

**Élisson Cerilo da Costa**

**ESTUDO DA DISTORÇÃO NA SOLDAGEM DE  
AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L COM DIFERENTES  
GEOMETRIAS DE CHANFROS.**

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

04/2014

**Élisson Cerilo da Costa**

(Tecnólogo, Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 1977)

**ESTUDO DA DISTORÇÃO NA SOLDAGEM DE  
AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L COM DIFERENTES  
GEOMETRIAS DE CHANFROS.**

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:

Especialização em Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

Co-orientador: Me. Jaime Casanova Soeiro Junior

São Paulo

04/2014

*Amar a Deus sobre todas as coisas e ao próximo como Nosso*

*Senhor Jesus Cristo nos amou.*

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho à minha querida esposa Izabel e aos meus  
amados filhos Rafael e Aline.*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Maria Izabel, e a meus filhos Rafael e Aline pelo incentivo à minha volta para a Universidade, em especial, na USP.

Ao Prof. Dr. Brandi e ao Me. Jaime Casanova, nas orientações e nas trabalhosas e dedicadas correções do TCC ao longo do curso.

Ao colega Marcos Fernandes por incentivar-me a fazer o curso, pela coordenação na execução dos corpos de prova, pela atenção e paciência e, pelas orientações e dicas sobre o TCC.

A todos os colegas da Metalúrgica Atlas – Grupo Votorantim, que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste Trabalho de Conclusão de Curso, que foram:

Srs. Olair Adalberto e Paulo Pisauro - Diretores,

Fabio Mendes – superv. eng<sup>a</sup>, Alisson Mollo e Ruan Azevedo, engenheiros.,

Jesse Vergueiro – superv. qualidade, João Paulo – inspetor de qualidade,

Hamilton Teles – Técnico em Soldagem,

Agnaldo Santos – enc. caldeiraria, Antônio Batista e Daniel Santana –

Soldadores, Thiago Estellita – Caldeireiro, e Maurício Arruda – Ajudante Geral,

Adilson Fernandes – Encarregado de Usinagem, Deusdede Medeiros –

Mandrilhador.

## **CURRICULUM VITAE**

### **Formação:**

Tecnólogo em Mecânica, Modalidade Projetos. Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 1977.

### **Qualificação:**

Profissional há 35 anos nas atividades de Desenvolvimento, Coordenação e Supervisão de Projetos de Máquinas e Equipamentos com vivência na geração, controle e distribuição de desenhos e instruções técnicas e na especificação de materiais.

Ênfase em Processos de Fabricação de Bens de Capital, nos setores de geração de energia, mineração, metalurgia, siderurgia, petroquímica, marítima, celulose, automação industrial e embalagens, conforme normas técnicas e instruções de clientes nacionais e internacionais (idioma inglês).

Usuário dos softwares SolidWorks, AutoCad e Microsoft Office.

Cargos exercidos: Gerente de Apoio Técnico; Supervisor de Departamentos: Técnico, de Ferramentaria, de Projetos e Construção de Máquinas; Tecnólogo; Encarregado de Métodos e Processos; Projetista.

## **RESUMO**

Distorções resultantes da soldagem de metais preocupam a indústria metalúrgica em geral. Para um bom produto final soldado, o projeto, os materiais e os processos de soldagem devem ser planejados antecipadamente, para que as deformações geradas pelas tensões residuais inerentes aos aquecimentos localizados durante as soldagens sejam minimizadas ou eliminadas. Este experimento visou à medição das distorções transversais, longitudinais e angulares de corpos de prova feitos em chapas de 19,7 mm de espessura, em aço inoxidável da norma AISI 316L, com chanfros simétricos e assimétricos, em juntas de topo. Todos os passes das soldagens foram sempre executados na posição vertical e na direção ascendente. Os passes das raízes foram executados utilizando-se a técnica da dupla fusão, com o processo de soldagem com arame tubular com proteção gasosa (CO<sub>2</sub>). O enchimento completo foi executado em passes consecutivos, no mesmo processo, com simples arame. As medições foram feitas antes do passe de raiz, após cada passe de raiz, e após cada passe de enchimento, com os CPs sempre resfriados ao ar, após cada passe de soldagem. Os valores das contrações, dilatações e distorções foram registrados e, no final, comparados com a norma de tolerâncias para estruturas soldadas ISO 13920. As soldagens foram executadas “com controle” e “sem controle” das deformações, a cada par de corpos de prova. Os resultados foram registrados e comentados.

## **ABSTRACT**

Resultant distortions on the welding of metals worry metallurgical industries in general. For a good final welded product, the design, the materials and the welding processes must be priory planned for minimizing or eliminating the distortions due to the residual stresses inherent to the localized heating during the welding. This experiment aimed the measurement of the transverse, longitudinal and angular distortions of the proof-bodies made by 19,7mm thickness stainless steel plates of the standard AISI 316L, with symmetrical and nonsymmetrical chamfers, in butt weld joints. All the welding passes were made in the vertical position, and in the upward direction. The root passes were executed using the flux cored arc welding process (FCAW), gas shielded (CO<sub>2</sub>), with the technic of double-sided electrode. The completing filling passes were executed in the same process but, with a single electrode. The measurements were executed prior to the root pass, after the root pass and, after each filling pass, always after cooling the proof bodies in the air. The values of the contractions, expansions and distortions were recorded and, at the end, compared with the tolerances of the standard ISO 13920, for welded structures. The weldings were executed with and without control of the distortions, in each pair of the proof-bodies. The results were recorded and commented.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Camada passiva retirada e refeita, na presença de oxigênio.....	3
Figura 2.2 - Variação - Módulo de Young versus Temperatura.....	5
Figura 2.3a - Microestrutura austenítica. Aço AISI 304.....	7
Figura 2.3b - Aplicações típicas dos aços austeníticos.....	7
Figura 2.4 - Origem dos diferentes tipos de aços oxidáveis.....	8
Figura 2.5 - Soldagem arame tubular auto-protégido.....	11
Figura 2.6 - Soldagem com arame tubular com proteção gasosa de fonte externa.....	11
Figura 2.7 - Instalação esquemática para soldagem automática.....	12
Figura 2.8 - Seções típicas de fabricação de arames tubulares.....	13
Figura 2.9 - Esquema Utilizado - Processo Dupla Fusão.....	23
Figura 2.10 - Configuração plasma convencional.....	24
Figura 2.11 - Esquema para a soldagem Dupla Fusão e Soldagem a Plasma. Alumínio 5052.....	25
Figura 2.12 - Processo Dupla Fusão com arame tubular.....	26
Figura 2.13 – Sistema de Soldagem com Arco de Plasma.....	28
Figura 2.14 - Diagrama de Schaeffler do metal depositado. Aço Inoxidável.....	29
Figura 2.15 - Precipitação intergranular do aço inoxidável.....	30
Figura 2.16 - Diagrama WRC-1988.....	32
Figura 2.17 - Importância das tensões residuais e distorções no projeto e fabricação de estruturas soldadas.....	34
Figura 2.18 - Tensões de contração longitudinais (L) e transversais (T) em solda de topo.....	36
Figura 2.19 - Tensões de contração Longitudinais (L) e Transversais (T) em solda de ângulo.....	36
Figura 2.20 - Solda de topo em chapa.....	36
Figura 2.21 - Distribuição das tensões em solda de topo ( $\sigma_x$ ) ao longo de X...37	37

Figura 2.22 - Distribuição das tensões em solda de topo ( $\sigma_y$ ) ao longo de Y...	37
Figura 2.23 - Barra Livre.....	38
Figura 2.24 – Barra Restrita.....	38
Figura 2.25 – Efeito da barra restrita nas Tensões Residuais.....	39
Figura 2.26 - Fatores que contribuem para a distorção total na soldagem e as interações entre si e com a distorção total.....	41
Figura 2.27 - Distorções em solda de topo e em solda em ângulo.....	43
Figura 2.28 - Variação dos valores de (E), (LE) e ( $\alpha$ ), para aços carbono, em função da variação da temperatura.....	44
Figura 2.29 - Abertura de raiz recomendada. ....	48
Figura 2.30 - Redução do ângulo de abertura. Aumento da abertura.....	48
Figura 2.31 - Chanfros em "U" diminuem a distorção angular.....	48
Figura 2.32 - Chanfros em duplo "V" simétricos diminuem a distorção angular.....	49
Figura 2.33 - Sequência de soldagem A, B, C e D. Comparação da distorção angular final sem controle e com controle.....	49
Figura 2.34 - Sequência de soldagem de 1 até 8 diminui distorções.....	50
Figura 2.35 - Reforço de solda excessivo.....	50
Figura 2.36 - Cordões intermitentes diminuem deformações.....	51
Figura 2.37 - Sequência de soldagem. Cordões contínuos e intermitentes.....	51
Figura 2.38 - Sequência de soldagem para recipientes cilíndricos.....	52
Figura 2.39 - Sequência de soldagem para reduzir o efeito do aquecimento na geração de tensões e distorções. (a) número de cordões recomendados; (b) quantidade excessiva de cordões.....	52
Figura 2.40 - Comparação da soldagem com referência à linha neutra.....	53
Figura 2.41 - Passe à Ré .....	54
Figura 2.42 - Posicionamento prévio das partes .....	54
Figura 2.43 - Espaçamento adequado ao processo escolhido.....	55
Figura 2.44 – Exemplo de Travamentos Mecânicos Prévios.....	56

Figura 2.45 - Pré-deformação antes da soldagem.....	56
Figura 2.46a - Aquecimento localizado após o resfriamento completo da soldagem.....	57
Figura 2.46b - Resfriamento após o aquecimento por chama.....	57
Figura 2.47 - Influência da velocidade de soldagem.....	58
Figura 4.1 – Sequência de Corte a Plasma.....	62
Figura 4.2 – Etapas de Desempenamento.....	62
Figura 4.3a – Esquadrejamento .....	63
Figura 4.3b – Chanfros.....	63
Figura 4.4 - Medidas de usinagem. ....	63
Figura 4.5 – Chanfros simétricos.....	63
Figura 4.6 - Chanfros assimétricos.....	63
Figura 4.7a - Identificação (CP2) .....	64
Figura 4.7b - Identificação (CP4) .....	64
Figura 4.8a – Suportes provisórios.....	64
Figura 4.8b – Suportes provisórios.....	64
Figura 4.9 - Referências para medições longitudinais, transversais e angulares.....	65
Figura 4.10a – Medições T1 a T12.....	66
Figura 4.10b – Medições L1 a L12.....	66
Figura 4.11 – CPs sobre cavalete.....	66
Figura 4.12 – Dupla Fusão (Raiz).....	67
Figura 4.13 - Esquema de soldagem com dupla fusão no passe de raiz.....	67
Figura 4.14 - Medição da deformação angular sobre mesa de desempenho.....	68
Figura 4.15 – Sequência de soldagem utilizada.....	69
Figura 4.16 – 2º Passe. Um lado.....	71
Figura 4.17 – Uma camada (2 cordões).....	71

Figura 4.18 – Cotas para as medidas Longitudinais e Transversais.....	71
Figura 4.19 – Cotas para as medidas Angulares.....	72
Figura 5.1 – Gráfico das distorções angulares para o CP1.....	74
Figura 5.2 – Gráfico das distorções angulares para o CP2.....	75
Figura 5.3 – Gráfico das distorções angulares para o CP3.....	76
Figura 5.4 – Gráfico das distorções angulares para o CP4.....	78
Figura 5.5 – Gráfico - distorções angulares dos CPs.....	81
Figura 5.6 – Gráfico das Distorções Longitudinais do CP1.....	82
Figura 5.7 – Gráfico das Distorções Longitudinais do CP2.....	83
Figura 5.8 – Gráfico das Distorções Longitudinais do CP3.....	84
Figura 5.9 – Gráfico das Distorções Longitudinais do CP4.....	85
Figura 5.10 – Gráfico das Distorções Longitudinais finais dos CPs.....	87
Figura 5.11 – Gráfico das Distorções Transversais do CP1.....	89
Figura 5.12 – Gráfico das Distorções Transversais do CP2.....	90
Figura 5.13 – Gráfico das Distorções Transversais do CP3.....	91
Figura 5.14 – Gráfico das Distorções Transversais do CP4.....	92
Figura 5.15 – Gráfico das Distorções Transversais finais dos CPs.....	93

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Propriedades dos aços inoxidáveis.....	5
Tabela 2.2a - Comp. Quím. Aços inoxidáveis austeníticos.....	7
Tabela 2.2b - Propr. Mec. Aços inoxidáveis austeníticos.....	8
Tabela 2.3 - Guia de seleção de gases para o processo a plasma.....	22
Tabela 2.4 - Parâmetros usados na soldagem.....	23
Tabela 2.5 – Propriedades físicas de alguns materiais .....	44
Tabela 4.1 - Composição Química da Chapa de Fabricação dos CPs.....	60

Tabela 4.2 - Composição Química do Arame Tubular.....	60
Tabela 4.3 - Características do Arame Tubular.....	60
Tabela 4.4 - Instrumentos e Equipamentos na confecção dos CPs.....	61
Tabela 4.5 – Validade – Calibração dos Instrumentos de medição.....	61
Tabela 4.6 - CPs “com controle e sem controle” da Deformação Angular.....	68
Tabela 5.1 – Distorções angulares na sequência de soldagem – CP1.....	73
Tabela 5.2 – Distorções angulares na sequência de soldagem – CP2.....	74
Tabela 5.3 – Distorções angulares na sequência de soldagem – CP3.....	76
Tabela 5.4 – Distorções angulares na sequência de soldagem – CP4.....	78
Tabela 5.5 – Dimensões “L” e ângulos máximos obtidos nos CPs.....	80
Tabela 5.6 – Tolerâncias para dimensões angulares da norma ISO 13920.....	80
Tabela 5.7 – Dimensões longitudinais dos CPs antes do passe de Raiz.....	82
Tabela 5.8 – Distorções Longitudinais do CP1.....	83
Tabela 5.9 – Distorções Longitudinais do CP2.....	84
Tabela 5.10– Distorções Longitudinais do CP3.....	85
Tabela 5.11– Distorções Longitudinais do CP4.....	86
Tabela 5.12 – Tolerâncias para dimensões lineares da norma ISO 13920.....	86
Tabela 5.13 – Dimensões Transversais dos CPs antes do passe de Raiz.....	88
Tabela 5.14 – Distorções Transversais do CP1.....	89
Tabela 5.15 – Distorções Transversais do CP2.....	90
Tabela 5.16– Distorções Transversais do CP3.....	91
Tabela 5.17– Distorções Transversais do CP4.....	92
Tabela 5.18– Variáveis utilizadas na soldagem dos CPs. ....	94

## **LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS**

TIG:	Tungsten Inert Gas.
MIG:	Metal Inert Gas.
MAG:	Metal Active Gas.
AISI:	American Iron and Steel Institute.
UNS:	Unified Number System.
PH:	Precipitation Hardening.
GMAW:	Gas Metal Arc Welding.
SMAW:	Shielded Metal Arc Welding.
GTAW:	Gas Tungsten Arc Welding.
ISO:	International Organization for Standardization.
ER:	Eletrodo Revestido.
FCAW:	Flux Cored Arc Welding
MA	Metal de Adição.
ZAC	Zona Afetada pelo Calor.
LE:	Limite de Escoamento.
FCAW-G:	Flux Cored Arc Welding – Gas Shielded.
FCAW-S:	Flux Cored Arc Welding – Self Shielded.
MB	Metal de Base.

- E: Módulo de Elasticidade.
- $\alpha$ : Coeficiente de Expansão Térmica Linear.
- CP: Corpo de Prova.
- ASME: American Society of Mechanical Engineers.
- AWS American Welding Society.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>iii</b>
<b>CURICULUM VITAE.....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>xiv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Aços Inoxidáveis.....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	6
<b>2.2 Processos de soldagem dos Aços Inoxidáveis.....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Processo de Soldagem por Arame Tubular com Proteção Gasosa e Auto-Protegido.....	10
2.2.1.1 Vantagens do processo de soldagem por arame tubular (com proteção gasosa e auto-protegido).....	13
2.2.1.2 Desvantagens processo de soldagem por arame tubular (com proteção gasosa e auto-protegido).....	14
2.2.2 Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido.....	15
2.2.2.1 Vantagens do Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido.....	15
2.2.2.2 Desvantagens do Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido....	16
2.2.3 Processo de Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas).....	16
2.2.3.1 Vantagens do Processo de Soldagem TIG.....	16
2.2.3.2 Desvantagens do Processo de Soldagem TIG.....	17
2.2.4 Processo de Soldagem MIG/MAG.....	17
2.2.4.1 Vantagens do Processo de Soldagem MIG/MAG.....	18
2.2.4.2 Desvantagens do Processo de Soldagem MIG/MAG.....	19
2.2.5 Processo de Soldagem por Arco Submerso.....	19
2.2.5.1 Vantagens do Processo de Soldagem por Arco Submerso.....	19
2.2.5.2 Desvantagens do Processo de Soldagem por Arco Submerso.....	20
2.2.6 Processo de Soldagem por Dupla Fusão.....	21
2.2.7 Processo de Soldagem com Arco de Plasma.....	27
<b>2.3 Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis.....</b>	<b>29</b>
2.3.1 Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	30
<b>2.4 Tensões Residuais Distorções e Deformações.....</b>	<b>32</b>
2.4.1 Tensões Residuais.....	35
2.4.1.1 Análise das tensões residuais e das distorções em soldagens e seus efeitos no desempenho de funcionamento.....	41
2.4.2 Causas das Distorções.....	43
2.4.3 Efeito das propriedades dos materiais nas deformações por soldagem.....	43
2.4.4 Controle das Distorções.....	47
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>59</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>60</b>

<b>4.1 Materiais.....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 Métodos.....</b>	<b>61</b>
<b>5. Resultados e discussões.....</b>	<b>73</b>
<b>5.1 Distorções Angulares .....</b>	<b>73</b>
5.1.1 Corpo-de-prova 1, chanfro simétrico, sem controle de distorção.....	73
5.1.2 Corpo-de-prova 2, chanfro simétrico, com controle de distorção.....	74
5.1.3 Corpo-de-prova 3, chanfro assimétrico, sem controle de distorção.....	76
5.1.4 Corpo-de-prova 4, chanfro assimétrico, com controle de distorção.....	78
<b>5.2 Distorções Longitudinais .....</b>	<b>82</b>
5.2.1 Corpo-de-prova 1, chanfro simétrico, sem controle de distorção.....	82
5.2.2 Corpo-de-prova 2, chanfro simétrico, com controle de distorção.....	83
5.2.3 Corpo-de-prova 3, chanfro assimétrico, sem controle de distorção.....	84
5.2.4 Corpo-de-prova 4, chanfro assimétrico, com controle de distorção.....	85
<b>5.3 Distorções Transversais.....</b>	<b>88</b>
5.3.1 Corpo-de-prova 1, chanfro simétrico, sem controle de distorção.....	88
5.3.2 Corpo-de-prova 2, chanfro simétrico, com controle de distorção.....	89
5.3.3 Corpo-de-prova 3, chanfro assimétrico, sem controle de distorção.....	90
5.3.4 Corpo-de-prova 4, chanfro assimétrico, com controle de distorção.....	92
<b>6. Conclusões.....</b>	<b>95</b>
<b>7. Sugestões de trabalhos futuros.....</b>	<b>99</b>
<b>8. Referências Bibliográficas. ....</b>	<b>100</b>

## **1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA**

As distorções e deformações resultantes da união de chapas e de elementos estruturais metálicos por soldagem ocorrem com grande intensidade e frequência em praticamente todas as indústrias de fabricação que utilizam os mais variados processos. Os engenheiros e técnicos que atuam na área de soldagem de peças metálicas em geral têm acompanhado ou convivido com todas as dificuldades e custos que se tem com a fabricação dos diversos dispositivos de travamento para uma boa soldagem, que resultem num mínimo de deformações. Os cuidados excessivos, mas necessários, com os processos de soldagem e os serviços de desempenamento ou calibragem das peças durante e após a soldagem, elevam os custos e aumentam os prazos de entrega dos produtos, diminuindo a produtividade.

Assim, foi feita a soldagem de topo em chapas laminadas em aço inoxidável austenítico AISI 316L, com espessura de 19,7mm, com chanfros simétricos e assimétricos, com e sem controle da deformação durante a soldagem. Foi utilizado o processo de soldagem dupla fusão no passe de raiz com arame tubular e proteção gasosa. O restante do enchimento foi executado com o processo de soldagem com arame tubular com proteção gasosa.

Justifica-se a exploração deste experimento com a utilização da "soldagem da raiz com dois arames simultâneos, em lados opostos, numa só poça de fusão", objetivando a equânime distribuição de calor, tensões, dilatações e contrações nas chapas, por igual em cada lado da raiz, o que,

acreditamos, poderia melhorar a qualidade da solda e promover a diminuição das deformações.

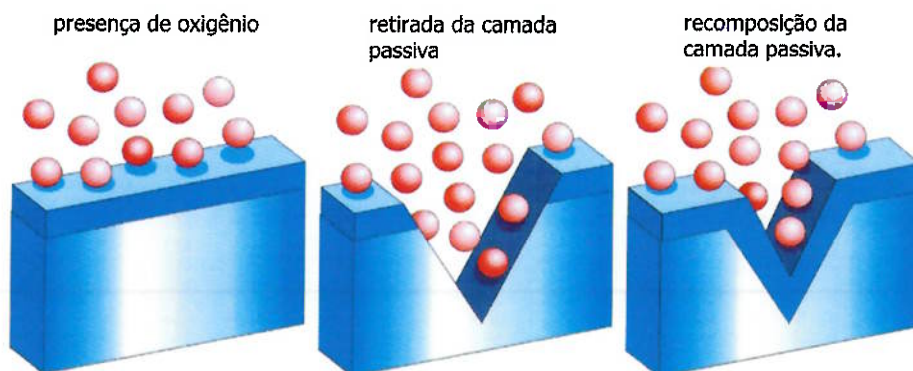
## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

### ***2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS.***

São os aços que contêm pelo menos 12% de cromo em sua composição química, sendo resistentes à corrosão e ao calor [1].

A resistência à corrosão e a não oxidação destes aços liga é atribuída à presença de uma camada passiva de óxido de cromo sobre a superfície. Quando expostos a condições que removem esta camada passiva, os aços inoxidáveis ficam sujeitos a ataque corrosivo, mas, a camada se recompõe muito rapidamente pela combinação do cromo com o oxigênio existente no meio a que está exposto. A velocidade de recomposição da camada passiva depende do conteúdo de cromo. [1].

A figura 2.1 representa esquematicamente a recomposição da Camada Passiva, quando retirada, mas, somente na presença de oxigênio.



**Figura 2.1** - Camada passiva retirada e refeita, na presença de oxigênio [2].

Os diversos tipos de aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco famílias básicas que são [3]:

**-Aços Inoxidáveis Austeníticos:** Incluem as séries 200 e 300 e o mais comum, é o AISI 304. As primeiras adições de elementos de liga são cromo e níquel [3]. Não são temperáveis [1].

**-Aços inoxidáveis Ferríticos:** São as ligas Fe-Cr não temperáveis Os mais representativos são os tipos AISI 405, 409, 430, 422 e 446 [3].

**-Aços Inoxidáveis Martensíticos:** São similares em composição aos do grupo ferrítico, mas contem mais carbono e menos cromo, para permitir endurecimento por tratamento térmico. Os mais representativos são AISI 403, 410, 416 e 420 [3].

**-Aços Inoxidáveis Duplex:** São fornecidos com uma microestrutura com quantidades aproximadamente iguais de ferrita e austenita. Contém 24% de cromo e 5% de níquel. Sua numeração não se inclui nas séries 200, 300 e 400 [3]. Alguns exemplos de aços Inoxidáveis duplex: 2205, 2304 e 2507.

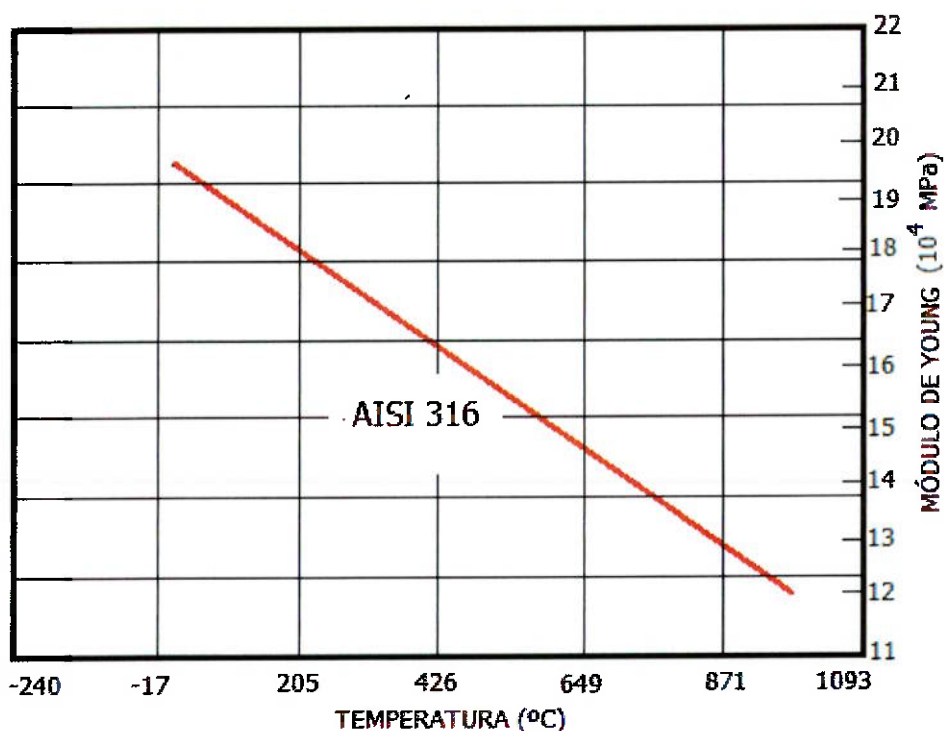
**-Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação:** Contém adições de elementos de liga tal como o alumínio que lhes permite o endurecimento por uma solução e tratamento térmico por envelhecimento. Dividem-se em subgrupos chamados de martensíticos, semiausteníticos e austeníticos. São identificados pela série AISI 600 [3]. Alguns exemplos de aços inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação: PH 13-8 Mo, 15-5 PH e PH 15-7 Mo.

A tabela 2.1 mostra as propriedades físicas de alguns aços inoxidáveis.

**Tabela 2.1** – Propriedades dos aços inoxidáveis. (Modif. de [3]).

Propriedades	Tipo	Tipo	Tipo	Tipo
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico	Endurecido por Precipitação
Módulo de Young (GPa)	195	200	200	200
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	8,0	7,8	7,8	7,8
Coef. de Expansão Térmica ( $\mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$ )	16,6	10,4	10,3	10,8
Coef. de Condutividade Térmica (w/mk)	15,7	25,1	24,2	22,3
Calor Específico (J/k °K)	500	460	460	460
Resistividade Elétrica ( $\mu\Omega\text{cm}$ )	74	61	61	80
Permeabilidade Magnética	1,02	600 - 1.100	700 - 1.000	95
Temperatura de Fusão ( $^\circ\text{C}$ )	1.375 - 1.450	1.425 - 1.530	1.525 - 1.530	1.400 - 1.440

A figura 2.2 mostra a variação do Módulo de Young versus a variação da Temperatura, para o aço inoxidável AISI 316.



**Figura 2.2** – Variação do Módulo de Young versus Temperatura (Modif. de [4]).

### **2.1.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.**

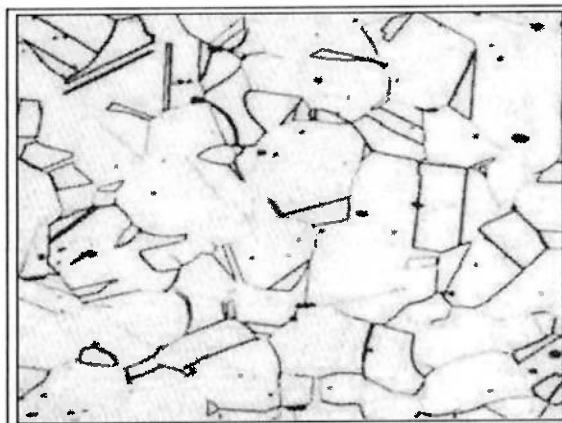
São os inoxidáveis com maior número de elementos de liga e de maior utilização. Nestes aços das séries 200 e 300 o cromo normalmente ultrapassa a porcentagem de 17% e o níquel pode, com poucas exceções, exceder 7%. O tipo 302 tem 18%Cr e 8%Ni. A principal característica deste grupo é o estabelecimento de estrutura austenítica durante o resfriamento de elevadas temperaturas. Na série 200 o níquel é substituído, em parte, por manganês e nitrogênio. Os aços inoxidáveis austeníticos têm elevada ductilidade, baixo limite de escoamento, e boas características para operações de conformação (estampagem). Na condição recozida são não magnéticos. Quando trabalhados a frio tendem a ser levemente magnéticos, dependendo da composição química. Possuem excelentes propriedades à temperaturas criogênicas e maior resistência que os aços da série 400, quando em temperaturas próximas de 540°C [5].

Os aços austeníticos tem elevada resistência à corrosão dentre os aços inoxidáveis, particularmente quando foram recozidos para a dissolução dos carbonetos de cromo, depois resfriados para a retenção do carbono em solução [5].

Observação: Os aços inoxidáveis "duplex" foram desenvolvidos para prover uma maior resistência à corrosão como alternativa aos austeníticos da série 300 [5].

A figura 2.3a mostra a microestrutura austenítica do aço AISI 304.

A figura 2.3b mostra aplicações típicas do aço inoxidável austenítico.



**Figura 2.3a** – Microestrutura Austenítica. Aço AISI 304 (Modif. de [6]).

APLICAÇÕES TÍPICAS - AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	
•	equipamentos para indústria química e petroquímica
•	equipamentos para indústria alimentícia e farmacêutica
•	construção civil
•	baixelas e utensílios domésticos.

**Figura 2.3b** – Aplicações típicas dos aços austeníticos (Modif. de [6]).

A tabela 2.2a mostra a composição química de aços austeníticos.

**Tabela 2.2a** – Comp. Quím. Aços inoxidáveis austeníticos (Modif. de [6]).

DESIGNAÇÃO UNS	TIPO AISI	COMPOSIÇÃO - PESO (%), máx.									
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	OUTROS
<b>LIGAS AUSTENÍTICAS</b>											
S28100	301	0.15	5.50-7.50	1.00	0.060	0.030	16.00-18.00	3.50-5.50	...	0.25	...
S28161	Call-Tough(e)	0.15	4.00-6.00	3.00-4.00	0.040	0.040	15.00-18.00	4.00-6.00	...	0.05-0.20	...
S29300	231E2(f)	0.08	5.00-6.50	1.00	0.040	0.040	16.00-18.00	5.00-6.50	0.50	...	1.75-2.25 Cu
S30910	22-19-Ni(g)	0.06	4.00-6.00	1.00	0.040	0.030	20.50-23.50	11.50-11.50	1.50-3.00	0.20-0.40	0.10-0.30 Nb, 0.10-0.30 V
S31608	SCF19(e)	0.10	4.00-7.00	0.60	0.030	0.030	18.00-21.00	10.00-20.00	...	0.15	2.00 Cu
S31306	15-15L-C1(c)	0.25	15.00-18.00	1.00	0.050	0.050	16.00-21.00	1.00	0.50-3.00	0.20-0.80	0.50-2.00 Cu
S31806	Nitronic 45N(g)	0.10	7.00-9.00	3.50-4.50	0.040	0.030	16.00-18.00	7.00-9.00	...	0.05-0.20	...
S31904	21-6-9L-C1(c)	0.04	8.00-10.00	1.00	0.060	0.030	19.00-21.00	5.50-7.50	...	0.15-0.40	...
S24100	18-2Mn(i)	0.14	11.00-14.00	1.00	0.060	0.030	16.50-19.50	0.50-2.50	...	0.20-0.45	...
S22200	18-18 Plus(e)	0.15	17.00-19.00	1.00	0.045	0.030	17.00-19.00	...	0.50-1.50	0.40-0.60	0.50-1.50 Cu
	Nitronic 30(g)	0.10	7.00-9.00	1.00	...	...	15.00-17.00	1.50-3.00	...	0.15-0.30	1.00 Cu
S31800	311	0.15	2.00	1.00	0.045	0.030	16.00-18.00	6.00-8.00	...	...	...
S31020	312	0.15	2.00	1.00	0.045	0.030	17.00-19.00	8.00-10.00	...	...	...
S30909	313	0.15	2.00	1.00	0.20	0.15(a)	17.00-19.00	8.00-10.00	0.60	...	...
S31010	311 Plus X(d)	0.15	2.50-4.50	1.00	0.20	0.25(a)	17.00-19.00	7.00-10.00	0.75	...	0.15 mm Se
S31031	313Se	0.15	2.00	1.00	0.20	0.060	17.00-19.00	8.00-10.00	...	...	...
S31033	311 Cu(b)	0.15	2.00	1.00	0.15	0.10(a)	17.00-19.00	6.00-10.00	...	...	2.50-4.00 Cu; 0.10 Cu
S30400	314	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	18.00-20.00	8.00-10.00	...	...	...
S30403	304L	0.01	2.00	1.00	0.045	0.030	18.00-20.00	8.00-12.00	...	...	...
S30430	702 HF(b)	0.10	2.00	1.00	0.045	0.030	17.00-19.00	8.00-10.00	...	...	1.00-4.00 Cu
S30451	302 HF-2-M(e)	0.06	2.00	1.00	0.040	0.14	16.00-19.00	9.00-11.00	...	...	1.50-2.40 Cu
S30452	704 HF(h)	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	18.00-20.00	8.00-10.00	...	0.10-0.30	...
S31020	305	0.12	2.00	1.00	0.045	0.030	17.00-19.00	10.00-13.00	...	...	...
S31050	306	0.20	2.00	1.00	0.045	0.030	22.00-24.00	12.00-15.00	...	...	...
S31100	309S	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	22.00-24.00	12.00-15.00	...	...	...
S31108	310	0.25	2.00	1.50	0.045	0.030	24.00-26.00	19.00-22.00	...	...	...
S31108	310S	0.08	2.00	1.50	0.045	0.030	24.00-26.00	19.00-22.00	...	...	...
S31100	316	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00	...	...
S31103	316L	0.030	2.00	1.00	0.045	0.030	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00	...	...
S31120	316F	0.08	2.00	1.00	0.20	0.10(a)	17.00-19.00	12.00-14.00	1.75-2.50	...	...
S31500	317	0.04	2.00	1.00	0.045	0.30	18.00-20.00	11.00-15.00	3.00-4.00	...	...
S31503	317L	0.030	2.00	1.00	0.045	0.030	18.00-20.00	11.00-15.00	3.00-4.00	...	...
S32300	321	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	17.00-19.00	9.00-12.00	...	...	5 x C 0.00 Ti
S34700	347	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	17.00-19.00	9.00-12.00	...	...	10 x C 0.00 Nb
S34720	347F(b)	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	17.00-19.00	9.00-12.00	...	...	10 x C 0.10 Nb, 0.15-0.35 Se
S34721	347F Se(b)	0.08	2.00	1.00	0.11-0.17	0.030	17.00-19.00	9.00-12.00	...	...	...
S318400	364	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	15.00-17.00	17.00-19.00	...	...	...
NUR20	35C(b-3(a))	0.07	2.00	1.00	0.045	0.030	19.00-21.00	32.00-38.00	2.00-3.00	...	8 x C 1.00 Nb, 3.00-4.00 Cu



Em análise da figura 2.4, adiciona-se ou diminui-se elementos de liga a partir do aço AISI 304 (Fe;18-20Cr;8-10Ni) para se obter as características desejadas, tais como melhoria da resistência à corrosão, resistência à corrosão em altas temperaturas, aumento da resistência mecânica, melhoria da soldagem, diminuição da sensitização (estabilização), facilitar a usinabilidade, para prover o endurecimento por precipitação, e outros [6].

O carbono é reduzido para melhorar as características de soldagem (304L, 316L, 317L), reduzindo a presença de carbonetos de cromo, precipitados durante a soldagem [6].

O molibdênio é adicionado a alguns dos aços austeníticos para aumentar a resistência aos mecanismos de corrosão localizados tais como a corrosão galvânica e por pite ou alveolar (ex.:316, 317) [6].

A adição de Nióbio, Tântalo e Titânio reduz a ocorrência de sensitização diminuindo a corrosão intergranular em altas temperaturas (321, 347 – inoxidáveis estáveis) [6].

A adição de Cobre, Titânio e Alumínio possibilita o endurecimento por precipitação (aços inoxidáveis PH) [6].

A adição de cromo e níquel aumenta a resistência mecânica e à oxidação (309, 310, 314, 330) [6]. Com maior adição de níquel possibilita-se a obtenção de maior resistência à corrosão em altas temperaturas (Ligas Ni-Cr-Fe) [6].

## **2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.**

Os principais processos empregados na soldagem dos aços inoxidáveis incluem a soldagem manual com eletrodo revestido, os processos

semiautomáticos e automáticos como TIG, MIG/MAG, Arame Tubular (com ou sem proteção gasosa externa), Arco Submerso, feixe de elétrons, resistência e outros.

Como os aços inoxidáveis contêm altas porcentagens de diferentes elementos de liga, suas soldagens tornam-se muitas vezes críticas, uma vez que os referidos elementos de liga podem influir diretamente na formação de fases frágeis ou alterar as propriedades originais do material-base [7].

### **2.2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARAME TUBULAR COM PROTEÇÃO GASOSA E AUTOPROTEGIDO.**

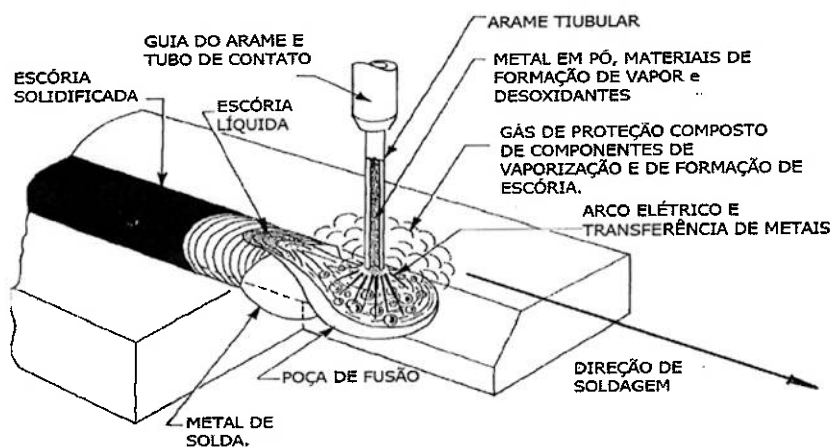
O consumível Arame tubular (autoprotégido) pode ser considerado uma evolução do Eletrodo Revestido. O eletrodo revestido, que tem o fluxo como uma camada externa, não permite a sua “fabricação e enrolamento em forma de bobinas” para possibilitar uma automatização do processo em forma de alimentação contínua, devido a não resistir à ação de curvamento, quebrando-se por ser frágil. Assim é sempre fabricado na forma de varetas [5].

A versatilidade e a manuseabilidade das varetas na soldagem manual estimularam esforços para a mecanização do processo de forma que um eletrodo de arame contínuo pudesse ser utilizado. A eliminação dos custos com o tempo perdido na troca das varetas e com a perda de parte do consumível foi também um grande objetivo atingido [5].

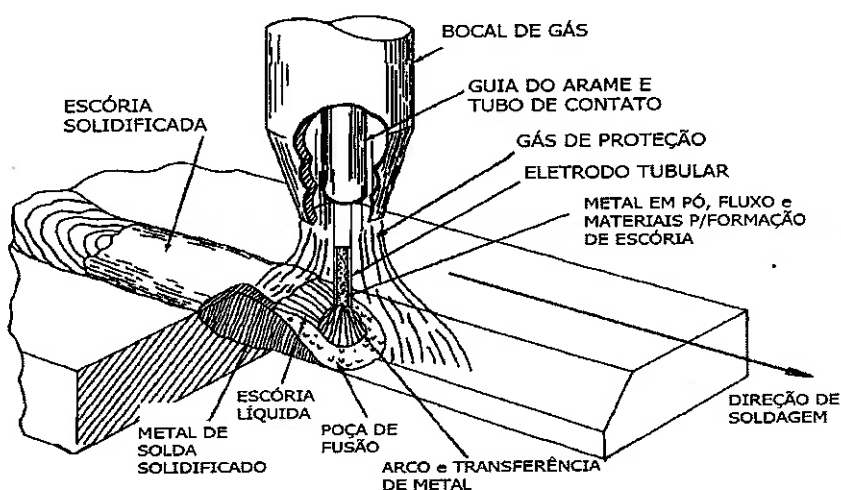
Assim, em função destas necessidades, criou-se o Processo de Soldagem por Arame tubular Autoprotégido que é uma soldagem por arco elétrico obtido entre o arame tubular e a peça a ser soldada. O fluxo, material necessário para

a proteção do arco e da poça de fusão, é inserido no eletrodo oco, durante a sua fabricação. Componentes adequados inseridos nos eletrodos tubulares resolveram os problemas de fluxagem, desoxidação do metal fundido, geração de gases, vapores e escória de proteção [5].

Com a adição da proteção gasosa externa, temos o processo de soldagem por arame tubular com proteção gasosa que pode ser considerado uma melhoria ou alternativa do processo de soldagem por arame tubular auto-protegido. As figuras 2.5 e 2.6 mostram as duas condições.



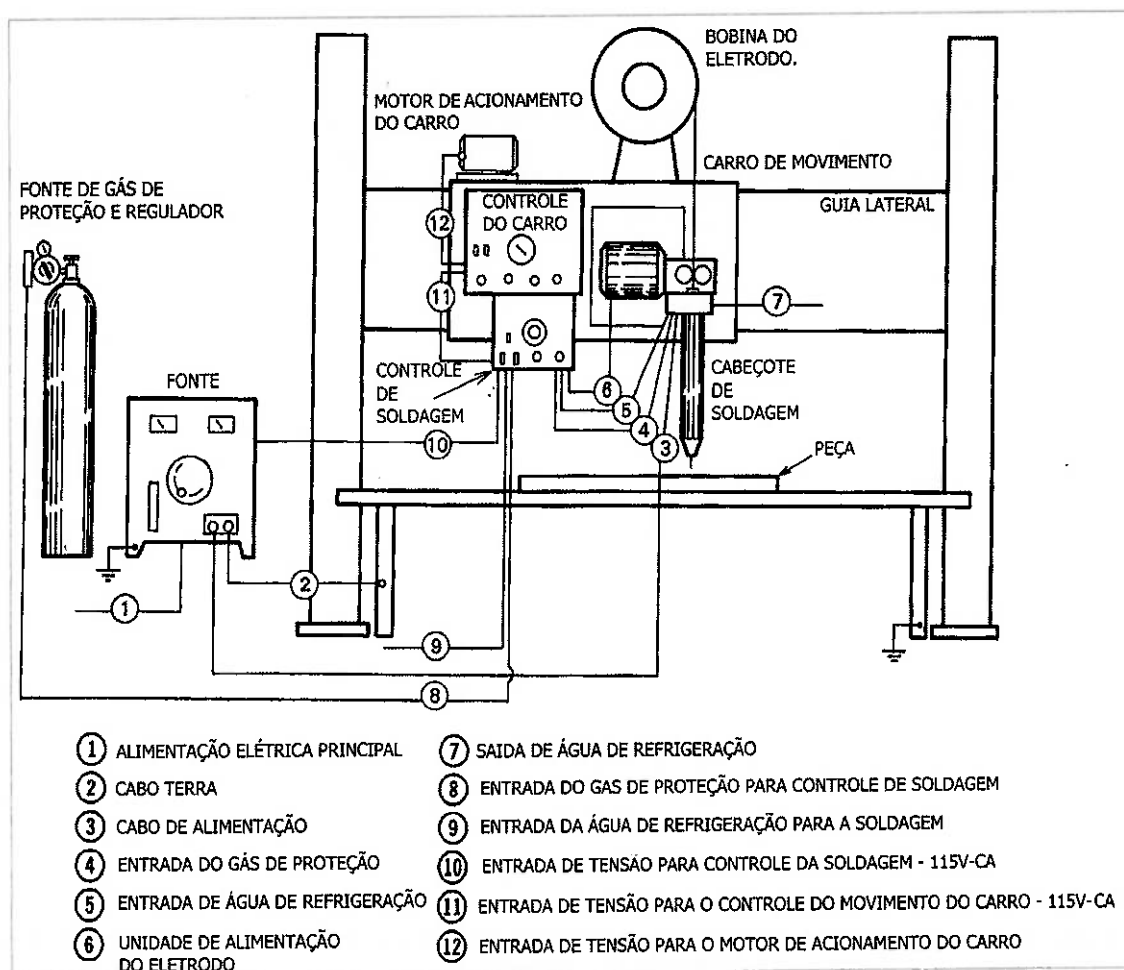
**Figura 2.5** – Soldagem arame tubular auto-protegido (Modif. de [8]).



**Figura 2.6** – Soldagem com arame tubular com proteção gasosa de fonte externa (Modif. de [8]).

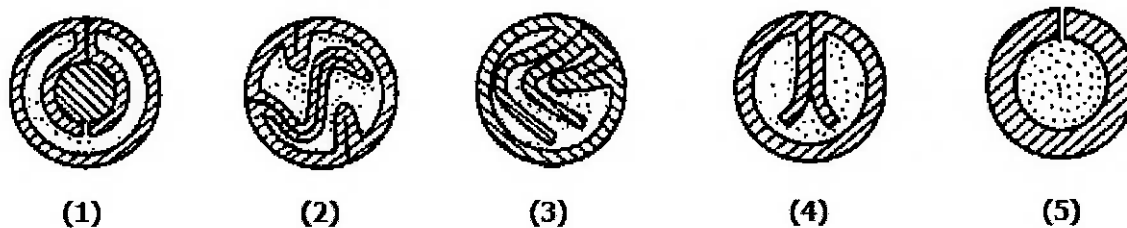
O arame é alimentado continuamente e de forma similar aos processos automáticos e semiautomáticos MIG/MAG.

A figura 2.7 demonstra esquematicamente um conjunto para soldagem mecanizada no processo arame tubular autoprotetido como também para o processo arame tubular com proteção gasosa, que se utiliza quando o processo solicita gás de proteção de fonte externa ao arame.



**Figura 2.7** – Instalação esquemática para soldagem automática (Modif. de [8]).

A figura 2.8 mostra algumas seções típicas utilizadas na fabricação dos arames tubulares.



**Figura 2.8** – Seções típicas de fabricação de arames tubulares. [7].

Para arames com diâmetros de 2,4 a 3,2 mm utilizam-se as seções 1, 2 e 3 da figura 2.8. Para diâmetros de 1,2 a 2,4 mm, utilizam-se as seções 4 e 5 [7].

#### 2.2.1.1 VANTAGENS PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARAME TUBULAR (COM PROTEÇÃO GASOSA E AUTOPROTEGIDO).

Alta qualidade do metal depositado, excelente aparência da solda (lisa e uniforme), excelente contorno em filetes de soldas horizontais, soldagem de diversos aços em grande variedade de espessuras, fator operacional alto [8].

Facilmente mecanizado, alta taxa de deposição com alta densidade de corrente, relativamente com alta eficiência de deposição do eletrodo, juntas de soldagem de projeto econômico, arco elétrico estável. Visível durante a soldagem, menor necessidade de pré-limpeza que o processo GMAW, menor distorção que o processo SMAW, taxa de deposição até quatro vezes maior que o processo SMAW, elimina a necessidade de manuseio com fluxos ou dispositivos de gases, com maior tolerância às condições de ventos presentes em soldagens de campo (com proteção gasosa cuidados devem ser tomados

com rajadas de vento), alta tolerância a contaminantes causadores de trincas de soldagem e resistente às trincas de superfície de cordões de solda [8].

Processo de soldagem que pode ser semiautomático ou automático, apresentando, relativamente, as mesmas vantagens do processo eletrodo revestido, no que se refere ao "fluxo" de proteção do arco e da poça de fusão [5].

#### 2.2.1.2 DESVANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARAME TUBULAR (PROTEÇÃO GASOSA E AUTOPROTEGIDO).

Equipamento muito mais caro e complexo que o processo de soldagem com eletrodo revestido, embora com maior produtividade, não é tão versátil ou portátil como o processo eletrodo revestido, existência de escória que, dependendo das variáveis, deve ser removida mecanicamente (para pintura ou acabamento) [8].

A escória deve ser removida, arame tubular mais caro que arame sólido (base em peso), alimentação do arame e fonte devem estar próximas ao local de uso [8].

Na versão com proteção gasosa deve-se tomar cuidado com rajadas de vento e correntes de ar. Na versão sem proteção gasosa não há problema, pois a proteção é criada exatamente onde é necessária (na ponta do eletrodo) [8].

O volume de fumos gerado é um dos maiores entre todos os processos [9].

## **2.2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO.**

É o processo mais utilizado devido a sua grande versatilidade, flexibilidade e relativa simplicidade de uso [5].

Consiste de um metal (arame) de material adequado, coberto com uma camada de fluxo fundente. O metal é fundido e consumido através de um arco elétrico gerado pelo contato entre a extremidade livre do eletrodo revestido e o metal que se deseja soldar [7].

O revestimento (fluxo fundente) consiste em uma mistura de certos ingredientes em proporções adequadas que tem as funções de estabilizar o arco, formar escória, gerar os gases redutores, desoxidar, fornecer elementos de liga, oxidar e fixar o revestimento no arame [7].

O fluxo fundente, pela sua decomposição e vaporização durante a soldagem, gera gases e escória que protegem o arco elétrico e a poça de fusão da atmosfera [5].

### **2.2.2.1 VANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO.**

É um processo de soldagem a arco elétrico caracterizado pela grande versatilidade e flexibilidade de aplicação, pelo equipamento de relativa simplicidade, pelo baixo custo do equipamento, pela soldagem em qualquer posição, com a grande variedade de tamanho e de materiais, pela extensa aplicação na fabricação industrial, em montagens de grandes estruturas de aço,

e também utilizado em pequenas oficinas de soldagem, mecânicas caseiras, reparos de equipamentos agrícolas, etc. [5].

#### 2.2.2.2 DESVANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO.

Perda de tempo operacional de soldagem na troca das varetas, perda de material (parte não revestida – contato elétrico do alicate), corrente de soldagem limitada pela resistência ao aquecimento do eletrodo revestido [5].

A geração de fumos é considerada uma das mais altas dentre os processos de soldagem [9].

#### 2.2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG (TUNGSTEN INERT GAS).

No processo TIG o arco elétrico é formado por um eletrodo não consumível de liga de tungstênio e a peça a ser soldada, sob uma proteção gasosa de um gás inerte. Este processo pode ou não utilizar um metal de adição. [9].

##### 2.2.3.1 VANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.

Alta qualidade da solda em quase todos os metais e ligas metálicas, podendo ser usado em ligas, como exemplo, Ti, Zr, Nb e Ta, onde a contaminação por oxigênio, hidrogênio e carbono podem causar fragilização e perda de resistência à corrosão; uso facilitado em soldagem de chapas finas e

em passes de raízes de diversos materiais; com o uso de metal de adição é obtida uma penetração desejada no metal base, o que propicia a aplicação na maioria dos metais [8]. A poça de fusão calma e a fonte de calor concentrada minimizam a ZAC e as consequentes distorções [5].

#### **2.2.3.2 DESVANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.**

Produtividade reduzida devida à baixa taxa de deposição, exigindo boa habilidade do soldador [5], custo operacional relativamente alto [7], possibilidade de inclusão de tungstênio no cordão de solda, emissão intensa de radiação ultravioleta, com alguma impossibilidade de soldagem em locais com corrente de ar [9].

#### **2.2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.**

No processo MIG utiliza-se como consumível um arame nu e o arco elétrico é gerado entre o mesmo e a peça a ser soldada. O arame é alimentado automática e continuamente pelo sistema. Utiliza-se como proteção gasosa um gás inerte que pode ser argônio ou hélio, ou uma mistura dos dois [9]. Pode-se adicionar O<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub> para ajudar na estabilização do arco elétrico [7]. Quando se utiliza um gás de proteção ativo, o processo passa a ser chamado de MAG. Os dois processos MIG/MAG são especificações do processo conhecido como GMAW [7].

Usualmente adicionam-se desoxidantes na composição do arame, embora os gases de proteção isolem a poça de fusão da atmosfera. Uma leve cobertura no arame também é, algumas vezes, adicionada para estabilização do arco [5].

#### 2.2.4.1 VANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.

Processo semiautomático bastante versátil sendo adaptado para automático com alguma facilidade, o eletrodo nu é alimentado continuamente, possibilita a soldagem em qualquer posição, taxa de deposição elevada, poucas operações de acabamento, solda com baixo teor de hidrogênio, facilidade de execução da soldagem, penetração de raiz mais uniforme que no processo com eletrodo revestido, problemas de distorções e de tensões residuais diminuídos, processo que permite ao soldador a visão total da poça de fusão, possibilidade de controle da profundidade de penetração e da diluição durante a soldagem [9].

É obtida uma boa concentração do arco sendo então muito estável, provocando poucos respingos, com operação suave e fácil; com corrente de soldagem alta permite-se velocidade de soldagem e taxas de deposição bastante elevadas, tornando o processo eficiente. Em vista das características apresentadas, o processo MIG pode ser utilizado praticamente na soldagem de qualquer material metálico, principalmente naqueles em que a soldabilidade é problemática, como os aços de alta resistência, aços inoxidáveis e diversas outras ligas não ferrosas, para as quais outros processos convencionais existentes não são eficientes [7].

#### 2.2.4.2 DESVANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.

Devido ao uso do gás inerte, o custo do processo MIG é alto, a soldagem deve ser protegida de correntes de ar, as operações em locais de difícil acesso são problemáticas devido à necessidade de proximidade do bocal da pistola com o metal a ser soldado, há grandes emissões de raios ultravioletas, o equipamento é muito mais caro que o processo Eletrodo Revestido, o processo não é tão versátil ou portátil como o processo Eletrodo Revestido [9].

#### 2.2.5 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO.

Neste processo o arco elétrico é formado entre o arame-eletrodo e o metal a ser soldado com a diferença de que o arco fica sob uma camada de um material fundente chamado de "fluxo" que se deposita por gravidade sobre a poça de fusão. A sua função é a de proteger a poça de fusão e o arco elétrico do contato com a atmosfera não havendo necessidade de uso de gás de proteção [9].

##### 2.2.5.1 VANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO.

Como o arco e a poça de fusão ficam protegidos pelo fluxo, com o processo (automático ou semiautomático) mantendo o arame posicionado adequadamente no chanfro, e com as variáveis do processo sob controle, o cordão de solda resultante é de boa qualidade; arames com grandes diâmetros e correntes de soldagem que proporcionam uma penetração bastante profunda e alta taxa de deposição; alto rendimento do processo em juntas com chanfros

pequenos permitem alta economia nos materiais consumidos; sendo o processo automático ou semiautomático, o operador de solda tem pouca influência na qualidade da junta soldada final obtida [7].

A maior vantagem do processo reside na sua alta eficiência e na possibilidade de se utilizar altas correntes, de modo que, quando se empregam múltiplos eletrodos simultaneamente, a intensidade de corrente pode atingir valores de até 3.000 amperes, obtendo-se altíssimas taxas de deposição [7].

#### 2.2.5.2 DESVANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO.

Como o arco não é visível, a seleção incorreta de materiais, a combinação inadequada das variáveis de soldagem, ou o posicionamento incorreto dos diversos componentes do equipamento, podem resultar numa junta soldada totalmente condenada; a soldagem só pode ser executada na posição plana e, dependendo das condições, na posição horizontal; a automação do processo impossibilita o uso de outras alternativas de aplicações quando comparada aos outros processos; dificuldade de manter o alinhamento entre o arame e a junta, devido à não visibilidade da solda torna-se uma enorme desvantagem deste processo [7].

Substancial investimento de capital pode ser necessário para se usar este processo e assim obter os ganhos de todas as vantagens do mesmo, por causa do custo dos dispositivos de fixação, posicionamento, controle, giro e movimentação da peça ou do equipamento durante a execução da soldagem [5].

### **2.2.6 PROCESSO DE SOLDAGEM POR DUPLA FUSÃO.**

Sobre Processos de Soldagem por Dupla Fusão, com dois eletrodos opostos à junta, sem metal de adição, e com atuação simultânea, foram encontrados artigos relatando alguns experimentos [11 a 13]. Em todos os artigos, esta técnica de soldagem é considerada nova. Y. M. Zhang e S.B. Zhang patentaram o Método de Soldagem por Duplo Arco (arcos opostos), utilizando duas tochas ligadas em série conforme a patente americana US Patent nº 5.990.446 de 1999 [10].

Y. M. Zhang, C Pan e A. T. Male, em seu experimento [11], "Soldagem de aço inoxidável utilizando o Processo de Soldagem a Arco Dupla Fusão", dissertam sobre a soldagem do aço AISI 304. Foram utilizados dois arcos elétricos ligados em série, para a soldagem das peças, simultaneamente, em lados opostos, em chapas de várias espessuras. De um lado foi utilizado o processo TIG (sem metal de adição) e do outro o processo a Arco de Plasma.

Também foram soldadas chapas de várias espessuras com o Processo de Soldagem a Arco de Plasma, com simples eletrodo, para comparação com o Processo de Soldagem a Arco Dupla Fusão. Segundo os autores, o Processo de Soldagem a Arco de Plasma, utilizando a técnica do "keyhole", atinge até ¼ de polegada de profundidade, e é considerado o processo de soldagem a arco elétrico que atinge as maiores profundidades de penetração, em comparação com qualquer outro processo a arco elétrico [11].

A tabela 2.3 mostra, resumidamente, uma seleção de gases tanto para o orifício do gás de plasma quanto para o gás de proteção, em Processo de Soldagem a Arco de Plasma.

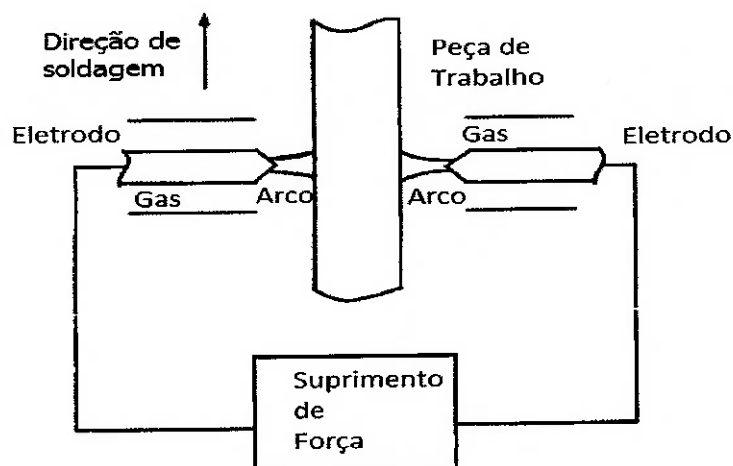
**Tabela 2.3** - Guia de seleção de gases para o processo a plasma (Modif.de [8]).

GUIA DE SELEÇÃO DE GÁS PARA SOLDAGEM PELO PROCESSO ARCO ELÉTRICO DE PLASMA (a)					
METAL		ESPESSURA		TÉCNICA DE SOLDAGEM	
		POL.	mm	ORIFÍCIO DE FECHADURA	GÁS DE PROTEÇÃO
AÇOS CARBONO	ATÉ	1/8	3.2	Ar	Ar
	ACIMA DE	1/8	3.2	Ar	75% He-25% Ar
AÇOS BAIXA LIGA	ATÉ	1/8	3.2	Ar	Ar
	ACIMA DE	1/8	3.2	Ar	75% He-25% Ar
AÇOS INOXIDÁVEIS	ATÉ	1/8	3.2	Ar, 92.5% Ar-7.5% H <sub>2</sub>	Ar
	ACIMA DE	1/8	3.2	Ar, 95% Ar-5% H <sub>2</sub>	75% He-25% Ar
COBRE	ATÉ	3/32	2.8	Ar	75% He-25% Ar
	ACIMA DE	3/32	2.8	NÃO RECOMENDADO (b)	He
LIGAS DE NIQUEL	ATÉ	1/8	3.2	Ar, 92.5% Ar-7.5% H <sub>2</sub>	Ar
	ACIMA DE	1/8	3.2	Ar, 95% Ar-5% H <sub>2</sub>	75% He-25% Ar
METAIS REATIVOS	ATÉ	1/4	1/4	Ar	Ar
	ACIMA DE	1/4	6.4	Ar-He (50 to 75% He)	75% He-25% Ar

(a) AS SELEÇÕES SÃO PARA GÁS DO ORIFÍCIO E GAS DE PROTEÇÃO

(b) A PARTE INFERIOR DO CORDÃO NÃO SE FORMARÁ CORRETAMENTE. A TÉCNICA SÓ PODE SER USADA PARA LIGAS COBRE-ZINCO

Conforme os autores deste experimento, a corrente de soldagem, segundo a figura 2.9, é forçada a fluir de um arco ao outro, através da peça e este fluxo de corrente concentra os arcos e aumenta a capacidade de penetração. A corrente, fluindo através da peça, gera um fluxo fluido dentro da peça de fusão. Devido ao uso de dois arcos opostos, o aquecimento tende a ser simétrico, e, em função da alta penetração, obtém-se microestrutura melhorada da solda por causa de uma elevação na "transição colunar para equiaxial" dos grãos e diminuição da distorção angular, que pode induzir trincas de solidificação [11].



**Figura. 2.9** – Esquema Utilizado no Processo Dupla Fusão (Modif. de [11]).

A tabela 2.4 mostra os parâmetros utilizados tanto no processo Dupla Fusão como no processo de Soldagem a Arco de Plasma, para comparação.

**Tabela 2.4** – Parâmetros usados na soldagem (Modificado de [11]).

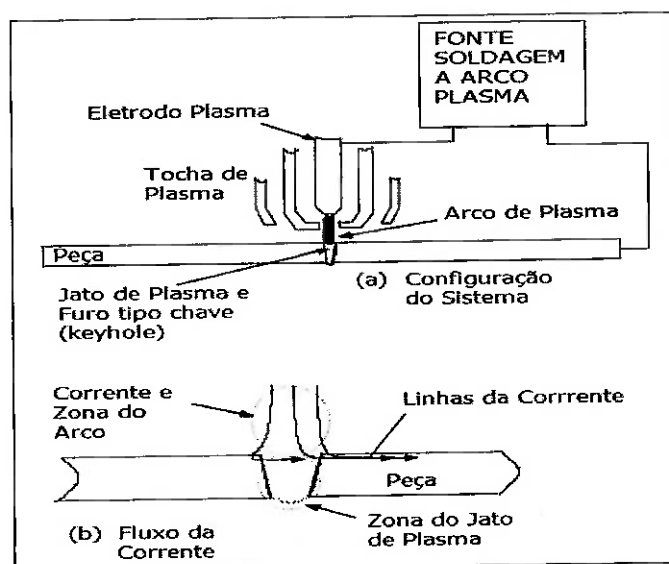
Parâmetros usados na soldagem de aço inoxidável austenítico AISI 304.								
Amostra	Método de Soldagem	Espessura mm	Tensão do Arco - V	Corrente de Soldagem A	Velocidade de Soldagem mm/min.	Tipo de Junta	Posição de Soldagem	Energia de Soldagem KJ/cm
a	Plasma	3,2	28-30	67	110	Topo	Plana	176,6
b	Plasma	6,3	28-30	69	40	Cordão s/chapa	Plana	500,3
c	*Dupla Fusão	9,5	45-55	67	80	Cordão s/chapa	Plana	418,8
d	*Dupla Fusão	12,7	45-55	70	50	Cordão s/chapa	Vertical asc.	700

\*Dupla Fusão (Plasma/TIG)

Pela tabela 2.4, nota-se que as energias de soldagem para as amostras foram menores no processo Dupla Fusão, quando se compara a espessura das chapas das amostras com o processo convencional a Arco de Plasma. Na amostra "d", com a maior espessura (12,7mm) temos 700 KJ/cm de energia utilizada no processo Dupla Fusão, mas com o dobro da espessura da amostra "b" (6,35mm), que utilizou 500 KJ/cm de energia no processo de Soldagem a Arco de Plasma.

Em outro experimento [12], Y. M. Zhang e S. B. Zhang dissertam que a “Soldagem a Arco pelo Processo Dupla Fusão aumenta a Penetração da Junta Soldada” onde a conexão de duas tochas ligadas a dois terminais de uma única fonte possibilita arcos elétricos mais concentrados, o que aumenta a penetração da solda na junta.

A figura 2.10(a) mostra um sistema de configuração de soldagem a plasma convencional com a fonte, o eletrodo, a tocha, o arco de plasma e o “keyhole” que atua na soldagem, e a peça. Na figura 2.10(b), vê-se a zona da corrente e do arco, as linhas de atuação da corrente e a zona do jato de plasma.

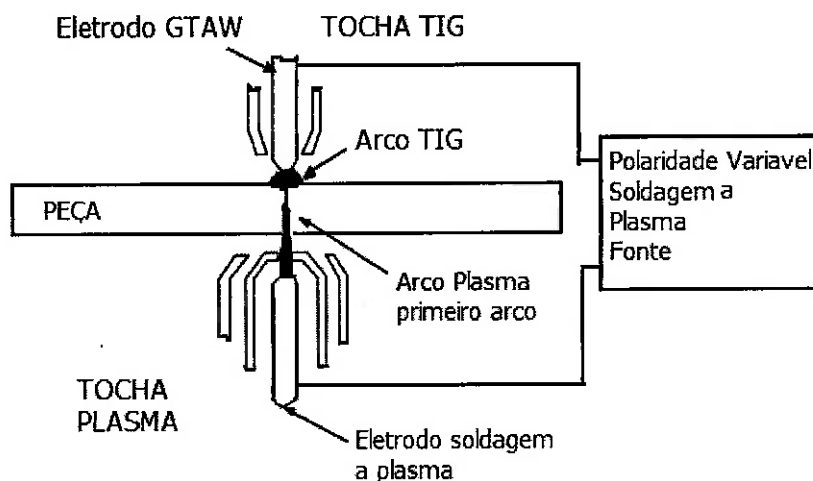


**Figura. 2.10** – Configuração plasma convencional (Modificado de [12]).

Na zona do jato de plasma não há atuação de corrente nem de arco. Tem-se apenas o jato de plasma [12]. A maior parte da corrente de soldagem no processo Soldagem a Arco de Plasma percorre a superfície do metal de base e apenas o jato de plasma, que foi ionizado e aquecido pelo arco, penetra diretamente no “keyhole”, e, muito mais que o próprio arco.

Por isso, os autores propuseram o experimento com uma segunda tocha do lado oposto ao metal de base, para aumentar a penetração. Duas tochas conectadas aos dois terminais elétricos da mesma fonte. O circuito da corrente de soldagem resultante se torna agora, fonte-tocha-peça-tocha-fonte ao invés do sistema convencional fonte-tocha-peça-fonte.

Como resultado, a corrente de soldagem e também o arco são guiados para dentro do "keyhole", conforme a figura 2.11, que mostra o esquema idealizado para aumentar a penetração, utilizado no experimento, hora para processo Dupla Fusão (duas tochas) e, hora para Soldagem a Arco de Plasma (uma tocha com polaridade variável), em chapas de Alumínio 5052 [12].

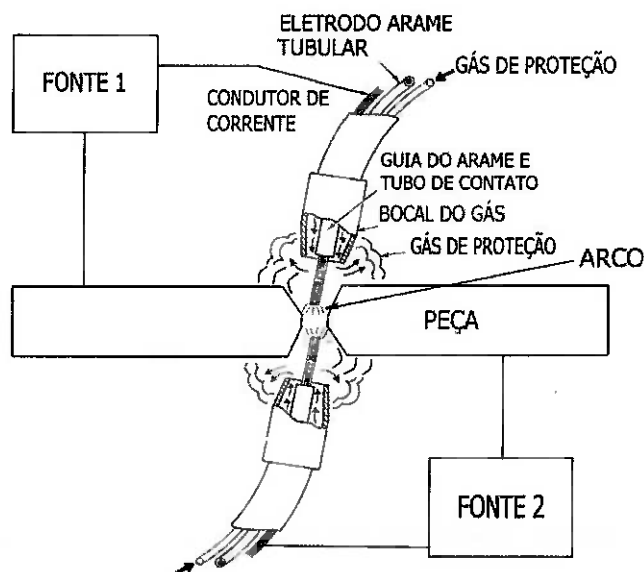


**Figura. 2.11** – Esquema para a soldagem Dupla Fusão e Soldagem a Plasma. Alumínio 5052 (Modificado de [12]).

No experimento foram utilizadas chapas de 6,5mm de espessura em Alumínio 5052 tanto no processo Dupla Fusão quanto no processo a Arco de Plasma (com regulador de polaridade variável), no intuito de confirmar a "maior penetração" no processo Dupla Fusão. As soldagens ocorreram na posição plana para ambos os processos.

Com relação à penetração do cordão de solda, foi concluído pelos autores que houve penetração total com o processo Dupla Fusão e parcial com o processo Arco de Plasma. A Energia de Soldagem no processo Dupla Fusão foi de 9,5 KJ/cm e no processo Arco de Plasma foi de 27,3 KJ/cm (três vezes maior).

Silva, M. F. em seu experimento [13] utilizou uma configuração com duas fontes e duas tochas simultaneamente posicionadas em lados opostos da junta de solda pelo Processo Arame Tubular, com a técnica do Processo Dupla Fusão, para soldagem de aço carbono, sendo o circuito de cada fonte considerado como: fonte-tocha-peça-fonte, num total de dois circuitos independentes, conforme a figura 2.12.



**Figura. 2.12** – Processo Dupla Fusão com arame tubular (modif. de [5, 13]).

Conforme Silva, M. F., o objetivo dos experimentos era a "Comparação da Deformação entre a Soldagem Convencional (arame tubular) e a Soldagem simultânea da raiz com duplo arame (tubular) em lados opostos da Junta".

Com relação à comparação entre os dois processos utilizados, no que se refere às distorções, o autor concluiu que no processo “dupla fusão” sem o controle da deformação a distorção ocorreu em alto grau, sendo rejeitada pelos parâmetros dimensionais da norma ISO 13920. Concluiu, também, que os valores gerais de distorção, obtidos por esta técnica da “dupla fusão”, também foram maiores quando comparados aos resultados da soldagem convencional.

Y, M, Zhang e S, B, Zhang [12] relatam também, em seu experimento, “outro método que tem sido aplicado para aumentar a penetração do cordão de solda envolve o uso de dois conjuntos independentes de tocha e fonte, para soldar simultaneamente a peça dos dois lados opostos”. Em continuação, Y. M. Zhang e S. B. Zhang dissertam que dois circuitos convencionais “fonte-tocha-peça-fonte” ligados em paralelo produzem uma penetração que é o dobro de um processo convencional. Embora isto não mude o mecanismo de arco de solda convencional onde o circuito “fonte-tocha-peça-fonte” é essencial, esta técnica tem encontrado sucesso nas aplicações, quando os dois lados são acessíveis [12].

### **2.2.7 PROCESSO DE SOLDAGEM COM PLASMA.**

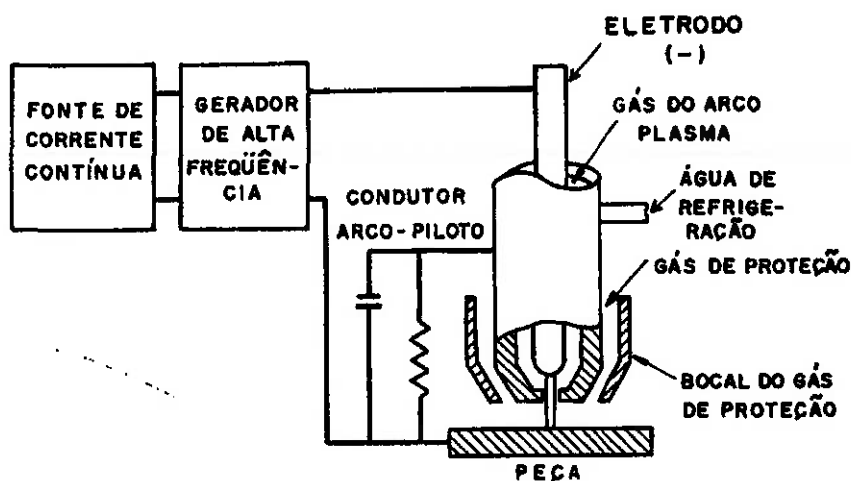
O Processo de Soldagem com Plasma é uma extensão do processo de Soldagem TIG, onde a coluna do arco elétrico sofre uma constrição, obtida ao se fazer o arco passar através de um orifício de diâmetro reduzido e de parede fria (cobre refrigerado à água). O gás de proteção é geralmente obtido do gás ionizado e aquecido da tocha. Este gás de plasma geralmente é suplementado por outra fonte auxiliar de gás de proteção. O gás de proteção da fonte auxiliar

pode ser um único gás inerte ou uma mistura de gases inertes. Não se aplica pressão e pode-se ou não utilizar metal de adição.

O processo de soldagem com plasma utiliza um eletrodo não consumível que fica numa câmara de gás. O arco aquece o gás alimentado dentro da câmara para uma temperatura que o torna ionizado e condutor de eletricidade. Este gás ionizado é definido como plasma. O mesmo flui da tocha a uma temperatura de 16.700°C.

Este processo é utilizado para a soldagem de diversos metais e em qualquer posição de soldagem. Fornece melhor controle direcional do arco e menores zonas afetadas pelo calor, quando comparado ao processo TIG. O arco elétrico, estreito e reduzido, é também mais tolerante às variações da distância da tocha. A maior desvantagem é o alto custo relativo do equipamento. Também comparado com o TIG, contém mais variáveis de controle de processo, exigindo procedimentos de soldagem mais complexos e mais demorados treinamentos dos operadores [8,9].

A figura 2.13 representa um equipamento de soldagem com plasma.

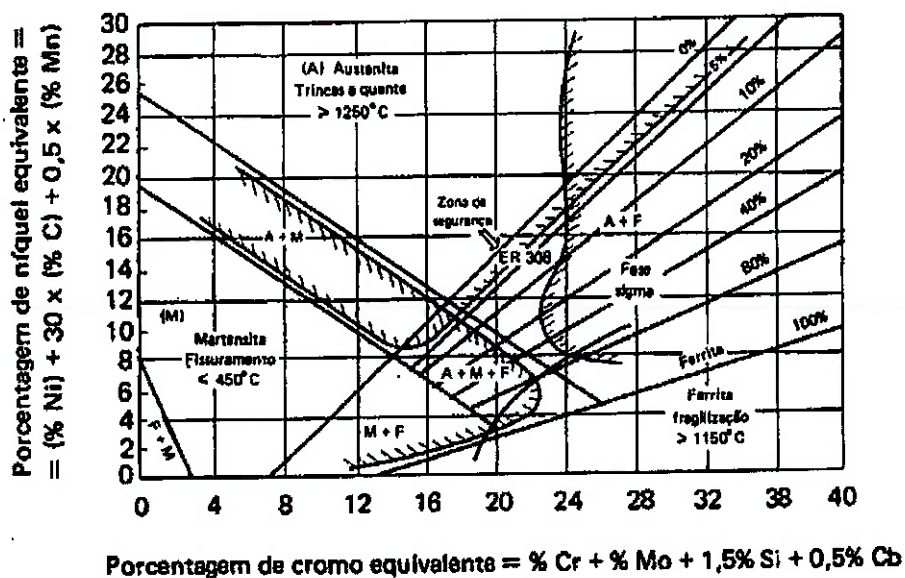


**Fig. 2.13** – Sistema de soldagem com arco de plasma [9].

### 2.3 SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.

As propriedades mecânicas e a resistência à corrosão do metal depositado na soldagem de aços inoxidáveis são bastante influenciadas pela composição química e pela microestrutura. A figura 2.14 mostra o diagrama de Schaeffler, que correlaciona os diferentes tipos de microestruturas passíveis de serem encontradas em aços inoxidáveis, em função de sua composição química, traduzidas em termos dos equivalentes percentuais de níquel e cromo [7].

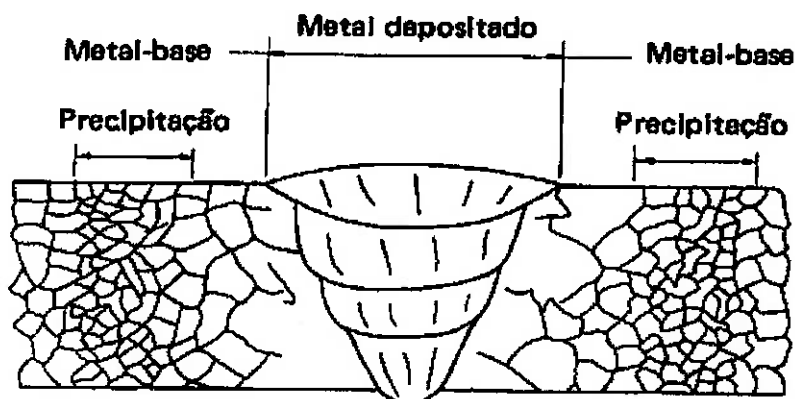
As estruturas martensíticas, ferríticas e austeníticas apresentam, em maior ou menor grau, tendências ao trincamento e à fragilização. Deve-se controlar o metal depositado de modo que sua estrutura se aproxime o mais possível da zona de segurança, representada pelo triângulo "ER 308", no diagrama de Schaeffler, através da seleção apropriada do consumível [7].



**Fig. 2.14** – Diagrama de Schaeffler do metal depositado do Aço Inoxidável [7].

### 2.3.1 SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.

Este grupo de aços inoxidáveis apresenta melhor soldabilidade que os ferríticos e martensíticos. Entretanto, quando ele é resfriado lentamente entre 850 e 480°C, após a soldagem, poderá ocorrer uma precipitação de carbonetos de cromo nos espaços intergranulares da matriz cristalina. A figura 2.15 mostra esquematicamente este fenômeno; a referida precipitação é mais intensa em torno de 650°C, que provoca um decréscimo sensível em sua resistência à corrosão e em suas propriedades mecânicas. Ao fenômeno descrito dá-se o nome de *corrosão intergranular* [7].



**Fig. 2.15** - Precipitação intergranular no aço inoxidável austenítico tipo 18-8 [7].

A condição térmica que produz a precipitação de carbonetos pode acontecer durante a soldagem, principalmente em soldagem multipasses, em passes de cordões com energia de soldagem excessiva ou, quando dois cordões se cruzam. O montante de intensidade de precipitação de carbonetos pode ser reduzido através de resfriamento rápido. Aquecimento a 1000 até 1150°C, para solubilização dos carbonetos precipitados e recuperação do teor de cromo em torno dos contornos de grão, e resfriamento rápido de 870 até 430°C, para evitar a reprecipitação, é um meio utilizado industrialmente. A alta temperatura

atingida pode causar distorções na solda. Conforme o tamanho da estrutura, pode ser impossível a sua colocação dentro de fornos de tratamento térmico. Como remédio contra a precipitação de carbonetos pode-se, quando possível, utilizar aços inoxidáveis com o mínimo de carbono em porcentagem, como também nos eletrodos [5].

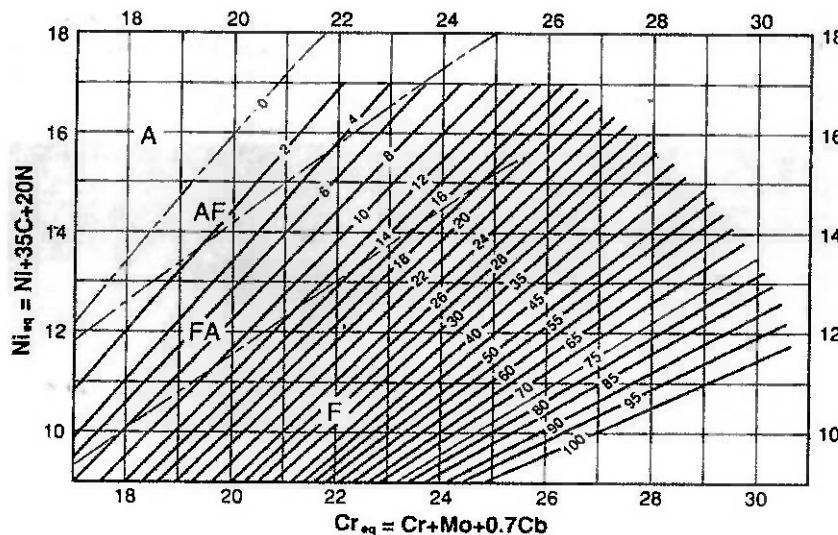
A utilização de eletrodos de nióbio e/ou titânio com conteúdo de carbono extra baixo ( $C < 0,03\%$ ) é também recomendada [7].

Os aços austeníticos têm elevado coeficiente de expansão térmica, acima de 50% maior que a dos aços carbono ou dos aços inoxidáveis da série 400 (martensíticos) da norma AISI, o que exige maiores precauções para minimizar distorções e empenamento de partes soldadas [5].

Os aços austeníticos podem ser suscetíveis à trincas de solidificação (micro trincas) se a quantidade de ferrita no metal de adição não for controlada. Isto pode ser corrigido utilizando-se eletrodos que depositem metal de adição contendo uma pequena quantidade de ferrita. Então, há eletrodos recomendados para soldagem de variados graus de aços austeníticos comuns, que podem depositar metal de adição contendo 3 a 15% de ferrita, mesmo não havendo ferrita no metal de base. [5].

A figura 2.16 mostra o diagrama WCR-1988, mais moderno que o Diagrama de Schaeffler, pois inclui Nitrogênio no cálculo do Níquel equivalente, com as previsões de porcentagens de ferrita, baseada nas porcentagens equivalentes de Cromo e de Níquel, para se determinar previamente a porcentagem de ferrita que haverá no cordão de solda.

Certos equipamentos modernos, através da medição direta do magnetismo do cordão de solda dão o resultado imediato da porcentagem de ferrita [5].



**Figura 2.16** - Diagrama WRC-1988 [5].

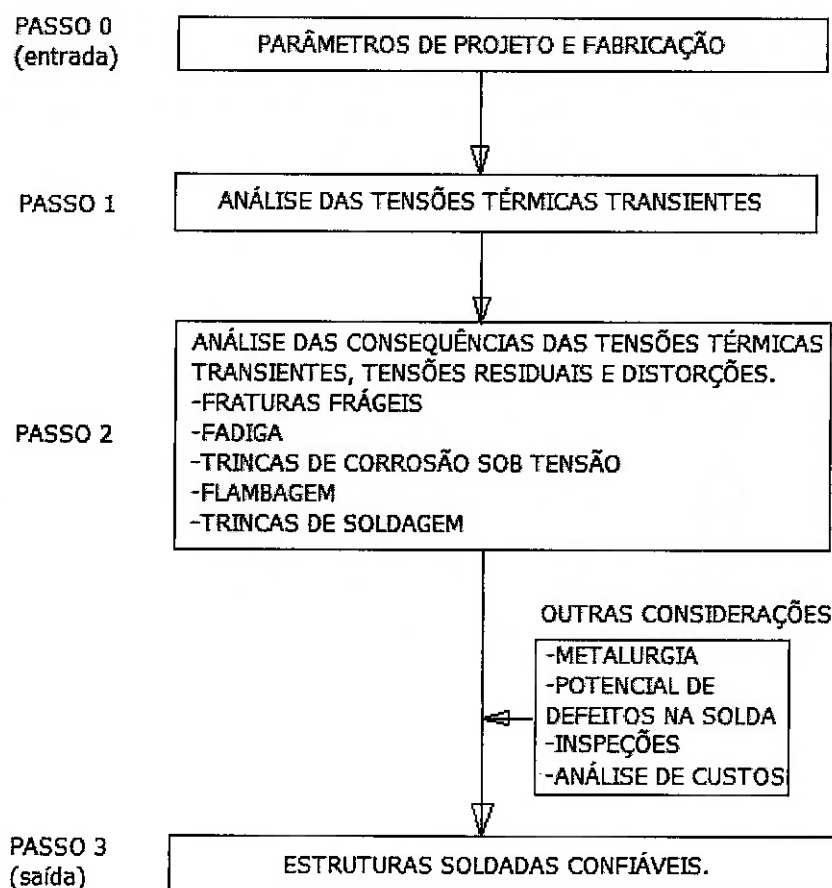
## ***2.4 TENSÕES RESIDUAIS, DISTORÇÕES E DEFORMAÇÕES.***

Segundo Masubuchi, K. [14], seu livro discute profundamente os problemas associados com o projeto e fabricação de estruturas soldadas. Isto cria a impressão de que estruturas soldadas são impraticáveis. Pelo contrário, estruturas soldadas são superiores em muitos aspectos às estruturas rebitadas, fundidas e forjadas. Antes da 2ª Guerra Mundial, os navios eram todos rebitados. Hoje, quase todos eles são fabricados por soldagem. Usa-se soldagem na fabricação de foguetes, submersíveis de grandes profundidades, vasos de contenção de reatores nucleares, edifícios, pontes, perfuradoras de petróleo, tubulações, etc. [14].

As estruturas metálicas soldadas têm vantagens e desvantagens. Alguns problemas são citados pelo autor tais como dificuldades de se eliminar trincas já iniciadas, em estruturas já em uso, embora os estudos das fraturas sejam muito importantes; possibilidade de defeitos como porosidades, trincas, inclusões, etc; sensibilidade dos materiais à soldagem (alguns mais difíceis de soldagem que outros); falta de “ensaios não destrutivos” confiáveis; tensões residuais e distorções [14].

Devido ao aquecimento local na soldagem, tensões térmicas complexas ocorrem, causando trincas e desalinhamentos. Conseqüentemente, para uma estrutura soldada confiável, é essencial que se tenha: projeto adequado, procedimentos e equipamentos de soldagem adequados, mão de obra experiente e treinada e controle de qualidade rigoroso e austero [14].

A figura 2.17 mostra a seqüência passo a passo, adequada para o controle das tensões residuais e distorções no projeto e na fabricação de estruturas soldadas [14].



**Figura 2.17** – Importância das tensões residuais e distorções no projeto e fabricação de estruturas soldadas (Modif. de [14]).

Quando um engenheiro ou técnico está preocupado com as tensões residuais e distorções ele também deve se preocupar com os efeitos adversos no desempenho dos serviços para os quais a sua estrutura soldada é designada ou fabricada. Tensões residuais elevadas em regiões próximas à solda podem promover fraturas frágeis, fraturas por fadiga ou trincas de corrosão sob tensão. Tensões de compressão e distorções iniciais podem reduzir a resistência à flambagem. O assunto é ainda complexo porque a extensão dos efeitos das tensões residuais não é governada apenas pelas tensões residuais, mas, também pela fragilidade do material. Quando o material é frágil, as tensões

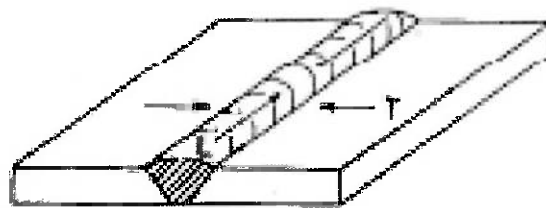
residuais podem reduzir significativamente a resistência à fratura. Quando é dúctil, por outro lado, os efeitos das tensões residuais são menores [14].

De fato, o que o engenheiro ou técnico deve procurar é alterar os parâmetros do projeto e da fabricação, tais como espessuras de chapas, projeto de juntas, condições de soldagem, sequência de soldagem, etc., de forma que os efeitos adversos das tensões residuais e distorções possam ser reduzidos a níveis aceitáveis. Melhor acertar de início durante o projeto e fabricação, do que confrontar os problemas nos estágios nos finais de fabricação. Para completar a tarefa, os engenheiros precisam de pelo menos dois tipos de análise: a primeira conforme os passos 0 e 1, da figura 2.17 e a segunda conforme os passos 2 e 3 da mesma figura [14].

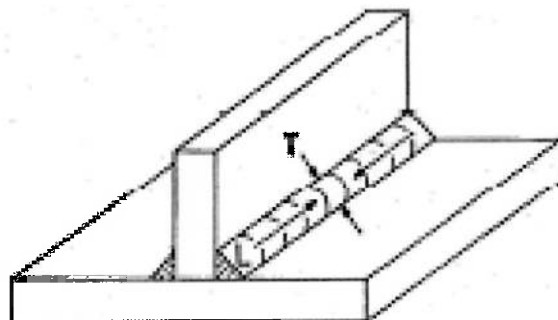
#### **2.4.1 TENSÕES RESIDUAIS.**

Numa soldagem, há aquecimento localizado pela maioria dos processos, portanto, a distribuição da temperatura não é uniforme, ocorrendo modificações metalúrgicas, conforme o progresso da soldagem, ao longo da junta. Normalmente, o metal de adição (MA) e a zona afetada pelo calor (ZAC), imediatamente adjacente ao cordão, estão em temperatura substancialmente acima daquela do metal base (MB), não afetado. Conforme o metal de adição se resfria à temperatura ambiente, a tensão aumenta e, eventualmente, atinge o limite de escoamento do MB e da ZAC. As porções já solidificadas resistem às contrações das outras porções em solidificação no cordão [15].

Assim, observam-se nas figuras 2.18 (junta de topo) e 2.19 (junta em ângulo) as direções das contrações longitudinais (L) e transversais (T).

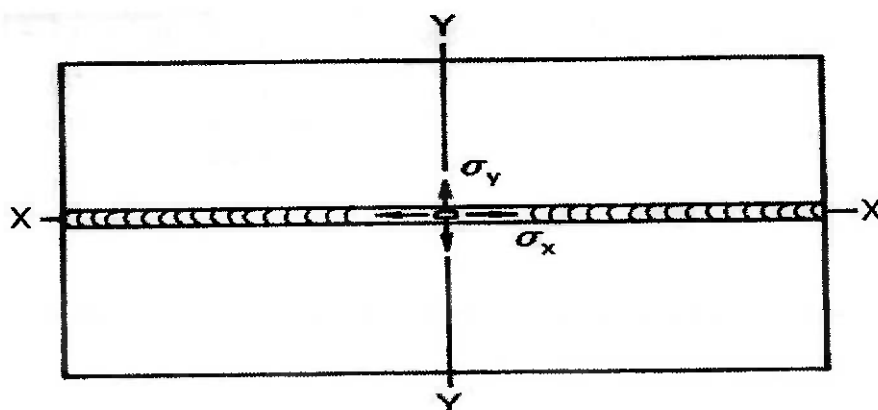


**Figura 2.18** – Tensões de contração longitudinais (L) e transversais (T) em solda de topo [15].

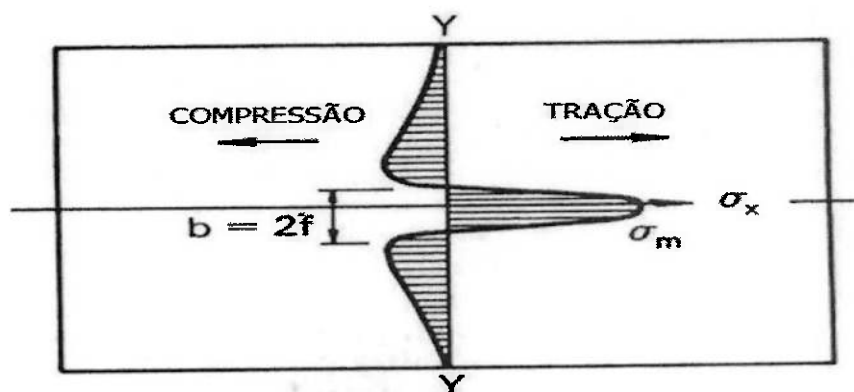


**Figura 2.19** – Tensões de contração Longitudinais (L) e Transversais (T) em solda de ângulo [15].

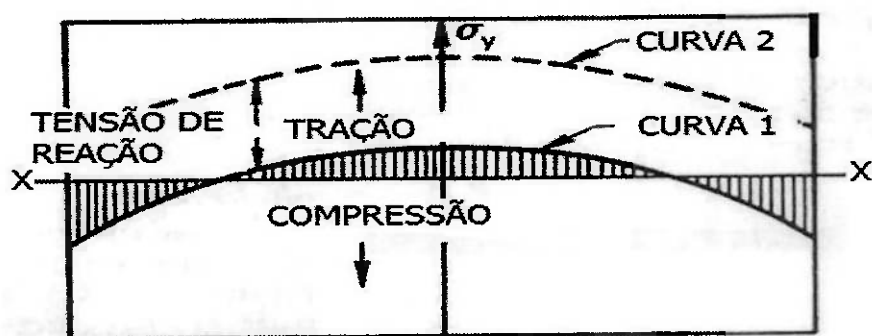
As figuras 2.20, 2.21 e 2.22 mostram a distribuição das tensões residuais numa solda de topo ao longo do eixo X e do eixo Y.



**Figura 2.20** – Solda de topo em chapa [15].

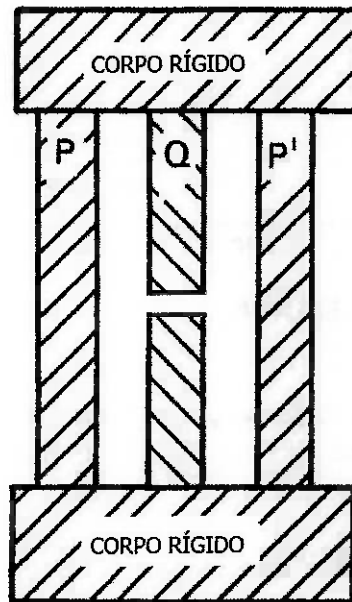


**Figura 2.21** - Distribuição das tensões em solda de topo ( $\sigma_x$ ) ao longo de X (Modif. de [15]).



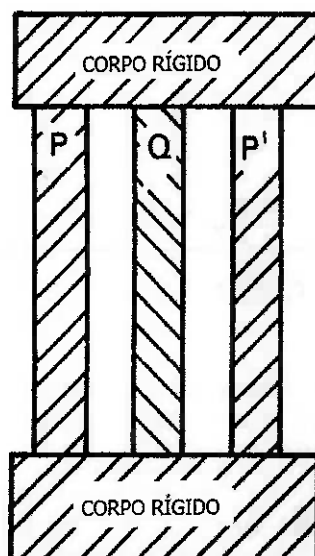
**Figura 2.22** - Distribuição das tensões em solda de topo ( $\sigma_y$ ) ao longo de Y (Modif. de [15]).

Um simples exemplo de como as tensões residuais são criadas é a chamada "barra restrita". As figuras 2.23 e 2.24 mostram três barras de aço carbono, conectadas em seus extremos por dois corpos rígidos. Um ciclo de aquecimento e resfriamento da barra central (Q) e dos dois membros rígidos à temperatura de  $595^{\circ}\text{C}$  e resfriados à temperatura ambiente é executado.



**Figura. 2.23** - Efeito do aquecimento em uma barra livre [15].

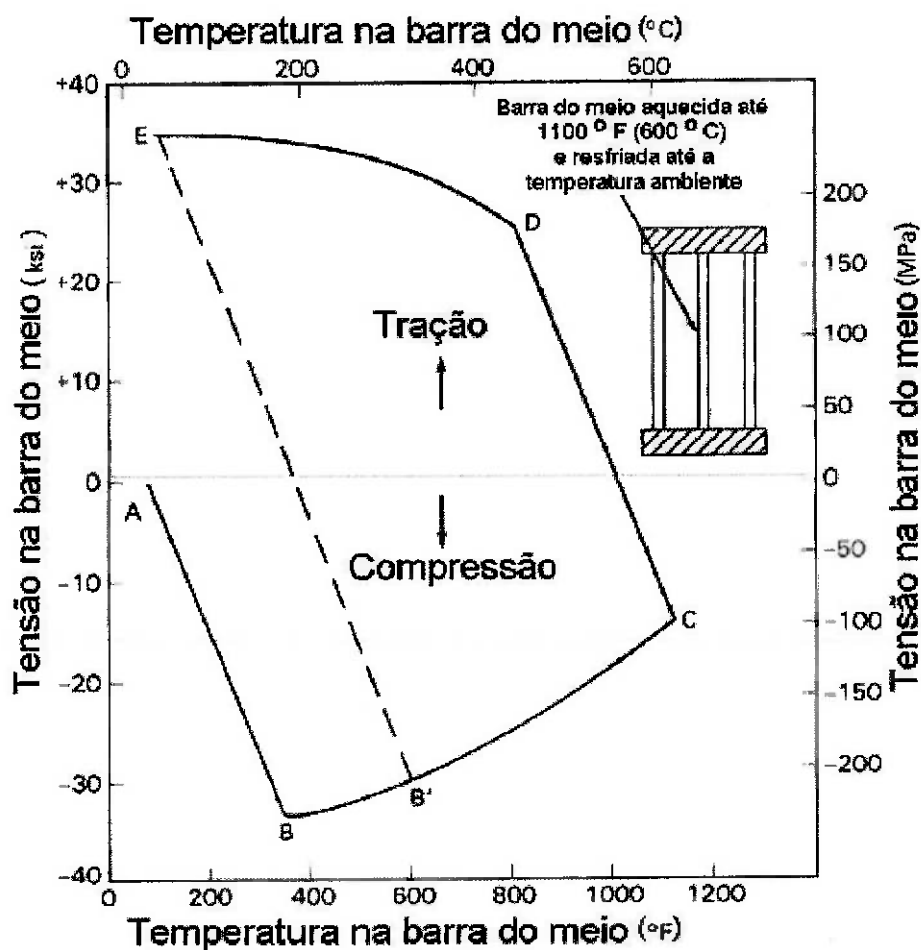
Na barra livre, mostrada na figura 2.23, após o aquecimento e durante o resfriamento, a barra Q volta a sua dimensão original. Por outro lado, a barra restrita Q, mostrada na figura 2.24, quando aquecida, sofre deformação plástica e, após o resfriamento, não retorna mais à sua dimensão original. O que ocorre na barra restrita está apresentado na figura 2.25.



**Figura. 2.24** - Efeito do aquecimento em uma barra restrita [15].

A tensão na barra central é mostrada no gráfico da figura 2.25, versus a temperatura. As barras laterais (P) e P', não aquecidas resistem à deformação da barra central. A tensão em cada barra lateral corresponde à metade da tensão da barra central, em direções opostas. A barra central tem um limite de escoamento de 240 MPa (35ksi).

Conforme a barra central é aquecida, tensões de compressão são produzidas na mesma porque a sua expansão é restrita pelas barras laterais. A tensão de compressão aumenta com a temperatura de acordo com a linha AB. O limite de escoamento LE é atingido em 170°C, ponto B.



**Figura 2.25** - Efeito da barra restrita na geração de Tensões Residuais [15,16].

Conforme aumenta a temperatura, além do ponto B, a tensão da barra central é limitada pelo seu LE, que decresce com o aumento da temperatura, mostrada na curva BC. Ao atingir 595°C o aquecimento é interrompido no ponto C [15].

No resfriamento, a partir deste ponto, a barra central adquire um comportamento elástico. A tensão da mesma cai drasticamente, altera-se para contração e, logo atinge a tensão de escoamento (LE) na temperatura, no ponto D. Conforme o resfriamento, a tensão na barra central é ainda limitada pelo seu LE, de acordo com a temperatura, mostrada na curva DE [15].

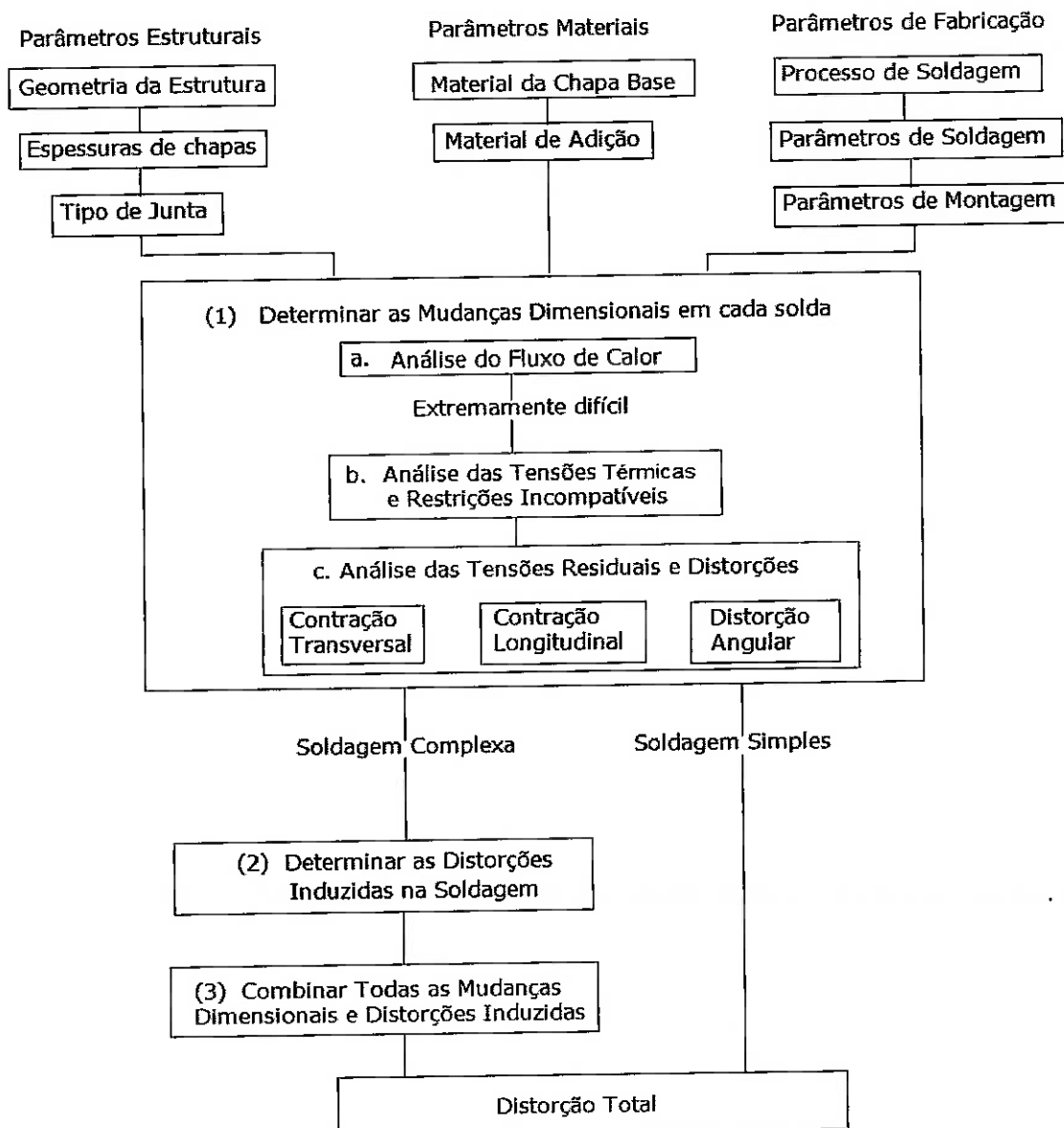
Uma tensão de contração residual igual ao LE, na temperatura ambiente é, agora, parte da barra central. A tensão residual em cada barra lateral corresponde à metade da tensão da barra central, mas é de compressão.

Caso o aquecimento fosse interrompido em qualquer ponto da linha BB', e o resfriamento atingisse a temperatura ambiente, a tensão de contração na barra central se desenvolveria elasticamente, e paralela a B'E, até que o limite de escoamento LE atinja a linha DE [15].

Em temperatura ambiente, as condições finais seriam as mesmas. A tensão residual em cada barra lateral corresponderia à metade da tensão da barra central, mas, de compressão [15].

### 2.4.1.1 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS E DAS DISTORÇÕES EM SOLDAGENS E SEUS EFEITOS NO DESEMPENHO DE FUNCIONAMENTO.

A figura 2.26 apresenta um diagrama de blocos para facilitar o entendimento dos diversos fatores que contribuem para a distorção total de estruturas soldadas, as suas interações e seus efeitos.



**Figura 2.26** - Fatores que contribuem para a distorção total na soldagem e as interações entre si e com a distorção total. Modificado de [14].

A figura 2.26 indica que a distorção é uma função dos parâmetros estruturais, dos parâmetros dos materiais e dos parâmetros de fabricação [14].

Os parâmetros estruturais incluem a geometria da estrutura (se é um painel, um cilindro, uma estrutura esférica, etc.), a espessura das chapas e os tipos de juntas (de topo, filete, etc.) [14].

Os parâmetros dos materiais incluem tipos e condições dos metais de base e dos metais de adição [14].

Os parâmetros de fabricação incluem os processos de fabricação (eletrodo revestido, arco submerso, MIG/MAG, TIG, etc.), gases de proteção e outros. Incluem os parâmetros de procedimento de soldagem, como: corrente de soldagem, tensão, velocidade de soldagem, pré-aquecimento, temperaturas de interpasse, além dos parâmetros de montagem (sequência de soldagem e graus de restrições, entre outros) [14].

Para uma soldagem simples (aquela que, após a análise prévia das suas contrações transversais, longitudinais e angulares, foram consideradas irrelevantes) os passos (2) e (3) não são necessários.

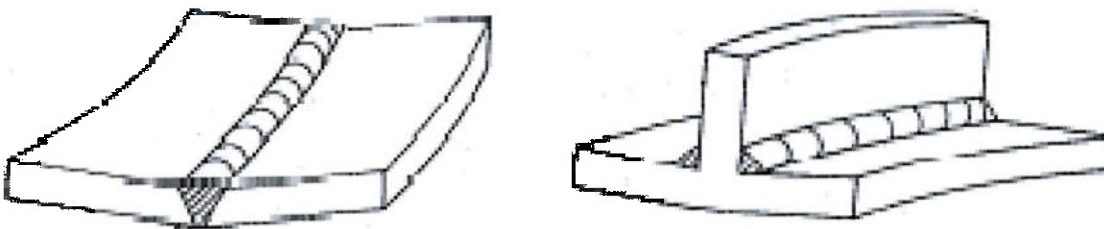
Para se determinar analiticamente as tensões residuais e as distorções é necessário se estabelecer, também analiticamente, o relacionamento entre estes três conjuntos de parâmetros e distorções. Isto pode ser feito desta forma [14]:

1. Determinar as mudanças dimensionais produzidas por cada soldagem.
2. Determinar as distorções induzidas por estas mudanças dimensionais.
3. Combinar todas as mudanças dimensionais com as distorções induzidas.

## 2.4.2 CAUSAS DAS DISTORÇÕES.

Os tipos e distribuições das tensões em soldagens são muito complexos. Tensões residuais em soldagem podem ter dois efeitos principais: podem produzir distorções ou produzir falhas prematuras nas juntas soldadas, ou ambos. As distorções são causadas quando as regiões aquecidas por soldagem contraem-se não uniformemente, fazendo com que as contrações em uma parte da solda exerçam forças excêntricas na secção transversal do cordão. Este se deforma elasticamente em resposta às tensões e, visíveis ou detectáveis distorções ocorrem como resultado a estas deformações não uniformes [15].

Distorções em filetes de soldas são similares àquelas em juntas de topo: conhecidas como contrações transversais e longitudinais como também distorções angulares resultantes da natureza não balanceada das tensões nestas soldas. Este comportamento pode ser visto na figura 2.27 [15].



**Figura 2.27** – Distorções em solda de topo e em solda em ângulo [15].

## 2.4.3 EFEITO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS NAS DEFORMAÇÕES POR SOLDAGEM.

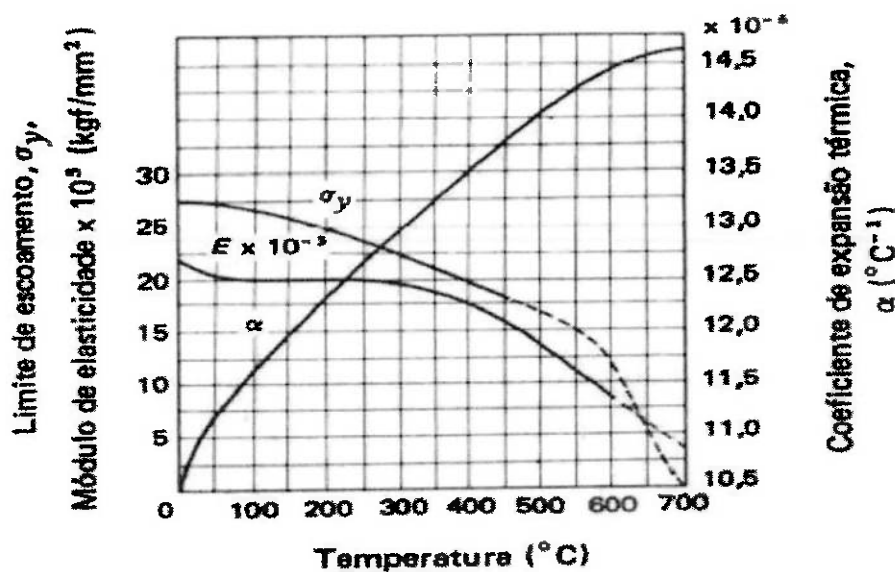
Uma vez que as distorções são causadas pelos efeitos do aquecimento e resfriamento e envolve rigidez e elasticidade, as relativas propriedades mecânicas e físicas dos metais afetam o grau de distorção. O conhecimento dos valores aproximados do coeficiente de expansão térmica, condutividade

térmica, módulo de elasticidade e tensão de escoamento ajuda o projetista e o soldador antecipar a severidade dos problemas de distorção [5].

A tabela 2.5 mostra, para comparação, os valores de Módulo de Elasticidade (E), Limite de Escoamento (LE), o coeficiente de expansão térmica linear ( $\alpha$ ), a condutividade térmica e a temperatura de fusão de alguns materiais. O gráfico (figura 2.28) mostra que, conforme a temperatura aumenta, diminuem os valores de (E) e (LE) e aumenta o valor de ( $\alpha$ ).

**Tabela 2.5** – Propriedades físicas de alguns materiais [16].

Material	E (GPa)	LE(MPa)	$\alpha$ ( $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{K}$ )	Condutividade térmica (J/m.s.K)	Temperatura liquidus/de fusão ( $^\circ\text{C}$ )
Aço carbono	210	260	12,62	41	1527
Aço baixa liga	210	350	12,25	41	1500
Aço inox. austenítico	200	310	18,42	24,9	1500
Cobre	110	70	16,7	384	1063
Alumínio	100	130	21,9	229	660



**Figura 2.28** – Variação dos valores de (E), (LE) e ( $\alpha$ ), para aços carbono, em função da variação da temperatura [16].

O coeficiente de expansão térmica linear é a medida da quantidade de expansão que o material atinge quando é aquecido ou a quantidade de contração do material que ocorre quando é resfriado. Os metais com altos coeficientes de expansão térmica expandem e contraem mais que os metais de baixos coeficientes, para uma dada temperatura. Portanto, na soldagem com metais com mais alto coeficiente de expansão térmica que os metais de adição ou que os metais adjacentes ao cordão, a possibilidade de distorção é maior [5].

O coeficiente de condutividade térmica é a medida da facilidade maior ou menor com que o calor flui através do material. Materiais com baixa condutividade térmica (aços inoxidáveis, ligas de níquel, por ex.) não dissipam o calor rapidamente. Em contrapartida, os materiais com alta condutividade térmica (alumínio e cobre) dissipam rapidamente o calor. Soldagens com materiais de baixa condutividade térmica resultam num gradiente de temperatura elevado que aumenta os efeitos de contração no cordão e áreas adjacentes [5].

O Limite de escoamento (LE) também afeta o grau das distorções. Durante a contração da solda, as tensões residuais no metal de adição e áreas adjacentes, devem atingir o LE para se acomodarem. Quanto maior o LE dos materiais envolvidos, maiores as tensões residuais. Ao contrário, com LE menor, menores também serão as tensões residuais e distorções resultantes [5].

O Módulo de Elasticidade (E) é uma medida da rigidez do material. Metais com altos Módulos de Elasticidade favorecem grandes distorções em soldagens [5].

Comparando-se os aços carbono de baixa liga e aços inoxidáveis comumente usados, tem-se valores de "LE" e "E" próximos, o que indicaria distorções pouco diferentes em soldagens. Mas, a condutividade térmica dos inoxidáveis comuns é de apenas um terço da dos aços carbono de baixa liga e o coeficiente de expansão térmica linear dos inoxidáveis é 1,5 vezes maior que o dos aços. Estes dois últimos fatores comparativos já induzem maiores distorções nas soldagens dos aços inoxidáveis com mesma quantidade de solda e de tamanhos iguais dos membros [5].

Em uma comparação entre o aço baixo carbono com o alumínio, o coeficiente de expansão térmica do alumínio é duas vezes o do aço. Se pudessem ser soldados em igual temperatura, o efeito da contração do alumínio seria muito maior. Mas, uma vez que a temperatura de fusão do aço é consideravelmente maior que a do alumínio, os fatores de expansão se cancelariam, aproximadamente. O alumínio tem condutividade térmica cinco vezes maior que a do aço baixo carbono o que significa que o calor dissipa-se mais rápido no alumínio, resultando num gradiente de temperatura menor na chapa adjacente à solda. Isto deveria produzir menor distorção em alumínio. O módulo de elasticidade do alumínio é de aproximadamente um terço do módulo do aço, indicando distorção maior no alumínio para a mesma tensão residual [5].

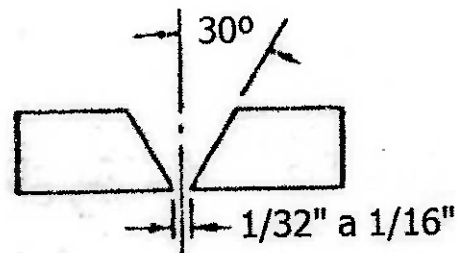
O limite de escoamento pode variar dentro de uma larga faixa, dependendo da liga de alumínio e de seu tratamento térmico. Os fatores que aumentam ou diminuem as distorções em alumínio e no aço se anulam, aproximadamente, indicando que a expectativa é quase igual para os dois metais, em geral. Uma vez que as muitas ligas de ambos os metais variam nas generalidades discutidas, o grau de distorção dependerá das propriedades específicas das ligas consideradas [5].

Em outra comparação, entre o aço carbono e os aços carbono de alta resistência, com relação às distorções, a única diferença significativa dentro das propriedades destes aços que afeta a distorção é o limite de escoamento. Os aços de alta resistência teriam maiores distorções em soldagem, mas, uma vez que se usariam seções menores, poderia resultar também, em distorções menores [5].

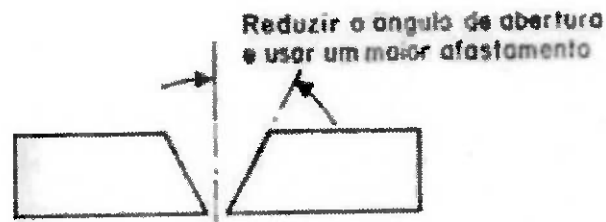
#### **2.4.4 CONTROLE DAS DISTORÇÕES.**

Há diversas técnicas para se controlar as distorções:

A técnica de controle de distorção mais utilizada é o projeto da geometria da junta, e, recomenda-se entre outras práticas, uma abertura de raiz entre 1/32" e 1/16", conforme a figura 2.29, um menor ângulo do chanfro em "V", conforme a figura 2.30, uma preparação dos chanfros em "U", conforme a figura 2.31 (neste caso, provavelmente o chanfro deve ser usinado), a preparação dos chanfros em "duplo V", conforme a figura 2.31, etc. [5,17].

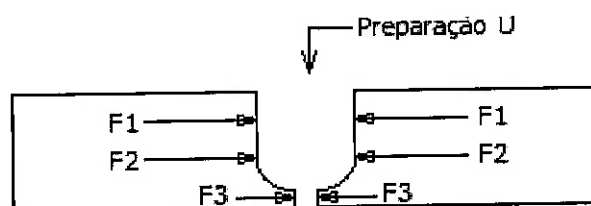


**Figura 2.29** - Abertura de raiz recomendada [5,17].



**Figura 2.30** – Redução do ângulo de abertura. Aumento da abertura [5].

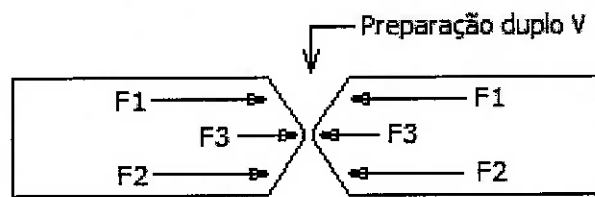
Com o chanfro em "U", as forças de contração F1 e F2, em uma soldagem, terão intensidades praticamente iguais e, bem maiores que F3. Haverá tendência a uma atuação mais simétrica do que com chanfros em "simples V", com relação à espessura da chapa. O volume de metal de adição em F3 na figura 2.31 é muito menor que em F1 e F2, gerando força de contração também menor, com menores distorções angulares.



**Figura 2.31** – Chanfros em "U" diminuem a distorção angular (Modificado de [5,17]).

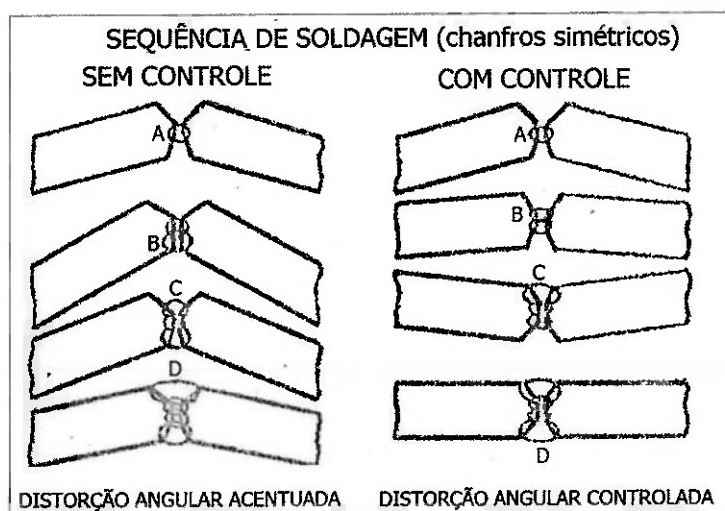
Com os chanfros em "duplo V", na figura 2.32, as forças de contração F1 e F2, em uma soldagem com controle, terão intensidades iguais e, bem maiores que F3. Neste caso também haverá tendência a uma atuação simétrica das

forças, com relação à espessura da chapa, gerando menores distorções angulares.



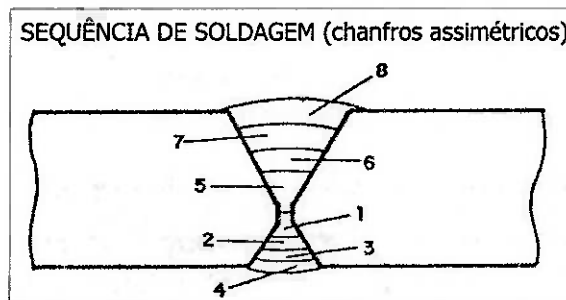
**Figura 2.32** – Chanfros em duplo “V” simétricos diminuem a distorção angular (Modificado de [17]).

Uma sequência de soldagem “com controle”, em chanfros “duplo V”, conforme a figura 2.33, alternando-se os lados de aplicação dos cordões de solda, no intuito de compensar ou equilibrar as forças de contração e a distorção angular é uma técnica muito utilizada e altamente eficaz. A sequência ideal dos cordões é: A, B, C e por último D [17].



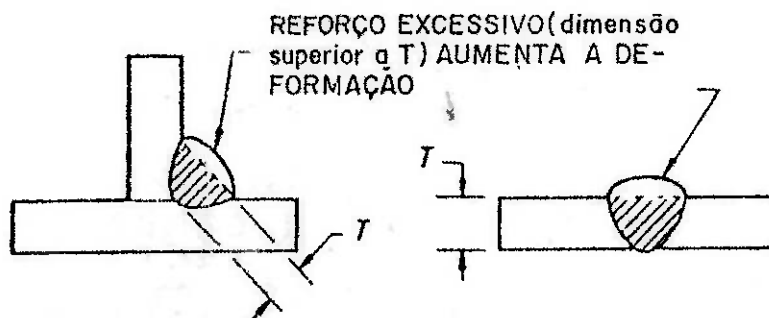
**Figura 2.33** – Sequência de soldagem A, B, C e D. Comparação da distorção angular final sem controle e com controle (Modificado de [17]).

Uma sequência de soldagem conforme a figura 2.34, com os cordões de 1 a 8, em chanfros “duplo V”, assimétricos, é feita quando se torna inviável a aplicação dos cordões de forma alternada. O lado a ser preenchido por último tem maior volume do metal depositado para compensar a restrição imposta pelo primeiro lado a ser soldado [17].



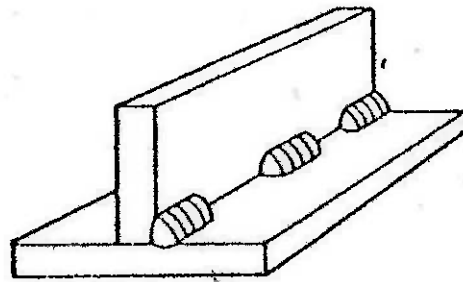
**Figura 2.34** – Sequência de soldagem de 1 até 8 diminui distorções [17].

A redução do “reforço” do cordão de solda diminui a deformação, conforme a figura 2.35 [5,17],



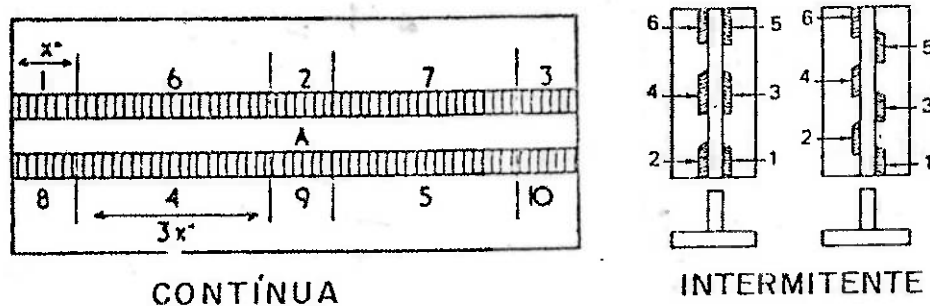
**Figura 2.35** – Reforço de solda excessivo [5,17].

A utilização de soldagem com cordões intermitentes, quando possível, conforme a figura 2.36, é uma grande aliada no controle de deformações, pois é realizada com menor energia do que se fosse com filete contínuo, de mesma dimensão, portanto menor distorção [5,17].



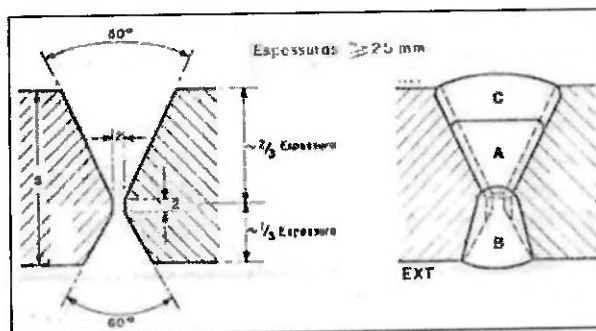
**Figura 2.36** – Cordões intermitentes diminuem deformações [5,17].

Uma sequência de soldagem em solda de ângulo bem feita pode ser vista nos exemplos da figura 2.37, contínua e intermitente. A distribuição do calor de forma não concentrada propicia menores distorções do conjunto soldado final. Em qualquer dos exemplos, a sequência vai do cordão "1" em diante. Na soldagem "contínua" da figura 2.37, com filete final contínuo, executa-se inicialmente os cordões 1, 2 e 3 (com comprimento " $x$ "), de um lado e depois os cordões 4 e 5 (com comprimento " $3x$ ") do outro lado, já compensando a distorção inicial dos cordões 1, 2 e 3. Em seguida executam-se os cordões 6 e 7 (com comprimento " $3x$ "), completando o filete no primeiro lado e finalmente os cordões 8, 9 e 10, terminando a soldagem. Na soldagem intermitente da figura 2.37 executa-se um cordão de cada lado, com melhor distribuição do calor, e, como consequência, menores distorções finais [17].



**Figura 2.37** – Sequência de soldagem. Cordões contínuos e intermitentes [17].

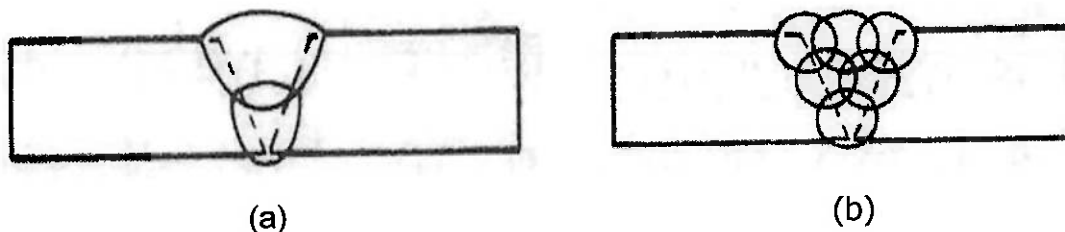
Uma sequência de soldagem em recipientes cilíndricos feitos de chapa deve levar em conta a diferença de rigidez para esforços internos e externos, conforme a figura 2.38. Preparam-se as chapas em chanfros assimétricos (1/3-2/3, como exemplo), solda-se em torno de 2/3 do chanfro interno (cordão A), executa-se a goivagem pelo lado externo, com posterior soldagem do cordão B, e finalmente a soldagem do lado interno (cordão C). Esta geometria é recomendada para chapas com espessuras igual ou maior que 25 mm [17].



**Figura 2.38** – Sequência de Soldagem para recipientes cilíndricos. Modificado de [17].

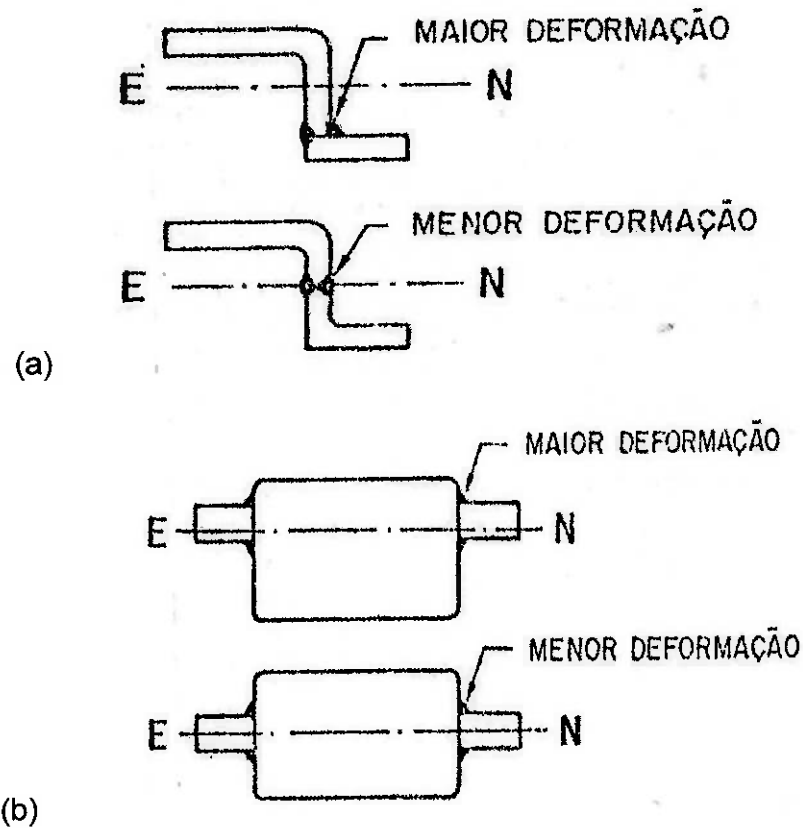
Executar a soldagem com o menor número de passes (cordões) diminui a tendência à distorções, devido a um menor aquecimento durante a soldagem.

As figuras 2.39a e 2.39b comparam a quantidade de cordões entre si [5].



**Figura 2.39-** Sequência de soldagem para reduzir o efeito do aquecimento na geração de tensões e distorções. (a) número de cordões recomendados; (b) quantidade excessiva de cordões [5].

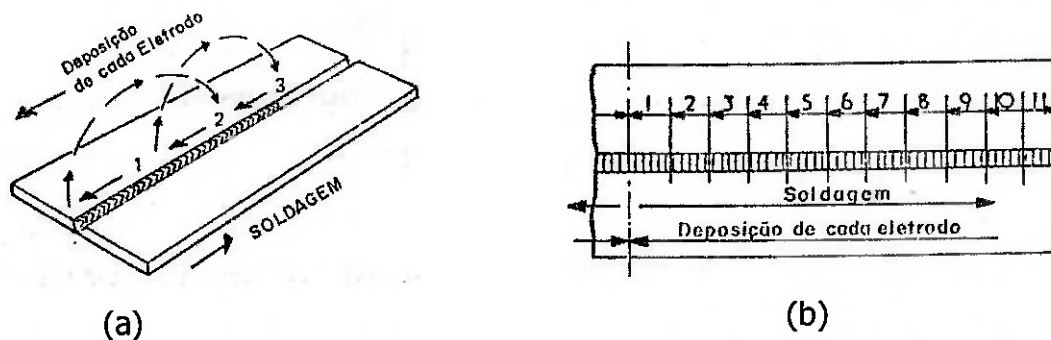
O posicionamento planejado e correto das partes com relação à linha neutra do conjunto a ser soldado (E-N), diminui as deformações resultantes, conforme as figuras 2.40a e 2.40b [5,17].



**Figura 2.40** - Comparação da deformação causada pela soldagem com referência à linha neutra [5,17].

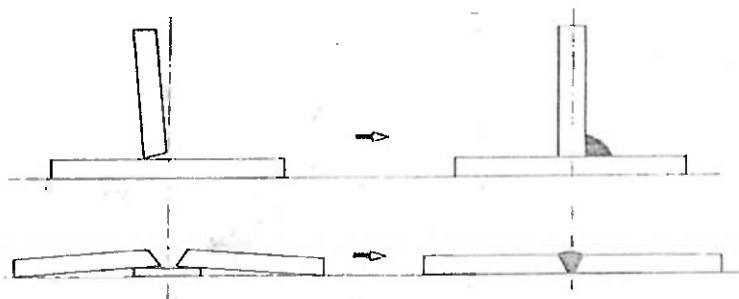
A Técnica do Passe à Ré melhora a distribuição do calor ao longo da soldagem, conforme as figuras 2.41a e 2.41b, e diminui as deformações. Como mostrado na figura 2.41b, o cordão nº 1, por exemplo, começa na linha vertical entre 1 e 2 e segue na direção da linha pontilhada, conforme a seta indicativa. O cordão nº 2 por sua vez, começa na linha vertical entre 2 e 3 e segue em direção à linha vertical entre 1 e 2, onde se iniciou o cordão nº 1. Assim segue a soldagem até o cordão nº 11, que começa onde se iniciou o cordão nº 10

(linha vertical entre 10 e 11) e termina no final da chapa, conforme a seta indica [5,17].



**Figura 2.41** – Passe à Ré [5,17].

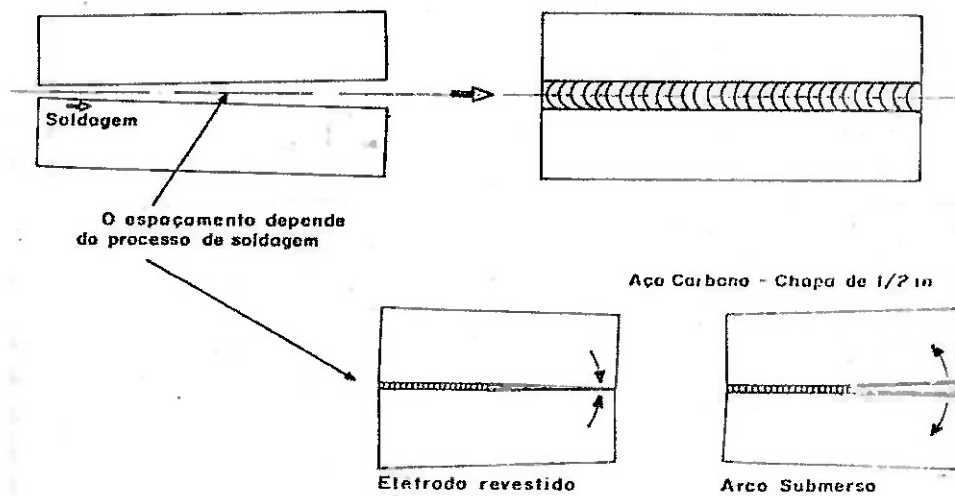
O posicionamento prévio das partes para que a deformação final se dê na posição desejada ou aceitável, conforme a figura 2.42, promove uma boa geometria final do conjunto soldado. Analisa-se, antecipadamente, para onde se dirigirá a “deformação, ou o empenamento” das peças, entre si (distorção angular, por exemplo) e montam-se as partes de tal forma que, quando ocorrer a “contração” dos cordões de solda, após o resfriamento de toda a soldagem, esta deformação, tenha ocorrido para o lado geométrico desejado [5,17].



**Figura 2.42** - Posicionamento prévio das partes a serem soldadas [5,17].

A seleção do correto processo de soldagem e o espaçamento adequado entre as partes, de acordo com o processo escolhido, podem resultar num produto final com a geometria desejada. Isto exige experiência e prática. A Figura 2.43 compara, como exemplo, dois processos de soldagem (Eletrodo

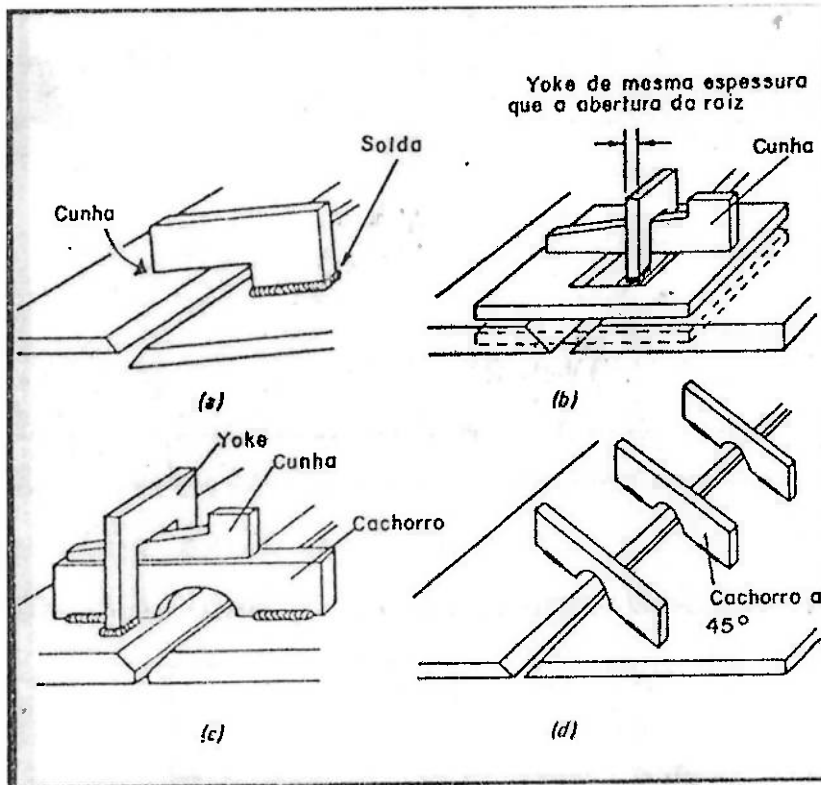
Revestido e Arco Submerso) demonstrando o espaçamento prévio (abertura entre as partes) que cada um necessita [17,18].



**Figura 2.43** - Espaçamento adequado ao processo escolhido [17,18].

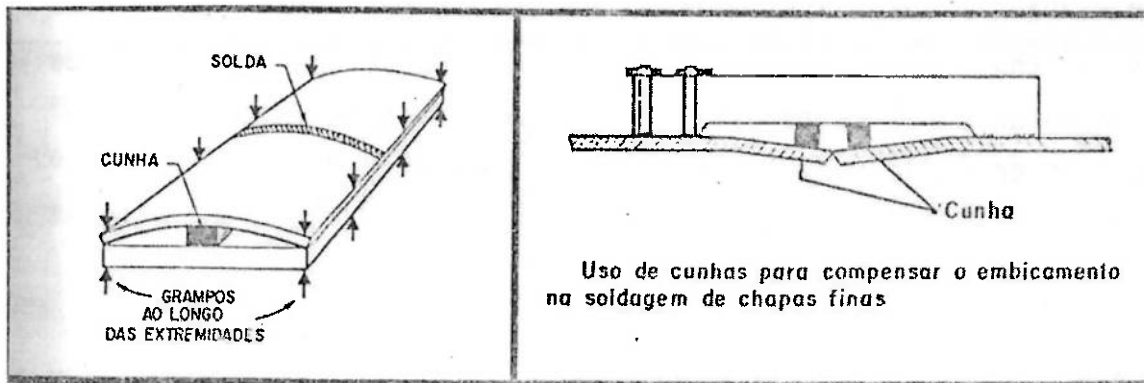
Segundo Masubuchi [18], a porção não soldada de uma junta de topo (entre chapas baixo carbono) tende a "fechar" com o uso de eletrodo revestido e a "abrir" com arco submerso, provavelmente devido ao caminho das tensões termais seguidos, ao redor do arco de soldagem.

O uso de "travamentos" mecânicos para impedir que as deformações ocorram ou torná-las aceitáveis é de grande utilidade na prevenção das distorções. Isto está exemplificado nas figuras 2.44a, b, c, d [5,17].



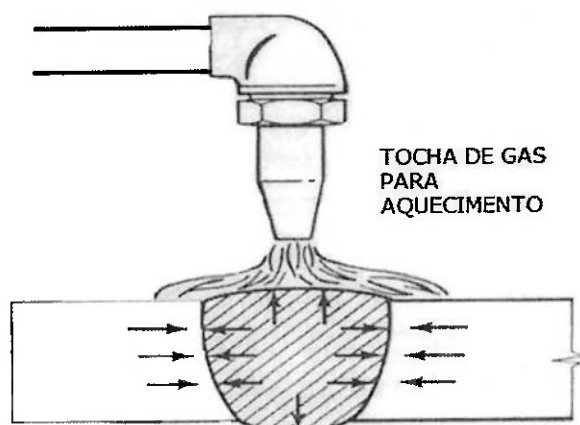
**Figura 2.44.** Exemplos de travamentos mecânicos prévios [5,17].

O uso da pré-deformação das partes e a fixação através de grampos, cunhas, etc., com análise antecipada dos movimentos de deformações e empenamentos, é bastante indicado para obter-se o conjunto final soldado com suas partes nas posições geométricas adequadas, após o resfriamento. A figura 2.45 mostra algumas técnicas [5,17].

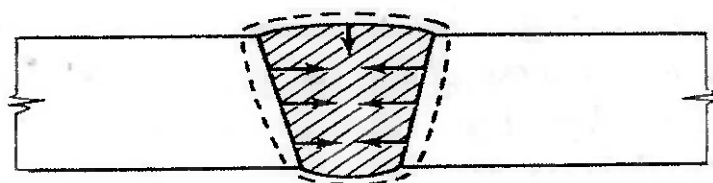


**Figura 2.45** - Pré-deformação antes da soldagem [5,17].

As figuras 2.46a e 2.46b demonstram uma técnica que usa o aquecimento por chama, localizado diretamente no cordão de solda, após o resfriamento total da soldagem. Isto causa o espessamento em volume, da região aquecida. Após o aquecimento por chama, a solda resfria-se e contrai, ocupando um volume menor que antes. A linha pontilhada na figura 2.45b representa, esquematicamente, o volume anteriormente ocupado [5].



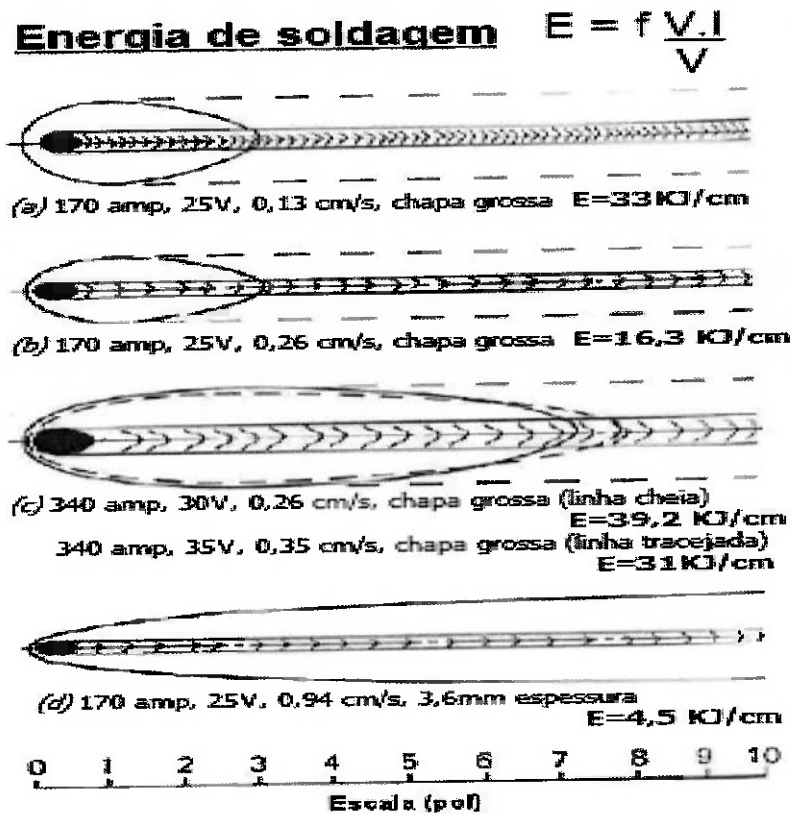
**Figura 2.46a** - Aquecimento localizado após o resfriamento completo da soldagem [5].



**Figura 2.46b.**- Resfriamento após o aquecimento por chama [5].

Velocidades de soldagens mais altas também proporcionam menores tensões residuais e conseqüente diminuição das distorções, conforme a figura 2.47. A energia de soldagem em (a) é bem maior quando comparada com (b),

33KJ/cm e 16,3 KJ/cm, respectivamente. Neste caso a maior velocidade de soldagem foi utilizada em (b), mas com os mesmos parâmetros de soldagem.



**Figura 2.47** – Influência da velocidade de soldagem [5,6].

Na equação  $E = \frac{fVI}{v}$  os dados significam:

E = Energia de soldagem (KJ/cm).

f = Eficiência. Fator que depende do processo de soldagem.

V = Tensão Elétrica (Volts)

I = Corrente Elétrica (Amperes).

v = Velocidade de soldagem (cm/s).

### **3. OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho são:

-Discutir os resultados entre as diferentes geometrias de chanfros (simétricos e assimétricos) com a sequência de soldagem feita com controle e sem controle da deformação, utilizando a soldagem de raiz com a técnica da dupla fusão empregando arame tubular.

-Comparar as distorções angulares, transversais e longitudinais, em juntas de topo de aço AISI 316L com 19,7 mm de espessura, soldadas pelo processo arame tubular com proteção gasosa.

-Comparar os resultados obtidos com a norma de tolerâncias para construções soldadas ISO 13920 [19].

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 MATERIAIS.**

O Metal Base utilizado foi o aço inoxidável austenítico AISI 316L, laminado, com espessura de 19,7 mm. A sua composição química está indicada na tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Composição Química da Chapa de Fabricação dos CPs [1]

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) - CHAPA AISI 316L							
C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
0,03 máx	2,0 máx	1 máx	16,0 -18,0	10,0 -14,0	0,045 máx	0,03 máx	2,0-3,0

O Metal de Adição (MA) utilizado foi o arame tubular E316LT1 com a composição química especificada na tabela 4.2 [20], e com as características dadas pelo fabricante na tabela 4.3 [21].

**Tabela 4.2** - Composição Química do Arame Tubular E316LT1 [20].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								
C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Cu	Mo
0,03	0,5-2,5	1,0	18,0-20,5	11,0-14,0	0,04	0,03	0,5	2,0-3,0

**Tabela 4.3** - Características do Arame Tubular [21].

CARACTERÍSTICAS DO ARAME TUBULAR	
Especificação	Norma Asme II Parte C, SFA-5.22 e AWS A5.22.
Classificação	E316LT1-1
Bitola	Φ1,2mm
Posição de soldagem	Todas
Corrente de Soldagem	120A a 220A
Tensão de Soldagem	23V a 33V
Temperatura de interpasse	150°C a 180°C (não aplicável)
Pré-Aquecimento	não aplicável
Limite de escoamento	470MPa
Alongamento mínimo	30%
Gás de Proteção	CO <sub>2</sub> (100%)

A tabela 4.4 mostra os instrumentos e equipamentos que foram utilizados na confecção e medição dos CPs. A tabela 4.5 contém as datas de validade das calibrações.

**Tabela 4.4** – Instrumentos e Equipamentos utilizados na confecção dos CPs

Instrumentos e Equipamentos utilizados para confecção e medição dos CPs
Paquímetro Universais 250mm e 500mm
Graminho com relógio comparador centesimal
Instrumento de Medição Universal com relógio comparador centesimal
Blocos padrões para ajuste dos instrumentos dos itens
Mesa de desempenho para apoio e medição
Máquina de corte à plasma 105-80A -220V. Ar com pressão de 5,5bar
Tartaruga – 220V
Máquina de soldagem Pulsarc 6200
Alicate – Amperímetro

**Tabela 4.5** – Validade - Calibração dos Instrumentos de medição.

Calibração dos instrumentos de medição		
Instrumento	Data - Calibração	Data - Validade
Paquímetro Universal 0 - 300mm	12/11/2012	12/11/2013
Paquímetro Universal 500mm	14/08/2012	14/08/2013
Graminho	26/02/2013	26/02/2014
Relógio comparador centesimal	01/10/2012	01/10/2013
Relógio comparador centesimal	01/10/2012	01/10/2013
Blocos padrões	16/02/2013	16/03/2014
Desempeno	18/02/2013	18/02/2015
Alicate – Amperímetro	07/05/2013	07/05/2015

## 4.2 MÉTODOS.

A sequência de operações para a obtenção dos quatro CPs, como corte, desempenho, usinagem, soldagem de suportes provisórios, identificações e tipagens, novos desempenos, soldagem do passe de raiz e soldagem dos demais passes foi feita da forma a seguir:

As chapas do Metal Base foram cortadas a plasma nas medidas aproximadas de 195 x 390mm, conforme as figuras 4.1a e 4.1b, totalizando 8 peças.



(a)



(b)

**Figura 4.1** – Sequência de corte a plasma.

Foi feito o desempenamento das chapas dos CPs com o uso de balancim de 100t, e esquadro (régua de luz) conforme as figuras 4.2a e 4.2b.



(a)



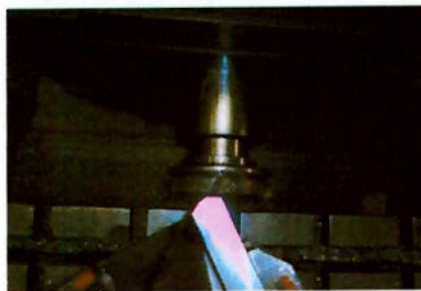
(b)

**Figura 4.2** – Etapas do Desempenamento.

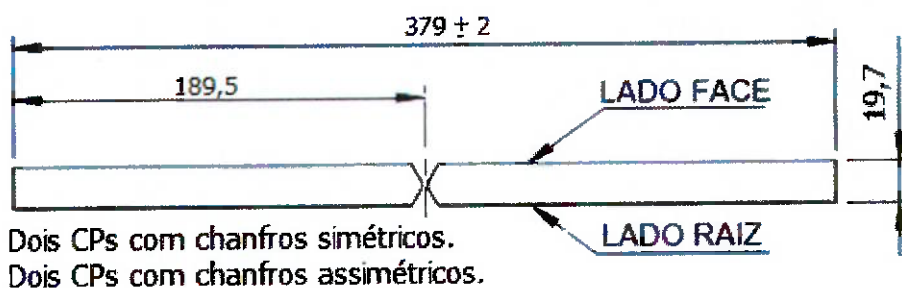
Foi feita a usinagem de esquadrejamento das chapas dos CPs nas medidas aproximadas de 188 x 379mm cada uma, e a usinagem dos chanfros, conforme as figuras 4.3a e 4.3b, completando 4 peças com chanfros simétricos e 4 peças com chanfros assimétricos, em máquina mandrilhadora. As medidas de usinagem foram seguidas conforme as figuras 4.4, 4.5 e 4.6.



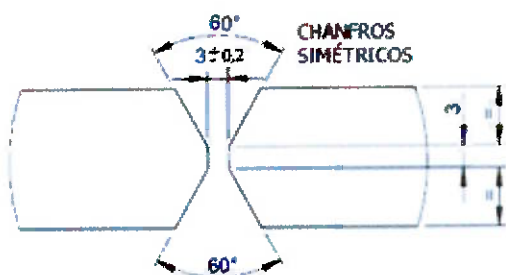
**Figura 4.3a** – Esquadreamento



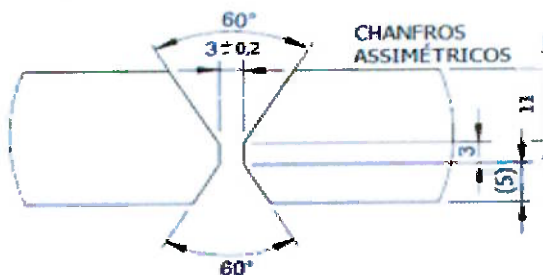
**Figura 4.3b** – Chanfros



**Figura 4.4** – Medidas de usinagem. O comprimento foi de 380mm.



**Figura 4.5** – Chanfros simétricos



**Figura 4.6** – Chanfros assimétricos.

Foi feita a identificação dos corpos (CP1, CP2, CP3 e CP4), através de tipagem, conforme as figuras 4.7a e 4.7b.



**Figura 4.7a** – Identificação (CP2)



**Figura 4.7b** – Identificação (CP4)

Foram feitas a montagem e a soldagem de suportes provisórios para a manutenção da abertura de raiz de 3mm, conforme as figuras 4.8a e 4.8b. Esta abertura foi indicada nas figuras 4.5 e 4.6.

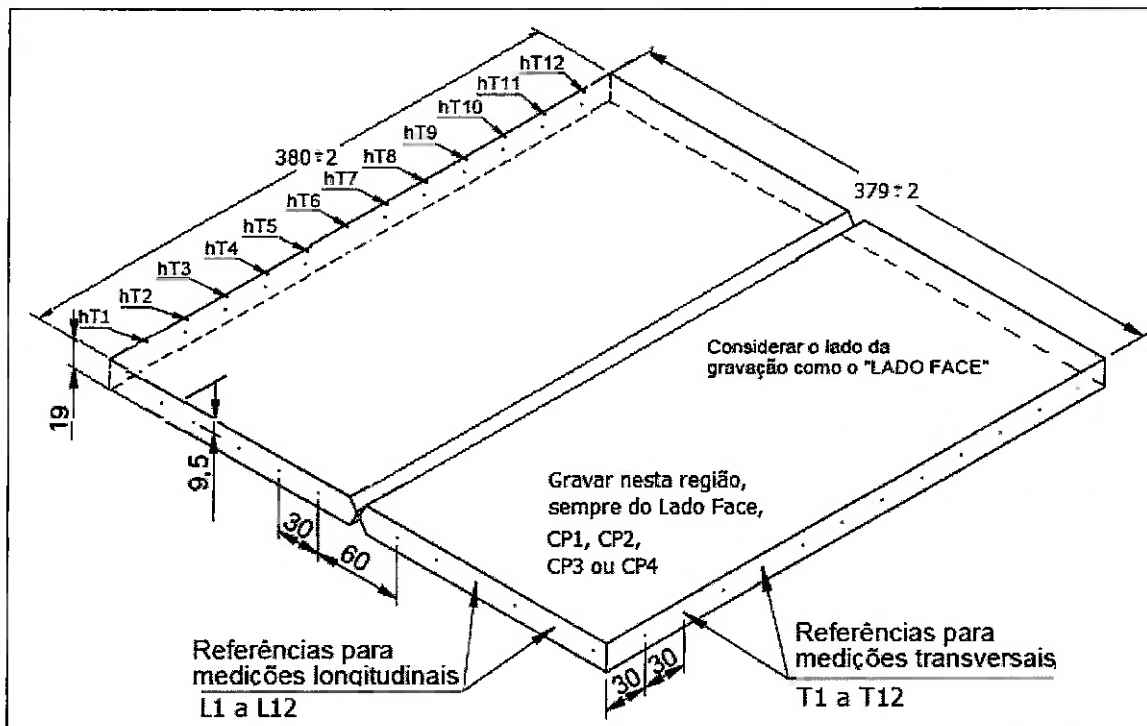


**Figura 4.8a** – Suportes provisórios.



**Figura 4.8b** – Suportes provisórios.

Foi feita a tipagem das referências para as medições Longitudinais (L1 a L12), Transversais (T1 a T12) e Angulares (hT1 a hT12), conforme a figura 4.9, nos quatro corpos de prova. Foram feitas as gravações de identificação "CP1, CP2, CP3 e CP4", na posição indicada na figura 4.9, sempre no lado considerado como "Lado Face".



**Figura 4.9** – Referências para medições Longitudinais, Transversais e Angulares.

Foi feito o desempenamento dos CPs, já com os suportes soldados e com as referências e gravações também concluídas. Foram verificadas e corrigidas as planicidades de cada par, sobre "Mesa de Desempeno".

Em seguida foram medidas e registradas as dimensões L1 a L12 (Longitudinais) e T1 a T12 (Transversais), utilizando-se as referências indicadas na figura 4.9 com a tomada das dimensões mostradas nas figuras 4.10a e 4.10b. Foi utilizado o Instrumento de Medição Universal, de precisão centesimal. Este instrumento contém pontas especiais que permitiram a medição com os CPs desempenados e, também depois, distorcidos pela soldagem, como foi descrito em operação posterior a esta. Após a soldagem do

passo de raiz, somente utilizaremos este instrumento nas medições L1 a L12 e T1 a T12.



**Figura 4.10a** – Medições T1 a T12



**Figura 4.10b** – Medições L1 a L12.

Foi feito o ponteamento dos CPs sobre cavalete, utilizando-se os suportes provisórios de manutenção da abertura de raiz de 3mm, para ancoragem dos corpos na posição vertical, e início das soldagens verticais ascendentes, conforme as figuras 4.11a e 4.11b. Este procedimento foi executado após todos os passes de soldagens, sempre utilizado o mesmo suporte escolhido previamente para ponteamento sobre o cavalete.



(a)



(b)

**Figura 4.11** – CPs sobre cavalete.

Foram executadas as soldagens dos passes de raiz em cada corpo de prova, pelo processo Arame Tubular com proteção gasosa, na posição Vertical Ascendente utilizando-se a técnica da Dupla Fusão, conforme as figuras 4.12a e 4.12b, com dois soldadores (ou soldagem com duplo arco).



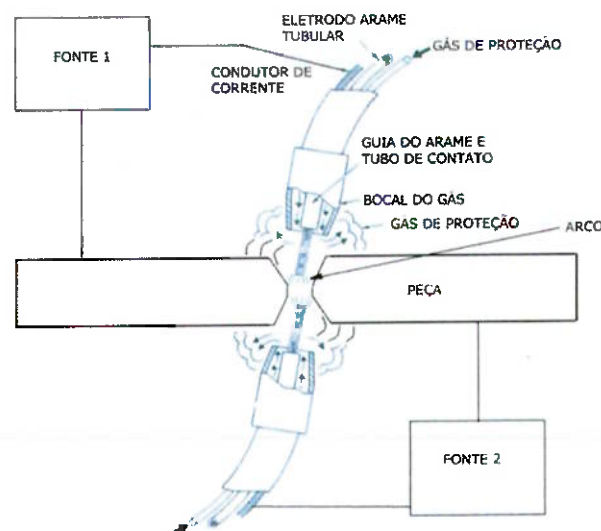
(a)



(b)

**Figura 4.12** - Soldagem Dupla Fusão (Raiz)

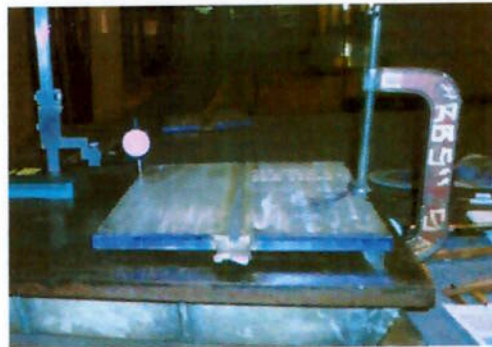
A figura 4.13 mostra, esquematicamente, o uso da técnica da Dupla Fusão, utilizada na soldagem dos passes de raiz dos CPs.



**Figura. 4.13** – Esquema de soldagem com dupla fusão (modif. de [5,13]).

Os CPs foram deixados para resfriamento até a temperatura ambiente, em ar calmo. Em seguida foram retirados do cavalete para a tomada das medidas Longitudinais (L1 a L12) e Transversais (T1 a T12) para as quais foi

utilizado o Instrumento de Medição Universal, com relógio comparador de precisão centesimal com pontas especiais. As medidas das Deformações Angulares (hT1 a hT12) foram feitas com o uso de Graminho com relógio comparador de precisão centesimal, com fixação e apoios específicos sobre a Mesa de Desempeno, conforme a figura 4.14.



**Figura. 4.14** – Medição da deformação angular sobre mesa de desempenho.








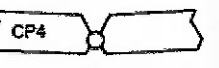




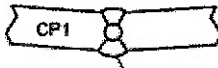
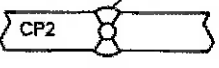




Os quatro CPs foram selecionados como, "Com Controle" (CP2 e CP4) e como "Sem Controle" (CP1 e CP3), para cada tipo de chanfro, conforme a tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – CPs "Com Controle" e "Sem Controle" da Deformação Angular.

ESCOLHA DOS CPs COM SOLDAGEM COM CONTROLE E SEM CONTROLE				
CORPO DE PROVA	CP1	CP2	CP3	CP4
COM CONTROLE		X		X
SEM CONTROLE	X		X	
CHANFROS	SIMÉTRICOS	SIMÉTRICOS	ASSIMÉTRICOS	ASSIMÉTRICOS

Para o controle das Deformações Angulares nas soldagens nos corpos de prova CP2 e CP4 (ambos selecionados como "com controle"), cada passe de solda, do Lado Face ou Lado Raiz, foi analisado antecipadamente. Para os corpos de prova CP1 e CP3 as soldagens foram feitas "sem controle".

A figura 4.15 mostra a sequência real das soldagens executadas, indicando os passes, o lado face ou lado raiz, os cordões soldados e a distorção angular (representativa).

SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM DOS CPs - COM CONTROLE e SEM CONTROLE				
	SEM CONTROLE	COM CONTROLE	SEM CONTROLE	COM CONTROLE
	CP1 - ch. simétricos	CP2 - ch. simétricos	CP3 - ch. assimétricos	CP4 - ch. assimétricos
MONTAGEM IDENTIFICAÇÃO LADO FACE e LADO RAIZ	Lado Face  Lado Raiz	Lado Face  Lado Raiz	Lado Face  Lado Raiz	Lado Face  Lado Raiz
1º PASSE Raiz Dupla Fusão	Distorção para o Lado Face 	Pequena distorção para o Lado Face 	Distorção para o Lado Face 	Distorção para o Lado Face 
2º PASSE	Cordão aplicado no Lado Face - Sem Controle  Distorção aumentada para o Lado Face	Distorção invertida para o Lado Raiz  Cordão aplicado no Lado Raiz - Com Controle	Cordão aplicado no Lado Face - Sem Controle  Distorção aumentada para o Lado Face	Distorção invertida para o Lado Raiz  Cordão aplicado no Lado Raiz - Com Controle
3º PASSE	Distorção diminuída mas insuficiente  Último cordão aplicado no Lado Raiz - Sem Controle	Último cordão aplicado no Lado Face - Com Controle  Distorção controlada	Dois cordões aplicados no Lado Face - Sem Controle  Distorção aumentada para o Lado Face	Cordão aplicado no Lado Face - Com Controle  Distorção invertida para o Lado Face
4º PASSE			Distorção diminuída mas insuficiente  Último cordão aplicado no Lado Raiz	Dois últimos cordões aplicados no Lado Face  Distorção aumentada para o Lado Face. Reprovada

**Figura 4.15** – Sequência real de soldagem utilizada na confecção dos CPs.

O 1º passe foi executado na raiz, com o processo Dupla Fusão. As soldagens dos passes subsequentes para enchimento das juntas em todos os CPs, do Lado Raiz ou Lado Face, foram feitas com um só soldador, também com o processo arame tubular com proteção gasosa, na posição vertical ascendente.

Conforme a figura 4.15, o CP1 (sem controle) teve distorção angular para ao Lado face após o passe de raiz, que foi aumentada para o mesmo lado após o 2º passe e diminuída após o 3º e último passe. Se fosse uma soldagem com controle da distorção angular, o 2º passe deveria ser executado do Lado Raiz, para se diminuir a distorção já resultante do 1º passe.

O CP2 (com controle) teve leve distorção angular para ao Lado Face após o passe de raiz, que foi invertida para o Lado Raiz após o 2º passe, aplicado deste lado, para se controlar a distorção. Após o 3º e último passe, do Lado Face, a distorção angular foi praticamente anulada.

O CP3 (sem controle) teve distorção angular acentuada para o Lado Face, após o passe de raiz. A distorção aumentou ainda mais para o Lado Face após o 2º e 3º passes (ambos sem controle). Diminuiu após o 4º passe (último), aplicado do Lado Raiz. Se fosse uma soldagem com controle, o 2º passe deveria ser executado do Lado Raiz, para se controlar a distorção já resultante do 1º passe. Para o 3º, uma análise da distorção deveria ser executada para a escolha do lado a ser aplicado.

O CP4 (com controle) teve distorção angular para o Lado Face após o 1º passe (raiz), que foi invertida para o Lado Raiz após o 2º passe que foi aplicado controladamente deste lado. A distorção foi novamente invertida para o Lado Face após o 3º passe, mas aumentou ainda mais para o este lado, após o 4º e último passe, que foi de enchimento. Não houve mais passes do lado raiz para controlar-se a distorção a um nível desejável.

A figura 4.16 mostra uma das soldagens executadas com este processo.

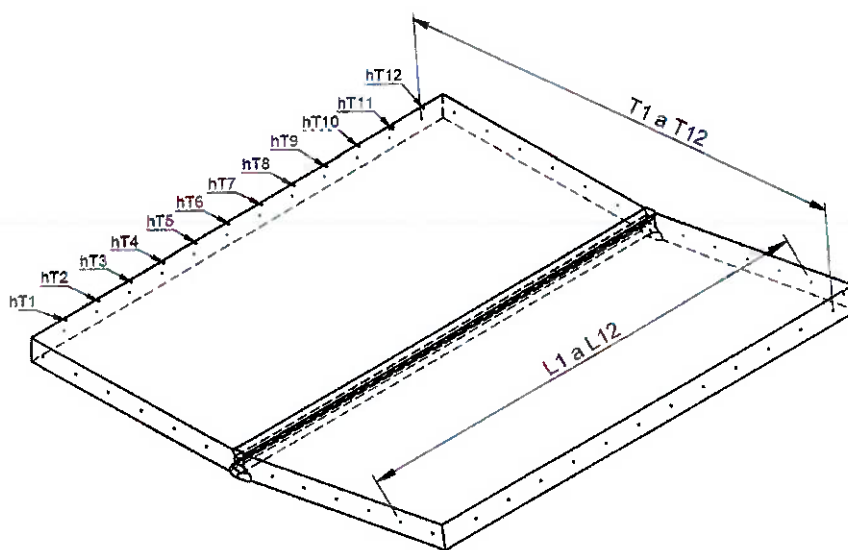
A figura 4.17 mostra os dois cordões executados no 3º passe no CP3.

Após a execução de "cada cordão de solda" os corpos de prova foram resfriados em ar calmo, até a temperatura ambiente, e retirados do cavalete para a tomada de todas as medições. Conforme a figura 4.15, o 3º passe do CP3 e o 4º passe do CP4, foram feitos com dois cordões (uma camada), sem resfriamento do corpo entre as execuções destes cordões.



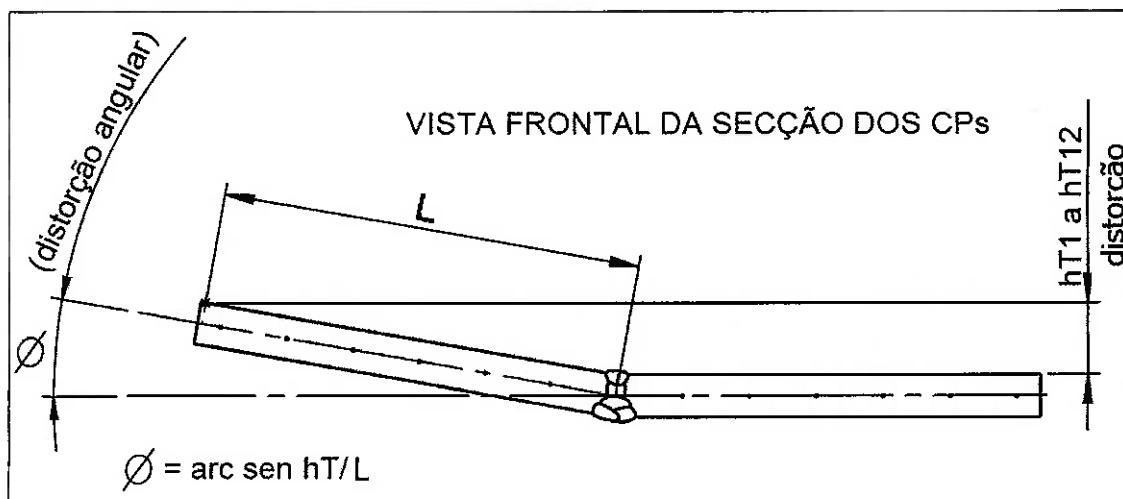
**Figura 4.16** – 2º Passe. Um lado. **Figura 4.17** – Uma Camada (2 cordões).

Todas as dimensões Longitudinais e Transversais foram obtidas segundo a figura 4.18, e registradas.



**Figura 4.18** – Cotas para as medidas Longitudinais e Transversais.

Todas as dimensões Angulares foram obtidas segundo a figura 4.19, e registradas.



**Figura 4.19** – Cotas para as dimensões angulares.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.**

### **5.1 DISTORÇÕES ANGULARES.**

Para cada corpo de prova foram registradas as medidas "hT1 a hT12", o ângulo  $\Phi$ , positivo ou negativo, e a energia de soldagem utilizada em cada passe, conforme as tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4. O ângulo  $\Phi$  foi calculado com base na maior distorção "hT", destas tabelas, e com o valor "L" da tabela 5.5, a partir da montagem e desempenamento dos CPs, antes do passe de raiz. Respectivamente foram criados os gráficos representativos das distorções angulares conforme as sequências de soldagem executadas, mostradas nas figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

#### **5.1.1 Corpo-de-prova 1, chanfro simétrico, sem controle de distorção.**

A tabela 5.1 contém os valores dos resultados das distorções angulares das dimensões "ht" e os ângulos ( $\Phi$ ) máximos resultantes da soldagem do CP1.

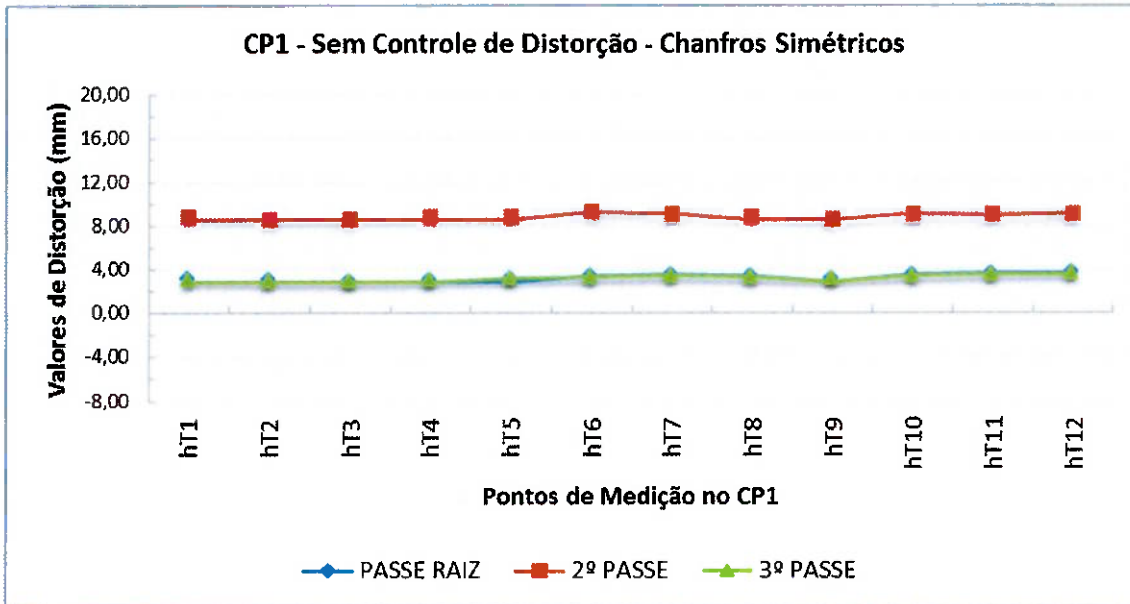
**Tabela 5.1** – Distorções Angulares na sequência de soldagem – CP1

Sequência e Lado dos Passes	CP1 - Distorções Angulares na Sequência de Soldagem (mm)												Energia de Soldagem (J/cm)	Distorção angular - $\Phi$	
	hT1	hT2	hT3	hT4	hT5	hT6	hT7	hT8	hT9	hT10	hT11	hT12			
Passe de Raiz Dupla Fusão	3,01	2,92	2,88	2,94	3,08	3,26	3,40	3,26	3,05	3,39	3,54	3,61	15522,0	(+) 1°06'21"	
													14545,9		
2° (lado face)	8,82	8,58	8,58	8,76	8,79	9,22	9,00	8,77	8,61	9,01	8,97	9,02	17188,7	(+) 2°49'37"	
3° (lado raiz)	2,93	2,84	2,81	2,94	3,05	3,22	3,34	3,18	3,02	3,33	3,46	3,51	18266,9	(+) 1°04'34"	

Com estes resultados foi construído o gráfico da figura 5.1.

Em análise da sequência de soldagem do CP1, com chanfros simétricos e sem controle de deformação angular, houve, já de início, grande distorção angular no passe de raiz, para o "lado face", talvez devido ao excesso de

energia de soldagem (30.000 J/cm). O 2º passe, feito no "lado face", aumentou ainda mais a distorção. Após o 3º e último passe, executado no "lado raiz", a distorção diminuiu, e teve valores finais de 3,51 mm e ângulo de 1º04'34".



**Figura 5.1** – Gráfico das distorções angulares para o CP1.

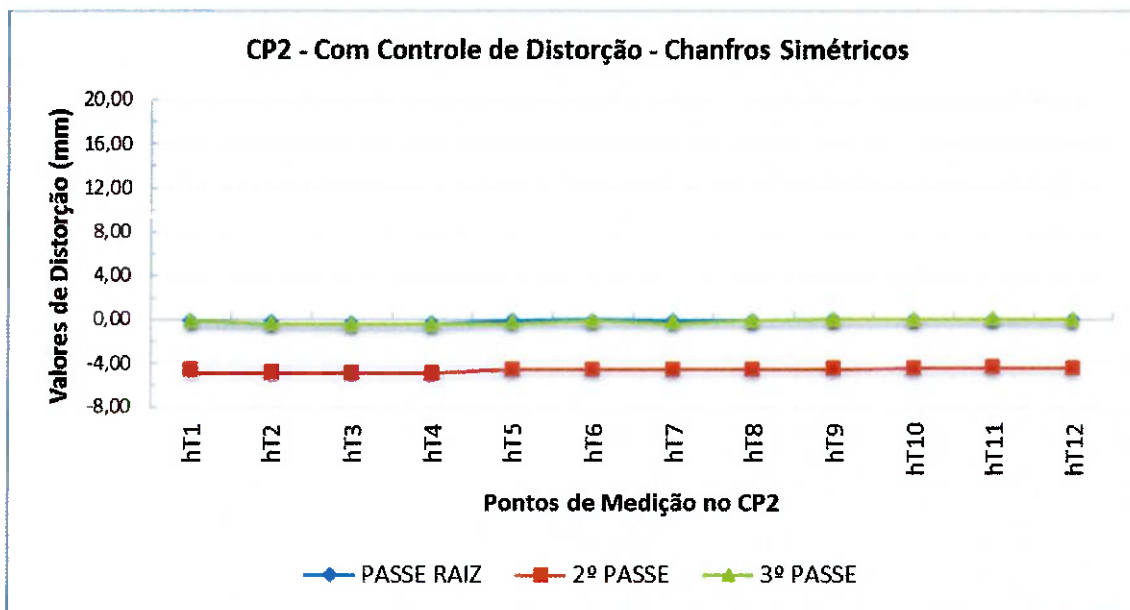
**5.1.2 Corpo-de-prova 2, chanfro simétrico, com controle de distorção.**

A tabela 5.2 contem os valores dos resultados das distorções angulares das dimensões "ht" e os ângulos (Φ) máximos resultantes da soldagem do CP2.

**Tabela 5.2** – Distorções Angulares na sequência de soldagem – CP2.

Sequência e Lado dos Passes	CP2 - Distorções Angulares na Sequência de Soldagem (mm)												Energia de Soldagem (J/cm)	Distorção angular - Φ	
	hT1	hT2	hT3	hT4	hT5	hT6	hT7	hT8	hT9	hT10	hT11	hT12			
Passe de Raiz Dupla Fusão	-0,13	-0,27	-0,34	-0,36	-0,13	-0,06	-0,14	-0,07	0,00	0,03	0,05	0,01	12558,0	(-)	0º06'40"
													12778,3		
2º (lado raiz)	-4,59	-4,80	-4,84	-4,86	-4,58	-4,50	-4,58	-4,55	-4,48	-4,45	-4,35	-4,40	20234,8	(-)	1º29'13"
3º (lado face)	-0,15	-0,34	-0,39	-0,42	-0,16	-0,10	-0,17	-0,12	-0,02	0,02	0,08	0,03	15380,4	(-)	0º07'44"

Com estes resultados foi construído o gráfico da figura 5.2 para o CP2.



**Figura 5.2** – Gráfico das distorções angulares para o CP2.

Para o CP2, também com chanfros simétricos, mas, com controle, a figura 5.2 mostra que a distorção angular no passe de raiz foi pequena, mantendo-se próxima ao eixo horizontal (0,0). O 2º passe, executado do “lado raiz”, distorceu o CP2 para este lado, com maior valor na referência “hT4”, de 4,86mm e ângulo de 1°29’13”. Após o 3º passe (último) no lado face, as deformações praticamente voltaram aos valores do passe de raiz, com ângulo máximo de 0°07’44” e 0,42 mm de altura na referência hT4.

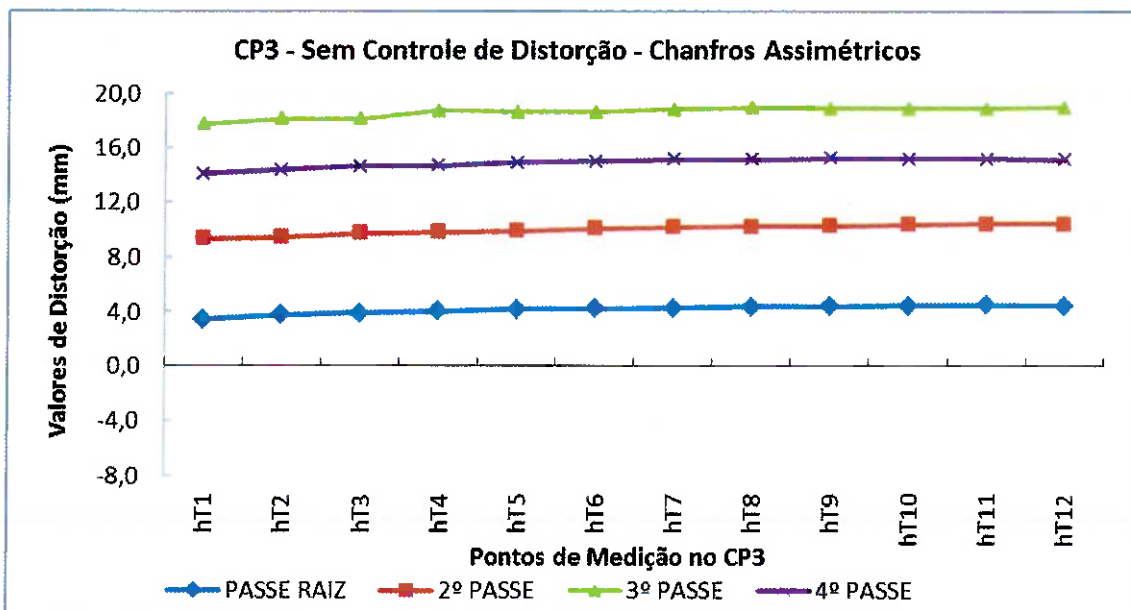
### 5.1.3 Corpo-de-prova 3, chanfro assimétrico, sem controle de distorção.

A tabela 5.3 contem os valores dos resultados das distorções angulares das dimensões "ht" e os ângulos ( $\Phi$ ) máximos resultantes da soldagem do CP3.

**Tabela 5.3** – Distorções Angulares na sequência de soldagem – CP3.

Sequência e Lado dos Passes	CP3 - Distorções angulares na sequência de soldagem (mm)												Energia de Soldagem (J/cm)	distorção angular - $\Phi$	
	ht1	ht2	ht3	ht4	ht5	ht6	ht7	ht8	ht9	ht10	ht11	ht12			
Passe de Raiz Dupla Fusão	3,41	3,74	3,88	4,02	4,16	4,20	4,26	4,34	4,41	4,45	4,47	4,42	12168,0	(+)	1°22'26"
													12168,0		
2º (lado face)	9,35	9,44	9,69	9,80	9,88	10,10	10,20	10,24	10,28	10,36	10,40	10,40	9769,8	(+)	3°11'53"
3º (lado face) (2 cordões)	17,73	18,12	18,10	18,71	18,64	18,62	18,82	18,96	18,92	18,92	18,92	18,98	10378,9	(+)	5°50'38"
													10476,6		
4º (lado raiz)	14,04	14,34	14,61	14,68	14,88	14,99	15,11	15,14	15,22	15,18	15,18	15,12	13492,6	(+)	4°40'15"

Com estes resultados foi construído o gráfico da figura 5.3 para o CP3.



**Figura 5.3** – Gráfico das distorções angulares para o CP3.

Para o CP3, com chanfros assimétricos (2/3 lado face - 1/3 lado raiz) e sem controle da deformação angular, a figura 5.3 mostra as distorções angulares para o "lado face", após o passe de raiz (dupla fusão), após o 2º

passo, aplicado do lado face, e após o 3º passo, que teve dois cordões, também aplicados do lado face, sem nenhum controle de deformação angular. Os maiores valores de deformação angular foram obtidos na referência "hT12" de 18,98mm e ângulo de 5º50'38", após o 3º passo (dois cordões).

Estes valores diminuíram para as medidas finais de 15,18mm e ângulo de 4º40'15" após o 4º e último passo, que foi aplicado no lado raiz.

A deformação angular inicial, após o passo de raiz (dupla fusão), para o lado face (chanfro 2/3) pode ser explicada pela posição desfavorável de aplicação deste passo (a 2/3 da espessura) com relação à linha neutra do CP, que, numa solda de topo localiza-se na metade da espessura. O calor gerado pela energia de soldagem dissipa-se por condução mais rapidamente para o lado de maior massa da peça (2/3), fazendo com que o metal de adição, mesmo sendo aplicado simultaneamente dos dois lados (dupla fusão) esfrie-se mais rapidamente deste lado (2/3), causando contração mais rápida e consequente deformação angular para este lado.

O 4º passo, executado do lado raiz (chanfro 1/3), não teve energia suficiente para vencer as restrições e os "momentos" de força causados pelos cordões dos passos anteriores do lado face (maior chanfro-2/3), causando pouca diminuição na deformação angular já existente.

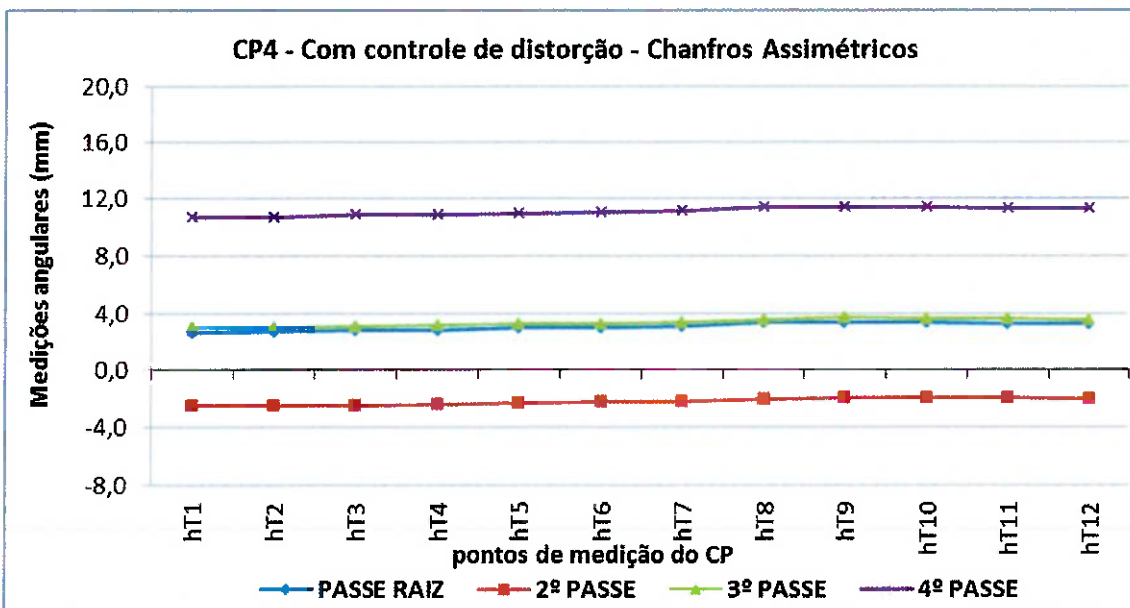
### 5.1.4 Corpo-de-prova 4, chanfro assimétrico, com controle de distorção.

A tabela 5.4 contem os valores dos resultados das distorções angulares das dimensões "ht" e os ângulos ( $\Phi$ ) máximos resultantes da soldagem do CP4.

**Tabela 5.4** – Distorções Angulares na sequência de soldagem – CP4.

Sequência e Lado dos Passes	CP4 - Distorções angulares na sequência de soldagem (mm)												Energia de Soldagem (J/cm)	distorção angular - $\Phi$	
	ht1	ht2	ht3	ht4	ht5	ht6	ht7	ht8	ht9	ht10	ht11	ht12			
Passe de Raiz Dupla Fusão	2,65	2,70	2,76	2,83	2,97	2,99	3,10	3,31	3,37	3,34	3,29	3,25	12636,0	(+)	1°02'08"
													12636,0		
2º (lado raiz)	-2,52	-2,49	-2,44	-2,39	-2,33	-2,23	-2,19	-2,00	-1,91	-1,96	-1,98	-2,01	14095,4	(-)	0°46'28"
3º (lado face)	2,98	3,00	3,07	3,14	3,22	3,29	3,37	3,53	3,66	3,62	3,59	3,54	13175,2	(+)	1°07'29"
4º (lado face) (2 cordões)	10,66	10,72	10,82	10,88	10,94	11,01	11,15	11,36	11,43	11,37	11,33	11,29	11587,8	(+)	3°30'53"
													11111,6		

Com estes resultados foi construído o gráfico da figura 5.4 para o CP4.



**Figura 5.4** – Gráfico das distorções angulares para o CP4.

Para o CP4, com chanfros assimétricos (2/3 lado face - 1/3 lado raiz) mas, com controle da deformação angular, a figura 5.4 mostra distorção angular para o "lado face", após o passe de raiz (dupla fusão), e para o "lado

raiz” após o 2º passe (inversão). Após o 3º passe no lado face houve nova inversão da distorção para este lado. A distorção aumentou, ainda mais para o lado face, após o 4º passe (último – com dois cordões), para os valores finais máximos em “hT9” de 11,43mm e ângulo de 3º30’53”.

Para todos os CPs (CP1, CP2, CP3 e CP4), os valores das deformações angulares, hT1, hT2, hT3, até hT12, tiveram entre si, em cada passe, leve crescimento, conforme foi verificado nos gráficos das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4. Isto pode ter explicação no fato que o calor gerado no início da soldagem de cada cordão, sempre com alinhamento em hT1, encontra a peça fria e dissipa-se por condução, durante a aplicação da energia, em todas as direções, inclusive para a região do cordão alinhada com hT12, final da soldagem. Esta região hT12 no final do passe, naturalmente, está mais quente que a região hT1 no início do mesmo passe. Ou seja, na região da soldagem alinhada com hT12, há maior aporte de calor, portanto gerando maior distorção angular que em hT1, provocando o leve crescimento citado.

O excesso de energia aplicado “no passe de raiz” (dupla fusão) do CP1 pode ter sido o causador da maior deformação angular deste CP1, quando comparada à deformação angular do CP2, também “no passe de raiz” (dupla fusão). Com chanfros simétricos e dupla fusão, a deformação deveria ter sido menor em CP1, pois a energia foi distribuída igualmente dos dois lados, em ambos os CPs.

A tabela 5.5 mostra os valores dos ângulos máximos finais em cada CP e a medida L, que foi usada no cálculo dos ângulos  $\Phi$ , da figura 4.20.

A tabela 5.6 mostra as tolerâncias angulares transcritas da norma ISO 13920.

**Tabela 5.5** – Dimensões "L" e ângulos máximos obtidos nos CPs.

Dimensões "L" e distorções angulares máximas dos CPs				
	CP1	CP2	CP3	CP4
L (mm)	186,95	186,54	186,41	186,44
Ângulo Máx.	1°04'34"	0°07'44"	4°40'15"	3°30'53"

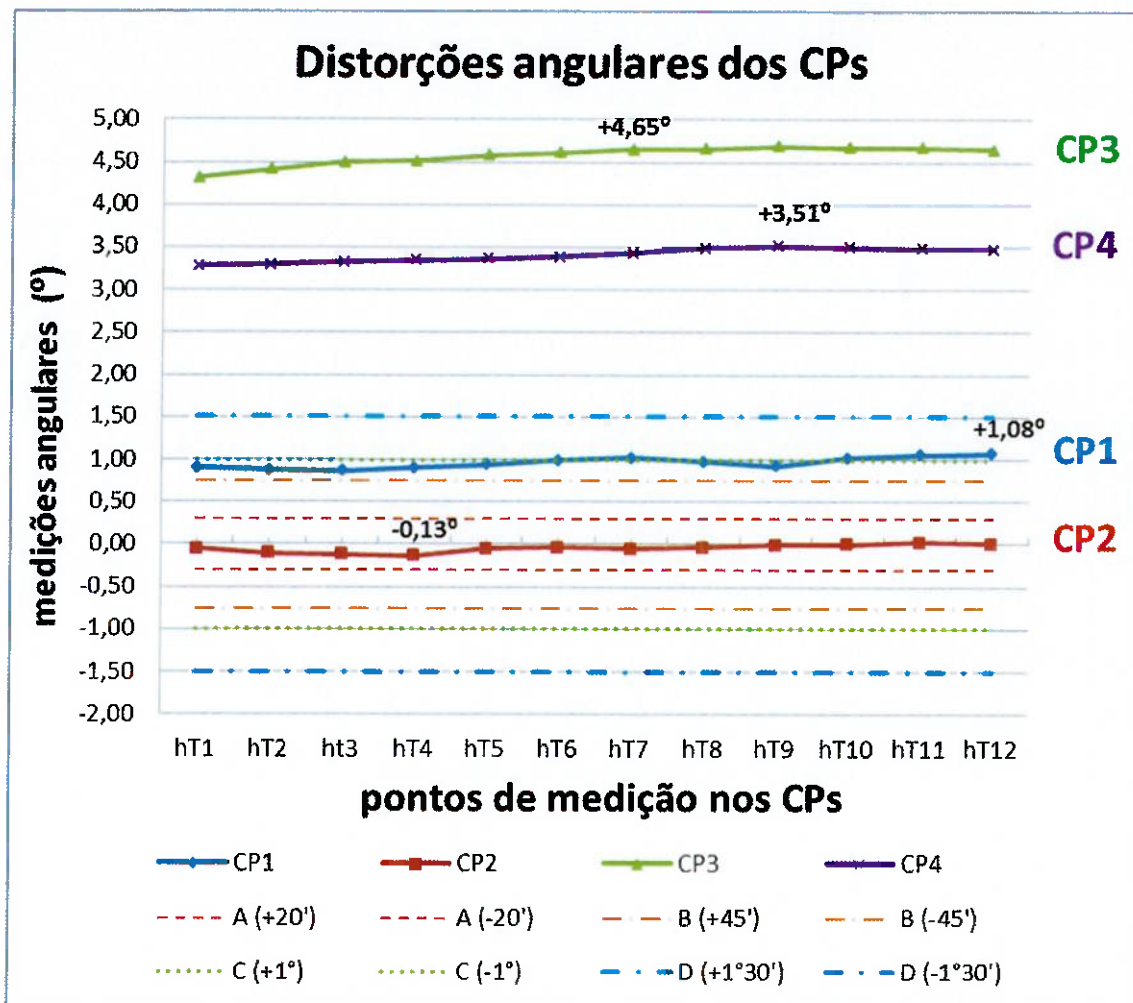
**Tabela 5.6** – Tolerâncias para dimensões angulares da Norma ISO 13920 [19].

Norma ISO 13920 - Tolerâncias para dimensões angulares			
Classe	Comprimento "L" (mm - nominal)		
	≤ 400	> 400 ≤ 1000	> 1000
Tolerâncias em graus e minutos			
A	± 20'	± 15'	± 10'
B	± 45'	± 30'	± 20'
C	± 1°	± 45'	± 30'
D	± 1°30'	± 1°15'	± 1°

O gráfico, figura 5.5 mostra os resultados finais das distorções angulares dos CPs, comparados com as Classes de tolerância A, B, C e D (angulares), da norma ISO 13920, para estruturas soldadas.

Somente o CP2, soldado com controle, com chanfros simétricos e com distorção angular máxima final de  $-0^{\circ}07'44''$  ( $-0,13^{\circ}$ ), está aprovado dentro da Classe A que tem tolerância angular de  $\pm 20'$  (classe fina) para um comprimento até 400mm.

O CP1, soldado sem controle, também com chanfros simétricos e com distorção angular de  $+1^{\circ}04'34''$  ( $+41,08^{\circ}$ ), está aprovado apenas dentro da Classe D com tolerância angular de  $\pm 1^{\circ}30'$  (classe grosseira).



**Figura 5.5** –Distorções angulares dos CPs versus as Classes de tolerância A, B, C e D, angulares, da norma ISO 13920, para estruturas soldadas.

O CP3 (chanfros assimétricos sem controle) com distorção angular de +4°40'15" (+4,65°) está reprovado totalmente e o CP4 com distorção angular de +3°30'53" (+3,51°), com chanfros assimétricos e com controle também está reprovado, mesmo sendo com controle de distorção.

## 5.2 DISTORÇÕES LONGITUDINAIS.

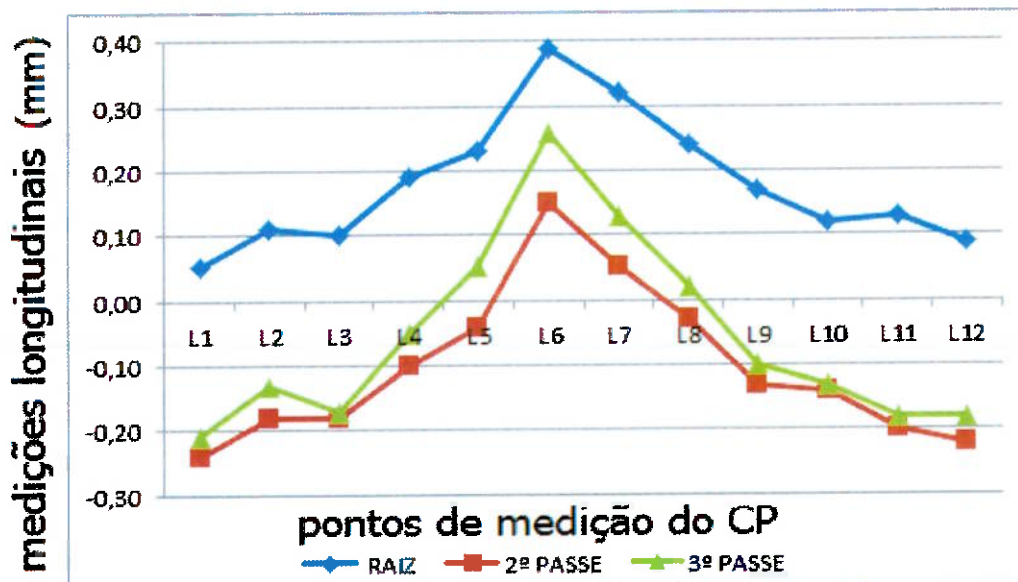
A tabela 5.7 mostra os valores de L1 a L12. Estas medidas foram tomadas nestas referências, antes do passe de raiz.

**Tabela 5.7** – Dimensões Longitudinais dos CPs, antes do passe de raiz, com abertura de raiz de 3 mm.

MEDIÇÕES LONGITUDINAIS (mm)												
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
CP1	380,32	380,34	380,10	380,18	380,15	380,40	380,37	380,53	380,53	380,58	380,54	380,65
CP2	380,56	380,45	380,60	380,62	380,58	380,71	380,42	380,41	380,44	380,48	380,42	380,59
CP3	380,40	380,31	380,33	380,21	380,20	380,33	380,42	380,42	380,46	380,46	380,41	380,65
CP4	380,49	380,27	380,36	380,34	380,31	380,38	380,34	380,37	380,44	380,43	380,40	380,52

### 5.2.1 Corpo-de-prova 1, chanfro simétrico, sem controle de distorção.

A figura 5.6 mostra o gráfico das variações das distorções longitudinais do CP1 ao longo de L1 a L12 e a tabela 5.8 mostra os valores das distorções. Valores positivos para contração e negativos para expansão.



**Figura 5.6** – Gráfico das Distorções Longitudinais do CP1.

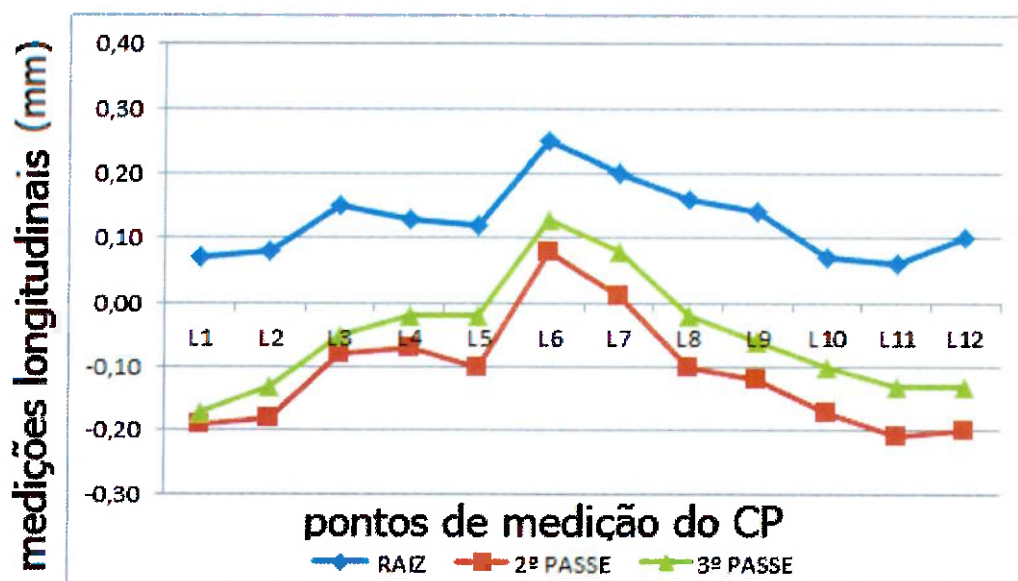
**Tabela 5.8** – Distorções Longitudinais do CP1.

CP1 - Distorções Longitudinais (mm) - Valores positivos para contração e negativos para expansão												
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
RAIZ	0,05	0,11	0,10	0,19	0,23	0,39	0,32	0,24	0,17	0,12	0,13	0,09
2º PASSE	-0,24	-0,18	-0,18	-0,10	-0,04	0,15	0,05	-0,03	-0,13	-0,14	-0,20	-0,22
3º PASSE	-0,21	-0,13	-0,17	-0,05	0,05	0,26	0,13	0,02	-0,10	-0,13	-0,18	-0,18

Analisando-se o gráfico da figura 5.6 do CP1 e a tabela 5.8, houve contração nas referências L5 a L8 (paralelas e próximas ao cordão de solda) com maior valor de 0,26mm em L6, e expansões nas laterais do corpo de prova (distantes da linha de soldagem) com maiores valores de 0,21mm em L1 e 0,18mm em L12, após o 3º e último passe.

### 5.2.2 Corpo-de-prova 2, chanfro simétrico, com controle de distorção.

A figura 5.7 mostra o gráfico das variações das distorções longitudinais do CP2 ao longo de L1 a L12 e a tabela 5.9 mostra os valores das distorções. Valores positivos para contração e negativos para expansão.

**Figura 5.7** – Gráfico das Distorções Longitudinais do CP2.

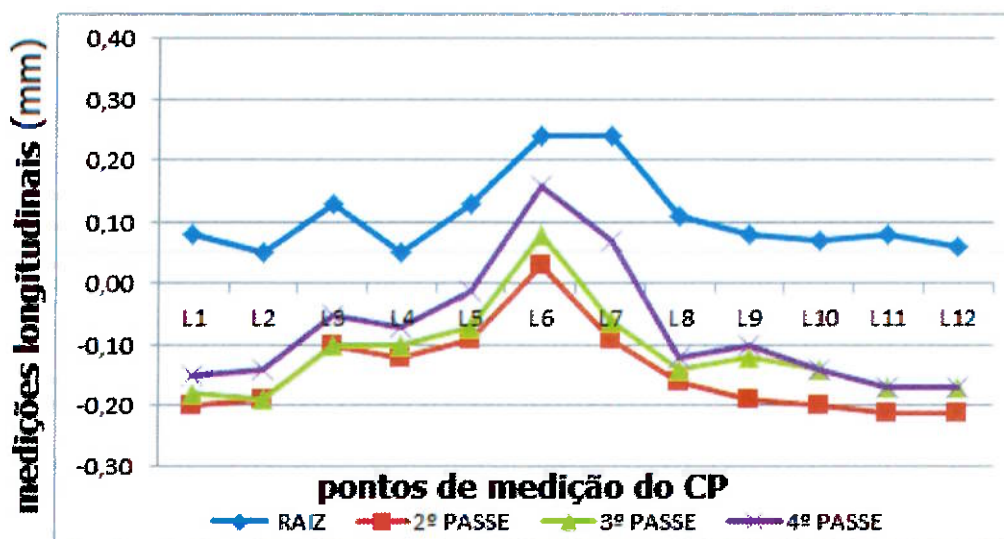
**Tabela 5.9** – Distorções Longitudinais do CP2.

CP2 - Distorções Longitudinais (mm) - Valores positivos para contração e negativos para expansão												
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
RAIZ	0,07	0,08	0,15	0,13	0,12	0,25	0,20	0,16	0,14	0,07	0,06	0,10
2º PASSE	-0,19	-0,18	-0,08	-0,07	-0,10	0,08	0,01	-0,10	-0,12	-0,17	-0,21	-0,20
3º PASSE	-0,17	-0,13	-0,05	-0,02	-0,02	0,13	0,08	-0,02	-0,06	-0,10	-0,13	-0,13

Pelo gráfico da figura 5.7 do CP2 e pela tabela 5.9, houve contração na referência L6 com maior valor de 0,13mm, e expansões nas laterais do corpo de prova com maiores valores de 0,17mm em L1 e 0,13mm em L12, após o 3º e último passe.

### 5.2.3 Corpo-de-prova 3, chanfro assimétrico, sem controle de distorção.

A figura 5.8 mostra o gráfico das variações das distorções longitudinais do CP3 ao longo de L1 a L12 e a tabela 5.10 mostra os valores das distorções. Valores positivos para contração e negativos para expansão.

**Figura 5.8** – Gráfico das Distorções Longitudinais do CP3.

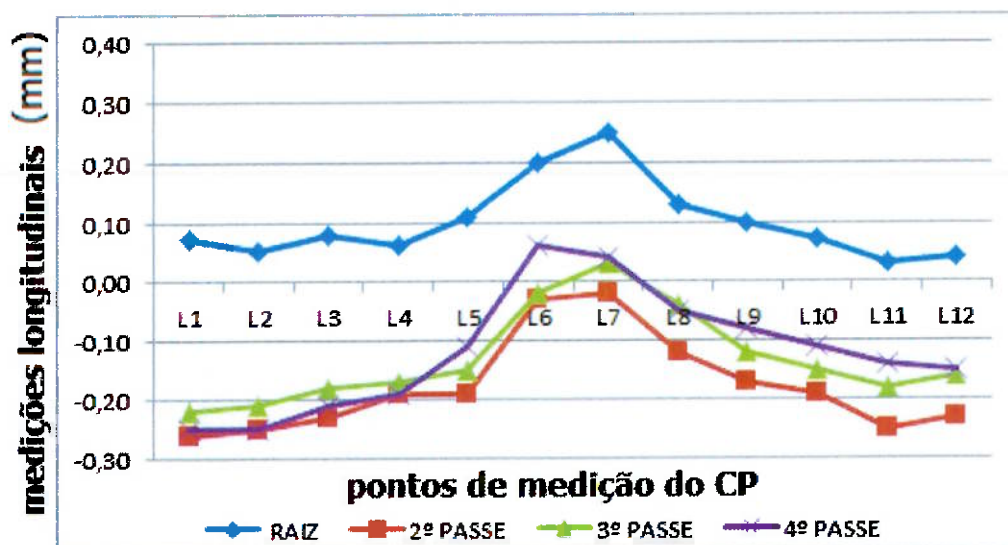
**Tabela 5.10** – Distorções Longitudinais do CP3.

CP3 - Distorções Longitudinais (mm) - Valores positivos para contração e negativos para expansão												
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
RAIZ	0,08	0,05	0,13	0,05	0,13	0,24	0,24	0,11	0,08	0,07	0,08	0,06
2º PASSE	-0,20	-0,19	-0,10	-0,12	-0,09	0,03	-0,09	-0,16	-0,19	-0,20	-0,21	-0,21
3º PASSE	-0,18	-0,19	-0,10	-0,10	-0,07	0,08	-0,06	-0,14	-0,12	-0,14	-0,17	-0,17
4º PASSE	-0,15	-0,14	-0,05	-0,07	-0,01	0,16	0,07	-0,12	-0,10	-0,14	-0,17	-0,17

No gráfico da figura 5.8 do CP3 e na tabela 5.10, vê-se a contração na referência L6 com valor de 0,16mm, e as expansões nas laterais do corpo de prova com maiores valores de 0,15mm em L1 e 0,17mm em L12, após o 4º e último passe.

#### 5.2.4 Corpo-de-prova 4, chanfro assimétrico, com controle de distorção.

A figura 5.9 mostra o gráfico das variações das distorções longitudinais do CP4 ao longo de L1 a L12 e a tabela 5.11 mostra os valores das distorções. Valores positivos para contração e negativos para expansão.

**Figura 5.9** – Gráfico das Distorções Longitudinais do CP4.

**Tabela 5.11** – Distorções Longitudinais do CP4.

CP4 - Distorções Longitudinais (mm) - Valores positivos para contração e negativos para expansão												
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
RAIZ	0,07	0,05	0,08	0,06	0,11	0,20	0,25	0,13	0,10	0,07	0,03	0,04
2º PASSE	-0,26	-0,25	-0,23	-0,19	-0,19	-0,03	-0,02	-0,12	-0,17	-0,19	-0,25	-0,23
3º PASSE	-0,22	-0,21	-0,18	-0,17	-0,15	-0,02	0,03	-0,04	-0,12	-0,15	-0,18	-0,16
4º PASSE	-0,25	-0,25	-0,21	-0,19	-0,11	0,06	0,04	-0,05	-0,08	-0,11	-0,14	-0,15

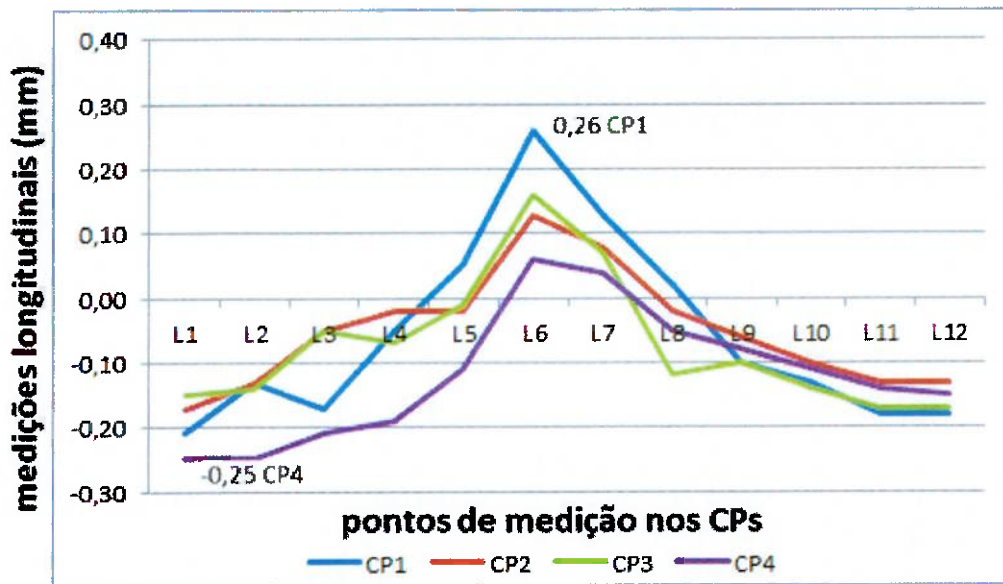
Pelo gráfico da figura 5.9 do CP4 e pela tabela, vê-se a contração na referência L6 com valor de 0,06mm, e expansões nas laterais do corpo de prova com maiores valores de 0,25mm em L1 e 0,15mm em L12, após o 4º e último passe.

A tabela 5.12 mostra as tolerâncias dimensionais lineares para comprimento nominal dentro da faixa de 120 a 400mm, da ISO 13920, com os valores de tolerâncias para as classes A, B, C e D.

**Tabela 5.12** – Tolerâncias dimensionais lineares da norma ISO 13920 [19].

Norma ISO 13920 - Tolerâncias para dimensões lineares	
Classe	Faixa de comprimento > 120 ≤ 400 (mm)
	Tolerâncias (mm)
A	± 1
B	± 2
C	± 4
D	± 7

O gráfico da figura 5.10 contém os valores das distorções longitudinais finais que foram obtidas de todos os CPs. Valores positivos para contrações e negativos para expansões, ao longo dos pontos de medição L1 até L12.



**Figura 5.10** – Gráfico - Distorções longitudinais finais dos CPs.

Em análise dos resultados finais mostrados no gráfico da figura 5.10, todas as distorções longitudinais de todos os CPs estão aprovadas pela ISO 13920, em comparação com as tolerâncias lineares da tabela 5.12 da Classe A (tolerância de +/- 1mm), dentro da faixa de comprimento 120 a 400mm.

A maior contração foi de 0,26mm no CP1 e a maior expansão foi no CP4, com valor de -0,25mm.

Pelas curvas do gráfico da figura 5.10, as maiores contrações nos CPs se concentraram na região paralela e próxima das linhas de soldagem de cada um e as maiores expansões se localizaram nas extremidades, paralelas às linhas de soldagem.

### 5.3 DISTORÇÕES TRANSVERSAIS.

A tabela 5.13 mostra os valores de T1 a T12. Estas medidas foram tomadas nestas referências, antes do passe de raiz, com os CPs montados e desempenados, com a abertura de 3mm entre as partes dos CPs.

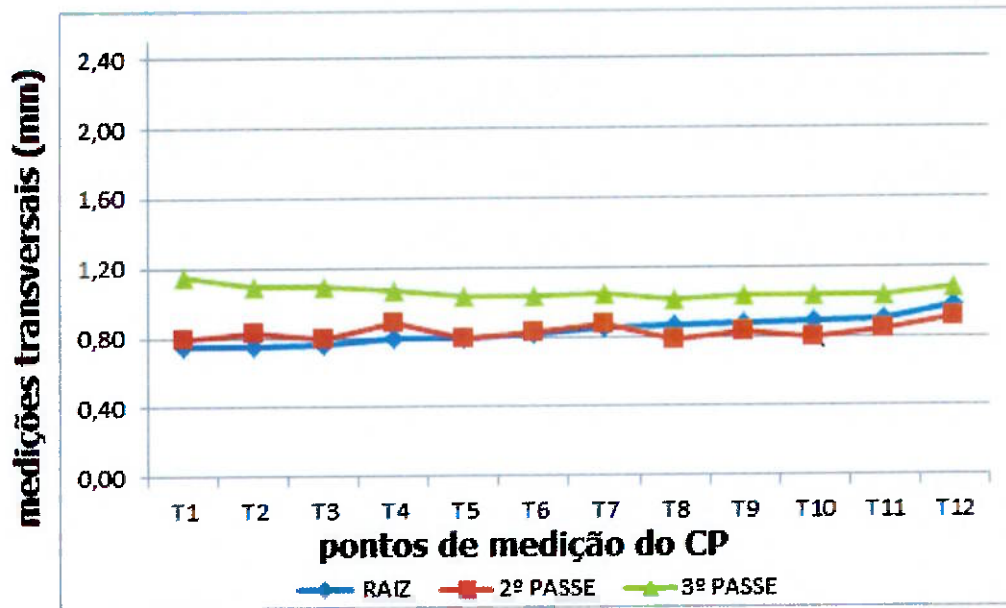
**Tabela 5.13** – Dimensões Transversais dos CPs, antes do passe de raiz.

MEDIÇÕES TRANSVERSAIS (mm)												
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
CP1	379,44	379,45	379,35	379,40	379,32	379,34	379,39	379,37	379,36	379,32	379,29	379,38
CP2	378,48	378,35	378,45	378,35	378,38	378,35	378,43	378,48	378,56	378,60	378,68	378,56
CP3	378,62	378,54	378,32	378,25	378,21	378,20	378,08	378,02	377,97	377,98	377,98	378,02
CP4	378,16	378,18	378,15	378,16	378,28	378,22	378,26	378,22	378,30	378,35	378,35	378,36

As figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 representam os valores das distorções de T1 a T12, que foram obtidos dos corpos CP1, CP2, CP3 e CP4. Estes valores foram calculados sempre em comparação às medidas da tabela 5.12, que foram tomadas antes do passe de raiz. Em todas elas foram confirmadas as tendências à contração de T1 a T12, devida à abertura de raiz de 3mm.

#### 5.3.1 Corpo-de-prova 1, chanfro simétrico, sem controle de distorção.

A figura 5.11 mostra o gráfico das variações das distorções transversais do CP1 ao longo de T1 a T12 e a tabela 5.14 mostra os valores das distorções. Os resultados foram valores positivos, e se referem às contrações obtidas.



**Figura 5.11** – Gráfico das Distorções Transversais do CP1.

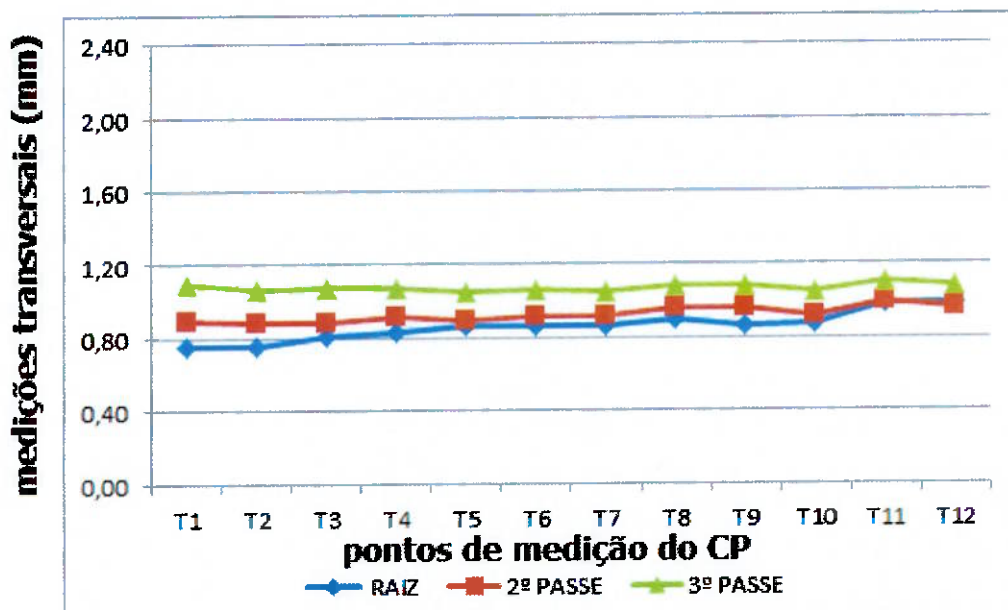
**Tabela 5.14** – Distorções Transversais do CP1.

CP1 - DISTORÇÕES TRANSVERSAIS (mm) - CONTRAÇÕES												
CP1	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
RAIZ	0,75	0,75	0,76	0,79	0,80	0,82	0,85	0,86	0,87	0,89	0,90	0,98
2º PASSE	0,79	0,83	0,79	0,89	0,80	0,83	0,87	0,78	0,83	0,80	0,84	0,91
3º PASSE	1,15	1,09	1,09	1,07	1,04	1,03	1,05	1,01	1,04	1,03	1,04	1,08

Conforme o gráfico da figura 5.11 do CP1 e tabela 5.14, o maior valor de contração de 1,15 mm foi obtido em T1, após o 3º e último passe.

### 5.3.2 Corpo-de-prova 2, chanfro simétrico, com controle de distorção.

A figura 5.12 mostra o gráfico das variações das distorções transversais do CP2 ao longo de T1 a T12 e a tabela 5.15 mostra os valores das distorções. Os resultados foram valores positivos, e se referem às contrações obtidas.



**Figura 5.12** – Gráfico das Distorções Transversais do CP2.

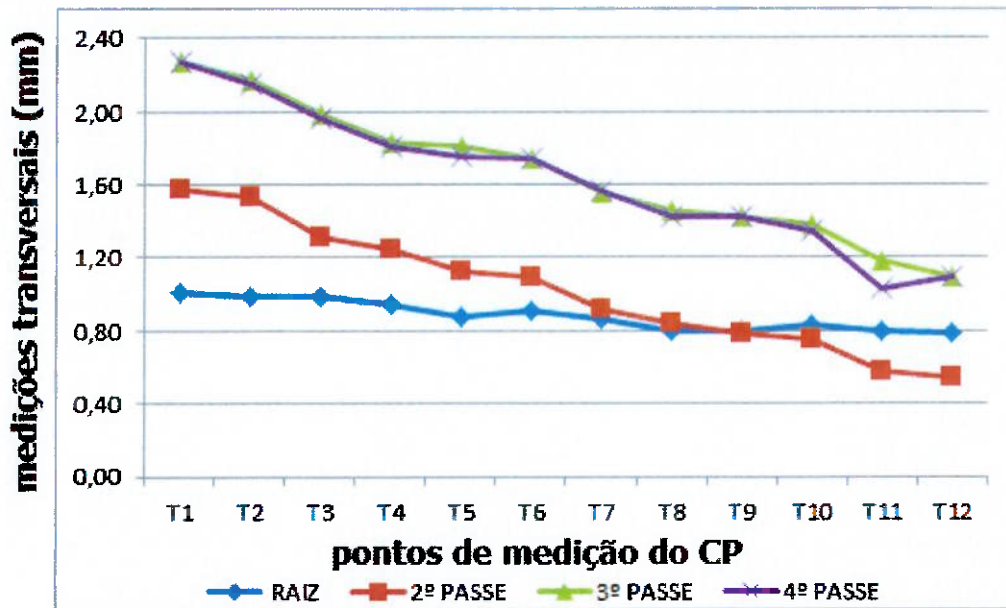
**Tabela 5.15** – Distorções Transversais dos CP2.

CP2 - DISTORÇÕES TRANSVERSAIS (mm) - CONTRAÇÕES												
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
RAIZ	0,76	0,76	0,81	0,83	0,86	0,86	0,86	0,90	0,87	0,88	0,98	0,98
2º PASSE	0,90	0,89	0,89	0,92	0,90	0,92	0,92	0,96	0,96	0,92	1,00	0,96
3º PASSE	1,09	1,06	1,07	1,07	1,05	1,06	1,05	1,08	1,08	1,05	1,11	1,08

Pelo gráfico da figura 5.12 do CP3 e pela tabela 5.15, o maior valor de contração de 1,11 mm foi obtido em T11, após o 3º e último passe.

### 5.3.3 Corpo-de-prova 3, chanfro assimétrico, sem controle de distorção.

A figura 5.13 mostra o gráfico das variações das distorções transversais do CP3 ao longo de T1 a T12 e a tabela 5.16 mostra os valores das distorções. Os resultados foram valores positivos, e se referem às contrações obtidas.



**Figura 5.13** – Gráfico das Distorções Transversais do CP3.

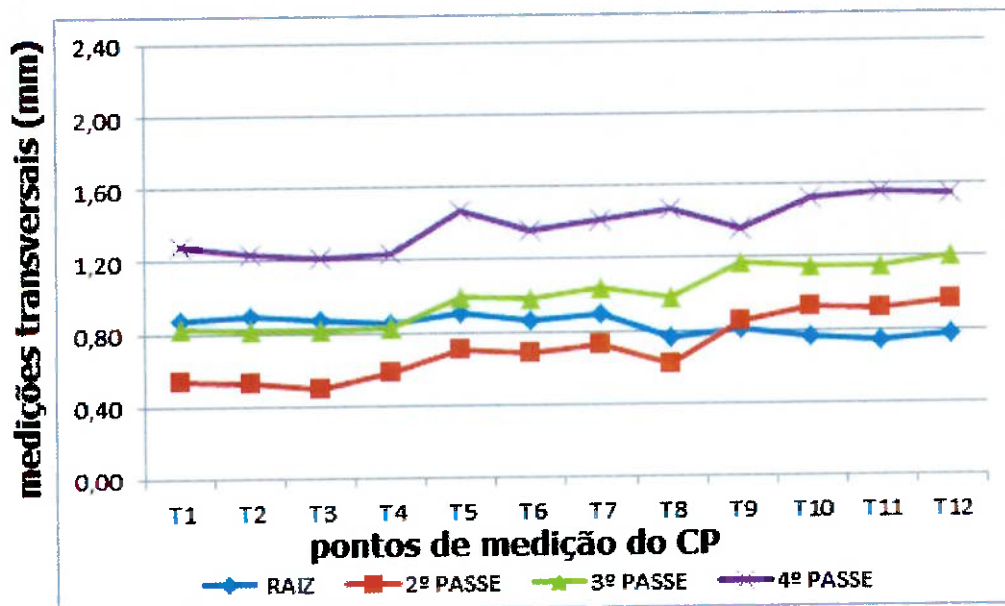
**Tabela 5.16** – Distorções Transversais do CP3.

CP3 - DISTORÇÕES TRANSVERSAIS (mm) - CONTRAÇÕES												
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
RAIZ	1,01	0,98	0,98	0,94	0,88	0,91	0,87	0,80	0,80	0,83	0,80	0,79
2º PASSE	1,58	1,53	1,32	1,25	1,13	1,10	0,92	0,84	0,79	0,76	0,58	0,55
3º PASSE	2,27	2,17	1,99	1,83	1,81	1,74	1,56	1,46	1,42	1,38	1,18	1,10
4º PASSE	2,27	2,15	1,96	1,81	1,75	1,74	1,57	1,43	1,43	1,35	1,03	1,09

Da mesma maneira o gráfico da figura 5.13 do CP3 e a tabela 5.16, mostram o maior valor de contração de 2,27mm que foi obtido em T1, após o 4º e último passe.

### 5.3.4 Corpo-de-prova 4, chanfro assimétrico, com controle de distorção.

A figura 5.14 mostra o gráfico das variações das distorções transversais do CP4 ao longo de T1 a T12 e a tabela 5.17 mostra os valores das distorções. Os resultados foram valores positivos, e se referem às contrações obtidas.



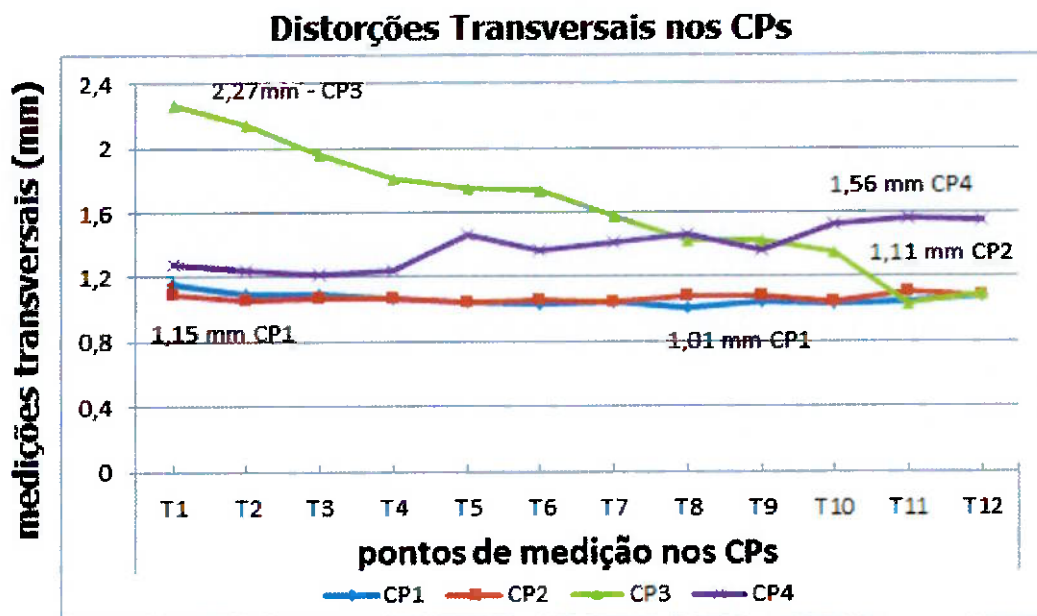
**Figura 5.14** – Gráfico das Distorções Transversais do CP4.

**Tabela 5.17** – Distorções Transversais do CP4.

CP4 - DISTORÇÕES TRANSVERSAIS (mm) - CONTRAÇÕES												
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
RAIZ	0,87	0,90	0,87	0,85	0,91	0,86	0,89	0,76	0,81	0,76	0,74	0,77
2º PASSE	0,54	0,53	0,50	0,58	0,71	0,68	0,73	0,62	0,85	0,93	0,92	0,96
3º PASSE	0,83	0,82	0,82	0,83	1,00	0,98	1,04	0,98	1,17	1,15	1,15	1,20
4º PASSE	1,28	1,24	1,22	1,24	1,47	1,36	1,42	1,47	1,36	1,53	1,56	1,55

O maior valor de contração do CP4, mostrado na figura 5.14 e na tabela 5.17, foi de 1,56 mm em T11, após o 4º e último passe.

O gráfico da figura 5.15 representa os valores das distorções transversais finais que foram obtidas de todos os CPs. Todos os valores foram positivos e representam contrações, ao longo dos pontos de medição T1 até T12.



**Figura 5.15** – Gráfico das distorções Transversais finais dos CPs.

Pelos resultados finais mostrados no gráfico da figura 5.15, as distorções transversais dos corpos-de-prova CP1, CP2 e CP4 estão aprovadas pela ISO 13920, Classe B (tolerância de +/- 2mm) quando comparadas com as tolerâncias lineares da tabela 5.12, dentro da faixa de comprimento 120 a 400mm. Destes três CPs, o maior valor de contração foi de 1,56mm no CP4.

O CP3 está aprovado apenas pela Classe C (+/- 4mm). Seu maior valor de contração foi de 2,27mm.

Não houve expansão nas medições das distorções transversais. Somente contrações. A menor contração se deu no CP1 com valor de 1,01mm.

As variáveis utilizadas nas soldagens dos CPs, em todos os passes estão indicadas na tabela 5.18.

**Tabela 5.18** – Variáveis utilizadas nas soldagens de todos os CPs.

CP	PASSE	LADO	VAZÃO-GÁS	TEMPO	CORRENTE	TENSÃO	VELOC.	ENERGIA
			l/min	(s)	(A)	(V)	(cm/s)	(J/cm)
CP1	DUPLA	FACE E	11	199	130	22,8	0,19	15522,0
	FUSÃO	RAIZ	11	199	124	22,4	0,19	14545,9
	2°	FACE	11	237	130	21,2	0,16	17188,7
	3°	RAIZ	11	220	136	23,2	0,17	18266,9
CP2	DUPLA	FACE E	11	161	130	22,8	0,24	12558,0
	FUSÃO	RAIZ	11	161	130	23,2	0,24	12778,3
	2°	FACE	11	279	130	21,2	0,14	20234,8
	3°	RAIZ	11	188	134	23,2	0,20	15380,4
CP3	DUPLA	FACE E	11	156	130	22,8	0,24	12168,0
	FUSÃO	RAIZ	11	156	130	22,8	0,24	12168,0
	2°	FACE	11	131	130	21,8	0,29	9769,8
	3°	FACE	11	136	125	23,2	0,28	10378,9
	2 cordões	FACE	11	132	130	23,2	0,29	10476,6
	4°	RAIZ	11	170	130	23,2	0,22	13492,6
CP4	DUPLA	FACE E	11	162	130	22,8	0,23	12636,0
	FUSÃO	RAIZ	11	162	130	22,8	0,23	12636,0
	2°	FACE	11	189	130	21,8	0,20	14095,4
	3°	FACE	11	166	130	23,2	0,23	13175,2
	4°	FACE	11	146	130	23,2	0,26	11587,8
	2 cordões	FACE	11	140	130	23,2	0,27	11111,6

## **6. CONCLUSÕES.**

Com base nos materiais, processos e métodos utilizados pode-se concluir que:

A técnica da dupla fusão deve ser evitada em chanfros assimétricos, pois, pode gerar alto grau de deformação angular, mesmo com o controle da deformação. Conclusão idêntica à que chegou Silva, M. F. [13], em seu experimento sobre a comparação da deformação entre a soldagem convencional com soldagem dupla fusão da raiz.

Com chanfros simétricos em solda de topo e sequência controlada de soldagem, escolhendo-se o lado a ser aplicado cada um dos passes, para corrigir a deformação angular, as deformações angulares foram mínimas, pois houve equanimidade de distribuição do número de cordões e de tensões de contração dos dois lados da junta.

Com chanfros assimétricos (1/3 - 2/3), mesmo com uma sequência de soldagem bem analisada e aplicada dos passes subsequentes ao passe de raiz e, com a localização desfavorável do passe de raiz abaixo da linha neutra da junta, com o maior número de cordões aplicados do lado 2/3 e com os momentos de força maiores, gerados pelas tensões de contração dos cordões deste lado, as deformações angulares, para o lado 2/3 não puderam ser compensadas para o lado 1/3. Portanto, não se recomenda aplicar soldagem de raiz pelo processo de dupla fusão em juntas de topo com chanfros assimétricos.

## **Comparação entre as distorções angulares, longitudinais e transversais:**

### **Distorções angulares:**

Os maiores valores dos resultados finais obtidos nas distorções angulares dos corpos de prova foram:

CP1: 3,51mm e ângulo de 1°04'34" (chanfros simétricos sem controle).

CP2: 0,42 mm e ângulo de 0°07'44" (chanfros simétricos com controle).

CP3: 15,18mm e ângulo de 4°40'15" (chanfros assimétricos sem controle).

CP4: 11,43mm e ângulo de 3°30'53" (chanfros assimétricos com controle).

Em comparação da distorção obtida entre as diferentes geometrias dos chanfros dos CPs pode-se concluir que:

Nos CPs com chanfros simétricos (CP1 e CP2), os resultados das distorções foram muito menores que os obtidos nos CPs com chanfros assimétricos (CP3 e CP4).

Com o controle da deformação observou-se que os valores obtidos de distorção foram ainda menores quando se compara os corpos com chanfros idênticos entre si.

### **Distorções longitudinais:**

Os maiores valores dos resultados finais obtidos nas distorções longitudinais dos corpos de prova foram:

CP1: contração 0,26mm e expansão de 0,21mm (chanfros simétricos sem controle).

CP2: contração 0,13mm, e expansão de 0,17mm (chanfros simétricos com controle).

CP3: contração de 0,16mm e expansão 0,17mm. (chanfros assimétricos sem controle).

CP4: contração 0,06mm e expansão de 0,25mm. (chanfros assimétricos com controle).

Em análise dos resultados das contrações e expansões longitudinais pode-se concluir que:

Na região central dos CPs, adjacente à soldagem, no sentido longitudinal dos cordões, foram obtidas contrações.

Ao longo das duas laterais dos CPs, paralelas à linha de soldagem foram obtidas expansões.

#### **Distorções transversais:**

Os maiores valores dos resultados finais obtidos nas distorções transversais dos corpos de prova foram:

CP1: Contração de 1,15mm.

CP2: Contração de 1,11mm.

CP3: Contração de 2,27mm.

CP4: Contração de 1,56mm.

Em análise dos resultados das distorções transversais pode-se concluir que:

Em todos os corpos houve contração transversal devida à abertura de 3mm na montagem das partes dos corpos dos CPs, na raiz.

As maiores contrações apresentadas nos corpos CP3 e CP4 podem ser devidas também, além da abertura de 3mm, à maiores deformações angulares obtidas nestes dois CPs, considerando-se o método como foram tomadas as medições longitudinais, conforme a figura 4.18.

**-Comparação entre os resultados obtidos das distorções com a norma de tolerâncias para construções soldadas ISO 13920:**

No CP2 as distorções angulares em soldagem de topo com chanfros simétricos, feita com controle da deformação, foram aprovadas pela Classe A das tolerâncias angulares, que é a mais rigorosa.

No CP1, as distorções angulares em soldagem de topo com chanfros simétricos, feita sem controle da deformação foram aprovadas pela norma, apenas dentro da Classe D de tolerâncias angulares, que é a mais grosseira.

Nos corpos CP3 e CP4, as distorções angulares com chanfros assimétricos com e sem controle foram reprovadas pela norma, em todas as classes.

As distorções longitudinais da soldagem de topo (contrações e expansões) com e sem controle da deformação são pequenas e foram aprovadas nas tolerâncias lineares da norma. As transversais, poderiam ser aprovadas, dependendo da Classe de tolerância linear escolhida.

## **7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

1. Execução de experimentos com solda de raiz pelo processo dupla fusão, em aço inox, aços carbono e alumínio com a análise da micrografia posterior das juntas soldadas.
2. Execução de experimentos com solda de raiz pelo processo dupla fusão, em aço inox, aços carbono e alumínio com ensaios posteriores para obtenção das propriedades mecânicas das juntas soldadas resultantes.
3. Execução de experimentos com solda de raiz com Dupla Fusão utilizando uma só máquina de solda (uma só fonte) atendendo as duas tochas de soldagens, com outros processos de soldagem com arame sólido (ex.: MIG ou TIG), ou seja, com um circuito de corrente elétrica de soldagem "fonte-tocha-peça-tocha-fonte" ao invés de dois circuitos "fonte-tocha-peça-fonte".
4. Execução de experimentos com soldagem de raiz pelo processo dupla fusão e por outro processo convencional, para comparação dos custos, com base na "não necessidade de goivagem" da soldagem de raiz pelo processo dupla fusão e da "necessidade de goivagem" posterior, pelo processo de soldagem convencional, após o passe de raiz. Esta última goivagem é sempre executada quando se quer garantia de qualidade da solda de raiz através de ensaios posteriores que também encarecem o processo convencional.

## **8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

1. WELDING HANDBOOK. **Metals and Their Weldability**. Vol.4, 7<sup>th</sup> edition, chapter 2, 1997. p.76.
2. EURO INOX. Pickling And Passivating Stainless Steel. **Materials and Applications Series**. Vol. 4, First Edition, 2007, ISBN 2-87997-047-4. p.2.
3. THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. **Welding Guide**. Stainless Steel. The Welding Experts. C6.4000, 2003. p2..
4. PECKNER, D.; BERNSTEIN, I. M. **Handbook Of Stainless Steel**, 1977, p.19-31, 19-32, 19-33, 19-34 e 19-35.
5. THE JAMES F. LINCOLN ARC WELDING FOUNDATION. **The Procedure Handbook Of Arc Welding**. fourteenth Edition, 2000. sections 3.1, 5.1-5.4, 7.1.
6. BRANDI, S. D., LENZ G. F. B. **Metalurgia da Soldagem, Tensões Residuais e Controle de Deformação III**. Material de aula da Disciplina SLD 026. Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem, 2012. 57p.
7. OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. The Association for International Technical Promotion/Japan, Rio de Janeiro, RJ, 1982. P.9, 17-19, 21, 33-35, 127-129.
8. WELDING HANDBOOK. **Welding Processes**. Vol.2, 8<sup>th</sup> edition, 1997. chapters 2, 3, 4, 5 e 10.
9. WAINER, E.; BRANDI, S. D., DE MELLO, F. D. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 1992. P.31, 32, 52, 58, 60, 61, 99-101, 133-141, 148, 149, 158-163.

10. ZHANG, Y.; ZHANG, S.; ASSIGNEE: UNIVERSITY OF KENTUCK RESEARCH FOUNDATION. **United States Patent** Number 5.990.446, Lexington, Ky. 1999.
11. ZHANG, Y. M.; PAN, C.; MALE, A. T. **Welding of Austenitic Stainless Steel Using Double Sided Arc Welding Process**. Materials Science and Technology. Vol. 17, n. 10, 2001. Pp. 1280-1284.
12. Y. M. ZHANGH.; S. B. ZHANG. **Double-Sided Arc Welding Increases Weld Joint Penetration**. Welding Journal 77, 1998. pp. 1-9.
13. SILVA, M. F. **Comparação da Deformação entre a Soldagem Convencional e a Soldagem Simultânea 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 a conclusão do curso de Especialização. São Paulo, 2012.
14. MASUBUCHI, K. **Analysis of Welded Structures**; Materials Science and Technology; Vol. 33; First Edition, 1980. p.1-6, 88-98, 108-110, 148, 149, 189-193, 235.
15. WELDING HANDBOOK – **Welding Technology** – Vol.1, 8<sup>th</sup> edition, chapter 7, 1998. p.218-226, 241-244, 261-264.
16. BRANDI, S. D. **Tensões Residuais e Controle da Deformação na Soldagem** - Material de aula da Disciplina SLD 026. Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem, 2012. 32p.
17. SILVEIRA, J. P.; BARROS, S. M. **Tensões e Deformações em Soldagem**. Petrobrás - Petróleo Brasileiro S. A - 1 V, s.d, Capítulos 2 e 3.

18. MASUBUCHI, K.; WRC (WELDING RESEARCH COUNCIL). **Bulletin nº 149**. April 1970. p.18 e 19.
19. INTERNATIONAL STANDARD. **Welding General Tolerances for WELDED CONSTRUCTIONS**. Dimensions for lengths, angles, shapes and positions. ISO 13920, first edition, 1996. p.2-4.
20. SPECIFICATION for **Welding Rods, Electrodes and Filler Metals**. Specification for Stainless Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding. ASME II Parte C; SFA 5.22; AWS specification A5.22-2005. First Edition 2010. p.501-502.
21. WELD-INOX. **Soldas Especiais**. Catálogo de Consumíveis para Soldagem, Diadema, São Paulo, Brasil, maio/2009.