, depende das propriedades do material a ser soldado e das características que se pretendem obter do cordão de soldadura, em termos de dureza, resistência  tração,  compressão e ao impacto, assim como a altura adequada do reforço do cordão, evitando sobre espessuras exageradas (Figura 3.4). Trata-se de um processo semiautomático, no qual o fio consumível enrolado numa bobine, é continuamente alimentado  medida que o soldador se movimenta e executa o cordão ao longo da junta de soldadura. Também existe a possibilidade de optar pelo processo mecanizado, onde todos os parâmetros são automaticamente controlados, mas podendo ajustá-los manualmente sempre que for necessário [10].

Ao contrário da soldadura MMA, este processo permite fazer cordões contínuos com poucas interrupções, já que o fio consumível é alimentado na tocha, de forma ininterrupta. É um processo muito utilizado na indústria naval, uma vez que permite substanciais deposições de material, sendo altamente produtivo [10].

A velocidade de soldadura e a posição da tocha são controladas manualmente pelo soldador no processo semiautomático. Os fios consumíveis possuem normalmente diâmetros que variam entre 0,6 e 1,6 mm. Quanto mais velocidade de fio consumível é aplicada, maior será a corrente elétrica necessária para a sua fusão. A entrega térmica nos processos de soldadura em geral,  de aproximadamente 1 a 3,5 KJ/mm. As principais desvantagens do processo de soldadura MIG/MAG são:

- Necessidade de utilização de gases de proteção e equipamentos de dimensões e complexidade consideráveis;
- Execução da soldadura muitas vezes comprometida devido ao vento e quando possível, criar condições de proteção;
- Dificuldades em manter o fio consumível sem contaminação (humidade);
- Níveis elevados de emissões de ozono [10].

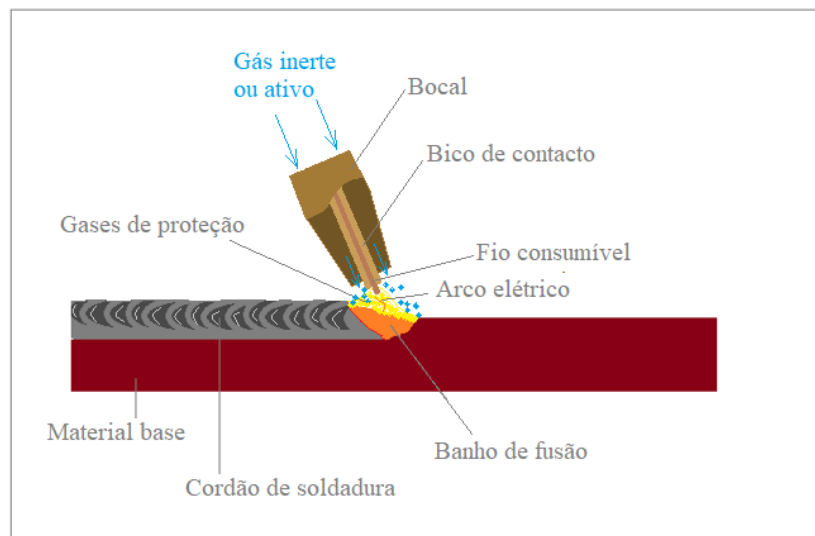


Figura 3.4 – Ilustração da soldadura MIG/MAG – [10] Imagem adaptada

Abaixo descritos encontram-se quatro dos métodos de transferência de material de adição mais utilizados no processo MIG/MAG:

Transferência por curto-circuito

O fio consumível entra constantemente em contato com o banho de fusão (entre 50 a 200 vezes por segundo), criando uma sequência de curto-circuitos que estabilizam o arco elétrico, fundindo assim o fio (Figura 3.5) [10;12].

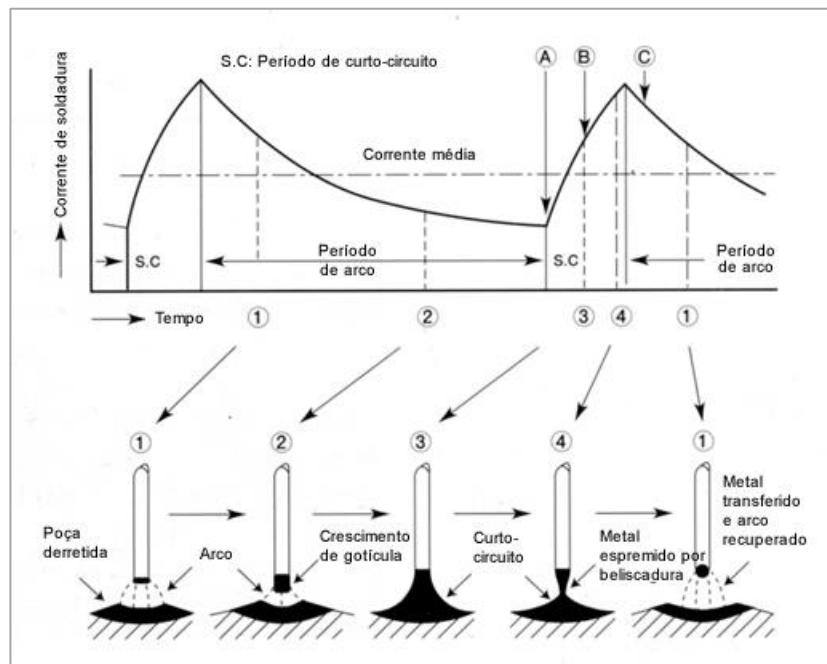


Figura 3.5 – Transferência por curto-circuito [12]

A corrente, a entrega térmica e as penetrações são relativamente baixas, tratando-se de um processo de soldadura aplicável a todas as posições, nomeadamente na soldadura de metais ferrosos com baixas espessuras (de 0,8mm a 3,2mm), na posição “ao teto”. O gás normalmente utilizado neste processo é o dióxido de carbono ou misturas de dióxido de carbono e argon. A principal desvantagem são algumas projeções provocadas pelas flutuações dos ciclos de voltagem e corrente [10;12].

Transferência por spray

No arco elétrico, pequenas gotículas fundidas de fio consumível, são pulverizadas para o banho de fusão (Figura 3.7). Este processo requer maiores intensidades de corrente, maiores voltagens e mais velocidade de alimentação do fio, o que proporciona altas taxas de deposição do material.

A fusão e a penetração são elevadas e, apesar de a posição de soldadura na qual melhor se enquadra este processo ser a posição “ao baixo”, pode ser utilizado na posição horizontal/vertical devido ao facto de o fluxo ser altamente direccionado. Uma vez que se trata de um método que transmite mais entrega térmica, a transferência por spray é aconselhada para soldar aços com espessuras superiores a 6 mm e Alumínio e suas ligas a partir de 3 mm de espessura [10;4;6].

Na figura 3.6 verifica-se que este tipo de transferência ocorre quando a corrente é superior à corrente de transição (diretamente proporcional à tensão existente na superfície do banho de fusão).

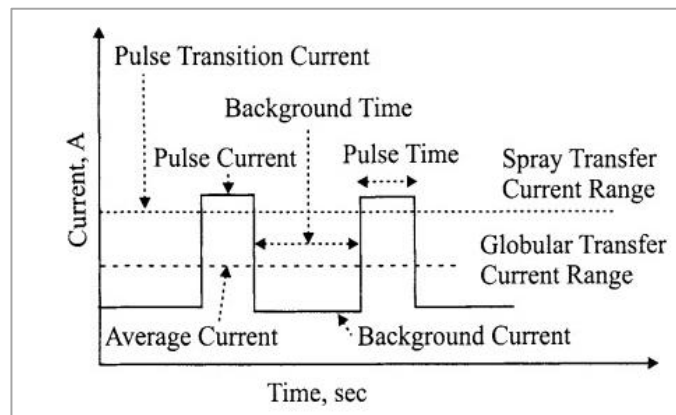


Figura 3.6 – Ciclos na transferência por spray [4]

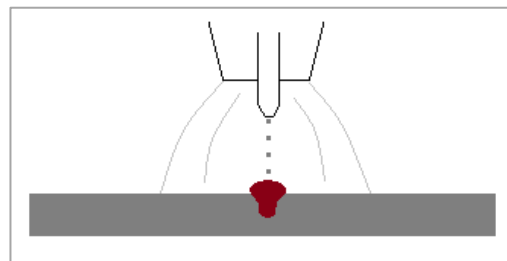


Figura 3.7 – Ilustração de transferência por spray – [10] Imagem adaptada

Transferência por arco pulsado

É um método de transferência por spray modificado que permite reduzir bastante a quantidade de projeções, a falta de fusão e a entrega térmica (Figura 3.9). Pode ser utilizado para soldar baixas espessuras (a partir de 1 mm), mas é mais utilizado para espessura elevadas (6 mm e superiores).

A intensidade de corrente alterna com uma frequência de aproximadamente 50 a 300 vezes por segundo, entre o pico máximo e mínimo. Durante um período, o ponto mais baixo de corrente (20 a 80A) permite manter o arco elétrico e a ponta do fio consumível fundida, de seguida a corrente aumenta até ao pico de máxima intensidade à qual é formada uma gotícula que se solta devido à força eletromagnética criada, sendo projetada ao longo do arco elétrico para o banho de fusão. Por fim, a intensidade de corrente volta a baixar até ao pico mínimo (Figura 3.8) [10].

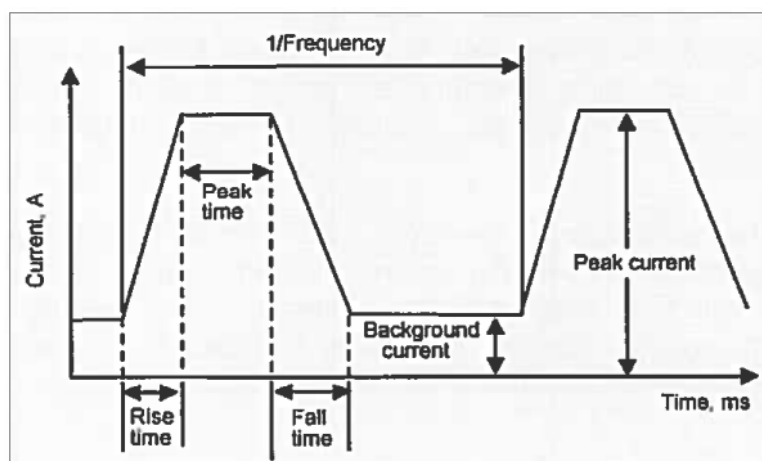


Figura 3.8 – Ciclo de funcionamento da transferência por arco pulsado [10]

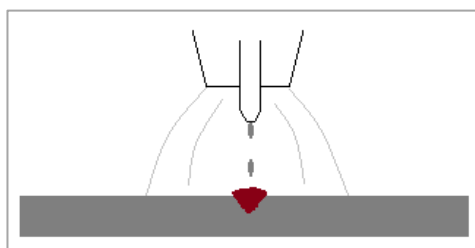


Figura 3.9 – Ilustração da transferência por arco pulsado – [10] Imagem adaptada

Transferência globular

É um método menos utilizado. Gotas com espessuras superiores às do fio consumível, são transferidas por gravidade da tocha para o banho de fusão (Figura 3.10). Uma vez que são aplicadas taxas inferiores de intensidade de corrente, a penetração é inferior, mas o nível de projeções é elevado, o que resulta numa entrega térmica média, sendo este método adequado para soldar metais com espessuras que variam de 3mm a 6mm. Defeitos como a falta de penetração, falta de fusão, projeções e cordões de soldadura irregulares são comuns. A posição de soldadura mais adequada para a aplicação deste processo é “ao baixo” [10].

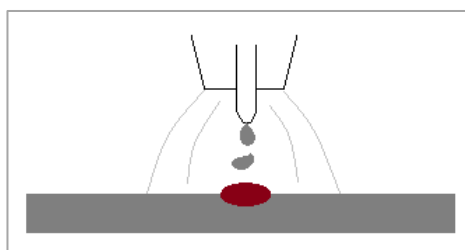


Figura 3.10 – Ilustração da transferência globular – [10] Imagem adaptada

Gases e misturas de gases mais utilizados no processo MIG/MAG

Para soldar aços de diversos graus e aços inoxidáveis, o processo de soldadura MAG, com gás ativo, é o mais recomendado. Adicionar dióxido de carbono ou oxigênio ao argônio, permite estabilizar o arco elétrico e uma boa diluição do banho de fusão.

No processo MAG através de transferência por curto-circuito, para soldar metais ferrosos, o dióxido de carbono em quantidade de 100%, sem ser misturado com outro gás, garante boa penetração; no entanto, não permite transferência por spray devido à instabilidade do arco elétrico e à enorme quantidade de projeções (salpicos). A mistura de dióxido de carbono ou oxigênio, com argônio, aplicável à soldadura de aços inoxidáveis, permite utilizar o processo de transferência por spray ou por arco pulsado, uma vez que estabiliza o arco elétrico e minimiza os salpicos. A mistura de argônio com dióxido de carbono é recomendada para soldar aços ao carbono, através da transferência por arco pulsado ou curto-circuito [10].

Na soldadura MIG, para soldar metais não ferrosos e suas ligas (Ni, Cu, Al) deve ser usado gás inerte ou mistura de gases, tais como argônio puro ou mistura de argônio com hélio. A adição de hélio ao argônio confere mais capacidade de ionização e melhor concentração calorífica no arco elétrico, uma vez que possui maior condutividade térmica. Permite obter cordões de soldadura de melhor qualidade, quer em termos de penetração, quer de fusão. Esta mistura é recomendada para soldar materiais base com espessuras elevadas e alta condutividade térmica, tais como o alumínio ou cobre, e suas ligas [10].

3.4.3 FCAW – Fluxe-cored Arc Welding – Soldadura por fio fluxado

Este processo é bastante versátil em termos de aplicações e posições de soldadura. Neste caso utiliza um fio tubular (elétrodo) com fluxo/pó no seu interior (Figura 3.11). A composição do fluxo é que define a natureza do fio, e o fluxo possui as propriedades e compostos existentes nos gases de proteção normalmente utilizados no processo MIG/MAG. Tal como no processo MMA, a escória que resulta do fluxo é depositada sobre o cordão de soldadura, que o protege da atmosfera circundante e dos contaminantes. Neste processo pode ou não ser utilizado gás ou mistura de gases de proteção [10].

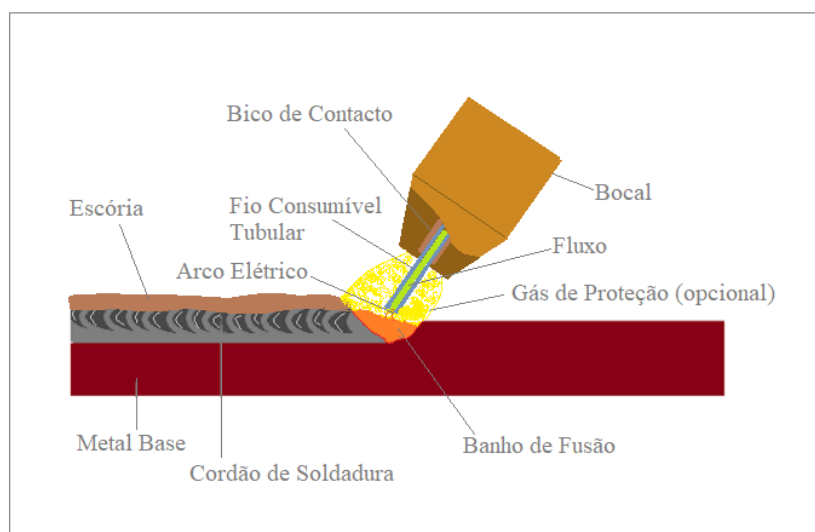


Figura 3.11 – Ilustração da soldadura por fio fluxado (FCAW) – [10] Imagem adaptada

Os fios de soldadura mais comuns são:

- Fio fluxado rutílico para aço carbono (muito versátil em termos posicionais);
- Fio fluxado básico para aço carbono e baixa liga;
- Fio *metal-cored* de alto rendimento para aço carbono;
- Fio auto-protegido sem necessidade de gases de proteção, para soldadura de aços macios e de baixa liga [10].

3.4.4 SAW - Submerged arc welding – Soldadura por arco submerso

No processo de soldadura por arco submerso é criado um arco elétrico entre a ponta do fio consumível e o material base. O fio consumível funde e junta-se ao material base, formando o banho de fusão, que fica coberto por uma camada de fluxo (granulado ou em pó) fundido. Esta cobertura de escória e gases protege o cordão de soldadura dos agentes contaminantes e controla o arrefecimento do mesmo. Uma vez que o arco elétrico fica submerso, é necessário um aumento considerável de corrente para fundir o consumível, parte do fluxo e parte do material base. O fluxo armazena uma quantidade considerável de calor, contribuindo dessa forma para maiores penetrações de soldadura. Por outro lado, também não existem projecções nem efeitos de radiação infravermelha ou ultravioleta. Como nem todo o fluxo direccionado para a zona de fusão é fundido, este é recuperado, sendo automaticamente aspirado para o reservatório de fluxo [10].

Tal como o processo de soldadura MIG/MAG, o fornecimento de fio de consumível é contínuo, garantindo grandes velocidades de soldadura e bons desempenhos em termos de produtividade. Como as taxas de deposição e as penetrações são consideravelmente grandes, permite soldar espessuras elevadas (a partir de 5 mm). A intensidade de corrente pode superar os 1.000A e a entrega térmica é das mais elevadas, o que pode levar a deformações significativas nas chapas soldadas. Importa referir que intensidades de corrente demasiado elevadas podem causar mordeduras, perfurações do material base, cordões demasiado estreitos e propensos a fissuração no arrefecimento. Por outro lado, intensidades demasiado baixas podem causar instabilidade do arco eléctrico, falta de penetração e de fusão [10].

A voltagem aplicada define o comprimento do arco eléctrico criado entre a ponta do fio consumível e o banho de fusão. À medida que a voltagem é aumentada, o arco eléctrico também aumenta e torna a superfície do cordão de soldadura mais achatada. Se a intensidade de corrente e a velocidade de soldadura se mantiverem constantes, e variando apenas a voltagem, à medida que a voltagem aumenta, o consumo de fluxo também aumenta, reduz a porosidade e proporciona maior eficácia na mistura dos elementos de liga caso estejam presentes no fluxo. À medida que se aumenta a velocidade de soldadura, a deposição de material de adição e a penetração são menores, e a entrega térmica por unidade de comprimento diminui [10].

O processo de soldadura SAW permite soldar aços ao carbono e de baixa liga, aços inoxidáveis e ligas de níquel. Também é possível soldar alumínio, no entanto, não é ainda um processo viável, uma vez que se trata de um material muito poroso, dando origem a uma quantidade excessiva de poros e fissurações, pelo facto de ainda não ter sido criado um fluxo menos higroscópico (que absorva menos humidade), não permitindo, portanto, garantir a qualidade e resistência mecânica das juntas soldadas.

Como este método utiliza fluxo em pó ou granulado, limita a execução de soldaduras à posição plana horizontal, no entanto, tanto permite soldar chapas como também possibilita a soldadura de formas não planares, como é o caso dos tubos (Figura 3.12). O tubo permanece na posição horizontal, e na parte superior da junta de soldadura é posicionado o cabeçote com a tocha de soldadura. O processo inicia com o tubo a girar em torno do eixo horizontal e o cabeçote permanece sempre fixo com a tocha na posição “ao baixo” até ao fecho/finalização da soldadura (após a rotação de 360°). O pó granulado tem a vantagem de possuir características desoxidantes, proteger o cordão dos agentes contaminantes e permitir a adição de elementos de liga, assim como proporcionar um controlo adequado do arrefecimento do cordão. Por fim, obtêm-se cordões de soldadura visualmente com bom acabamento e metalurgicamente com alta resistência ao impacto, devido à utilização do fluxo para protecção e adição de elementos de liga [10].

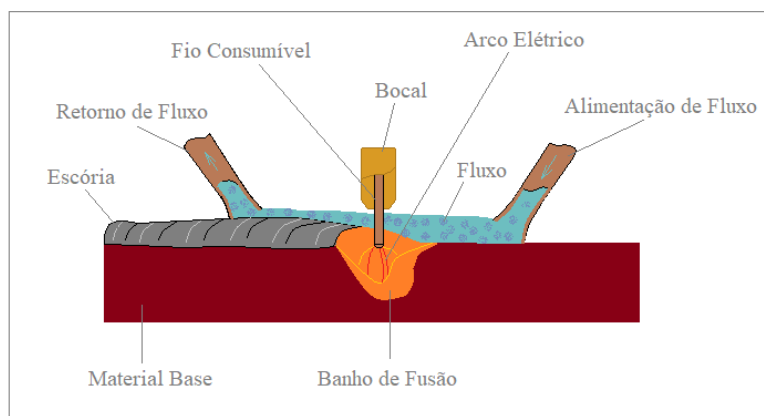


Figura 3.12 – Soldadura por arco submerso, SAW – [10] Imagem adaptada

SAW.OSW.FCuB – One side welding, Flux copper backing

Um dos processos mais importantes na soldadura de painéis de grandes dimensões utilizado na construção naval é a soldadura mecanizada topo a topo, a arco submerso, por um lado (*OSW - One side welding*) na posição “ao baixo”, com cobrejunta em cobre (*FCuB - Flux copper backing*). Trata-se de um processo muito rentável em termos produtivos, uma vez que podem ser executados entre um a três passes simultâneos de soldadura, mediante a espessura das chapas a soldar [13].

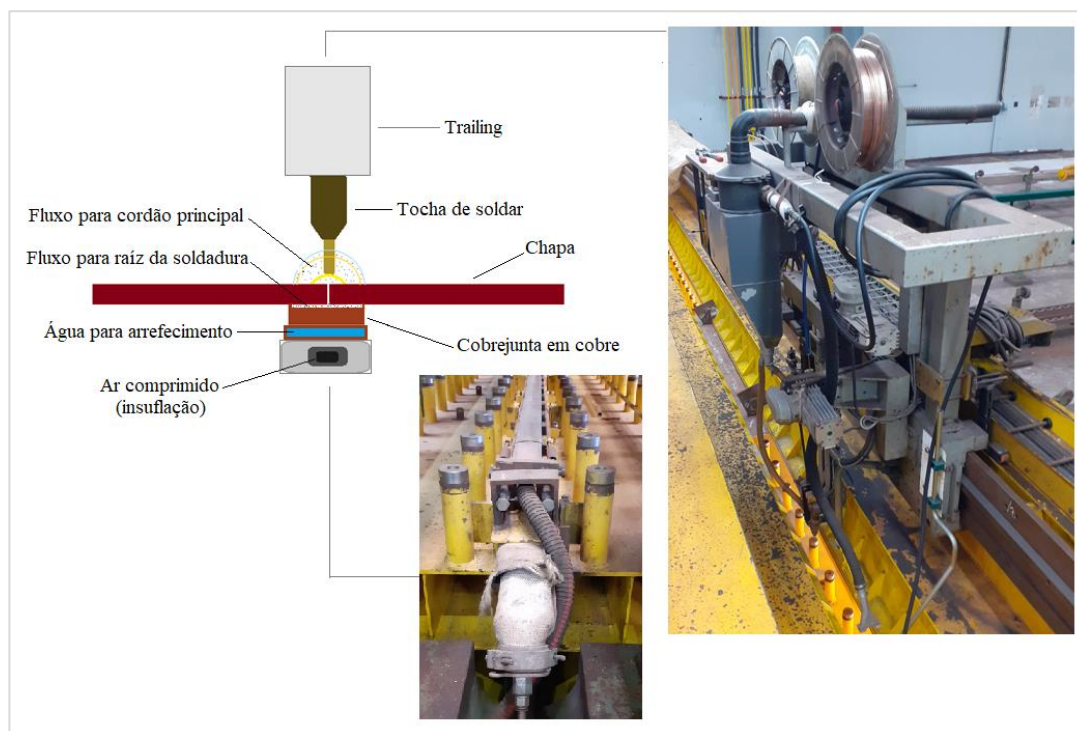


Figura 3.13 - Ilustração de pódio SAW.OSW.FCuB, com um só passe para chapas de baixa espessura (fonte: West-sea)

Na figura 3.13, o ar comprimido assinalado é injetado no interior de uma mangueira, que através do enchimento faz “efeito balão”, subindo o cobrejunta de cobre até encostar no lado inferior da junta de soldadura.

Segundo um estudo feito através de três empresas japonesas, *Universal Shipbuilding Corporation* (*Ariake Shipyard*), *Nippon Steel Corporation* e a *Nippon Steel Welding Products and Engineering Co., Ltd.* através do processo designado por *NH-HISAW* (*High-speed One-side Submerged Arc Welding Process*), executado com quatro passes em simultâneo (dois de penetração/enchimento e dois de acabamento) é possível obter velocidades de soldadura a rondar 1,5m/min, na soldadura de chapas de 16 mm de espessura. Os dois passes de penetração requerem uma intensidade de corrente de 3.000A, enquanto os dois passes de acabamento necessitam de 1.500A (Figura 3.14).

Trata-se de um processo que é considerado mais rápido que o processo convencional *SAW.OSW.FCuB*, e que causa menos deformações na soldadura de chapas com espessuras de 12 a 25mm [13].

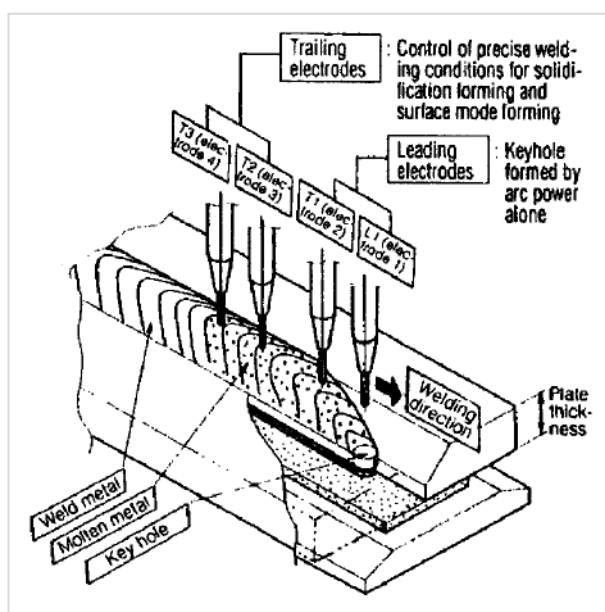


Figura 3.14 – Ilustração do processo de soldadura *NH-HISAW* [13]

3.4.5 Designações dos processos de soldadura

A norma EN ISO 4063 classifica os processos de soldadura através de um código de referência, com o objetivo de facilitar a gestão da documentação, tal como informatizar a informação, desenhos e especificações de procedimentos. A norma abrange os principais grupos de processos de soldadura

através de um algarismo, classificando os grupos com dois algarismos e por sua vez, os subgrupos através de três algarismos. Cada código de referência possui no máximo três algarismos. Relativamente aos processos mencionados anteriormente, são classificados da seguinte forma:

MMA – 111

MIG – 131

MAG – 135

FCAW (114 – Auto-protegido; 136 – Rutilo/básico; 138 – *Metal-cored*)

SAW – 121

3.4.6 Posições de soldadura

As posições de soldadura são normalizadas e definem os parâmetros a aplicar. Segundo a Norma Europeia EN ISO 6947, CEN/TR 14633, as posições de soldadura são designadas da seguinte forma [14] (Figura 3.15 e Tabela 3.2):

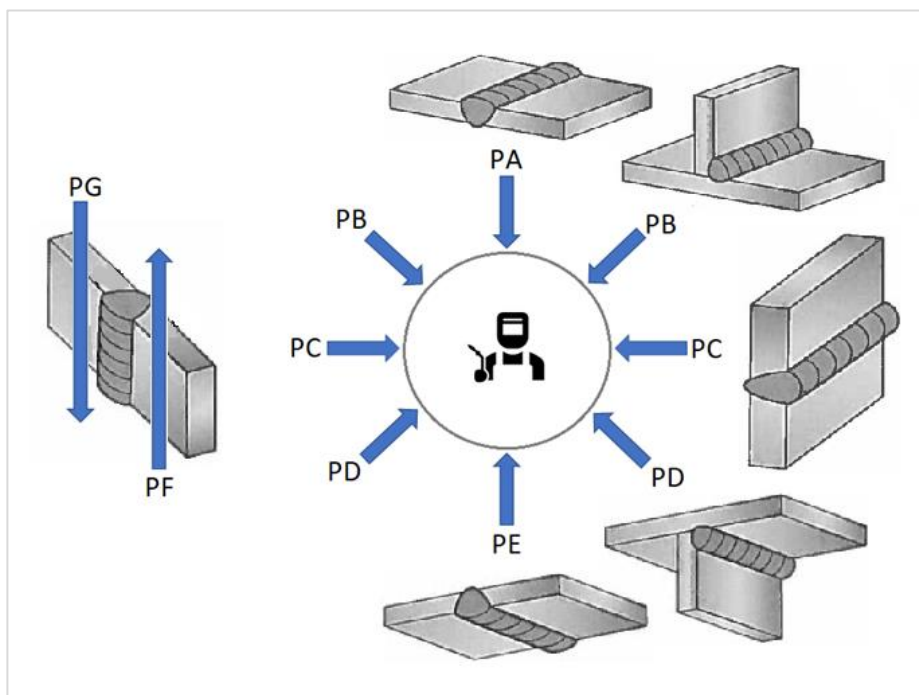


Figura 3.15 – Posições de soldadura segundo EN ISO 6947 - [10] Imagem adaptada

Tabela 3.2 - Posições de soldadura segundo EN ISO 6947, comparadas com a norma Americana AWS A3.0M/A3.0:2010 [14]

EN ISO	AWS	POSIÇÃO / TIPO DE JUNTA
PA	1G/1F	Baixo Topo (ou ângulo só AWS)
PB	2F	Horizontal Ângulo
PC	2G	Horizontal Topo
PD	4F	Teto Ângulo
PE	4G	Teto Topo
PF	3G/3F	Vertical Ascendente Topo ou Ângulo
PG	3G/3F	Vertical Descendente Topo ou Ângulo

3.4.7 Geometria das juntas de soldadura

A geometria das juntas de soldadura é de extrema importância, pois em função dos tipos de material base, as suas espessuras, folgas e ângulos entre peças, é definido o tipo e quantidade de material de adição que vai ser fundido e depositado. A forma da junta de soldadura pode requerer material de adição em apenas um dos lados ou em ambos.

Estes aspetos são de enorme relevância, pois, uma vez definidos, serão decisivos para reduzir ao máximo as tensões residuais e as distorções provocadas pelas soldaduras. Quanto maior for a junta de soldadura e mais folga existir, maior necessidade haverá de enchimento com material de adição, o que, inevitavelmente requererá mais passes de soldadura, causando maior entrega térmica, provocando mais deformações.

A norma EN ISO 9692, normaliza os vários tipos de juntas que são designados da seguinte forma (Figura 3.16):

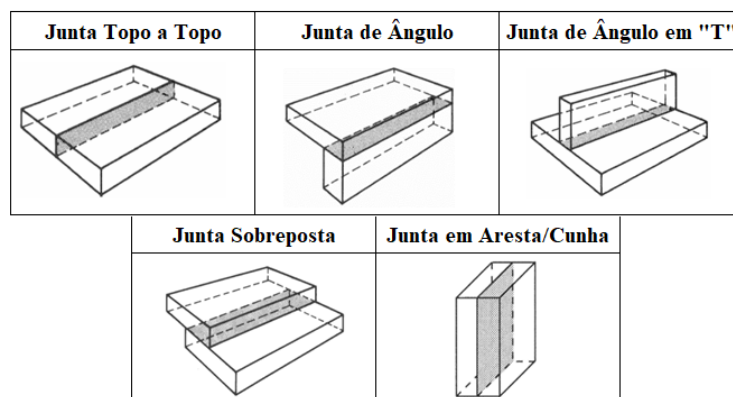


Figura 3.16 - Tipos de juntas de soldadura segundo EN ISO 9692 [14]

3.4.8 Nomenclatura da junta e da soldadura

Numa junta de soldadura, podemos optar por abrir ou não bisel nos bordos das peças a serem soldadas. O bisel é o desbaste que é necessário fazer para criar espaço que será preenchido pela soldadura (Figura 3.17). Quanto maior a espessura do material base, maior será a necessidade de abertura do bisel, logo maior o ângulo do chanfro, para poder permitir uma boa penetração (passe de raiz) (Figura 3.19). Essa penetração também depende da folga deixada para depositar o passe de raiz [10].

Materiais de baixas espessuras (até 4mm na construção naval), normalmente não requerem abertura de bisel porque permitem uma boa penetração e porque quanto maior for a deposição de material, maior será a entrega térmica e a tendência ao surgimento de empenos. A face do bisel deve ser o mais regular e limpa possível, de modo a não afetar a qualidade da soldadura [10].

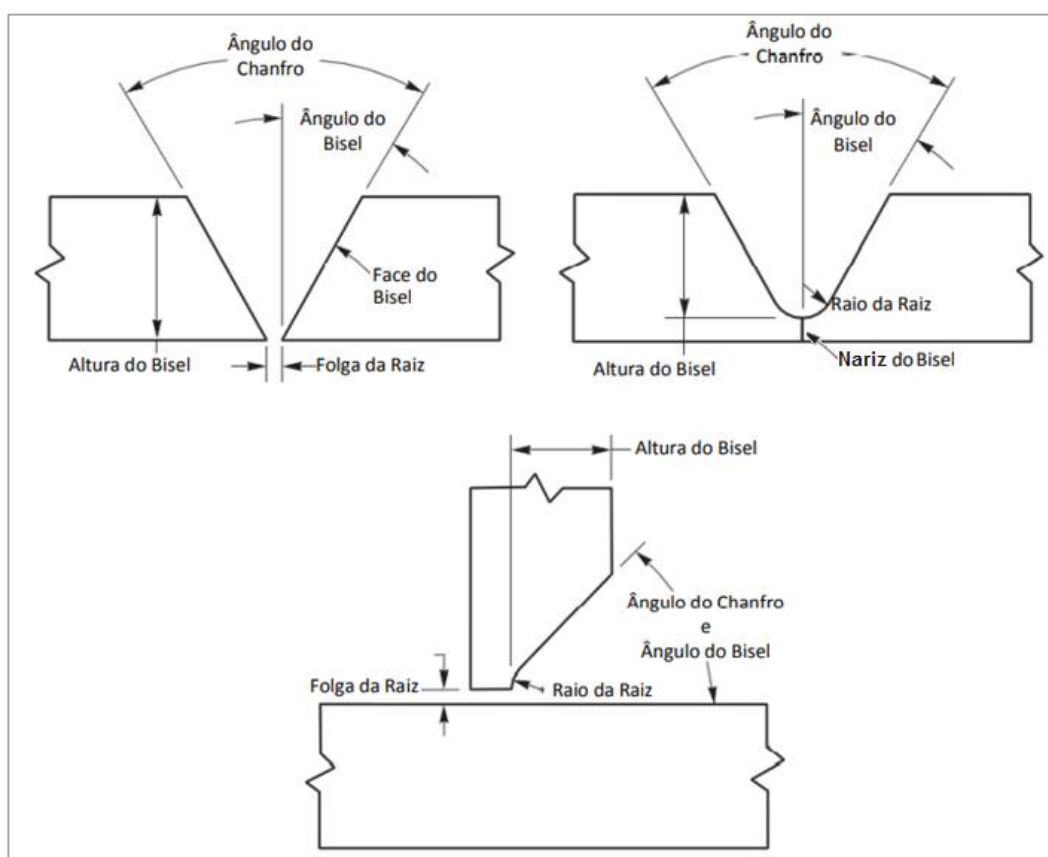


Figura 3.17 - Principal nomenclatura utilizada numa junta de soldadura [14]

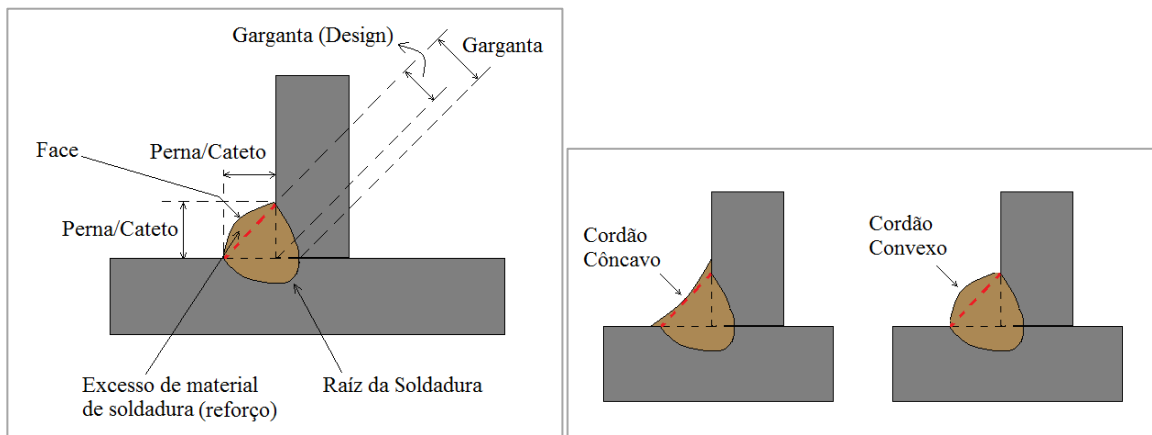


Figura 3.18 - Principal nomenclatura de uma soldadura (à esquerda) e concavidade (à direita) - [10] Imagem adaptada

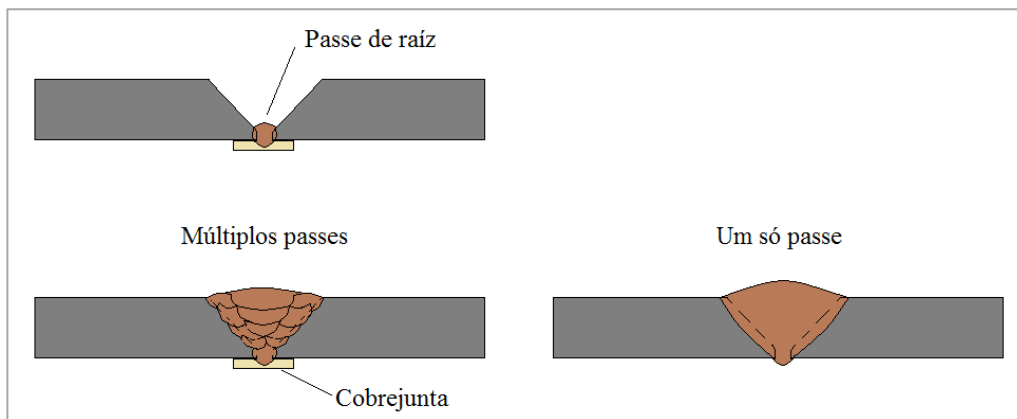

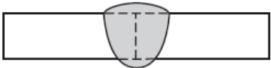
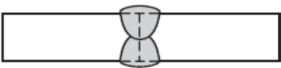

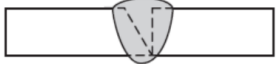
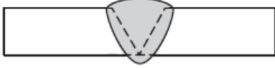
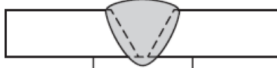
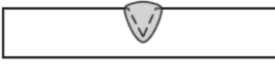


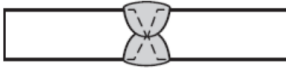

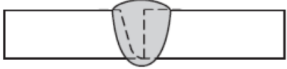


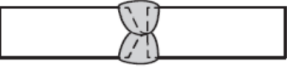

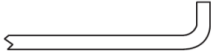
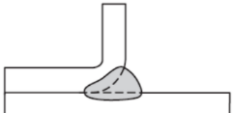
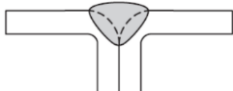
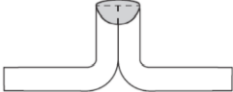
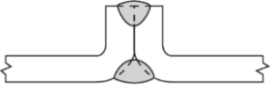

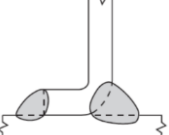



Figura 3.19 - Múltiplos passes ou um só passe de soldadura - [10] Imagem adaptada

3.4.9 Preparação dos bordos e tipos de soldadura

Tabela 3.3 – Tipos de bordos e respectivas juntas soldadas [14]

TIPOS DE BORDOS	TIPOS DE SOLDADURAS	
<p>Bordos Direitos</p>  <p><i>Sem chanfro</i></p>	 <p>Bordos Direitos</p>	 <p>Dupla de Bordos Direitos</p>
<p>Aresta em Bisel</p>  <p><i>Chanfro em V</i></p>	 <p>em 1/2 V</p>	 <p>em V</p>
	 <p>V com Cobrejunta</p>	 <p>V Superficial</p>
<p>Aresta em Duplo Bisel</p>  <p><i>Chanfro em K, X ou Duplo V</i></p>	 <p>Duplo bisel K</p>	 <p>X ou Duplo V</p>
<p>Aresta em J ou U</p> 	 <p>em J</p>	 <p>em U</p>
<p><i>Chanfro em J ou U</i></p> 	 <p>Duplo J</p>	 <p>Duplo U</p>
<p>Aresta Rebordada</p> 	 <p>Uma face Rebordada</p>	 <p>V com uma face Rebordada</p>
	 <p>Aresta em junta topo a topo</p>	 <p>Bordos direitor V topo a topo</p>
	 <p>Aresta em junta de canto</p>	 <p>Em ângulo e chanfro com um lado rebordado numa junta T</p>
	 <p>Aresta com penetração topo a topo</p>	

3.4.10 Cuidados a ter antes, durante e após a soldadura

Antes de iniciar uma soldadura

Devem ser cumpridos os seguintes critérios:

- Relativamente ao material a ser soldado, devem ser confirmados os tipos de material que vão ser unidos por soldadura, ou seja, se vão ser soldados dois metais iguais ou diferentes, pelo facto de poderem ter composições químicas diferentes e de fundirem a diferentes temperaturas, devendo ser escolhidos os consumíveis corretos de modo a garantir a sua soldabilidade. Fazer a verificação dos certificados de material e garantir que este não esteja contaminado;
- Analisar o procedimento de soldadura previamente aprovado para o efeito e confirmar que de facto os soldadores têm a certificação para executar as soldaduras pretendidas. O equipamento de soldadura deve estar calibrado;
- As juntas de soldadura devem estar devidamente preparadas e sem defeitos, em termos de chanfros, folgas e limpeza (sem água, gorduras, pó ou corrosão);
- Os consumíveis devem ser os indicados no procedimento de soldadura e estarem devidamente armazenados;
- Garantir que, se aplicável, o pré-aquecimento é feito de acordo com o procedimento [10].

Durante a execução da soldadura

Devem ser garantidos os seguintes aspetos:

- Confirmar que as condições climatéricas são adequadas e estão dentro dos parâmetros de aceitação, não afetando a qualidade das soldaduras;
- Conferir que de facto os consumíveis a utilizar são os corretos;
- Verificar a temperatura de pré-aquecimento (quando aplicável), a temperatura entre passes de soldadura, e se os parâmetros de soldadura (voltagem, corrente e velocidade de soldadura) estão de acordo com o procedimento;
- Verificar se o passe de raiz (penetração) foi bem executado;
- Garantir a inexistência de contaminantes entre os diversos passes de soldadura [10];

Após a soldadura

- Cada soldador deve fazer a identificação das suas próprias soldaduras, para posterior identificação, em caso de eventuais reparações;
- As soldaduras deverão estar devidamente “limpas”, de modo a possibilitar a inspeção visual e outros ensaios não destrutivos, tais como RX, líquidos penetrantes, ultrassons e partículas magnéticas;
- Controlar devidamente os processos de tratamento térmico ou controlo de arrefecimento da temperatura, após a soldadura, nos casos aplicáveis [10].

3.4.11 Parâmetros de soldadura

Tensão ou Voltagem (V)

A voltagem do arco elétrico está diretamente relacionada com o comprimento do mesmo. Nos processos SAW, MIG/MAG e FCAW, a voltagem é automaticamente controlada pelo equipamento. Quando existe um aumento da corrente (A), surge a necessidade de um aumento da voltagem, de modo a conseguir ter a capacidade de dispersar o banho de fusão e executar o cordão de soldadura com as características pretendidas. Note-se que no processo MIG/MAG, a voltagem tem um papel decisivo em termos de transferência do material de adição ao longo do arco elétrico, uma vez que é a responsável por definir o comprimento do arco elétrico e o acabamento do reforço superficial do cordão. O comprimento do arco elétrico é definido pela distância entre a ponta do eletrodo consumível e a superfície do banho de fusão. Se o comprimento for curto, é exercida mais “pressão” sobre o banho de fusão, criando um cordão mais achatado e com o reforço do cordão mais largo. Por outro lado, um arco elétrico de maior comprimento reduz a “pressão” exercida sobre o banho de fusão e é obtido um cordão superficialmente mais estreito, com mais altura de reforço superficial. Deve ser tido em consideração que um aumento exagerado da tensão contribui para uma redução da penetração, pode produzir projeções do material de adição, poros, mordeduras, e cordões demasiado achatados ou côncavos, correndo o risco de não possuírem a resistência mecânica esperada [10].

Intensidade de Corrente (I)

A intensidade de corrente define a profundidade da fusão/penetração do material de adição no material base e considera-se que quanto maior a corrente, maior será a fusão/penetração. Uma vez que este parâmetro afeta a diluição do material de adição na junção com o material base, deve ter-se especial atenção à corrente aplicada quando se pretendem soldar dois metais com propriedades

distintas, uma vez que podem possuir diferentes temperaturas de fusão e a corrente adequada para um, pode ser insuficiente ou exagerada para o outro [10].

Velocidade de Soldadura (mm/s)

A velocidade de soldadura pode ser definida como sendo o deslocamento (medido por exemplo, em milímetros) do eléctrodo consumível que se consegue executar num dado período de tempo (medido por exemplo, em segundos) ao longo da junta de soldadura. A variação da velocidade de soldadura afeta a geometria do cordão e a concentração de tensões residuais na garganta do cordão de soldadura [15]. Também influencia diretamente o tempo de realização da soldadura e a acumulação de calor no material base [16]. É um parâmetro que depende significativamente da perícia do soldador nas soldaduras manual e semiautomática, resultando numa maior ou menor entrega térmica.

Polaridade (positiva/negativa)

A polaridade determina se a entrega térmica está maioritariamente aplicada no eléctrodo consumível ou no material base. A localização da maior ou menor entrega térmica, não é igual em todos os processos de soldadura, dependendo da polaridade aplicada, tal como se pode verificar na tabela 3.4 [10]:

Tabela 3.4 - Polaridade aplicada ao eléctrodo nos principais processos de soldadura [10]

Processo	Polaridade		
	DC (+ ve)	DC (- ve)	AC
MIG/MAG	Normalmente utilizado	Raramente utilizado	Não aplicável
MMA	Boa penetração	Baixa penetração, mas boa deposição de material de adição (adequado para passes de raiz e <i>Weld Overlay</i>)	Não se aplica a determinados eléctrodos. Minimiza o sopro magnético
SAW	Boa penetração	Baixa penetração, mas boa deposição de material de adição (adequado para passes de raiz e <i>Weld Overlay</i>)	Previne o sopro magnético
FCAW	Normalmente utilizada	É recomendada para a aplicação de alguns fios fluxados, devido a questões de posicionamento de soldadura	Não aplicável
(DC) Corrente Contínua; (AC) Corrente Alternada (+ ve) Eléctrodo polaridade positiva; (- ve) Eléctrodo polaridade negativa			

3.5 Entrega Térmica

É comum dizer-se, paradoxalmente que a melhor prática para evitar a entrega térmica é simplesmente “*Não Soldar*”. Mas se assim fosse, seria impossível soldar metais, uma vez que é necessária energia térmica para a sua fusão/união.

A entrega térmica traduz-se como sendo uma unidade de energia que representa a quantidade de calor que é transferida para o material base por unidade de comprimento de soldadura, ao longo de um dado período de tempo [15].

Quando se dá uma descarga elétrica entre o eletrodo consumível e o material base, surge uma faísca e é criado um arco elétrico que eleva a temperatura para fundir o consumível e o material base. O banho de fusão é envolvido e protegido por um gás ionizante que impede a sua contaminação. A entrega térmica na zona de fusão, depende essencialmente da voltagem, corrente (intensidade aplicada e tipo de corrente), velocidade de soldadura e polaridades aplicadas na peça e eletrodo consumível.

O arco energético é caracterizado como sendo a quantidade de calor gerada pelo arco elétrico, medida por unidade de comprimento de soldadura. Normalmente é expresso em kiloJoule por milímetro de comprimento de soldadura (kJ/mm) e dado pela equação 3.2 [10]:

$$\text{Arco Energético (kJ/mm)} = \frac{\text{Voltagem (V)} \times \text{Amperagem (A)}}{\text{Velocidade de soldadura (mm/s)} \times 1000}$$

(Eq.2)

A entrega térmica é a energia transmitida pelo arco elétrico ao material base a ser soldado, principalmente influenciada pela velocidade de soldadura, e expressa-se pela equação 3.3 [10]:

$$\text{Entrega Térmica (KJ/mm)} = \text{Arco energético (KJ/mm)} \times \text{Fator de eficiência térmica}$$

(Eq.3)

O fator de eficiência térmica é a razão entre a energia de aquecimento no arco elétrico e a energia elétrica consumida pelo arco. Cada processo de soldadura possui o respetivo fator de eficiência térmica, indicado na tabela 3.5:

Tabela 3.5 - Fatores de eficiência térmica para cada processo de soldadura [10]

Processo de soldadura	Fator de eficiência térmica
SAW	0,95*
MMA	0,8
MIG/MAG	0,8
FCAW	0,8
TIG	0,6
PLASMA	0,6

*Valor do fator de eficiência térmica, considerando o consumo energético na fusão do fluxo, do fio consumível e do material base [40].

Os tipos de processo e as posições de soldadura influenciam a velocidade da mesma. Para os processos de soldadura manual e semiautomático, considera-se que a posição de soldadura vertical ascendente é aquela que proporciona maior entrega térmica devido à forma como se executa o cordão em oscilação “zig zag” de modo a conseguir depositar o material de adição sem escorrimentos, e também pelo facto de a velocidade de soldadura ser baixa relativamente a outras posições. Por outro lado, a posição vertical descendente é aquela que causa menor entrega térmica, uma vez que a velocidade de soldadura é superior.

Nas soldaduras ao teto, como existe a necessidade de baixar a corrente elétrica e aumentar a velocidade de soldadura, considera-se que a entrega térmica é reduzida. Sempre que o soldador, mediante determinada posição de soldadura, não consiga soldar em “zig zag” para deposição do material de adição, e a velocidade de soldadura seja elevada, a entrega térmica será relativamente baixa [10].

Comparando os processos de soldadura MIG/MAG, FCAW e SAW, e sabendo que estes são os melhores em termos de produtividade, uma vez que são processos que permitem boas deposições de material a maiores velocidades de soldadura, verifica-se que o processo SAW é aquele que transmite maior entrega térmica e supostamente causa mais deformações [3]. Regra geral, considera-se que os valores de entrega térmica em soldaduras estão compreendidos entre 1 a 3,5 KJ/mm [10].

3.6 Fluxo de calor

Nos processos de soldadura por fusão existe a necessidade de fornecer energia que permita fundir o consumível e parte do material base, criando o banho de fusão. A energia é transmitida da fonte para uma área restrita (A0) na junta de soldadura. Sendo o material base metálico, condutor

térmico, e estando a uma temperatura bastante inferior à da zona de contacto na região (A0), a energia que incide nessa zona tende a disseminar-se rapidamente pelo material base para regiões mais distantes (Figura 3.20). Existe, portanto, a necessidade de intensificar a concentração de energia na junta de soldadura, e como consequência afetando termicamente a zona da periferia (ZTA), adjacente à zona de fusão [17].

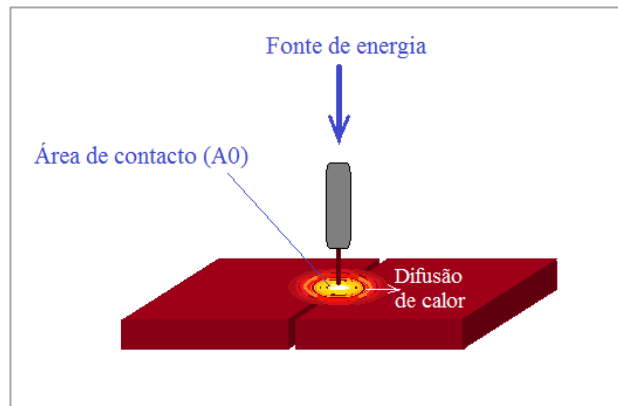


Figura 3.20 - Difusão de calor na peça - [3] Imagem adaptada

A potência necessária para garantir o processo de fusão numa zona restrita é dada pela equação 3.4 [17]:

$$P_{\text{esp.}} = \frac{\eta \cdot P_f}{A_0} = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{A_0} = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{\pi \cdot \left(\frac{d^2}{4}\right)}$$

(Eq.4)

$P_{\text{esp.}}$ = Potência específica (W/m²);

η = rendimento ou percentagem de energia que realmente é transmitida para o material base;

P_f = Potência: quantidade de energia por unidade de tempo. Produto da tensão (U) pela corrente (I);

A_0 = Área de contacto. Zona de transmissão de energia para o material base;

d = Diâmetro do arco na zona de contacto com o material base.

De modo a ser possível concretizar-se o processo de fusão, a potência específica típica dos processos de soldadura por fusão, situa-se entre 10⁶ e 10¹³ W/m² (soldadura através de arco elétrico 10⁶ a 10⁹ W/m², soldadura por plasma 10⁸ a 10¹¹ W/m², soldadura a laser 10⁹ a 10¹² W/m² e soldadura por feixe de eletrões 10¹⁰ a 10¹³ W/m²). Se a densidade de energia for muito superior, o aquecimento é tão radical que provoca a vaporização da zona de contacto do material base. Densidades energéticas

inferiores às mencionadas anteriormente inviabilizam o processo de fusão sendo aplicadas para processos de pré-aquecimento [17].

Nos processos de soldadura por fusão, um dos fenómenos físicos mais relevantes é o fluxo de calor. Este pode ser obtido através do número de Fourier que relaciona a distância que o calor percorre, pelo produto entre a difusão térmica do material e o tempo. É dado pela seguinte equação:

$$\frac{\text{Distância}}{\text{Difusão Térmica} \times \text{Tempo}} = \frac{X}{\sqrt{\alpha \cdot t}}$$

(Eq.5)

Considera-se que 98% dos problemas relacionados com o fluxo de calor nas soldaduras pode ser resolvido através do número de Fourier. Se o número de Fourier for consideravelmente superior a 1, significa que o material é demasiado espesso e o fluxo de calor está limitado pela difusão térmica. Se o número de Fourier for muito inferior a 1, o material é demasiado fino e os gradientes térmicos são pequenos. Por fim, se o número de Fourier for aproximadamente igual a 1, sugere-se que se façam estudos mais complexos em termos de análise da difusão de calor [18]. Poderão ser feitos cálculos mais complexos através de modelos analíticos e numéricos, utilizando softwares de simulação (por exemplo, o programa ANSYS).

A condutividade térmica quantifica o fluxo de calor que atravessa o material, e aumenta à medida que a temperatura aumenta. Uma condutividade térmica elevada significa que a distribuição de calor é feita de uma forma mais uniforme ao longo da soldadura e zonas periféricas. Portanto, condutividades térmicas superiores garantem menos empenos, uma vez que existem menos gradientes de temperatura a provocar tensões de contração. Deduz-se, portanto, que as deformações nos aços são muito influenciadas pela condutividade térmica [19].

3.7 Distorções e tensões residuais causadas pelas soldaduras

A soldadura de um metal requer a adição de calor numa zona muito restrita, localizada na junta de soldadura, para fundir o material de adição e parte do material base. Essa energia térmica aplicada propaga-se a partir do banho de fusão para o material base, nomeadamente para a ZTA adjacente ao cordão, provocando dilatações do material. Ao entrar em contacto com as zonas “frias” do material base, a energia calorífica transportada pelo banho de fusão provoca a expansão térmica do material aquecido e conseqüente deformação plástica. São originadas tensões de compressão que vão

no sentido do banho de fusão para o material base. Ao iniciar o ciclo de arrefecimento irregular do cordão, este vai contraindo através de forças de tração, e como existe uma força oposta que resiste, provocada pela massa fria do material base, é criada uma concentração de tensões residuais de maior ou menor dimensão. Havendo transformação de fases, considera-se que nesta fase se inicia uma redução do volume da soldadura [20;21].

À medida que prossegue o arrefecimento, as tensões vão sendo aliviadas, mas enquanto estas forem superiores à tensão de cedência do material base, as distorções prosseguem. Quando concluir o ciclo de arrefecimento (ao atingir a temperatura ambiente), é alcançado o ponto de equilíbrio entre as tensões de compressão e as tensões de cedência, portanto as distorções terminam. No entanto, é necessário salientar que essas tensões residuais ficam alojadas na soldadura [20;21].

As tensões residuais dependem de diversos fatores interdependentes, tais como, as propriedades do material de adição e material base, quantidade e tipo de reforços estruturais existentes, geometria da junta de soldadura, processo e posição de soldadura, velocidade e sequências, e o ciclo térmico [20;21].

Caso seja necessário, o alívio de tensões pode ser feito posteriormente através de processos de tratamentos térmicos, e a redução das distorções através de desempenos a quente, ou a frio através de processos mecânicos [10;20].

3.7.1 Tensões residuais nos aços de diferentes graus

A transformação de fases nos aços de baixo teor de carbono não é assinalável em termos de distorções, uma vez que existem menos tensões residuais acumuladas. Nos aços de médio e alto teor de carbono, as alterações de fases têm bastante relevância na criação de distorções, atendendo a que estes acumulam mais tensões residuais.

Em função da percentagem de carbono e respetivas transformações de fases, os aços podem ser divididos em aços hipoeutetóides, com teor de carbono de 0 a 0,77%, aços eutetóides com 0,77% de carbono e aços hipereutetóides com 0,77 a 2,11% de carbono [4] (Figura 3.21).

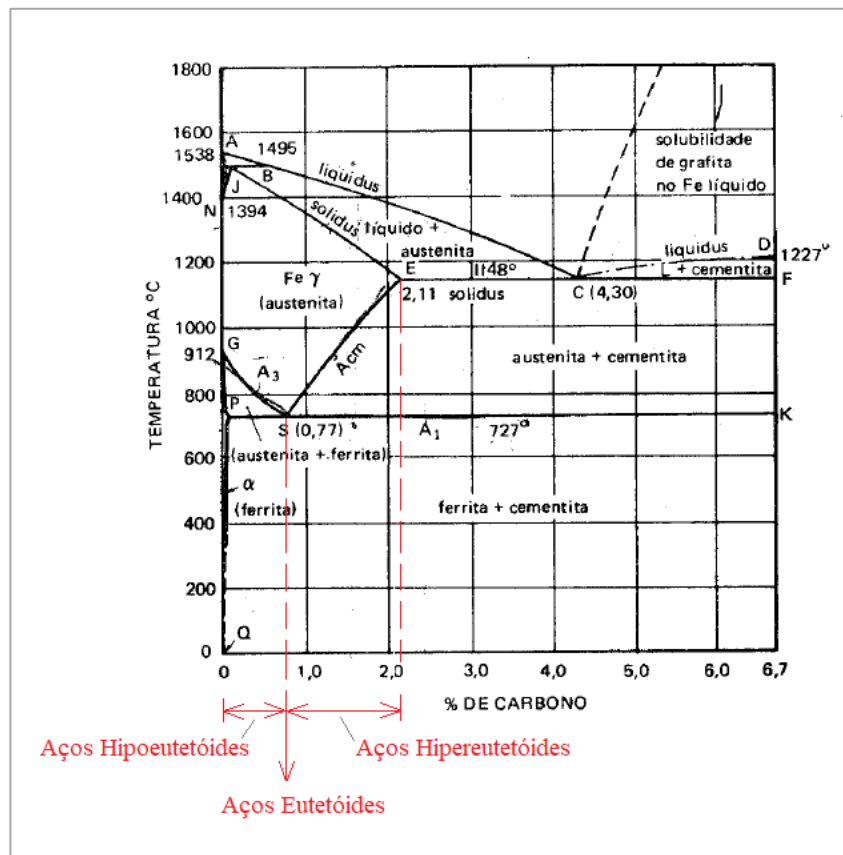


Figura 3.21 - Diagrama de equilíbrio Fe-C - [4] Imagem adaptada

Quando o arrefecimento é suficientemente rápido (têmpera), a austenite transforma-se em martensite, provocando um aumento de volume que reduz parcialmente as deformações por contração transversal, devido à criação de tensões de compressão [19]. A variação do volume durante a transformação da austenite para a martensite em 1% de carbono é de aproximadamente 4% [4].

A martensite é uma estrutura tetragonal c.c.c (cúbica de corpo centrado) com átomos de carbono inseridos intersticialmente [3]. Possui elevada dureza, de 65 a 67 RC (*Rockwell C*), pois como o arrefecimento é rápido, não existe tempo suficiente para que o carbono retido na austenite sólida seja libertado [4].

Forma-se, portanto, uma estrutura martensítica frágil, constituída por uma solução sólida sobressaturada de carbono com alto nível de micro tensões, sendo considerada dura e frágil à temperatura ambiente [4].

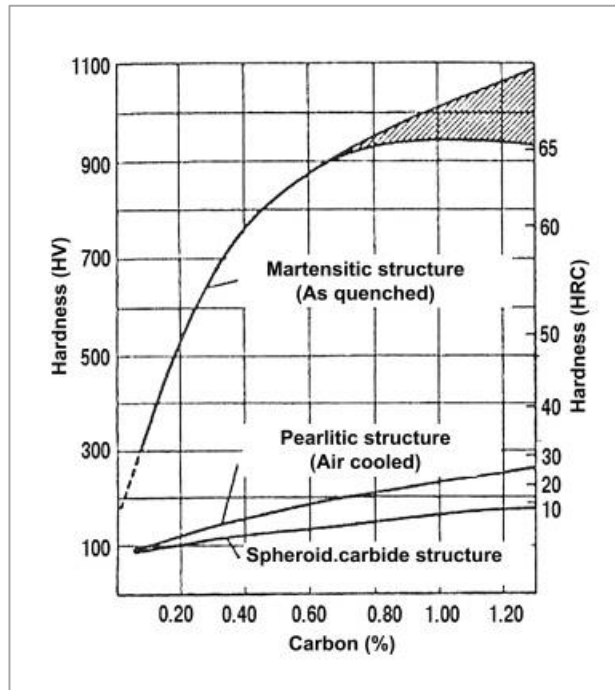


Figura 3.22 - Dureza da martensite em função do teor de carbono [22]

Como pode verificar-se no gráfico da figura 3.22, quanto maior for a percentagem de carbono no aço, mais presença tem a martensite, o que implica durezas superiores.

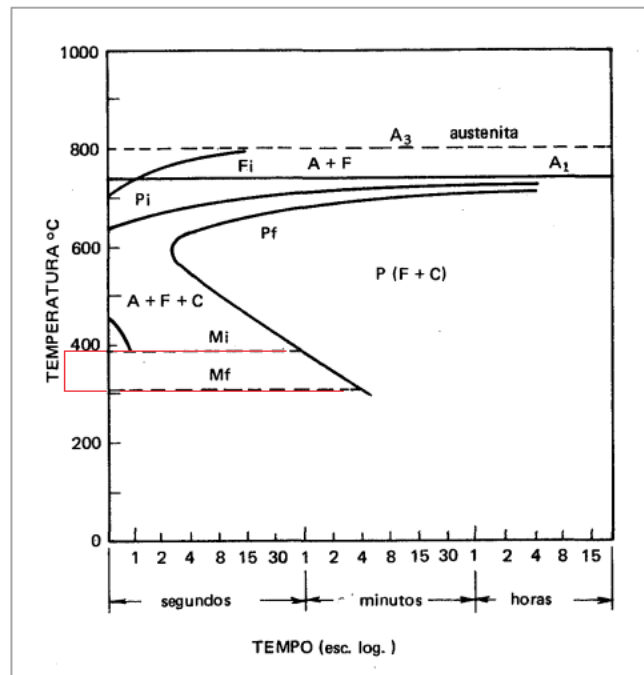


Figura 3.23 - Diagrama de transformação isotérmica de um aço hipoeutetóide. Formação da martensite [4] Imagem adaptada

Observando o gráfico da figura 3.23, verifica-se que a formação da martensite num aço hipoeutetóide inicia-se na linha M_i que se situa ligeiramente abaixo dos 400°C, terminando na linha M_f , um pouco acima dos 300°C. E comparando este mesmo gráfico com os seguintes (Figura 3.24 e Figura 3.25), verifica-se que nos aços com menos teor de carbono (hipoeutetóides), a iniciação da formação da martensite dá-se por volta dos 400°C, enquanto que nos aços de maior teor de carbono (hipereutetóides), essa formação inicia abaixo dos 200°C. Portanto a transformação da austenite em martensite inicia-se a diferentes temperaturas, em função da composição química de cada tipo de aço [4].

A temperatura de início de formação da martensite M_s , pode ser calculada através da seguinte equação [22]:

$$M_s (^\circ\text{C}) = 545 - 470,4C - 3,96Si - 37,7Mn - 21,5Cr + 38,9Mo$$

(Eq.6)

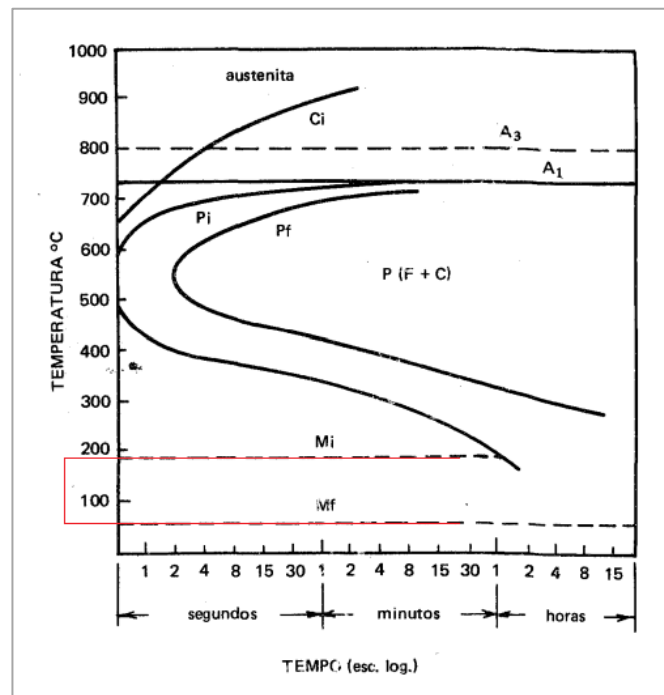


Figura 3.24 - Diagrama de transformação isotérmica de um aço hipereutetóide. Formação da martensite [4] Imagem adaptada

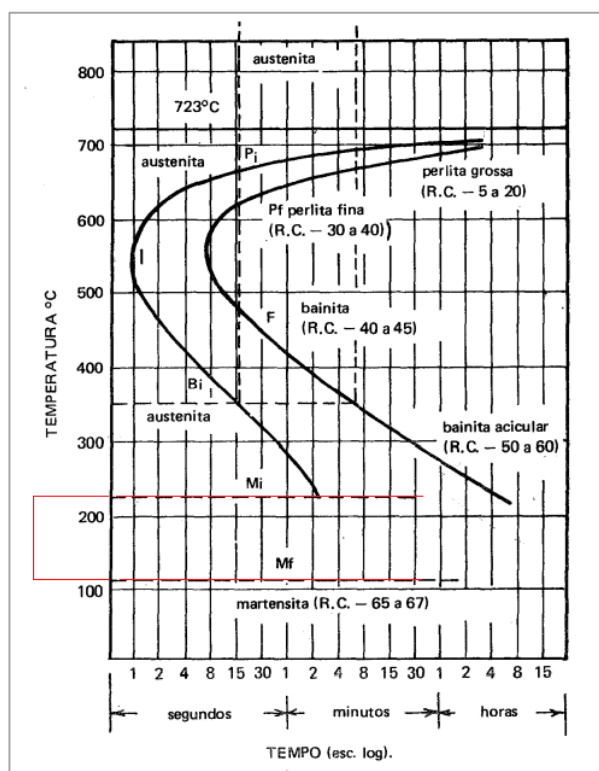


Figura 3.25 - Diagrama de transformação isotérmica de um aço eutetóide. Formação da martensite [4] Imagem adaptada

3.7.2 Métodos de controlo das distorções

Para reduzir ao máximo a entrega térmica e posteriormente as distorções, em cada caso deve ser definida previamente uma estratégia baseada na montagem e forma de pingar as peças, seqüências de soldadura a adotar, e quantidade de passes a executar, mediante as espessuras em questão. As boas práticas construtivas focam a importância do aspeto dimensional, do nivelamento e alinhamento inicial das peças a serem soldadas.

Num estudo levado a cabo com o objetivo de reduzir as tensões residuais e conseqüente minoração das distorções em chapas soldadas topo a topo, através do processo semiautomático constata-se pela análise da Figura 3.26 a), que o nível de distorção angular se acentua à medida que a espessura das mesmas aumenta, uma vez que espessuras superiores necessitam mais volume de material de adição para preencher as juntas de soldadura de maior dimensão. Mais material depositado gera maiores contrações no processo de arrefecimento. Nas chapas de baixa espessura, uma vez que o calor é distribuído de forma mais homogênea, difundindo-se mais facilmente pelo material base, as distorções angulares não são assinaláveis.

Contudo, na figura 3.26 b), observa-se um acentuar do nível de distorções β à medida que aumenta a espessura h das chapas, mas apenas até uma dada espessura, destacando-se a partir daí uma diminuição progressiva das distorções em chapas de espessura muito superior, devido ao facto de possuírem maior rigidez.

A entrega térmica q_w das soldaduras depende dos parâmetros aplicados (velocidade, corrente, voltagem, manipulação da tocha). Comparando o processo de soldadura semiautomática dito normal (GMAW) que possui a entrega térmica q_{w2} , com o processo de soldadura semiautomática CW-GMAW (Cold wire-Gas Metal Arc Welding) que utiliza um fio adicional não energizado, e que possui a entrega térmica q_{w1} , verifica-se que a curva q_{w2} avançou para a direita da curva q_{w1} . Significa, portanto, que a entrega térmica q_{w1} é mais reduzida para as diferentes espessuras de chapa, originando menores distorções angulares, em comparação com a curva q_{w2} . Este facto deve-se a que o processo CW-GMAW dá origem a uma menor largura da ZTA, acelerando o processo de arrefecimento e por sua vez garantindo menores distorções angulares [23].

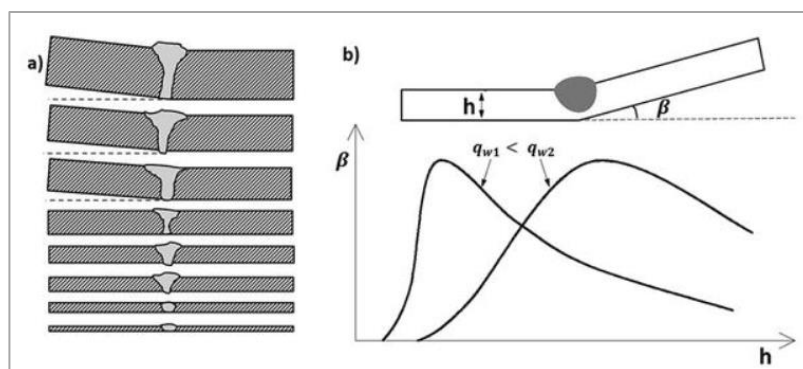


Figura 3.26 - Deformações de uma chapa de aço em soldadura topo a topo, mediante diferentes espessuras

b) Distorção angular (β), variando a espessura (h) e respetiva entrega térmica (q_w) [23]

Existem alguns métodos que podem ser aplicados antes da soldadura, de modo a contrariar as deformações finais previstas. Fixar a peça em vários pontos através de pingos de soldadura ou grampos de fixação, por vezes com o auxílio de cunhas, permite mantê-la fixa e alinhada durante a soldadura. Por outro lado, através de forças mecânicas aplicadas, grampeando e pré-curvando a chapa no sentido oposto ao das tensões de deformação previstas, podem reduzir as deformações finais após arrefecimento da soldadura e libertação dos grampos de fixação [24;25] (Figura 3.27).

No caso das distorções angulares, também existe a possibilidade de executar a montagem criando propositadamente uma distorção angular negativa (Figura 3.28), antes de soldar, com o objetivo de ser neutralizada pela distorção positiva após contração no arrefecimento da soldadura [26].

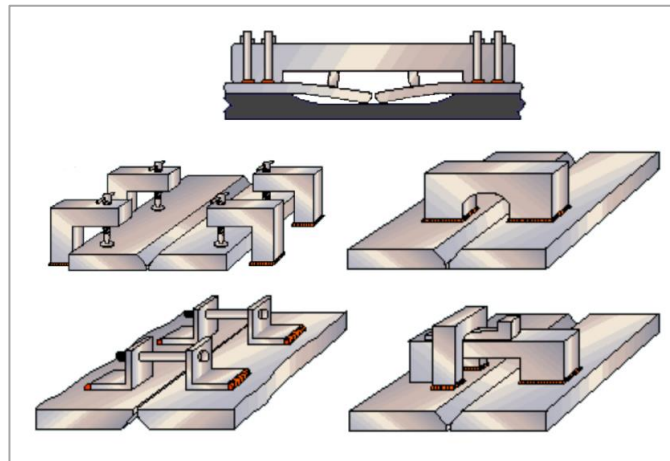


Figura 3.27 - Diferentes formas de fixação das peças - [25] Imagem adaptada

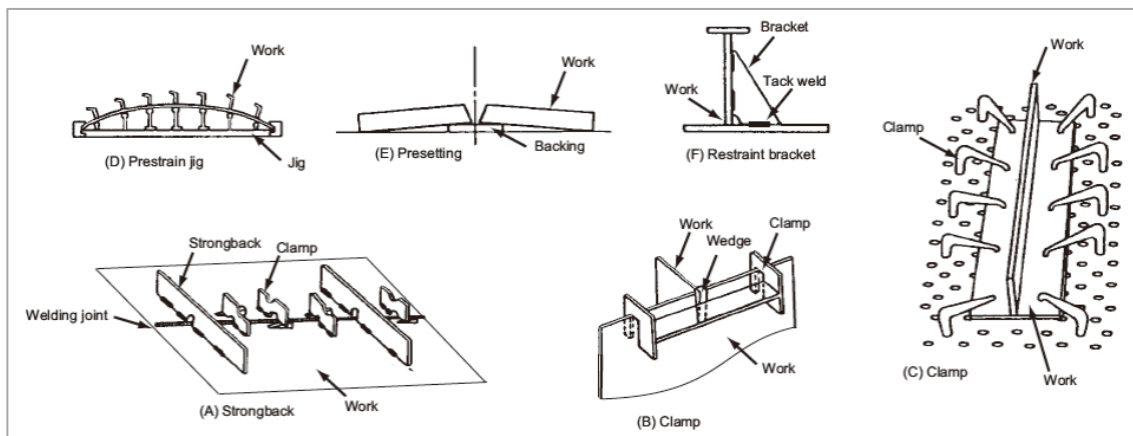


Figura 3.28 - Outras formas de fixação das peças para prevenção de deformações - [27] Imagem adaptada

Na fase de montagem deve ser definida a sequência e a dimensão dos pingos de soldadura que servem para fixar as peças. Pingos de soldadura de grandes dimensões são prejudiciais porque, ou requerem desbaste de modo a reduzir o seu tamanho (o que implica mais gastos inerentes ao tempo de trabalho, consumíveis e energia), ou caso contrário, mantê-los e o cordão de soldadura deverá ser o suficientemente espesso, de forma a ficar uniforme com a espessura dos pingos (o que implica mais custos em energia, tempo de trabalho, consumíveis e mais entrega térmica). Ambas as situações são prejudiciais porque implicam não respeitar os procedimentos de soldadura, aumentar os custos e diminuir a qualidade devido às deformações que a entrega térmica adicional aporta [10;11].

As sequências dos pingos de soldadura (Figura 3.29) são importantes para prevenir as distorções, nomeadamente transversais, uma vez que bem executados, garantem uma folga regular da junta [10].

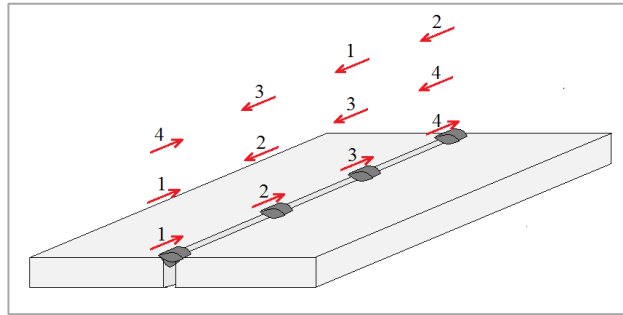


Figura 3.29 - Diversas alternativas de seqüências de pingos de soldadura [10]

Considera-se que optar por fazer uma soldadura completa em apenas um dos lados da peça causa muito mais distorções do que alternando os passes de soldadura entre um lado e o outro (Figura 3.30). Normalmente opta-se por juntas de dupla face em vez de uma só [10;11].

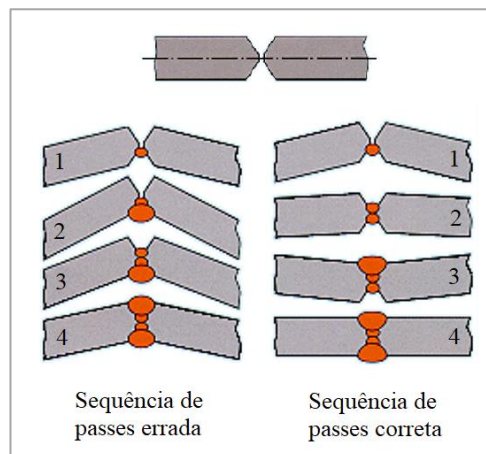


Figura 3.30 - Seqüências de soldadura, alternando ou não, lateralmente os passes - [10] Imagem adaptada

A velocidade de soldadura também deve ser considerada, pois a rapidez da sua execução faz toda a diferença na entrega térmica. Uma soldadura rápida produz menos entrega térmica que uma soldadura idêntica, mas lenta. Devido a esta conclusão, deve sempre dar-se preferência a processos de soldadura mecanizados [10;24;28].

A elevada concentração de calor na zona da soldadura e zonas adjacentes, pode provocar uma expansão do material base em todas as direções e uma deformação plástica (Figura 3.31). A elevadas temperaturas, a tensão de rutura é mais baixa e afeta diretamente as distorções. Por outro lado, o coeficiente de expansão térmica do aço a temperaturas superiores, permite uma maior expansão do material, o que também provoca uma maior contração no arrefecimento, logo mais deformações [19].

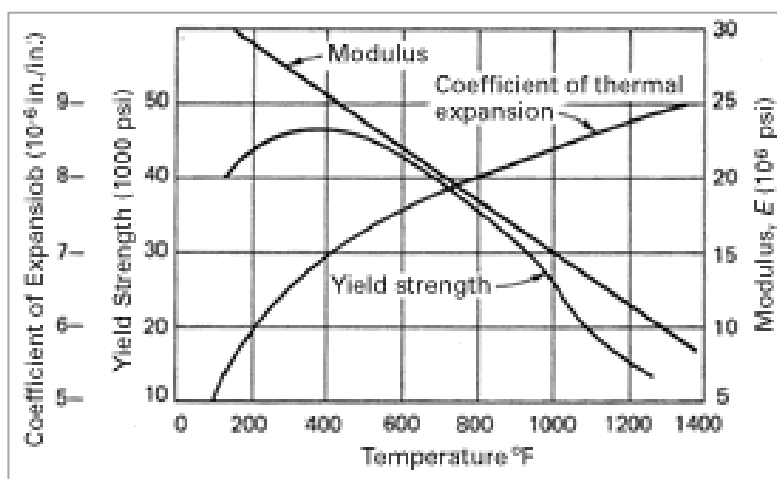


Figura 3.31 - Alteração das propriedades do aço com o aumento da temperatura [24]

Assim sendo, as soldaduras devem ser planeadas de forma a ficarem localizadas e equilibradas em torno do eixo neutro, devem evitar-se cordões de soldadura com excesso de material de reforço de modo a evitar sobre espessuras que causam maior concentração de tensões residuais, e eventuais fissurações por fadiga. Também é importante escolher a correta geometria da junta, de maneira a equilibrar as tensões e reduzir a quantidade de material de adição na junta de soldadura [10;24;28].

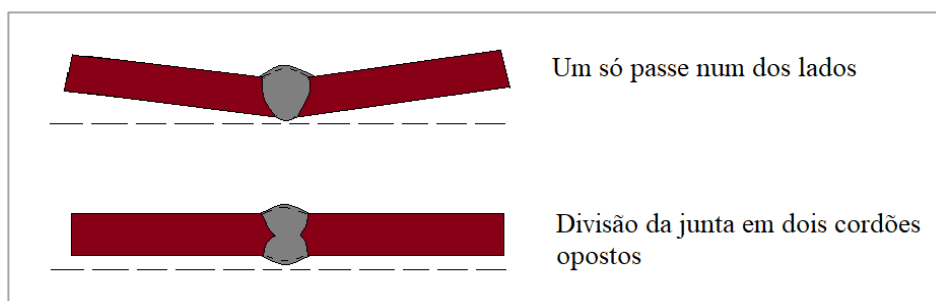


Figura 3.32 - Divisão da junta em dois cordões de soldadura opostos – [10] imagem adaptada

Optar por soldaduras intermitentes/alternadas (Figura 3.32, Figura 3.33, Figura 3.34 e Figura 3.35) em detrimento de soldaduras contínuas é uma boa opção, assim como reduzir ao máximo a quantidades de passes de soldadura.

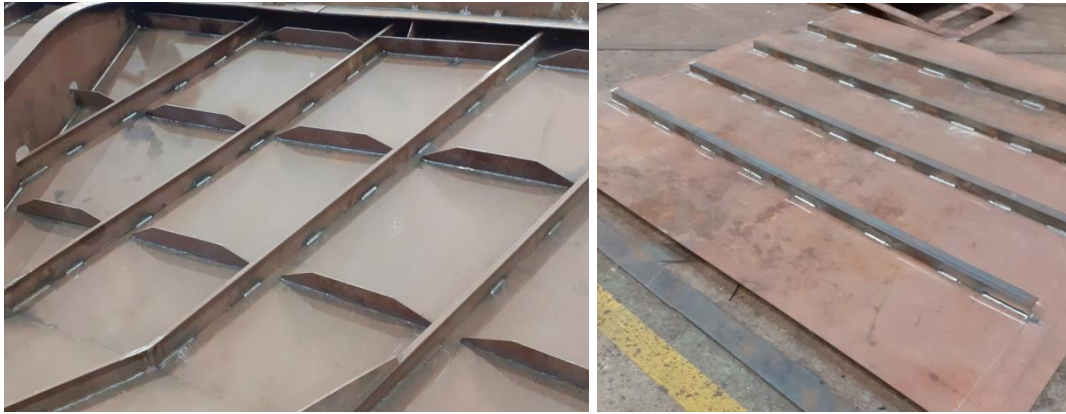


Figura 3.33 - Soldaduras intermitentes (fonte: West-sea)

Por vezes é preferível executar um menor número de cordões com elétrodos de maior diâmetro, do que aumentar a quantidade de passes devido à utilização de elétrodos de diâmetro reduzido. Note-se que a sucessão de diversos passes tem um efeito cumulativo em termos de incremento de calor e distorções [10;24;28].

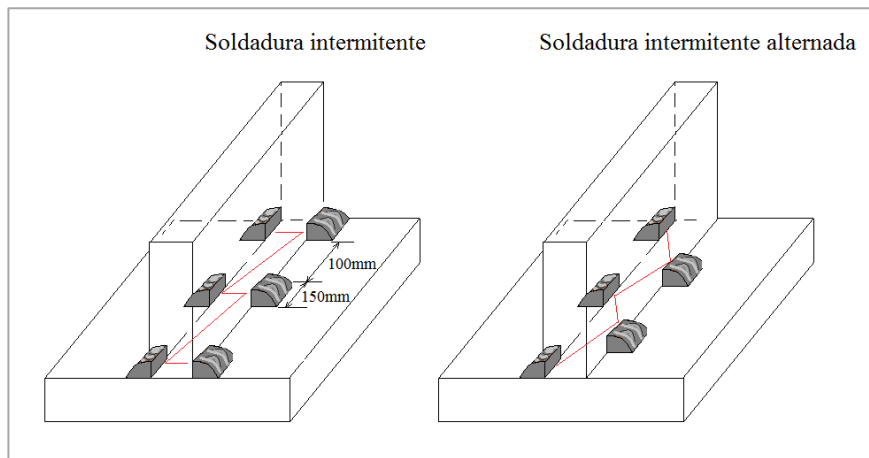


Figura 3.34 - Diferentes métodos de soldadura intermitente em soldaduras de canto (fonte: West-sea)

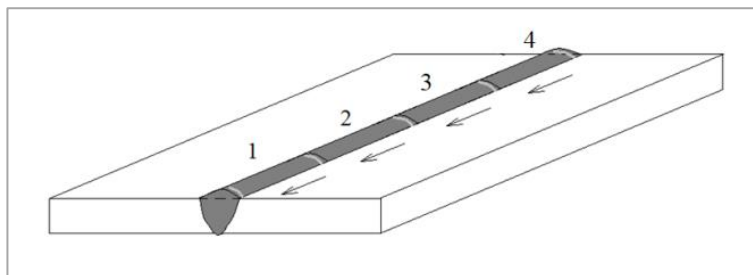


Figura 3.35 - Passes de soldadura com sequência alternada - [10] Imagem adaptada

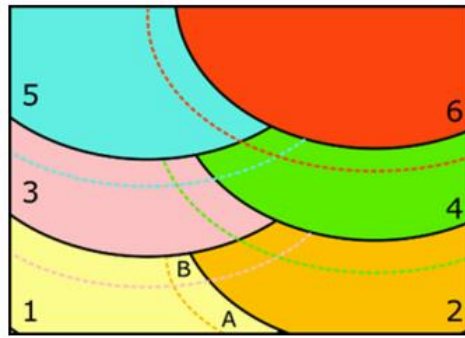


Figura 3.36 - Representação esquemática de 6 passes de soldadura [29]

Na figura 3.36 pode verificar-se a sobreposição de seis passes de soldadura, e as linhas a tracejado representativas das zonas termicamente afetadas. Por exemplo, a área assinalada B é termicamente afetada pelo passe nº1, e posteriormente reauecida pelos passes nº2 e nº3. Seguindo os restantes passes, verifica-se um acumular de zonas reauecidas que geram um aumento da entrega térmica total [29].

3.7.3 Tipos de deformações

As distorções nos aços são deformações causadas pelas tensões de tração/compressão originadas devido aos ciclos de aquecimento e arrefecimento das soldaduras, alterando a forma e as dimensões iniciais. De seguida são demonstrados os principais tipos de deformações que ocorrem nos aços:

Contração/encolhimento transversal e longitudinal

A contração transversal é perpendicular ao eixo central da soldadura e quanto maior for a junta e a zona fundida, maior será a deformação (Figura 3.37), por outro lado, também se dá um encolhimento longitudinal porque o cordão contrai paralelamente ao eixo central da soldadura e a chapa deforma (Figura 3.38) [30].

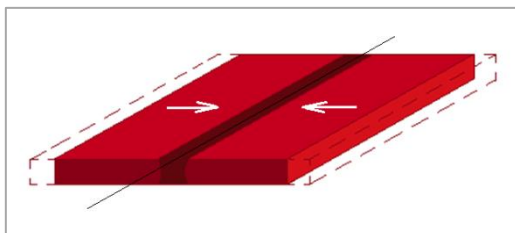


Figura 3.37 - Encolhimento transversal [10]

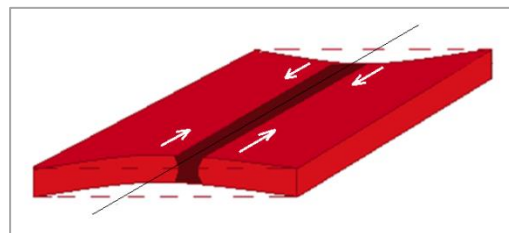


Figura 3.38 - Encolhimento longitudinal [10]

Distorção angular

Rotação da estrutura causada pela distribuição não uniforme da contração transversal ao longo da espessura da junta. Ocorre com mais frequência em juntas de topo a topo (Figura 3.40) e de canto (Figura 3.39) [19].

As distorções angulares nas juntas topo a topo diminuem à medida que aumenta a espessura da estrutura e normalmente deixa de ser considerável a partir dos 25 mm de espessura [31].

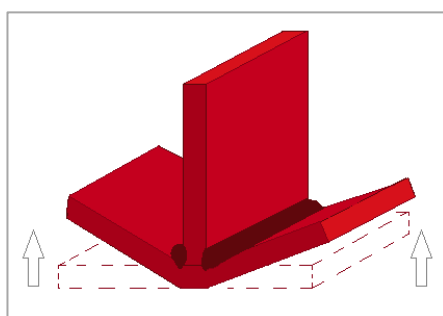


Figura 3.39 - Distorção angular em junta de canto "T" [10]

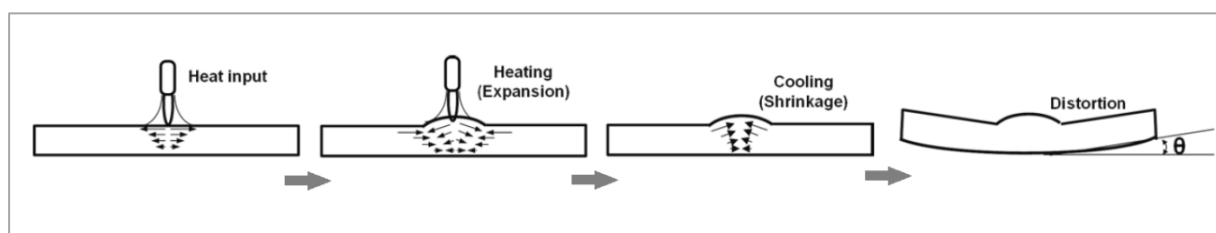


Figura 3.40 - Distorção angular em junta de topo [39] - Imagem adaptada

A distorção angular é diretamente proporcional à quantidade de passes de soldadura que formam o cordão e ao tempo de espera entre passes. Portanto, quanto mais passes forem executados e mais alargado for o período de tempo entre eles, maior será a magnitude e o nível de distorções angulares [26].

Distorção rotacional

Causada pela soldadura contínua e progressiva ao longo da junta, provocando distorção na zona da junta que não foi soldada. Este tipo de distorção ocorre principalmente nas juntas topo a topo (Figura 3.41) [33].

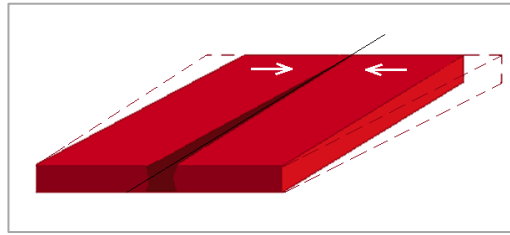


Figura 3.41 - Distorção rotacional [10]

Encurvadura

Trata-se da distorção mais frequente nas estruturas de chapa fina e ocorre com mais frequência nas chapas de maior comprimento e menor largura, devido às tensões residuais de compressão (Figura 3.42). As distorções por encurvadura em aços estruturais diminuem à medida que aumenta a espessura da estrutura, e tendem a desaparecer acima dos 10 mm de espessura [31;34].

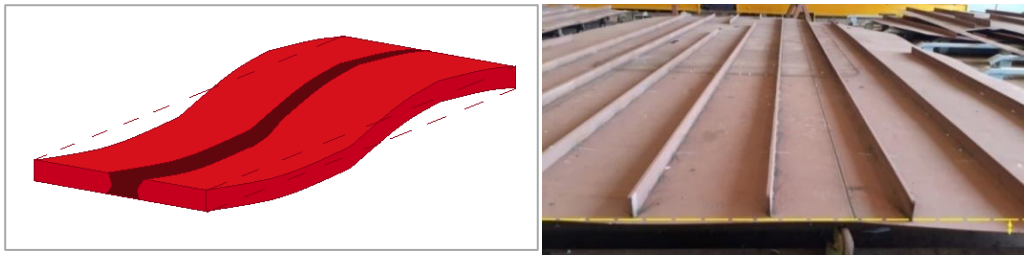


Figura 3.42 - Encurvadura de painel

Deformação longitudinal e distorção angular

O cordão contrai na direção da linha central da soldadura e dá-se simultaneamente a rotação da estrutura devido à distribuição não uniforme da contração transversal (Figura 3.43).

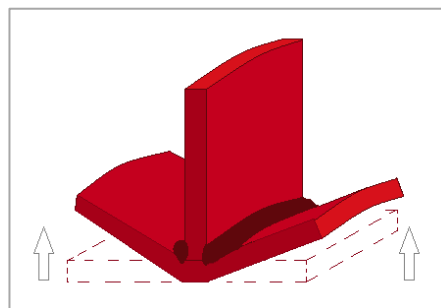


Figura 3.43 - Deformação longitudinal e distorção angular [10]

Num estudo realizado com o objetivo de demonstrar a importância das seqüências de soldadura e a sua influência nas distorções e tensões residuais em estruturas soldadas, destacou-se uma assinalável redução das mesmas, através do processo de soldadura mecanizado FCAW. Foram demonstradas três diferentes seqüências de soldadura das chapas em aço estrutural AH32 com os respectivos reforços estruturais, utilizados na construção naval [23].

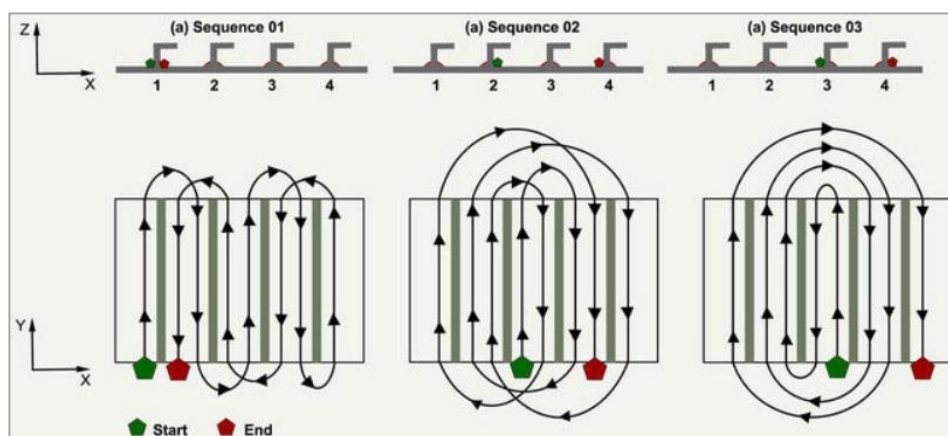


Figura 3.44 - Diferentes seqüências de soldadura em painéis de aço AH32 [23]

Em termos comparativos, verificou-se que a seqüência de soldadura tem muita influência nas deformações, nomeadamente longitudinais e transversais, uma vez que a seqüência 3 apresentou a menor quantidade de distorções em termos globais (Figura 3.44).

Relativamente à obtenção das tensões residuais, através de um difratômetro de medição RX, foram apresentados os resultados das tensões médias transversais e longitudinais dos três painéis (figura 3.45). Verificou-se que normalmente as tensões residuais estão associadas diretamente ao nível de distorções, pelo que a seqüência 3 foi a que apresentou a menor concentração de tensões [23].

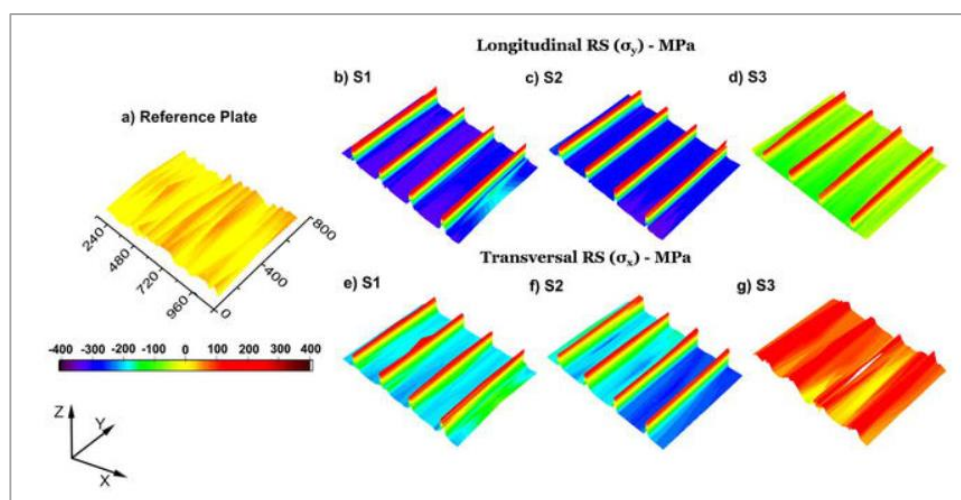


Figura 3.45 - Deformações longitudinais e transversais nas três seqüências de soldadura em painéis [23]

Outro estudo refere que na formação de painéis de chapa fina, as distorções por encurvadura podem ser minimizadas através da aplicação de linhas de calor por chama, feitas antes e durante a execução das soldaduras ao longo da chapa do painel e paralelamente aos perfis de reforço [35].

O processo consiste em soldar cada perfil estrutural à chapa principal, através de soldadura mecanizada, provida de duas tochas em simultâneo, que executam as soldaduras de canto de ambos os lados do perfil. Antes de iniciar as soldaduras, são executadas duas linhas de calor, cada uma paralela a cada cordão de modo a fazer um pré-aquecimento. De seguida, e simultaneamente com o início das soldaduras, são novamente executadas as mesmas linhas de calor ao longo do painel (desta vez aproximadas 50mm na direção do perfil estrutural) progredindo simultaneamente à velocidade de soldadura [35] (Figura 3.46 e Figura 3.47).

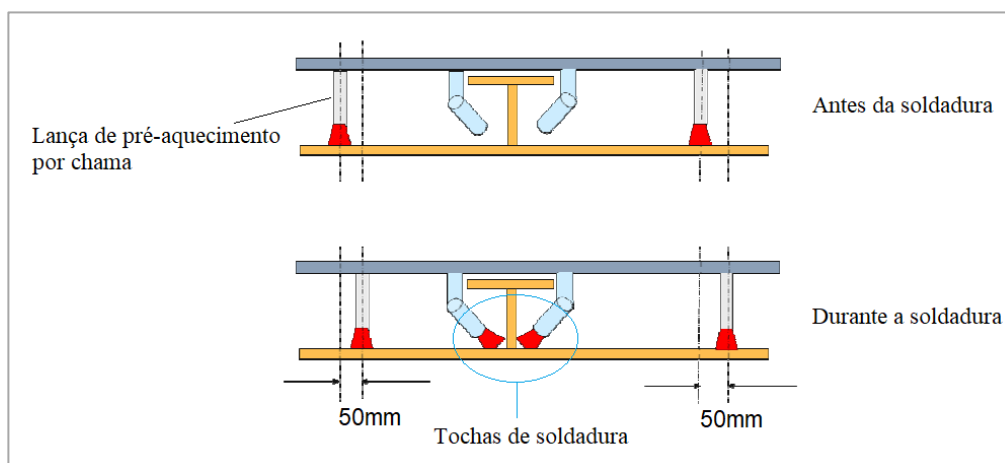


Figura 3.46 - Aplicação de linhas de calor, antes e durante a soldadura - [35] Imagem adaptada

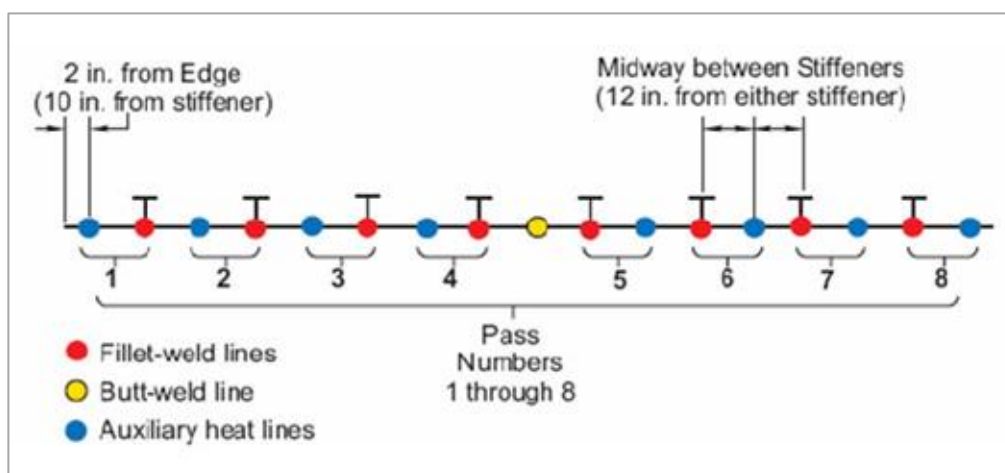


Figura 3.47 - Sequências de linhas de calor e soldaduras [35]

3.8 Processos de desempenho

Como foi referido anteriormente, e pelas razões já citadas, a prevenção das deformações é de extrema importância. No entanto, e quando estas surgem, a sua eliminação ou redução pode ser feita de diversas formas, aplicando a mais adequada deformação plástica na zona ou estrutura deformada, através de processos mecânicos de correção e/ou processos térmicos [31].

De seguida são descritos alguns dos principais processos de desempenho por chama mais utilizados na construção naval.

3.8.1 Desempeno através de processo térmico por chama

Um processo térmico para desempenar uma estrutura consiste na aplicação repetitiva de calor na área deformada, através de chama (atingindo temperaturas na ordem dos 594 a 649°C), seguindo sequências e padrões predefinidos, recorrendo ao arrefecimento com água. De notar que são processos que devem ser levados a cabo por pessoal com o *know how* específico (com experiência de aprendizagem através da visualização e trabalho prático. Ver e fazer), por terem como principal desvantagem a alteração das propriedades mecânicas do material devido à deformação plástica [31]. Temperaturas demasiado elevadas podem causar alterações metalúrgicas no material.

Durante o processo, o aquecimento permite uma expansão do material e o arrefecimento proporciona a sua contração. Estas variações são determinadas pela dimensão, quantidade, localização e temperatura das zonas aquecidas, assim como a espessura do material [10].

Na execução de desempenos nos navios, as chapas dos painéis possuem reforços estruturais soldados em determinadas zonas, deixando as áreas vizinhas sem reforço e muitas vezes com deformações. Os desempenos por chama são feitos através de tocha de oxiacetileno (utilizando oxigénio e acetileno) e podem ser levados a cabo das seguintes formas:

Pontos quentes

A área empenada é aquecida através de diversos pontos com diâmetros de aproximadamente 25 a 50 mm, espaçados por distâncias entre centros de 150 a 200 mm e arrefecidos imediatamente através de água. Estas medidas e distâncias podem variar mediante a dimensão da área a ser aquecida e o nível de empeno existente [31].

Os pontos são normalmente aplicados na parte convexa da chapa (Figura 3.48), e se a deformação existente for regular, os pontos podem ser alinhados/aplicados simetricamente, iniciando o processo do centro da área deformada para a periferia [10].

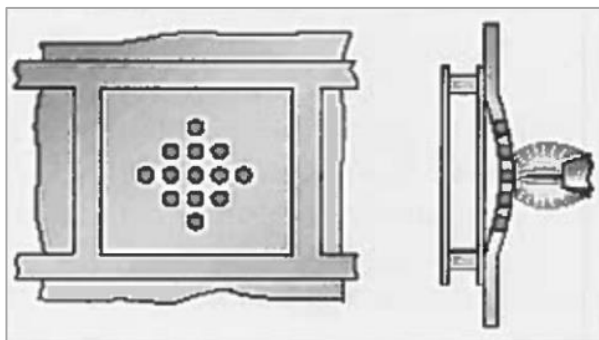


Figura 3.48 - Aplicação de pontos de calor [10]

Linhas de calor contínuas

A execução de desempenos a quente também pode ser feita do mesmo modo com o auxílio do oxiacetileno, percorrendo a área empenada, “desenhando” múltiplas linhas de calor contínuas (retas, curvadas ou circulares). Da mesma forma que o processo anteriormente referido, o arrefecimento é feito através de água. Ao longo do arrefecimento, as chapas de menor espessura tendem a arquear na direção oposta (Figura 3.49 e 3.50) [31].

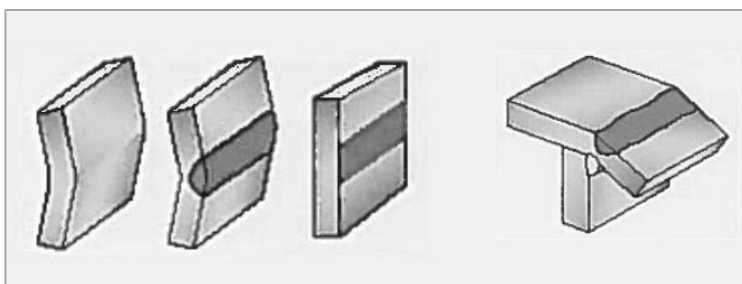


Figura 3.49 - Ilustração da aplicação de linha de calor para desempeno [10]

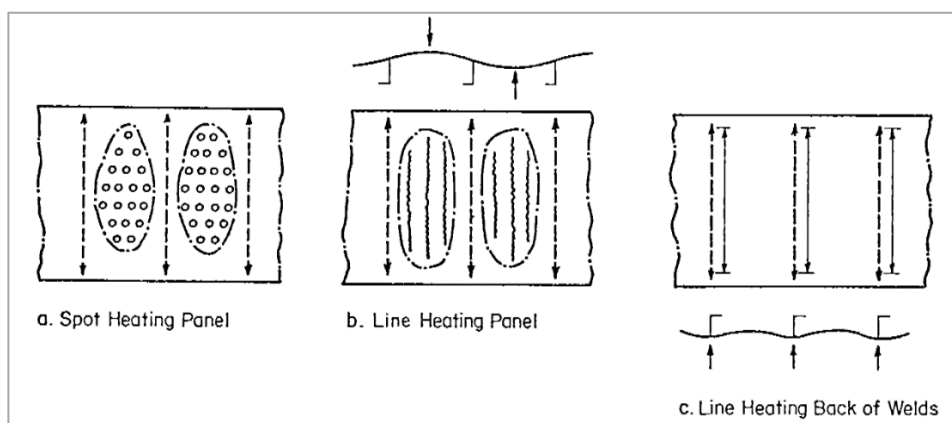


Figura 3.50 - Diferentes padrões de aplicação de calor por chama [31]

Lança e bicos de maçarico

A escolha do tipo de lança, respetivos bicos e suas dimensões, para realizar os desempenos depende do tipo de material a desempenar e da sua espessura.

Para desempenar distorções angulares e encurvadura em painéis, nomeadamente de pisos e costados dos navios, através de linhas quentes contínuas, a lança de três bicos (Figura 3.52) é a mais adequada pelo facto de conseguir realizar de uma só vez três linhas paralelas na face da chapa oposta à face sobre o qual estão soldados os perfis estruturais de reforço [36].

O desempenho é considerado eficiente quando apenas $1/3$ (em profundidade) da espessura da chapa é aquecida (Figura 3.51). Essa penetração do calor é conseguida quando se observa a superfície da chapa onde incide a chama, com um brilho de cor vermelho escuro, que desaparece imediatamente à medida que se desloca a lança (Figura 3.52). Para que o desempenho seja feito com sucesso, o bico da lança deve ser escolhido em função da espessura da chapa a desempenar [36].

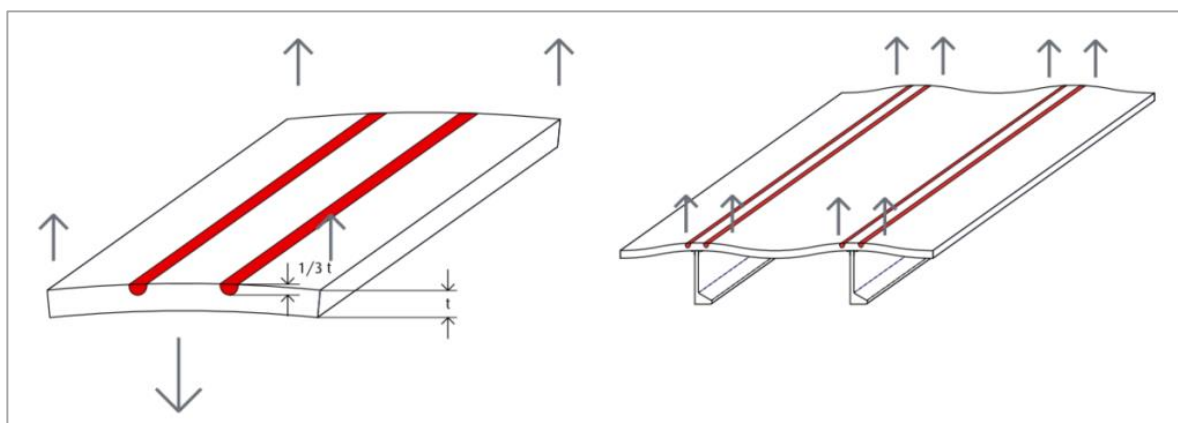


Figura 3.51 - Aplicação de linhas de calor, aquecendo $1/3$ da espessura da chapa (à esquerda).
Aplicação de linhas de calor na face oposta ao lado dos perfis estruturais soldados [36]

Para lanças oxiacetilénicas de múltiplos bicos, são geralmente utilizados os seguintes bicos:

Chapas com espessuras inferiores a 15 mm - bicos com aberturas de 2 a 4 mm;

Chapas com espessuras entre 15 e 40 mm - bicos com aberturas de 4 a 6 mm;



Figura 3.52 - Lança de três bicos [29]



Figura 3.53 - Marcas de desempenho em antepara (Fonte: West-sea)

Os principais aspetos a ter em consideração para realizar um desempenho a quente são:

- Método de desempenho a ser seguido, considerando padrões e sequências (Figura 3.53);
- Não exceder a temperatura à qual é feito o desempenho, ou seja, escolher o bico adequado, mantendo apenas a chama até atingir a coloração avermelhada na superfície da chapa;
- Nível de distorção existente;
- Espessura do material base.

Como é sabido, chapas finas deformam mais facilmente, e à medida que aumentam as espessuras, reduz a suscetibilidade à deformação. Contudo, à medida que a espessura aumenta, as alterações das propriedades do material acentuam, tais como a diminuição da tenacidade (provado através de ensaios de tenacidade ao entalhe), maiores gradientes de temperatura devido a um aumento da dificuldade de difusão do calor (Figura 3.54) [31].

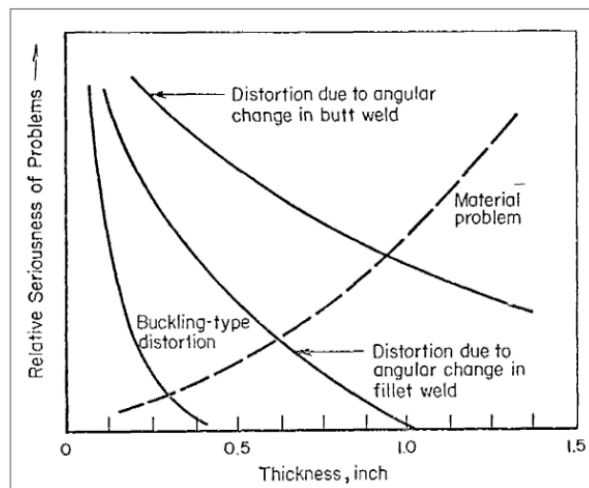


Figura 3.54 - Nível de deformação de uma chapa de aço em função da sua espessura [31]

3.8.2 Desvantagens e limitações dos desempenos

Para além dos custos referidos anteriormente, os desempenos trazem outras desvantagens:

- São operações adicionais, separadas das restantes, e para além de todos os recursos necessários, requer mão-de-obra com o *know how* específico para a sua execução;
- Requerem tarefas adicionais de limpeza;
- Algumas vezes, as deformações que ficam retidas em zonas muito específicas e que não permitem o endireitamento da chapa, uma vez que persistem mesmo após a aplicação de calor, requerem trabalhos adicionais de corte da chapa e novas soldaduras para correção;
- Por vezes, o desempenho de grandes áreas provoca uma redistribuição das tensões e pode gerar elevadas concentrações de tensões residuais em zonas específicas, podendo, por conseguinte, causar novas deformações noutras zonas [35].

3.8.3 Método alternativo para desempenos - Aquecimento por indução

Uma das tecnologias mais recentes é um equipamento para desempenos de pisos e anteparas, que abdica da utilização de chama e gases.

O processo consiste em aquecer a chapa por indução, através de correntes *Eddy* (também conhecidas por correntes “*Foucault*”, “*parasitas*” ou “*de fuga*”).

A unidade transformadora possui um íman na parte inferior que garante um posicionamento preciso durante a operação de aquecimento. A chapa de aço, e sendo este material um condutor, ao estar sujeita ao campo magnético, recebe calor dissipado, proveniente das correntes induzidas (Figura 3.55).

O equipamento mencionado permite atingir a *temperatura de Curie* em apenas 4 segundos, no entanto, e para não correr o risco de a ultrapassar, os parâmetros são previamente regulados em função da espessura da chapa.

Algumas vantagens da utilização deste equipamento são a inexistência de ruídos, não são libertadas grandes quantidades de fumos nem gases tóxicos, reduz os tempos de desempenho em cerca de 80%, em comparação com os métodos convencionais [37].



Figura 3.55 - Equipamento *EFD Induction* de desempenho por indução [37]

3.9 Construção estrutural de um navio

Genericamente, as principais zonas e formas de orientação/localização num navio são identificadas da seguinte forma: a parte da frente do navio é designada por proa e a traseira por popa; estando posicionado no navio, virado para a proa, o lado esquerdo é denominado bombordo e o lado direito estibordo; estando na proa em deslocação no sentido da popa, diz-se ir para a ré, sendo que no sentido contrário é ir para vante; a linha central é a meia nau. Outras zonas que fazem parte do navio que serve de referência neste trabalho são: casa da máquina (onde se encontram diversos equipamentos importantes, tais como os motores principais do navio, quadros elétricos, bombas, compressores, entre outros), hélices para propulsão/tração, os lemes para controlo da direção, impulsores de proa através de propulsão transversal para manobras, o bolbo para redução da onda de proa e criar a sua própria onda (diminuindo o efeito de arrasto da onda do casco), a ponte de comando (zona com equipamentos para controlo da navegação por parte do comandante do navio), mastro de sinais (para sinalização náutica, através de auxílios de radar, sonoros, visuais, entre outros), convés (zona do topo do navio que fecha o casco e se encontra “ao tempo”), chaminés para evacuação dos gases de escape provenientes da casa da máquina, e o helideck para aterragem de helicópteros (Figura 3.56 e 3.57).

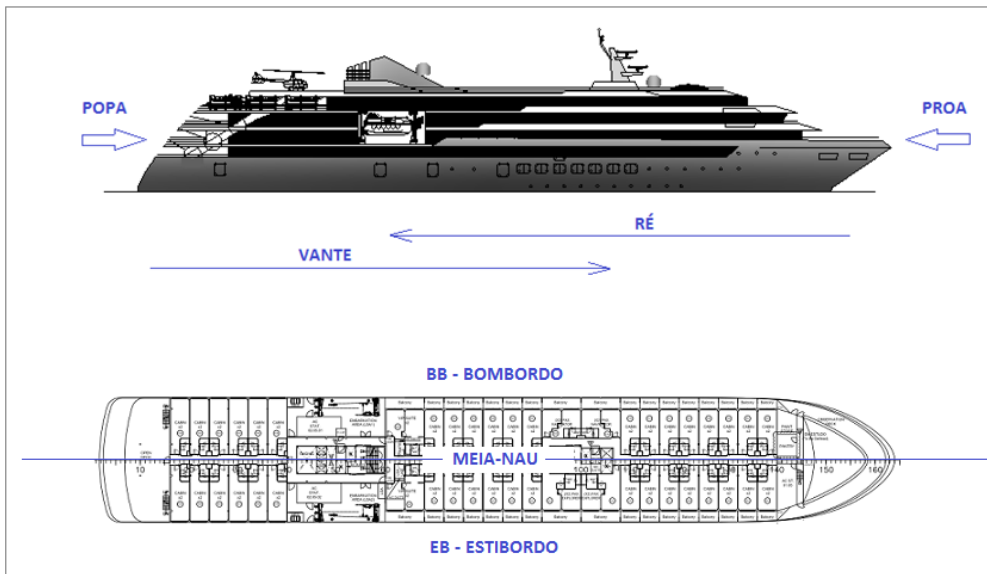


Figura 3.56 - Identificação das principais zonas de um navio (Navio da categoria Polar, construído na West-sea)

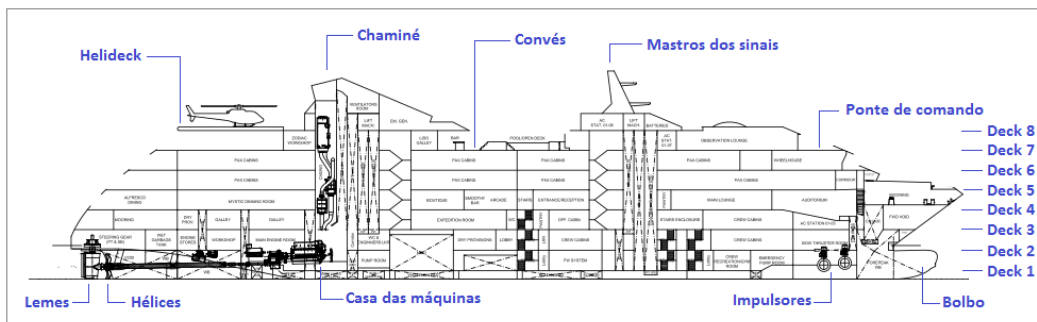


Figura 3.57 - Identificação das principais zonas de um navio (Navio da categoria Polar, construído na West-sea)

Em termos estruturais, a construção de um navio segue normalmente a seguinte sequência e etapas:

3.9.1 Fase de estudo, design e projeto

São elaborados o design e o dimensionamento do navio mediante as solicitações do cliente. É feita a seleção dos tipos de materiais a aplicar e elaborado o projeto para execução.

3.9.2 Desenhos de peças e criação de CNC's para corte das mesmas

De modo a otimizar o trabalho, reduzir os desperdícios e perdas de tempo, assim como minimizar a entrega térmica e empenos das peças cortadas, e consequentemente evitar problemas de carácter dimensional, é comum recorrer a algumas técnicas básicas de corte, tais como:

- As peças são desenhadas em 3D, em programas paramétricos, tais como *Nupas/Cadmatic*;
- Num módulo próprio as peças planificadas são exportadas e através de uma aplicação designada por *ficha gama*, (utilizado na empresa West-sea) são organizadas por espessuras e quantidades para posteriormente serem importadas para o programa *Lantek*, onde são feitos os CNC para corte por espessura (Figura 3.58);

REGISTO DE AUTOCONTROLO				NESTING				
Duração	01	Caraterísticas a controlar	03	Colaborador				
H: Início	H: Fim	Tpo de apodimensões	X		Ref	C19-07-707C14 Qtd: 1		
D: Início	D: Fim	Registrar nº sobre	Y		Trabalho	C020 PFI091-JOB000769		
H: Início	H: Fim	02 Marca de Laminagem	Xm	Responsável	CNC	2000C187	3692 x 2500 x7	
D: Início	D: Fim	PN	Ym		D:14/07/2021 H:11:06:36.00			
Códigos Paragem			ch RT					
Avaria Máquina	HN							
Subs. Consumível								
Máquina	Plasma		Peso	315.453 kg				
Material	GR-A		X	3553.3				
Tempo total	00:30:31.34		Y	2475.2				
Aproveitamento (%)	66.136		Restante (%)	69.097 95.715				
#	Referência	Workflow	Parque	Chapa	Total	Faltam	Peso	Dimensões
80	20-509-7910006-2	C20-509-A12		1	4	0	4.314	785.086 x 100
62	20-509-7910004-40	C20-509-A12		2	2	0	3.657	833.039 x 80
56	20-509-7910004-28	C20-509-A12		2	2	0	4.549	854.61 x 99.996

Figura 3.58 - Exemplo de um CNC para corte de peças através de corte por arco plasma (Fonte: West-sea)

- Os CNC podem ser utilizados tanto pelas máquinas de corte por arco plasma como pelas de oxicorte. Na elaboração de um CNC, as peças desenhadas são dispostas de maneira a maximizar o aproveitamento da chapa a ser cortada, minimizando os desperdícios;
- De modo a verificar as sequências de corte e eventuais erros recorre-se ao programa *CNC Tools*, permitindo também a escolha da máquina a ser utilizada;

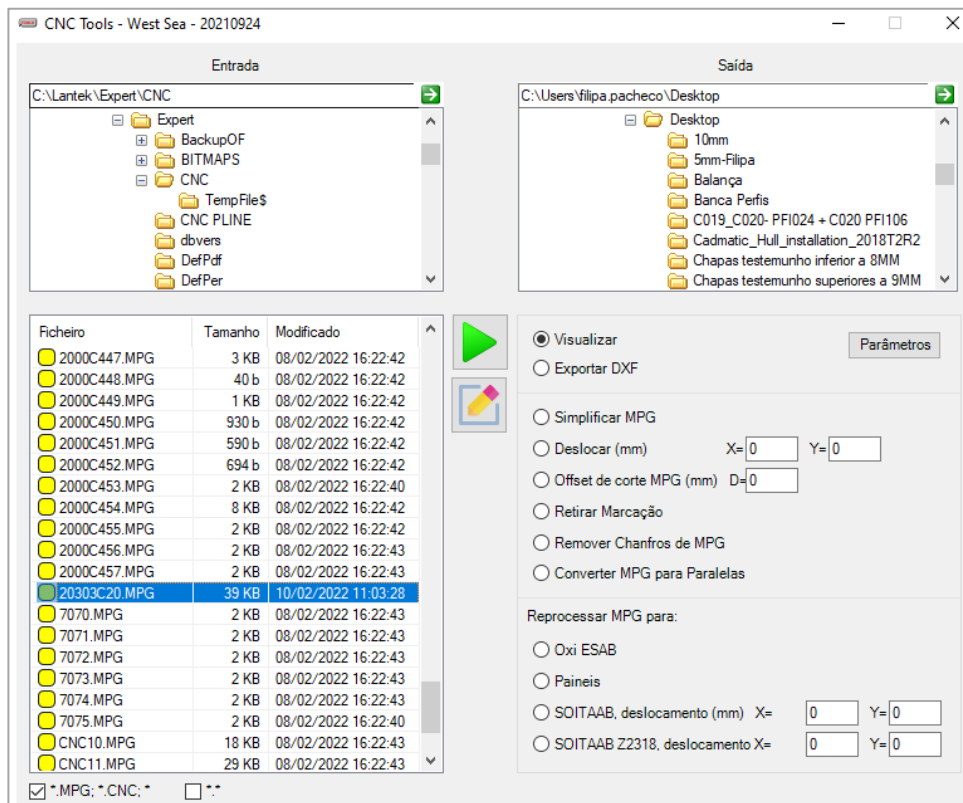


Figura 3.59 - Programa CNC Tools (Fonte: West-sea)



Figura 3.60 - Marcação de chapas e abertura de chanfros (Fonte: West-sea)

- No processo de corte, inicialmente a máquina faz uma passagem para fazer as marcações aleatoriamente, através da queima superficial da chapa. Essas marcações servirão como referência para ângulos de quinagem, curvaturas de calandragem e pontos de união na montagem (Figura 3.60);
- O corte é iniciado por um dos cantos da chapa principal, seguindo uma sequência. Os espaçamentos entre peças é variável, sendo que para peças com espessuras de 4 a 8 mm o espaçamento é de 10 mm, e para espessuras superiores ronda os 20 mm;
- As peças cortadas poderão ser obtidas com ou sem chanfro, mediante o tipo de aplicação das mesmas;
- No processo de corte, de modo a minimizar as deformações das peças, para além de iniciar o corte num dos cantos da chapa principal e seguir as sequências adequadas, são deixadas “amarrações” em zonas específicas a seguir mencionadas (Figura 3.61);

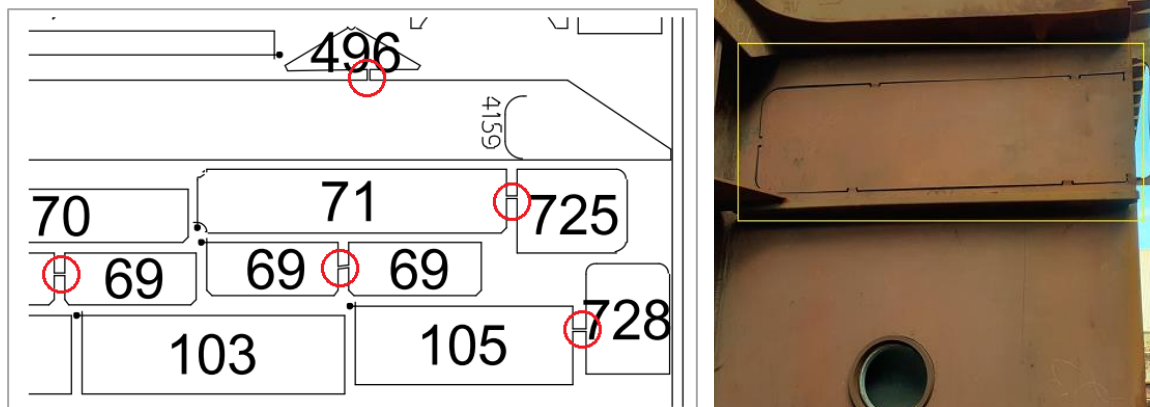


Figura 3.61 - Exemplo de amarrações entre peças (Fonte: West-sea)

- Por fim, as amarrações são cortadas e as peças ficam livres, sendo encaminhadas para os processos construtivos. Caso sobre uma chapa com dimensões que permita futuramente produzir mais peças, é armazenada em local próprio e devidamente codificada/numerada, para ser reutilizada. Algumas amarrações e chapas temporárias, são mantidas a preencher as aberturas nos painéis e anteparas, até à fase de montagem. Posteriormente são removidas, de modo a minimizar as deformações causadas pelas aberturas.

3.9.3 Corte de chapas e perfis

Os dois principais processos de corte utilizados são o oxicorte (Figura 3.62) e o arco plasma (Figura 3.63). As máquinas utilizam os CNCs anteriormente referidos, de modo a cortar as peças a partir de uma chapa inteira ou de alguma sobra anteriormente considerada para esse efeito.

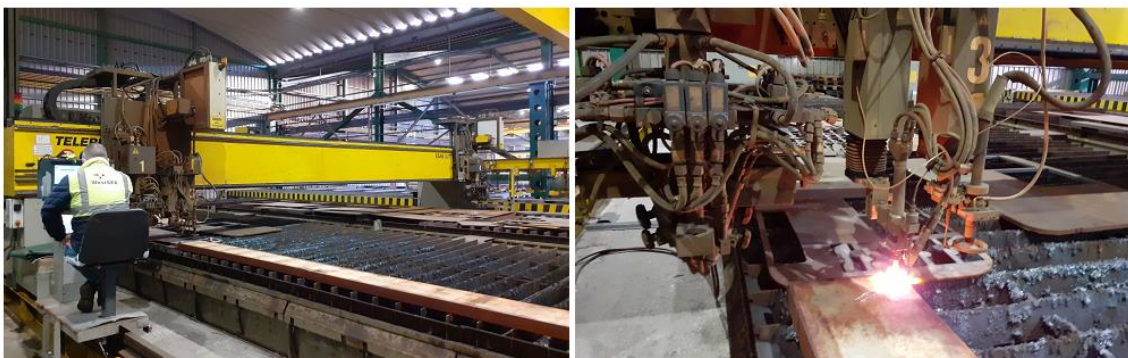


Figura 3.62 - Corte de chapas através de oxicorte (Fonte: West-sea)

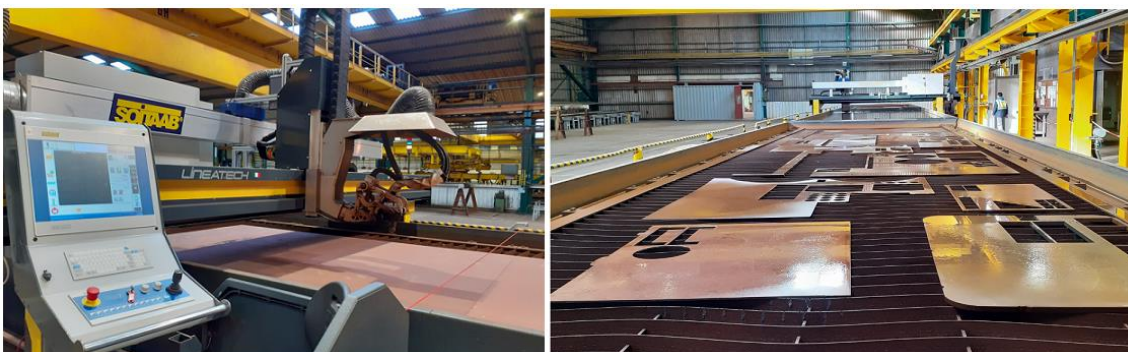


Figura 3.63 - Corte de chapas através de arco plasma (Fonte: West-sea)

3.9.4 Enformação de chapas e perfis

Parte das chapas e perfis cortados, necessitam ser enformados a frio através de calandras e prensas (Figura 3.65). Qualquer rebarba presente nas chapas, proveniente do corte, deve ser removida antes da enformação de modo a não danificarem os rolos da calandra. A chapa é introduzida e o rolo superior desce até entrar em contacto com a chapa, e através do movimento (num e outro sentido) dos rolos inferiores, e após várias passagens, a chapa vai encurvando até atingir a curvatura desejada (Figura 3.64).



Figura 3.64 - Chapas enformadas através de calandra de 750 Ton (Fonte: West-sea)

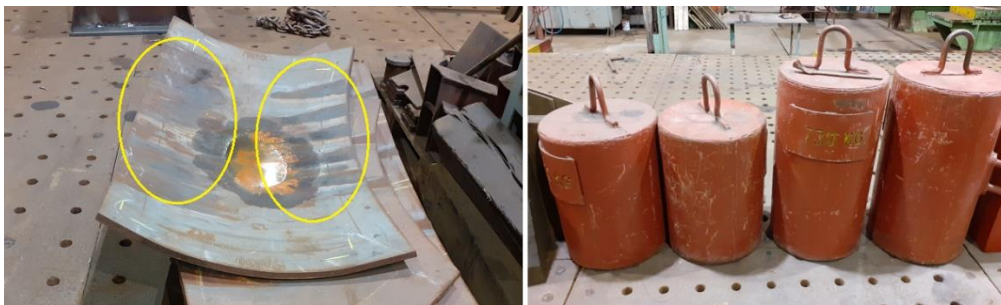


Figura 3.65 - Chapas enformadas a quente e pesos auxiliares (Fonte: West-sea)

3.9.5 Fabrico de blocos

Um bloco é uma parte do navio, formada essencialmente por chapas e reforços estruturais. O conjunto global de todos os blocos forma a estrutura do navio. Na figura 3.66 está representado como exemplo, o bloco do heliponto (Helideck) para operações de aterragem e descolagem de helicópteros.

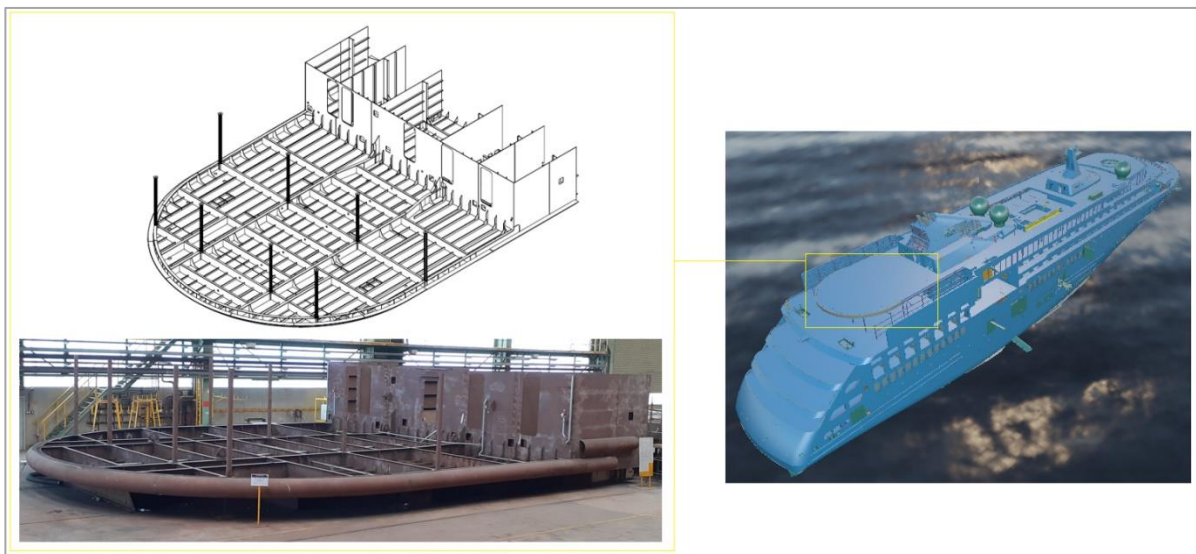


Figura 3.66 - Bloco 602 – Helideck (Fonte: West-sea)

Antes de iniciar o fabrico de um bloco é necessário analisar os desenhos, definir a estratégia de montagem e considerar as normas de segurança a respeitar. Grande parte dos blocos são fabricados na posição invertida, sendo posteriormente rodados 180° para a posição final. A posição invertida permite executar uma boa parte das soldaduras, na posição “ao baixo”, podendo, portanto, serem feitas com menor grau de dificuldade. Após a rotação do bloco para a posição final, essas soldaduras encontrar-se-ão “ao teto”, mas já executadas [38].

A estratégia de montagem deverá ter em conta os seguintes aspetos:

- Permitir a montagem de peças, nomeadamente nas zonas de difícil acesso onde nem sempre é possível utilizar meios de elevação;
- Facilitar a execução das soldaduras, reduzindo ao máximo o grau de dificuldade, considerando as posições e sequências de soldadura a seguir [38].

Tomando como exemplo a construção de um bloco do duplo fundo, que é essencialmente feita através de chapas e perfis de diversas espessuras. Inicialmente é necessário unir chapas através de soldadura para formar o painel do duplo fundo, de modo a obter uma chapa principal, sobre a qual são soldados os perfis em ferro bolbo, designados por longarinas.

Nesta fase é utilizado o processo de soldadura SAW e o trabalho é normalmente executado na *linha de painéis*.

Existem blocos que são construídos na posição normal e outros na posição invertida. Considerando como exemplo um bloco de fundo, construído na posição normal, a sequência de montagem resumida dos principais elementos é a seguinte:

- Colocação de chapas na linha de painéis para formar o painel do fundo;
- União de chapas topo a topo, através de pingos de soldadura;
- Soldadura das uniões no pórtico através do processo de soldadura SAW mecanizado;
- Deslocação da chapa final no pórtico e pingar as longarinas de forma intercalada (Figura 3.67 e Figura 3.68);

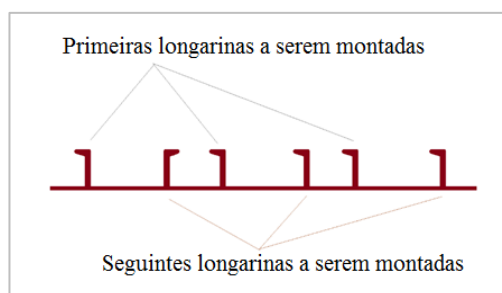


Figura 3.67 - Sequências de montagem de longarinas, através de pingos de soldadura (Fonte: West-sea)

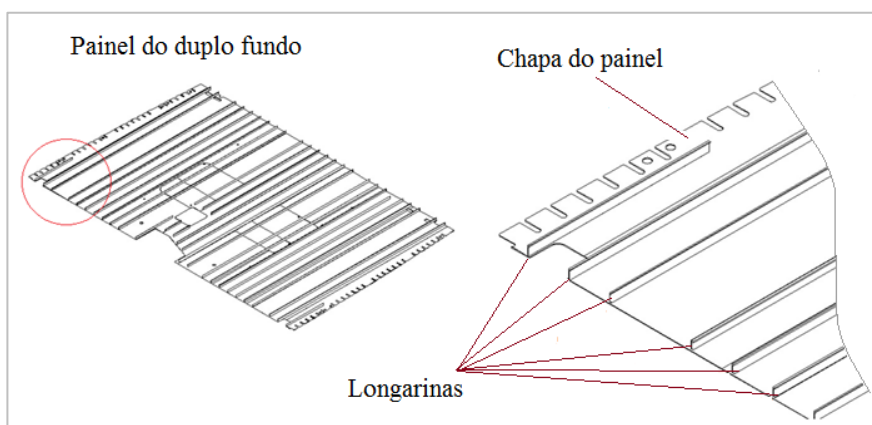


Figura 3.68 - Painel de duplo fundo (Fonte: West-sea)



Figura 3.69 - Perfis estruturais ferros bolbo (à esquerda) e painel com longarinas pingadas (à direita) (Fonte: West-sea)

- Soldadura das longarinas à chapa principal (Figura 3.69);
- Transporte do painel para o local de montagem e sua colocação em sítio plano;
- Executar o mesmo procedimento formando o painel do duplo fundo que fechará o bloco;
- Fabrico e montagem de pequenos conjuntos (formados por chapas e perfis) quando aplicável (Figura 3.73);
- Montagem de cavernas e carlingas (previamente cortadas) sobre o painel do fundo (Figura 3.70);
- Executar todas as soldaduras possíveis nas posições existentes (Figura 3.74);
- Aprovação do bloco “em aberto” e fecho do mesmo com o painel do duplo fundo (Figura 3.71);
- Conclusão das soldaduras [38].

A montagem das longarinas (através de pingos de soldadura) deve ser intercalada, de modo a manter o painel o mais direito possível. Caso contrário, o painel deformaria significativamente.

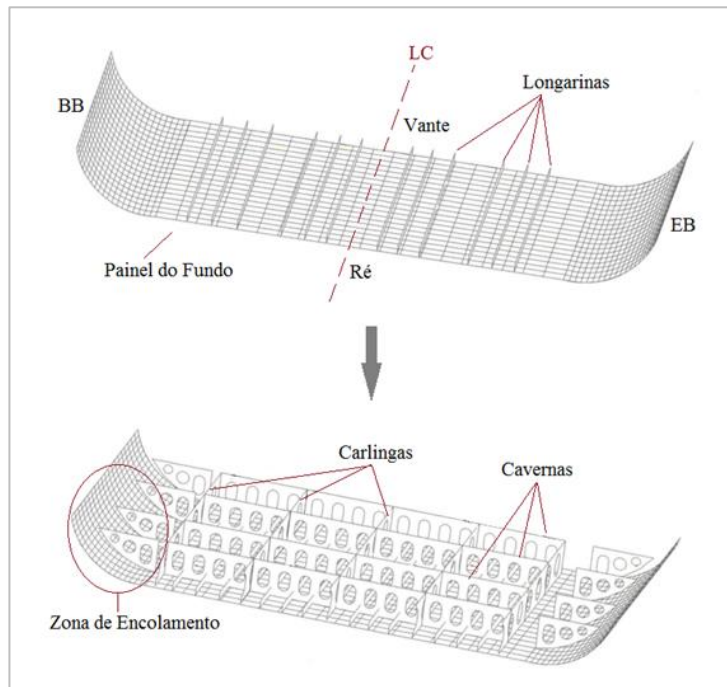


Figura 3.70 - Ilustração da montagem de diversos elementos do bloco [38]

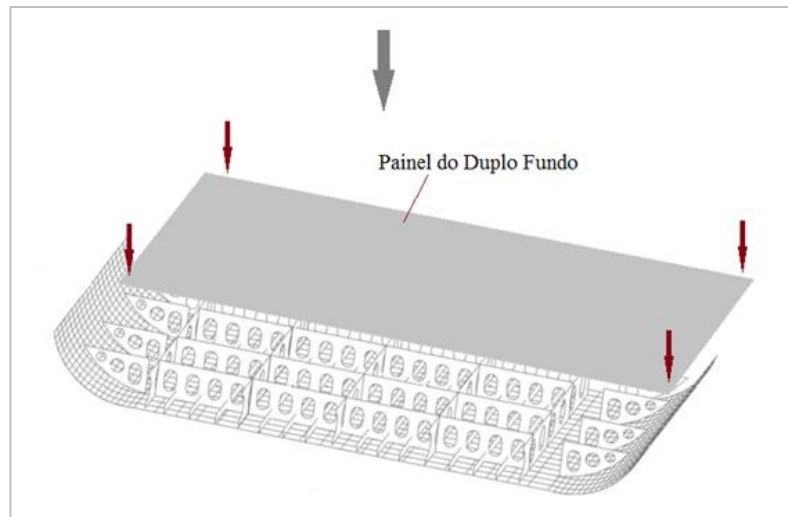


Figura 3.71 - Fecho do bloco com o painel do duplo fundo [38]

No caso de um bloco construído na posição invertida (aplica-se à maior parte dos blocos), o painel do duplo fundo serve como base para receber as cavernas, carlingas e outros elementos. Note-se que nesta fase, devem ser feitas todas as soldaduras possíveis, uma vez que o bloco será rodado 180° para a posição final e essas juntas de soldadura ficarão posteriormente na posição “ao teto” (maior grau de dificuldade para soldar).

O bloco é posteriormente rodado para a posição final. O painel do fundo fica, portanto, na posição “ao baixo”, facilitando a execução das soldaduras (Figura 3.72 e Figura 3.75).

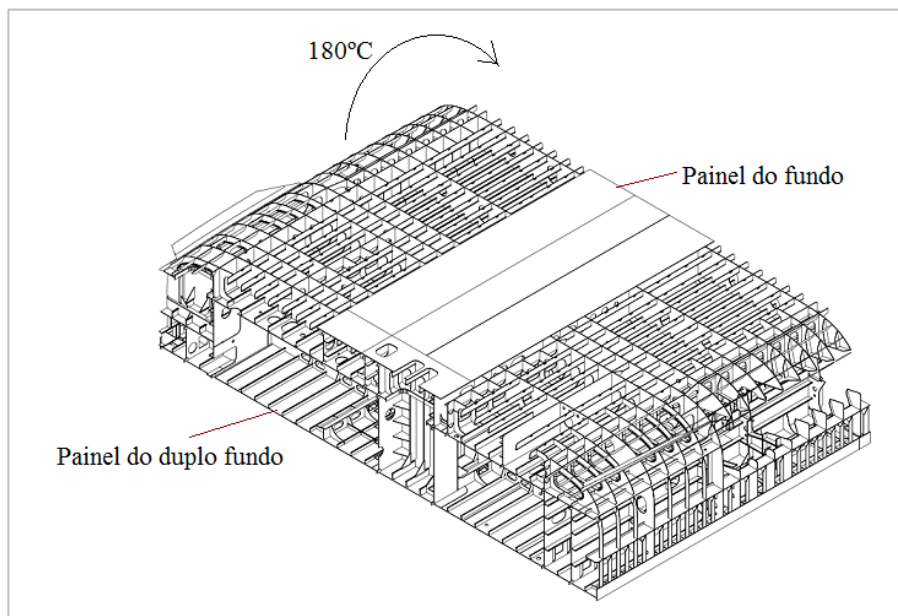


Figura 3.72 - Bloco construído na posição invertida [38]



Figura 3.73 - Formação de pequenos conjuntos (Fonte: West-sea)



Figura 3.74 - Execução de soldaduras ao baixo (Fonte: West-sea)



Figura 3.75 - Rotação de um bloco (Fonte: West-sea)

3.9.6 Ligação de blocos em doca

À medida que os blocos vão sendo fabricados e aprovados, seguem uma sequência de montagem na doca seca (Figura 3.76). Primeiro são instalados os blocos do fundo (do centro do navio para as extremidades (proa e popa)), e posteriormente os blocos superiores (Figura 3.77). As uniões são feitas através de processos de soldadura.

À medida que os blocos vão sendo instalados, o navio vai adquirindo a forma com a constituição do casco e dos diversos pisos (Figura 3.78).

Por questões de rentabilidade produtiva, cada bloco deverá conter a máxima quantidade possível de equipamentos e aprestamentos pré-instalados, nomeadamente os de maiores dimensões, de modo a evitar posteriores aberturas através de processos de corte, para entrada desses mesmos equipamentos.

Obviamente que em alguns casos específicos, o peso do bloco aumenta consideravelmente e devem ter-se em consideração todos os fatores de segurança e qualidade inerentes.

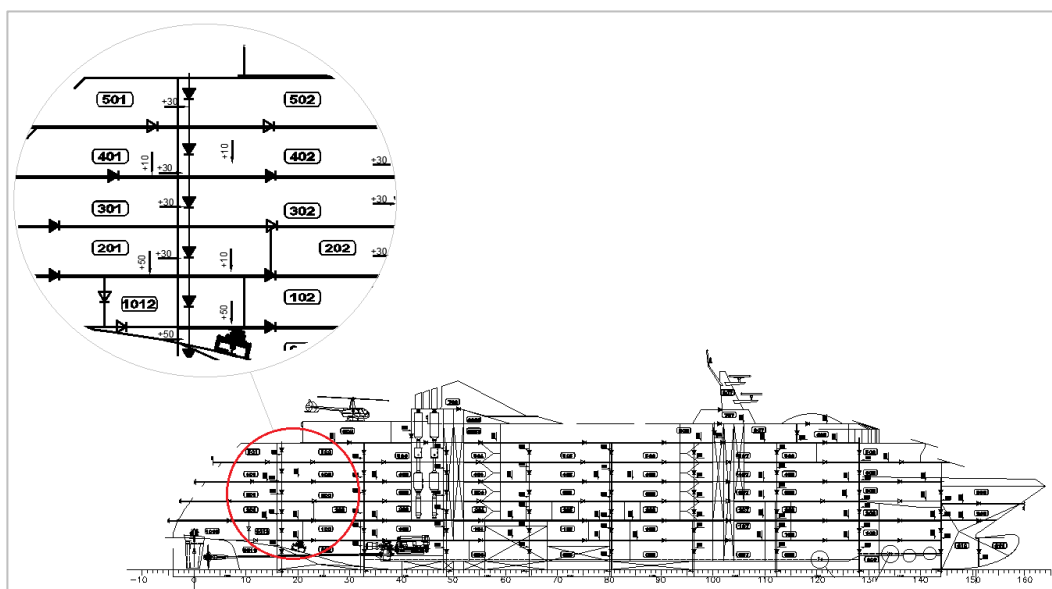


Figura 3.76 - Estratégia de montagem e soldadura de blocos (Fonte: West-sea)



Figura 3.16 - Colocação de bloco (Impulsor) em doca (Fonte: West-sea)

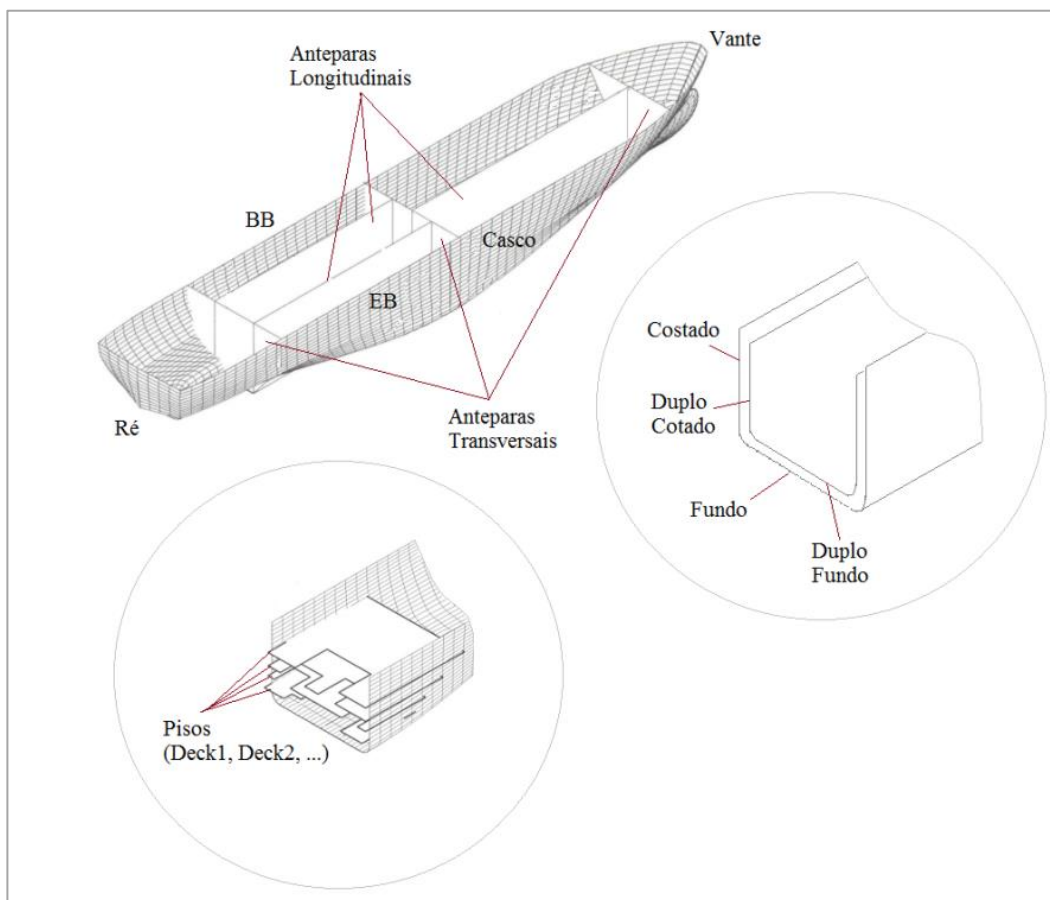


Figura 3.78 - Designação de algumas das principais estruturas que formam um navio [38]

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A empresa West-Sea Lda., pertencente ao Grupo Martifer, dispõe atualmente do *know-how* e capacidade para a construção, reparação e reconversão de navios de porte médio-alto até 37.000 DWT (deadweight tonnage, “toneladas de peso morto”), tais como navios militares de patrulha oceânica - *NPO*, navios de cruzeiro oceânicos e de cruzeiro de rio, entre outros.

Foi considerada como referência para este trabalho, a construção do navio da categoria Polar (World Seeker), construído nas instalações da West-Sea, destinado à empresa de cruzeiros de luxo, Mystic Cruises, que tem o objetivo claro de construir navios mais limpos, seguros e silenciosos neste segmento. Trata-se de um navio com capacidade de transporte de cerca de 200 passageiros e 117 membros de tripulação, equipado com sistema de propulsão Rolls Royce.

A implementação e melhoria de práticas construtivas é um processo contínuo e progressivo que requer a cooperação dos diversos sectores de forma a convergirem para uma estratégia comum. O entendimento e a coesão entre o sector da montagem e o sector da soldadura é imprescindível para a resolução de problemas e garantir um produto de qualidade. Servem como exemplo a preparação das juntas de soldadura, (respeitando a geometria da junta, as folgas recomendadas e o acabamento), pingos de soldadura através do processo adequado e de dimensões aceitáveis, montagem adaptada de modo a facilitar a execução de determinadas soldaduras e evitar posições menos adequadas, com o intuito principal de mitigar os empenos.

As deformações surgem habitualmente nas zonas onde predominam as chapas de baixa espessura e com áreas de menor suporte estrutural através de perfis, assim como nas zonas de maior concentração de quantidade de soldaduras que produzem demasiada entrega térmica numa zona restrita, se as soldaduras forem feitas sem qualquer sequência ou estratégia.

Uma vez que o objetivo deste Relatório de Atividades é demonstrar como reduzir a entrega térmica nas zonas suscetíveis ao surgimento de maiores empenos, consideraram-se como mais críticos o fabrico de painéis (pisos e costados), assim como a soldadura das anteparas e união de blocos.

4.1 Tratamento superficial do aço

Os aços utilizados nos processos de fabrico foram todos certificados e, previamente decapados e tratados superficialmente com um primário anticorrosivo de base epoxídico (base + agente de cura, com relação 2:1 por volume), designado por *Hempel's Shopprimer E 15280*. Isto, principalmente, para proteção nas fases de transporte, armazenamento e construção. A espessura da película seca,

normalmente controlada através de medidores de espessuras nos aços da West-sea, ronda os 20 a 25 micrómetros.

4.2 Consumíveis de soldadura

Os consumíveis de soldadura utilizados nos processos descritos são considerados os mais adequados para as condições de acabamento superficial existentes (presença de *Shopprimer*), garantindo as propriedades mecânicas necessárias e um alto nível de produtividade.

4.3 Formação de painéis

Para fabrico de painéis são normalmente utilizadas chapas de aço estrutural, com dimensões variando de 12x3 m e 12x2,5 m, e espessuras de 5 a 30 mm. Os graus mais utilizados são A, AH36, EH36 e DH36 (em particular para a espessura de 30 mm).

Estruturalmente são aplicados ferros bolbo (HP) em aço estrutural grau A, com espessuras variando de 6 a 14 mm. Para o bloco em estudo foram considerados chapa grau A de 5 mm de espessura e perfil HP140x7 mm (Tabela 4.1 e Figura 4.1).

Tabela 4.1 - Espessuras por piso, de chapas e perfis aplicados em painéis

Principais elementos constituintes do painel, por piso			
Pisos	Espessura da chapa (mm)	Perfil Estrutural	Espessura do perfil (mm)
1	9	HP200	9
2	6	HP140	7
3	5	HP140	7
4	5	HP120	6
5	6	HP120	6
6	5	HP100	6
7	6	HP100	6

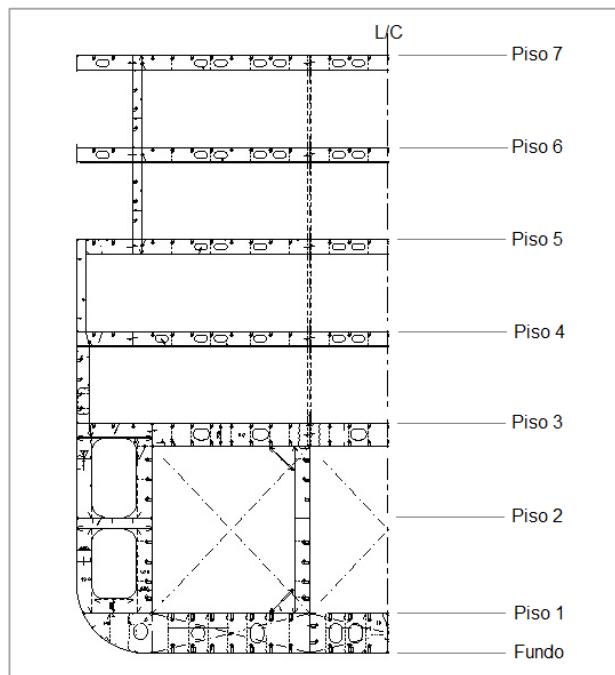


Figura 4.1 - Vista em corte com identificação dos pisos (Fonte: West-sea)

4.4 Ensaio

Foi selecionado um bloco (designado por B106) indicado nas figuras 4.2 e 4.3, com as características ideais para demonstrar as melhores estratégias de montagem e soldadura, que serve de bitola para a maior parte dos restantes blocos.

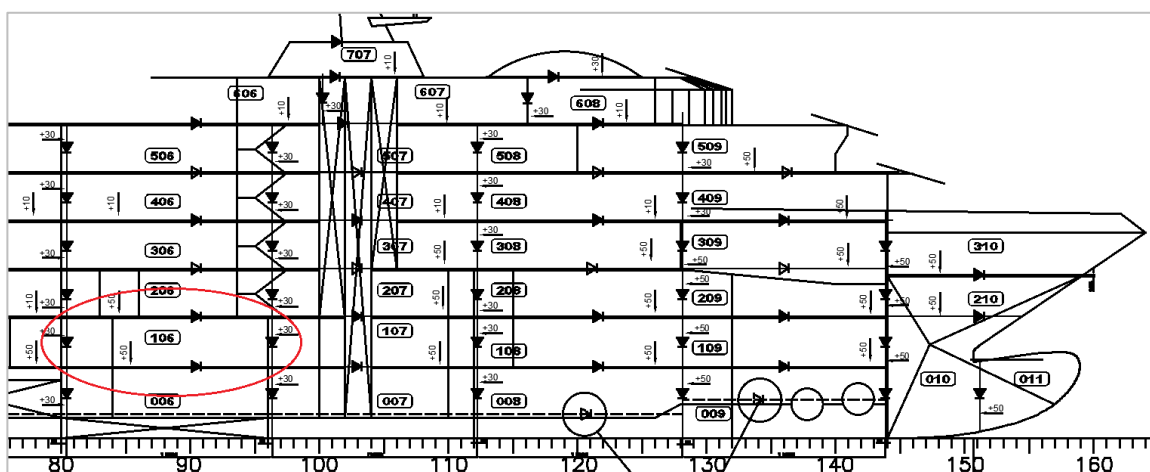


Figura 4.2 - Localização do bloco 106 no navio (Fonte: West-sea)

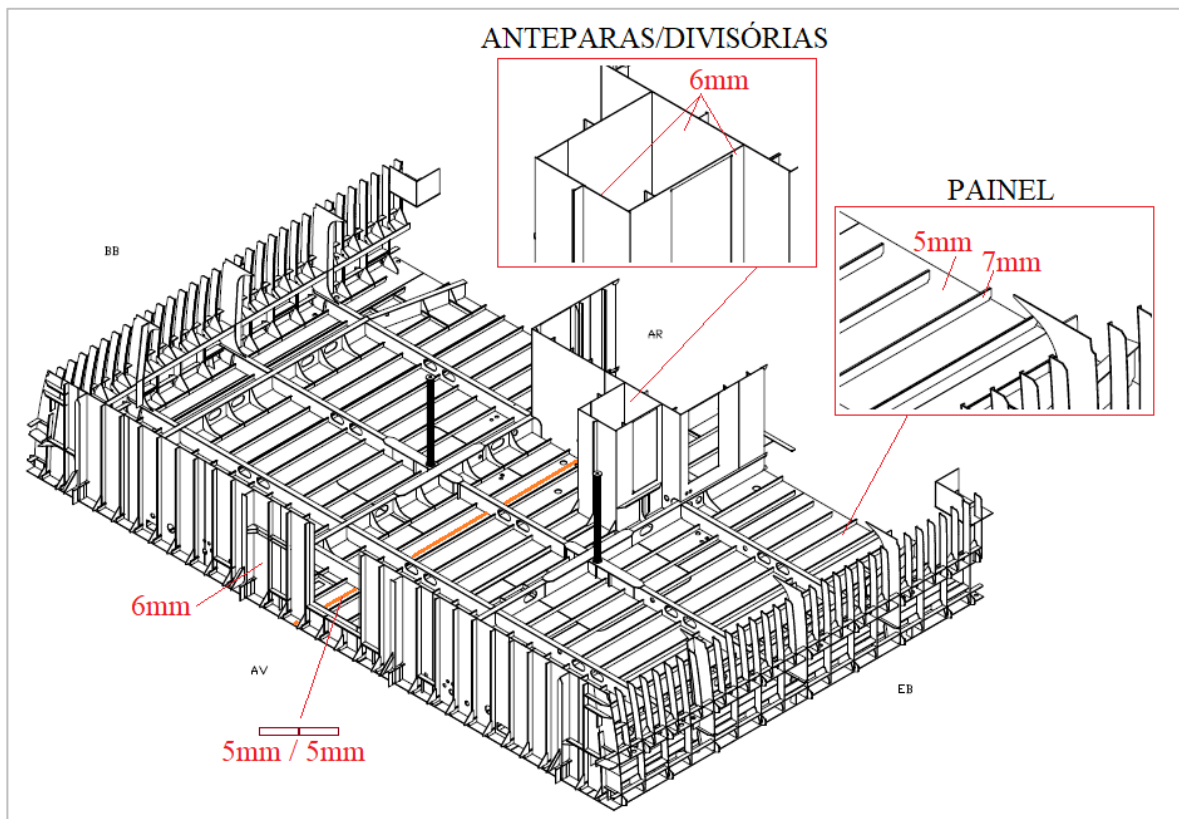


Figura 4.3 - B106 na posição de construção (invertido) e respetivas espessuras

4.4.1 Ensaio nº.1 – Formação de painel (posição PA, chapa com chapa)

As soldaduras de união das chapas para formar o painel principal, foram executadas no pórtico de soldadura mecanizada *SAW.OSW.FCuB* (Figura 4.4).

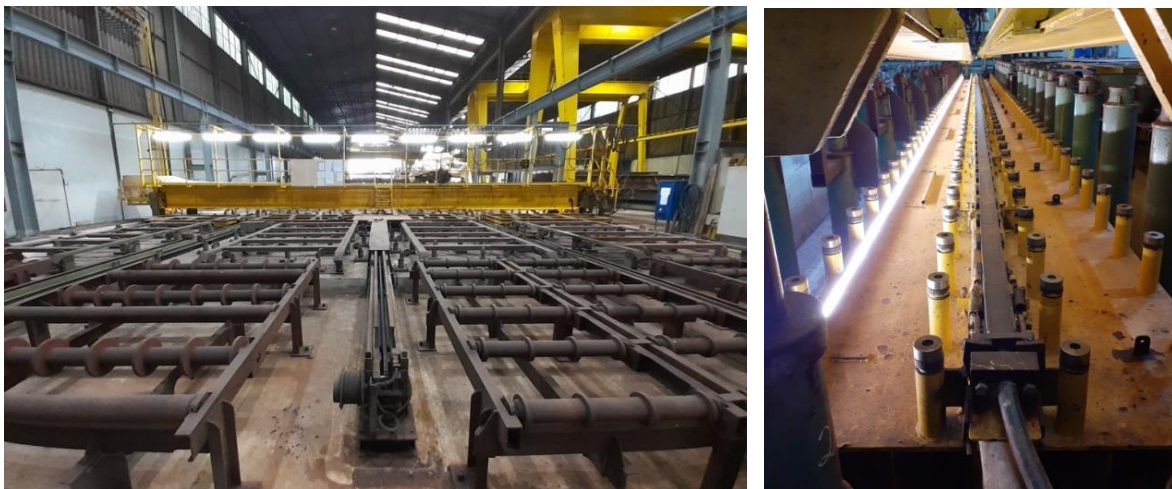


Figura 4.4 - Pórtico de soldadura a arco submerso (*SAW.OSW.FCuB*)

Os equipamentos de soldadura utilizados no pórtico foram um retificador de corrente DC (*ESAB LAE 1.250*) e um transformador de corrente AC (*ESAB TAF 801*).

Como consumível, foi utilizado o fio de soldadura *ESAB OK AUTROD 12.22* com diâmetro de 3 mm. Os fluxos utilizados foram *ESAB OK FLUX 10.71* (para o cordão de soldadura) e *ESAB OK FLUX 10.69* (para a raiz do cordão, colocado entre o cobrejunta de cobre e a parte inferior do painel) devidamente armazenados em estufa, à temperatura recomendada. A utilização de gases de proteção não se aplica, pelo facto de terem sido utilizados fluxos para esse efeito.

No B106 as chapas consideradas foram de 5 mm de espessura, aço grau A. Foi feita uma simulação real da união de chapas de formação de painéis através de ensaios de soldadura em dois provetes. As chapas para os ensaios foram cortadas através do processo de corte por arco plasma sob água, com dimensões de 2.000x400x5 mm, de modo a garantir cortes precisos e limpos, sem provocar deformações nas mesmas.

Foram fabricados dois provetes P.1 e P.2, deixando as juntas de soldadura devidamente livres de impurezas, gorduras ou oxidação. Os pingos foram executados com comprimentos curtos e espessuras não superiores a 3 mm. As juntas de soldadura utilizadas foram topo a topo, de bordos retos, sem folga, pelo facto de as chapas possuírem baixa espessura (Figura 4.5).

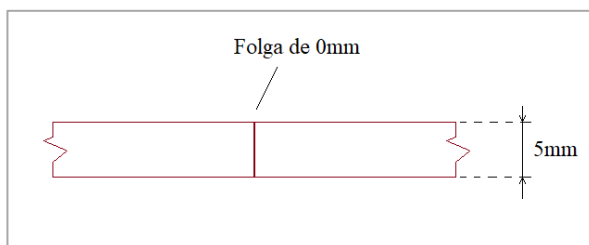


Figura 4.5 - Junta de soldadura topo a topo sem folga (Fonte: West-sea)

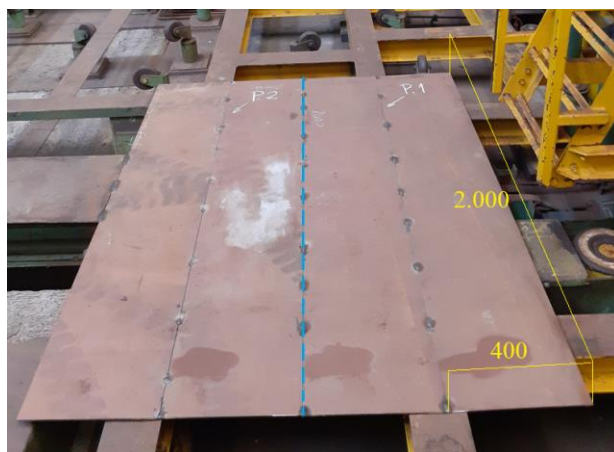


Figura 4.6 - Provetes P.1 e P.2

O provete P.1 foi temporariamente pingado ao provete P.2, de modo a facilitar o processo de deslocamento/arrastamento das chapas no pórtico até à zona de soldadura (Figura 4.6).

Também foram pingadas “chapas de arranque” nas extremidades das juntas de soldadura de cada provete (Figura 4.7), de modo a iniciar a soldadura nessas chapas (Figura 4.8), sendo que na fase de arranque da soldadura, os parâmetros de tensão e corrente são instáveis, provocando defeitos de soldadura. À medida que a soldadura percorreu as chapas de arranque em direção às chapas do provete (com valores de corrente a rondar 510A, e voltagem de 31V), os valores de tensão e corrente estabilizaram, garantindo assim que a soldadura prosseguisse no provete com os parâmetros estabilizados.



Figura 4.7 - Montagem de chapas de arranque

Ambos os provetes foram soldados através do processo de soldadura por arco submerso *SAW.OSW.FCuB* (com um só fio e apenas uma passagem, sobre cobrejunta de cobre) e foram utilizados parâmetros semelhantes, no entanto, com uma diferença no processo de arrefecimento.

O provete P.1 foi soldado através de arrefecimento forçado a ar comprimido, a uma pressão de aproximadamente 1,3 bar (Figura 4.9). Iniciou-se a soldadura e, acompanhando-a no mesmo sentido e no decorrer da sua execução, foi feito um arrefecimento através de sopro a ar comprimido, incidindo sobre o cordão de soldadura. O arrefecimento manteve-se durante a execução da mesma e após a sua finalização, durante o tempo de retorno do *trailing* à posição partida (posição inicial de arranque da soldadura). De seguida, o *trailing* do pórtico de soldadura regressou à posição inicial (deslocamento no sentido contrário ao sentido de execução da soldadura) e durante esse percurso manteve o arrefecimento através de ar comprimido, sem nunca ter sido interrompido (Figura 4.10).

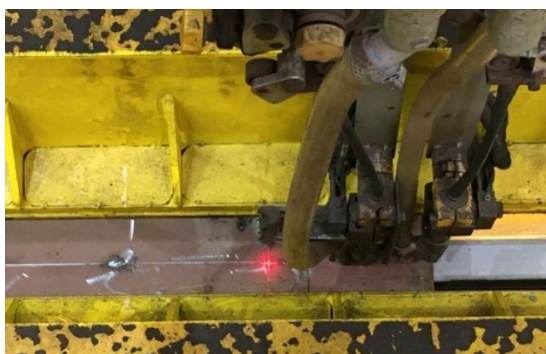


Figura 4.8 - Posicionamento da tocha para dar início à soldadura



Figura 4.9 - Sistema de arrefecimento através de ar comprimido



Figura 4.10 - Sentido da soldadura e posterior retorno do *trailing* à posição inicial

O provete P.1 foi mantido fixo no arrefecimento durante 20 min, através do sistema hidráulico da mesa do pórtico, e libertado após decorrido esse período de tempo.

O provete P.2 foi libertado imediatamente após a soldadura, arrefecendo livremente e de forma natural, sem qualquer fixação ou força a restringir as deformações, até ter atingido a temperatura ambiente.

Em ambos os provetes P.1 e P.2 foram feitas medições de temperatura em dois pontos, A e B, marcados nas chapas dos mesmos, através de um termómetro de infravermelhos (Figura 4.11 e Figura 4.12).



Figura 4.11 - Pontos de medição de temperatura A e B



Figura 4.12 – Termómetro utilizado para obtenção das leituras de temperatura

Descrição do processo de leituras de temperatura nos provetes P.1 e P.2

Provete P.1

Antes de iniciar a soldadura, foi feita a primeira medição de temperaturas no ponto A e no ponto B. Passados 30 segundos após o início da soldadura, foi feita nova leitura nos pontos A e B. As medições continuaram a ser registadas de 30 em 30 segundos durante o processo (desde o início da soldadura no provete, até à sua finalização, e durante o período de retorno do *trailing* até à posição de partida) (Tabela 4.3). Uma última leitura foi feita 30 segundos após esse retorno. Não foi contabilizado o tempo de soldadura nas chapas de arranque.

Após esta fase, fizeram-se leituras de temperatura de 5 em 5 minutos durante um total de 20 minutos de arrefecimento da soldadura do provete. Por fim, o provete foi libertado da mesa hidráulica do pórtico de soldadura.

Provete P.2

Foram seguidos os mesmos passos anteriormente aplicados ao P.1, com duas diferenças. A soldadura do P.2 não foi arrefecida com ar comprimido e o provete foi libertado da fixação da mesa hidráulica do pórtico de soldadura, imediatamente após a soldadura e respetiva recolha do *trailing* à posição de partida. Por fim, após terem sido feitos os registos dos tempos mencionados nas tabelas 4.3 e 4.5, registaram-se também os parâmetros de soldadura (Tabelas 4.2 e 4.4) e obtidas as medições assinaladas nas figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15.

Medições do provete P.1

P.1 - Medição da distorção angular junto da soldadura



Figura 4.13 - Distorção angular (transversal) do P.1

P.1 - Medição da deformação longitudinal por encurvadura no centro da chapa

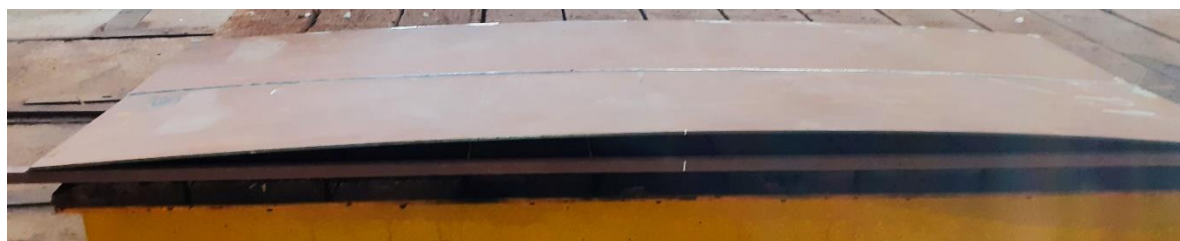


Figura 4.14 - Deformação por encurvadura (longitudinal) do P.1



Figura 4.15 – Valor máximo obtido de encurvadura (longitudinal) no P.1

P.1 - Parâmetros aplicados, entrega térmica e níveis de deformação

As tabelas que se seguem dizem respeito às leituras e valores registados. Na tabela 4.2 encontram-se os valores mínimos e máximos de voltagem e corrente, registados no decorrer das soldaduras. Os tempos de execução das mesmas, registados em minutos. As velocidades médias de soldadura, calculadas a partir da divisão do comprimento do cordão pelo tempo de execução. As entregas térmicas médias, calculadas através dos parâmetros médios obtidos (corrente, voltagem, velocidade e fator de eficiência térmica). Por fim, os valores de deformação angular e encurvadura, medidos através de um paquímetro digital, após o arrefecimento.

Na tabela 4.3 estão assinaladas as leituras de temperatura obtidas antes de iniciar a soldadura (0 segundos), durante a mesma (0 a 180 segundos) e após a sua execução (180 a 1590 segundos).

Tabela 4.2 - Parâmetros de soldadura e resultados obtidos (P.1)

P.1 - Formação de painel (soldadura topo a topo)										
Processo de soldadura: SAW.OSW.FCuB										
Tipo de corrente: AC Polaridade do elétrodo: n/a Proteção gasosa: n/a										
Provete n°	Posição de soldadura	Voltagem (V)		Corrente (A)		Tempo de soldadura (min)	Velocidade de soldadura (mm/min)	Entrega térmica (KJ/mm)	Nível de deformação angular (mm)	Nível de deformação por encurvadura (mm)
		min.	máx.	min.	máx.					
P.1	PA	33.00	33.20	583.00	593.00	3.00	666.67	1.75	3.21	16.62

Tabela 4.3 - Tempos de espera e temperaturas obtidas (P.1)

Recolha de dados referentes ao provete P.1 (com arrefecimento a ar comprimido)			
Tempo (s)	Temperatura (°C)		Notas
	Ponto A	Ponto B	
0	14.8	15.6	Temperatura ambiente
30	16.9	15.1	30 segundos após o início da soldadura
60	19.6	15.0	
90	45.0	15.0	
120	59.4	15.2	
150	138.0	15.3	
180	182.8	60.0	Fase de conclusão da soldadura (3min.)
210	143.0	78.2	30 segundos após início do retorno do trailing
240	128.4	264.0	
270	109.5	221.3	
300	93.0	158.0	
330	89.6	148.1	
360	83.2	122.8	Conclusão do retorno do trailing à posição de partida
390	70.4	121.2	Dado adicional recolhido 30 segundos após retorno do trailing
-----Aguardar 5min-----			
690	33.0	55.3	
-----Aguardar 5min-----			
990	29.0	37.6	
-----Aguardar 5min-----			
1290	24.5	29.7	
-----Aguardar 5min-----			
1590	21.9	25.3	

Medições do provete P.2

P.2 - Medição da distorção angular junto da soldadura



Figura 4.16 - Deformação angular (transversal) do P.2

P.2 - Medição da deformação por encurvadura no centro da chapa (na longitudinal)



Figura 4.17 - Deformação por encurvadura (longitudinal) do P.2

P.2 - Parâmetros aplicados, entrega térmica e níveis de deformação

As tabelas que se seguem dizem respeito às leituras e valores registrados. Na tabela 4.4 encontram-se os valores mínimos e máximos de voltagem e corrente, registrados no decorrer das soldaduras. Os tempos de execução das mesmas, registrados em minutos. As velocidades médias de soldadura, calculadas a partir da divisão do comprimento do cordão pelo tempo de execução. As entregas térmicas médias, calculadas através dos parâmetros médios obtidos (corrente, voltagem, velocidade e fator de eficiência térmica). Por fim, os valores de deformação angular e encurvadura, medidos através de um paquímetro digital, após o arrefecimento.

Na tabela 4.5 estão assinaladas as leituras de temperatura obtidas antes de iniciar a soldadura (0 segundos), durante a mesma (0 a 180 segundos) e após a sua execução (180 a 1590 segundos).

Tabela 4.4 - Parâmetros de soldadura e resultados obtidos (P.2)

P.2 - Formação de painel (soldadura topo a topo)										
Processo de soldadura: SAW.OSW.FCuB										
Tipo de corrente: AC Polaridade do eletrodo: n/a Proteção gasosa: n/a										
Provete n°	Posição de soldadura	Voltagem (V)		Corrente (A)		Tempo de soldadura (min)	Velocidade de soldadura (mm/min)	Entrega térmica (KJ/mm)	Nível de deformação angular (mm)	Nível de deformação por encurvadura (mm)
		min.	máx.	min.	máx.					
P.2	PA	32.70	33.10	577.00	595.00	3.00	666.67	1.74	9.56	28.01

Tabela 4.5 - Tempos de espera e temperaturas recolhidas (P.2)

Recolha de dados referentes ao provete P.2 (sem arrefecimento a ar comprimido)			
Tempo (s)	Temperatura (°C)		Notas
	Ponto A	Ponto B	
0	15.1	17.2	Temperatura ambiente
30	17.7	17.3	30 segundos após o início da soldadura
60	24.4	16.9	
90	73.1	17.3	
120	68.2	17.4	
150	170.0	21.6	
180	185.0	24.0	Fase de conclusão da soldadura (3min.)
210	177.5	42.4	30 segundos após início do retorno do trailing
240	137.5	55.6	
270	114.5	180.9	
300	93.0	172.0	
330	88.9	152.6	
360	84.5	132.1	Conclusão do retorno do trailing à posição de partida
390	72.1	129.8	Dado adicional recolhido 30 segundos após retorno do trailing
-----Aguardar 5min-----			
690	55.0	82.0	
-----Aguardar 5min-----			
990	41.3	67.3	
-----Aguardar 5min-----			
1290	35.5	50.0	
-----Aguardar 5min-----			
1590	31.1	44.2	

4.4.2 Ensaio n.º.2 – Formação de painel (posição PB, chapa com barra)

Foram feitos quatro provetes para simulação real da união de barras/perfis estruturais com as chapas de painel, juntas de canto na posição PB (Figura 4.18).

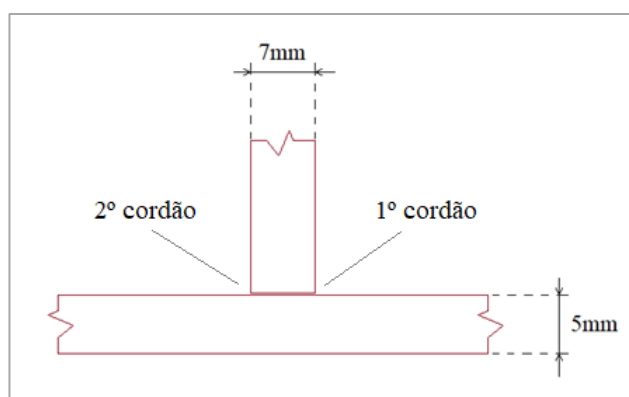


Figura 4.18 - Junta de soldadura de canto (Fonte West-sea)

As chapas e as barras para os provetes foram cortadas através do processo de corte por arco plasma sob água, com dimensões de 1.000x500x5 mm e 1.000x140x7 mm respetivamente.

As juntas foram devidamente limpas, eliminando gorduras e outras impurezas, executaram-se pingos de soldadura não superiores a 3 mm de espessura, já que as gargantas de soldadura executadas posteriormente foram consideradas de espessura superior, cobrindo os pingos na sua totalidade.

Os provetes foram soldados através do processo de soldadura FCAW, sobre diferentes sequências e parâmetros.

Descrição dos processos de soldadura nos provetes P.11, P.12, P.13 e P.14

O provete P.11 foi soldado através do processo de soldadura mecanizada FCAW (trator de soldadura). A soldadura foi executada de forma contínua, em ambos os lados da união da barra com a chapa, tendo sido iniciada e interrompida a cerca de 150 mm das extremidades (troços que ficaram por soldar), de modo a minimizar as deformações (Figuras 4.19, 4.20 e 4.21). Considerou-se que essas soldaduras são normalmente concluídas *a posteriori* na fase da união de blocos, na doca seca.

O provete P.12 foi soldado através do mesmo processo, mas com a diferença de terem sido feitas soldaduras intermitentes (paralelas) em ambos os lados. Optou-se por fazer cordões com aproximadamente 75 mm de comprimento e interrupções da mesma dimensão (Figuras 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25).

O provete P.13 soldou-se através do processo semiautomático FCAW, executando ambos os cordões de forma contínua na sua totalidade, isto é, contrariamente ao provete P.11, não foram deixadas extremidades livres por soldar (Figuras 4.26, 4.27 e 4.28).

O provete P.14 foi soldado através do mesmo processo semiautomático, executando cordões de soldadura intermitentes e desfasados entre o 1º e 2º cordão, ou seja, não foram executados de forma paralela, tal como sucedeu no P.11 (Figuras 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32).

Em todos os provetes, foram contabilizados os tempos de execução de cada cordão, assim como registadas as medições dos parâmetros mínimos e máximos da tensão e intensidade. Posteriormente, e uma vez obtidas as médias desses parâmetros, foram calculadas as velocidades de soldadura, considerando os tempos registados e o deslocamento total de 1000 mm. Foram calculados os valores médios de tensão e intensidade, tendo permitido obter os valores individuais de entrega térmica por cordão e valores médios de entrega térmica total.

Por fim, após todos os provetes terem arrefecido livremente e sem restrições até à temperatura ambiente, foram feitas as medições das distorções angulares observadas, assim como das deformações longitudinais das chapas e barras. As intensidades de correntes utilizadas foram inferiores no processo semiautomático (Tabela 4.6).

O equipamento de soldadura mecanizada utilizado nos provetes P.11 e P.12 foi um carro/trator soldador *Pastoriza Flateld-5B* e fonte de alimentação *ESAB Warrior 400i CC/CV*. O equipamento de soldadura semiautomática utilizado nos provetes P.13 e P.14 foi o alimentador de arame *ESAB Warrior Feed 304* e uma fonte de alimentação *ESAB Warrior 400i CC/CV*.

O consumível de soldadura utilizado nos quatro provetes foi o fio fluxado *Kobelco MX 200E 3Y, 136*. Trata-se de um fio fluxado rutílico de arrefecimento lento de 1.2 mm de diâmetro.

A corrente utilizada foi DC com polaridade positiva no elétrodo consumível e proteção gasosa com 100% de CO₂ (10 a 16 L/min).

Medições do provete P.11

P.11 - Medição da distorção angular

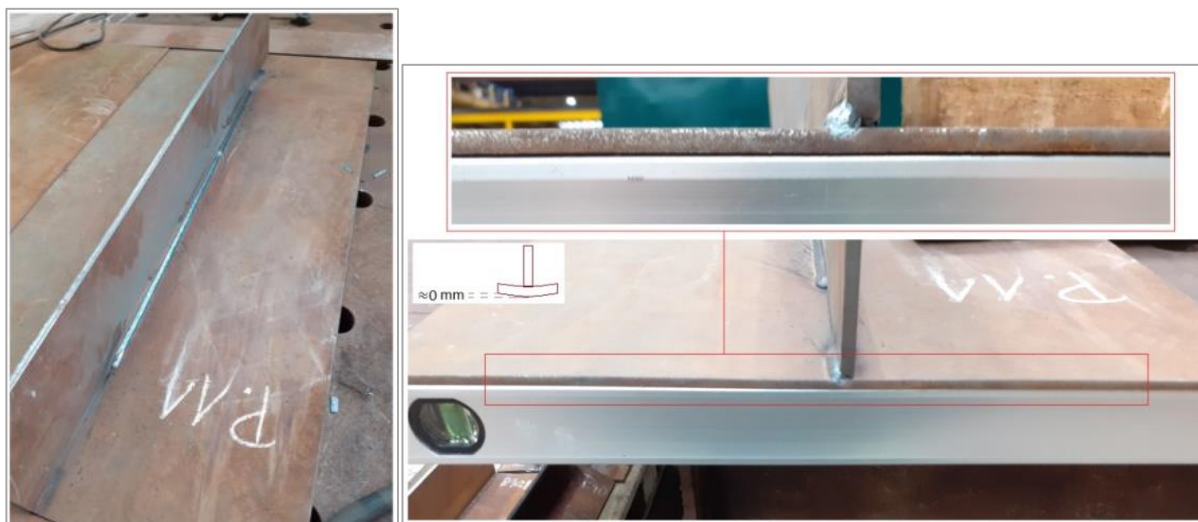


Figura 4.19 - Sem distorção angular (transversal) do P.11

P.11 - Medição da deformação por encurvadura da chapa (na longitudinal)

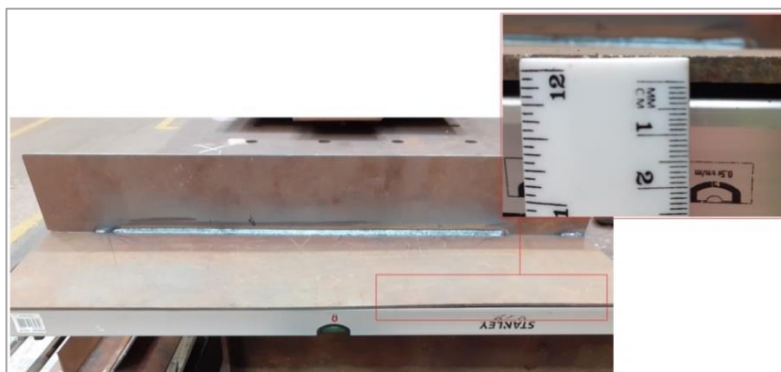


Figura 4.20 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.11

P.11 - Medição da deformação por encurvadura da barra (na longitudinal)



Figura 4.21 - Sem deformação por encurvadura da barra (na longitudinal) do P.11

Medições do provete P.12

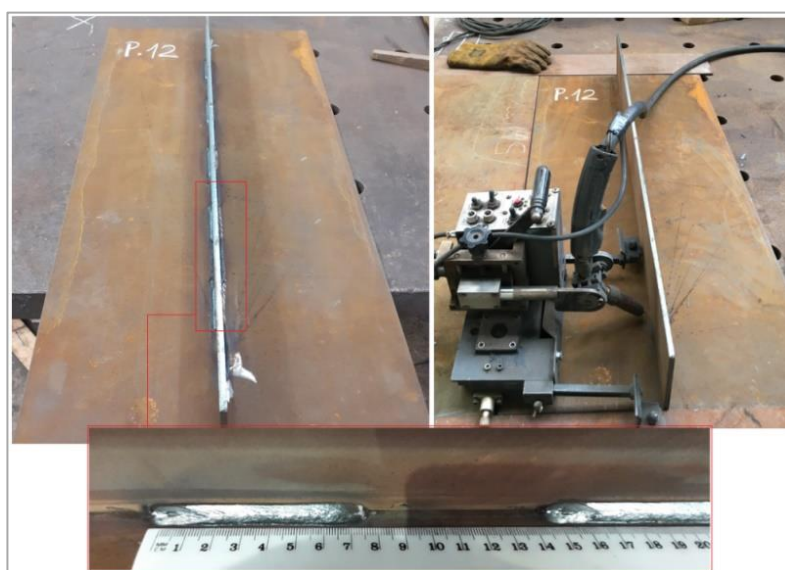


Figura 4.22 - Provete P.12

P.12 - Medição da distorção angular



Figura 4.23 - Distorção angular (transversal) do P.12

P.12 - Medição da deformação por encurvadura da chapa (na longitudinal)



Figura 4.24 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.11

P.12 - Medição da deformação por encurvadura da barra (na longitudinal)



Figura 4.25 - Sem deformação por encurvadura da barra (na longitudinal) do P.12

Medições do provete P.13

P.13 - Medição da distorção angular

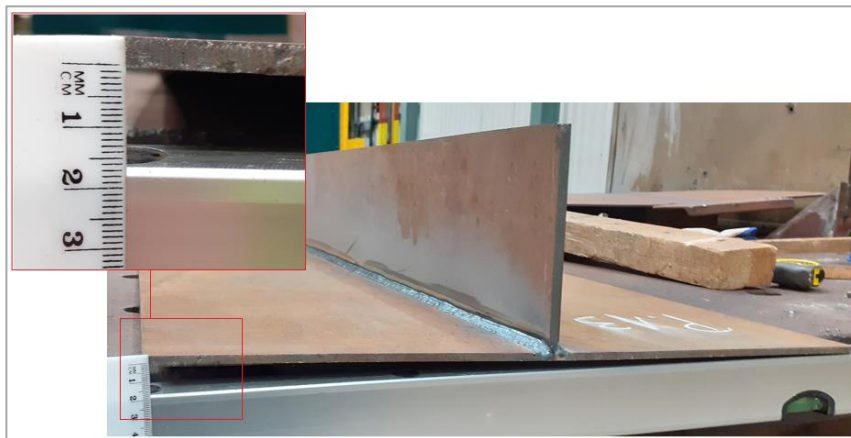


Figura 4.26 - Distorção angular (transversal) do P.13

P.13 - Medição da deformação por encurvadura da chapa (na longitudinal)

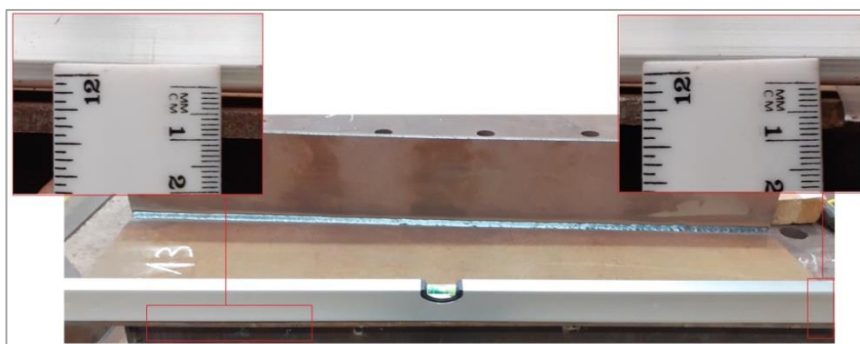


Figura 4.27 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.13

P.13 - Medição da deformação por encurvadura da barra (na longitudinal)



Figura 4.28 - Sem deformação da barra (na longitudinal) do P.13

Medições do provete P.14



Figura 4.29 - Provete P.14

P.14 - Medição da distorção angular



Figura 4.30 - Distorção angular (transversal) do P.14

P.14 - Medição da deformação por encurvadura da chapa (na longitudinal)



Figura 4.31 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.14

P.14 - Medição da deformação por encurvadura da barra (na longitudinal)



Figura 4.32 - Sem deformação por encurvadura da barra (na longitudinal) do P.14

P.11, P.12, P.13 e P.14 - Parâmetros utilizados, entrega térmica e níveis de deformação

A tabela 4.6 diz respeito aos valores mínimos e máximos de voltagem e corrente registrados em cada cordão de soldadura, de cada provete. O tempo de execução representa o tempo medido em minutos, desde o início até ao final de cada cordão de soldadura. A velocidade de soldadura foi calculada dividindo o comprimento do cordão pelo tempo de execução. A entrega térmica de cada cordão foi obtida através dos valores médios de corrente, voltagem e velocidade, e fator de eficiência térmica. A entrega térmica global foi obtida através da média da entrega térmica de cada cordão. Por fim, os valores correspondentes às distorções angulares obtidas, assim como as deformações longitudinais da chapa principal e da barra de reforço.

Tabela 4.6 - Parâmetros utilizados e resultados obtidos (P.11, P.12, P.13 e P.14)

Ensaio nº.2 – Formação de painel (soldadura de canto)													
Processo de soldadura: FCAW mecanizado - tractor soldador (P.15 soldadura contínua; P.16 soldadura intermitente)													
Tipo de corrente: DC Polaridade do elétrodo: ev+ Proteção gasosa:100% CO2 (10-16L/min)													
Provete nº	Posição de soldadura	Cordão	Voltagem (V)		Corrente (A)		Tempo de execução (min)	Velocidade de soldadura (mm/min)	Entrega térmica média por cordão (KJ/mm)	Entrega térmica média total (KJ/mm)	Distorção angular (mm)	Deformação longitudinal da barra (mm)	Deformação longitudinal da chapa (mm)
			min.	máx.	min.	máx.							
P.11	PB	1º	28.00	28.20	268.00	269.00	1.40	600.24	0.60	0.59	0.00	0.00	3.50
		2º	28.20	28.30	253.00	258.00	1.41	594.18	0.58				
P.12	PB	1º	28.20	28.30	245.00	248.00	1.20	750.19	0.45	0.45	3.50	0.00	3.00
		2º	28.20	28.40	246.00	248.00	1.19	759.53	0.44				
Processo de soldadura: FCAW semiautomático (P.13 soldadura contínua; P.14 soldadura intermitente)													
Tipo de corrente: DC Polaridade do elétrodo: ev+ Proteção gasosa:100% CO2 (10-16L/min)													
P.13	PB	1º	28.30	29.00	225.00	227.00	2.20	428.63	0.73	0.73	16.00	0.00	4.00
		2º	28.50	29.00	231.00	233.00	2.16	441.31	0.73				
P.14	PB	1º	28.20	28.30	244.00	255.00	1.60	909.09	0.47	0.48	3.80	0.00	3.00
		2º	28.50	29.10	231.00	242.00	1.30	666.67	0.49				

4.4.3 Ensaio n°.3 – União de anteparas e divisórias (posição PF/PG, chapa com chapa)

Foram fabricados e soldados cinco provetes para simulação real da união de barras/perfis estruturais com as chapas de painel (juntas de canto na posição vertical ascendente/descendente – PF/PG).

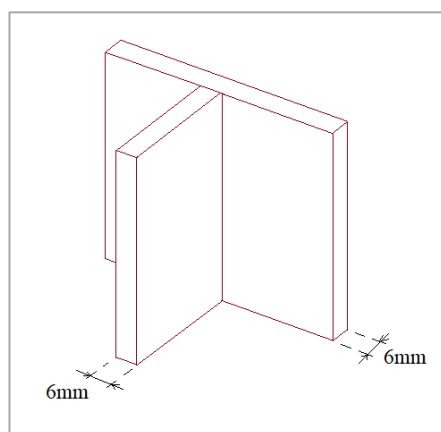


Figura 4.33 - Junta de soldadura de canto (fonte: West-sea)

As chapas e as barras para os ensaios, foram cortadas através do processo de corte por arco plasma sob água, com dimensões de 400x200x6 mm e 400x140x6 mm.

As juntas foram devidamente limpas, removidas impurezas (tais como gorduras, pó, tinta e água) executaram-se pingos de soldadura não superiores a 3 mm de espessura, já que as gargantas de soldadura executadas posteriormente foram consideradas de espessura superior, cobrindo os pingos na sua totalidade.

Os provetes foram soldados através do processo de soldadura semiautomático FCAW, variando parâmetros e sentidos ascendente/descendente.

O equipamento de soldadura semiautomática utilizado foi o alimentador de arame *ESAB Warrior Feed 304* e uma fonte de alimentação *ESAB Warrior 400i CC/CV*.

O fio fluxado consumível utilizado nas soldaduras verticais ascendentes, com polaridade positiva, foi o *Kobelko Familiarc DW50* de 1,2mm de diâmetro. Para execução das soldaduras verticais descendentes foi utilizado o fio fluxado *ESAB Tubrod 14.12*, polaridade negativa.

A corrente utilizada foi DC e a proteção gasosa com 100% de CO₂ (11 a 16 L/min).

Descrição dos processos de soldadura nos provetes P.7, P.8, P.9, P.10 e P10.1

O provete P.7 foi soldado na posição PF (vertical ascendente). Foram executados dois cordões de soldadura contínuos (um cordão de cada lado da junta T). A garganta real de soldadura (a menor distância medida entre a raiz e a face do cordão de soldadura) obtida foi de 4,7mm (Figuras 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38).

O provete P.8 foi soldado nas mesmas condições que o P.7, mas aumentando ligeiramente a intensidade de corrente, aumentando a velocidade de soldadura e reduzindo a garganta real de soldadura para 3,6mm (Figuras 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42).

P.9, identificado nas figuras 4.43, 4.44, 4.45 e 4.46, soldou-se na posição PF, com sequências de cordões de soldadura assinalados na figura 4.34:

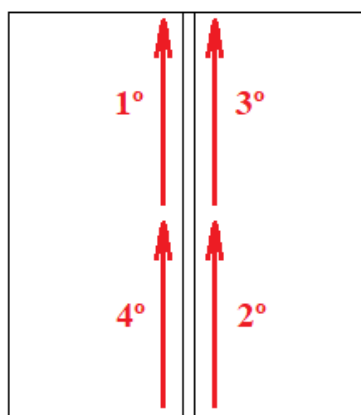


Figura 4.34 - Sequência de cordões de soldadura no P.9 (Fonte: West-sea)

O provete P.10 foi soldado na posição PG (vertical descendente), de forma contínua e num só passe, com um cordão em cada lado da junta de soldadura em T (Figuras 4.47, 4.48 e 4.49). Optou-se por utilizar uma intensidade de corrente mais elevada (média de 235A).

Por fim, o provete P.10.1, também soldado em vertical descendente e de forma contínua, no entanto, reduzindo substancialmente a intensidade de corrente para 152A (valor médio), o que implicou uma redução da velocidade de soldadura (Figuras 4.50, 4.51 e 4.52).

Todos os parâmetros e valores obtidos, referentes ao ensaio nº3, encontram-se resumidos na tabela 4.7.

Medições do provete P.7



Figura 4.35 - Provete P.7

P.7 - Medição da distorção angular



Figura 4.36 - Distorção angular (transversal) do P.7

P.7 - Medição da deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal)



Figura 4.37 - Deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal) do P.7

P.7 - Medição da deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal)



Figura 4.38 - Deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.7

Medições do provete P.8



Figura 4.39 - Provete P.8

P.8 - Medição da distorção angular



Figura 4.40 - Distorção angular (transversal) do P.8

P.8 - Medição da deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal)

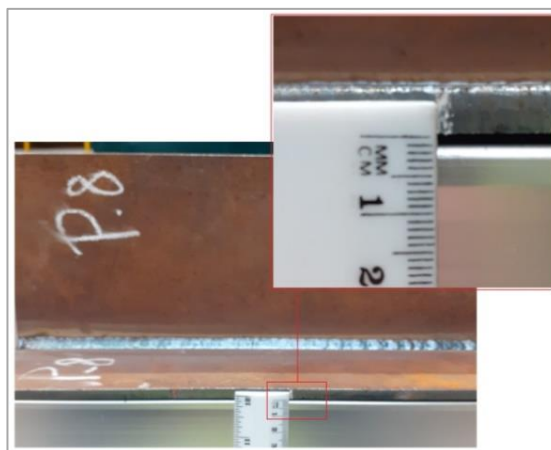


Figura 4.41 - Deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal) do P.8

P.8 - Medição da deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal)



Figura 4.42 - Deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.8

Medições do provete P.9



Figura 4.43 - Provete P.9

P.9 - Medição da distorção angular



Figura 4.44 - Distorção angular (transversal) do P.9

P.9 - Medição da deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal)

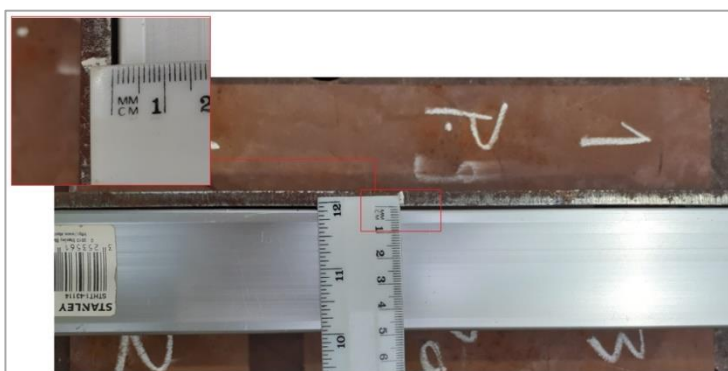


Figura 4.45 - Deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.9

P.9 - Medição da deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal)

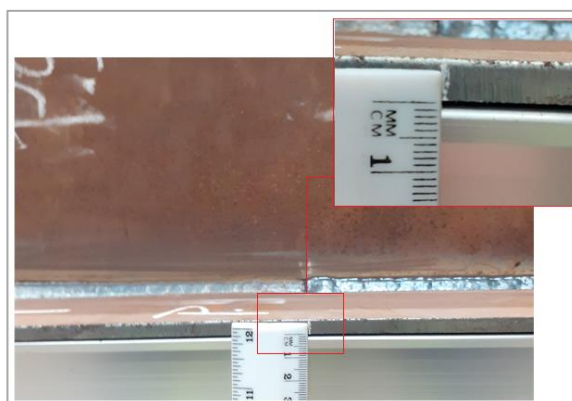


Figura 4.46 - Deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal) do P.9

Medições do provete P.10



Figura 4.47 - Provete P.10

P.10 - Medição da distorção angular



Figura 4.48 - Distorção angular (transversal) do P.10

P.10 - Medição da deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal)

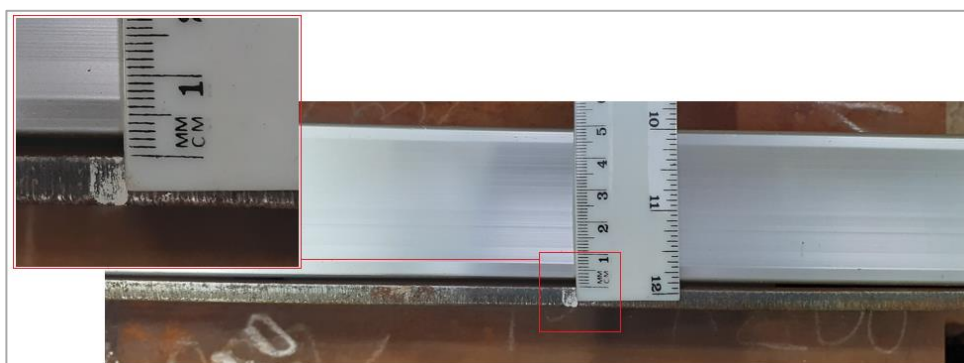


Figura 4.49 - Deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.10

Medições do provete P.10.1

P.10.1 - Medição da distorção angular



Figura 4.50 - Distorção angular (transversal) do P.10.1

P.10.1 - Medição da deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal)



Figura 4.51 - Sem deformação por encurvadura da chapa menor (na longitudinal) do P.10.1

P.10.1 - Medição da deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal)



Figura 4.52 - Sem deformação por encurvadura da chapa principal (na longitudinal) do P.10.1

Parâmetros aplicados, entrega térmica e níveis de deformação (P.7, P.8, P.9, P.10 e P10.1)

A tabela 4.7 diz respeito aos valores mínimos e máximos de tensão e corrente registados em cada cordão de soldadura, de cada provete. O tempo de execução representa o tempo medido em minutos, desde o início até ao final de cada cordão de soldadura. A velocidade de soldadura foi calculada dividindo o comprimento do cordão pelo tempo de execução. A entrega térmica de cada cordão foi obtida através dos valores médios de corrente, voltagem e velocidade, e fator de eficiência térmica. A entrega térmica total foi obtida através da média da entrega térmica de cada cordão. Por fim, os valores correspondentes às distorções angulares obtidas, assim como as deformações longitudinais da chapa principal e da barra.

Tabela 4.7 - Parâmetros de soldadura e resultados obtidos (P.7, P.8, P.9, P.10 e P.10.1)

Ensaio nº.3 – União de anteparas e divisórias (soldadura de canto, chapa com chapa)													
Processo de soldadura: FCAW semiautomático													
Tipo de corrente: DC Polaridade do eletrodo: ev+ Proteção gasosa:100% CO2 (11 -16L/min)													
Provete nº	Posição de soldadura	Cordão	Voltagem (V)		Corrente (A)		Tempo de execução (min)	Velocidade de soldadura (mm/min)	Entrega térmica média por cordão (KJ/mm)	Entrega térmica média total (KJ/mm)	Distorção angular (mm)	Deformação longitudinal da barra (mm)	Deformação longitudinal da chapa (mm)
			min.	máx.	min.	máx.							
P.7	PF	1º	24.20	24.50	172.00	185.00	1.54	259.74	0.80	0.82	0.95	1.00	2.00
		2º	24.20	24.60	171.00	182.00	1.60	250.00	0.83				
P.8	PF	1º	24.20	25.00	182.00	188.00	1.43	279.72	0.78	0.75	1.45	2.50	1.00
		2º	24.20	24.50	167.00	176.00	1.42	281.69	0.71				
P.9	PF	1º	24.20	24.50	175.00	190.00	0.68	292.68	0.73	0.73	1.79	1.00	1.00
		2º	24.00	24.40	177.00	188.00	0.73	273.97	0.77				
		3º	24.20	24.00	175.00	189.00	0.63	315.79	0.67				
		4º	24.20	24.50	176.00	190.00	0.72	277.78	0.77				
Processo de soldadura: FCAW semiautomático													
Tipo de corrente: DC Polaridade do eletrodo: ev- Proteção gasosa:100% CO2 (11 -16L/min)													
P.10	PG	1º	24.00	24.20	230.00	240.00	0.92	436.36	0.62	0.58	3.19	2.00	0.00
		2º	24.00	24.20	227.00	244.00	0.78	510.64	0.53				
P.10.1	PG	1º	19.20	20.50	144.00	153.00	1.29	310.11	0.46	0.47	3.06	0.00	0.00
		2º	20.00	24.20	152.00	160.00	1.17	342.86	0.48				

4.4.4 Ensaio nº.4 – União de blocos (posição PA, chapa com chapa)

Após a colocação em doca, os blocos são unidos através de soldadura. Serve de exemplo a ligação do B106 ao B107 (bloco seguinte, a vante - Figura 4.53).

Assim sendo, considerou-se essa união de pisos, soldada na posição PA, através de junta topo a topo, com bisel de 17º e cobrejunta cerâmica temporária, ilustrada na figura 4.54:

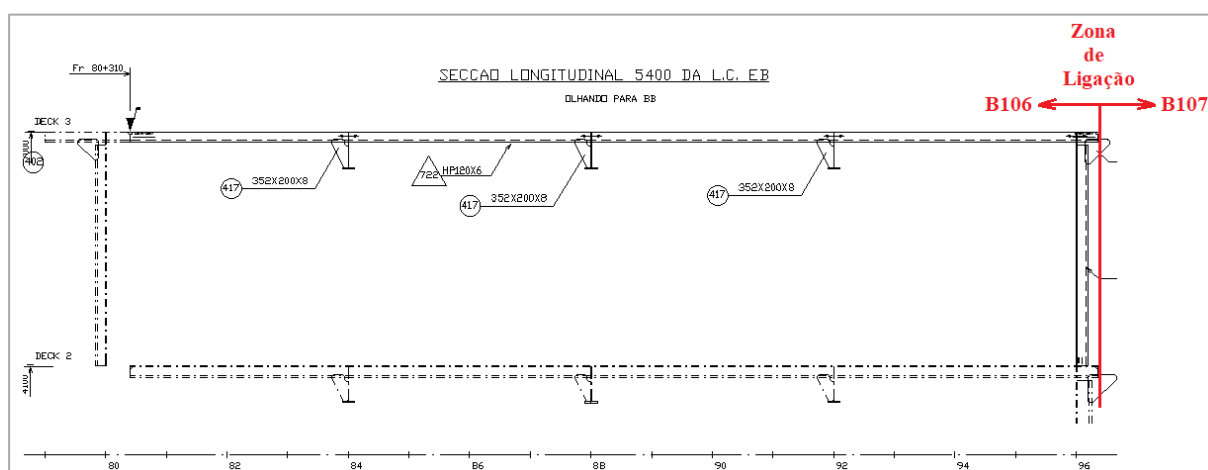


Figura 4.53 - Vista da seção longitudinal do B106 e zona de ligação do B107 assinalada (Fonte West-sea)

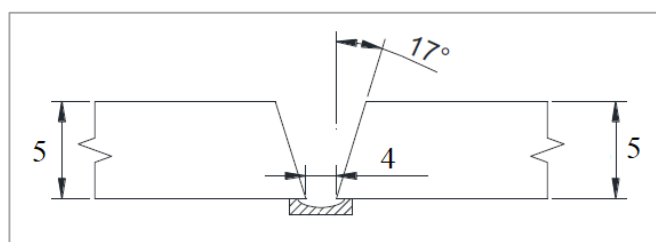


Figura 4.54 - Junta topo a topo (Fonte: West-sea)

Foram fabricados quatro provetes para simulação real da união de blocos.

As chapas em aço grau A para os ensaios, foram cortadas através do processo de corte por arco plasma sob água, com dimensões de 1000x400x5 mm.

As juntas foram chanfradas e devidamente limpas, sem gorduras ou outro tipo de impurezas. O chanfro foi feito com o bisel de 17° em ambos os bordos, com folga de 4 mm para enchimento. As chapas foram fixas através de “grampas” do mesmo material, devidamente pingadas. Na parte inferior da soldadura (raiz) foi colocado cobrejunta temporário em cerâmica.

Os provetes foram soldados através dos processos de soldadura semiautomático FCAW, variando as sequências de soldadura.

O equipamento de soldadura semiautomática utilizado nos provetes P.15 e P.16 foi o alimentador de arame *ESAB Warrior Feed 304* e uma fonte de alimentação *ESAB Warrior 400i CC/CV*.

O consumível utilizado nos quatro provetes foi o fio de soldadura *Kobelco DW50*, com 1.2mm de diâmetro.

A corrente utilizada foi DC com polaridade positiva no eletrodo consumível e proteção gasosa com 100% de CO₂ (11 a 16 L/min).

Descrição dos processos de soldadura nos provetes P.15 e P.16

O provete P.15, identificado nas figuras 4.56, 4.57 e 4.58, foi soldado na posição PA (ao baixo), através de dois passes contínuos de soldadura. Após a execução do primeiro passe, foi feita uma limpeza da superfície da soldadura através de processo abrasivo (rebarbadora) e de seguida foi feito o segundo passe.

O provete P.16 (Figuras 4.59, 4.60 e 4.61) foi soldado na mesma posição PA e procedeu-se do mesmo modo, em termos de limpezas. Contrariamente ao P.15, o P.16 foi soldado com diferentes seqüências de soldadura, tal como indicado na figura 4.55.

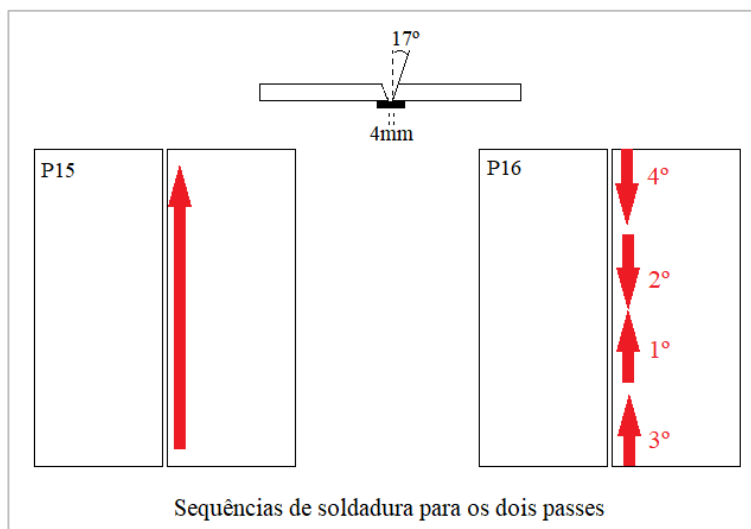


Figura 4.55 - Sequências de soldadura seguidas nos provetes P.15 e P.16 (Fonte: West-sea)

Foram registados os parâmetros e os tempos de execução para cálculo da velocidade de soldadura e entregas térmicas de ambos os provetes (Tabela 4.8).

Uma vez finalizadas, as soldaduras foram arrefecendo até atingirem a temperatura ambiente, sem qualquer tipo de restrições, e procedeu-se posteriormente à medição das deformações.

Medições do provete P.15

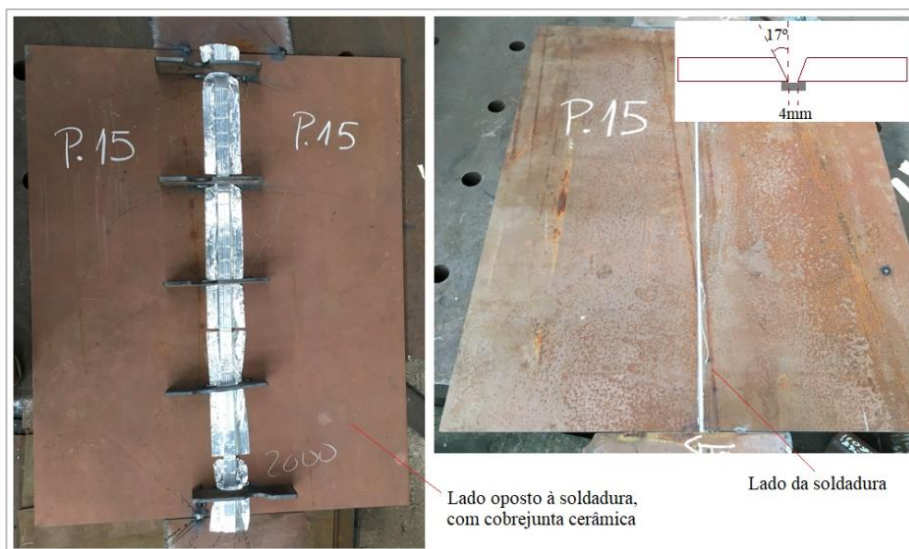


Figura 4.56 - Provette P.15

P.15 - Medição da distorção angular

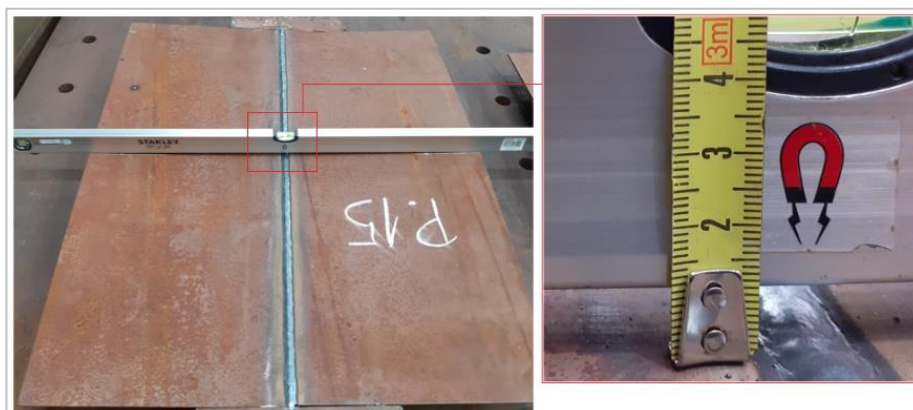


Figura 4.57 - Distorção angular (transversal) do P.15

P.15 - Medição da deformação por encurvadura (na longitudinal)



Figura 4.58 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.15

Medições do provete P.16



Figura 4.59 - Provete P.16

P.16 - Medição da distorção angular

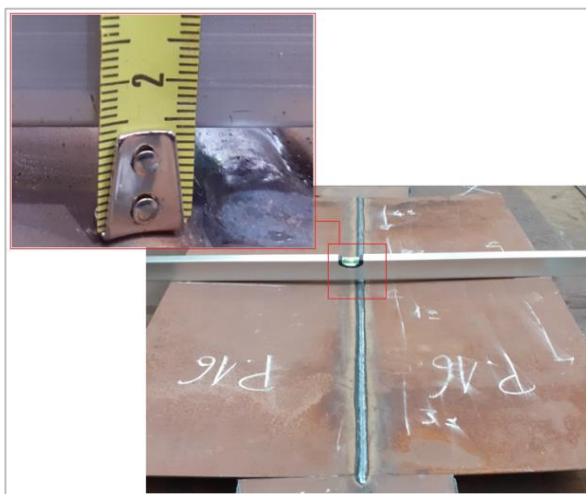


Figura 4.60 - Distorção angular (transversal) do P.16

P.16 - Medição da deformação por encurvadura (na longitudinal)



Figura 4.61 - Deformação por encurvadura (na longitudinal) do P.16

Parâmetros aplicados, entrega térmica e níveis de deformação (P.15 e P.16)

A tabela 4.8 diz respeito aos valores mínimos e máximos de voltagem e corrente registrados em cada passe de soldadura, de cada provete. O tempo de execução representa o tempo medido em minutos, desde o início até ao final de cada cordão de soldadura. A velocidade de soldadura foi calculada dividindo o comprimento do cordão pelo tempo de execução. A entrega térmica de cada passe foi obtida através dos valores médios de corrente, voltagem e velocidade, e fator de eficiência térmica. A entrega térmica total de cada cordão, foi obtida através da média da entrega térmica de cada passe. Por fim, os valores correspondentes às distorções angulares e deformações longitudinais obtidas.

Tabela 4.8 - Parâmetros de soldadura e resultados obtidos (P.15 e P.16)

Ensaio nº.4 – União de blocos (soldadura de pisos, chapa com chapa)														
Processo de soldadura: FCAW semiautomático														
Tipo de corrente: DC Polaridade do eletrodo: ev+ Proteção gasosa:100% CO2 (11-16L/min)														
Provete nº	Posição de soldadura	Cordão	Voltagem (V)		Corrente (A)		Tempo de execução (min)	Velocidade de soldadura (mm/min)	Entrega térmica média por cordão (KJ/mm)	Entrega térmica média total (KJ/mm)		Distorção angular (mm)	Deformação longitudinal máx. (mm)	
			min.	máx.	min.	máx.								
P.15	PA	1º passe contínuo	26.20	26.50	198.00	219.00	4.26	234.74	1.12	0.98		12.00	27.00	
		2º passe contínuo	26.20	26.50	205.00	221.00	3.14	318.47	0.85					
P.16	PA	1ª sequência de passes	1º	26.10	26.40	210.00	215.00	0.90	277.78	0.96	0.98		14.50	13.00
			2º	26.20	26.50	200.00	213.00	0.95	263.16	0.99				
			3º	26.20	26.50	205.00	226.00	0.92	272.73	1.00				
			4º	26.10	26.50	210.00	215.00	0.90	277.78	0.97				
		2ª sequência de passes	1º	26.00	26.40	204.00	220.00	0.85	294.12	0.91	0.97			
			2º	26.20	26.60	205.00	219.00	0.92	272.73	0.99				
			3º	26.00	26.50	205.00	220.00	0.90	277.78	0.96				
			4º	26.20	26.50	210.00	219.00	0.92	272.73	0.99				

5 RESULTADOS E SUA DISCUSSÃO

5.1 Análise dos resultados obtidos nos P.1 e P.2

Observando os valores medidos e os gráficos obtidos, verificou-se que 26,5 min após o início da soldadura, o ponto A do P.1 encontrava-se a 21,9 °C enquanto o mesmo ponto do P.2 se encontrava a 31,1 °C, revelando, portanto, uma diminuição bastante significativa da temperatura nesse ponto. Por sua vez, o ponto B do P.1, após o mesmo período de tempo, registava 25,3 °C e o mesmo ponto do P.2 indicava ainda uma temperatura de 44,2 °C.

Tal como indicado na tabela 5.1, verificou-se que, ao fim desse mesmo período de tempo, a temperatura média do ponto A foi de 21,9 °C no P.1 e 25,3 °C no P.2. Relativamente ao P.2, o ponto A encontrava-se a 31,1 °C e o ponto B a 44,2 °C.

Tabela 5.1 - Temperaturas médias nos pontos A e B dos provetes P.1 e P.2

Temperatura média °C		
Provetes	Ponto A	Ponto B
P.1	21.9	25.3
P.2	31.1	44.2

Apesar de terem sido aplicados parâmetros semelhantes nos P.1 e P.2, obtendo a mesma entrega térmica, conclui-se que, em média, o arrefecimento através de ar comprimido na zona da soldadura permitiu reduzir a temperatura no ponto A em 9,2 °C e no ponto B em cerca de 18,9 °C, proporcionando uma aceleração no arrefecimento e, portanto, uma maior dissipação de calor (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Redução da temperatura média alcançada nos pontos A e B dos provetes P.1 e P.2, através da utilização de ar comprimido no arrefecimento da soldadura

Redução da temperatura média (°C) dos pontos A e B devido ao arrefecimento com ar comprimido	
Ponto A	9.2
Ponto B	18.9

Comparação das temperaturas obtidas no ponto A, nos P.1 e P.2, em função das contagens de tempo registadas

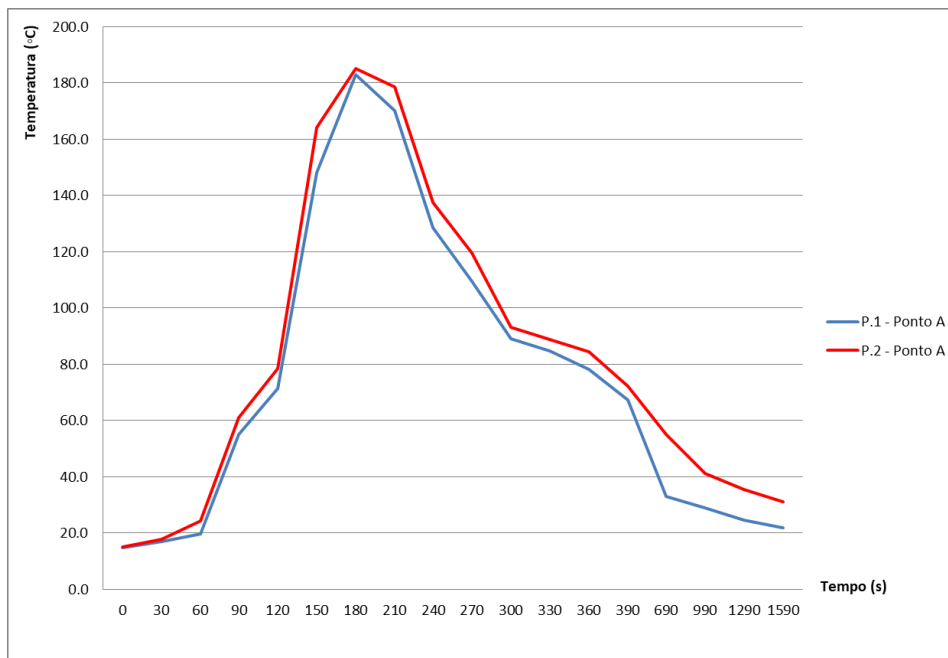


Figura 5.1 - Comparação de temperaturas atingidas no ponto A, pelos provetes P.1 e P.2

Comparação das temperaturas obtidas no ponto B, nos P.1 e P.2, em função das contagens de tempo registadas

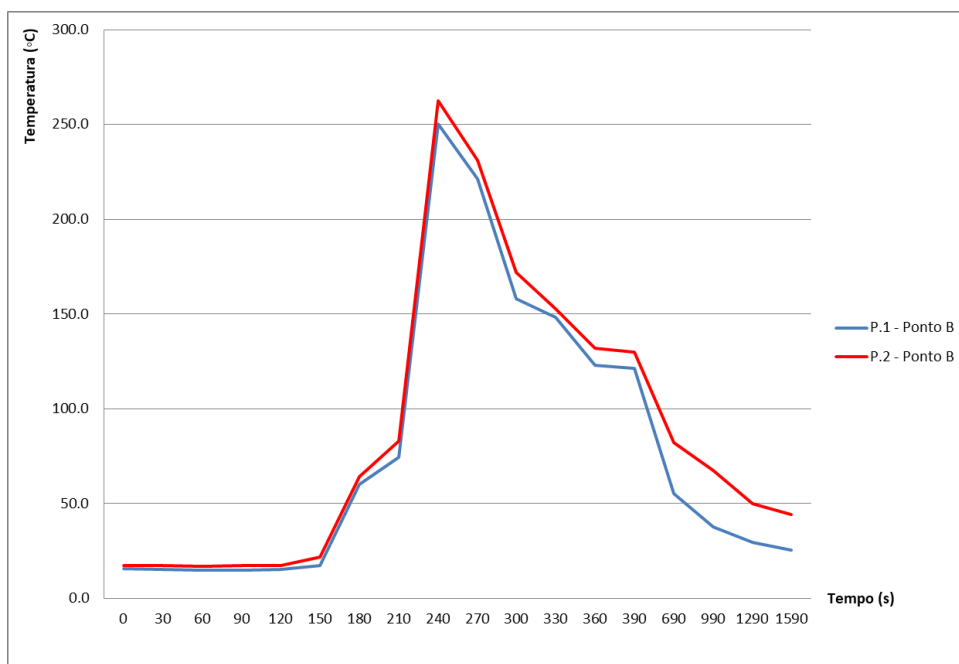


Figura 5.2 - Comparação de temperaturas atingidas no ponto B, pelos provetes P.1 e P.2

Relativamente às deformações obtidas, verifica-se que ambos os provetes sofreram deformações consideráveis, uma vez que as chapas dos mesmos não foram chapas da dimensão real dum painel, que inteiras atingem muitas vezes 12 m de comprimento. Por outro lado, não foram mantidas fixas e com restrições (reforços estruturais) de forma permanente.

No entanto, foi interessante verificar que o facto de o P.1 ter sido soldado com ligeiro arrefecimento a ar comprimido e ter ficado preso/fixo na mesa do pórtico após a soldadura, restringindo movimentações da chapa, durante um período de tempo de 26,5 min, revelou menores distorções angulares e menor empeno por encurvadura.

Por outro lado, o P.2, tendo arrefecido naturalmente ao ar livre e tendo sido libertado/solto da mesa do pórtico imediatamente após a recolha do *trailing* de soldadura, permitiu que a chapa deformasse com maior amplitude, nas várias direções.

Também foi possível verificar através das medições de temperatura que as zonas mais afetadas pelo calor no provete P.1 registaram temperaturas sempre inferiores às obtidas no P.2, revelando, portanto, uma redução significativa da temperatura e maior dissipação de calor através do arrefecimento (Figuras 5.1 e 5.2).

5.2 Análise dos resultados obtidos nos P.11, P.12, P.13 e P.14

Após cálculos e análise dos parâmetros e deformações (Tabela 5.3), verificou-se que o provete P.11 (soldado de forma contínua através de processo mecanizado - trator soldador) apresentou uma entrega térmica média de 0,59 kJ/mm (Figura 5.3) e uma deformação longitudinal máxima na chapa principal, de 3,5 mm. Não foram notadas deformações na barra nem distorções angulares.

O provete P.13, soldado de forma contínua em processo semiautomático, registou uma entrega térmica média de 0,73 kJ/mm, deformação máxima de 4 mm na chapa principal e uma distorção angular máxima de 16 mm. Portanto, mais entrega térmica do que no P.11 (Figura 5.4) e mais deformações.

O P.12, soldado de forma intermitente através de trator soldador, apresentou uma distorção angular de 3,5 mm e deformação longitudinal de 3 mm na chapa principal do provete. A entrega térmica obtida foi de 0,45 kJ/mm (Figura 5.5).

O provete P.14, unido através de processo semiautomático por soldadura intermitente, registou uma entrega térmica de 0,48 kJ/mm, tendo sido observada uma distorção angular ligeiramente superior ao P.12 e manteve a mesma deformação longitudinal da chapa principal.

Tabela 5.3 - Parâmetros obtidos nas soldaduras dos provetes P.11, P.12, P.13 e P.14

Parâmetros médios								
Provete	Posição	Voltagem (V)	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)	Entrega térmica (kJ/mm)	Deformada por distorção angular (mm)	Encurvadura longitudinal da barra (mm)	Encurvadura longitudinal da chapa (mm)
P.11	PB	28.18	262.00	597.21	0.59	0.00	0.00	3.50
P.12	PB	28.28	246.75	754.86	0.45	3.50	0.00	3.00
P.13	PB	28.70	229.00	434.97	0.73	16.00	0.00	4.00
P.14	PB	28.53	243.00	787.88	0.48	3.80	0.00	3.00

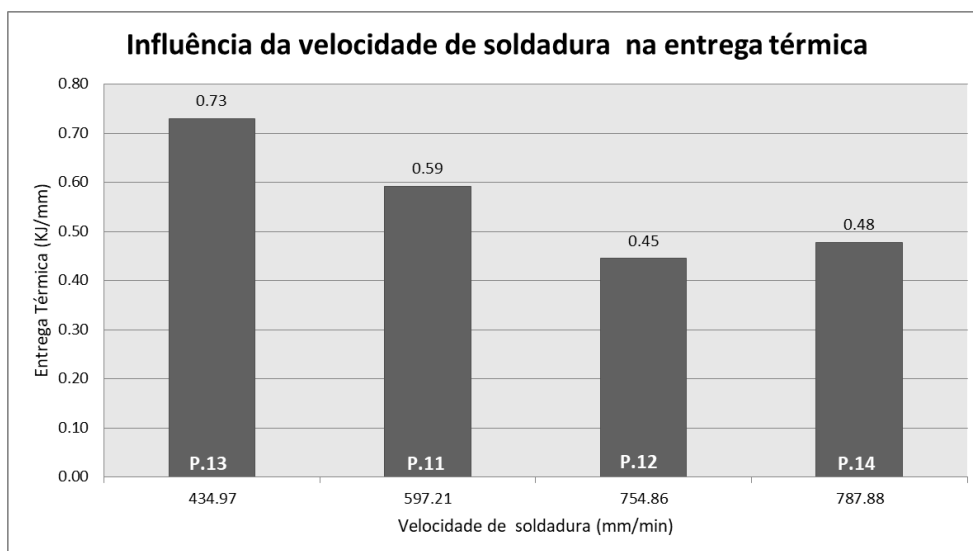


Figura 5.3 - Influência da velocidade de soldadura na entrega térmica

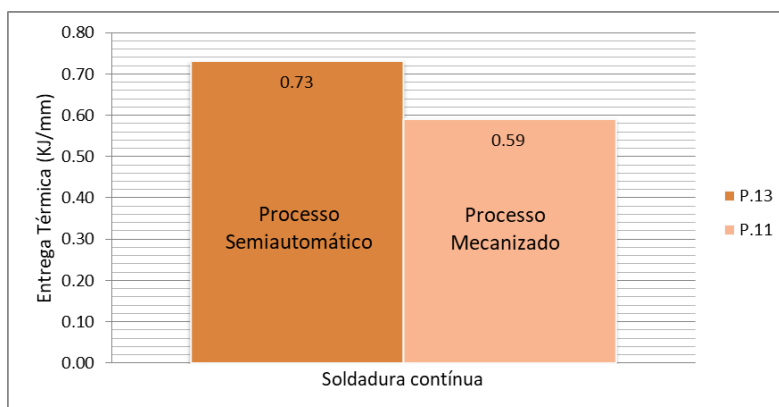


Figura 5.4 - Comparação da entrega térmica entre os processos semiautomático e mecanizado, na soldadura contínua

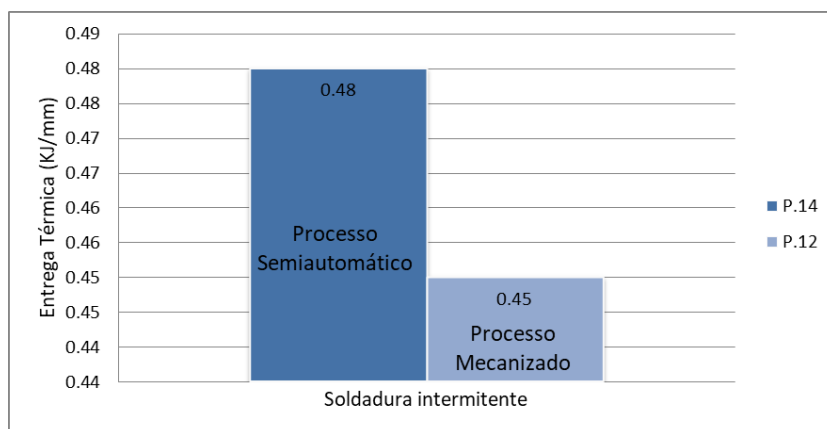


Figura 5.5 - Comparação da entrega térmica entre os processos semiautomático e mecanizado, na soldadura intermitente

5.3 Análise dos resultados obtidos nos P.7, P.8, P.9, P.10 e P.10.1

Os provetes soldados verticalmente permitiram confirmar algumas diferenças em termos de entrega térmica, mediante os parâmetros e posições de soldadura PF e PG (Tabela 5.4).

O provete P.7 foi soldado na posição PF, de forma contínua e com excesso de deposição de material. Verificou-se menor velocidade de soldadura e maior entrega térmica relativamente aos restantes provetes (0,82 kJ/mm). Revelou deformações em todas as direções.

O provete P.8 foi soldado pelo mesmo método, mas com menor deposição de material de adição, permitindo maior velocidade de soldadura do que no P.7 (Figura 5.6). A entrega térmica reduziu para 0,75 kJ/mm. Também foram verificadas deformações em todas as direções.

A soldadura do P.9 foi executada por sequências. Foram feitos quatro cordões na posição vertical ascendente, em cruz. A intensidade de corrente foi ligeiramente superior à dos anteriores, o que poderia ter levado a um aumento da entrega térmica, no entanto, o facto de ter sido soldado a uma velocidade superior, levou a uma redução da entrega térmica para 0,73 kJ/mm (Figura 5.8). Tal como os provetes P.7 e P.8, verificaram-se deformações longitudinais e distorção angular.

O P.10 foi soldado na posição PG (vertical descendente) a uma velocidade de soldadura muito superior à dos restantes provetes e com uma intensidade de corrente média de 235,3 A e a tensão manteve-se a rondar os 24 V. Destaca-se uma redução da entrega térmica para 0,58 kJ/mm. Foi observada distorção angular e deformação longitudinal da chapa menor do provete. A chapa maior não sofreu deformação longitudinal.

O P.10.1 foi soldado na mesma posição PG a uma velocidade ligeiramente inferior ao P.10, mas utilizando uma amperagem média substancialmente mais reduzida, de 152,3 A. A tensão média rondou os 21 V (Figura 5.7). Não foram observadas quaisquer deformações longitudinais, destacando apenas distorção angular. A entrega térmica obtida de 0,47 kJ/mm foi a mais reduzida de todos os provetes executados nas posições PG/PF.

Tabela 5.4 - Parâmetros médios obtidos nas posições PF e PG

Parâmetros médios								
Provete	Posição	Voltagem (V)	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)	Entrega térmica (KJ/mm)	Deformada por distorção angular (mm)	Encurvadura longitudinal da barra (mm)	Encurvadura longitudinal da chapa (mm)
P.7	PF	24.38	177.50	254.87	0.82	0.95	1.00	2.00
P.8	PF	24.48	178.25	280.71	0.75	1.45	2.50	1.00
P.9	PF	24.25	182.50	290.06	0.73	1.79	1.00	1.00
P.10	PG	24.10	235.25	473.50	0.58	3.06	0.00	0.00
P.10.1	PG	20.98	152.25	326.48	0.47	3.19	2.00	0.00

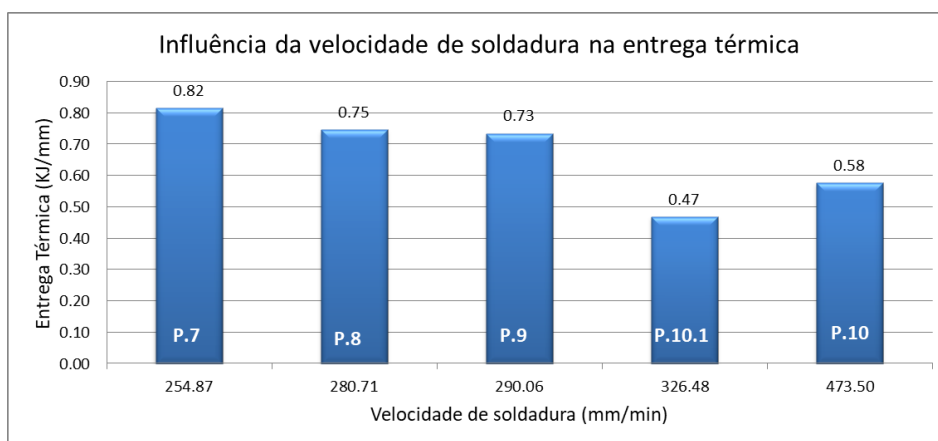


Figura 5.6 - Influência da velocidade de soldadura na entrega térmica

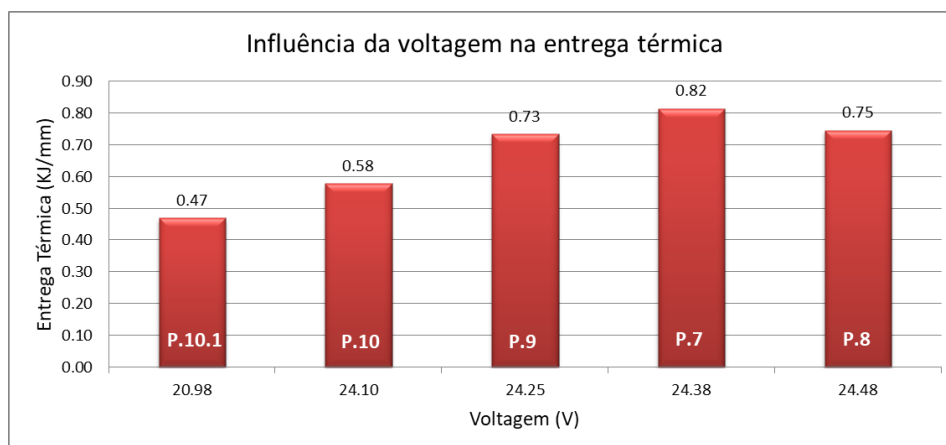


Figura 5.7 - Influência da voltagem na entrega térmica

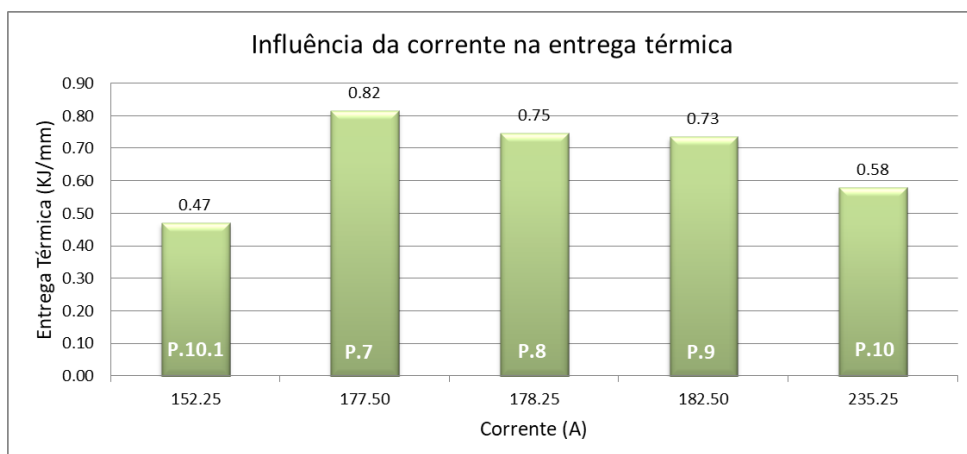


Figura 5.8 - Influência da intensidade de corrente na entrega térmica

5.4 Análise dos resultados obtidos nos P.15 e P.16

Os provetes P.15 e P.16 foram soldados na posição PA, praticamente com os mesmos parâmetros de tensão, corrente e velocidade de soldadura. Tal como seria de esperar, as entregas térmicas obtidas foram semelhantes, de 0,98 e 0,97 kJ/mm (Figura 5.5). A grande diferença observada foi que no P.15, soldado através de dois passes contínuos, a deformação longitudinal registada no ponto máximo foi de 27 mm. Por sua vez, o P.16, soldado através de dois passes, mas por seqüências, revelou uma deformação longitudinal de 13 mm.

Relativamente à distorção angular, a diferença entre provetes não foi muito significativa, no entanto, observou-se 2,5 mm a mais no P.16, em comparação com o P.15.

Tabela 5.5 - Parâmetros médios obtidos nos provetes P.15 e P.16

Parâmetros médios							
Provete	Posição	Voltagem (V)	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)	Entrega térmica (KJ/mm)	Deformada por distorção angular (mm)	Encurvadura longitudinal máxima (mm)
P.15	PA	26.35	210.75	276.61	0.98	12.00	27.00
P.16	PA	26.31	212.25	276.10	0.97	14.50	13.00

6 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos, verificou-se que no caso da união de chapas de baixa espessura para formação de painéis, através do processo *SAW.OSW.FCuB*, acelerar o arrefecimento através de ar comprimido garante uma redução de temperatura nas zonas mais afetadas pelo calor, reduzindo a suscetibilidade a deformações, face à proporcionalidade direta existente entre a quantidade de calor e taxa de deformação. Comprovou-se também que manter a chapa fixa à mesa do pórtico de soldadura por um período superior a 20 min, garante uma redução das deformações em todos os sentidos. Note-se que um arrefecimento forçado tem limitações, uma vez que uma redução brusca da temperatura provoca aumento da dureza do aço na zona afetada pelo calor.

A fase seguinte, de soldadura dos perfis/barras à chapa do painel, revelou que o processo semiautomático mecanizado produz menor entrega térmica que o processo semiautomático dito normal (sejam cordões de soldadura contínuos, sejam intermitentes). O processo semiautomático mecanizado, sempre que seja possível a sua utilização, garante menores empenos. Verificou-se que nesse mesmo processo, a soldadura contínua apresenta maiores entregas térmicas, no entanto, a soldadura intermitente, e apesar de ter registado menor entrega térmica, causou maiores distorções angulares. Esse registo deveu-se ao facto de a soldadura intermitente mecanizada ter sido feita de forma seguida, sem alternância da sequência dos cordões (o processo não seria rentável em termos produtivos se o trator soldador tivesse que ser constantemente interrompido para alterar as sequências).

Na soldadura de anteparas com divisórias, concluiu-se que a entrega térmica apresenta valores mais reduzidos na posição vertical descendente, principalmente pelo facto de a velocidade de soldadura ser superior à da posição ascendente. Sempre que se garanta uma correta deposição de material e uma soldadura de qualidade, deveria optar-se pela posição vertical descendente.

Por fim, a simulação da união de blocos, apresentou entregas térmicas sem diferenças significativas entre os processos de soldadura contínua e por sequências de passes. Pelas medições das deformações obtidas, concluiu-se que a soldadura por sequências apresenta uma distorção angular ligeiramente superior e a soldadura contínua uma significativa maior deformação longitudinal (encurvatura). Comparando ambos os casos, sugere-se optar pela soldadura por sequências em detrimento da soldadura contínua.

Como últimas conclusões e indicações de modo a minorar a entrega térmica, sugere-se em termos de projeto, a atenção para analisar com rigor todas as possibilidades que viabilizem a redução

de soldaduras em excesso, respeitando as exigências das normas, relativamente às distâncias mínimas exigidas entre reforços (Normas IACS - *N.47 Shipbuilding and Repair Quality Standard*). Deverão, portanto, ser eliminadas soldaduras que possam ser consideradas desnecessárias de modo a evitar uma concentração excessiva das mesmas em zonas específicas, nomeadamente caracterizadas por uma elevada quantidade de reforços.

No transporte e armazenamento de chapas, garantir que estas ficam devidamente apoiadas e niveladas, de modo a evitar deformações prévias à sua utilização.

Relativamente ao corte de chapas através dos processos de corte mecanizados, devem sempre escolher-se as corretas sequências de corte, de modo a reduzir a concentração de calor numa determinada zona da chapa principal. Na execução de aberturas, não fazer o corte na sua totalidade, mantendo a chapa a ser eliminada com as amarrações e removê-la *a posteriori* na fase de montagem, quando o painel estiver devidamente reforçado e fazendo já parte do bloco.

Relativamente à preparação e montagem, devem sempre seguir-se a normas de construção, respeitando as geometrias e folgas das juntas de soldadura. Os pingos de soldadura devem ser de dimensão aceitável, de modo a evitar novas tarefas de redução do seu tamanho ou na pior das hipóteses, criar um estímulo errado que leva à execução de um cordão de soldadura com uma garganta superior à indicada, de modo a cobrir esses mesmos pingos. Utilizar sempre que possível, os métodos de fixação e amarração das chapas de modo a reduzir as deformações, nomeadamente por encurvadura.

Não deve soldar-se em excesso, garantindo que o reforço superficial dos cordões de soldadura não seja exagerado e, se possível, reduzir o número de passes, de modo a baixar as entregas térmicas. É sabido que soldadores menos experientes têm tendência a exagerar na quantidade de material depositado. As sequências de soldadura deverão ser planeadas para cada situação, de maneira intermitente e sendo distribuídas de forma dispersa, em vez de as concentrar todas numa só zona (ter especial atenção nas zonas de concentração de reforços, uma vez que normalmente requer elevada quantidade de soldaduras).

É importante o foco nas posições de soldadura escolhidas e apurar se compensa o trabalho de rotação de uma peça, de maneira a soldá-la numa posição mais favorável em termos de facilidade de execução e redução da entrega térmica. Sempre que exista essa possibilidade, deve evitar-se concentrar a soldadura num só lado da peça, mas sim optar-se pelos dois lados, de forma equilibrada.

As boas práticas, o profissionalismo e o seguimento das normas garantem sucesso no controlo dimensional e obtenção de elevados padrões de qualidade.

Todo o rigor na preparação e a convergência na tomada de decisões entre especialidades, garantem a definição das estratégias mais adequadas a aplicar em cada caso, resultando em menores entregas térmicas no processo construtivo, reduzindo a necessidade da execução de desempenos e, por fim, minimizando os custos produtivos.

Sugestões para futuros trabalhos

Para futuros trabalhos sugere-se aperfeiçoar as uniões de chapas de formação de painel, testando a execução de soldaduras através do processo a arco submerso SAW.OSW.FCuB, com auxílio de ar arrefecido, para acelerar o processo de arrefecimento. De seguida fazer ensaios de dureza de modo a determinar qual o limite mínimo de temperatura que pode assumir o ar arrefecido, de modo a não afetar a dureza nas zonas afetadas pelo calor.

Também seria interessante estudar com mais profundidade as sequências de soldadura na posição vertical descendente, combinando diversas espessuras de chapas, de modo a reduzir as distorções angulares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rodrigues Pereira, Calhau Feitoria, Alberto Leite, Ezequiel Pereira, “Tecnologia e Elementos de Marinharia da Embarcação de Pesca”, 2ª Edição - Rui Nascimento, Propriedade da Escola de Pesca e da Marinha de Comércio, Lisboa, 1999, p.1-2
- [2] Steve Scholler and T.D. Huang, “Ship Design and Construction Training Module”, Ingalls Shipbuilding, 11 de Setembro de 2012
- [3] Brito Gonçalves e Gordo J.M., “Tecnologia Naval – Materiais Metálicos” - Parte III, Instituto Superior Técnico, 2003, p.1-3; p.9; p.30-33; p.48-57
- [4] Vicente Chiaverini, “Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e Tratamento”, Volume III, 2ª Edição, 1986, p.67-69, p.79-84
- [5] Brito Gonçalves e Gordo J.M., “Tecnologias de Processamento de Materiais” - Parte II, Instituto Superior Técnico, 2003, p.31/82-33/82
- [6] Desineni Subbaram Naidu, Kevin L. Moore, “Gas Metal Arc Welding: Modeling”, Artigo: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/spray-transfer> (acedido em 02-02-2022)
- [7] Raphaël Thiébauda, Jean-Marie Drezet b, Jean-Paul Lebet, “Experimental and numerical characterisation of heat flow during flame cutting of thick steel plates”, Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 304–310, p.1
- [8] W. E. Wood, “Heat-Affected Zone Studies of Thermally Cut Structural Steels”, Oregon Graduate Institute of Science & Technology, Report n°. FHWA-RD-93-O 15, December 1994, p.79-80
- [9] Wilhelmsen Ships Services, “Maritime Welding Handbook”, 14th edition, 2nd revision, www.wilhelmsen.com (acedido em 09-02-20022), p.444-445; p.466-467
- [10] TWI – The Welding Institute, “CSWIP 3.1 – Welding Inspector – Level 2 WIS5”, Rev.2 April 2013, p.2/6; 7/2; 10/1; 13/1 a 14/7;11/6; 2/17; 9/10 a 9/12; 19/1-19/24
- [11] TWI – The Welding Institute, “Job Knowledge for Welders Part1”, 25th May 1996, p.1-2
- [12] https://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC_1998-03.html (acedido em 02-02-2022)
- [13] Shigeo OYAMA, Tadashi KASUYA, Kouichi SHINADA, “High-speed One-side Submerged Arc Welding Process - NH-HISAW”, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 95 January 2007
- [14] Pax Rocha, “Manual de Soldadura”, Martifer Group, Engenharia de Produção-Soldadura, Rev.0, 2014, p.14
- [15] Jatinder Gill, JagdevSingh, “Effect of Welding Speed and Heat Input Rate on Stress Concentration Factor of Butt Welded Joint of IS 2062 E 250 A Steel”, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies E-ISSN2249–8974, Research Article

- [16] Ajit Mondal, Manas Kumar Saha, Ritesh Hazra, & Santanu Das, “Influence of heat input on weld bead geometry using duplex stainless steel wire electrode on low alloy steel specimens”, www.tandfonline.com, Article: 1143598 Published online:19 Feb 2016
- [17] Modenesi J. Paulo, “Introdução à Física do Arco Elétrico – Soldagem I”, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Janeiro 2012, p.1-2
- [18] Thomas W. Eager, "Welding and Joining - Moving from Art to Science", *Welding Journal*, June 1995, p.54-55
- [19] Ahmet Irfan Yukler, Memduh Kurtulmus, Ezgi Dogan, “ANGULAR DISTORTION IN BUTT ARC WELDING”, *International Journal of Engineering Science and Application*, Yukler et al., Vol. 2, No. 4, 2018, p.1-8
- [20] Hernández Arriaga Isaac, Aguilera Gómez Eduardo, Pérez Meneses Joaquín, “Welding sequence analysis in three dimensional weldments with experimental Verification”, *Memorias del XXII Congresso de la Somim*, 28 a 30 de Setembro de 2016, Mérida, Yucatán, México, p.1-12
- [21] Kiochi Masubuchi, D.C.Martin, “Investigation of Residual Stresses In Steel Weldments”, *Ship Structure Committee, National Academy of Sciences - National Research Council*, Washington D.C, September 1996, p.11-14
- [22] L.C J. Wang, P. J. van der Wolk, S. van der Zwaag, “Determination of martensite start temperature in engineering steels part I. Empirical relations describing the effect of steel chemistry”, *Materials transactions, JIM*, 41(7):761–768, 2000.
- [23] Lino Alberto Soares Rodrigues, Ednelson da Silva Costa, Tarcio dos Santos Cabral e Eduardo Magalhães Braga, “Welding Residual Stresses to the Electric Arc”, *Published: August 31st, 2020*, DOI: 10.5772/intechopen.93533
- [24] <https://www.lincolnelectric.com/it-it/support/welding-how-to/Pages/weld-distortion-detail.aspx> (acedido em 16-02-2022)
- [25] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/distortion-prevention-by-pre-setting-pre-bending-or-use-of-restraint-035> (acedido em 18-02-2022)
- [26] BY V. VEL MURUGAN AND V. GUNARAJ, “Effects of Process Parameters on Angular Distortion of Gas Metal Arc Welded Structural Steel Plates”, *SUPPLEMENT TO THE WELDING JOURNAL*, Sponsored by the American Welding Society and the Welding Research Council, November 2005
- [27] https://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC_2006-03.html (acedido em 01-04-2022)
- [28] O. Doyen, N. Rizzo, L. Forest, J. Tosi, N. Thomas, “Assessment of HCLL-TBM optimum welding sequence scenario to minimize welding distortions”, *SOFT 2016 - 29th edition of the Symposium on Fusion Technology*, Sep 2016, Prague, Czech Republic, cea-02442290
- [29] J.P. Oliveira, T.G. Santos, R.M. Miranda, “Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice”, *Elsevier*, Volume 107, Artigo nº 100590, p.7, 2020

- [30] Pilipenko Artem, “Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multielectrode submerged arc welding: Their mitigation techniques”, Department of Machine Design and Materials Technology, Norwegian University of Science and Technology N-7491 Trondheim, Norway, 2001, p.31-33
- [31] H.E. Patee, R.M. Evans, and R.E. Monroe, “Effect of Flame and Mechanical Straightening on Material Properties of Weldments”, Summary report to the ship structure committee, SSC-207, 1970, p.1-25
- [32] Tae-Jun Kim, Beom-Seon Jang and Sung-Wook Kang, “Welding deformation analysis based on improved equivalent strain method to cover external constraint during cooling stage”, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. (2015) 7:805~816
- [33] Folchi, Francesca, "Weld Distortion Prediction With Virtual Analysis For Practical Applications" (2014). Electronic Theses and Dissertations. 5229. <https://scholar.uwindsor.ca/etd/5229> p.24-25
- [34] Jiangchao Wang, Hidekazu Murakawa, “Study on Transient Buckling Behavior of Thin Plate Structures During Welding Process”, Transactions of JWRI, Special Issue on WSE2011 (2011), p.1-4
- [35] T.D. Huang, Ph.Dong, P.E., P. Keene and L. Kvidahl, “DISTORTION MITIGATION TECHNIQUE FOR LIGHTWEIGHT SHIP STRUCTURE FABRICATION https://www.nsamcenter.org/wp-content/uploads/2016/09/SNAME_2006_TTT2.pdf (accedido em 04-03-2022)
- [36] BOC a member of the Linde Group, “Fundamentals of flame straightening”, Technical information for flame processes, www.boconline.co.uk, p.14-22
- [37] <https://www.efd-induction.com/pt-br/induction-heating-applications/induction-straightening>
- [38] João Vieira, “Tecnologia de Montagem – Nível 1”, Centro de Formação dos ENVC - Estaleiros Navais de Viana do Castelo, Julho de 2006, p.35-37; p.55.
- [39] Hoheok KIM, Junya INOUE, Masato OKADA and Kenji NAGATA, “Prediction of Ac3 and Martensite Start Temperatures by a Datadriven Model Selection Approach”, ISIJ International, Vol. 57 (2017), No. 12, pp. 2229–2230
- [40] Dae-Won Cho, Woo-Hyun Song, Min-Hyun Cho, Suck-Joo Na, “Analysis of submerged arc welding process by three-dimensional computational fluid dynamics simulations”, Elsevier, Volume 213, Issue 12, p.12, 2013



