

Marcos Fernandes da Silva

**COMPARAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ENTRE A
SOLDAGEM CONVENCIONAL E A SOLDAGEM
SIMULTANEA DA RAIZ COM DUPLO ARAME EM
LADOS OPOSTOS DA JUNTA.**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Fevereiro/2012

Marcos Fernandes da Silva

(Tecnólogo, Universidade Bandeirantes, 2009)

**COMPARAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ENTRE A
SOLDAGEM CONVENCIONAL E A SOLDAGEM
SIMULTANEA DA RAIZ COM DUPLO ARAME EM
LADOS OPOSTOS DA JUNTA.**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

Fevereiro/2012

Posso todas as coisas naquele que me fortalece.

(Filipenses 4:13- Bíblia)

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha amada Patrícia e aos meus
queridíssimos filhos Murilo, Cauê e Marco Antonio que esta por
nascer. Vocês são um presente de Deus.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Sr João Candido e a Sra. Lezenita Fernandes por terem me preparado para a vida.

Ao professor Brandi pela orientação e conselhos no desenvolvimento deste trabalho e pelas horas que passamos conversando sobre o tema.

A Metalúrgica Atlas por todo apoio técnico e pessoal oferecido neste trabalho, disponibilizando equipamentos, soldadores e demais materiais para a conclusão do mesmo.

Ao Sr. Nicodemos Nunes pela idéia inicial da dupla fusão, como assim batizou.

Ao Sr. Olair Adalberto pelas conversas que tivemos, incentivo a voltar a estudar, apoio na empresa e por confiar que este trabalho ainda seria divulgado.

Aos soldadores Antonio Batista, Daniel Santana e Luciano Moraes por terem soldado os corpos de prova.

Ao Jaime Soeiro, por "Marcão começa a escrever" e ajuda na reta final.

Agradeço a todos que confiaram e me deram apoio.

CURRICULUM VITAE

Formação:

Técnico em Metalurgia com especialização em Soldagem.

Tecnólogo em Logística.

Inspetor de Soldagem nível I pela FBTS.

Experiência:

Técnico em Soldagem Metalúrgica Atlas.

Inspetor de soldagem Metalúrgica Atlas.

Encarregado de Caldeiraria atuando na montagem e soldagem de equipamentos e estruturas no ramo de: Mineração, Metalurgia, Petroquímico, Meio Ambiente, Geração de energia, Naval, etc.

RESUMO

O Brasil é um país que esta cada vez mais vem se desenvolvendo e suas indústrias, principalmente a de bens de capital. A cada dia utiliza chapas e estruturas soldadas maiores e com maior espessura. Para isso é necessário o desenvolvimento constante de novos processos, equipamentos, e ainda é preciso produzir mais e com menor custo e dentro das especificações geométricas, controlando-se, por exemplo, a distorção, para que os produtos brasileiros possam concorrer internacionalmente. Este trabalho tem como objetivo comparar duas técnicas diferentes de soldagem dos passes de raiz empregando a técnica convencional e a soldagem com dupla fusão, para verificar o efeito delas na distorção e deformação durante a soldagem. Para tanto será empregada a norma ISO 13920 para as tolerâncias geométricas da soldagem dos corpos-de-prova. A soldagem será realizada com o processo de soldagem com arame tubular com proteção gasosa. Analisando-se os resultados foi possível concluir que dos quatro procedimentos de soldagem utilizados três são classificados pela norma ISO 13920. Além disso, a técnica da dupla fusão demonstra viabilidade e possível redução de custo na montagem e fabricação de estruturas e peças. Porém, a técnica de soldagem convencional demonstrou valores melhores quando comparadas com a dupla fusão, para chanfros assimétricos.

ABSTRACT

Brazil is a country that is continuously in development, in particular its industries, as base industries. Each day larger and thicker plates has been welded to build structures up. This requires the constant development of new processes, equipment, and we still need to produce more and at lower cost and according to geometrical specifications, such as, distortion, and Brazilian products can compete to international companies. The objective of this work is to compare two different root pass welding techniques using conventional welding and double fusion welding to verify its effect in structure deformation. The dimensional tolerance will be evaluated according to ISO 13920. Samples were welded using Flux cored arc welding. Analyzing the results it was concluded that the four welding procedures only three are classified by ISO 13920. Furthermore, the technique of double fusion demonstrates its feasibility and possible cost reduction in assembling and manufacturing of welded structures parts. However, the conventional welding technique showed better values as compared to the dual melt distortion and deformation during welding, for asymmetrical groove.

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 2.1</u> – Esquema das etapas que produzem a distorção durante a soldagem.	16
<u>Figura 2.2</u> – Esquema da barra restrita [5].....	17
<u>Figura 2.3</u> – Esquema de tensão longitudinal, transversal e de cordão livre contraído [5].....	18
<u>Figura 2.4</u> – Efeito dos parâmetros de soldagem na deformação [5].....	19
<u>Figura 2.5</u> - Goivagem a Chama [11].....	23
<u>Figura 2.6</u> – Goivagem a arco elétrico [11].....	24
<u>Figura 2.7</u> - Goivagem a arco elétrico.....	25
<u>Figura 4.1</u> - Geometria da junta de todos os corpos de prova utilizados neste trabalho.....	28
<u>Figura 4.2</u> – Soldagem da raiz com a técnica convencional.....	32
<u>Figura 4.3</u> – Soldagem da raiz com a técnica da dupla fusão. (a) Os dois soldadores trabalhando na mesma poça de fusão em lados opostos; (b) Poça de fusão solidificada com os dois arames em lados oposto.....	34
<u>Figura 4.4</u> – Marcação na lateral das chapas para fazer as medidas de distorção....	35
<u>Figura 4.5</u> – Bloco padrão, paquímetro e goniômetro utilizados nas medições.....	36
<u>Figura 4.6</u> – Corpo de prova apoiado sobre a mesa de desempenho.....	37
<u>Figura 4.7</u> – Medição da altura do corpo de prova com relação à mesa de desempenho	38
<u>Figura 4.8</u> – Esquema de soldagem com e sem controle de deformação [16].....	39
<u>Figura 5.1</u> – Gráfico de deformação em relação a ordem de cada camada (corpo de prova: B).....	42

Figura 5.2 – Gráfico de deformação em relação a ordem de cada camada (corpo de prova: A).....	46
Figura 5.3 – Gráfico de deformação em relação a ordem de cada camada (corpo de prova: D).....	50
Figura 5.4 – Gráfico de deformação em relação a ordem de cada camada (corpo de prova: C).....	53
Figura 5.5 - Tolerâncias gerais de estruturas soldadas. [17].....	54
Figura 5.6 - Gráfico com os valores de distorção especificados pela norma ISO 13920, colunas na cor azul, e os valores obtidos ao final da soldagem nos quatro experimentos, estes representados na linhas coloridas [17].....	55

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 2.1</u> - Propriedades típicas dos metais [6].....	20
<u>Tabela 4.1</u> - Calibração dos equipamentos de medição.....	30
<u>Tabela 4.2</u> – Identificação dos corpos de prova.....	40
<u>Tabela 5.1</u> - Soldagem de corpo de prova convencional com controle.....	41
<u>Tabela 5.2</u> - Soldagem convencional sem controle de deformação.....	45
<u>Tabela 5.3</u> - Soldagem com dupla fusão e com controle de deformação.....	49
<u>Tabela 5.4</u> - Soldagem com dupla fusão e sem controle de deformação.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

GMAW: Gas Metal Arc Welding

ZAC: Zona Afetada pelo Calor

SADL: Soldagem a Arco nos Dois Lados, soldagem por dupla fusão.

TIG: Tungsten Inert Gas

ASTM: American Society of Testing and Materials

ASME: American Society of Mechanical Engineers

ISO: International Organization for Standardization

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
CURRICULUM VITAE.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.....	x
SUMÁRIO.....	xi
<u>1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....</u>	13
<u>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	14
<i>2.1 AÇOS ESTRUTURAIS.....</i>	14
<i>2.2 SOLDABILIDADE.....</i>	14
<i>2.3 DEFORMAÇÕES.....</i>	15
<i>2.3.1 CAUSA DA DEFORMAÇÃO E TENSÃO RESIDUAL.....</i>	17
<i>2.3.2 COMO PROPRIEDADES DOS MATERIAIS AFETAM NA DEFORMAÇÃO.....</i>	19
<i>2.3.3 CONTROLE DA DEFORMAÇÃO.....</i>	20
<i>2.3.4 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR.....</i>	21
<i>2.3.5 GOIVAGEM.....</i>	22
<i>2.3.5.1 TIPOS DE GOIVAGEM.....</i>	22
<i>2.3.5.1.a Goivagem a Gás.....</i>	23
<i>2.3.5.1.b Goivagem a Arco.....</i>	23
<i>2.3.5.1.c Goivagem por Meio Mecânico: Usinagem.....</i>	25
<i>2.3.5.1.d Goivagem por Meio Mecânico: Esmerilhamento.....</i>	25
<i>2.3.6 PESQUISA SOBRE DUPLA FUSÃO.....</i>	26
<u>3. OBJETIVO.....</u>	27
<u>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</u>	28

4.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA.....	28
4.2 SOLDAGEM DO CORPO DE PROVA COM PROCESSO ARAME TUBULAR.....	29
4.2.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	29
4.2.2 TÉCNICA UTILIZADA.....	30
4.2.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	34
4.2.4 MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES.....	35
4.2.4.1 PONTOS DE MEDIÇÃO.....	35
4.2.4.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO.....	35
4.2.4.3 LOCAL DE MEDIÇÃO.....	36
4.2.4.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO.....	37
4.2.4.5 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM.....	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1 DEFORMAÇÃO NA SOLDAGEM CONVENCIONAL.....	41
5.1.1 SOLDAGEM COM CONTROLE DE DEFORMAÇÃO.....	41
5.1.2 SOLDAGEM SEM CONTROLE DE DEFORMAÇÃO.....	45
5.2. DEFORMAÇÃO NA SOLDAGEM COM DUPLA FUSÃO.....	48
5.2.1 SOLDAGEM COM DUPLA FUSÃO E COM CONTROLE DE DEFORMAÇÃO.....	48
5.2.2 SOLDAGEM COM DUPLA FUSÃO E SEM CONTROLE DE DEFORMAÇÃO.....	52
5.3. COMPARAÇÃO DA DISTORÇÃO COM A NORMA ISO 13920.....	56
6. CONCLUSÕES.....	59
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	60
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

O desenvolvimento da indústria de bens de capital vem impulsionando a utilização de aços carbono com espessuras cada vez maiores. Isto se deve ao fato do consumo mundial ter aumentado em vários segmentos, seja em geração de energia, mineração, químico, petroquímico, etc. Com isso, faz-se necessário uma maior produtividade e qualidade dos equipamentos fabricados.

Este trabalho desenvolverá técnicas para que seja evidenciadas melhorias nas estruturas soldadas. Os fenômenos da distorção e da deformação são produzidos durante o processo de fabricação por soldagem, sendo um dos principais problemas para esses produtos. Com a redução de tais problemas há uma melhora nos outros fatores, que estão em cadeia, como aumento na produtividade, menores índices de conformação, redução de custos (com energia elétrica e de retrabalho das juntas), eliminação de goivagem, de esmerilhamento, de ensaios não destrutivos (como líquido penetrante e partícula magnética).

Um dos métodos para controlar e minimizar a distorção e a deformação é através da soldagem simultânea da raiz com duplo arame em lados opostos da junta, também chamada de soldagem por dupla fusão. Tal técnica pode reduzir o custo final do projeto, quando estiver na fase de montagem.

Esse fenômeno não pode ser totalmente controlado, mas pode ser minimizado quando se utiliza bons procedimentos de soldagem, como por exemplo, pré-posicionamento das partes, soldagem com sequência de passes controlada e soldagem simultânea da raiz com duplo arame em lados opostos da junta. Atualmente na indústria, o tempo médio gasto com correções para tais problemas fica numa faixa de 10 a 30% do tempo total da soldagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 AÇOS ESTRUTURAIS.

Segundo Colpaert [1], os aços estruturais são classificados como aços baixo e médio carbono com teores de fósforo e enxofre controlados. São utilizados em estruturas estáticas, mas também podem ser usados como perfis e chapas para aplicações estruturais. Estes aços são utilizados em vários tipos de equipamentos e segmentos de mercado como: indústria química, mineração, petroquímica, metalúrgica, geração de energia e outras, que normalmente trabalham com temperaturas abaixo de 350°C.

Os aços estruturais normalmente são produtos laminados ou forjados com os seguintes requisitos básicos para aplicação: tensão de escoamento, boa tenacidade, boa soldabilidade, boa conformabilidade e custo mínimo.

2.2 SOLDABILIDADE.

A Soldabilidade é a capacidade do material ser soldado sob condição de fabricação impostas em uma estrutura ou um componente específico e devidamente projetado para executar satisfatoriamente a função a que se destina [2]. A soldabilidade pode ser dividida em três, sendo elas [3,4]: operacional, metalúrgica e em serviço.

A soldabilidade operacional envolve aspectos da preparação, montagem e da fabricação da junta.

A soldabilidade metalúrgica engloba aspectos relacionados à presença de defeitos como porosidade e trincas além de avaliar as propriedades mecânicas e/ou químicas da junta soldada.

A soldabilidade em serviço trata da vida útil e do desempenho adequado da estrutura ou componente em serviço.

Um dos fenômenos importantes na soldabilidade operacional é a distorção ou deformação que ocorre durante a montagem e a soldagem.

2.3 DEFORMAÇÕES.

Existem vários problemas que ocorrem quando se executa a soldagem [5]. Um deles é a distorção, com a consequente deformação da forma geométrica do equipamento ou estrutura, produzindo a contração longitudinal, a contração transversal, a deformação angular ou o empenamento. Este problema pode afetar o desempenho em serviço da junta soldada. Para ocorrer a distorção é necessário que exista uma região deformada plasticamente durante a soldagem, que produzirá uma tensão residual, responsável pela distorção.

A dimensão desta região é influenciada por fatores como: coeficiente de dilatação térmica linear, módulo de elasticidade, condutividade térmica e diferença de temperatura entre duas regiões do material. Caso a soldagem seja com dois materiais diferentes, deve-se optar por materiais com propriedades físicas similares. A figura 2.1 mostra esquematicamente o fenômeno da distorção.

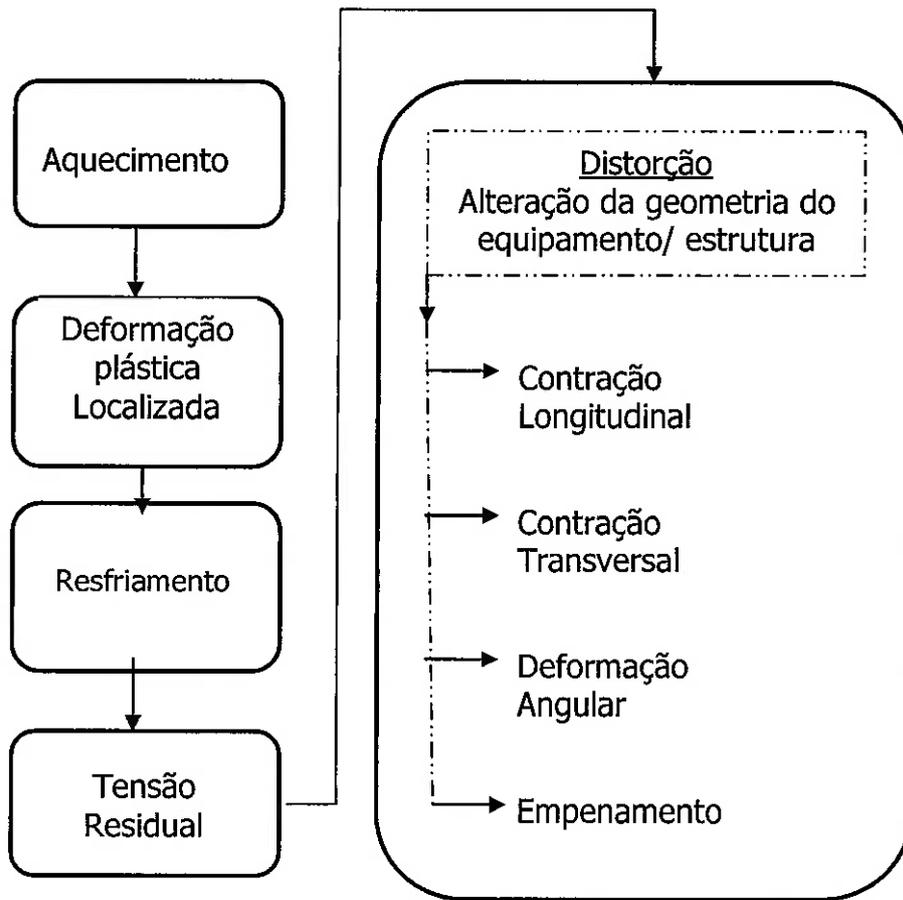


Figura 2.1 – Esquema das etapas que produzem a distorção durante a soldagem.

Todas as condições de deformações são inevitáveis, porém, essas podem ser minimizadas, dependendo das ações utilizadas na montagem e na fabricação da junta [6].

Os termos contração, deformação geométrica e distorção são equivalentes e todos são causados após a soldagem. Contração é descrito como um fenômeno no estado sólido, e que sofre uma redução na espessura do aço devido a essa contração. A contração se dá internamente gerando uma tensão residual com o resfriamento do local soldado. Deformação pode ser permanente ou temporária.

2.3.1 CAUSA DA DEFORMAÇÃO E TENSÃO RESIDUAL

A compreender que a deformação ocorre durante o ciclo de aquecimento e resfriamento, podemos afirmar, que quando aquecemos uma barra sem restrições haverá uma expansão uniforme e conseqüentemente ao resfriar voltará a sua forma original. Porém, quando aquecemos uma barra com restrição de dois lados, esta deverá expandir somente para os lados sem restrição, ao resfriar haverá uma redução tanto no sentido da expansão quanto no sentido da restrição [5]. Conforme figura 2.2.

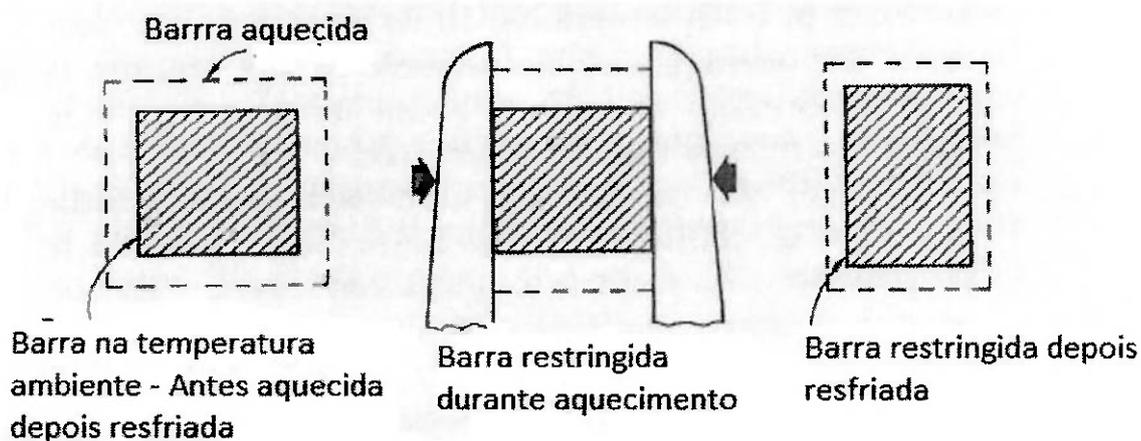


Figura 2.2 – Esquema da barra restringida [5].

As tensões residuais geradas em uma solda de filete são a tensão longitudinal e a tensão transversal, como mostra na figura 2.3. Estas duas tensões residuais tendem a deformar o conjunto soldado.

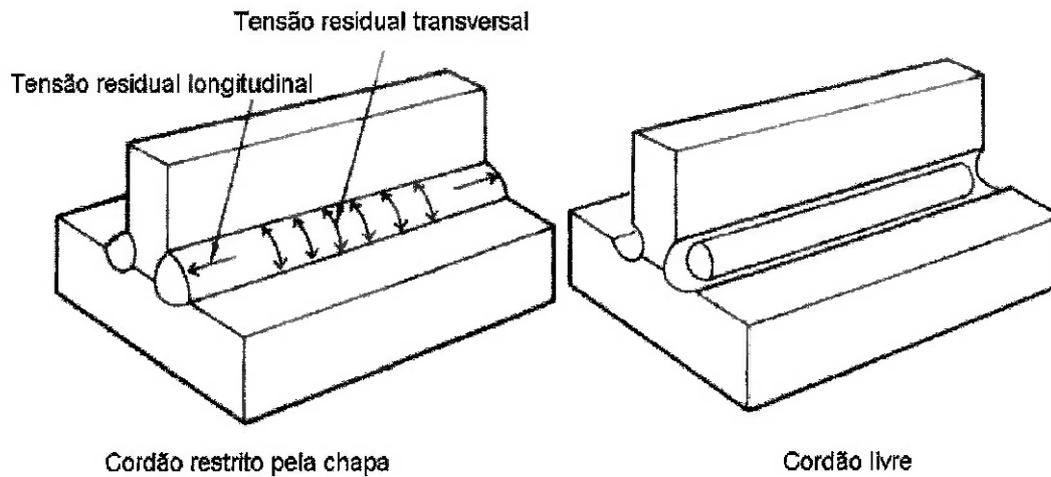


Figura 2.3 – Esquema de tensão longitudinal, transversal e de cordão livre contraído [5].

Um dos mecanismos de ocorrência da deformação ocorre da seguinte maneira. Na execução da soldagem a região de maior aquecimento na junta é a da poça de fusão, que expande devido à temperatura e quando resfria ocorrendo à solidificação, a tendência normal é a contração.

Um dos modos de controlar a deformação é através do procedimento de soldagem. Altas velocidades de soldagem tendem a diminuir consideravelmente as deformações. Conforme ilustrado na figura 2.4.

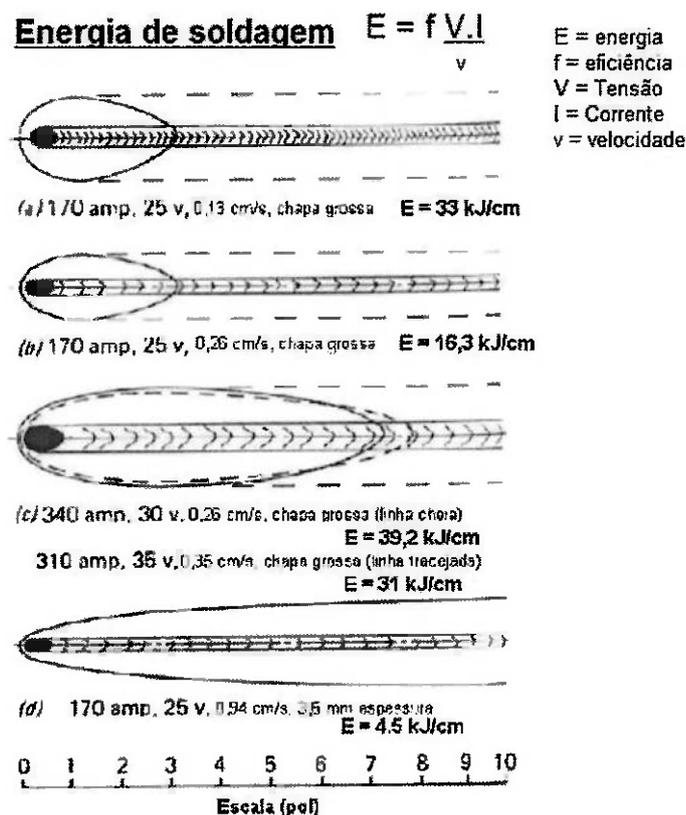


Figura 2.4 – Efeito dos parâmetros de soldagem na deformação [5].

2.3.2 COMO PROPRIEDADES DOS MATERIAIS AFETAM NA DEFORMAÇÃO.

Os fatores que afetam as deformações na soldagem [5] são: o aquecimento e o resfriamento. Estes afetam as propriedades mecânicas e físicas dos materiais. Como cada material tem suas propriedades específicas é importante saber seu coeficiente de expansão térmica, a condutividade térmica, o módulo de elasticidade e o limite de resistência. Com os dados de cada material é possível que se possa prevenir e minimizar as deformações.

O coeficiente de expansão térmica é a capacidade que o material tem de se expandir quando aquecido e resfriado. Esta capacidade de expansão pode variar dependendo das propriedades químicas e mecânicas dos materiais.

A condutividade térmica é a capacidade que o material tem de dissipar calor rapidamente, por exemplo, aços inoxidáveis e aços carbono não dissipam calor rapidamente, diferente de ligas de alumínio e ligas de cobre que dissipam muito rápido o calor.

O módulo de elasticidade é a capacidade que o material tem de resistir a distorção, ou seja, quanto mais rígido o material menor será a distorção. Segue tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades típicas dos metais [6].

Metal	Módulo de Elasticidade (106 psi)	Limite de Resistência (103 psi)	Coefficiente de Expansão térmica (micro-in./in/°F)	Condutividade Térmica (cal/cm ² /cm/°C/sec)
Aços carbono	30	38	7	0.12
Aços Inoxidáveis	29	45	10	0.04
Ligas Alumínio	10	20	12	0.50
Ligas de cobre	15	10	9	0.90

2.3.3 CONTROLE DA DEFORMAÇÃO.

Existem vários meios para se realizar o controle da distorção e deformação [7,8,9]. A contração de soldagem depende do material a ser soldado e pode ser minimizada através de algumas técnicas, viabilizando uma redução econômica.

Alguns fatores podem ser controlados para reduzir a distorção como: a preparação da junta, a redução do ângulo, a utilização de chanfro em "X", a realização da soldagem intermitente, etc. Outra forma de controle é aplicada durante a execução da soldagem onde visa evitar a sobreposição de passes, o balanceamento a linha neutra da peça, o posicionamento da junta, o tipo e a localização do travamento da peça, entre outros. [9].

Deverá ser de responsabilidade do contratante quando a estrutura a ser soldada tiver níveis altos de distorção elaborar um procedimento específico para controlar tais defeitos e assim se adequar as condições do projeto.

2.3.4 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR

O processo de soldagem com arame tubular é classificado como sendo por fusão [10]. Este possui duas características devido ao tipo de consumível. Uma delas é a necessidade de utilização externa de gás, que serve para proteger o arco elétrico do nitrogênio e do oxigênio da atmosfera. A outra característica é o fluxo interno, contido no núcleo do consumível, que serve como formador de escória, agente desoxidante, estabilizador de arco e meio de adicionar elementos de liga.

Neste processo de soldagem apresenta duas variáveis que depende da classificação do arame. A primeira é conhecida como auto-protegido, ou seja, o próprio fluxo interno protege o arco gerando gases e formando uma escória sobre o cordão. A segunda variável é conhecida como proteção gasosa, esta utiliza o gás para proteger o arco.

As vantagens de processo deste, esta nas altas taxas de deposição, especialmente fora da posição plana, menor habilidade para soldagem em relação à soldagem com arame sólido, mais simples e adaptável que a soldagem com arco submerso, maior penetração quando comparado com o processo eletrodo revestido.

Este processo também apresenta algumas desvantagens: requer remoção da escória gerada no processo, aumento na geração de fumos comparados com soldagem arco submerso ou arame sólido, requer exaustor

para retirada dos fumos, equipamento de soldagem mais complexo comparado com o do eletrodo revestido.

A soldagem com arame tubular utiliza os mesmos equipamentos do processo GMAW e pode ser semiautomático, mecanizado ou automático.

O processo de soldagem com arame tubular é utilizado em todos os segmentos de mercado: indústria pesada, petroquímica, tubulações, indústria automobilística e outras. Este processo também é muito utilizado na soldagem de aços carbono, aços de baixa liga, aços inoxidáveis entre outros.

2.3.5 GOIVAGEM

A goivagem é um processo de remoção de material, seja na construção ou na manutenção de estruturas e equipamentos. Principalmente na soldagem, a goivagem é utilizada na remoção do cordão de solda, seja para reparo ou como técnica de construção, esta última utilizada na remoção do passe de raiz para garantir a penetração total.

2.3.5.1 TIPOS DE GOIVAGEM.

A goivagem está intimamente ligada à operação de soldagem, serve para fazer a limpeza de raiz, remover cordões de solda com defeito e fazer pequenos ajustes na hora da montagem de equipamentos. Existem basicamente quatro tipos de goivagem: goivagem a gás, goivagem a arco elétrico com ar comprimido, goivagem por usinagem e goivagem por esmerilhamento.

2.3.5.1.a Goivagem a Gás.

A goivagem a chama consiste em um bico inclinado entre 25 a 35° em relação à superfície da chapa. O material que fica líquido com o aquecimento da chama é expulso com jato de oxigênio de alta pressão como mostra na figura 2.5 [11].

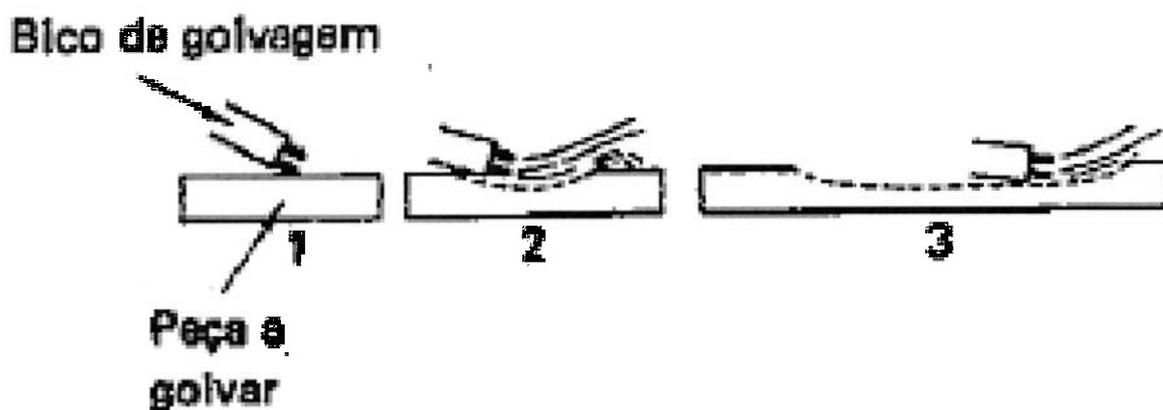


Figura 2.5 - Goivagem a Chama [11].

2.3.5.1.b Goivagem a Arco.

A goivagem a arco com arco elétrico consiste em um eletrodo de carvão ligado a uma máquina retificadora, que utiliza corrente contínua com polaridade inversa. Nesta máquina instala-se uma tocha onde é preso o eletrodo de carvão e nesta mesma tocha tem dois furos para saída de ar comprimido. O eletrodo de carvão

ao entrar em contato com a chapa abre um arco elétrico que forma uma poça de metal liquido que é expulsa pelo ar comprimido no mesmo tempo da abertura do arco, como mostra a figura 2.6 ilustrativa [11].

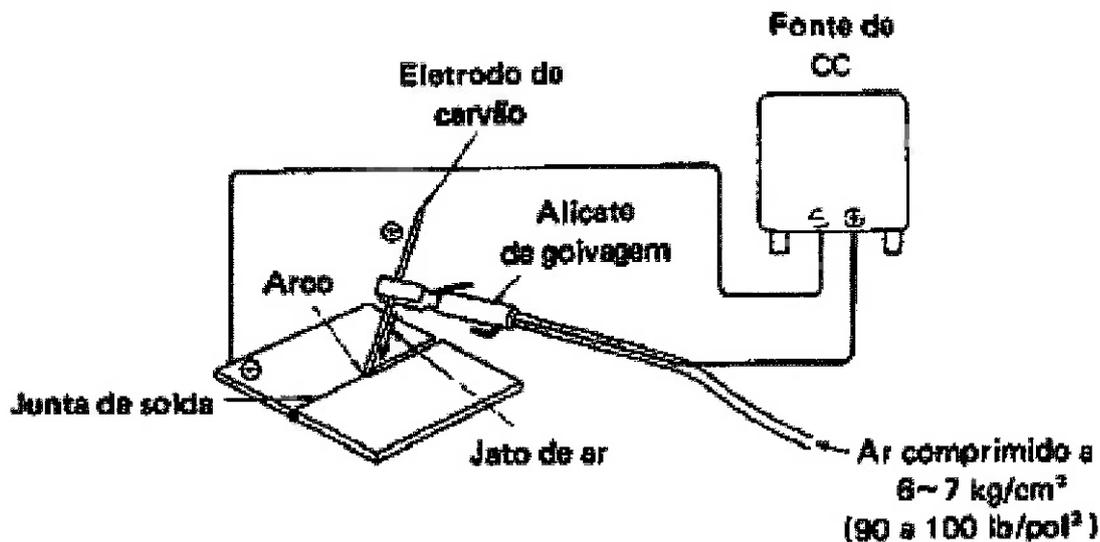


Figura 2.6 – Goivagem a arco elétrico [11].

Fazendo uma comparação entre o processo de goivagem a gás e o processo a arco, o processo a arco deixa uma zona afetada pelo calor (ZAC) menor que processo a gás e uma melhor qualidade de goivagem. Esta diferença faz com que hoje em dia o processo de goivagem a arco seja o mais utilizado. Como mostra figura 2.7.

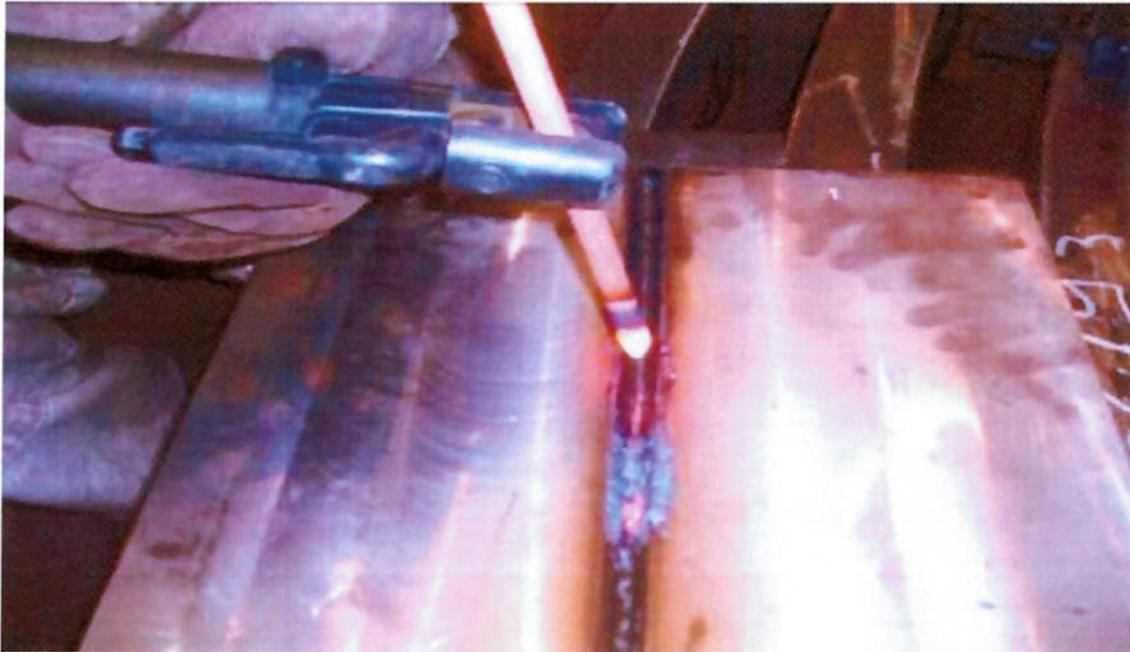


Figura 2.7 - Goivagem a arco elétrico.

2.3.5.1.c Goivagem por Meio Mecânico: Usinagem.

A goivagem por usinagem é feita em materiais de grandes espessuras onde não tem acesso para fazer a limpeza para posteriores ensaios não destrutivos. Esta goivagem também é feita em materiais como, por exemplo, aços inoxidáveis, aços de media e de alta liga, onde pode contaminar se for utilizado eletrodo de carvão [11].

.2.3.5.1.d Goivagem por Meio Mecânico: Esmerilhamento.

A goivagem por esmerilhamento é feita normalmente em chapa de pequenas espessuras, devido à facilidade. Também executa goivagem por esmerilhamento em materiais especiais como aço inoxidável [11].

2.3.6 PESQUISA SOBRE DUPLA FUSÃO.

Existem algumas pesquisas feitas sobre o processo de soldagem com dupla fusão. Alguns pesquisadores nomearam como Soldagem a Arco nos Dois Lados (SADL). WU [12], publicou um trabalho que cita o SADL com o processo de soldagem TIG em conjunto com processo de soldagem MAG, mas com os dois do mesmo lado da peça, fazendo uma análise numérica sobre o reforço da solda e apresenta uma redução na distorção [13].

A soldagem de aço inoxidável austenítico usando duplo lado de soldagem diminuiu consideravelmente a distorção angular, pois o calor adicionado é menor, isto se dá pelo fato das forças de contração serem simétricas em ambos os lados durante o resfriamento da peça, reduzindo as distorções [13].

3. OBJETIVO.

O objetivo deste trabalho é comparar duas técnicas diferentes de soldagem dos passes de raiz com a norma ISO 13920 de tolerâncias gerais de estruturas soldadas. . A primeira técnica é o procedimento de soldagem convencional, que consiste na realização de um passe de raiz e passes de enchimento por um dos lados da junta; fazendo-se posteriormente a goivagem do lado oposto do passe de raiz; seguida do esmerilhamento da região goivada para remoção dos óxidos residuais e da zona afetada pelo calor produzida na goivagem; dos ensaios não destrutivos (líquido penetrante e partículas magnéticas); da limpeza dos resíduos dos ensaios; pré-aquecimento (quando necessário) e continuação da sequência da soldagem no lado oposto da raiz. A segunda técnica é a soldagem simultânea da raiz com duplo arame em lados opostos da junta, seguida da soldagem em um dos dois lados do chanfro até acabar a soldagem da junta, não necessitando das outras etapas descritas na soldagem convencional. Para tanto será empregando o processo de soldagem com arame tubular com proteção gasosa, para verificar o efeito delas na distorção e deformação durante a soldagem.

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA.

O metal de base utilizado foi o ASTM A-516 Gr 60 MT – 2006. Cada chapa media 500,0 mm de comprimento, 200,0 mm de largura e 40,0 mm de espessura. Para cada experimento foi utilizado duas chapas a fim de gerar o chanfro descrito na figura 4.1.

Após a montagem do chanfro, todos os corpos de prova foram usinados em ambos os lados com a finalidade de aumentar a sua planicidade, sendo retirado de cada lado uma média de 0,5 mm na espessura. Os chanfros, iguais em todos os corpos de prova foram preparados com o processo oxicorte, teve um dos lados com 2/3 da espessura, este recebendo o nome de lado da face e 1/3 do lado oposto que será chamado de lado da raiz. O ângulo do bisel foi de aproximadamente 30° em ambos os lados, conforme figura 4.1.

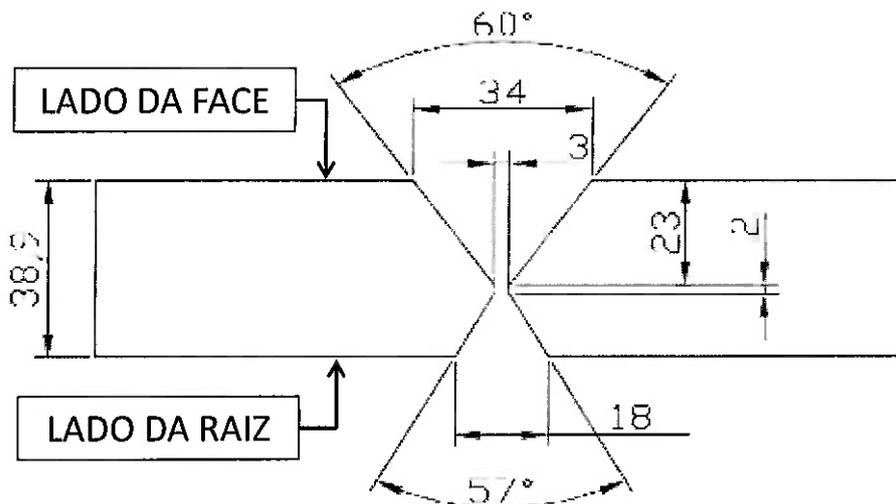


Figura 4.1 - Geometria da junta de todos os corpos de prova utilizados neste trabalho.

A montagem dos corpos de prova foi executada sobre uma mesa de desempenho a fim de garantir o paralelismo entre o lado da face e da raiz.

Foram montadas duas chapas, com 6,0 mm de espessura, como apêndices nas pontas para garantir a abertura entre as faces de raiz do chanfro. Após a montagem, o mesmo foi colocado sobre uma bancada e posicionado na posição vertical.

4.2 SOLDAGEM DO CORPO DE PROVA COM PROCESSO

ARAME TUBULAR.

A soldagem dos corpos de prova foi feita com o processo arame tubular com proteção gasosa. A soldagem foi executada na posição vertical e no sentido ascendente. O motivo da escolha desta posição foi devido ao maior aporte de calor no corpo de prova em relação às posições plana, horizontal e sobre cabeça. Foi utilizado o consumível E-71T1 com diâmetro de 1,2 mm, a fabricação deste consumível foi de acordo com a norma ASME II parte C [14].

4.2.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO.

Todos os equipamentos utilizados no experimento estavam calibrados e as informações de calibração dos equipamentos estão na tabela 4.1.

Os equipamentos utilizados para o experimento foram:

- 1) Paquímetro universal;
- 2) Termômetro de contato;
- 3) Trena de 5m;
- 4) Alicates amperímetro;
- 5) Mesa de desempenho;
- 6) Transferidor de ângulos (Goniômetro);

- 7) Bloco padrão;
- 8) Máquina de soldagem Pulsarc 6000.

Tabela 4.1 - Calibração dos equipamentos de medição.

Equipamentos	Data da calibração	Validade da calibração
Paquímetro universal	04/02/2011	01/11/2012
Termômetro de contato	12/04/2011	01/04/2012
Alicate Amperímetro	12/04/2011	01/04/2012
Mesa de desempenho	23/11/2011	01/11/2012
Transferidor de ângulos	13/10/2011	01/10/2014
Bloco padrão	02/09/2011	01/05/2012

4.2.2 TÉCNICA UTILIZADA.

Para a soldagem dos corpos de prova foi utilizado uma técnica convencional, figura 4.2, e a outra com a dupla fusão, figura 4.3, que serão relacionadas com a distorção causada pelos diferentes procedimentos de soldagem.

A soldagem dos corpos de prova com procedimento convencional é descrito a seguir:

- 1- Posicionamento do corpo de prova na posição vertical;
- 2- Corpo de prova na temperatura ambiente;
- 3- Início do primeiro passe de soldagem pelo lado da face, passe de raiz, esperar o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e medir distorção;

- 4- Segundo passe de soldagem pelo lado da face formando duas camadas, esperar o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e medir distorção;
- 5- Vira a chapa para o lado da raiz, ou seja, região de 1/3;
- 6- Execução da goivagem com arco elétrico e eletrodo de grafite;
- 7- Esmerilhamento da goivagem com disco de desbaste;
- 8- Ensaio de líquido penetrante, penetrante aplicado com pincel, limpeza com água corrente, secagem com pano e revelação com spray de aerosol. O ensaio de líquido penetrante foi feito por inspetor qualificado pelo sistema nacional de qualificação e certificação. Após foi feita a medição da distorção.
- 9- Soldagem do lado em que foi feito a goivagem, após isso era esperado o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e feita a medição da distorção;
- 10-Segundo passe lado da raiz, esperava-se o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e era feita a medição da distorção;
- 11-Terceiro passe do lado da face esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
- 12-Acabamento, quarto passe de soldagem do lado da raiz, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
- 13-Quarto passe do lado da face, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
- 14-Quinto passe do lado da face, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;.

15-Sexto passe do lado da face esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;

16-Acabamento, sétimo passe do lado da face, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;

Toda soldagem do corpo de prova foi executada por soldador qualificado, conforme norma ASME seção IX edição 2010 [15].



Figura 4.2 – Soldagem da raiz com a técnica convencional.

A soldagem do corpo de prova com a técnica da dupla fusão manteve o mesmo chanfro, características elétricas, posição de soldagem e até mesmos soldadores. Os passos executados foram:

- 1- Posicionamento do corpo de prova na posição vertical;
- 2- Corpo de prova na temperatura ambiente;
- 3- Início da soldagem com dupla fusão, ou seja, inicia se o passe de raiz com dois soldadores, um de cada lado do corpo de prova,

- simultaneamente na mesma poça de fusão. Esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
- 4- Primeiro passe de soldagem pelo lado da face, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
 - 5- Primeiro passe de soldagem pelo lado da raiz, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
 - 6- Segundo passe de soldagem pelo lado da raiz, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
 - 7- Acabamento, terceiro passe de soldagem pelo lado da raiz, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
 - 8- Segundo passe pelo lado da face, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media distorção;
 - 9- Terceiro passe pelo lado da face esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
 - 10-Quarto passe pelo lado da face esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
 - 11-Quinto passe pelo lado da face esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;
 - 12-Acabamento, passe de soldagem pelo lado da face, esperava o corpo de prova chegar à temperatura ambiente e media a distorção;

O intuito de executar a soldagem variando entre o lado da face e o lado da raiz era de controlar ou reduzir a distorção.

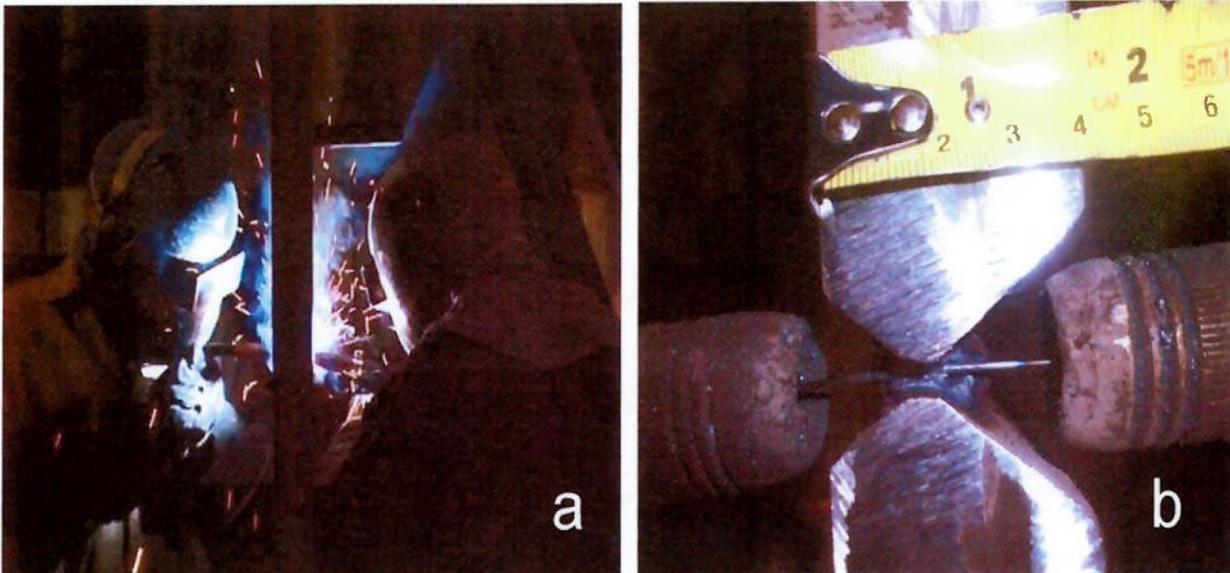


Figura 4.3 – Soldagem da raiz com a técnica da dupla fusão. (a) Os dois soldadores trabalhando na mesma poça de fusão em lados opostos; (b) Poça de fusão solidificada com os dois arames em lados opostos.

4.2.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.

Segue abaixo tabelas com os parâmetros de soldagem utilizados nas soldas dos corpos de prova. Os instrumentos de utilizados para medir os parâmetros foram:

- 1- Corrente - voltiamperímetro;
- 2- Tensão - voltiamperímetro;
- 3- Temperatura - termômetro de contato;
- 4- Vazão de gás - fluxômetro;
- 5- Tempo – cronômetro.

Os instrumentos utilizados foram aferidos conforme indica tabela 4.1.

O gás utilizado para a soldagem foi o CO₂ com vazão de 8,0 L/min., indicado para o consumível E-71T1. A altura do bico de contato à peça (stick

out) foi de aproximadamente 15,0 mm, sendo 5,0 mm entre o bico de contato e o bocal.

4.2.4 MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES.

4.2.4.1 PONTOS DE MEDIÇÃO.

Os corpos de prova foram divididos em 20 pontos iguais em um dos lados conforme mostra figura 4.4 para medição das deformações. Todos foram medidos em uma mesa de desempenho.



Figura 4.4 – Marcação na lateral das chapas para fazer as medidas de distorção.

4.2.4.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO.

Os equipamentos que foram utilizados para fazer a medição dos corpos de provas foram os mesmos em todo o experimento. O paquímetro universal com escala de 0,02 mm, o goniômetro com escala de cinco minutos e o bloco

padrão conforme mostra a figura 4.5. Todos os equipamentos foram calibrados conforme mostra na tabela 4.1.



Figura 4.5 – Bloco padrão, paquímetro e goniômetro utilizados nas medições.

4.2.4.3 LOCAL DE MEDIÇÃO.

O local onde foram medidos os corpos de prova foi em uma mesa de desempenho que normalmente é utilizada na sala de metrologia, conforme mostra figura 4.6. O corpo de prova era apoiado sobre a mesa e feito da seguinte maneira:

- 1) Limpeza com pano em toda a superfície da mesa;
- 2) Limpeza do corpo de prova com escova de aço manual e pano;
- 3) Apoiava corpo de prova sobre a mesa;
- 4) Prendia o corpo de prova com sargento nas duas extremidades;
- 5) Verificação visual para checagem de passagem de luz;
- 6) Caso fosse observado passagem de luz, repetir todos os passos anteriores;
- 7) Medição.



Figura 4.6 – Corpo de prova apoiado sobre a mesa de desempenho.

4.2.4.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO.

Após cada camada de solda executada era esperado o corpo de prova chegar até a temperatura ambiente, depois era apoiado sobre a mesa de desempenho e medido a altura do corpo de prova em relação à mesa, conforme figura 4.7.

Para medir o grau de empenamento final do corpo de prova foi utilizado um goniômetro. Como o corpo de prova já estava com o acabamento pronto, ou seja, com reforço, foi preciso utilizar como apoio para o goniômetro um bloco padrão.

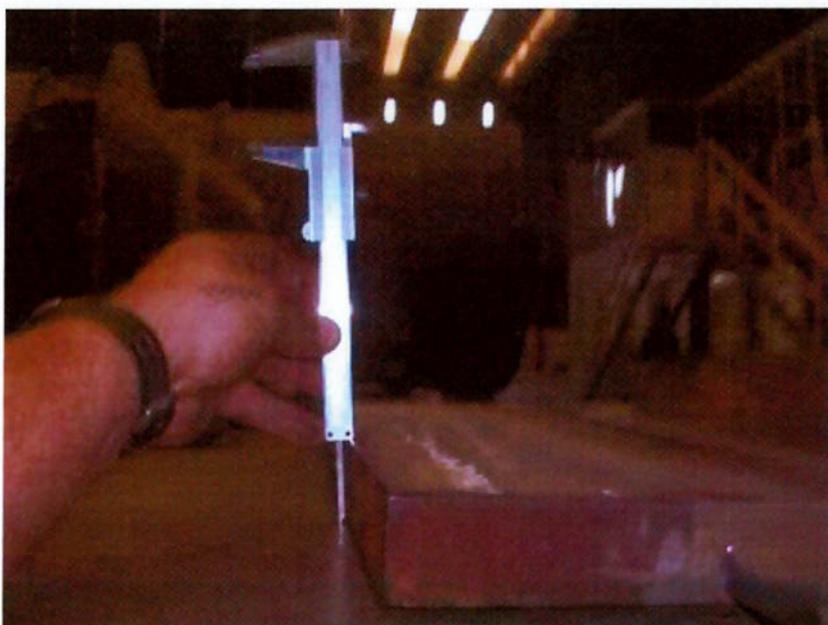


Figura 4.7 – Medição da altura do corpo de prova com relação à mesa de desempenho.

4.2.4.5 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM.

A soldagem dos corpos de prova foi realizada com o processo arame tubular e foi dividida em sem controle, com controle e com enchimento simultâneo.

Na soldagem sem controle, foi feito o passe de raiz, depois foi realizado mais um passe sobre o passe de raiz, depois feito a goivagem, seguido por esmerilhamento da região goivada, seguida pelo ensaio de líquido penetrante e então preenchida toda a junta pelo lado em que foi feito a goivagem.

Na soldagem com controle, o passe de raiz recebeu mais um passe sobre ele, seguido de goivagem, esmerilhamento, ensaio de líquido penetrante e iniciado a soldagem pelo lado da raiz, este sendo goivado. A sequência de execução dos passes foi sendo intercalada entre os lados da face e da raiz até o enchimento completo da junta a fim de controlar a distorção

Na soldagem com enchimento simultâneo, utilizada no experimento C, após a execução da técnica da dupla fusão os soldadores continuaram soldando, cada um de um lado da junta, até o preenchimento total do chanfro. Neste caso, o lado em que foi preenchido primeiro foi o lado da raiz, pois, tinha a menor espessura (1/3). Quando preencheu o primeiro lado da junta um dos soldadores continuou a soldagem do seu lado da face até o final.

Na figura 4.8 pode-se observar um esquema de como é a soldagem com controle e sem controle de deformação.

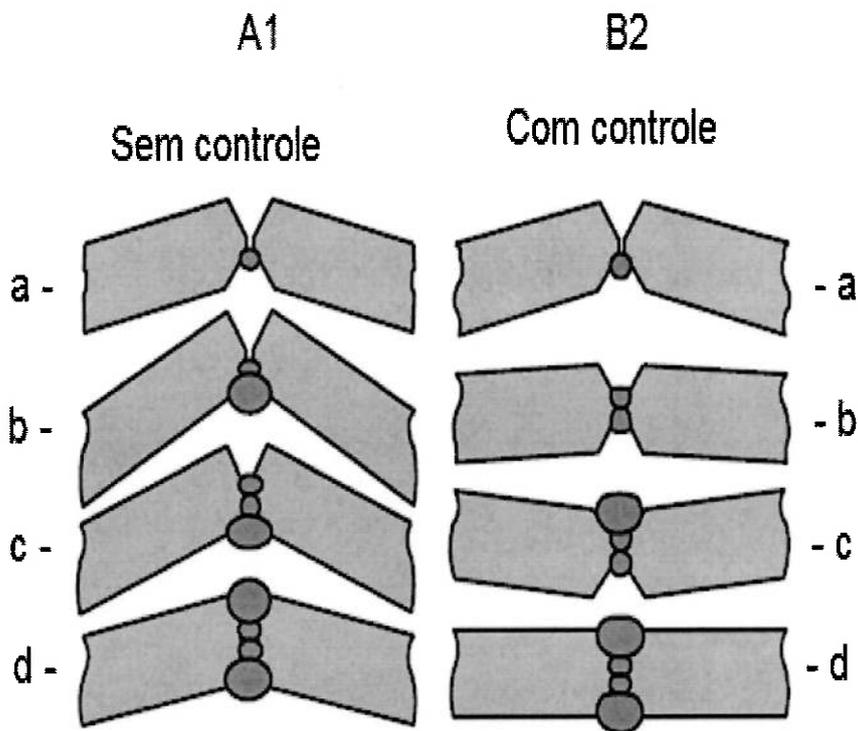


Figura 4.8 – Esquema de soldagem com e sem controle de deformação

4.2.4.6 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM.

A identificação dos corpos-de-prova estão apresentadas na tabela 4.2. Nesta tabela as amostras estão divididas entre soldagem convencional e soldagem com dupla fusão.

Tabela 4.2 – Identificação dos corpos de prova.

Identificação dos Corpos de Prova	Descrição dos Experimentos
A	Soldagem convencional, sem controle de deformação.
B	Soldagem convencional, com controle de deformação.
C	Soldagem simultânea da raiz com duplo arame em lados opostos na mesma junta, sem controle de deformação.
D	Soldagem simultânea da raiz com duplo arame em lados opostos na mesma junta, com controle de deformação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1 DEFORMAÇÃO NA SOLDAGEM CONVENCIONAL.

Para análise dos resultados obtidos nos experimentos será feita a seguinte convenção:

0° a 180° - Deformação Positiva;

181 a 360 - Deformação Negativa.

5.1.1 SOLDAGEM COM CONTROLE DE DEFORMAÇÃO.

O resultado das medidas de deformação pode ser visto na tabela 5.1 que mostra os dados do corpo de prova B durante a execução da soldagem, sendo possível comparar com as variáveis utilizadas.

Tabela 5.1 - Soldagem de corpo de prova convencional com controle.

B		Corrente (A)	Tensão (V)	Veloc. (mm/s)	Oscilação (mm)	Temp. CP (°C)	Energia (KJ/mm)	Deformação	
								(mm)	Graus (°)
1° camada face	1° passe	160	24,4	1,35	8	16,8	173,81	2,10	0,60
2° camada face	1° passe	188	26,4	3,29	9,0	20,1	90,53	8,88	2,55
	2° passe	176	25,8	2,96	10,0	20,1	92,09		
1° camada raiz	1° passe	176	25,2	1,68	12,0	23,5	158,07	-6,40	-1,83
2° camada raiz	1° passe	176	25,2	3,45	8,0	17,3	77,17	-4,91	-1,41
	2° passe	180	25,6	2,99	9,0		92,34		
3° camada face	1° passe	184	26,8	2,82	11,0	24,1	104,74	3,58	1,02
	2° passe	180	25,8	3,11	11,2		89,72		
3° camada raiz	1° passe	176	25,6	3,79	11,5	21,6	71,37	-1,19	-0,34
	2° passe	179	26	3,68	10		75,95		
4° camada raiz acab.	1° passe	176	24	3,40	11,5	20,0	74,51	0,06	0,02
	2° passe	176	24	3,18	12,0		79,58		
4° camada face	1° passe	192	24,8	4,03	10,5	24,7	70,85	0,88	0,25
	2° passe	176	24,6	4,27	11,0		60,79		
	3° passe	180	25,2	3,85	10,5		70,76		
5° camada face	1° passe	180	24,8	3,85	11,0	18,3	69,64	1,29	0,37
	2° passe	180	24,8	3,91	11,5		68,57		
	3° passe	180	24,8	3,33	12,0		80,35		
6° camada face	1° passe	180	24,4	3,79	11,0	19,2	69,57	0,26	0,07
	2° passe	180	24,4	4,00	11,5		65,88		
	3° passe	180	24	4,42	10,5		58,58		
	4° passe	180	24	3,65	11,5		71,02		
7° camada face acab.	1° passe	188	23,6	4,00	11,5	27,0	66,55	0,11	0,03
	2° passe	180	24	4,39	12,0		59,10		
	3° passe	180	24	4,59	11,0		56,51		
	4° passe	176	24,4	4,31	12,0		59,78		

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.1 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.1, com as deformações ocorridas para cada camada durante a soldagem do corpo de prova B. O gráfico tem início com o valor da espessura do metal de base sendo atribuído o valor de deformação zero e com a inclusão dos resultados de cada camada, podendo ser positivo quando estiver entre 0° e 180° ou negativo quando estiver entre 181° e 360° .

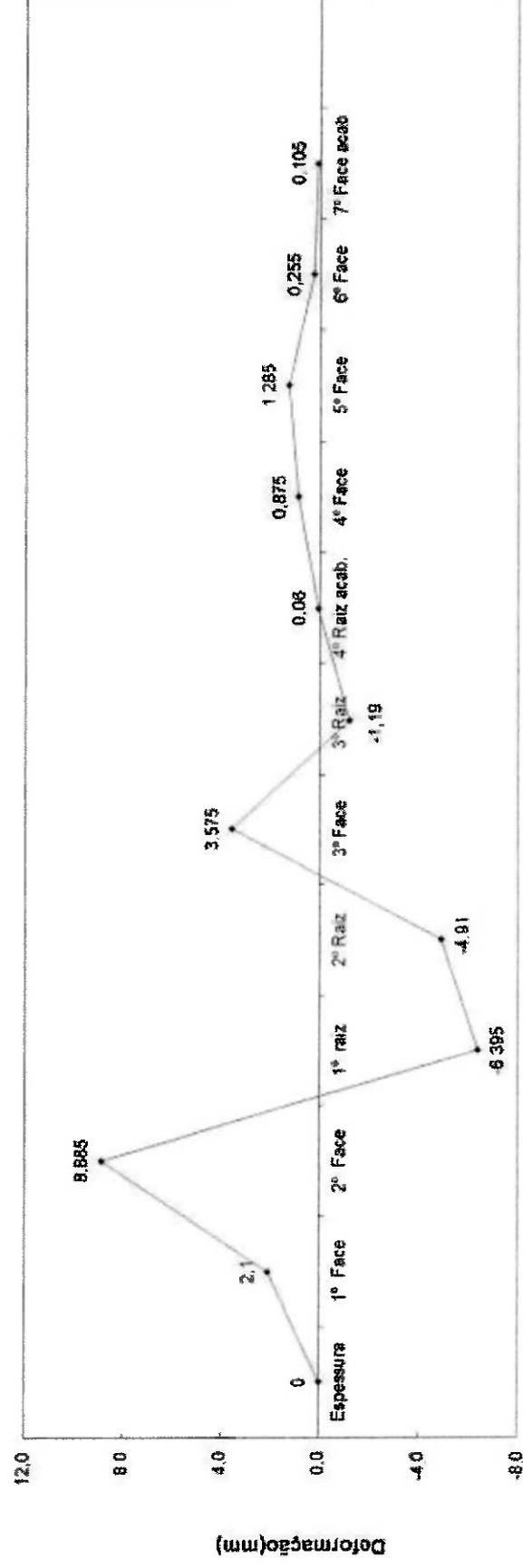


Figura 5.1 – Gráfico de deformação em relação a ordem de cada camada (corpo de prova: B).

O ponto zero, nomeado espessura, na figura 5.1 sempre será considerado como ponto de comparação em relação às medições da distorção.

A primeira camada, que é o passe de raiz, variou 2,1 mm positivamente, ficando similar a figura 4.8 (B2.C). Este comportamento era esperado, pois, a deformação tende para o lado onde está sendo realizada a soldagem.

A segunda camada do lado da face foi feito com dois passes. Obteve-se uma deformação de 8,88 mm positiva, aumentando a deformação geral da peça para 10,98 mm positivo, seguindo o padrão da figura 4.8 (B2.C).

Ao soldar a primeira camada do lado da raiz, houve uma deformação de 6,395 mm negativa, porém, a peça ainda acumula uma deformação de 4,58 mm positiva.

A segunda camada do lado da raiz apresenta uma deformação de 4,91 mm negativa, assim deixando a peça com uma deformação total de 0,33mm negativa, similar a figura 4.8 (A1.C).

Como se trata de uma soldagem com controle de deformação e como na segunda camada do passe de raiz houve uma deformação negativa, optou-se por fazer a terceira camada no lado face, a fim de reduzir a deformação do lado negativo. A deformação desta camada foi de 3,575 mm positivo e invertendo a deformação geral da peça para 3,24 positiva, similar a figura 4.8 (B2.C).

Para reduzir a deformação do lado positivo novamente inverteu-se o lado da soldagem, desta vez para o lado da raiz, onde esta camada gerou uma deformação de 1,19 mm negativo o que levou a uma deformação geral na peça para 2,05 mm.

Observando que ainda tinha algumas camadas para completar o lado face, foi terminada a soldagem do lado raiz, fazendo a camada de acabamento. Esta camada gerou uma deformação de 0,06 mm positiva, esta deixou a deformação geral da peça em 2,11 mm positivo.

Fazendo a quarta camada do lado face que foi soldada com três passes, houve uma deformação de 0,875 mm positivo, assim continuando com deformação geral da peça positiva só que com valor de 2,98.

Continuando com a soldagem do lado da face foi realizada a quinta camada, esta com três passes, teve uma deformação de 1,285 mm, aumentando a deformação geral para 4,26 mm positivo.

Não havendo mais como controlar a deformação continuou com a sexta camada, completada com quatro passes, está gerando uma deformação de 0,255 mm e elevando a deformação geral do corpo de prova para 4,51 mm.

Terminando a soldagem de acabamento com a sétima camada, esta com quatro passes, houve uma deformação de 0,105 mm.

Na soldagem deste corpo de prova pode-se observar que a deformação foi reduzida na medida em que se preenchia a junta, mesmo quando ocorria o aumento da quantidade de passes em cada camada.

Ao final da soldagem convencional do corpo de prova "B", pode se observar que houve uma deformação positiva final de 4,6 mm.

O valor de deformação positiva de 4,6 mm é o resultado da subtração entre os pontos positivos e negativos do gráfico de figura 5.1.

5.1.2 SOLDAGEM SEM CONTROLE DE DEFORMAÇÃO.

O resultado das medidas de deformação pode ser visto na tabela 5.2 que mostra os dados do corpo de prova A durante a execução da soldagem, sendo possível comparar com as variáveis utilizadas.

Tabela 5.2 - Soldagem convencional sem controle de deformação.

A		Corrente (A)	Tensão (V)	Veloc. (mm/s)	Oscilação (mm)	Temp. CP (°C)	Energia (KJ/mm)	Deformação	
								(mm)	graus (°)
1° camada face	1° passe	156	24,6	1,50	9,5	18,0	2,56	1,43	0,41
2° camada face	1° passe	188	25,4	2,37	11,0	17,9	120,91	3,53	1,01
Goivagem	-	400	-	7,14	-	20,0	-	-1,81	-0,52
1° camada raiz	1° passe	176	25,6	2,08	9,0	19,0	129,76	-2,97	-0,85
2° camada raiz	1° passe	172	25,5	2,45	11,0	20,4	107,37	-5,02	-1,44
3° camada raiz	1° passe	184	24,8	2,35	11,0	17,8	116,64	-5,87	-1,68
	2° passe	184	25,6	2,27	10,0		124,35		
4° camada raiz acab.	1° passe	156	25,4	3,47	9,5	17,7	68,47	-1,86	-0,53
	2° passe	160	24,8	3,03	10,0		78,57		
	3° passe	156	24,8	3,45	9,5		67,32		
3° camada face	1° passe	184	24,8	3,13	10,0	20,2	87,61	3,16	0,91
	2° passe	176	24,4	2,78	11,0		92,76		
4° camada face	1° passe	180	26	3,57	10,0	17,4	78,62	2,31	0,66
	2° passe	176	25,6	3,47	10,7		77,86		
	3° passe	176	25,6	3,31	10,2		81,64		
5° camada face	1° passe	176	25,6	3,33	10,5	18,3	81,10	0,80	0,23
	2° passe	176	25,2	4,17	11,0		63,87		
	3° passe	176	25,6	3,55	11,0		76,23		
6° camada face	1° passe	176	25,6	3,73	11,5	29,9	72,45	1,10	0,32
	2° passe	172	26	3,76	10,0		71,37		
	3° passe	178	25,2	4,17	11,0		64,59		
	4° passe	187	25,6	3,33	11,5		86,17		
7° camada face acab.	1° passe	176	23,6	3,27	11,0	22,2	76,26	0,00	0,00
	2° passe	168	24	3,36	10,5		72,09		
	3° passe	172	24	3,47	10,0		71,33		
	4° passe	176	24	3,16	11,0		80,09		

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.2 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.2, com as deformações ocorridas para cada camada durante a soldagem do corpo de prova A. O gráfico tem início com o valor da espessura do metal de base sendo atribuído o valor de deformação zero e com a inclusão dos resultados de cada camada, podendo ser positivo quando estiver entre 0° e 180° ou negativo quando estiver entre 181° e 360°.

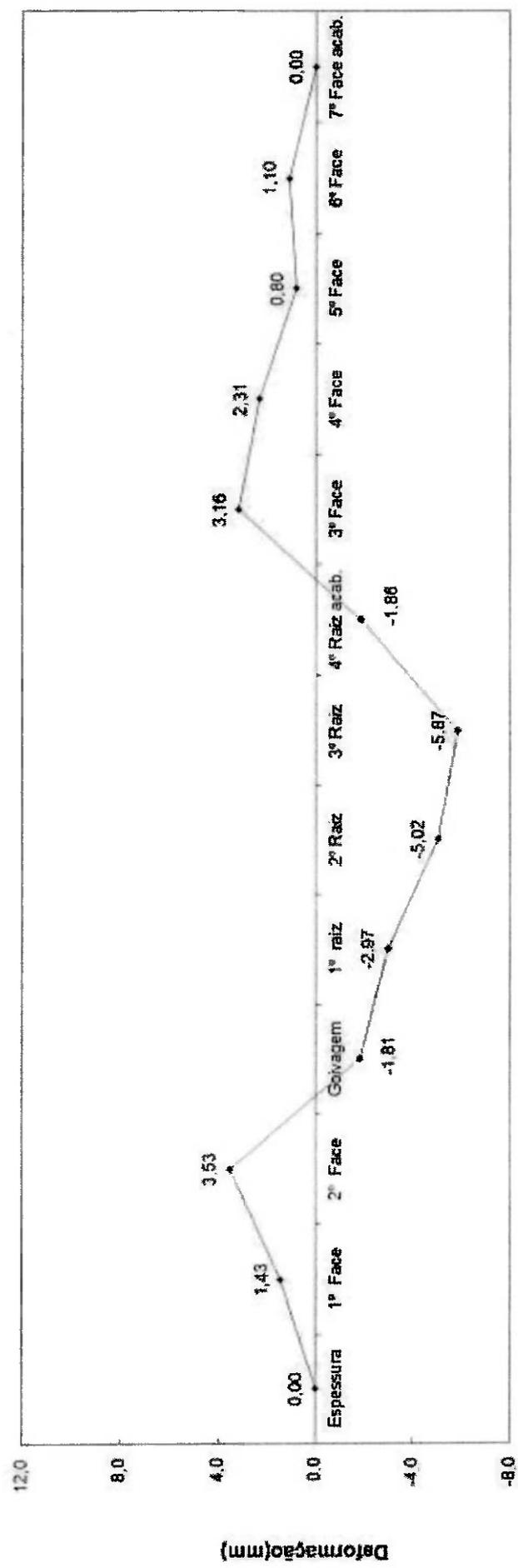


Figura 5.2 – Gráfico de deformação em relação a ordem de cada camada (corpo de prova: A).

O ponto zero, nomeado espessura, na figura 5.2 sempre será considerado como ponto de comparação em relação às medições da distorção.

A primeira camada do lado da face gerou uma deformação de 1,43 mm , causando uma deformação positiva, similar a figura 4.8 (B2C).

segunda camada também foi no lado da face levando a uma deformação de 3,53mm, aumentando a deformação geral do corpo de prova para 4,96 mm positiva.

Após a segunda camada no lado da face foi executado a goivagem no lado da raiz, causando uma deformação de 1,81mm negativo, isso reduziu a deformação geral do corpo de prova para 3,15 mm positivo. Este fato se deve por ter removido material da raiz da junta aliviando um pouco a tensão da soldagem executada no lado da face.

Ao soldar a primeira camada na raiz, logo após a goivagem, houve uma deformação de 2,97 mm negativo, isso levou a uma deformação geral da peça de 0,18 mm positivo.

Na soldagem da segunda camada no lado da raiz, houve uma deformação de 5,02 mm negativo, deixando o corpo de prova com uma deformação geral de 4,84 mm negativo.

Na soldagem da terceira camada no lado da raiz houve uma deformação de 5,87 mm, isso aumentou ainda mais a deformação geral do corpo de prova para 10,71 mm negativo.

A quarta camada no lado da raiz foi o acabamento e gerou uma deformação de 1,86 mm, deixou o corpo de prova com uma deformação geral de 12,57 negativo, similar a figura 4.8 (A1C).

Ao soldar a terceira camada do lado da face houve uma deformação de 3,16 mm positiva, reduzindo a deformação geral do corpo de prova para 9,41 mm, negativo.

Na soldagem da quarta, quinta e sexta camadas no lado da face houve uma deformação de 2,31 mm, 0,80 mm e 1,10 mm todas positivas, levando a deformação geral do corpo de prova para 5,2 mm negativa.

Na camada de acabamento do lado da face não houve deformação continuando com deformação negativa.

Ao final da soldagem convencional do corpo de prova "A" pode se observar que houve uma deformação negativa final de 5,2 mm.

O valor de deformação negativa de 5,2 mm é o resultado da subtração entre os pontos positivos e negativos do gráfico de figura 5.2.

5.2. DEFORMAÇÃO NA SOLDAGEM COM DUPLA FUSÃO.

Para análise dos resultados obtidos nos experimentos será considerado:

0° a 180° - Deformação Positiva;

181 a 360 - Deformação Negativa.

5.2.1 SOLDAGEM COM DUPLA FUSÃO E COM CONTROLE DE DEFORMAÇÃO.

O resultado das medidas de deformação pode ser visto na tabela 5.3 que mostra os dados do corpo de prova D durante a execução da soldagem, sendo possível comparar com as variáveis utilizadas.

Tabela 5.3 - Soldagem com dupla fusão e com controle de deformação.

D		Corrente (A)	Tensão (V)	Veloc. (mm/s)	Oscilação (mm)	Temp. CP (°C)	Energia (KJ/mm)	Deformação	
								(mm)	Graus (°)
1° passe face DF	1° passe	152	23,6	1,52	7	19,2	3,59	-1,41	-0,40
1° passe raiz DF	1° passe	164	26,4	1,52	8,0		4,33		
1° camada face	1° passe	184	24,8	3,05	9,0	21,1	4,56	7,71	2,21
	2° passe	176	24,8	2,84	10,5		4,36		
1° camada raiz	1° passe	176	26	2,76	10,5	17,4	4,58	-2,51	-0,72
2° camada raiz	1° passe	168	25,2	3,16	11,0	24,7	4,23	-2,55	-0,73
	2° passe	176	24,4	3,47	12,0		4,29		
3° camada raiz acab.	1° passe	176	24,8	3,16	12,0	18,3	4,36	-0,5	-0,14
	2° passe	176	25,2	3,45	11,0		4,44		
2° camada face	1° passe	176	25,4	3,45	10,0	24,3	4,47	2,21	0,63
	2° passe	182	25,2	3,47	10,5		4,59		
3° camada face	1° passe	180	24	3,47	10	20,6	4,32	1,81	0,52
	2° passe	176	24	3,97	11		4,22		
	3° passe	172	24	3,13	11,5		4,13		
4° camada face	1° passe	184	25,4	3,97	11,0	17,5	4,67	1,04	0,30
	2° passe	180	24,8	4,00	12,5		4,46		
	3° passe	184	25,2	3,73	11,5		4,64		
5° camada face	1° passe	188	24,4	3,50	10,0	18,3	4,59	0,2	0,06
	2° passe	184	24,4	3,68	11,5		4,49		
	3° passe	192	24,4	3,79	12,0		4,68		
	4° passe	180	24	3,09	12,0		4,32		
6° camada face acab.	1° passe	176	24	3,62	12,0	26,0	4,22	0,58	0,17
	2° passe	180	24,4	3,79	12,0		4,39		
	3° passe	176	24	4,10	11,5		4,22		
	4° passe	176	24	3,57	12,0		4,22		

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.3 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.3, com as deformações ocorridas para cada camada durante a soldagem do corpo de prova D. O gráfico tem início com o valor da espessura do metal de base sendo atribuído o valor de deformação zero e com a inclusão dos resultados de cada camada, podendo ser positivo quando estiver entre 0° e 180° ou negativo quando estiver entre 181° e 360°.

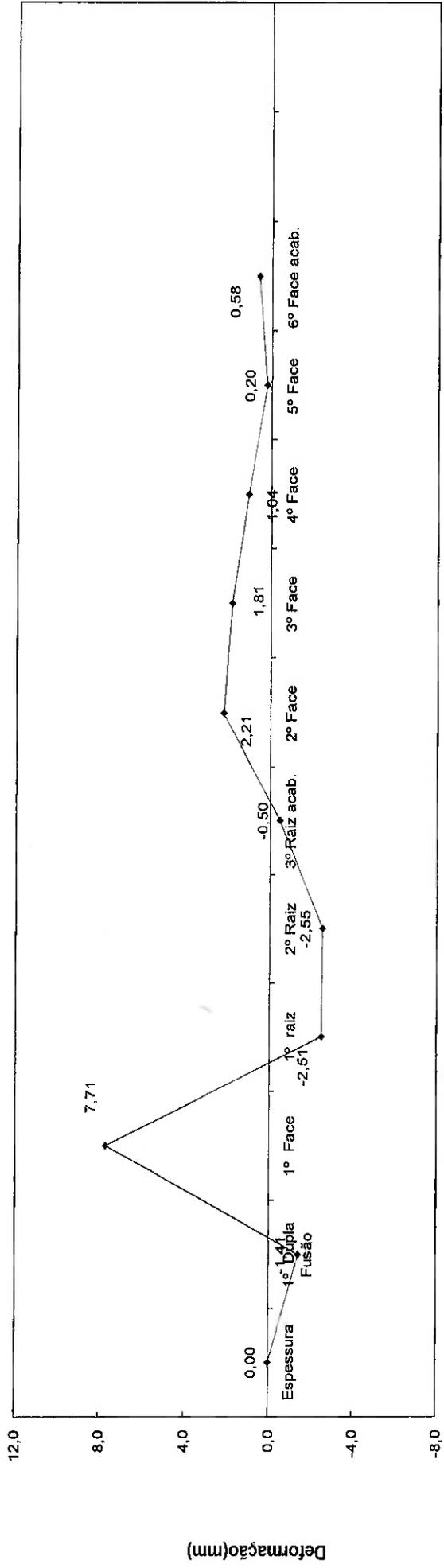


Figura 5.3 – Gráfico de deformação em relação a ordem de cada camada (corpo de prova: D).

O ponto zero, nomeado espessura, na figura 5.3 sempre será considerado como ponto de comparação em relação às medições da distorção.

A soldagem do passe de raiz com a técnica de dupla fusão, dois arames em lados opostos na mesma junta, teve uma deformação de 1,41 mm negativo.

A segunda camada de soldagem foi realizada pelo lado da face e teve uma deformação de 7,705 mm positivo, deixando o corpo de prova com uma deformação total de 6,29 mm positivo.

Como a deformação positiva estava pelo lado face que é maior lado, foi realizada a primeira e segunda camada do lado da raiz deformando 2,507 mm e 2,547 mm cada, isso gerou uma deformação geral no corpo de prova de 1,25 mm positivo.

Realizada a camada de acabamento da raiz a deformação foi de 0,50 mm negativo e a deformação geral do corpo de prova foi de 0,75 mm positivo.

A segunda, terceira, quarta e quinta camada, observou-se que deformou 2,2075 mm, 1,815 mm, 1,04 mm e 0,2 mm respectivamente, todos os valores são positivos. A deformação geral do corpo de prova passou para 6,0 mm positivo.

Após enchimento total da junta, foi realizada a camada de acabamento no lado da face, deformando 0,575 mm positivamente, permanecendo com deformação positiva.

A deformação final do corpo de prova "D" foi de 6,576 mm positivo. Este resultado foi obtido pela diferença das somatórias dos valores positivos e negativos da figura 5.3.

5.2.2 SOLDAGEM COM DUPLA FUSÃO E SEM CONTROLE DE DEFORMAÇÃO.

O resultado das medidas de deformação pode ser visto na tabela 5.4 que mostra os dados do corpo de prova C durante a execução da soldagem, sendo possível comparar com as variáveis utilizadas. O enchimento simultâneo se dá pelo fato da soldagem ser realizada com duplo arame em lados opostos da junta ao mesmo tempo, até que um dos lados seja preenchido.

Tabela 5.4 - Soldagem com dupla fusão e sem controle de deformação.

C		Corrente (A)	Tensão (V)	Veloc. (mm/s)	Oscilação (mm)	Temp. CP (°C)	Energia (KJ/mm)	Deformação		
								(mm)	graus(o)	
1° camada face DF	1° passe	122	21,8	1,46	8,5	19,2	109,15	0,17	0,05	
	1° camada raiz DF	132	22,4	1,46	7,5					121,35
2° camada face DF	1° passe	178	25,8	2,14	14,0	20,0	128,95	3,53	1,01	
	2° camada raiz DF	182	24,6	2,72	12,0					98,86
3° camada face DF	1° passe	180	24,8	1,28	9,8	21,7	209,99	4,71	1,35	
	3° camada raiz DF	167	23,4	3,85	10,0					60,96
3° camada face DF	2° passe	168	24,8	2,92	9,3	21,7	85,49	4,71	1,35	
	3° camada raiz DF	165	23,2	3,57	9,0					64,31
4° camada face DF	1° passe	164	24,8	2,78	12,0	20,8	87,85	1,57	0,45	
	4° camada raiz DF	184	24,8	3,13	11,5					87,61
4° camada face DF	2° passe	162	25,4	2,81	11,0	20,8	87,89	1,57	0,45	
	4° camada raiz DF	176	23,8	2,62	11,0					96,01
5° camada face DF	1° passe	176	25,6	3,55	11,0	21,3	76,23	2,01	0,58	
	5° camada raiz DF acab.	184	24,4	3,68	10,5					73,27
5° camada face DF	2° passe	180	26	3,52	11,0	21,3	79,75	2,01	0,58	
	5° camada raiz DF acab.	176	24,4	3,52	11,0					73,18
5° camada face DF	3° passe	178	25,8	3,91	10,8	21,3	70,54	2,01	0,58	
	5° camada raiz DF acab.	172	24,8	3,70	12,0					69,10
6° camada face	1° passe	188	25,2	3,13	13,0	22,5	90,96	0,95	0,27	
	2° passe	184	25,2	3,94	12,0					70,66
	3° passe	188	25,6	3,11	12,3					92,98
7° camada face acab.	1° passe	180	24,4	3,38	11,5	19,5	78,00	0,64	0,18	
	2° passe	176	24,4	3,50	11,5					73,69
	3° passe	180	24	3,52	12,0					73,61
	4° passe	176	24,4	3,25	12,0					79,36

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.4 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.4, com as deformações ocorridas para cada camada durante a soldagem do corpo de prova C. O gráfico tem início com o valor da espessura do metal de base sendo atribuído o valor de deformação

zero e com a inclusão dos resultados de cada camada, podendo ser positivo quando estiver entre 0° e 180° ou negativo quando estiver entre 181° e 360° .

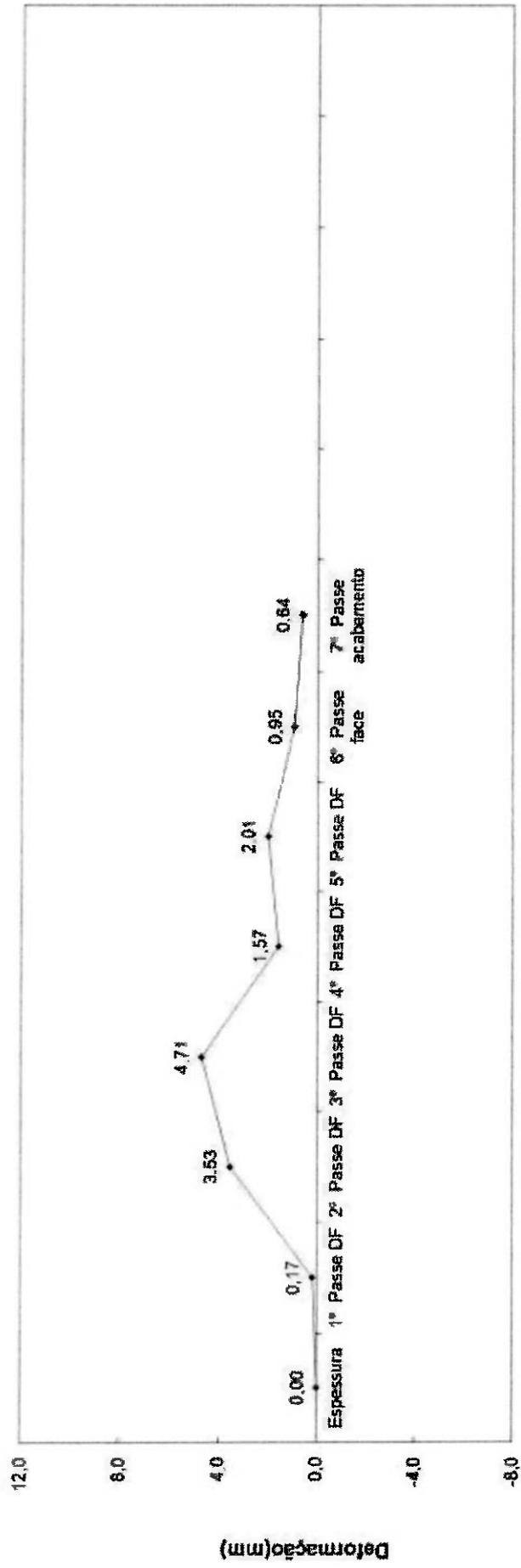


Figura 5.4 – Gráfico de deformação em relação a ordem de cada camada (corpo de prova: C).

O ponto zero, nomeado espessura, na figura 5.4 sempre será considerado como ponto de comparação em relação às medições da distorção.

Na soldagem do passe de raiz com duplo arame opostos na mesma junta, houve uma deformação de 0,17 mm, sendo considerada uma deformação positiva.

Na segunda camada, houve uma deformação de 3,53 mm positivo. A soldagem da camada foi realizada somente com um passe.

Na terceira e quarta camada houve uma deformação de 4,71 mm e 1,57 mm positivo para cada camada, esta gerou uma deformação geral no corpo de prova de 9.98 mm positivo.

A quinta camada foi preenchida com três passes, com deformação positiva de 2,01 mm. Nesta camada o lado da raiz já estava para dar o passe de acabamento, enquanto o lado da face ainda estava em processo de enchimento.

A sexta camada foi preenchida com três passes e ocorreu uma deformação positiva de 0,95 mm.

A sétima camada que é o acabamento do lado da face e foi preenchida com quatro passes, teve uma deformação positiva de 0,64 mm.

Na soldagem do corpo de prova "C", pode ser observado que a deformação sempre ocorreu positivamente. Esta ocorrência se deve porque a preparação da junta foi de 1/3 e 2/3. Sempre a deformação sempre ocorrera para o lado em que o chanfro for maior.

A deformação final deste corpo de prova foi de 13,6 mm. Este resultado é a somatória total das deformações que pode ser observadas na figura 5.4.

5.3. COMPARAÇÃO DA DEFORMAÇÃO COM A NORMA ISO 13920.

A norma ISO 13920 [17], oferece um padrão de tolerância de deformação para estruturas soldadas e esta é classificada com o tamanho da peça ou estrutura e a quantidade de deformação. A figura 5.5 mostra um gráfico com os valores transcritos da norma.

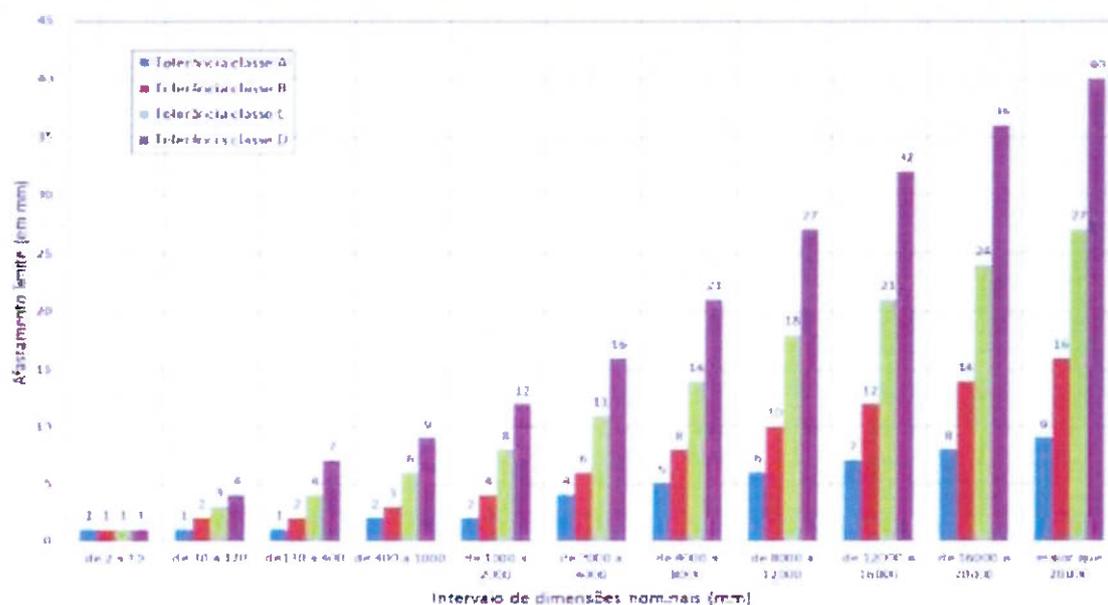


Figura 5.5 - Tolerâncias gerais de estruturas soldadas.

Para realizar a comparação dos valores de distorção dos experimentos deste trabalho com a norma ISO 13920 foi realizado um gráfico, mostrado na figura 5.6, que compara esses valores com o especificado na norma, sendo adotada a escala de 400,0 a 1000,0 mm devido o tamanho final dos corpos de prova ser de 500,0 mm de comprimento por 400,0 mm de largura.

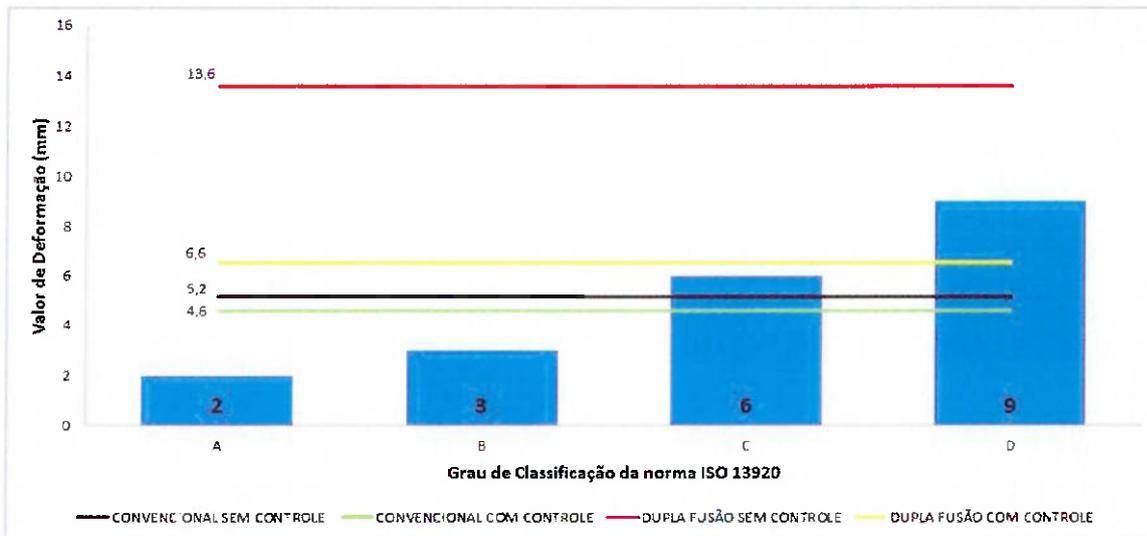


Figura 5.6 - Gráfico com os valores de distorção especificados pela norma ISO 13920, colunas na cor azul, e os valores obtidos ao final da soldagem nos quatro experimentos, estes representados nas linhas coloridas [17].

O corpo de prova soldado com a técnica convencional sem controle de deformação, representado pela linha da cor preta, teve uma deformação final de 5,2 mm, sendo considerado aceitável e classificado com o grau "C", conforme indica da figura 5.6.

O corpo de prova soldado com a técnica convencional com controle de deformação, representado pela linha da cor verde, teve uma deformação final de 4,6 mm, considerado aprovado e classificado com o grau classe "C", conforme indica na figura 5.6.

O corpo de prova soldado com a técnica da dupla fusão e sem controle de deformação, representado pela linha da cor vermelha, teve deformação final

de 13,6 mm, sendo considerado reprovado por não se enquadrar em nenhum grau da norma de tolerância para estrutura soldada.

O corpo de prova soldado com a técnica da dupla fusão com controle de deformação teve deformação de 6,6 mm, sendo considerado aprovado e classificado com o grau "D", conforme indica figura 5.6.

6. CONCLUSÕES.

1. A deformação nos experimentos que utilizaram a técnica convencional teve o mesmo grau de deformação quando classificados pela norma ISO 13920.
2. Para os experimentos utilizados com a técnica de dupla fusão é possível afirmar que o procedimento de soldagem com e sem controle de deformação oferece menor custo, em menor tempo, sendo justificado pela eliminação da goivagem, esmerilhamento e da inspeção não destrutiva de partículas magnéticas e/ou líquido penetrante, que são aplicados na soldagem convencional com e sem controle de deformação.
3. A técnica da dupla fusão sem o controle de deformação não pode ser aplicada com chanfros assimétricos a estruturas soldadas, devido o alto grau de deformação gerado, ficando fora da classificação de grau de deformação da especificação da norma ISO 13920. Dentre as técnicas de soldagem com dupla fusão, a soldagem com controle de deformação apresentou melhores resultados que a soldagem com dupla fusão sem controle de deformação.
4. Os valores de deformação encontrados nos dois experimentos que utilizaram a técnica da dupla fusão foram maiores quando comparado com os experimentos soldados pela técnica convencional. Isso pode ser explicado pela geometria do chanfro adotado, que era assimétrico.
5. O procedimento de soldagem realizado com a técnica da dupla fusão na raiz pode ser utilizado para controle da deformação, desde que seja feito um treinamento com os soldadores.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Realização dos experimentos com a geometria do chanfro simétrico.
2. Estudos das propriedades mecânicas com esta técnica de soldagem.
3. Estudo metalúrgico da poça de fusão com a técnica da soldagem simultânea da raiz com duplo arame em lados opostos da junta.
4. Estudo da soldagem simultânea da raiz com duplo arame em lados opostos da junta em outros materiais como: alumínio e aços inoxidáveis.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. - COLPAERT, H.; Metalografia dos produtos Siderúrgicos comuns; Ed. 4; São Paulo: Edgard Blucher, 2008; capítulo 14.
2. - STANDARD Welding Terminology Terms and Definition; AWS A3.0:2001 An American National Standard.
3. - SÉFÉRIAN, D "Metallurgie de la soudure", Ed. Dunod, Paris, França, pg. 209, 1959.
- 4 - BRANDI, S. D.; Metalurgia da Soldagem: conceitos; ZIEDA, S; TATINI, I; Coleção tecnologia SENAI; Soldagem, São Paulo: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 1997; cap. 2, pag. 89 - 92.
5. – THE PROCEDURE HANDBOOK AF ARC WELDING. Lincoln Electric; Ed. fourteenth; section 3
6. – LINNERT, E. G.. Welding Metallurgy; Ed. Third, vol. 2; chapter 11
7. – WELDING HANDBOOK. section 5; sixth Edition; pag. 81.29 a 81.30
8. – AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1/D1.1M:2010; pag 201; item5.21
9. - <http://weldingdesign.com/welding-avoiding-weld-distortion-thin-sheet-709/>
10. - MEYER ,D. W.,Flux Cored Arc Welding; Welding Brazing and Soldering. Metals Handbook; vol. 6, 10 ed. American Society of Metals, 1998, pag. 581 - 590.
11. - OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. – Engenharia de Soldagem e Aplicações – 1982 – p 261.
12. – WU, C. S.; ZHANG, M. X.; LI, K, H.; ZHANG, Y. M. Numerical Analysis of Double-Electrode Gas Metal Arc Welding Process. Computational Materials Science. 416 – 423p. accepted 11 July 2006.

13. - ZHANG, Y. M., Pan, c. and Male A. T.; Welding of austenitic stainless steel using double sided arc welding process; Materials Science and technology, October 2001, vol. 17.
14. - SPECIFICATION for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals; ASME II Parte C; ed. 2010; Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding; SFA 5.20/SFA 5.20M; AWS specification A5.20/A5.20M-2005
15. - QUALIFICATION Standard for Welding and Brazing Procedures, welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators; ASME seção IX ; ed. 2010.
16. - TWI Job Knowledge for Welders, part 34, Welding Institute, Cambridge, UK, March 21, 1998.
17. - INTERNATIONAL STANDARD. Welding- General tolerances for welded constructions – Dimensions for lengths and angles – shape and position; ISO 13920, first edition, 1996 (E).