

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

JEFF EDUARD BLANK

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM SOBRE AS
DISTORÇÕES DE SOLDAS REALIZADAS EM ESTALEIROS**

Joinville

2014

JEFF EDUARD BLANK

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM SOBRE AS
DISTORÇÕES DE SOLDAS REALIZADAS EM ESTALEIROS**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Naval.

Área de fabricação.

Orientador: Ricardo Aurélio Quinhões Pinto

Joinville

2014

Blank, Jeff Eduard, 1988-

Análise de influência da sequência de soldagem sobre as distorções de soldas realizadas em estaleiros / Jeff Eduard Blank -

2014;

- Florianópolis, SC, 2014.

66 p.

Orientador: Ricardo Aurélio Quinhões Pinto.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.

Graduação em Engenharia Naval, 2014

1. *Distorções.* 2. *Estudo experimental da influência de distorções em placas enrijecidas variando o sentido, sequência e passe de cordão de solda.* I. Aurélio Quinhões Pinto, Ricardo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. *Análise da influência de distorções na soldagem com a variação de sequência de solda.*

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

Jeff Eduard Blank

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM SOBRE AS
DISTORÇÕES DE SOLDAS REALIZADAS EM ESTALEIROS**

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Naval e aprovado em sua forma final pela Comissão examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 15 de julho de 2014

Prof. Lucas Weihmann
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Orientador
Universidade UFSC

Prof. Tiago Vieira da Cunha
Universidade UFSC

Prof. Luiz Eduardo Bueno Minioli.
Universidade UFSC

Dedicado ao meu pai ,Olaf
e minha mãe, Marli.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Olaf Alwin Blank e Marli Hornburg por todo o incentivo de fazer uma faculdade e estar sempre do meu lado em qualquer ocasião;

Ao meu irmão Olaf Alwin Blank Júnior por, mesmo longe, me apoiar e ser um grande amigo;

Aos meus avós, Quito, Alzira, Arthur e Ida pelo grande amor e orgulho dos meus objetivos;

Ao meu orientador de estágio Ricardo Aurélio Quinhões Pinto pela orientação, paciência e incentivos;

Ao Diretor Engenheiro Aldo por oferecer a empresa para os testes do trabalho e dar todo o suporte como equipamentos e mão de obra;

Aos meus grandes amigos que conheci durante a faculdade que vou levar durante toda a minha vida;

Aos professores da Universidade Federal de Santa Catarina no campus de Joinville pela minha formação como engenheiro.

Jeff Eduard Blank

“ Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá. ”

Ayrton Senna

RESUMO

A indústria da construção naval brasileira está em grande crescimento impulsionada pelo setor de extração de petróleo e gás. Diante dos processos de soldagem na construção de navios, depara-se com problemas de soldagem em estruturas metálicas que aparecem na forma de distorções após a aplicação da solda, influenciadas, também, pela maneira com o qual foram processadas. Estas imperfeições são provocadas nos painéis enrijecidos da estrutura do navio, onde acarretam em problemas futuros na formação e união de bloco demandando, assim, mais tempo e custos no retrabalho. O intuito deste trabalho foi verificar a influência, nos procedimentos de soldagem, das variáveis de sequência de solda, direção e passe do cordão nos valores de amplitudes de distorções gerados após a soldagem. Para a metodologia deste trabalho, foi elaborado um modelo em escala reduzida de painel enrijecido similar ao fundo duplo de um navio de aço, com um reforço longitudinal e um transversal. Para verificar a influência dos processos de soldagem, foram escolhidos três variáveis no procedimento: sequência de solda, passe do cordão e sentido de soldagem. Cada variável teve duas alternativas e os experimentos práticos foram com todas as combinações possíveis, totalizando oito testes. Os experimentos foram realizados com soldagem MAG (*Metal Active Gas*), arame E71T1M, gás de proteção C25, tensão de 27 V e corrente de 170 A para todos os modelos. Após os testes, verificou-se que as mudanças nos procedimentos de soldagem provocaram diferenças nas amplitudes de distorções dos painéis soldados. Mudando apenas os parâmetros de soldagem, constataram-se distorções de 9,8 mm até 2,0 mm, uma variação de 7,8 mm. Pela análise dos resultados, a influência mais significativa foi pela mudança do passe contínuo para o passe a ré, sendo o passe a ré com melhor desempenho reduzindo 59 % da distorção comparado com o passe contínuo. A sequência de solda foi a segunda variação que mais surtiu efeito nas distorções, sendo a sequência número dois com distorções de 36% menores que a sequência número um.

Palavras-chave: Distorções. MAG. Soldagem. Sequência de soldagem. Construção naval.

ABSTRACT

The Brazilian shipbuilding industry is booming driven by the extraction of oil and gas sector. Given the manufacturing processes within shipyards, faced with problems of welding steel structures that appear as distortions after applying solder, influenced by the manner in which they were processed. These imperfections are caused stiffened panels in the ship's structure, which cause problems in future training and union block, thus requiring more time and money on rework. The aim of this study was to investigate the influence on welding procedures such as welding sequence, direction and pass the cord in amplitude values generated distortions after welding. For the methodology of this study, a model was developed on a small scale similar to the double bottom of a steel ship with a longitudinal and a transverse reinforcement stiffened panel. Following welding, pass the cord and sense Welding: To check the influence of welding processes, three variables were chosen in the procedure. Each variable had two alternatives and practical experiments were with all possible combinations, a total of eight tests. The experiments were performed with MAG (*Metal Active Gas*), wire ER 70 S-3, C25 shielding gas, voltage of 27 V and current of 170 A for all models. After the tests, it was found that the differences in welding procedures resulted in differences in the amplitude distortion of welded panels. Only changing the welding parameters, we found distortions changing from 9.8 mm to 2.0 mm, a variation of 7.8 mm. By analyzing the results, the most significant influence was the change of pass lanyard, with the pass astern with 59% better performance by reducing the distortion compared with continuous pass. The sequence of welding was the second most variation that had an effect on distortion, and the sequence number two with distortion less than 36% the number one result.

Keywords: Distortions. MIG. Welding. Sequences. Shipbuilding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração dos seis tipos de distorções causados pela soldagem	- 18 -
Figura 2: Diagrama de variação do limite de escoamento elástico e coeficiente de expansão térmica	- 20 -
Figura 3: Ilustração de distribuição de tensão residual devidas a vínculos internos em juntas de topo	- 21 -
Figura 4: Ilustração de distribuição de tensão residual devidas a vínculos externos em juntas de topo	- 21 -
Figura 5: Exemplo do comportamento da tensão residual em um metal soldado	- 22 -
Figura 6: Gráfico da relação entre temperatura de ensaio e a tensão de fratura na junta da solda	- 23 -
Figura 7: Esquemática de flambagem em uma placa	- 25 -
Figura 8: Processo de soldagem MAG	- 27 -
Figura 9: Esquema dos equipamentos para o processo MAG	- 28 -
Figura 10: Tocha de soldagem manual do processo MAG	- 29 -
Figura 11: Esquema dos campos operacionais na transferência metálica na soldagem GMAW	- 31 -
Figura 12: Variação tensão e corrente de soldagem na transferência globular ...	- 32 -
Figura 13: Esquema da transferência metálica por curto-circuito, mostrando o comportamento da tensão e corrente de soldagem durante a transferência	- 33 -
Figura 14: Esquema de transferência goticular, mostrando o comportamento da tensão e da corrente de soldagem	- 34 -
Figura 15: Esquema do modo de transferência por arco pulsado	- 35 -
Figura 16: Ilustração de sequência de deposição do cordão da solda	- 37 -
Figura 17: Exemplos de sequências de soldagem em união mista com diferentes graus de contração	- 39 -

Figura 18: Exemplos de sequência de soldagem na união de chapas (a) e (b), e de painéis enrijecidos (c).....	- 40 -
Figura 19: Ilustração das etapas seguidas na metodologia dos experimentos	- 42 -
Figura 20: Ilustração de montagem de uma unidade de bloco de navio de aço ..	- 43 -
Figura 21: Ilustração do fundo duplo em duas dimensões com o destaque da estrutura para o experimento	- 43 -
Figura 22: Ilustração do modelo reduzido usado nos testes	- 44 -
Figura 23: Ilustração da vista lateral do reforço da placa enrijecida.....	- 44 -
Figura 24: Ilustração do modelo reduzido para os experimentos de soldagem ...	- 45 -
Figura 25: Ilustração das duas sequências estabelecidas. (a) primeira sequência; (b) segunda sequência.	- 46 -
Figura 26: Ilustração dos sentidos de soldagem no modelo reduzido.....	- 46 -
Figura 27: Passe do cordão contínuo (a) e passe a ré (b)	- 47 -
Figura 28: Sequências de soldagem dos testes para os experimentos 1 ao 8.....	- 48 -
Figura 29: Ilustração das marcações para o cordão de solda na chapa metálica	- 50 -
Figura 30: Ilustração dos pontos de medição das distorções nas placas.....	- 51 -
Figura 31: Ilustração da distorção para a medição dos experimentos	- 51 -
Figura 32: Alimentador de arame (a) e a fonte de soldagem (b)	- 52 -
Figura 33: Ilustração do modelo da tocha utilizada nos experimentos	- 53 -
Figura 34: Ilustração da fixação do modelo soldado	- 54 -
Figura 35: Teste do modelo após a aplicação da soldagem	- 55 -
Figura 36: Distorções na vista lateral das placas 1 à 8	- 57 -
Figura 37: Medição das distorções em cada ponto dos painéis.....	- 58 -
Figura 38: Médias das distorções de cada painel	- 59 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ilustração da sequência, sentido e passe de cada experimento	- 49 -
Tabela 2: Medições de distorção de cada ponto da placa enrijecida	- 56 -
Tabela 3: Medidas, comparações e variações dos modelos testados	- 60 -

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Deformação elástica
° C	Graus célsius
σ_y	Limite de escoamento
δ	Deflexão lateral
σ	Tensão
ΔL	Varição do comprimento
L	Comprimento
ϵ	Modulo de Young
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active gás
GMAW	Gas Metal Arc Welding
U	Tensão
I	Corrente
CO ₂	Dióxido de carbono
I _p	Corrente de pulso
I _t	Corrente de transição
I _b	Corrente de base

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA.....	- 15 -
1.2 OBJETIVO	- 16 -

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Métodos de união dos metais	- 17 -
2.2 Distorções	- 17 -
2.3 Tensões residuais.....	- 19 -
2.4 Efeitos das tensões residuais	- 23 -
2.4.1 Efeitos na fratura frágil.....	- 23 -
2.4.2 Efeitos das tensões residuais no limite de fadiga	- 24 -
2.4.3 Efeito das tensões residuais na resistência à flambagem	- 24 -
2.5 Medidas das tensões residuais	- 25 -
2.6 Conceitos do processo de soldagem MIG/MAG com adição de arame.	- 26 -
2.6.1 Equipamentos empregados no processo MIG/MAG	- 28 -
2.6.2 Fonte de soldagem MIG/MAG.....	- 29 -
2.6.3 Gases de proteção	- 30 -
2.6.4 Formas básicas de transferência metálica.....	- 30 -
2.7 Técnicas de sequência de deposição e sequência de soldagem.....	- 35 -
2.7.1 Técnicas de sequência de deposição	- 35 -
2.7.2 Técnicas de sequência de soldagem	- 38 -

CAPÍTULO III - METODOLOGIA E MATERIAIS EMPREGADOS

3.1 Metodologia	- 41 -
3.2 Planejamento experimental para análise das distribuições dos painéis.....	- 41 -
3.3 Materiais utilizados	- 52 -
3.3.1 Fonte de soldagem e alimentador de arame	- 52 -

3.3.2 Tocha de soldagem.....	- 52 -
3.3.3 Gás de proteção	- 53 -
3.3.4 Arame de soldagem	- 53 -
3.4 Fixação dos modelos testados	- 54 -
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	
4.1 Preparação para os experimentos	- 55 -
4.2 Experimentos e resultados	- 55 -
4.3 Comparação das distorções relacionadas com a mudança de passe de cordão	- 60 -
4.4 Comparação das distorções relacionadas com a mudança de sequência	- 61 -
4.5 Comparação das distorções relacionadas com a mudança de direção.....	- 61 -
4.6 Dificuldades nos testes realizados.....	- 61 -
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	
5.1 Conclusões	- 63 -
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	- 64 -
BIBLIOGRAFIAS	- 65 -

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

A recuperação da indústria naval e offshore brasileira foram influenciadas especialmente pelo setor de petróleo e gás natural. As expectativas geradas principalmente na exploração e produção do petróleo *offshore*, descoberto nas reservas do pré-sal, preveem a fabricação de novos navios-sonda, navios petroleiros, plataformas de produção e navios de apoio, reaquentando o setor naval (SINAVAL, 2012). No contexto geral do litoral de Santa Catarina, grandes empresas no setor de construção de embarcações de apoio *offshore* estão acompanhando este crescimento econômico, sendo um dos maiores polos da América Latina neste setor.

Diante dos processos de fabricações dentro de estaleiros, fica claro a necessidades de melhorias no setor da soldagem, pelo fato de haver problemas de distorções e tensões residuais em estruturas metálicas. Em geral, os navios são fabricados por placas enrijecidas, as quais são reforçadas por vigas longitudinais e transversais, utilizando a soldagem como o método de ligação permanente. Com o processo de soldagem, a transferência de calor em pontos localizados, é a responsável pela distorção nas estruturas unidas. Esta imperfeição é gerada pelo calor aplicado de forma não homogênia que gera expansão térmica ao redor da área do cordão de solda, e quando resfriada, ocorrem variações do modelo base, sendo este deslocamento as distorções. Com o problema das imperfeições nas estruturas concluídas, suas próximas etapas de construção, como a união de placas e também de blocos, são prejudicadas pelo tempo de retrabalho.

Para que se tenha uma diminuição do tempo e custo de fabricação deve-se empregar procedimentos que venham promover menores distorções em painéis enrijecidos. Um dos fatores envolvidos para isto são as mudanças nos processos de soldagem como a sequência de soldagem, sentido e passe do cordão para verificar o melhor procedimento para minimizar as imperfeições.

1.1 JUSTIFICATIVA

A adoção de técnicas de preparação para a soldagem, o estabelecimento de sequências de soldagem bem definidas, e a redução da quantidade de solda;

permitem minimizar tensões residuais e evitar distorções. Estas distorções podem ser tão graves que exija a substituição do material para ser aprovado pelas classificadoras, o que torna o retrabalho muito caro e demorado. Por isso a competitividade que a indústria naval brasileira requer envolve entender as causas que levam à distorção e criar ações efetivas para minimizar seus efeitos e reduzir de forma significativa o retrabalho. Com isto, o assunto abordado foi escolhido para analisar as principais causas de distorções em um modelo reduzido trabalhado na indústria naval.

1.2 OBJETIVO

O foco deste trabalho de conclusão de curso está direcionado para a soldagem *MAG (Metal Active Gas)*, em que teve oito modelos de placas enrijecidas aplicando combinações de três aspectos diferentes, com duas alternativas para cada, sendo eles: sentido de soldagem, passe do cordão e sequência de soldagem pré-estabelecidas. Estes testes foram feitos com o intuito de estudo das influências de cada variável para analisar a alteração das distorções de cada painel, e assim, discutir as melhores combinações de variáveis de soldagem para este modelo reduzido estudado.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Métodos de união dos metais

Os métodos de união de metais podem ser divididos em duas categorias principais, isto é, aqueles baseados no aparecimento de forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas e aqueles baseados em forças microscópicas (interatômicas ou intermoleculares). No primeiro caso, do qual são exemplos a parafusagem e a rebitagem, a resistência da junta é dada pela resistência ao cisalhamento do parafuso ou rebite, mais as forças de atrito entre as superfícies em contato. No segundo caso, a união é conseguida pela aproximação dos átomos das partes a serem unidas, ou destas e um material intermediário, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações metálicas e de Van der Waals. Como exemplos desta categoria citam-se a soldagem, a brasagem e a colagem. (MODENESI, 2006).

Segundo Modenesi (2006), a soldagem é considerada como um método de união, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície. Se tratando da soldagem, o processo de junção de metais por fusão é a operação que visa obter a união de duas ou mais peças. Além da soldagem, outros métodos de união de elementos são usadas como exemplos a brasagem, rebitagem e a soldagem por forjamento. Atualmente, mais de 50 diferentes processos de soldagem têm alguma utilização industrial, sendo assim, o principal método de união permanente de metais. Em contra partida, a soldagem apresenta também problemas de operação, um exemplo para isto são as distorções causadas pela transferência de calor durante a deposição de metal na união de elementos.

2.2 Distorções

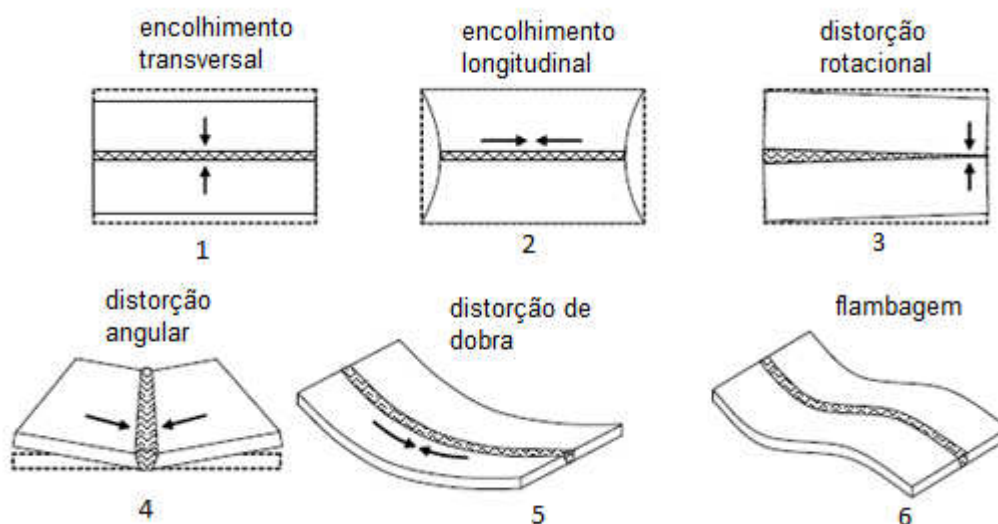
No processo de construção de placas enrijecidas na industrial naval, existem as etapas de corte dos elementos, a montagem com o posicionamento e fixação das partes por pontos de solda e por fim a sua soldagem para a união entre placas. Diante de todas as suas etapas de fabricação, vários tópicos são importantes na

causa dos defeitos finais, como o estoque em pátios em estaleiro, seu transporte, tratamento das chapas, a forma de montagem e por fim, e o que mais influencia nas imperfeições, a transferência de energia o qual a soldagem é o processo mais importante.

As distorções em placas metálicas ocorrem na soldagem de reforços, entre eles podem ser reforços transversais e longitudinais. Estas estruturas para enrijecer as placas são de diversas formas como: cantoneiras, vigas "I", "U" e "H", entre outras. Para saber a deformação após a soldagem destes reforços pode-se analisar a variação dos pontos da estrutura antes e depois da solda, sendo o deslocamento destes pontos que se identificam como distorções. Além da distorção das placas na soldagem, podem ocorrer variações dos elementos soldados (reforços) também na ligação permanente.

Segundo Masubuchi (1991), a soldagem tipicamente resulta em vários tipos de deformação tal como contrações transversais, longitudinais e distorções angulares, rotacionais e de flambagem. Estas distorções estão ilustradas na figura 1.

Figura 1: Ilustração dos seis tipos de distorções causados pela soldagem



Fonte: MASUBUCHI (1991).

Existem seis tipos de deformações segundo Masubuchi (1991). A primeira distorção é a contração transversal (número 1), o qual ocorre o encolhimento do material no sentido transversal. A segunda deformação característica é a contração longitudinal (número 2), esta contração longitudinal é bem menor que a transversal e

seu efeito é desprezado. A rotação durante a soldagem é ilustrada no número 3. O número 4 mostra a distorção angular, ela acontece pela variação de temperatura entre as faces superior e inferior da chapa, que provocam variações nos níveis de contração no sentido da espessura da chapa. Quando há chapas com espessuras muito grandes, sua distorção é menor por causa do próprio material base, quando em espessuras muito finas, sua distorção é pequena e vai aumentando proporcionalmente com o aumento da espessura das chapas soldadas. A flambagem é ilustrada nos números 5 e 6, elas são características em chapas finas.

Segundo Dydo (1999), na indústria naval as distorções mais importantes, e as que mais acontecem, são as de flambagem e angulares.

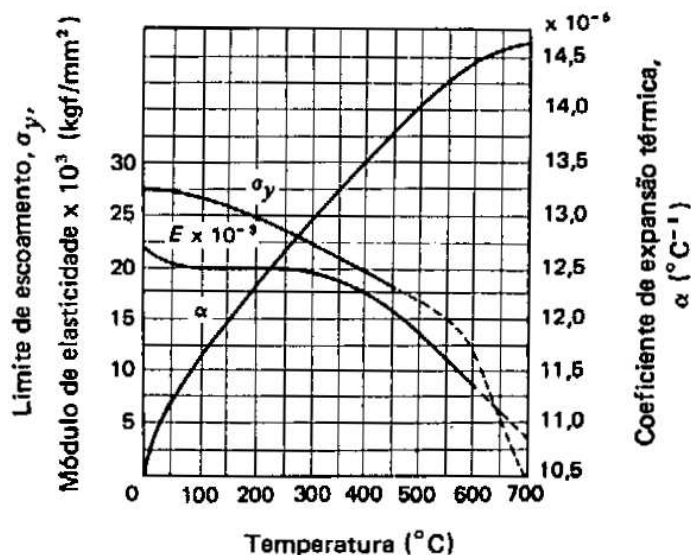
De acordo com Masubuchi (1991) classificam-se as deformações como o encolhimento do metal soldado após o resfriamento do cordão de solda e o material adjacente. As distorções angulares e distorções de flexão, por exemplo, são causadas por diferentes quantidades de expansão térmica e contração por meio da espessura da placa. Estas deformações são causadas por tensões de compressão no plano e, portanto, diferente dos outros tipos de deformação. Na prática estas várias formas de deformações podem ter lugar ao mesmo tempo, sendo difícil de distinguir entre as diferentes formas mostradas na figura 1. Diante dos vários modelos de distorções, os que mais ocorrem em painéis de seção fina são as deformações de flambagem distorcional.

2.3 Tensões residuais

A soldagem é a união de dois materiais durante a soldagem, segundo Okumura e Taniguchi (1982) o metal que é aquecido no local de sua solda causa expansões e contrações térmicas na passagem do cordão de solda, estas expansões são restringidas pelo metal adjacente a este local de solda, o qual está frio, causando assim as tensões de soldagem naquela região. Em contrapartida, o limite de escoamento do metal diminui e as tensões de restrição sofrem aumento relativo, a altas temperaturas. Como resultado, o metal é deformado plasticamente na zona de soldagem. Pode-se analisar a variação do limite de escoamento elástico e do coeficiente de expansão térmica na Figura 2. No gráfico da Figura 2 o coeficiente de expansão térmica (α) aumenta proporcionalmente com o aumento da

temperatura. O limite de escoamento (σ_y) diminui com o aumento da temperatura, tendo uma variação maior a partir de 550^o C. O Modulo de elasticidade do material diminui com o aumento da temperatura, semelhante ao limite de escoamento.

Figura 2: Diagrama de variação do limite de escoamento elástico e coeficiente de expansão térmica



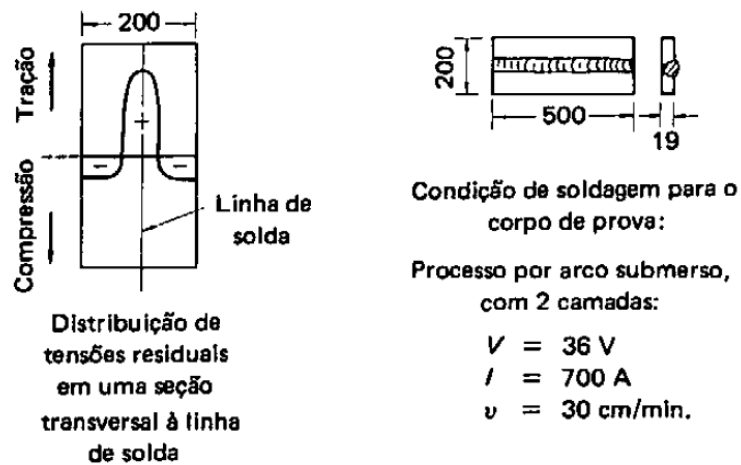
Fonte: OKUMURA E TANIGUCHI, (1982).

As tensões residuais são produzidas porque a deformação plástica permanece parcialmente entrando, assim, em equilíbrio elástico com as zonas adjacentes do cordão soldado. As tensões podem ser divididas em dois grupos:

- (a) Tensões residuais devidas a vínculos internos. No aquecimento e resfriamento do objeto soldado, criam-se tensões que são equilibradas por forças internas, ou seja, do local soldado com o metal adjacente a ele.
- (b) Tensões residuais devidas a vínculos externos. Quando o material é acoplado a outro objeto, após sua soldagem há tensões residuais externas. (OKUMURA E TANIGUSHI, 1982).

Nas Figuras 3 e 4 abaixo, estão ilustradas exemplos de tensões residuais internas e externas, respectivamente.

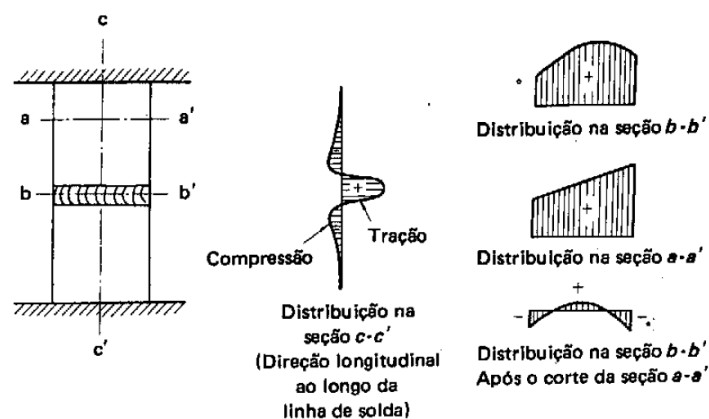
Figura 3: Ilustração de distribuição de tensão residual devidas a vínculos internos em juntas de topo



Fonte: OKUMURA E TANIGUCHI (1982).

Pela Figura 3 pode ser analisado, após o passe do cordão de solda, que criam-se tensões residuais de compressão e tração. Na linha de soldagem existem as maiores tensões residuais de tração, em contrapartida as tensões de compressão ocorrem no material adjacente do cordão.

Figura 4: Ilustração de distribuição de tensão residual devidas a vínculos externos em juntas de topo



Fonte: OKUMURA E TANIGUCHI (1982).

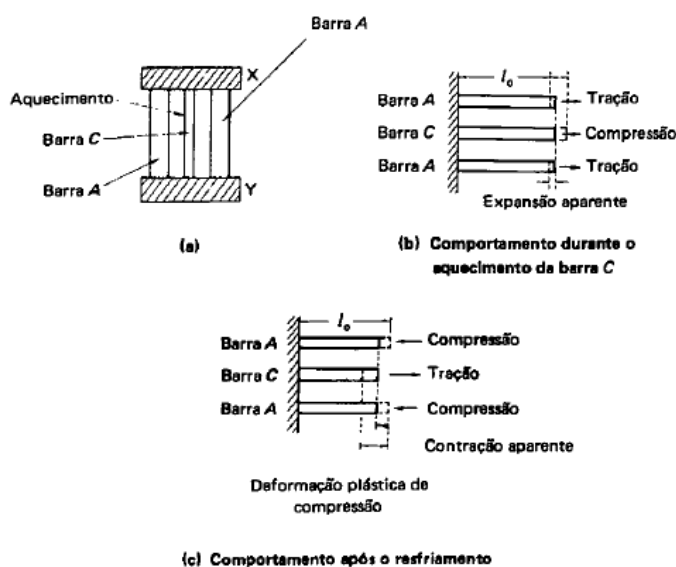
Pela figura 4, nota-se que a distribuição de tensões residuais para vínculos externos é igual a interna, sendo de tração na linha de solda e de compressão no material adjacente a soldagem.

Segundo Okumura e Taniguchi (1982), as tensões de compressão se desenvolvem em áreas a pequenas distâncias da linha de solda no metal base, para

equilibrar as tensões de tração. Estas tensões são causadas pela deformação plástica de compressão nas áreas de soldagem.

Na figura 5 abaixo, é ilustrado um exemplo do comportamento da tensão residual em um metal soldado. Para este experimento, há três barras ("A" e "C") o qual a barra "C" é aquecida e se expande termicamente em regime plástico. As duas barras "A" restringem a expansão, ocorrendo compressão na barra "C", enquanto as barras "A" irão permanecer no regime elástico. Quando resfriada a barra "C" tenderá a se contrair, com um deslocamento correspondente ao encurtamento plástico sofrido durante o aquecimento. No final do resfriamento, irá ter tensões de tração no elemento "C" enquanto nos elementos "A" irão ter tensões de compressão.

Figura 5: Exemplo do comportamento da tensão residual em um metal soldado



Fonte: OKUMURA E TANIGUCHI (1982).

Este é um exemplo para demonstrar como acontecem as tensões residuais durante a soldagem de dois elementos ou mais.

Alguns fatores que afetam o desenvolvimento das tensões residuais são apresentados abaixo:

- (a) Tensão de escoamento do material e seu comportamento em relação à temperatura;
- (b) Temperatura máxima de aquecimento;
- (c) Velocidade de resfriamento;
- (d) Vinculação externa;
- (e) Pré-aquecimento. (OKUMURA E TANIGUCHI, 1982)

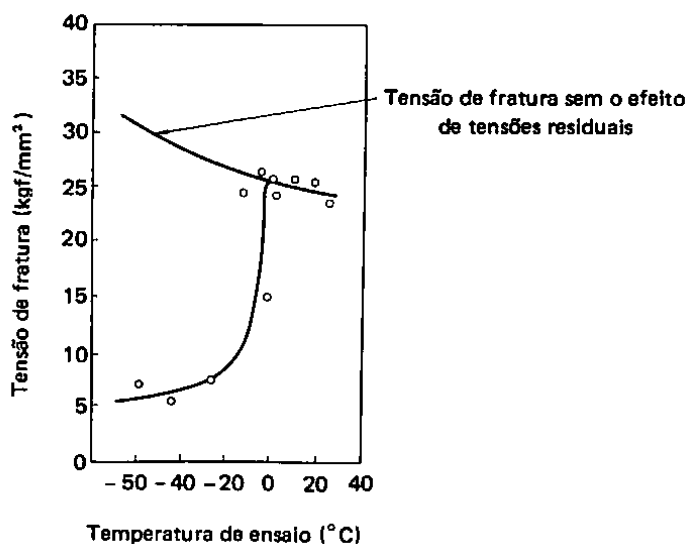
2.4 Efeitos das tensões residuais

Existem três tipos de efeitos predominantes com as tensões residuais segundo Modenesi (2008) e Okumura e Taniguchi (1982). Estes efeitos são de fratura frágil, fadiga e flambagem, o qual será detalhado a seguir.

2.4.1 Efeitos na fratura frágil

As fraturas frágeis são ocasionadas quando a deformação plástica é restringida, sendo ajudada com a presença de concentração de tensão. A figura 6 mostra a relação existente entre a temperatura de ensaio e a tensão de fratura na solda. Este teste foi realizado aplicando uma força no sentido longitudinal do modelo ensaiado, ocorrendo assim uma força de tração. Abaixo a ilustração do gráfico em fraturas frágeis.

Figura 6: Gráfico da relação entre temperatura de ensaio e a tensão de fratura na junta da solda



Fonte: OKUMURA E TANIGUCHI (1982).

Na presença de tensões residuais os valores de tensão de ruptura decrescem rapidamente com a diminuição da temperatura, enquanto sem efeito de tensão residual ela aumenta.

Segundo Modenesi (2008), existem outros fatores que influenciam a estrutura soldada com os efeitos de fratura frágil, os quais são:

- A peça soldada é monolítica, assim há maior probabilidade de trincas para a propagação da mesma;
- No local de solda ocorre um aumento do tamanho de grão, ou seja, alterações microestruturais características. Esta variação no cordão de solda em materiais de estrutura cristalina CCC diminui sua tenacidade;
- Na região de solda ocorrem defeitos que acarretam em pontos de concentração de tensão e pontos de iniciação da fratura, estes defeitos podem ser trincas, inclusão de escória e deficiência de fusão;
- Tensões residuais elevadas de tração existem na região de solda.

Estes fatores de aumento de tensões residuais devido a solda são suficientemente elevadas para a causa da fratura frágil. Além disto, estes fatores podem ser adicionados a tensões externas, aumentando sua fratura. Para a minimização destas causas, pode-se fazer o tratamento térmico para a minimização de tensões residuais e/ou refino da estrutura na região da solda. (MODENESI, 2008).

2.4.2 Efeitos das tensões residuais no limite de fadiga

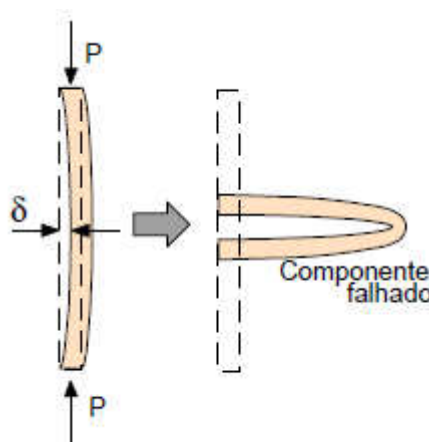
A fadiga em estruturas soldadas diminui na presença de tensões residuais de tração na direção do carregamento, enquanto aumenta se as tensões residuais forem de compressão. (OKUMURA E TANIGUCHI,1982 e MODENESI, 2008).

2.4.3 Efeito das tensões residuais na resistência à flambagem

Quando um painel estrutural é soldado ao longo de seu contorno, aparecerão tensões residuais de compressão na região central do painel, e é frequente a estrutura flambar apenas pelo efeito das tensões residuais. Mesmo que não haja uma pré flambagem, a estrutura poderá se tornar instável quando carregada com força de compressão. OKUMURA E TANIGUCHI (1982).

Na Figura 7 é ilustrado o carregamento de forças de compressão em um elemento e seu efeito de flambagem.

Figura 7: Esquematização de flambagem em uma placa



Fonte: MODENESI (2008)

Quando aplicada uma força de compressão, ocorre uma deflexão lateral na placa (δ), e quando atinge um valor crítico, levará a uma falha instável e deformação plástica na estrutura. O que pode reduzir a resistência à flambagem de uma estrutura são as regiões longe da solda, que têm tensões residuais de compressão. Além disso, distorções causadas por soldagem ou outros processos podem comprometer seriamente a resistência a flambagem.

2.5 Medidas das tensões residuais

Nos primórdios das pesquisas realizadas a respeito de tensão residual, as medições eram feitas através de técnicas destrutivas e em algumas vezes havia introdução de novas tensões durante o processo de análise. Com o desenvolvimento da pesquisa, os métodos de medição foram aprimorados e as incertezas provenientes das análises eram cada vez mais reduzidas. A busca por técnicas cada

vez mais completas fez com que os estudos alcançassem um nível muito bom. Atualmente, é pouco provável que uma única técnica de medição de tensões residuais abranja todas as situações, entretanto, a combinação entre elas irá convergir para um resultado satisfatório. (SUTERIO, 2005).

Segundo Okumura e Taniguchi (1982), as medidas das tensões residuais são normalmente efetuadas por meio de extensômetros, os quais, por sua vez, podem ter diferentes princípios de funcionamento. Assim, por exemplo, um extensômetro com comprimento "L", instalado em uma dada junta soldada, acusará um deslocamento "ΔL", quando aliviado. A relação " ΔL/L" indicará a deformação sofrida pelo material na direção em que o extensômetro foi instalado, de modo que a tensão residual poderá ser estimada pela equação abaixo:

$$\sigma = E \frac{\Delta L}{L} = E\epsilon \quad (2.1)$$

Onde a deformação é:

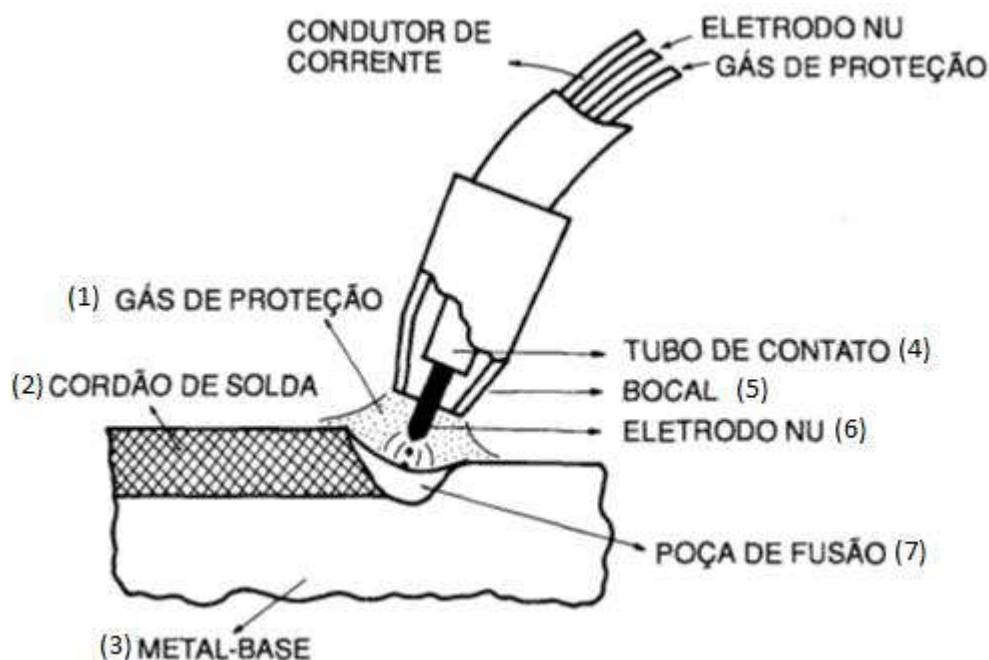
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

2.6 Conceitos do processo de soldagem MIG/MAG com adição de arame.

O processo MAG utiliza como fonte de calor um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás ativo. O processo MAG é adequado para muitos tipos de materiais, entre eles podem destacar: aços-carbono, aços de baixa, média e altas ligas, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas e cobre e ligas. (WAINER, EMILIO, 2004).

Na Figura 8, mostra-se esquematicamente o processo MAG, como os equipamentos, o eletrodo, gás aplicado na peça, a poça de fusão que acompanha durante a soldagem e o cordão de solda.

Figura 8: Processo de soldagem MAG



Fonte: WAINER, EMILIO (2004).

Segundo Wainer, Emilio (2004), na Figura 8 mostra-se o eletrodo nu (6) o qual é alimentado ao metal base (3) constantemente através de um alimentador motorizado, sendo o soldador responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além da movimentação da tocha ao longo da junta. Quando o eletrodo toca a peça, fecha-se o circuito e automaticamente abre o arco, iniciando o fluxo de gás protetor (1) e a alimentação do arame. Este gás de proteção é envolvido pelo bocal (5). Depois da formação da poça de fusão, o qual é a fundição do metal base no local da soldagem, a tocha é deslocada ao longo da junta com velocidade uniforme, podendo-se realizar movimentos de tecimento do cordão se necessário. O calor gerado pelo arco durante o processo é usado para a fusão das peças a serem unidas, sendo o arame transferido para a junta em forma de metal de adição. Este metal de adição quando fundido e transferido para o metal base é chamado de gota (por causa do formato). O cordão de solda (2) feito após a passagem da tocha é feito sem a formação de escória.

Segundo Wainer, Emilio (2004), descrevem as principais vantagens e limitações do processo MIG/MAG, que são mostrados abaixo:

Vantagens:

- Processo semi automático bastante versátil, podendo ser adaptado facilmente para soldagem automática;
- Eletrodo nu é alimentado continuamente;
- Pode ser executada em qualquer posição;
- Execução de soldagem muito elevada;
- Alta corrente na ponta do arame, havendo deposição de material elevada;
- Penetração na raiz do material base uniforme;
- Problemas de distorções e tensões residuais diminuídos;
- Possibilidade de controlar a penetração.

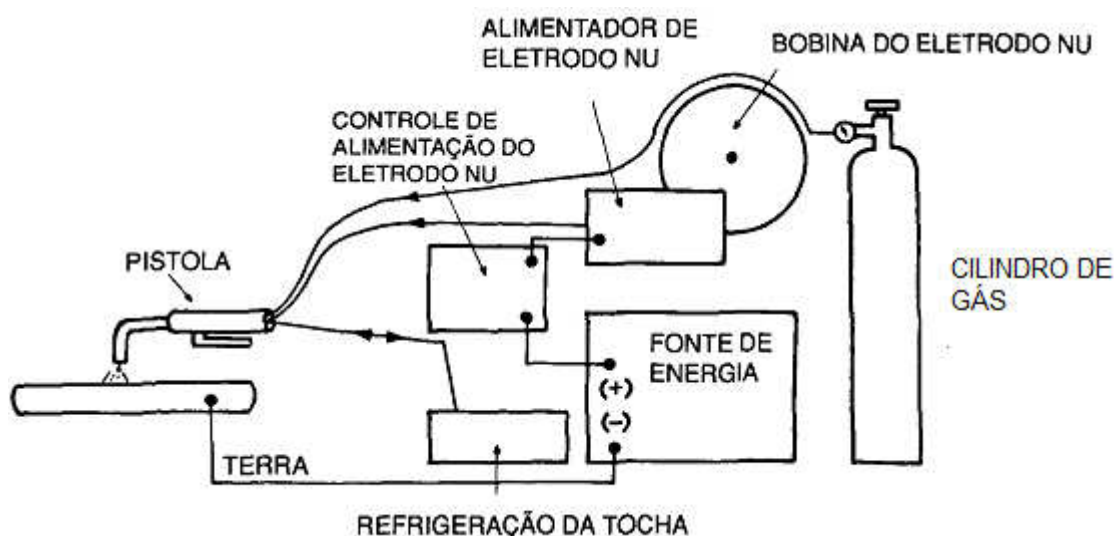
Limitações:

- Maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a ocorrência de trincas, principalmente no caso de aços temperados;
- A soldagem deve ser protegida de corrente de ar;
- Como o bocal da pistola precisa ficar próximo do metal base a ser soldado, a operação não é fácil em locais de acesso difícil;
- Projeções de gotas de metal líquido durante a soldagem;
- Equipamento de soldagem mais caro e complexo;
- Equipamento menos portátil por causa do tamanho. (WAINER, EMILIO, 2004).

2.6.1 Equipamentos empregados no processo MIG/MAG

Segundo Wainer, Emilio (2004), os equipamentos básicos para a soldagem MIG/MAG estão ilustrados na Figura 9 abaixo:

Figura 9: Esquema dos equipamentos para o processo MAG



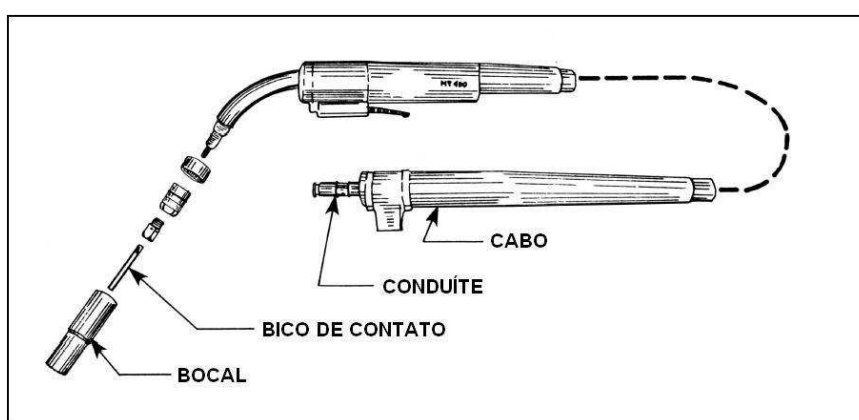
Fonte: WAINER, EMILIO (2004)

Este sistema basicamente é formado por uma fonte de soldagem, o qual pode ser de tensão constante ou corrente constante, sistema de alimentação de arame

eletrodo, tocha de soldagem, sistema de fornecimento de gás e um sistema de refrigeração da tocha.

A alimentação de arame eletrodo é composta pelo bocal, o qual envolve a saída do arame e o gás de proteção. Esta tocha tem o cabo de controle, que é acionada pelo botão de disparo que irá acionar o arame, saída do gás de proteção, eletrodo nu e também a energia elétrica. Pode-se analisar este boca pela Figura 10 demonstrada abaixo:

Figura 10: Tocha de soldagem manual do processo MAG



Fonte: CLEBER FORTES (2005)

Segundo Cleber Fortes (2005), o bico de contato é fabricado de cobre e é utilizado para conduzir a corrente até o arame e também para dirigir o arame até a peça. A conexão da fonte de soldagem até a tocha, e também o bico de contato, é feita pelo cabo de solda. A função do bocal é direcionar o fluxo de gás até a região de solda, variando este dependendo da corrente, se a corrente for alta, o bocal será grande, caso contrário, será pequena. O conduíte é conectado entre a tocha e as roldanas de alimentação.

2.6.2 Fonte de soldagem MIG/MAG

Fontes de corrente contínua e de tensão constante são empregadas na maioria dos casos de soldagem MIG/MAG. Esta fonte proporciona uma tensão do arco relativamente constante durante a soldagem. Esta tensão determina o comprimento do arco. Quando ocorre uma variação brusca da velocidade de alimentação do arame, ou uma mudança momentânea da tensão do arco, a fonte

aumenta ou diminui abruptamente a corrente (e, portanto, a taxa de fusão do arame) dependendo da mudança no comprimento do arco. A taxa de fusão do arame muda automaticamente para restaurar o comprimento original do arco. Como resultado, alterações permanentes no comprimento do arco são efetuadas ajustando-se a tensão de saída da fonte.

2.6.3 Gases de proteção

Na soldagem MIG/MAG, a variação entre MIG e MAG é pelo tipo de gás de proteção utilizado. Para a soldagem MIG (Metal Inert Gas), é utilizado gás inerte, sem a reação com o metal de adição e o metal base. Os principais gases utilizados são o Argônio (Ar) e Hélio (He). A soldagem MAG (Metal Active Gas), utiliza gases com Oxigênio, podendo ele ser na forma de O₂ (Oxigênio) ou CO₂ (Dióxido de Carbono).

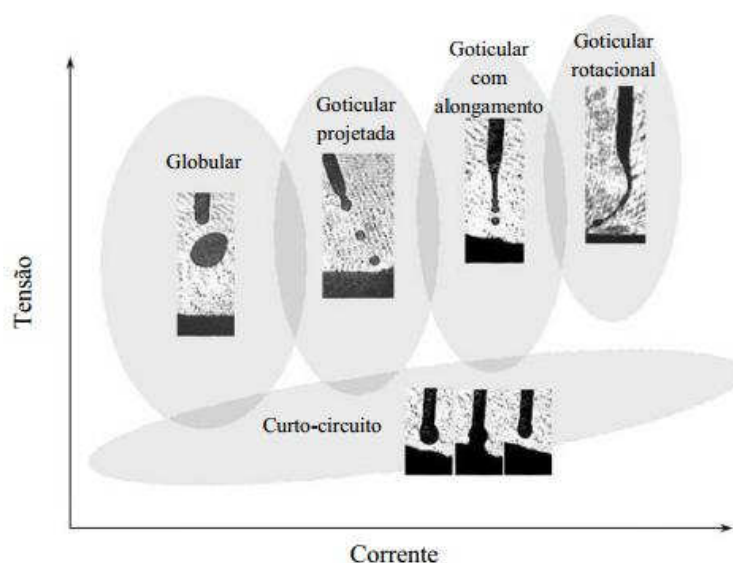
Segundo Okumura e Tanigushi (1982), para a soldagem de aço-carbono, a combinação de gases é feita com Argônio e dióxido de carbono, podendo variar a quantidade de dióxido de carbono entre 20 à 50 %.

2.6.4 Formas básicas de transferência metálica

Na soldagem MIG/MAG, existem algumas formas de transferências metálicas. Estas transferências variam de acordo com a tensão e corrente aplicadas no material de adição. Pode ser classificadas por transferência de voo livre (a gota não tem contato com o arame e a poça de fusão) ou então por curto-circuito (a gota está em contato com o arame e a poça de fusão). (PONOMAREV, V., 2009).

Mostra-se na Figura 11 esquematicamente os campos operacionais das principais formas de tranferências, dependentes da tensão e corrente aplicadas na soldagem.

Figura 11: Esquema dos campos operacionais na transferência metálica na soldagem GMAW



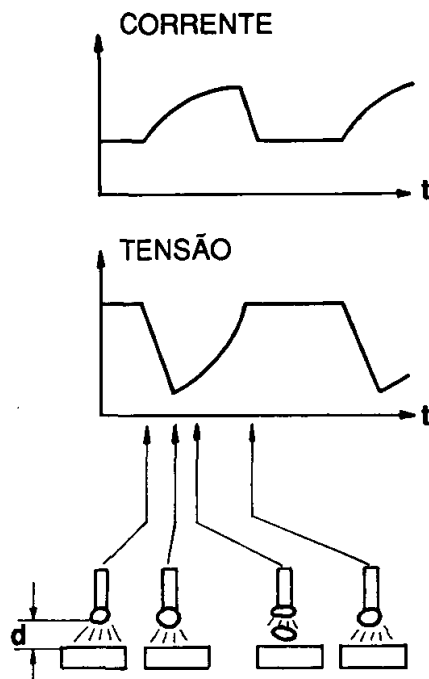
Fonte: JESÚS, E. LOPERA (2010)

- **Transferência globular**

Ocorre para valores intermediários de corrente e tensão. Pode ser utilizado qualquer tipo de gás de proteção, especialmente para CO₂ e hélio. A gota que se forma na ponta do eletrodo tem o diâmetro maior que o arame, assim resultando na dificuldade em soldar fora da posição plana. A quantidade de calor colocada na peça a ser soldada tem um valor intermediário, comparando com os outros modos de transferência. Esse tipo de transferência pode gerar falta de penetração, falta de fusão e/ou reforço do cordão de solda excessivo. (WAINER, EMILIO, 1992).

A Figura 12 mostra a variação da corrente e tensão desde a formação da gota até a deposição no material base. Primeiramente a corrente fornecida para este tipo de transferência é baixa. Na formação globular é mantida a corrente e tensão constante, quando há o descolamento da gota de solda, sua corrente aumenta e a tensão diminui. Para a formação da próxima gota, sua corrente e tensão voltam aos valores originais.

Figura 12: Variação tensão e corrente de soldagem na transferência globular



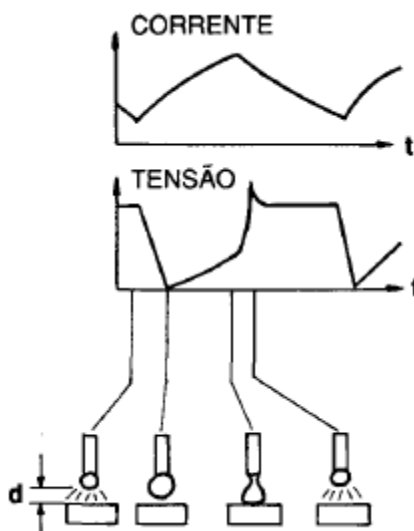
Fonte: WAINER, EMILIO (1992).

- **Transferência por curto-circuito**

A transferência por curto-circuito ocorre para eletrodos nus de diâmetros menores que os convencionais (0,8 a 1.2 mm), para valores mais baixos de tensão que a transferência globular e utilizada para qualquer tipo de gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu toca a poça de fusão, formando um curto-circuito. A gota é puxada para a poça de fusão pela tensão superficial desta e, por isso, este modo de transferência é adequado para todas as posições. A quantidade de calor colocada na peça é bem menor que a transferência globular, sendo assim recomendado para soldar chapas finas. A penetração não é muito grande e existe problema de respingo e instabilidade do arco. (WAINER, EMILIO, 1992).

A Figura 13 mostra a variação da tensão e corrente na transferência metálica. A corrente durante a deposição do metal de adição nunca é constante, ela diminui no início da formação da gota enquanto aumenta no seu descolamento até o curto-circuito, quando a gota encosta na poça de fusão. A tensão é similar a tensão de transferência globular, mudando somente antes do curto-circuito, o qual vai a tensão quase a zero.

Figura 13: Esquema da transferência metálica por curto-circuito, mostrando o comportamento da tensão e corrente de soldagem durante a transferência



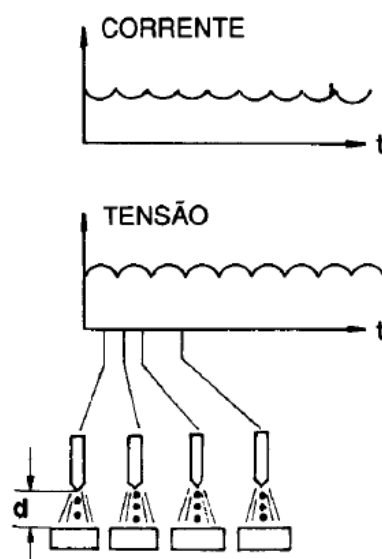
Fonte: WAINER, EMILIO (1992).

- **Transferência goticular**

A transferência goticular conhecida também por spray ocorre basicamente com gases de proteção a base de argônio e com eletrodo positivo. O modo é caracterizado por pequenas gotas uniformes de forma sequencial, em alta frequência. O diâmetro das gotas de transferência goticular é menor que o diâmetro do eletrodo. Durante o processo a transferência apresenta uma elevada estabilidade do arco, de maneira que a corrente e a tensão não apresentam variações significativas. Com o aumento da corrente o tamanho das gotas em transferência se reduz e a frequência de destacamento aumenta. (SCOTTI, 2000 e PONOMAREV, 2008).

A corrente e tensão deste tipo de transferência podem ser analisados na Figura 14 a seguir, a qual não mostra variações significativas durante a solda.

Figura 14: Esquema de transferência goticular, mostrando o comportamento da tensão e da corrente de soldagem



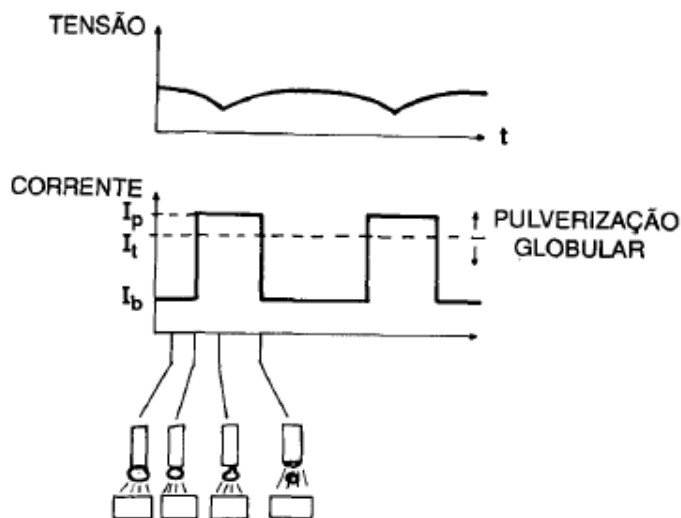
Fonte: WAINER, EMILIO (1992).

- **Transferência com arco pulsado**

Na transferência por arco pulsado o equipamento de soldagem gera dois níveis de corrente. No primeiro, a corrente de base (I_b) é tão baixa que não há transferência, mas somente o início da fusão do arame. Na segunda etapa, a corrente de pico (I_p) é superior à corrente de transição globular/pulverização (I_t), ocasionando a transferência de uma única gota. Com isso consegue-se uma transferência com características de pulverização, porém com uma corrente média menor. A corrente de calor transferida na peça é menor que a da pulverização axial convencional, por isso, pode ser soldadas espessuras bem menores e consegue-se soldar em todas as posições. (WAINER, EMILIO, 1992).

A Figura 15 mostra esquematicamente a transferência metálica. O destacamento da gota é na transição da corrente I_p para I_b , sendo uma única gota por pulso de corrente.

Figura 15: Esquema do modo de transferência por arco pulsado.



Fonte: WAINER, EMILIO (1992).

2.7 Técnicas de sequência de deposição e sequência de soldagem

2.7.1 Técnicas de sequência de deposição

As técnicas de sequência de solda são cruciais para a minimização de distorções e tensões residuais, o qual influencia diretamente o comportamento da junta. Com isto, é necessário estabelecer certos parâmetros de solda, sabendo os tipos de sequência existentes com suas características principais para aproveitar ao máximo na execução. (OKUMURA E TANIGUCHI, 1982).

Segundo Okumura e Tanigushi (1982), existem algumas sequências de deposição dos passes e cordões, como, por exemplo, da deposição de um cordão de um só passe, que podem ser empregadas sequências com passes corridos, simétricos, orientados, progressivos ou ainda a ré. Estes modelos serão mencionados abaixo:




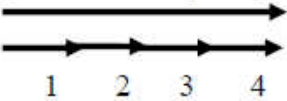


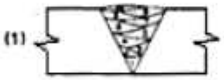
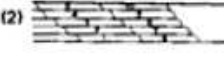
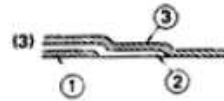
- (1) Sequência corrida: a solda se inicia em uma extremidade da junta e prossegue de modo contínuo até a outra extremidade. São utilizadas em passes curtos com um só cordão e em processos automáticos.
- (2) Sequência com passes a ré: os diferentes trechos do cordão são executados no sentido oposto ao da progressão da soldagem, de tal maneira que o cordão seguinte sempre termina no ponto onde se iniciou o cordão anterior. Com isto consegue-se uma distribuição mais uniforme de tensões residuais e baixos níveis de distorção.
- (3) Sequência simétrica: consiste em dividir ao meio o comprimento total da junta e soldar simetricamente, a partir do centro para as extremidades. Ela é

recomendada quando são necessários baixos níveis de distorções residuais.

- (4) Sequência com passes orientados: consiste em uma técnica em que vários trechos do cordão são espaçados uns dos outros segundo uma orientação previamente estabelecida, sendo posteriormente unidos para formar o cordão desejado. A eficiência deste processo é mais baixa que as demais, mas permite uma distribuição bem mais uniforme das tensões e distorções residuais.
- (5) Progressão por passes corridos: cada passe do cordão é continuamente depositado ao longo de toda a extensão da junta. Esta operação pode causar trincas na raiz, principalmente na soldagem de estruturas pesadas.
- (6) Progressão em cascata: combinação com técnicas de passes a ré, e tem a vantagem de não provocar grandes defeitos na junta soldada.
- (7) Progressão em blocos: executa trechos do cordão por meio de vários passes sem completá-los necessariamente. Este processo é muito útil quando se deseja evitar a ocorrência de trincas na raiz da solda. Pode ser combinado com diferentes tipos de passes, como os corridos, orientados, a ré, etc. (OKUMURA E TANIGUSHI, 1982).

Estes tipos de soldagem de deposição podem ser analisados na Figura 16, o qual mostra esquematicamente todos os modelos.

Figura 16: Ilustração de seqüência de deposição do cordão da solda

Classificação	Esquemas Explicativos	Denominação Usual
(a) Classificação pela direção da soldagem	(1) De uma extremidade à outra (passe corrido) 	Seqüência Corrida
	(2) Do centro para as extremidades 	Seqüência simétrica
	(3) Passes intercalados 	Passes orientados
(b) Classificação pela direção da soldagem e pela direção da progressão	(1) Mesma direção e progressão de soldagem  Direção de soldagem Direção de progressão	Passes progressivos
	(2) A direção e a progressão de soldagem são opostas.  Direção de soldagem Direção de progressão	Passes a ré ou em recuo
(c) Classificação pela seqüência de deposição	(1) Seqüência de deposição dos passes em um cordão de múltiplos passes.  Deposição por passes corridos	Passes corridos Tecimento
	(a) Os passes são depositados em seqüência, através de passes corridos  Deposição por passes corridos	Deposição por passes corridos
	(2) Progressão de deposição em cordão de múltiplos passes (b) Cada bloco é totalmente executado antes de se iniciar o bloco seguinte  Progressão em blocos	Progressão em blocos
	(c) Um passe inicial central é depositado e prosseguem-se a soldagem longitudinalmente em ambas as direções  Progressão em cascata	Progressão em cascata

2.7.2 Técnicas de sequência de soldagem

Segundo Okumura e Taniguchi (1982), o estabelecimento da sequência de soldagem deve estar intimamente relacionado à sequência de montagem. A sequência de soldagem, além de fazer um método que minimize as tensões e distorções, deve ser viável economicamente. Existem algumas regras que devem ser seguidas na soldagem, as quais são:

- (1) Quando há muitas juntas a serem soldadas no mesmo plano, deve-se tentar manter as extremidades livres;
- (2) Soldam-se primeiramente as juntas que tem a maior possibilidade de distorção;
- (3) Soldar os cordões simetricamente em relação ao eixo neutro do conjunto estrutural. (OKUMURA E TANIGUSHI, 1982).

Para que uma peça seja soldada com métodos bem sucedidos, deve-se ter a distribuição do metal de solda em diferentes pontos da montagem, fazendo com que uma estrutura contraia em um ponto e se contrapõem as forças internas de contração da solda já realizada. O objetivo disto é balancear as contrações através da sequência dos passes para provocar a interação interna na peça trabalhada. (AWS, 1987 e FBTS, 2000)

Além das regras estabelecidas por Okumura e Taniguchi (1982), Lucas (1988) estabeleceu outros parâmetros para a influência das distorções na soldagem, as quais são:

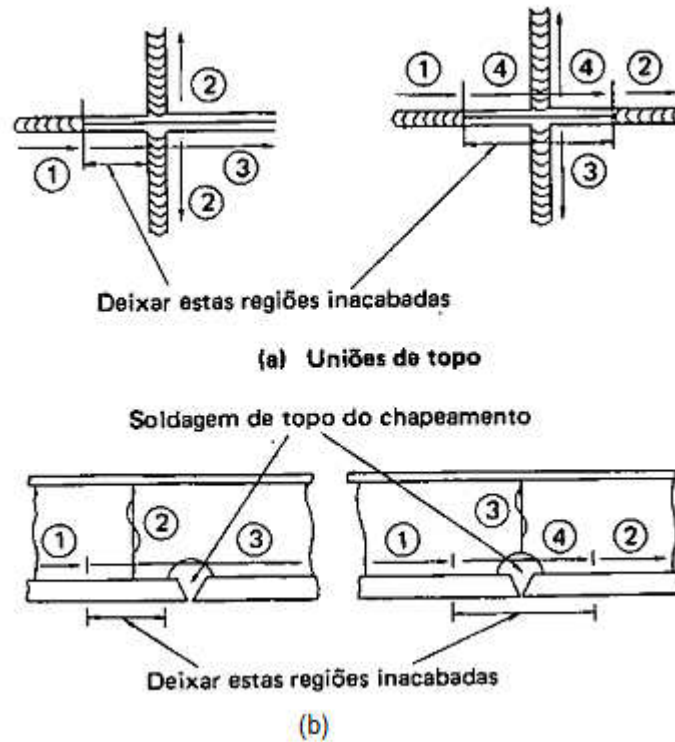
- (1) Restringir os movimentos da peça devido a transferência de calor de solda;
- (2) Minimizar o período de tempo entre os passes;
- (3) Minimizar o volume do cordão de solda;
- (4) Balancear a soldagem em torno do eixo neutro. (LUCAS, 1988).

Por meio do balanceamento das tensões, a estrutura sofre menores consequências devido à compensação de esforços já alcançados, sem a correção por métodos posteriores à conclusão da solda.

Segundo Okumura e Taniguchi (1982) nem sempre é possível seguir as regras enumeradas por causa de algumas inconveniências de construção. Com isto, pode-se manipular a situação deixando muitas vezes inacabados trechos de juntas que apresentam pequenos níveis de contração nas proximidades das outras juntas, terminado elas no final da soldagem da peça. As Figuras 17(a) e 17(b) abaixo

ilustram estes tipos de situações, o qual nas junções de reforços soldados não é aplicado à solda, somente após a finalização da estrutura.

Figura 17: Exemplos de sequências de soldagem em união mista com diferentes graus de contração

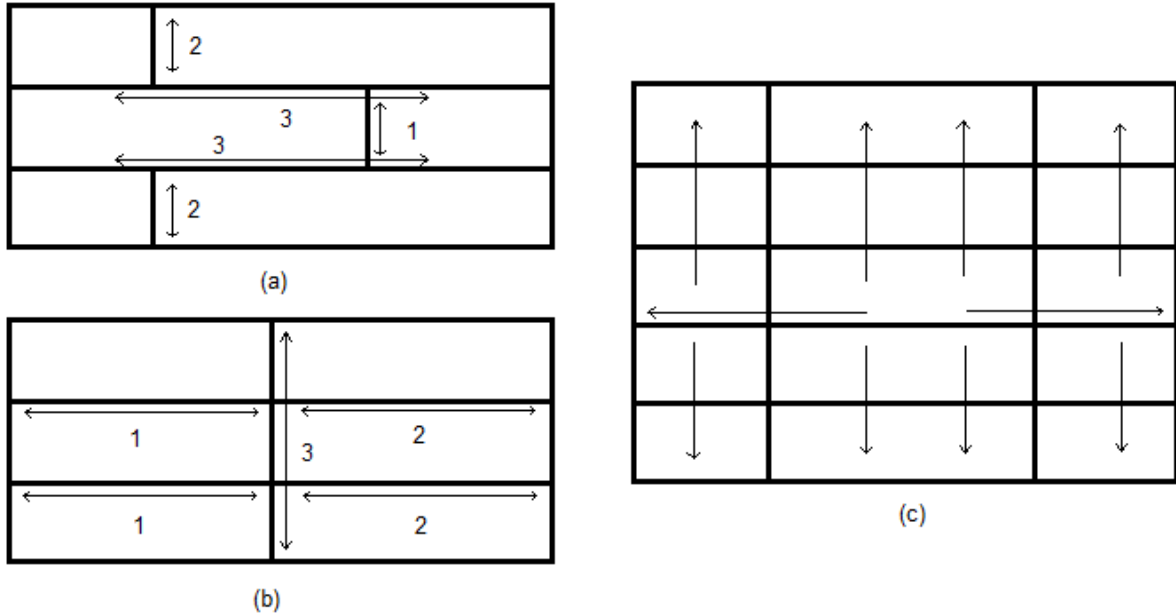


Fonte: OKUMURA E TANIGUSHI (1982)

Na Figura 17(a) pode-se ver que no cruzamento dos cordões de solda não foi soldado completamente, terminando a soldagem somente após o processo de todas as sequências pré-estabelecidas. Este procedimento minimiza os efeitos das distorções, tanto em reforços soldados ou em placas unidas pela solda.

Outros exemplos de aplicação das regras básicas são mostrados na Figura 18.

Figura 18: Exemplos de seqüência de soldagem na união de chapas (a) e (b), e de painéis enrijecidos (c)



Fonte: OKUMURA E TANIGUSHI (1982)

Na Figura 18 são mostrados alguns tipos de seqüência de soldagem, que variam a partir do sentido de soldagem do cordão e da seqüência de soldagem de cada cordão.

CAPÍTULO III - METODOLOGIA E MATERIAIS EMPREGADOS

3.1 Metodologia

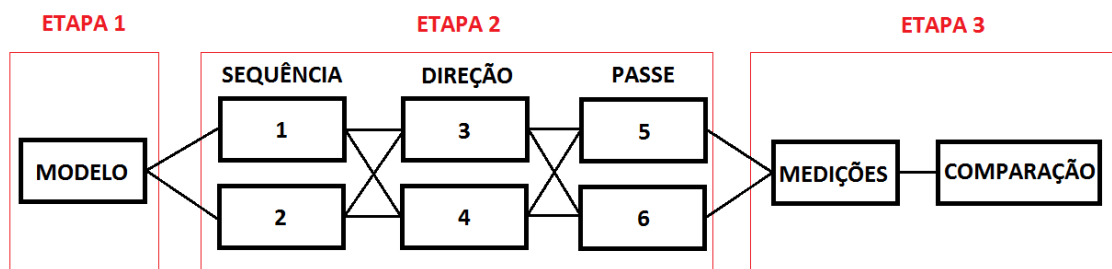
Esta metodologia foi desenvolvida para analisar os métodos de sequência de soldagem e verificar qual combinação de aspectos de soldagem acarretam nas menores distorções em placas enrijecidas. Para a realização deste trabalho, e para possibilitar uma comparação entre execuções, é necessário estabelecer os parâmetros a serem empregados na soldagem GMAW. Foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Valor de tensão igual, para que tenha a mesma energia transferida na soldagem;
- Padronizar o comprimento de cordão com o mesmo comprimento;
- Mesmos eletrodos, gás de proteção e material das placas;
- Mesmo ângulo de trabalho para ter a mesma penetração no metal base;
- Relação de material de adição igual para cada placa enrijecida.

3.2 Planejamento experimental para análise das distribuições dos painéis

Para simplificar e organizar o trabalho, foi dividido os experimentos em três etapas para o procedimento experimental. A primeira etapa é o modelo que será trabalho. A segunda etapa é como serão soldados os cordões na placa enrijecida, os quais são as sequências, sentidos e passes na soldagem dos experimentos. A terceira, e última, etapa serão feitas medições e comparações entre os modelos testados. Estas etapas serão mais detalhadas em seguida. Na Figura 19, ilustra-se as etapas seguidas.

Figura 19: Ilustração das etapas seguidas na metodologia dos experimentos



Fonte: arquivo pessoal

Na Figura 19, os números 1, 2, 3, 4, 5 e 6 são demonstrados na legenda abaixo.

Legenda:

- Sequência de soldagem:
 - 1 = Primeira sequência;
 - 2 = Segunda sequência.
- Direção de solda:
 - 3 = Fora para dentro;
 - 4 = Dentro para fora.
- Passe de cordão:
 - 5 = Passe corrido;
 - 6 = Passe a ré.

- **Etapa 1 Modelo para o experimento**

Para o teste experimental, foi feito um modelo reduzido de uma placa reforçada, simulando o fundo duplo de um navio, com reforço longitudinal e transversal comparado com painéis enrijecidos usados na indústria naval. Na Figura 20 mostra o bloco do fundo duplo de um navio de aço construído com os reforços para dar sua sustentação a estrutura.

Figura 20: Ilustração de montagem do uma unidade de bloco de navio de aço



Fonte: arquivo pessoal

Para que possa ser exemplificado melhor, mostra-se a estrutura do fundo duplo desenhado em duas dimensões na Figura 21. A estrutura do modelo que será trabalho foi destacado em vermelho na próxima imagem.

Figura 21: Ilustração do fundo duplo em duas dimensões com o destaque da estrutura para o experimento



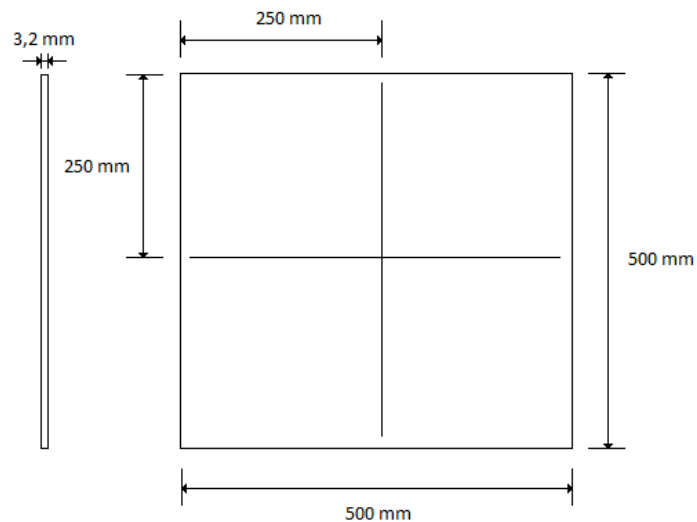
Fonte: arquivo pessoal

Estas placas enrijecidas para a construção do fundo duplo dos navios são muito grandes, em média são de pelo menos 10 metros de comprimento. Para facilitar os experimentos para este trabalho, decidiu-se fazer uma maquete de um modelo reduzido similar ao verdadeiro, assim há condições de realizarem-se os ensaios no estaleiro. Em relação à parte do fundo duplo que será reduzido para os

experimentos, foi escolhido este formato pelo de ter cordões de solda longitudinais e transversais.

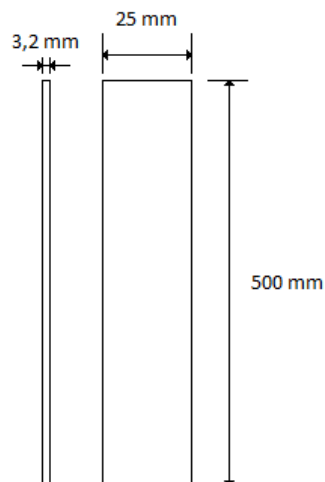
O modelo é composto por uma chapa metálica quadrada de 500 mm de comprimento e dois reforços, sendo um longitudinal e um transversal. A espessura tanto da chapa quanto dos reforços são 1/8" (3,2 milímetros). Na Figura 22 e 23 a seguir, mostram-se as dimensões estipuladas.

Figura 22: Ilustração do modelo reduzido usado nos testes



Fonte: arquivo pessoal

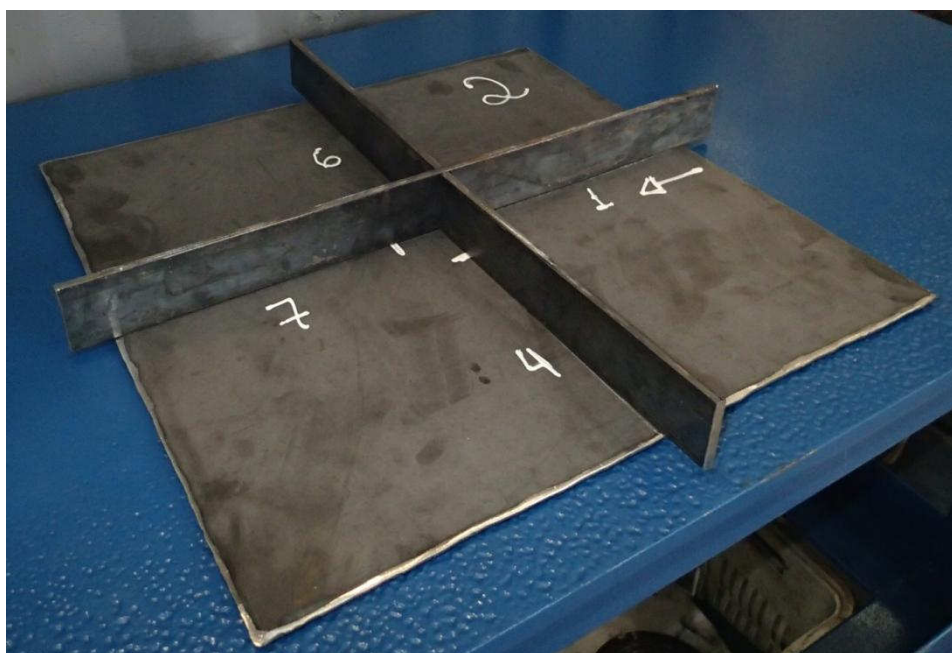
Figura 23: Ilustração da vista lateral do reforço da placa enrijecida



Fonte: arquivo pessoal.

Este modelo foi desenvolvido no estaleiro com a ajuda de funcionários, sendo um ajudante do setor de acessórios para o corte das chapas e um soldador para a execução dos cordões de solda. Abaixo na Figura 24 segue o modelo montado antes da aplicação da soldagem.

Figura 24: Ilustração do modelo reduzido para os experimentos de soldagem



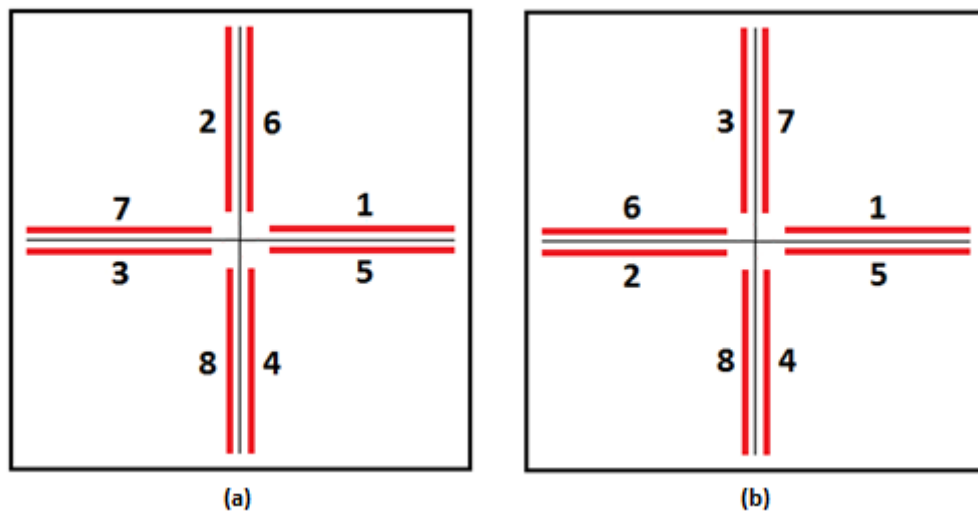
Fonte: arquivo pessoal.

- **Etapa 2 Sequência, direção e passe do cordão de solda.**

- Sequência de soldagem

Quando há uma soldagem com mais de um cordão a soldar, é necessário fazer uma sequência de soldagem pré-estabelecida. No experimento feito, escolheu-se dois tipos de sequência de soldagem segundo Okumura e Taniguchi (1982). A primeira sequência foi utilizada para depositar os cordões de solda ao redor do painel como se fosse uma espiral. A sequência dois foi escolhida de modo que as soldagens com números pares fossem em sentido oposto aos cordões de números ímpares, ou seja, ocorrendo um eixo normal na sequência. Com este método, cada quadrante do painel pode expandir com maior mobilidade. Na Figura 25 são ilustradas as duas sequências estabelecidas.

Figura 25: Ilustração das duas seqüências estabelecidas. (a) primeira seqüência; (b) segunda seqüência.

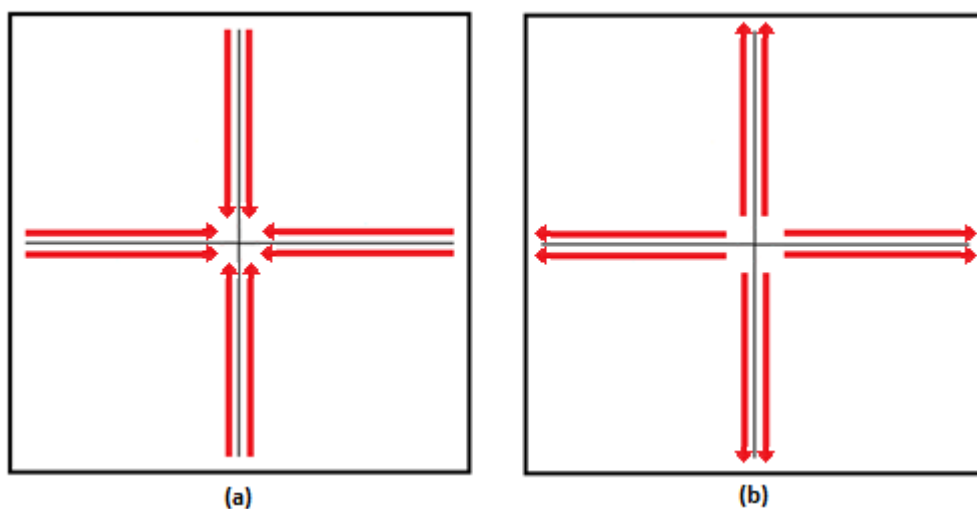


Fonte: arquivo pessoal

➤ Direção do cordão de solda

Para o sentido de soldagem dos cordões, estabeleceram-se dois sentidos. O primeiro é a soldagem da borda da chapa metálica para o centro do quadrado, como pode ser visto na Figura 26 (a) a seguir. O segundo sentido é o oposto do primeiro, ou seja, do centro da chapa metálica até a borda sua borda, assim como na Figura 26 (b) abaixo.

Figura 26: Ilustração dos sentidos de soldagem no modelo reduzido

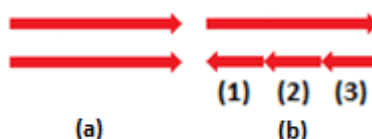


Fonte: arquivo pessoal

➤ Passe do cordão de solda

O passe do cordão de solda é a maneira que vai ser soldado o cordão. Para este processo foram estabelecidos dois passes, o passe contínuo e o passe a ré. No passe contínuo (Figura 27 (a)) é executado o cordão do começo ao fim sem interrupção. No passe a ré (Figura 27 (b)) foi dividido o comprimento do cordão em três partes iguais. O procedimento da soldagem, baseando-se pela figura, começou pelo cordão número 1. Após a finalização deste cordão, começa a execução do cordão número 2, o qual termina no ponto inicial do cordão número 1, e assim sucessivamente para o cordão número 3. Na Figura 27 está ilustrado o sentido do cordão (linha superior) e como é soldado (linha inferior).

Figura 27: Passe do cordão contínuo (a) e passe a ré (b)

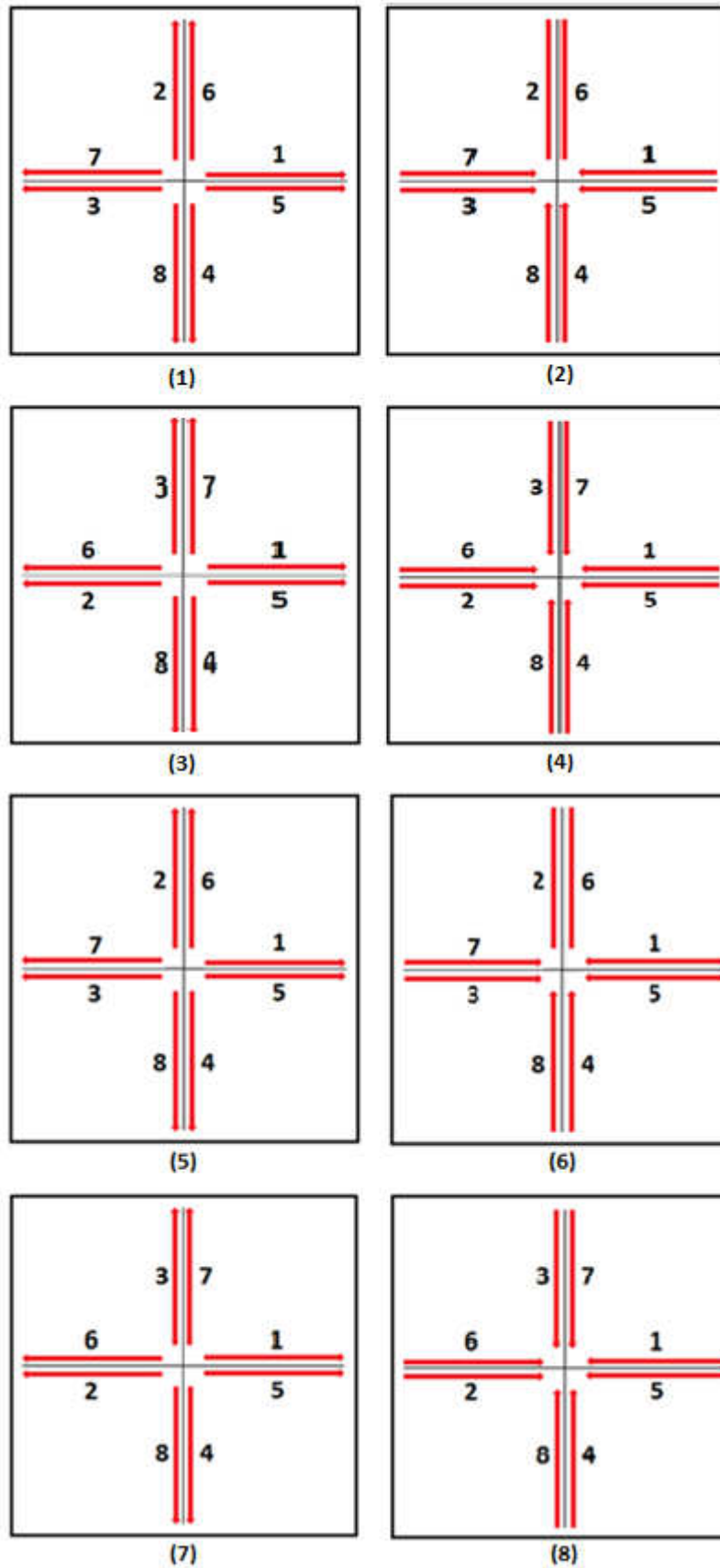


Fonte: arquivo pessoal

➤ Sequência dos testes nos modelos

Diante da sequência de soldagem, sentido e passes de soldagem, foram estabelecidos os testes nos modelos construídos. Como visto nos tópicos passados, serão duas sequências de soldagem, dois sentidos e dois passes de cordão de solda. Assim, os testes foram empregados com todas as possibilidades possíveis, totalizando em oito ensaios. A Figuras 28 apresenta as sequências dos experimentos.

Figura 28: Sequências de soldagem dos testes para os experimentos 1 ao 8



Fonte: arquivo pessoal

Os detalhes de cada teste realizado são mostrados na tabela 1.

Tabela 1: Ilustração da sequência, sentido e passe de cada experimento

TESTE	SEQUÊNCIA	SENTIDO	PASSE
1	1	4	5
2	1	3	5
3	2	4	5
4	2	3	5
5	1	4	6
6	1	3	6
7	2	4	6
8	2	3	6

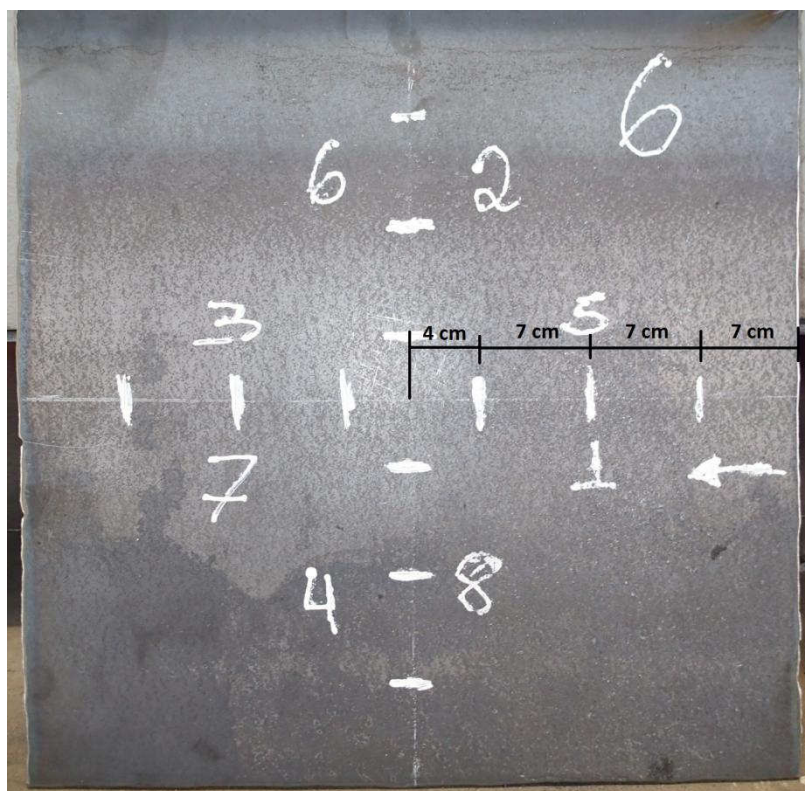
LEGENDA	
1	SEQUÊNCIA 1
2	SEQUÊNCIA 2
3	FORA PARA DENTRO
4	DENTRO PARA FORA
5	PASSE CONTÍNUO
6	PASSE A RÉ

Fonte: arquivo pessoal.

➤ Tamanho do cordão de soldagem

Primeiramente, o afastamento da solda entre o ponto central da chapa e o começo do cordão é de 40 mm. Quando o cordão for contínuo, seu tamanho é de 210 mm. Para o passe a ré, foi feito três divisões com cada um no tamanho de 70 mm. Na Figura 29 a seguir, mostram-se as marcações na chapa metálica do cordão de solda para ter referência na hora da execução da soldagem.

Figura 29: Ilustração das marcações para o cordão de solda na chapa metálica



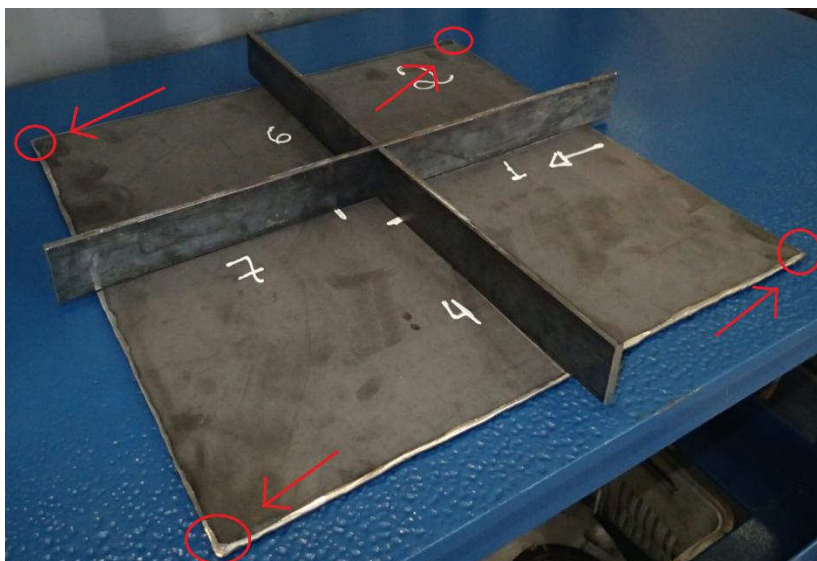
Fonte: arquivo pessoal.

- **Etapa 3 Medição das distorções**

Para a análise das distorções nas placas soldadas, foram feitas medições para que haja a possibilidade de comparações entre cada método executado. Para isto, nos pontos marcados na Figura 30 será realizada a tomada dos valores de distorções.

Foram escolhidos estes pontos porque é onde ocorre o maior nível de distorções (empenamentos) sendo, assim, onde se terá a maior facilidade de comparação entre as amostras.

Figura 30: Ilustração dos pontos de medição das distorções nas placas



Fonte: arquivo pessoal.

As distorções serão medidas verticalmente em relação à mesa até os pontos da placa após seu resfriamento. Já que podem ocorrer distorções das placas antes da soldagem pelo fato de serem cortadas a quente ou por já estarem distorcidas, suas distorções foram medidas antes e após o processo, sendo a distorção considerada a variação destas duas medições. As medidas foram obtidas com um paquímetro com a resolução de 1/20 mm. Usou-se paquímetro para as medições pelo fato de ser o equipamento disponível na empresa. Na Figura 31 mostra um exemplo, da distorção, medido.

Figura 31: Ilustração da distorção para a medição dos experimentos



Fonte: arquivo pessoal.

3.3 Materiais utilizados

Para a utilização dos ensaios de soldagem nos modelos, foram utilizados equipamentos de soldagem MIG/MAG, o qual inclui uma fonte de soldagem e alimentador de arame, tocha de soldagem, mesa de operação e o gás de proteção. A seguir são descritos tecnicamente estes equipamentos.

3.3.1 Fonte de soldagem e alimentador de arame

A fonte de soldagem foi da marca ESAB modelo LAI 550 P. A descrição do alimentador de arame é do modelo *Origo Feed 302 P1*. A Figura 32 mostra os equipamentos utilizados no trabalho.

Antes de estabelecer a tensão e corrente para os modelos empregados foi testado em um modelo teste para analisar as melhores medidas de tensão e corrente. Com isto, foi estabelecido uma tensão entre 27 V e 28 V e uma corrente de 170 A.

Figura 32: Alimentador de arame (a) e a fonte de soldagem (b)



Fonte: arquivo pessoal.

3.3.2 Tocha de soldagem

A tocha de soldagem utilizada no trabalho é da marca SUMIG, o seu modelo é a tocha MIG/MAG SU 325. Esta tocha tem isolamento térmico e elétrico e punho ergonômico. Pode-se usar para trabalhos leves em geral, aço carbono, alumínio e

inox. Quando utilizado gás de proteção de argônio e misturas, o qual foi utilizado, sua corrente suporta até 260 A. O arame utilizado para esta tocha pode variar de 0,80 mm até 1,20 mm, no trabalho foi utilizado arame de 1,2 mm. Os testes nos modelos foram feitos com um ângulo de inclinação entre a tocha e a base da placa enrijecida de 45 graus. Na Figura 33 mostra-se a tocha utilizada.

Figura 33: Ilustração do modelo da tocha utilizada nos experimentos



Fonte: arquivo pessoal.

3.3.3 Gás de proteção

No estaleiro em que foi feito os testes, só tem um tipo de modelo de gás de proteção, assim, foi este empregado. O modelo é o C25, uma mistura de dióxido de carbono em argônio. Seu nome comercial é o *AirMag* e sua concentração é de 75% de argônio e 25 % de dióxido de carbono. Na área de trabalho há a instalação de tubulações para o abastecimento de gás de proteção. Com este gás de operação, o processo de soldagem é o MAG (Metal Active Gas), a utilização do dióxido de carbono para melhorar a estabilidade do arco, diminui a ocorrência de respingos e aumenta a penetração.

3.3.4 Arame de soldagem

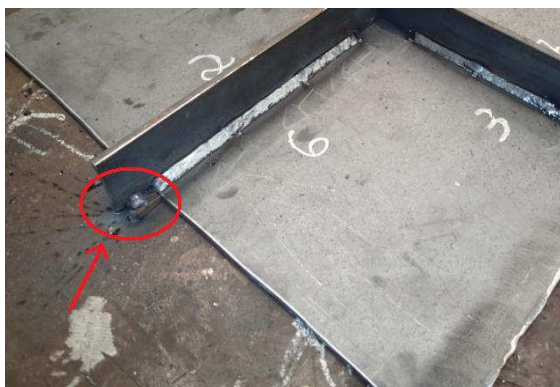
O arame de soldagem utilizado nos testes é o E71T1M, este arame pode ser utilizado em todas as posições. O material de deposição foi disponível em diâmetro de 1,2 mm. Este metal de solda é de boa qualidade com baixo nível de hidrogênio difusível.

3.4 Fixação dos modelos testados

Para não ocorrer o empenamento e deslocamento dos reforços soldados nas chapas metálicas, foi necessária a fixação do modelo na mesa de soldagem.

A fixação foi feita com pontos de solda entre as extremidades dos reforços e a mesa nos 4 (quatro) lados do modelo. Esta fixação é mostrada na Figura 34.

Figura 34: Ilustração da fixação do modelo soldado



Fonte: arquivo pessoal

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Preparação para os experimentos

Para o início dos experimentos, foi necessário testar um dos modelos para ter certeza se o painel iria ter medidas de distorções significativas para a análise de todas as sequências empregadas. No primeiro caso, testou-se o modelo com uma tensão de 30 V e corrente empregada de 190 A. Este teste ficou fora de cogitação pelo fato de distorcer, aproximadamente, dois centímetros em cada ponto de coleta e também dos reforços terem ocorrido distorções de empenamento junto com a placa.

O segundo teste foi realizado com uma tensão de 27 V e corrente de 170 A. Com estes valores, teve-se um resultado satisfatório, sendo o modelo sensível com empenamentos nos pontos de coleta de dados satisfatórios e sem a distorção dos reforços da placa enrijecida. Na figura 35 a seguir mostra-se o resultado da distorção após seu resfriamento.

Figura 35: Teste do modelo após a aplicação da soldagem



Fonte: arquivo pessoal.

4.2 Experimentos e resultados

Na aplicação dos testes, para ter uma comparação entre os modelos, o tempo de soldagem dos cordões foram aproximadamente iguais, em torno de 14 segundos cada cordão.

Após o resfriamento da soldagem de cada painel, mediram-se as distorções nos quatro pontos de coleta das placas. As distorções de cada ponto podem ser

visto na tabela 2. O número do painel desta tabela é com base na sequência proposta na metodologia 3.2. Para que se tenha uma análise geral de cada placa, foi feito uma média das distorções de cada modelo para ser mais fácil o entendimento nas discussões da sequência de soldagem, tipo de passe e sentido de solda.

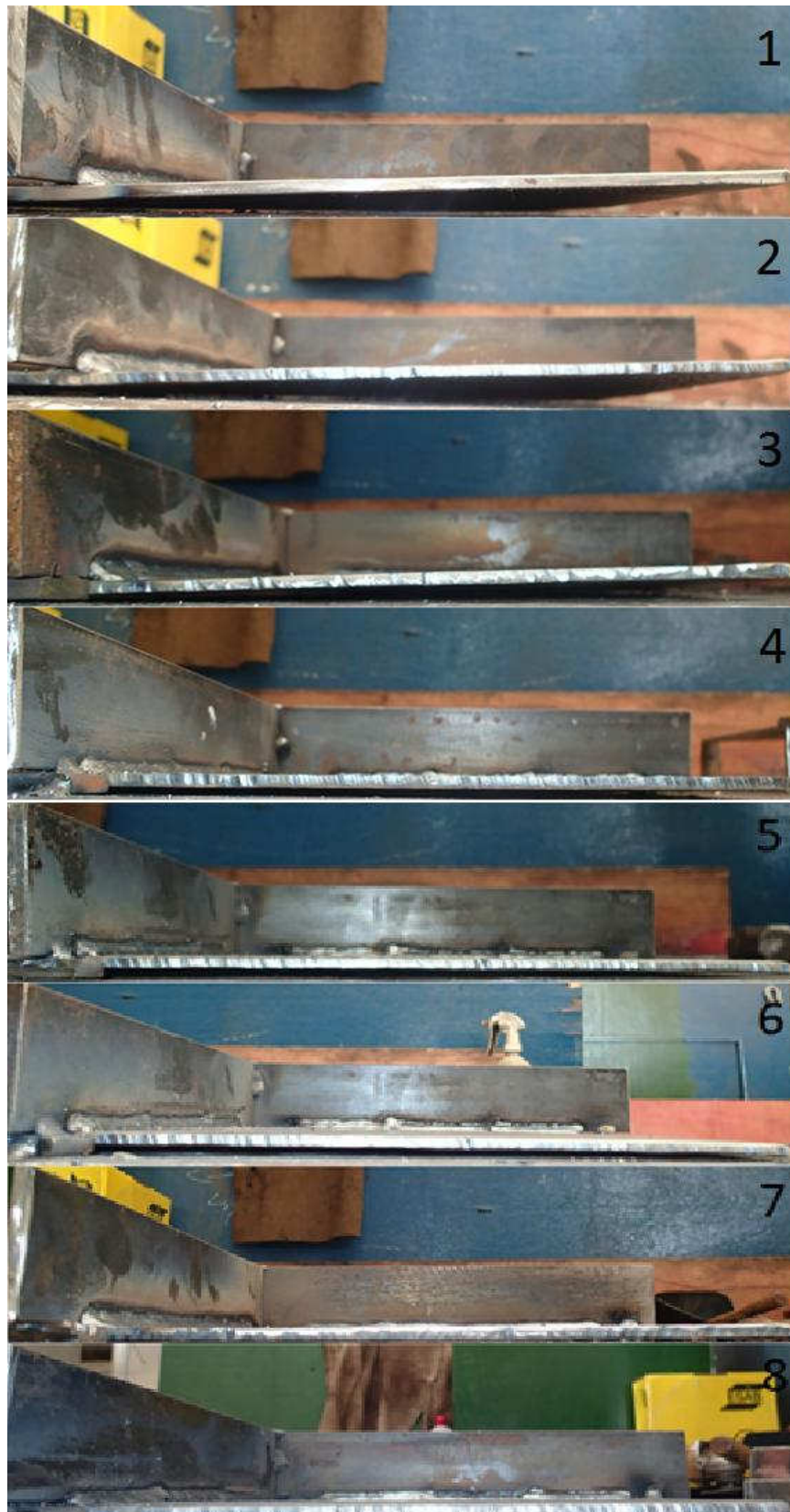
Tabela 2: Medições de distorção de cada ponto da placa enrijecida

PAINEL	1 QUAD.(mm)	2 QUAD. (mm)	3 QUAD. (mm)	4 QUAD. (mm)	MÉDIA (mm)
1	12,7	8,3	11,1	7,1	9,8
2	6,5	10,4	9,3	9,4	8,9
3	6,8	5,2	7	7,8	6,7
4	6,6	5,2	4	4,7	5,1
5	1,8	5,3	1,5	5	3,4
6	2	5	2,5	6,9	4,1
7	1,9	4	1,5	3,8	2,8
8	0,9	3,5	0,6	3	2

Fonte: arquivo pessoal

Após o experimento foram fotografadas as placas em vista lateral para visualizar a influência das sequências de soldagem. As fotos estão enumeradas de 1 à 8 seguindo como foi pré-estabelecido na metodologia dos testes. Na figuras 36 mostra as distorções nos modelos.

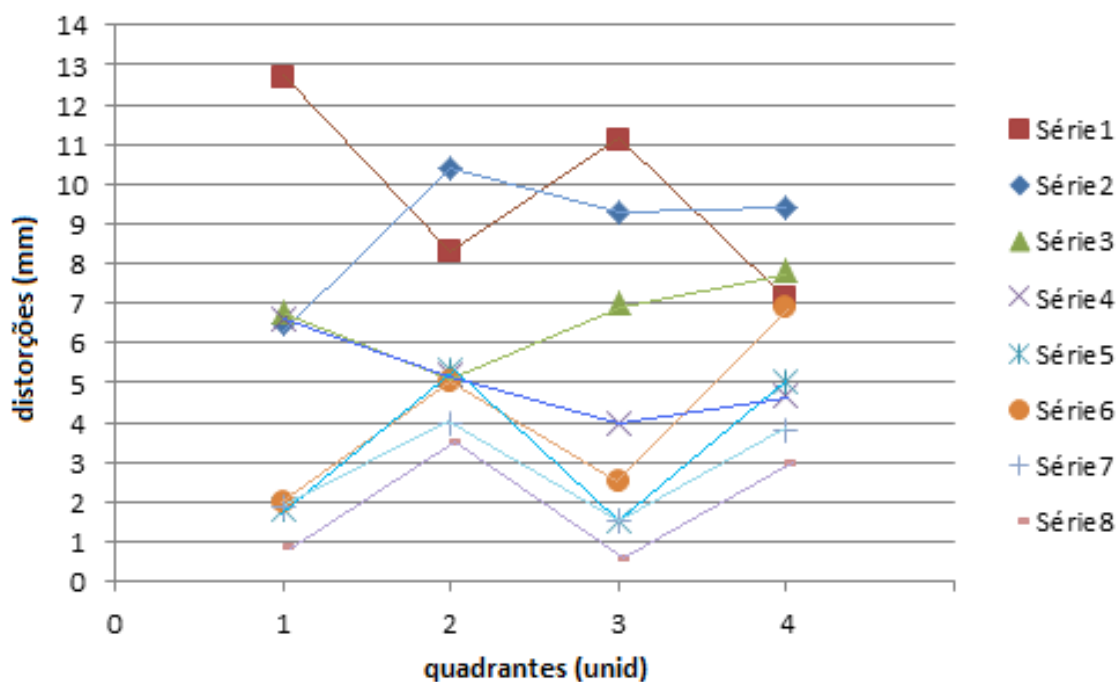
Figura 36: Distorções na vista lateral das placas 1 à 8



Fonte: arquivo pessoal.

Pode-se visualizar nas fotos das vistas laterais que teve diferentes valores de distorções em cada ponto da placa enrijecida. Para que haja a melhor visualização das distorções, foi feito o gráfico mostrado a seguir na Figura 37 mostrando cada ponto.

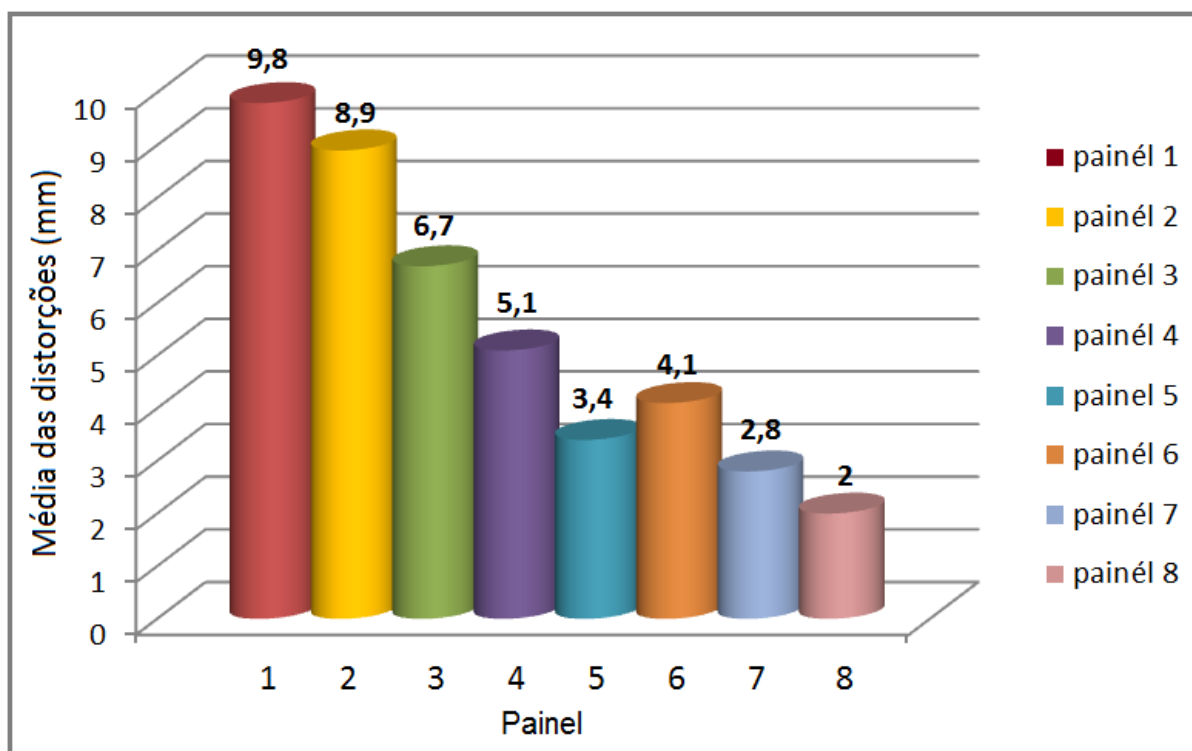
Figura 37: Medição das distorções em cada ponto dos painéis



Fonte: arquivo pessoal.

Pelo gráfico na Figura 37, visualiza-se que as maiores distorções causadas foram no painel 1, enquanto as menores distorções foram no painel 8. As distorções globais, de cada painel enrijecido, mostram-se na Figura 38, indicando a média calculada de cada modelo.

Figura 38: Médias das distorções de cada painel



Fonte: arquivo pessoal.

Com os resultados mostrados das médias das distorções, pode-se fazer uma comparação entre cada painel, tendo como referência a distorção do painel 1. Além disso, para discutir as variações devidas a execução da soldagem deve-se ter a comparação entre a sequência, passe e sentido de soldagem. Para ser mais fácil o entendimento dos dados adquiridos, é mostrado na Tabela 3 as medidas, comparações e redução de distorções.

Tabela 3: Medidas, comparações e variações dos modelos testados

Modelos	Medidas (mm)	Comparação (%)	Redução (%)	Médias variando passes (mm)	Médias variando sentido (mm)	Médias variando sequências (mm)
1	9,8	100	-	7,62	Dentro para fora 5,67	Sequência 1 6,55
2	8,9	90,81	9,19			
3	6,7	68,36	31,64			
4	5,1	52,04	47,96			
5	3,4	34,69	65,31	3,07	Fora para dentro 5,02	Sequência 2 4,15
6	4,1	41,83	58,17			
7	2,8	28,57	71,43			
8	2	20,4	79,6			
Redução da distorção				59,71%	11,46%	36,64%

Fonte: arquivo pessoal

A maior distorção dentre os oito testes foi o painel número 1 com a média de 9,8 milímetros de amplitude de distorção, este experimento teve o seu passe de cordão contínuo, sentido de dentro para fora e sequência de soldagem número 1. O painel 2 teve 9,19% menos distorções comparado com a primeira placa enrijecida. A variação de soldagem entre os dois painéis foi o sentido de soldagem. Os painéis número 3 e 4 tiveram, respectivamente, 31,63% e 47,95% menores distorção comparada com a primeira placa, o que mudou nos experimentos 3 e 4 comparados com o 1 e 2 foi somente a sequência de soldagem, da sequência número 1 para a sequência número 2. Os experimentos dos painéis 5 ao 8 tiveram a mesma combinações de variáveis dos painéis 1 ao 4, variando, somente, o passe do cordão, de passe contínuo para o passe a ré. O painel 5 e 6 tiveram distorções de 65,53% e 58,16%, respectivamente, menores que o painel 1. Os painéis 7 e 8 foram os que tiveram as menores distorções no contexto geral, sendo o painel 7 com 71,14% menos distorções que o painel 1 e a placa número 8 minimizando 79,59%.

4.3 Comparação das distorções relacionadas com a mudança de passe de cordão

Diante dos resultados obtidos, observou-se a maior variação de distorção com a mudança do passe dos cordões. Em média, para os modelos de passe contínuo de número 1 ao 4 teve uma distorção de 7,62 milímetros enquanto para os modelos

de número 5 à 8 teve uma média de 3,07 milímetros. Com estes dados o passe a ré teve melhores resultados com uma redução de 59,71 % comparados com o passe contínuo. Esta variação, provavelmente, teve a menor distorção porque teve o início da transferência de corrente em 3 pontos no cordão, e não somente um como o passe corrido.

4.4 Comparação das distorções relacionadas com a mudança de sequência

A troca da sequência de soldagem nos modelos testados foi a segunda maior variação de distorções nos experimentos. A sequência de soldagem número 2 minimizou 36,64% de amplitude comparada com a sequência número 1. Com estes dados, fica clara a importância da sequência número 2 pelo fato de soldar o segundo cordão da série, ou os cordões pares, sempre contra a distorção dos cordões números ímpares, fazendo assim um equilíbrio de forças internas nos modelos.

4.5 Comparação das distorções relacionadas com a mudança de direção

A mudança do sentido de soldagem, dentro para fora ou vice-versa, foi a que respondeu com a menor variação de distorções. O sentido de fora para dentro teve 11,45% menos distorções que o sentido de dentro para fora, mostrando que também é válida a importância na operação de soldagem de placas. Este sentido de fora para dentro foi a que teve a menor distorção provavelmente porque restringiu o movimento de distorção da placa, começando a soldagem na extremidade da placa, dificultando a movimentação da chapa e o reforço no sentido vertical.

4.6 Dificuldades nos testes realizados

Para a execução dos trabalhos dentro da empresa, pode incluir algumas dificuldades encontradas que interferiram no contexto geral dos experimentos. A primeira abordada é a distorção das placas antes da soldagem. Com as operações de corte do material e também da fixação dos modelos por pontos de solda,

prejudicaram para que as peças fossem completamente planas, distorcendo-as antes da operação. Para isto, obrigou-se a fazer as medições antes e após a soldagem para ter respostas mais exatas.

Um tópico muito importante que prejudicou com os parâmetros estabelecidos na metodologia foi o período de tempo para a execução de cada cordão. Teve aproximadamente 14 s para cada cordão, como o soldador não consegue controlar para executar sempre na mesma velocidade de soldagem, esta variação interferiu nos resultados finais ocorrendo diferente quantidade de energia para cada modelo por não ser preciso este tempo de operação. Estes problemas de execução, provavelmente, prejudicaram no experimento número 6, tendo este um valor de distorção fora do esperado.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

O índice de retrabalho em construções navais soldadas é muito elevado e as causas são diversas. Este trabalho procurou estudar um caso de distorções em um estaleiro no litoral de Santa Catarina, focalizando em distorções excessivas geradas na união de reforços em placas enrijecidas, onde o índice de retrabalho, na união de painéis costuma ser grande associada ao elevado nível de distorções que os painéis apresentam na hora de sua união. Para esta causa a ação proposta foi analisar as melhores combinações de variáveis no processo de soldagem MAG.

Com os testes realizados, observou-se que os painéis 7 e 8 foram os melhores resultados obtidos, sendo que o painel número 8, com passe a ré, sequência 2 e sentido de fora para dentro, teve 2 mm de distorções e o painel 7 variando somente o sentido comparado com o número 8 teve 2,8 mm. Com estes dados, observou-se que estas variações na aplicação da soldagem influenciaram nos valores finais dos modelos, assim, conclui-se que pode ter resultados mais favoráveis de distorções para a indústria naval quando pré-estabelecidas metodologias no processo MAG para a sua minimização da amplitude de distorções.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar testes não somente com a solda MAG, mas também com MIG para ter outro item de comparação entre os resultados.
- Fazer testes de uma combinação de soldagem com mais modelos empregados, assim, quando houver resultados fora do esperado, tem a possibilidade de descartá-los.
- Aplicar esta metodologia de trabalho para modelos mais complexos de elementos de estruturas em três dimensões.
- Fazer testes em elementos finitos para a comparação do trabalho realizado.

BIBLIOGRAFIAS

AWS. Welding Handbook; **“Welding technology”**. Miami, 1987.

CLEBER FORTES, **“Soldagem MIG/MAG”** ESAB, BR, 2005.

DYDO. R. J., **“Castner R. H., Koppenhoefer K., Guidelines for Control of Distortions in Thin Ship Structures”**. Navy Joining Center, Ohio, 1999.

JESUS, E. LOPERA. **“Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW baseada em técnicas de processamento de imagens difitais e superfícies de resposta”**, Brasília, 2010.

Lucas, B. **“Distorções: prevenção pelas técnicas de fabricação”**. Soldagem e Inspeção ABS, São Paulo, 1998.

MASUBUCHI, K. **“Research activities examine residual stresses and distortion in welded structures”**, Dec. 1991.

MODENESI, P. J. **“Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico”**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.

MODENESI, P. J. **“Introdução aos processos de soldagem”**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C **“Engenharia de soldagem e Aplicações”**, 1 ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1982.

PONOMAREV, V. **“Classification of Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: contributions to a new IIW classification”**, 2009.

SCOTTI, A. **“Mapping transfer modes for stainless steel gas metal arc welding”**. Vol 5, 2000.

SUTERIO, R. **“Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica”**. Florianópolis, SC, Brasil, 2005.

WAINER, EMILIO, **“Soldagem: Processos e Metalurgias”**. 2ª edição, São Paulo, 1992.