

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**EFEITO DA REFRIGERAÇÃO FORÇADA DA POÇA DE FUSÃO NAS
DISTORÇÕES ANGULARES EM CORDÕES DE SOLDA SOBRE CHAPA DE
AÇO CARBONO**

Autor: Eng^o. Leonardo Horta Miranda

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD

LEONARDO HORTA MIRANDA

**EFEITO DA REFRIGERAÇÃO FORÇADA DA POÇA DE
FUSÃO NAS DISTORÇÕES ANGULARES EM CORDÕES
DE SOLDA SOBRE CHAPA DE AÇO CARBONO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador: Prof. Alexandre Q. Bracarense, PhD.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

Abril de 2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901- Belo Horizonte – MG
Tel: 55 31 3499 5145, Fax: 55 31 3443-3783
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

“Efeito da Refrigeração Forçada da Poça de Fusão nas Distorções Angulares em Cordões de Solda sobre Chapa de Aço Carbono”

Leonardo Horta Miranda

Dissertação submetida a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos à obtenção do título de **“Mestre em Engenharia Mecânica”**, na área de concentração de **“Processos de Fabricação”**.

Dissertação aprovada em: 06 de abril de 2006.

Por:

Prof. Alexandre Queiroz Bracarense

Orientador - PhD - Departamento de Engenharia Mecânica – E.E/UFMG

Prof. Nilton da Silva Maia

Examinador - Doutor - Departamento de Engenharia de Produção Civil, CEFET-MG

Wagner Reis da Costa Campos

Examinador - Doutor - Comissão Nacional de Energia Nuclear, MG

“Se um dia tudo lhe parecer perdido, lembre-se de que você nasceu sem nada, e que tudo que conseguiu foi através de esforços e os esforços nunca se perdem, somente dignificam as pessoas”.

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais e irmãos, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e incentivando.

Ao meu professor e orientador Alexandre Queiroz Bracarense, pelos ensinamentos e sugestões durante o desenvolvimento da dissertação.

Aos senhores Wagner Reis - CDTN, pelo auxílio em macrografias e micrografias de chapas soldadas, Alexandre Faleiro - White Martins pelo fornecimento de gases industriais, Rômél Erwin Souza - Usiminas e à empresa TBM Ltda pelo fornecimento de chapas de aço, Anderson - Oficina Mecânica do Departamento de Química da UFMG, pela utilização da fresadora para usinagem de chapas.

A todos os colegas da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (Carolina, Hélio, Luciana, Eduardo, Carlos, Ezequiel) e Graduação (Álvaro, Paulo, Zanata, Alisson) e Alexandre da empresa Rotech Ltda, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos.

Ao meu amor Aléxia, pelo carinho, paciência e zelo para comigo.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Fico muito grato a todos vocês.

RESUMO

A monitoração da distorção angular em chapa de aço de baixo carbono ASTM A36, por meio de um transdutor linear (laser), possibilitou verificar a influência da geometria do corpo de prova e da refrigeração forçada da poça de fusão com dióxido de carbono em sua magnitude. Foram feitos cordões de solda sobre chapa, engastada em uma das extremidades, utilizou-se o processo de soldagem *FCAW (Flux Cored Arc Welding)* robotizado, sendo mantidos os mesmos parâmetros de soldagem, espessura e material. Na monitoração observou-se que no início da soldagem, a chapa distorce-se no sentido negativo (expansão) e posteriormente começa-se a distorcer no sentido positivo (contração) e algum tempo após o arco elétrico extinguir a distorção foi reduzida até se estabilizar. A dispersão dos resultados indicou que a geometria do corpo de prova tem grande influência nas distorções angulares de chapas soldadas e que a refrigeração forçada da poça de fusão possibilitou uma redução da distorção angular em aproximadamente vinte e cinco por cento. A microestrutura da chapa foi alterada devido ao resfriamento, mas não seus constituintes.

ABSTRACT

The monitoring of the angular distortion in steel plates of low carbon ASTM A36, by means of a linear transducer (laser), turned possible to verify the influence of the geometry of the test piece and the forced refrigeration of the pool of fusion in its magnitude. Were made bead on plate welding, fixed in one of the extremities, was used the process of welding FCAW (Flux Cored Arc Welding) robotic, being kept the same parameters of welding, thickness and material. In the monitoring it was observed that in the beginning of the welding, the plate is distorted in the negative direction (expansion) and later is started to distort it in the positive direction (contraction) and some time after the electric arc to extinguish the distortion was reduced until stabilizing. The dispersion of the results indicated that the geometry test piece had great influence in the angular welded plate distortions and that the forced refrigeration of the pool of fusion turned possible a reduction of the angular distortion in approximately twenty and five percent being that the microstructure was modified due cooling, but not its constituents.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2- OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1- Distorções	
3.1.1- Tipos de distorções	4
3.1.1.1- Flexão longitudinal	4
3.1.1.2- Contração longitudinal	5
3.1.1.3- Distorção rotacional	6
3.1.1.4- Distorção devido à instabilidade	8
3.1.1.5- Contração transversal	8
3.1.1.6- Distorção angular	9
3.1.2- Métodos de redução de distorção em soldagem	12
3.1.3- Métodos de remoção de distorção em soldagem	15
3.1.3.1- Alinhamento de chapas por aquecimento com chama	16
3.1.4- Fluxo de calor em soldagem	18
3.1.5- Processo <i>FCAW</i>	20
3.2- Tensões residuais	22
CAPÍTULO 4- METODOLOGIA	29
4.1- Introdução	29
4.2- Folha para marcação das projeções do laser	29
4.3- Preparação dos corpos de prova	30
4.4- Procedimento de soldagem	33
4.5- Procedimento para preparação da monitoração	37

4.6- Procedimento para preparação da monitoração angular	39
CAPÍTULO 5- RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
CAPÍTULO 6- CONCLUSÕES	58
CAPÍTULO 7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXOS	64

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Flexão longitudinal em uma solda de filete de uma viga de perfil T	5
FIGURA 3.2 - Contração longitudinal em uma junta de topo	6
FIGURA 3.3 - Distorção rotacional em uma junta de topo utilizando processo <i>SMAW</i>	7
FIGURA 3.4 - Distorção rotacional em um junta de topo utilizando processo <i>SAW</i>	7
FIGURA 3.5 - Distorção devido à instabilidade	8
FIGURA 3.6 - Contração transversal em uma junta de topo	9
FIGURA 3.7 - Distorção angular	10
FIGURA 3.8 - Representação esquemática da evolução da distorção angular em um corpo de prova engastado em uma extremidade e livre na outra, com 160mm de largura e 80mm de comprimento e fluxo de calor bidimensional	11
FIGURA 3.9 - Minimização da distorção por flambagem através do método <i>DC-LNSD (Dynamicall Control - Low Stress No Distortion)</i>	13
FIGURA 3.10 - Mecanismos de alinhamento da junta por aquecimento local	14
FIGURA 3.11 - Sistemas de aquecimento e resfriamento local utilizado. Sistema de aquecimento (a) e sistema de resfriamento (b).	15
FIGURA 3.12 - Métodos de remoção de distorção em soldagem	16
FIGURA 3.13 - Ciclo térmico de soldagem	18
FIGURA 3.14 - Perfil térmico em um material soldado	20
FIGURA 3.15- Processo <i>FCAW</i>	21
FIGURA 3.16- Variação idealizada da distribuição das tensões residuais que ocorrem paralelamente ao cordão de solda	24
FIGURA 3.17- Distribuição de temperatura e tensões	25
(1)- Cordão de solda	
(2)- Variação de temperatura	
(3)- Variação da tensão transversal	
FIGURA 4.1- Folha de papel milimetrado para monitoração da projeção do feixe de laser	30
FIGURA 4.2- Usinagem das chapas de formato de “halter”	30
FIGURA 4.3- Pesagem das chapas de formato de “halter”	31

FIGURA 4.4- Pesagem das chapas de formato retangular	31
FIGURA 4.5 - Corpo de prova fixado a uma bancada e o dispositivo para monitoração das distorções angulares (laser)	32
FIGURA 4.6 - Geometria dos corpos de prova utilizados nos testes experimentais de 1 a 10	34
FIGURA 4.7 - Geometria dos corpos de prova utilizados nos testes experimentais 11 a 30	35
FIGURA 4.8 - Montagem experimental dos testes 21 a 30	37
FIGURA 4.9 - Montagem experimental para monitoração das distorções angulares	39
FIGURA 4.10 - Relações trigonométricas para obtenção da distorção angular	40
FIGURA 5.1- Evolução das distorções angulares em função do tempo (Chapas retangulares 1 a 10)	42
FIGURA 5.2 - Evolução das médias das distorções angulares e a respectiva média do dobro do desvio padrão experimental em função do tempo (Chapas retangulares)	43
FIGURA 5.3 - Macrografia da chapa retangular com um aumento de 5x	44
FIGURA 5.4 - Micrografia da chapa retangular (zona termicamente afetada)	44
FIGURA 5.5 - Micrografia da chapa retangular (linha de fusão)	45
FIGURA 5.6 - Micrografia da chapa retangular (metal de solda)	45
FIGURA 5.7 - Evolução das distorções angulares em função do tempo (Chapas “ <i>halter</i> ” 1 a 10)	47
FIGURA 5.8 - Evolução das médias das distorções angulares e a respectiva média do dobro do desvio padrão experimental em função do tempo (Chapas “ <i>halter</i> ”)	48
FIGURA 5.9 - Macrografia da chapa “ <i>halter</i> ” com um aumento de 5,2x	49
FIGURA 5.10 - Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” (zona termicamente afetada)	49
FIGURA 5.11- Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” (linha fundida)	50
FIGURA 5.12 - Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” (metal de solda)	50
FIGURA 5.13 - Evolução das distorções angulares em função do tempo (Chapas “ <i>halter</i> ” com refrigeração 1 a 10)	51
FIGURA 5.14 - Evolução das médias das distorções angulares e a respectiva média do dobro do desvio padrão experimental em função do tempo (Chapas “ <i>halter</i> ” com refrigeração)	52

FIGURA 5.15 - Macrografia da chapa “ <i>halter</i> ” com refrigeração com aumento de 6,5x	53
FIGURA 5.16- Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” com refrigeração (zona termicamente afetada)	54
FIGURA 5.17 - Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” com refrigeração (linha de fusão)	54
FIGURA 5.18 - Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” com refrigeração (metal de solda)	55
Anexo (Figura 1A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 1)	64
Anexo (Figura 2A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 2)	64
Anexo (Figura 3A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 3)	65
Anexo (Figura 4A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 4)	65
Anexo (Figura 5A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 5)	66
Anexo (Figura 6A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 6)	66
Anexo (Figura 7A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 7)	67
Anexo (Figura 8A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 8)	67
Anexo (Figura 9A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 9)	68
Anexo (Figura 10A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa retangular 10)	68
Anexo (Figura 11A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 1)	69

Anexo (Figura 12A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 2)	69
Anexo (Figura 13A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 3)	70
Anexo (Figura 14A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 4)	70
Anexo (Figura 15A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 5)	71
Anexo (Figura 16A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 6)	71
Anexo (Figura 17A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 7)	72
Anexo (Figura 18A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 8)	72
Anexo (Figura 19A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 9)	73
Anexo (Figura 20A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” 10)	73
Anexo (Figura 21A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 1)	74
Anexo (Figura 22A)- Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 2)	74
Anexo (Figura 23A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 3)	75
Anexo (Figura 24A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 4)	75
Anexo (Figura 25A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 5)	76
Anexo (Figura 26A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 6)	76

Anexo (Figura 27A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 7)	77
Anexo (Figura 28A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 8)	77
Anexo (Figura 29A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 9)	78
Anexo (Figura 30A) - Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapa “ <i>halter</i> ” refrigerado 10)	78
Anexo (Figura 31A) - Micrografia da chapa retangular 2 (metal de solda)	79
Anexo (Figura 32A) - Micrografia da chapa retangular 3 (metal de solda)	79
Anexo (Figura 33A) - Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” 2 (metal de solda)	79
Anexo (Figura 34A) - Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” 3 (metal de solda)	79
Anexo (Figura 35A) - Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” com refrigeração 2 (metal de solda)	81
Anexo (Figura 36A) - Micrografia da chapa “ <i>halter</i> ” com refrigeração 3 (metal de solda)	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1- Classificação das técnicas de medição de tensões residuais	27
TABELA 4.1- Parâmetros de soldagem	33
TABELA 4.2- Dados relativos aos testes 1 a 10	34
TABELA 4.3- Dados relativos aos testes 11 teste 30	36

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- α - Coeficiente linear de expansão térmica do material [$1/^\circ\text{C}$];
- η - Eficiência do processo de soldagem (adimensional);
- v - Velocidade de soldagem [mm/s];
- ΔL - Variação do comprimento da chapa [mm];
- σ_x, σ_L - Tensão residual longitudinal [kN/mm^2];
- σ_y, σ_t - Tensão residual transversal [kN/mm^2];
- σ_z - Tensão residual na direção da espessura [kN/mm^2];
- I - Corrente de soldagem [Ampère];
- L_0 - Comprimento inicial da chapa [mm];
- LR - Comprimento do corpo de prova engastado em [mm];
- LS - Distância do início do cordão de solda a extremidade do corpo de prova [mm];
- q - Aporte térmico [J/mm];
- ZTA - Zona termicamente afetada;
- s - segundos;
- t - Tempo [s];
- t_0 - Tempo inicial [s];
- Δt - Taxa de resfriamento, tempo necessário para um determinado ponto da chapa resfriar de uma temperatura (T_1) a outra (T_2), em [s];
- T - Temperatura da chapa [$^\circ\text{C}$];
- T_0 - Temperatura ambiente [$^\circ\text{C}$];
- ΔT - Variação de temperatura [$^\circ\text{C}$];
- T_m - Temperatura de fusão do aço carbono [$^\circ\text{C}$];
- T_p - Temperatura de pico do material [$^\circ\text{C}$];
- T_c - Temperatura crítica do material [$^\circ\text{C}$];
- t_p - Tempo de permanência [s];
- V - Tensão do arco elétrico [Volt];
- X - Largura do corpo de prova [mm];
- Y - Comprimento do corpo de prova [mm];

Stick out - Distância entre o bico da tocha de soldagem e a peça de trabalho [mm];

AWS - *American Welding Society*;

FCAW - *Flux-Cored Arc Welding*;

GMAW - *Gas Metal Arc Welding*;

GTAW- *Gas Tungsten Arc Welding*;

SAW- *Submerged Arc Welding*;

SMAW - *Shielded Metal Arc Welding*;

DC LNSD - *Dynamically controlled Low Stress No Distortion*;

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais.

ESAB - Empresa fabricante de consumíveis de soldagem.

1- INTRODUÇÃO

Atualmente a soldagem é aplicada não somente a metais. Um conceito antigo a definiu como sendo, “união de metais por fusão”, entretanto hoje já existem processos que as peças se unem sem se fundir. Os processos de soldagem consistem na deposição do material sobre uma superfície ou uma junta para a união de peças ou recuperação daquelas desgastadas. Os processos de corte ou recobrimento possuem características bem semelhantes aos de soldagem, em relação aos aspectos térmicos (FELIZARDO, 1997).

O campo de pesquisa em relação à soldagem, diariamente se amplia, pois surgem novas ligas de materiais, os quais necessitam serem unidos. Estes estudos objetivam o aperfeiçoamento dos equipamentos e consumíveis de soldagem e ainda a diminuição dos efeitos térmicos provocados pelos processos de soldagem, buscando os melhores parâmetros de soldagem para assegurar a qualidade do cordão de solda e do produto final.

Outra área que revoluciona e traz grande avanço tecnológico à soldagem é a robótica. Ela torna o processo muito mais produtivo, ou seja, maior número de peças produzidas por unidade de tempo, além de garantir maior repetitividade das soldas e o produto final possuir melhor acabamento comparando-se a processos manuais.

Processos manuais ou automatizados devem buscar parâmetros de soldagem que proporcionem uma diminuição dos efeitos térmicos provocados pela soldagem, tais como: distorções e tensões residuais. Os parâmetros de soldagem devem ser monitorados e controlados durante o processo.

Uma das maneiras de minimizar a distorção é o resfriamento da poça de fusão durante a soldagem utilizando dióxido de carbono, o qual é a proposta desse trabalho.

O dióxido de carbono tem enorme aplicação em soldagem como gás de proteção e é o gás que trabalha à menor temperatura funcionando como refrigerante que não gera defeitos ou

trincas nas soldas e em termos de custos é um dos mais baixos do mercado, tornando assim muito interessante a sua aplicação na soldagem.

Quando se tem uma chapa distorcida após a soldagem, o re-trabalho para voltá-la a forma requerida pelo projeto é enorme e agrega alto custo e tempo.

A distorção é um problema antigo em soldagem devido ao aporte térmico introduzido pelo processo. Existem algumas técnicas para minimizá-la, tais como: pré-deformação, pré-aquecimento, seqüências de soldagem e travamento das peças.

A indústria opera com curtos prazos de entregas dos produtos acabados e alta produtividade devido a grande concorrência do mercado. Adotar uma metodologia ou uma especificação do procedimento de soldagem nem sempre é a prioridade nas fábricas, o que torna o problema da distorção muito comum. O processo e os parâmetros de soldagem e a sua seqüência influenciam no nível da distorção (LUCAS et al., 1998).

Uma modelagem matemática que permita simular e prever tipos e níveis de distorção, assim como sua evolução, possibilitará melhores resultados quanto à distorção em soldagem.

O capítulo 2 aborda os principais objetivos do trabalho. No capítulo 3, tem-se uma revisão bibliográfica relacionada a distorções, tensões residuais, fluxo de calor em soldagem e o processo de soldagem *FCAW (Flux-Cored Arc Welding)*. O capítulo 4 aborda a metodologia utilizada nos testes experimentais. No capítulo 5, tem-se os resultados e as discussões dos testes experimentais. No capítulo 6 estão as conclusões do trabalho. No capítulo 7 estão as propostas para trabalhos futuros.

2- OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi verificar a evolução da distorção angular em chapas de aço de baixo carbono, *ASTM A-36*, com diferentes geometrias e utilizando ou não refrigeração forçada da poça de fusão com dióxido de carbono. Para tanto, foram mantidos os parâmetros de soldagem, o material e a espessura.

1- INTRODUÇÃO

Atualmente a soldagem é aplicada não somente a metais. Um conceito antigo a definiu como sendo, “união de metais por fusão”, entretanto hoje já existem processos que as peças se unem sem se fundir. Os processos de soldagem consistem na deposição do material sobre uma superfície ou uma junta para a união de peças ou recuperação daquelas desgastadas. Os processos de corte ou recobrimento possuem características bem semelhantes aos de soldagem, em relação aos aspectos térmicos (FELIZARDO, 1997).

O campo de pesquisa em relação à soldagem, diariamente se amplia, pois surgem novas ligas de materiais, os quais necessitam serem unidos. Estes estudos objetivam o aperfeiçoamento dos equipamentos e consumíveis de soldagem e ainda a diminuição dos efeitos térmicos provocados pelos processos de soldagem, buscando os melhores parâmetros de soldagem para assegurar a qualidade do cordão de solda e do produto final.

Outra área que revoluciona e traz grande avanço tecnológico à soldagem é a robótica. Ela torna o processo muito mais produtivo, ou seja, maior número de peças produzidas por unidade de tempo, além de garantir maior repetitividade das soldas e o produto final possuir melhor acabamento comparando-se a processos manuais.

Processos manuais ou automatizados devem buscar parâmetros de soldagem que proporcionem uma diminuição dos efeitos térmicos provocados pela soldagem, tais como: distorções e tensões residuais. Os parâmetros de soldagem devem ser monitorados e controlados durante o processo.

Uma das maneiras de minimizar a distorção é o resfriamento da poça de fusão durante a soldagem utilizando dióxido de carbono, o qual é a proposta desse trabalho.

O dióxido de carbono tem enorme aplicação em soldagem como gás de proteção e é o gás que trabalha à menor temperatura funcionando como refrigerante que não gera defeitos ou

trincas nas soldas e em termos de custos é um dos mais baixos do mercado, tornando assim muito interessante a sua aplicação na soldagem.

Quando se tem uma chapa distorcida após a soldagem, o re-trabalho para voltá-la a forma requerida pelo projeto é enorme e agrega alto custo e tempo.

A distorção é um problema antigo em soldagem devido ao aporte térmico introduzido pelo processo. Existem algumas técnicas para minimizá-la, tais como: pré-deformação, pré-aquecimento, seqüências de soldagem e travamento das peças.

A indústria opera com curtos prazos de entregas dos produtos acabados e alta produtividade devido a grande concorrência do mercado. Adotar uma metodologia ou uma especificação do procedimento de soldagem nem sempre é a prioridade nas fábricas, o que torna o problema da distorção muito comum. O processo e os parâmetros de soldagem e a sua seqüência influenciam no nível da distorção (LUCAS et al., 1998).

Uma modelagem matemática que permita simular e prever tipos e níveis de distorção, assim como sua evolução, possibilitará melhores resultados quanto à distorção em soldagem.

O capítulo 2 aborda os principais objetivos do trabalho. No capítulo 3, tem-se uma revisão bibliográfica relacionada a distorções, tensões residuais, fluxo de calor em soldagem e o processo de soldagem *FCAW (Flux-Cored Arc Welding)*. O capítulo 4 aborda a metodologia utilizada nos testes experimentais. No capítulo 5, tem-se os resultados e as discussões dos testes experimentais. No capítulo 6 estão as conclusões do trabalho. No capítulo 7 estão as propostas para trabalhos futuros.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- DISTORÇÕES

Durante o aquecimento e resfriamento no ciclo de soldagem, deformações térmicas ocorrem no metal de solda e no metal de base em regiões próximas à solda. As deformações produzidas durante o aquecimento são acompanhadas por compressão plástica. As tensões resultantes dessas deformações combinam e reagem para a produção de forças internas que causam flexão, flambagem e rotação. Estes deslocamentos são chamados de distorção (Masubuchi, 1980).

Quando um material é aquecido, suas dimensões aumentam proporcionalmente à variação de sua temperatura. Sendo essa variação expressa por:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T \text{ (Equação 1);}$$

Onde ΔL é a variação de comprimento, L_0 é o comprimento inicial e α é o coeficiente de dilatação térmica linear do material. Se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder expandir e contrair livremente durante o ciclo térmico, distorções e tensões residuais poderão surgir (Modenesi, 2001).

3.1.1 - Tipos de distorções

3.1.1.1 - Flexão longitudinal

A contração longitudinal do metal de solda induz momentos de flexão, resultando em distorção longitudinal da estrutura, quando a linha de solda não coincide com o eixo ou linha neutra da estrutura, como apresentado na figura 3.1. Este tipo de distorção ocorre principalmente quando são fabricadas vigas de formato I ou T.

Sasayama et al., 1955, pesquisou sobre a distorção longitudinal em soldas de várias vigas I ou T de aço baixo carbono. Ele percebeu que nas vigas T a deformação aumenta gradualmente com o progresso da soldagem, já em vigas I ele notou que a deformação

aumenta com a soldagem do filete da parte inferior da estrutura e diminui com a soldagem de filete do lado superior. A deformação devido à soldagem desse segundo filete é geralmente menor que aquela do primeiro causando alguma deformação residual permanente quando o peso do depósito do metal de solda de ambos filetes são iguais e a geometria da junta é simétrica. Isto ocorre porque a área resistiva efetiva da junta difere-se entre as duas, a junta superior não restringe efetivamente a deformação durante a soldagem do lado inferior do filete, sendo que a junta superior é somente uma soldagem temporária para a chapa vertical ou alma, mas ambas juntas efetivamente restringem a soldagem do lado superior do filete, já que o flange inferior já está soldado a alma.

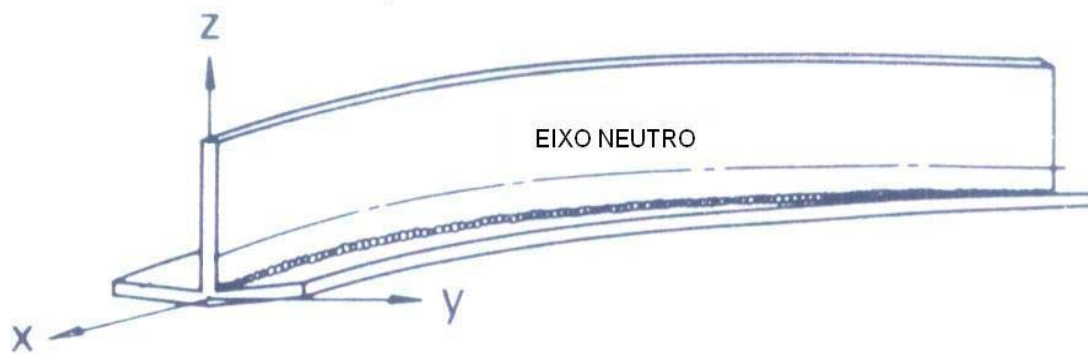


FIGURA 3.1- Flexão longitudinal em uma solda de filete de uma viga de perfil T (AWS, 1987).

3.1.1.2 - Contração longitudinal

A contração longitudinal como apresentado na figura 3.2, ocorre ao longo do cordão de solda e pode-se dizer que ela é muito menor que a contração transversal, pois o próprio metal de base funciona como agente restritivo à distorção. Guyot, 1947, pesquisou sobre contração longitudinal em soldas de filete de aço carbono, ele achava que as contrações

longitudinais eram primeiramente uma função das seções transversais das juntas e que as chapas mais espessas e mais largas restringiam essa contração.

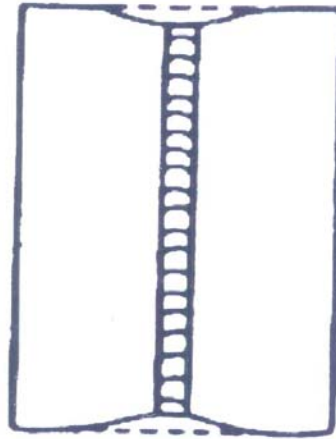


FIGURA 3.2- Contração longitudinal em uma junta de topo
(Okumura e Taniguchi, 1982).

3.1.1.3 - Distorção rotacional

A distorção rotacional é afetada pelo aporte térmico e pela velocidade de soldagem (Kihara et al., 1959). Quando aços de baixo carbono são utilizados e são soldados com eletrodos revestidos processo *SMAW* (*Shielded Metal Arc Welding*) e uma baixa velocidade de soldagem a porção não soldada da junta à frente da poça de fusão tende-se a fechar, como apresentado na figura 3.3. Agora, quando utilizamos o processo a arco submerso *SAW* (*Submerged Arc Welding*), a porção à frente da poça de fusão tende-se a abrir, pois sua velocidade de soldagem é alta, como apresentado na figura 3.4. Isto significa que as restrições feitas por soldas de ponteamto deverão ter dimensão adequada para resistir às tensões causadas pela distorção rotacional.

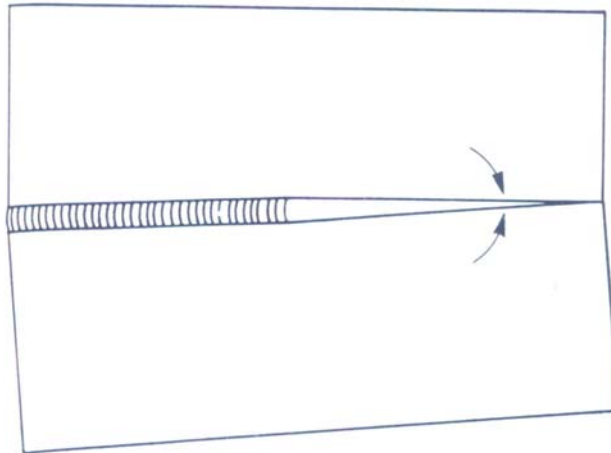


FIGURA 3.3- Distorção rotacional em uma junta de topo utilizando processo *SMAW* (AWS, 1987).

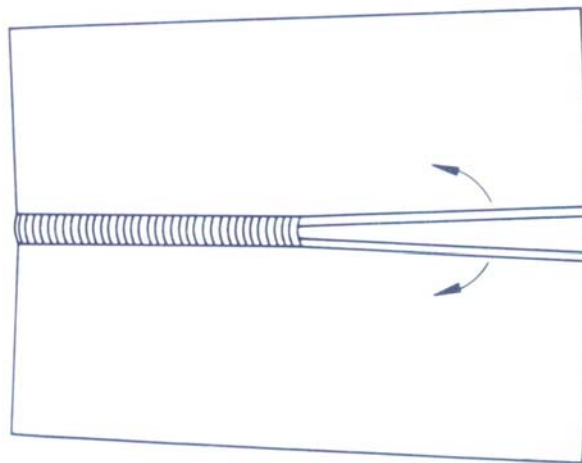


FIGURA 3.4 - Distorção rotacional em um junta de topo utilizando processo *SAW* (AWS, 1987).

3.1.1.4 - Distorção devido à instabilidade

Quando chapas finas são soldadas, tensões compressivas residuais ocorrem em áreas distantes da solda e causam flambagem como apresentado na figura 3.5. A flambagem ocorre quando o comprimento da amostra excede o comprimento crítico para uma determinada espessura em uma determinada amostra. Em estudos de distorções em soldagem em estruturas de chapas finas, é importante determinar se a distorção está sendo produzida por flambagem ou por flexão. A flambagem difere da flexão em dois aspectos:

- A quantidade de deformação é muito maior que na flexão;
- Há mais que uma forma de deformação estável.

Já que a quantidade de deformação é maior na flambagem, o melhor caminho para evitá-la é uma seleção apropriada de parâmetros estruturais tais como: espessura da chapa, espaçamento de enrijecedores e parâmetros de soldagem.



FIGURA 3.5- Distorção devido à instabilidade (AWS, 1987).

3.1.1.5 - Contração transversal

Os mecanismos de contração transversal tem sido estudados por muitos pesquisadores (Naka, 1950; Matsui, 1964; Iwamura, 1974), também conduziram um estudo analítico e experimental dos mecanismos de contração transversal em soldas de topo em alumínio. A

maior contribuição dessas análises matemáticas foi provar que a maior porção de contração transversal de soldas de topo é devido à contração do metal de base. Quando o metal de solda solidifica, o metal de base expandido contrai, sendo que grande parte dessa contração é por contração transversal, contração do próprio metal de solda é muito pequena, aproximadamente dez por cento da contração total da estrutura.

A quantidade de contração transversal que ocorre em soldas é afetada pelo grau de restrições aplicados a junta soldada e a distorção rotacional é um dos tipos de distorções que causam contração transversal como apresentado na figura 3.6, quando a soldagem é conduzida progressivamente do fim de uma junta até a outra, sendo que a porção não soldada das juntas move-se fechando ou abrindo.

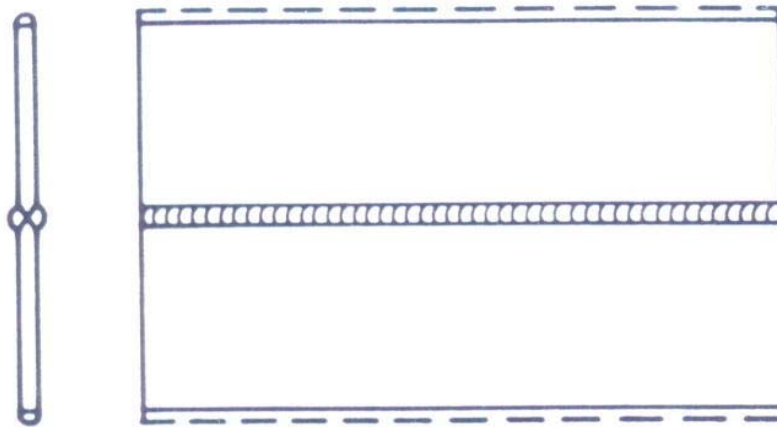


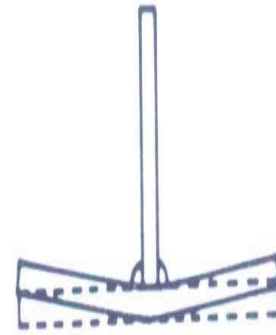
FIGURA 3.6 - Contração transversal em uma junta de topo (AWS, 1987).

3.1.1.6 - Distorção angular

A distorção angular apresentada na figura 3.7 é gerada pelas diferenças de temperatura entre as faces superior e inferior do cordão, que provocam variações nos valores da magnitude de contração no sentido da espessura da chapa (AWS, 1991). Em chapas mais espessas a distorção angular é pequena, pois o próprio metal de base funcionará como restrição. Em soldas de topo, este tipo de distorção é muito freqüente devido à contração transversal não ser uniforme na direção da espessura.



(1)



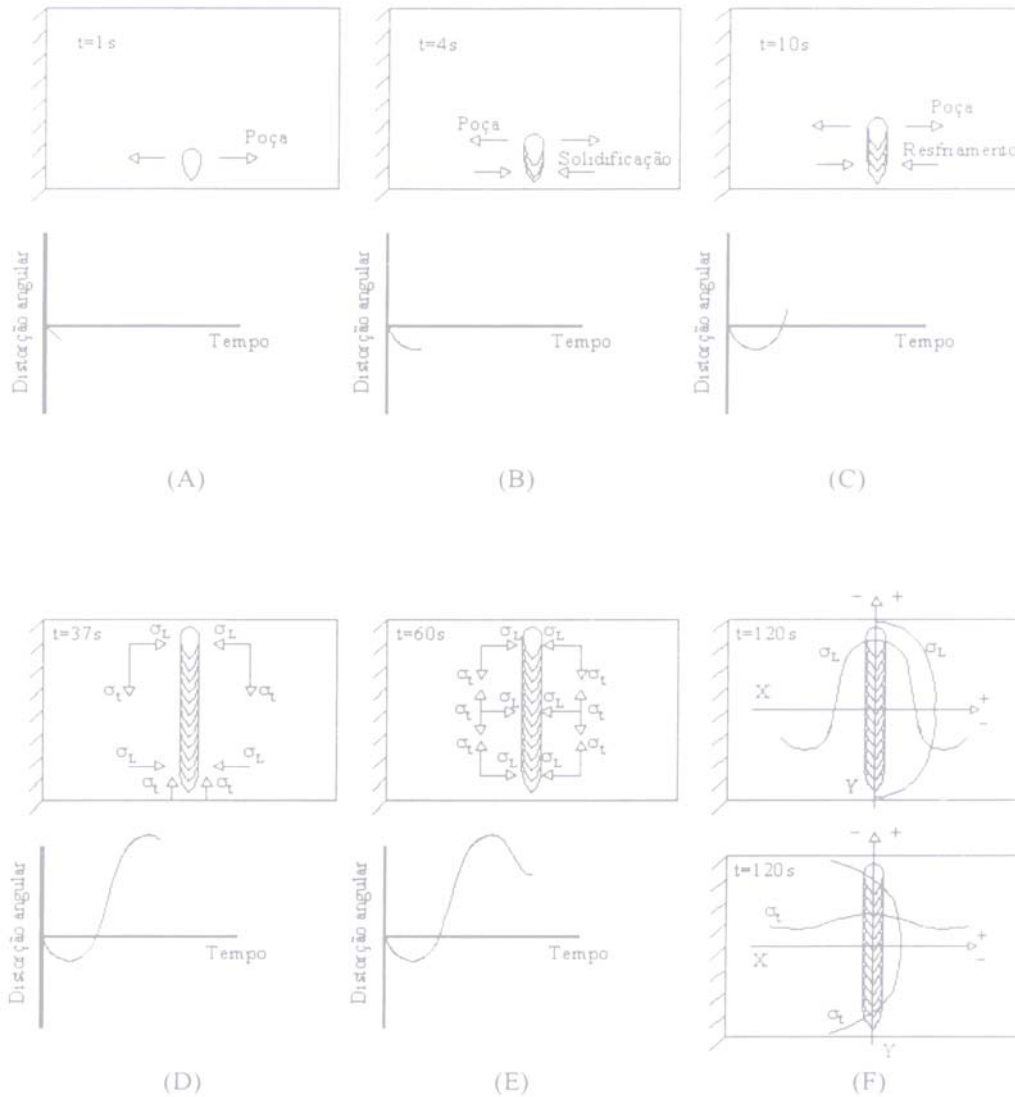
(2)

(1) Distorção angular em uma junta de topo

(2) Distorção angular em uma solda de filete

FIGURA 3.7- Distorção angular (AWS, 1987).

Em trabalhos anteriores no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (Rogana, 1999), fez-se o monitoramento das distorções angulares em aços de baixo carbono utilizando-se sensores de deslocamento (lasers), engastando uma das extremidades das chapas e deixando a outra livre, foram feitos cordões de solda sobre chapa, paralelos à região engastada. A evolução da distorção angular assim como as tensões térmicas longitudinais e transversais geradas no corpo de prova e a poça de fusão e o seu respectivo aquecimento, solidificação e resfriamento em relação ao tempo, foram observadas e tiveram o comportamento, como apresentado na figura 3.8.



Nota: 1) σ_L : Tensão longitudinal;
 2) σ_t : Tensão transversal.

FIGURA 3.8 - Representação esquemática da evolução da distorção angular em um corpo de prova engastado em uma extremidade e livre na outra, com 160mm de largura e 80mm de comprimento e fluxo de calor bidimensional (Rogana, 1999).

Rogana, 1999, observou que no início da soldagem a chapa se expande (distorção angular negativa) devido a tensões térmicas de compressão originadas pelo arco elétrico sobre a

chapa, formando assim a poça de fusão, como apresentado nas figuras 3.8 (a) e (b). Após aproximadamente 4s, a parte soldada já está solidificada e começa a se resfriar produzindo tensões térmicas de tração que superam às tensões térmicas de compressão da poça de fusão e a chapa se contrai (distorção angular positiva), isto ocorre até aproximadamente o término da soldagem como apresentado na figura 3.8 (c). Após a extinção do arco elétrico, ocorre a solidificação da cratera de solda e posteriormente seu resfriamento produzindo um estado de tensões térmicas que reduz a distorção angular e ela é estabilizada em torno de 60s.

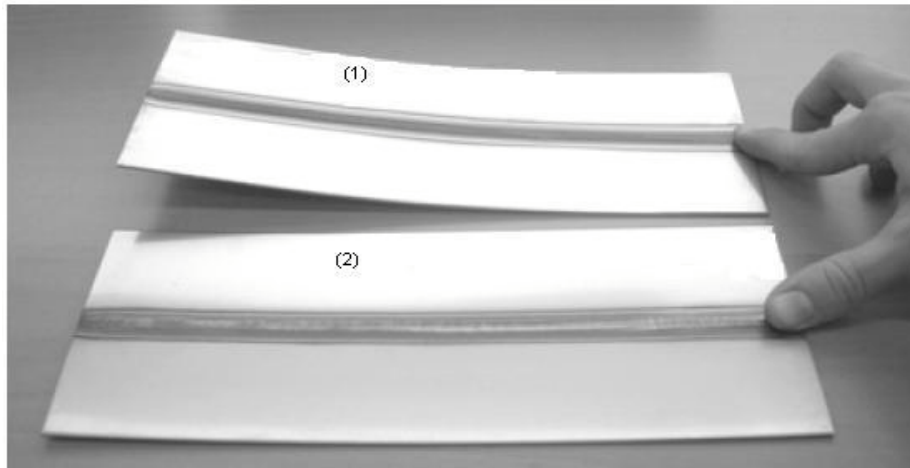
Restrições externas têm sido amplamente conhecidas como técnicas para redução da distorção angular em estruturas soldadas. Em vasos de pressão ou tubos de grande escala, pré-expansão tem sido utilizada para redução da contração radial. No caso de juntas em T, isto também foi verificado, tendo efeito significativo na redução da distorção angular (Conrardy e Dull, 1997).

Jung et al., 2004, também pesquisaram sobre distorções angulares em soldas de filete de vigas T. Nelas foram utilizadas restrições, seus resultados concluíram que, quanto menor a distância do engastamento da viga horizontal até o cordão de solda menores serão as distorções angulares.

3.1.2 - Métodos de redução de distorção em soldagem

Foi proposto por (van der Aa et al., 2005) um método chamado *DC-LNSD (Dynamically controlled low stress-no-distortion)* para diminuir a distorção em soldagem. Este método foi primeiramente proposto por (Guan et al., 1994). Nesta técnica, a fonte de calor é seguida por um resfriamento traseiro a uma curta distância da tocha de soldagem. O objetivo seria controlar a flambagem da peça. Quando chapas finas e longas são soldadas e suas tensões de compressão excedem a sua tensão crítica, elas distorcem. Quando um resfriamento traseiro é aplicado, as tensões longitudinais paralelas às direções de soldagem, mudam drasticamente a distribuição de tensões residuais. Sendo assim, as tensões não

excedem o nível de tensão de flambagem crítica da peça e a flambagem é eliminada, como representado na figura 3.9 (2).



(1) Soldagem convencional

(2) Soldagem com resfriamento traseiro

FIGURA 3.9- Minimização da distorção por flambagem através do método *DC-LNSD* - *Dinamically controlled low stress-no-distortion* (van der Aa et al., 2005), modificada.

Utilizou-se chapas de aço inoxidável *AISI 316L*, com dimensões de 250x100x1,5mm, soldadas com o processo *GTAW* (*Gas Tungsten Arc Welding*), utilizando os mesmos parâmetros de soldagem. Esse resfriamento traseiro utilizado na segunda chapa consistiu de um jato de dióxido de carbono liquefeito que sob expansão se solidifica. Este jato foi acoplado a uma distância de 25mm da tocha, os resultados desse resfriamento são chapas planas e livres de distorções por flambagem.

Chang, 1988; Park, 1988; Miyachi,1989, fizeram experiências e estudos analíticos para reduzir as forças que agem em soldas de ponteamto durante o preenchimento de juntas em soldas de topo. A idéia básica utilizada por Chang foi reduzir a abertura da junta ou a distorção rotacional por aquecimento local como apresentado na figura 3.10 (b).

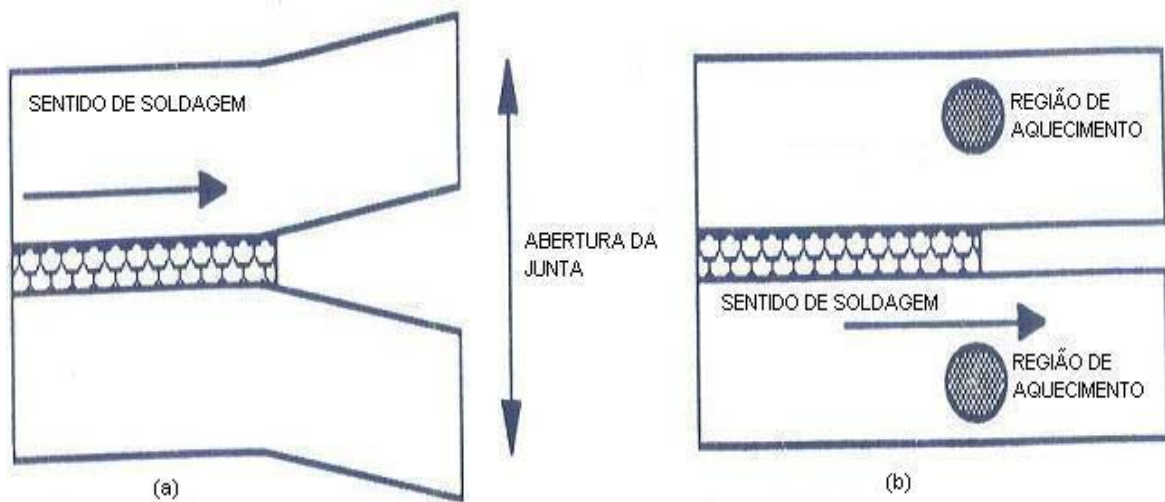


FIGURA 3.10 - Mecanismos de alinhamento da junta por aquecimento local Masubuchi, 1991 (modificada).

Foram montadas duas tochas oxi-acetilênicas no cabeçote de soldagem, até que o sistema de aquecimento local pudesse mover em conjunto com o arco elétrico. A posição do sistema de aquecimento, poderia ser ajustado nas três direções x, y e z, como apresentado na figura 3.11 (a). Este sistema poderia ser utilizado principalmente para controlar o alinhamento da junta ou a distorção rotacional em aços soldáveis. A figura 3.11 (b) apresenta esquematicamente o sistema de refrigeração, ele foi utilizado principalmente para controlar desalinhamento de juntas em soldas de alumínio.

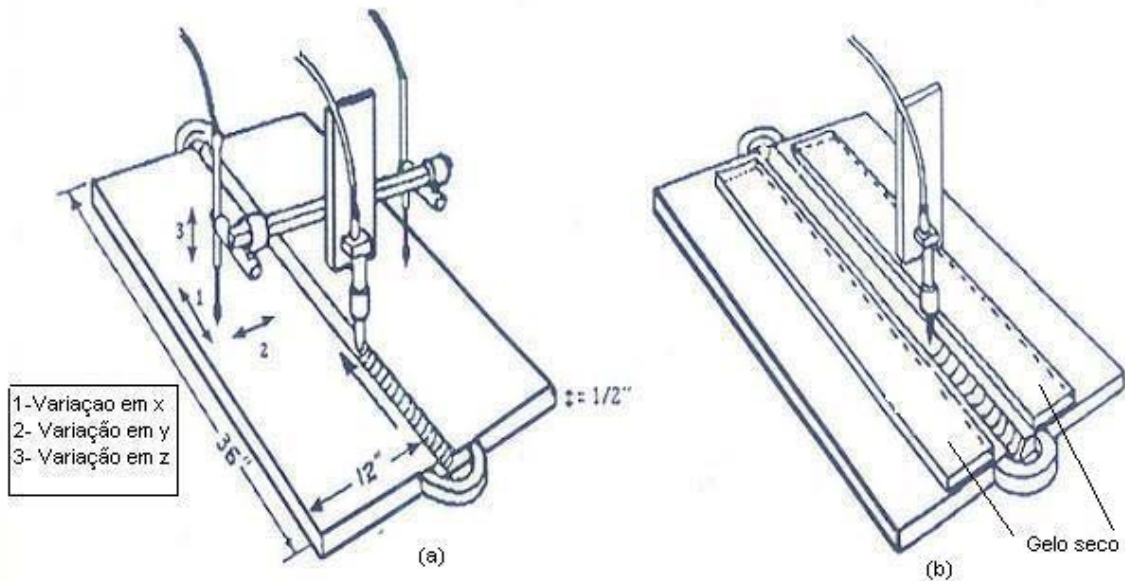


FIGURA 3.11 – Sistemas de aquecimento e resfriamento local utilizado. Sistema de aquecimento (a) e sistema de resfriamento (b)
 Masubuchi, 1991 (modificada).

Restrições e montagem costas a costas podem reduzir as distorções em chapas de alumínio e podem ser combinadas com pré-flexão (Anderson, 2003).

3.1.3- Métodos de remoção da distorção em soldagem

A distorção freqüentemente excede os níveis de tolerância aceitáveis, sendo que ela pode ser produzida durante serviço (por meio de colisão, por exemplo), isto torna necessário utilizar métodos de remoção da distorção. Existem alguns métodos de redução da distorção em uso regular, um dos métodos será discutido na seção 3.1.3.1.

3.1.3.1- Alinhamento de chapas por aquecimento com chama

A técnica mais comum de remoção de distorção em soldagem é aquecer a chapa por chama em pontos seleccionados ou ao longo de certas linhas e então resfriar com água ou ar. Algumas chapas são aquecidas e forjadas, uma técnica que requer muita habilidade intuitiva por parte do soldador, já que há pouca informação científica, analítica ou experimental disponível em literaturas, quando este tratamento é requerido. A figura 3.12 ilustra os métodos de alinhamento por chama e posteriormente suas definições.

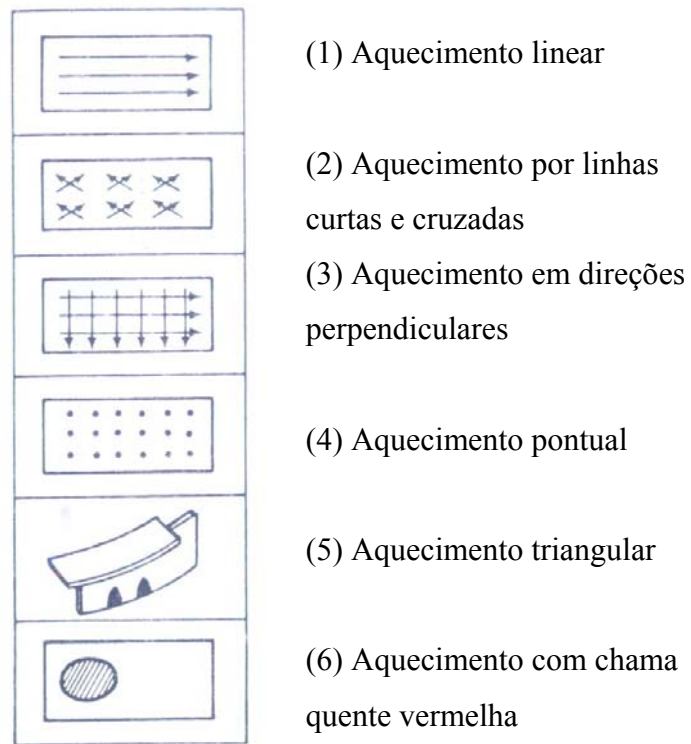


FIGURA 3.12- Métodos de remoção de distorção em soldagem
Masubuchi, 1980 (modificada).

(1) Aquecimento linear - Em uma linha de aquecimento, o calor da tocha é aplicado ao longo de uma linha ou configuração de linhas paralelas. Este método é frequentemente

utilizado para remover distorção angular produzida por solda de filete, aquecimento linear pode também ser usado como um método para chapas flexionadas. Muitos pesquisadores têm estudado linha de aquecimento de contração e mecanismos de distorção (Johnson, 1971, Hashimoto e Fujishiro, 1959, Satoh et al., 1969).

(2) Aquecimento por duas linhas curtas e cruzadas - O calor é aplicado ao longo dessas linhas curtas e cruzadas. Este método está entre o aquecimento linear e o aquecimento pontual. Já que a contração e a distorção angular ocorrem em duas direções, este método produz efeitos uniformes removendo a distorção.

(3) Aquecimento em direções perpendiculares - Este método é freqüentemente utilizado para remover distorções severas (Masubuchi, 1980).

(4) Aquecimento por pontos - É amplamente utilizado para remover distorções, especialmente em chapas estruturais finas.

(5) Aquecimento triangular - Calor é aplicado de uma forma triangular em uma determinada área. Este método é utilizado para remover distorção por flexão em vigas.

(6) Aquecimento com chama quente - vermelha - Quando ocorre uma distorção severa (Masubuchi, 1980) em uma área localizada, poderá ser necessário um aquecimento a altas temperaturas dessa região e forjamento por martelamento.

Durante muitos anos, tentativas tem sido feitas para desenvolver novas técnicas de remoção de distorção (Duffy, 1970), tais como: técnicas de alívio de tensão por oscilações ou vibrações e técnicas de forjamento eletromagnético.

3.1.4 - Fluxo de calor em soldagem

O calor aplicado do arco de soldagem produz complexos ciclos térmicos na soldagem como apresentado na figura 3.13 e estes causam mudanças nas microestruturas da zona termicamente afetada, causam tensões térmicas transientes e movimento de metais, o resultado é a geração de tensões residuais e distorções no produto final (Masubuchi, 1980).

São características importantes do ciclo térmico de soldagem:

- (1) Temperatura de pico (T_p), temperatura máxima atingida no ponto. Quanto maior a distância do ponto em relação à linha central do cordão de solda menor será a temperatura de pico.
- (2) Tempo de permanência (t_p), tempo em que o ponto fica submetido a temperaturas superiores a uma temperatura crítica (T_c) - temperatura mínima para que uma determinada alteração, por exemplo microestrutural, possa ocorrer;
- (3) Taxa de resfriamento - definida pelo tempo necessário (Δt) para o ponto resfriar de uma temperatura (T_1) a outra (T_2).

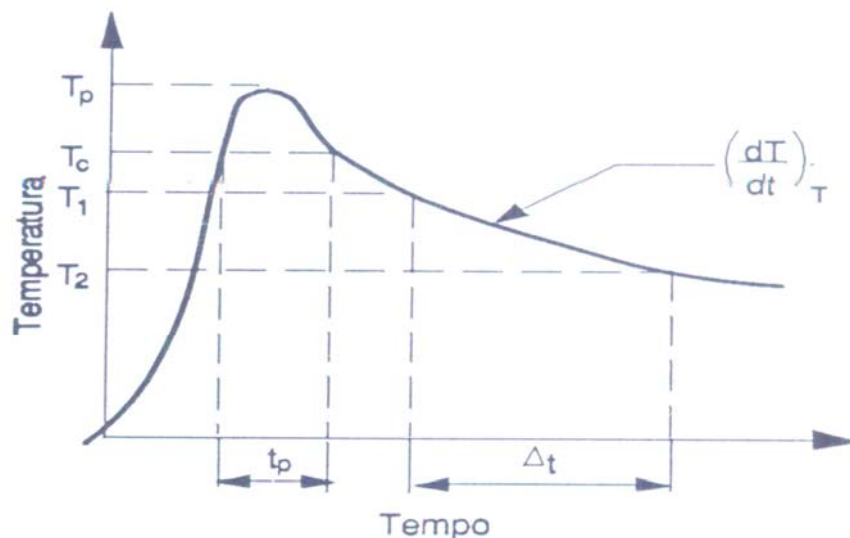


FIGURA 3.13 - Ciclo térmico de soldagem (Marques, 1991).

O calor gerado pelo arco elétrico de soldagem é dado pelo:

- (1) Calor gerado pela potência elétrica dada pelo arco de soldagem, que é o produto da tensão do arco elétrico com a corrente elétrica do processo;
- (2) Calor causado por reações químicas entre a peça e o eletrodo e seu revestimento ou gás de proteção, arco atmosférico e a poça de fusão (reações entre a escória e o metal fundido);
- (3) Calor causado pela transformação de estado do metal.

A dissipação do calor de soldagem é dado pela:

- (1) Condução térmica da peça de trabalho;
- (2) Condução térmica do eletrodo (grande quantidade do calor é utilizada para fundir o eletrodo);
- (3) Pela atmosfera vizinha por radiação diretamente do arco elétrico e da peça de trabalho.

Uma curva que une todas as temperaturas de pico (T_p), de vários pontos sobre uma linha perpendicular à linha central do cordão de solda, chama-se perfil térmico. Através dele pode-se estimar as larguras da poça de fusão e da zona termicamente afetada assim como prever alterações microestruturais que uma dada região da chapa possa sofrer devido ao processo de soldagem. A figura 3.14 apresenta este perfil térmico esquematicamente e apresenta as suas três regiões básicas. Sendo que T_f é a temperatura de fusão do material, T_c a temperatura crítica do material e T_p a temperatura de pico do material.

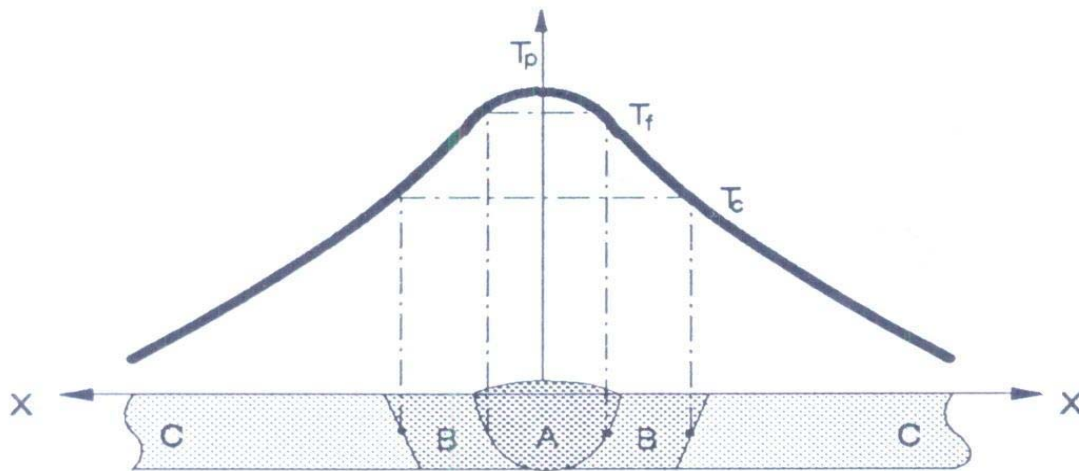


FIGURA 3.14- Perfil térmico em um material soldado (Marques, 1991).

- (A)- Zona fundida
- (B)- Zona termicamente afetada
- (C)- Metal de base

3.1.5 - Processo FCAW

O processo *FCAW* (*Flux-Cored Arc Welding*), apresentado na figura 3.15 produz coalescência através da fusão das peças com o arco elétrico, estabelecido pelo arame tubular e a peça de trabalho. O fluxo de soldagem contido no arame é responsável pela proteção do arco e do cordão de solda, um fluxo de gás de uma fonte externa também pode gerar proteção. Os fluxos também têm função de desoxidar e refinar o metal de solda, adicionar elementos de liga à solda e fornecer elementos que estabilizam o arco.

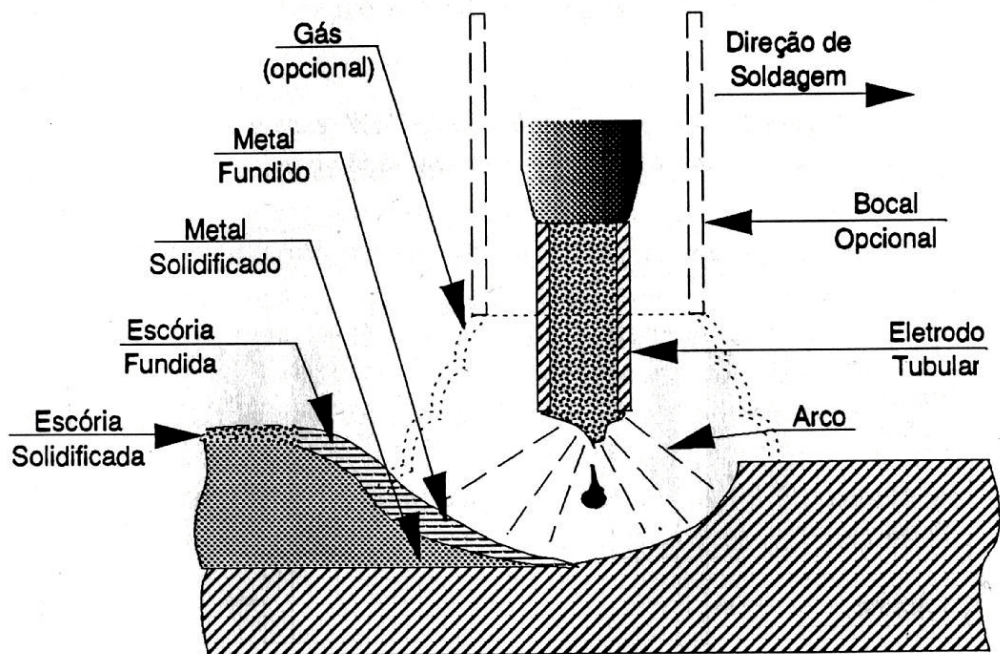


FIGURA 3.15- Processo FCAW (Marques, 1991).

O processo é aplicável aos aços-carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis. Já existem arames tubulares de pequenos diâmetros em torno de 0,8 mm, que tornam possível a soldagem em qualquer posição, com excelentes resultados.

A norma que classifica os arames tubulares é a AWS. As especificações da AWS A 5.20-79 e AWS A 5.29-80 se baseiam principalmente na aplicabilidade do arame quanto ao número de passes e quanto ao uso ou não de proteção gasosa por fonte externa. É considerado também o tipo de corrente e posição de soldagem recomendadas para um dado arame, além das propriedades mecânicas do cordão de solda obtido. Estes fatores são considerados também na escolha do tipo de eletrodo para uma dada aplicação. O sistema de classificação tem o seguinte formato: E XYT – Z – K, sendo que:

E indica que se trata de um eletrodo para soldagem a arco elétrico, o X é um número que indica o limite de resistência mínima à tração do metal depositado, em 10000 psi, o Y indica as posições de soldagem recomendadas, sendo que 1 para a soldagem em todas as

posições e 0 quando se utiliza somente nas posições plana e horizontal, T indica que o arame utilizado é o arame tubular, Z a aplicabilidade e desempenho do consumível e K os requisitos de composição química do metal depositado, sendo usado apenas nos eletrodos para soldagem de aços de baixa liga.

O processo *FCAW* tem algumas vantagens em relação ao *GMAW* (*Gas Metal Arc Welding*), que são a formação de escórias protegendo o cordão de solda, melhor estabilidade do arco, menor quantidade de respingos e mais produtivo.

O processo *FCAW* tem sido muito utilizado nos Estados Unidos, Japão e Europa. No Brasil seu interesse também está em ascensão. Ele é utilizado em indústrias nucleares, navais, de construção de plataformas de exploração de petróleo e fabricação de componentes e estruturas.

3.2- TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais em soldagem são aquelas que permanecem em um componente soldado após a retirada de todas os carregamentos externos. Vários termos técnicos são aplicados às tensões residuais, tais como: tensões internas, tensões iniciais, tensões inerentes e tensões de reação. Tensões residuais que ocorrem quando a estrutura está sujeita a mudanças de temperaturas não uniformes, são usualmente chamadas de tensões térmicas.

Tensões residuais podem ocorrer em muitas estruturas metálicas por diversas razões durante a sua manufatura. Podem ocorrer em barras, chapas e seções durante a laminação, forjamento, fundição. Durante processos de conformação como: dobramento, calandragem e durante processos de fabricação como soldagem.

Durante a soldagem a peça é aquecida e tem-se a formação de uma poça de fusão que une o metal de base e geralmente o metal de adição, após sua formação, inicia-se a solidificação e conseqüente contração da região aquecida. Nessa região a tensão de escoamento é muito

baixa podendo sofrer tensões térmicas que levarão a geração de deformações residuais, ou até mesmo a distorções.

Tratamentos térmicos durante a manufatura podem também influenciar nas tensões residuais. Um resfriamento brusco em soldagem produz tensões residuais enquanto um tratamento térmico para alívio de tensões reduz as tensões residuais, sendo que as maiores diminuições de tensões residuais são mais observadas na região da solda do que no metal de base (Tanaka, 1972).

As tensões residuais devido à contração térmica são maiores quanto maiores forem o coeficiente de expansão térmica do material, a tensão de escoamento e menor for a condutividade térmica. Quanto maior for o aporte térmico maior será a tensão residual gerada e maior será a largura do cordão de solda (Antunes, 1995).

Trincas transversais ao cordão de solda podem ser detectadas próximas à superfície, nas áreas de tensão residual máxima, para ambos processos *FCAW (Flux Cored Arc Welding)* e *SAW (Submerged Arc Welding)*, em aços de alta resistência EH32 TMCP (Lee and kang, 2003), com chamfros em V e utilizando-se soldas com múltiplos passes de solda e pré-aquecimento, com espessura de 50mm. As trincas foram detectadas a aproximadamente 9,5mm de profundidade do cordão de solda. As tensões residuais superficiais foram medidas através do método do furo central.

Análises de temperatura e de taxas de resfriamento durante o processo de soldagem são essenciais para determinar a deformação e as tensões residuais e então prever a capacidade de carga das soldas (Prasad e Narayanan, 1996).

A figura 3.16 apresenta a distribuição de tensões residuais que ocorrem paralelamente ao cordão de solda, em função do comprimento do mesmo. Cordões de solda menores produzem menores tensões residuais. A partir de determinado comprimento do cordão, as tensões residuais se tornam constantes. As tensões residuais sobre um eixo longitudinal ao

cordão de solda foram somente positivas, pois as tensões de tração após o resfriamento da solda próximo ao cordão de solda se transformam em tensões residuais.

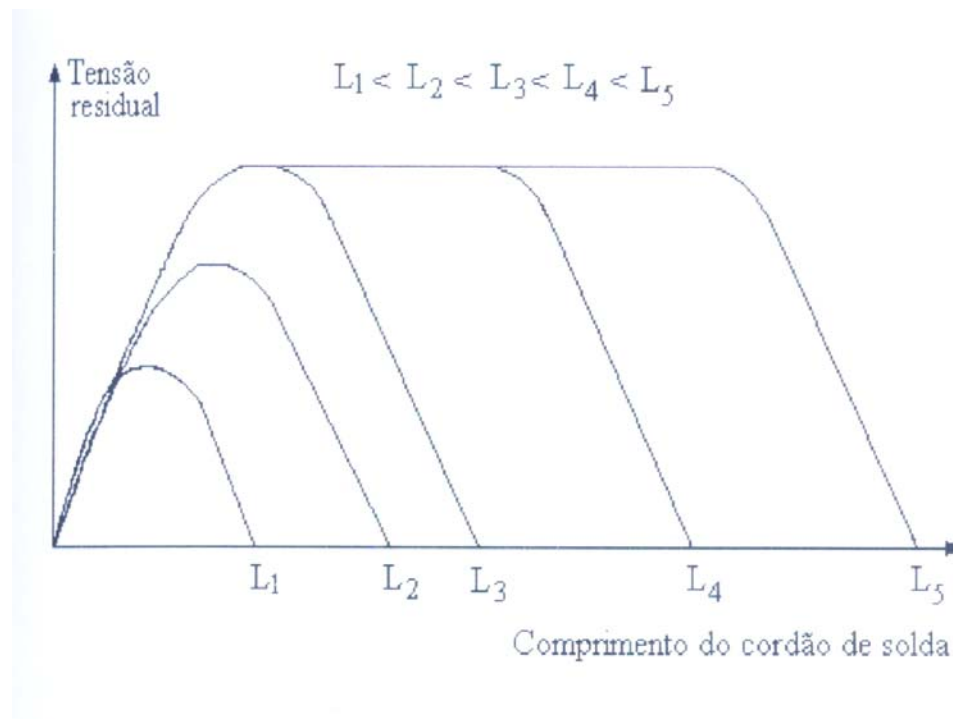


FIGURA 3.16- Variação idealizada da distribuição das tensões residuais que ocorrem paralelamente ao cordão de solda (DeGramo et al., 1946, modificada).

Na figura 3.17, tem-se uma distribuição esquemática de temperatura e de tensões em função do tempo em um cordão de solda sobre chapa.

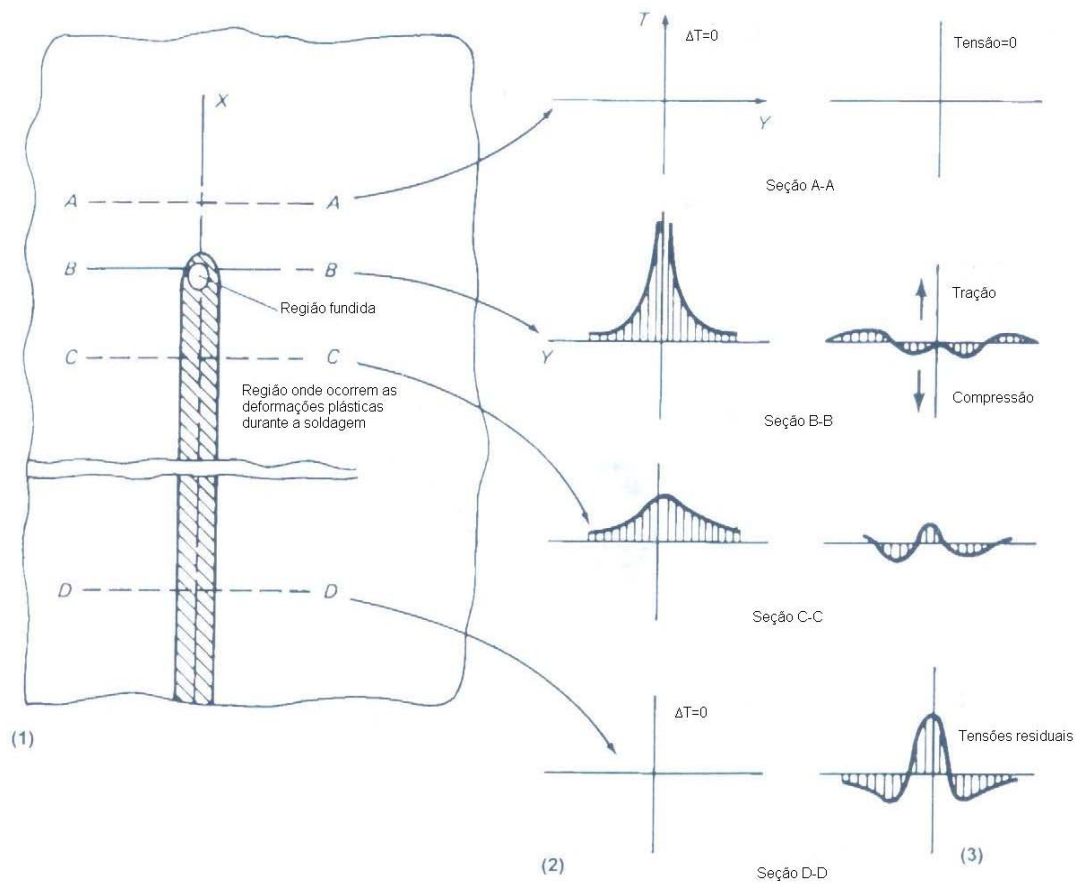


FIGURA 3.17 - Distribuição de temperatura e tensões (AWS, 1987, modificada).

(1) - Cordão de solda

(2) - Variação da temperatura

(3) - Variação da tensão transversal

Na seção A-A a distribuição de tensões e de temperatura são praticamente nulas, pois se encontram afastadas da região soldada.

Na seção B-B, tem-se uma distribuição bastante abrupta de temperatura, sendo que a tensão de escoamento a quente nesta região é baixa e inicia-se a geração de tensões térmicas.

Na seção C-C, tem-se uma distribuição de temperatura mais branda, a tensão de escoamento aumenta e a resistência à contração dessa região em relação ao metal de base também é aumentada e as tensões térmicas originadas podem levar o material a deformar-se plasticamente.

Na seção D-D, altas tensões de tração existem na solda e na zona termicamente afetada, enquanto tensões de compressão existem no metal de base distantes da solda e a distribuição de temperatura retorna a temperatura ambiente. As tensões térmicas que permaneceram e alcançaram a tensão de escoamento do material resultam em tensões residuais.

Para se medir as tensões residuais existem diversos métodos. Na tabela 3.1, apresenta-se uma classificação das técnicas de medição das tensões residuais, segundo a norma AWS.

TABELA 3.1- Classificação das técnicas de medição de tensões residuais
(AWS, 1987), modificada

GRUPOS		TÉCNICAS DE MEDIÇÃO
A1. Tensão-relaxamento utilizando-se extensômetros mecânico e elétrico	Aplicação principal em chapas	1. Extensômetro de resistência elétrica 2. Método de Gunnert 3. Método do furo central 4. Método de fresamento sucessivo de Stablem
	Aplicação principal em tubos e cilindros sólidos	5. Método de usinagem sucessiva de Heyn-Bauer 6. Método das perfurações de Mesnager-Sachs
	Aplicação principal em sólidos tridimensionais	7. Método do furo de Gunnert 8. Método do seccionamento de Rosenthal-Norton
A2. Tensão- relaxamento utilizando-se outros dispositivos (exceto extensômetro)		9. Método da divisão por malhas 10. Método do revestimento frágil 11. Método do revestimento fotoelástico
B Difração por raios X		12. Método do filme por raios X 13. Método de difração por raios X
C Trincamento		14. Método do trincamento induzido por hidrogênio 15. Método do trincamento por corrosão

As seqüências de soldagem influenciam nas tensões residuais e contrações em soldas de topo restringidas e soldas de contorno circulares, que podem ser resumidas, como (Kihara et al, 1959):

- (1) Seqüência de soldagem tem pouco efeito nas tensões residuais ao longo da solda. Entretanto, tensões de tração longitudinais poderão ser relativamente altas.
- (2) Diferentes seqüências de soldagem, podem resultar em consideráveis diferenças na: contração transversal, na energia total elástica em juntas restringidas em tensões de reação em chapas inerentes de soldas circulares.
- (3) Soldas bloqueadas geralmente resultam em menor contração, menor energia de deformação e menor tensão de reação, comparando-se às seqüências de soldagem com multi - camadas.

4- METODOLOGIA

4.1 - INTRODUÇÃO

Visando dar continuidade a uma linha de pesquisa desenvolvida no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, este trabalho estudou problemas gerados pelos ciclos térmicos de soldagem, mais especificamente sobre distorções angulares.

Para monitorar as distorções angulares das chapas, fixou-se uma fonte de laser em uma das extremidades das chapas de aço carbono (*ASTM A-36*), cortadas pelo processo oxicorte e usinadas através de uma fresadora. Uma das extremidades da chapa foi engastada e a outra ficou livre a qual fixou-se o laser. Utilizou-se o processo de soldagem de arame contínuo com proteção gasosa (*Flux-Cored Arc Welding - FCAW*). O feixe de laser varia de posição de acordo com a evolução das distorções devido à operação de soldagem. Monitorou-se as variações do feixe de laser projetadas sobre um papel milimetrado com uma filmadora digital, em determinado intervalo de tempo, sendo assim tem-se o histórico das distorções em um ponto afastado do cordão de solda.

4.2- MATERIAIS UTILIZADOS

- Chapas de aço carbono *ASTM A36*;
- Chapa de aço galvanizado;
- Cola a base de silicone;
- Transdutor linear (laser);
- Sargentos de fixação;
- Folhas de papel milimetrado.

Para monitoração das distorções angulares, fixou-se uma folha de papel milimetrado em um anteparo vertical de madeira, para a marcação da projeção do laser. A projeção do laser pode ser observada sobre o papel milimetrado, como apresentado na figura 4.1.



FIGURA
4.1- Folha de
papel
milimetrado
para
monitoração

10 mm

das projeções do feixe de laser.

4.3 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As chapas após cortadas pelo processo oxicorte e esmerilhadas, foram usinadas através de uma fresadora. Usinou-se dez chapas por fresamento em um total de trinta, sendo elas unidas face a face, para que possuísem a mesma geometria após o término da execução do trabalho. Sendo assim as chapas retangulares foram usinadas em quatro faces e as chapas em formato de “halter” em doze faces, como exemplifica a figura 4.2.



FIGURA 4.2- Usinagem das chapas em formato de “halter”.

Após a usinagem, as chapas foram medidas com paquímetros e posteriormente pesadas com uma balança analítica digital, como apresentado nas figuras 4.3 e 4.4, para verificar a repetitividade dos corpos de prova. A variação de peso das chapas retangulares foi, em no máximo 14 gramas e a variação de peso das chapas de formato em “halter” foi em no máximo 13 gramas, o que foi considerado baixo em relação ao peso do corpo de prova e que não prejudicaria os resultados dos testes.



FIGURA 4.3- Pesagem das chapas em formato de “halter”.



FIGURA 4.4- Pesagem das chapas em formato retangular.

Para fixação do laser à chapa, utilizou-se uma chapa galvanizada dobrada para se adequar a uma das extremidades do corpo de prova. Na parte inferior da chapa galvanizada, fixou-se um imã com uma cola a base de silicone resistente a altas temperaturas. Posteriormente colou-se o laser na parte superior da chapa de aço galvanizado com esta mesma cola, o tempo de cura foi de vinte e quatro horas. O imã foi o responsável pela fixação do dispositivo ao corpo de prova. O corpo de prova fixado em uma bancada através de “sargentos” e o dispositivo de monitoração (laser) estão apresentados na figura 4.5.



FIGURA 4.5- Corpo de prova fixado a uma bancada e o dispositivo para monitoração das distorções angulares (laser).

4.4- PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Utilizou-se o processo de soldagem de arame contínuo e proteção gasosa *FCAW* (*Flux Cored Arc Welding*). Um robô *Motoman* foi utilizado para a soldagem, acoplou-se uma tocha de soldagem a ele, sendo que a abertura e manutenção do arco elétrico, a alimentação do arame, a velocidade de soldagem e o comprimento do arco elétrico são as variáveis do processo controlados pela máquina de soldagem, que no caso é a do robô. A orientação do arco elétrico, o posicionamento da tocha de soldagem, a trajetória do robô, foram variáveis controladas e programadas pelo operador.

Para permitir a comparação entre os testes, manteve-se inalterados os parâmetros de soldagem, como apresentado na tabela 4.1.

TABELA 4.1

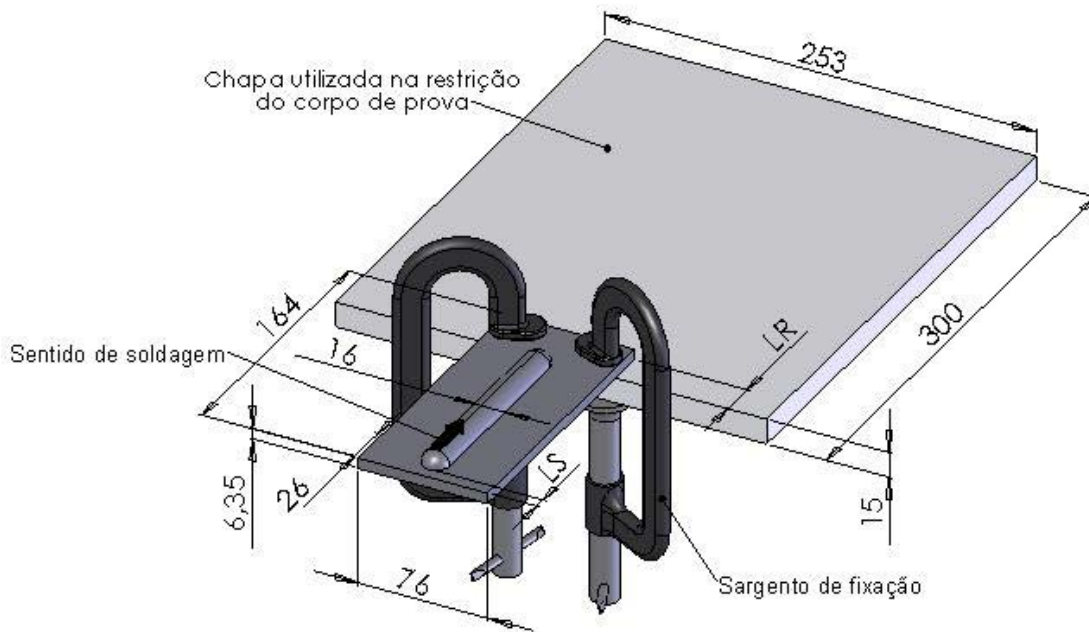
Parâmetros de soldagem	
Corrente [A]	220,0 ± 5,0
Tensão [V]	21,5
Velocidade de soldagem [mm/s]	3
<i>Stick out</i> [mm]	14
Vazão do gás de proteção [l /min.]	17,5
Diâmetro do arame tubular [mm]	1,2
Temperatura ambiente [°C]	25

Para a execução do cordão de solda sobre chapa foram utilizados os seguintes equipamentos e consumíveis de soldagem:

- Robô Motoman;
- Máquina de soldagem *MotoArc* 450;
- Arame tubular E71T-1;
- Gás de proteção (25% de dióxido de carbono e 75% de Argônio).

Para os corpos de prova em formato de “*halter*”, utilizou-se também refrigeração com dióxido de carbono, acoplado-se uma mangueira à frente da tocha de soldagem.

Numa primeira etapa de testes experimentais (1 a 10), utilizou-se os corpos de prova em formato retangular, estes foram engastados e fixados a uma chapa de bancada, como representado na figura 4.6.



LR: Comprimento do corpo de prova engastado em [mm];

LS: Distância do início do cordão de solda a extremidade do corpo de prova [mm].

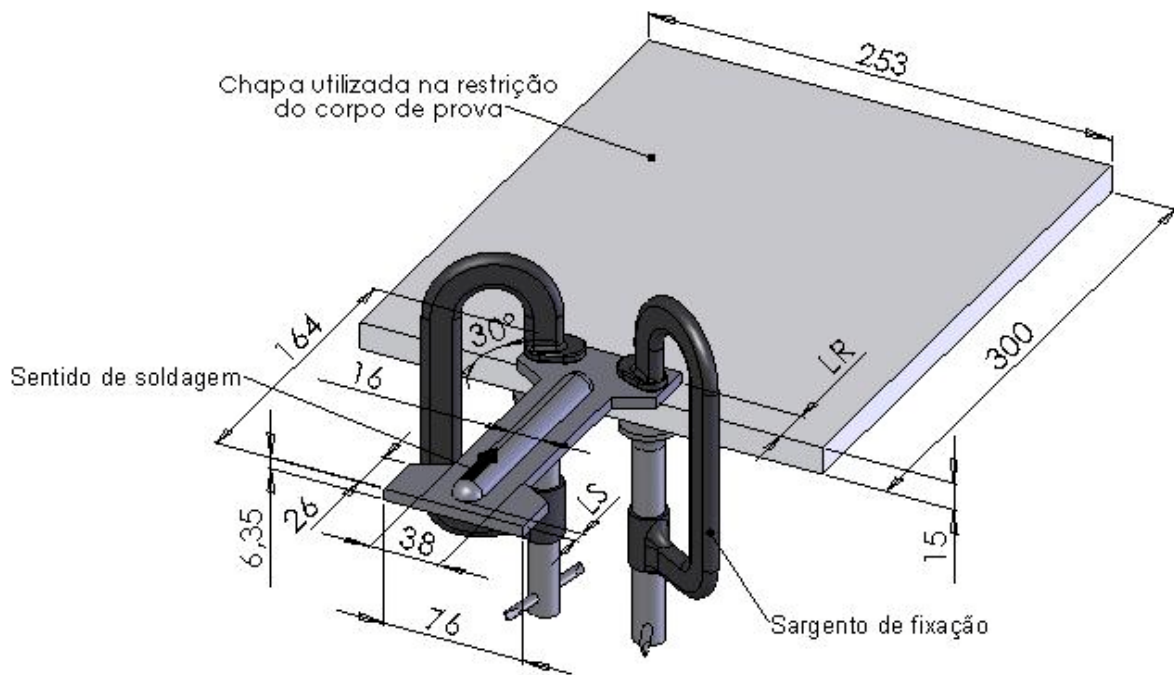
FIGURA 4.6- Geometria dos corpos de prova utilizados nos testes experimentais de 1 a 10.

TABELA 4.2- Dados relativos aos testes 1 a 10 (dimensões conforme figura 4.6)

Corpos de prova	Testes (1 A 10)
Tempo de soldagem [s]	40
Comprimento do cordão de solda [mm]	127
Comprimento do corpo de prova engastado "LR" [mm]	28
Distância do início do cordão de solda a extremidade do corpo de prova "LS" [mm]	7
Largura do corpo de prova [mm]	76
Comprimento do corpo de prova [mm]	164

Numa segunda etapa de testes experimentais (11 a 20), procurou-se verificar a influência da geometria dos corpos de prova nas distorções angulares das chapas soldadas, por isso utilizou-se geometrias de corpos de prova diferentes dos testes 1 a 10. Denominou-se este novo formato de geometria de “*halter*”, este formato foi de caráter exploratório e pesquisa, pois suas medidas não foram baseadas em nenhuma norma padrão para fabricação de corpos de prova.

No desenho esquemático da figura 4.7, apresenta-se a geometria dos corpos de prova em formato “*halter*” e como eles foram engastados e fixados a uma chapa de bancada. Estas chapas em formato “*halter*” foram utilizadas nos testes experimentais 11 a 20 e também nos testes 21 a 30 que serão explicados posteriormente.



LR: Comprimento do corpo de prova engastado [mm];

LS: Distância do início do cordão de solda a extremidade do corpo de prova [mm].

FIGURA 4.7- Geometria dos corpos de prova utilizados nos testes experimentais 11 a 30.

TABELA 4.3- Dados relativos aos testes 11 até o teste 30 (dimensões conforme figura 4.7)

Corpos de prova	Testes (11 A 30)
Tempo de soldagem [s]	40
Comprimento do cordão de solda [mm]	127
Comprimento do corpo de prova engastado "LR" [mm]	28
Distância do início do cordão de solda a extremidade do corpo de prova "LS" [mm]	7
Largura do corpo de prova [mm]	76
Comprimento do corpo de prova [mm]	164

O objetivo de uma terceira etapa de testes experimentais (21 a 30), foi diminuir a distorção angular de aços de baixo carbono, *ASTM A-36*, utilizando refrigeração forçada da poça de fusão com a injeção de dióxido de carbono. A geometria dos corpos de prova dos testes 21 a 30 são iguais à geometria dos corpos de prova dos testes 11 a 20 (figura 4.7) e denominou-se os corpos de prova de “*halter*” - refrigerado devido ao resfriamento com dióxido de carbono.

Nesses testes, utilizou-se um cilindro de dióxido de carbono conectado a uma mangueira flexível de aço inoxidável resistente a baixas temperaturas, em torno de -200°C . Esta mangueira foi presa à tocha de soldagem do robô por uma abraçadeira de aço. Na ponta da mangueira foi rosqueado um bico com diâmetro de saída de 0,4 mm, com o objetivo de reduzir a área de saída do dióxido de carbono aumentando assim a pressão. O dióxido de carbono liquefeito retirado do cilindro, através de um tubo edutor, se solidifica por expansão, este sistema foi ligado aproximadamente um minuto antes de cada solda, para que o dióxido de carbono atingisse a temperatura e pressão adequadas. A ponta bico injetor

ficou a uma distância de 25 mm da tocha de soldagem e a uma altura de 7mm do corpo de prova, como apresentado na figura 4.8.



FIGURA 4.8 - Montagem experimental dos testes 21 a 30.

4.5- PROCEDIMENTOS PARA PREPARAÇÃO DA MONITORAÇÃO

As seguintes etapas foram seguidas para a monitoração das distorções angulares das chapas:

- 1- Posicionou-se o anteparo com folhas de papel milimetrado fixados com fita adesiva a uma distância de 4240 mm do dispositivo de monitoração das distorções;
- 2- Fixou-se os corpos de prova em uma chapa de base (espessura de 15 mm), por meio de dois “sargentos”, fez-se um gabarito demarcado na chapa de base para o correto

- posicionamento do corpo de prova com comprimento de 28mm. O objetivo foi realizar a restrição (engastamento) de uma das extremidades da chapa;
- 3- Ajustou-se os parâmetros de soldagem através de chapas auxiliares;
 - 4- Ligou-se o controlador do robô *Motoman* e rodou-se o programa, observou-se a trajetória da tocha de soldagem verificando se o movimento estava simétrico em relação a linha de centro do corpo de prova;
 - 5- Posicionou-se a tocha de soldagem na posição inicial de teste e conferiu-se o *stick out*, que é a distância do bico de contato da tocha até a peça de trabalho, utilizou-se um gabarito para esta medida;
 - 6- Utilizou-se um bibímetro acoplado a tocha de soldagem para a verificação da vazão do gás de proteção;
 - 7- Posicionou-se o dispositivo de monitoração na extremidade esquerda do corpo de prova testando-se o laser e sua projeção no papel milimetrado, posteriormente o laser foi acionado através de uma abraçadeira de plástico;
 - 8- Posicionou-se uma filmadora digital para a leitura posterior dos dados;
 - 9- Mediu-se a distância da fonte de laser ao papel milimetrado, que foi de 4240mm, utilizou-se uma trena para esta medida, este valor foi constante para todos os testes, quanto ao paralelismo do anteparo com o laser, utilizou-se a projeção do laser sobre um esquadro colocado ao lado do anteparo, quando a projeção do laser coincidissem com a ponta do esquadro, naquela posição o laser estaria paralelo ao anteparo;
 - 10- Ligou-se a máquina de soldagem assim como o sistema de refrigeração da tocha e a filmadora;
 - 11- Iniciou-se a operação de soldagem através do controlador do robô e a monitoração das distorções.

Na figura 4.9, é apresentado a montagem experimental que foi preparada à monitoração das distorções angulares.

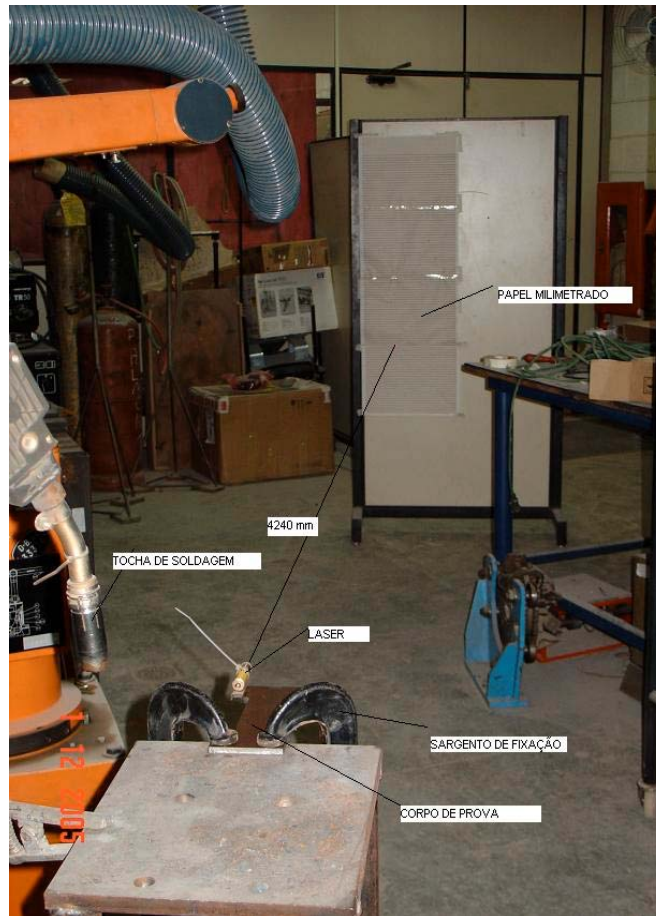


FIGURA 4.9 - Montagem experimental para monitoração das distorções angulares.

4.6- PROCEDIMENTO PARA MONITORAÇÃO DA DISTORÇÃO ANGULAR

Para monitorar a projeção do laser utilizou-se uma filmadora digital. A coleta de dados foi feita transferindo a informação da filmadora para um computador. Os vídeos foram revistos e a cada intervalo de 1 segundo, a tela foi paralisada e foi feita a leitura da distorção (em milímetros) no eixo Y do papel milimetrado, até a estabilização da distorção. A variação dos deslocamentos foi medida na direção vertical, sendo igual à diferença entre a posição do feixe de laser em determinado tempo “ t ” e o ponto de base no tempo “ t_0 ”. Para converter a variação do deslocamento em um valor angular (em radianos), utilizou-se a Equação 4.1, obtida através da relação trigonométrica apresentada na figura 4.10.

$$\text{Distorção angular} = \text{arc tan} \frac{\text{Distância do ponto de incidência do feixe de laser no tempo "t" ao tempo "t_0"}{4240} \quad (4.1)$$

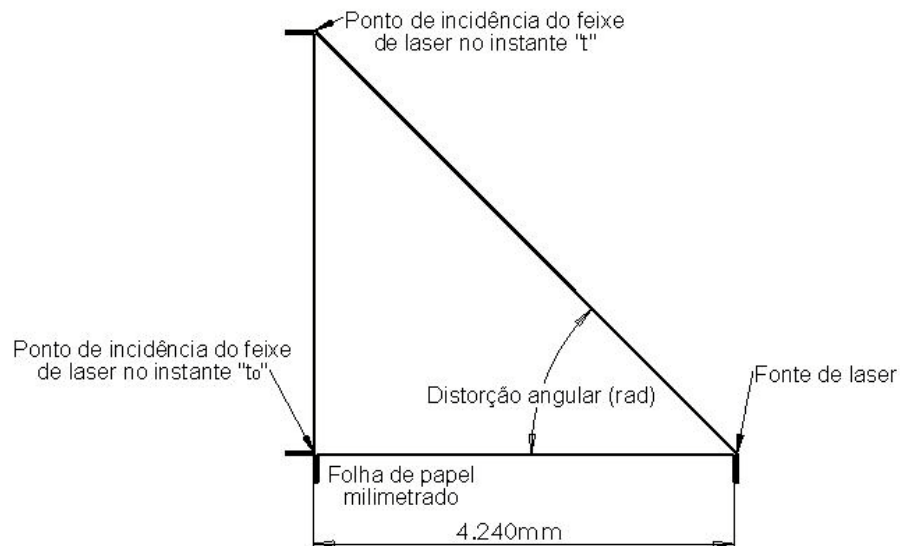


FIGURA 4.10- Relações trigonométricas para obtenção da distorção angular.

Posteriormente aos testes experimentais, foram feitas macrografias e micrografias do cordão de solda, para verificar a penetração e às microestruturas presentes nas chapas soldadas com ou sem resfriamento da poça de fusão, cortando-se três de cada chapa (retangular, “halter” e “halter” com refrigeração) na seção transversal a 63mm do início do cordão. Estas peças foram lixadas e atacadas por imersão em Nital (2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico), durante o tempo de 45s e fotografadas.

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados dos testes 1 a 10 em Anexo (Figuras A1 a A10), utilizando chapas retangulares, observou-se que nos primeiros 2s aproximadamente de soldagem, a chapa sofre uma distorção angular negativa (expansão). Isto ocorre porque com o início da soldagem, o arco elétrico forma uma poça de fusão na chapa (Kim, 1992), promovendo uma relaxação de tensões neste local (Michaleris and Sun, 1997) e como estes materiais geralmente já possuem tensão residual devido a processos de fabricação, este relaxamento somado as tensões térmicas geradas pela poça de fusão com o metal de base, promovem a expansão da chapa.

Com a continuidade do cordão de solda após os 2s iniciais, este trecho já soldado, começa a se resfriar e tensões térmicas longitudinais de tração (AWS, 1991) começam a surgir e superam as tensões térmicas longitudinais de compressão que a poça de fusão gera, promovendo a contração ou distorção angular positiva desse material.

A contração do material permanece até aproximadamente 43s, um pouco após o término da soldagem (40s). Com a extinção do arco elétrico a cratera de solda começa a se solidificar e a produzir tensões térmicas com o seu resfriamento (Radaj, 1992), reduzindo assim a distorção angular da chapa.

Em aproximadamente 80s, as chapas atingiram a estabilidade da distorção.

Na figura 5.1, estão apresentados todos os resultados experimentais dos testes 1 a 10 em Anexo (Figuras A1 a A10).

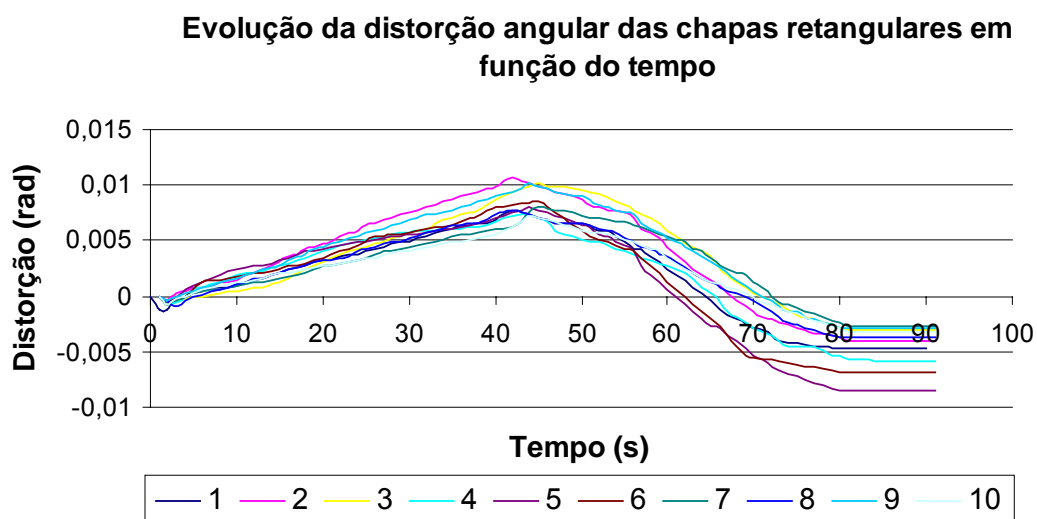
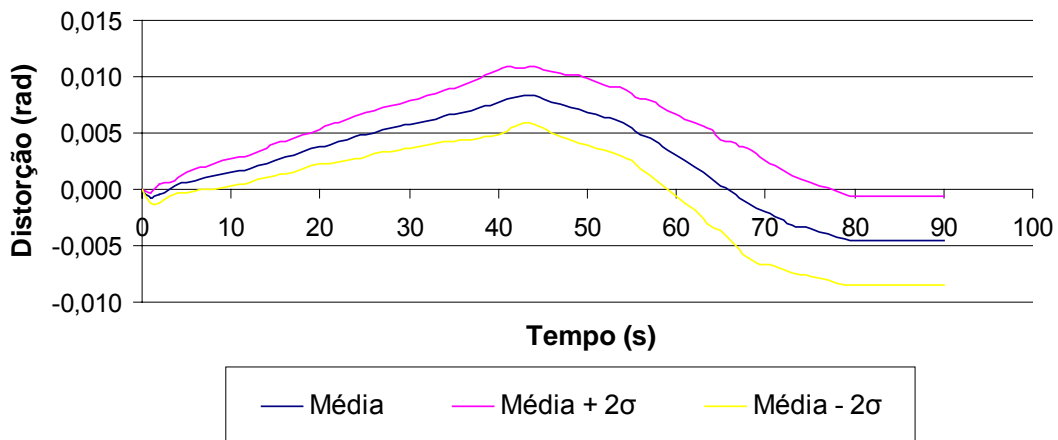


FIGURA 5.1- Evolução da distorção angular em função do tempo (Chapas retangulares 1 a 10).

Para verificar se os resultados estavam estatisticamente satisfatórios, calculou-se a média das distorções angulares em função do tempo, assim como seu desvio padrão. As curvas das distorções angulares dos testes 1 a 10, ficaram entre a média e mais ou menos duas vezes o desvio padrão (σ), sendo assim os resultados podem ser distribuídos em uma curva normal com confiabilidade de 95,45% (figura 5.2). Optou-se por essa distribuição, pois os resultados das distorções angulares ficaram enquadrados nessa faixa. Sendo que para uma distribuição da média $\pm \sigma$ também seria possível com um intervalo de confiança de 68%, assim como da média $\pm 3\sigma$ com um intervalo de confiança de 99% .

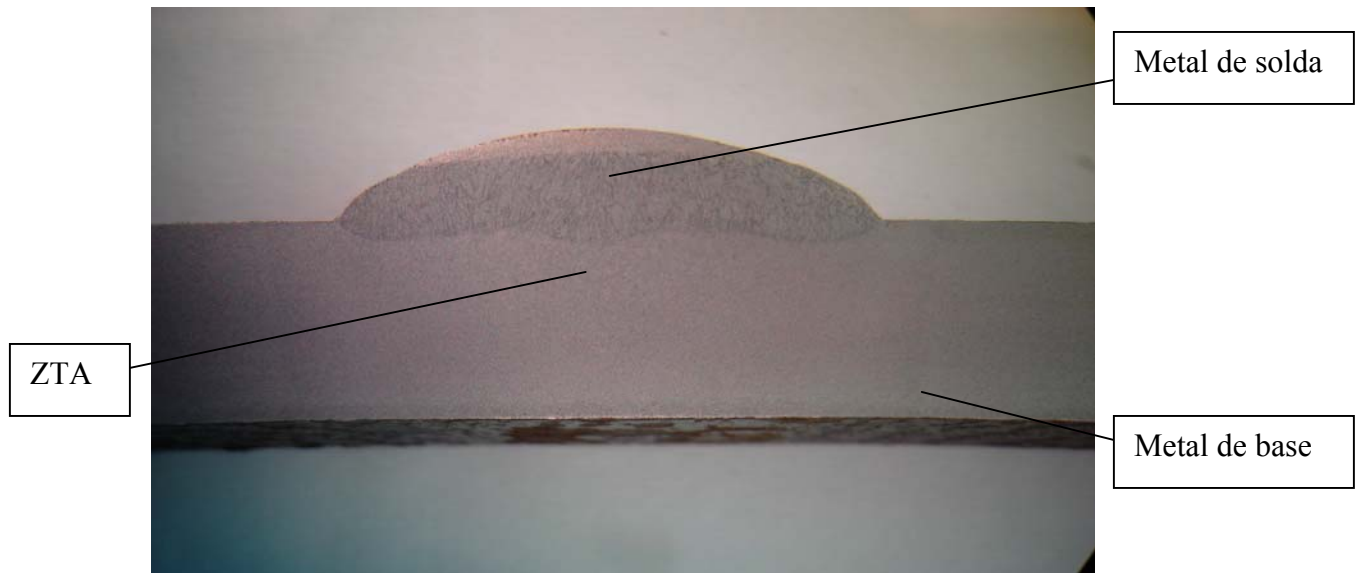
Evolução das médias das distorções angulares e respectiva média do dobro do desvio padrão das chapas retangulares em função do tempo



Nota: σ (Desvio padrão da amostra);

FIGURA 5.2- Evolução das médias das distorções angulares e a respectiva média do dobro do desvio padrão experimental em função do tempo (Chapas retangulares).

Na análise macrográfica (figura 5.3) e micrográficas (figuras 5.4, 5.5 e 5.6), observou-se que o cordão de solda teve pouca penetração e nas microestruturas presentes observou-se um crescimento significativo dos grãos da zona termicamente afetada em relação aos grãos do metal de base, os constituintes estão descritos em cada figura, no metal de solda as estruturas mais escuras eram de ferrita acicular e algumas regiões mais claras de ferrita primária.



Nota: ZTA (Zona termicamente afetada)

FIGURA 5.3 - Macrografia da chapa retangular com um aumento de 5x.

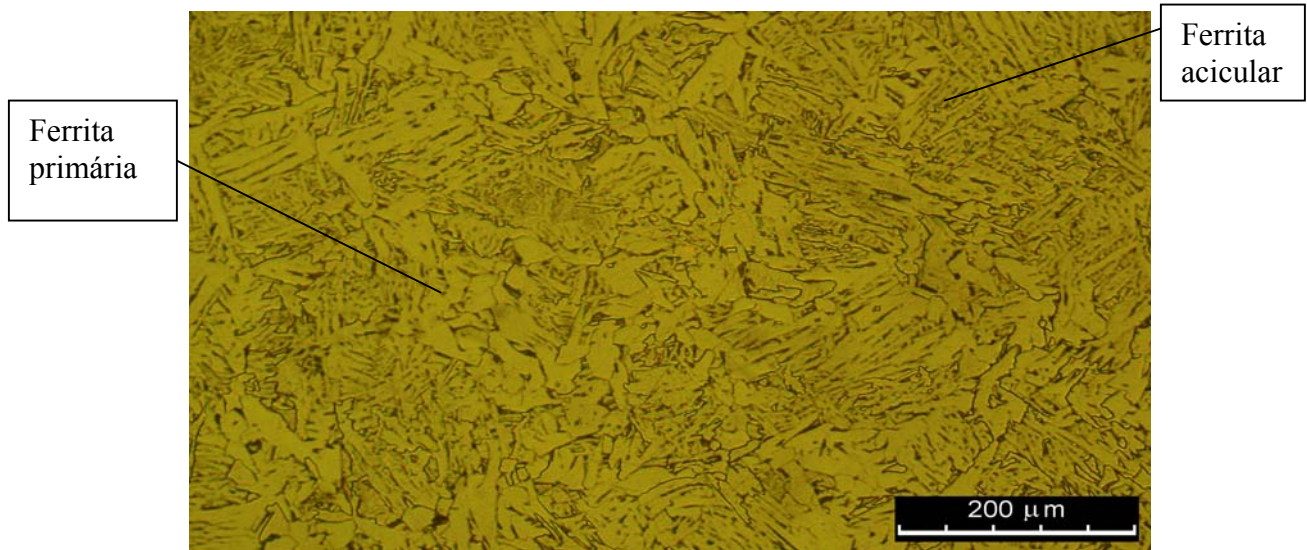


FIGURA 5.4 - Micrografia da chapa retangular (zona termicamente afetada).

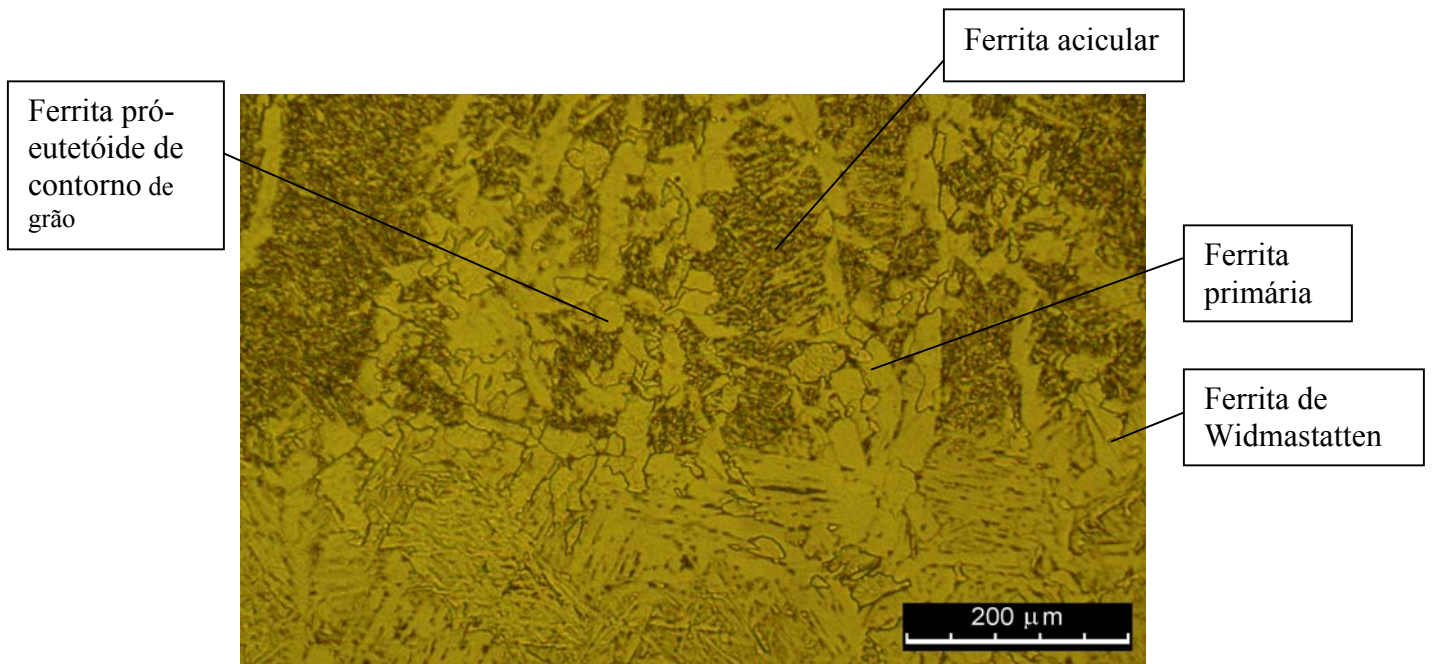


FIGURA 5.5- Micrografia da chapa retangular (linha de fusão).

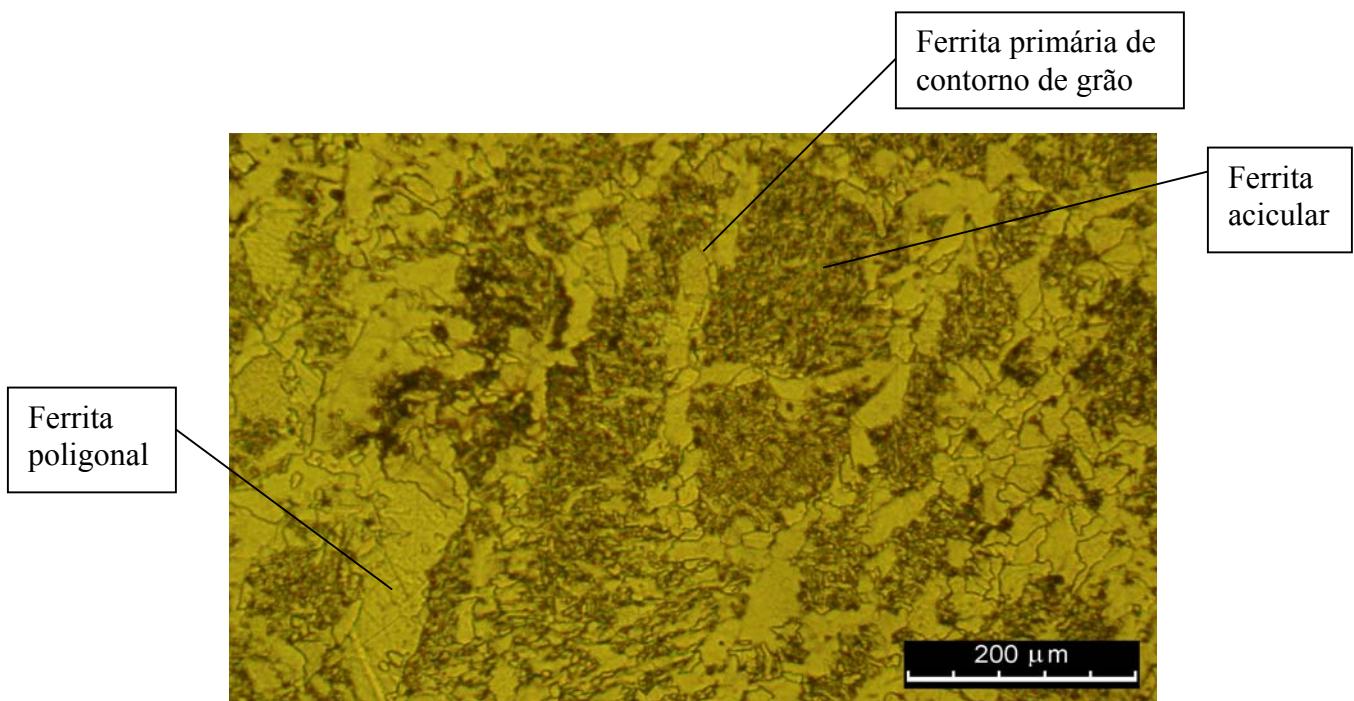


FIGURA 5.6- Micrografia da chapa retangular (metal de solda).

Os testes 11 a 20, foram realizados para verificar se a evolução da distorção angular varia em diferentes geometrias de corpos de prova, utilizando os mesmos parâmetros de soldagem. O formato desses corpos de prova, cuja denominação nesse trabalho foi “*halter*” estão descritos na figura 4.7.

Nos testes com as chapas “*halter*”, observou-se a expansão no corpo de prova somente no primeiro segundo de soldagem, comportamento semelhante às chapas retangulares.

Após o tempo de 1 segundo de início da soldagem, as peças começaram a se contrair (distorção angular positiva) até aproximadamente 60s. Como a região central das chapas “*halter*” tinha a largura reduzida, as regiões da vizinhança que são mais frias por onde o calor poderia se propagar são menores, promovendo então um maior acúmulo de calor numa menor massa e resultando em uma maior distorção angular. O tempo de contração (distorção angular positiva) da geometria “*halter*” foi superior à da geometria retangular, pois o calor pode ter se concentrado nas extremidades dessa região central da chapa e aumentando-se assim o tempo de propagação do calor pela peça, diminuindo-se a velocidade de aquecimento por condução de calor na chapa e também do resfriamento após a soldagem, como apresentado na figura 5.7.

Com o arco elétrico já extinto e aproximadamente 60 segundos após o início da soldagem, a chapa distorce-se no sentido negativo, com o mesmo comportamento da chapa retangular.

Após aproximadamente 120s, ocorre à estabilização da distorção da chapa.

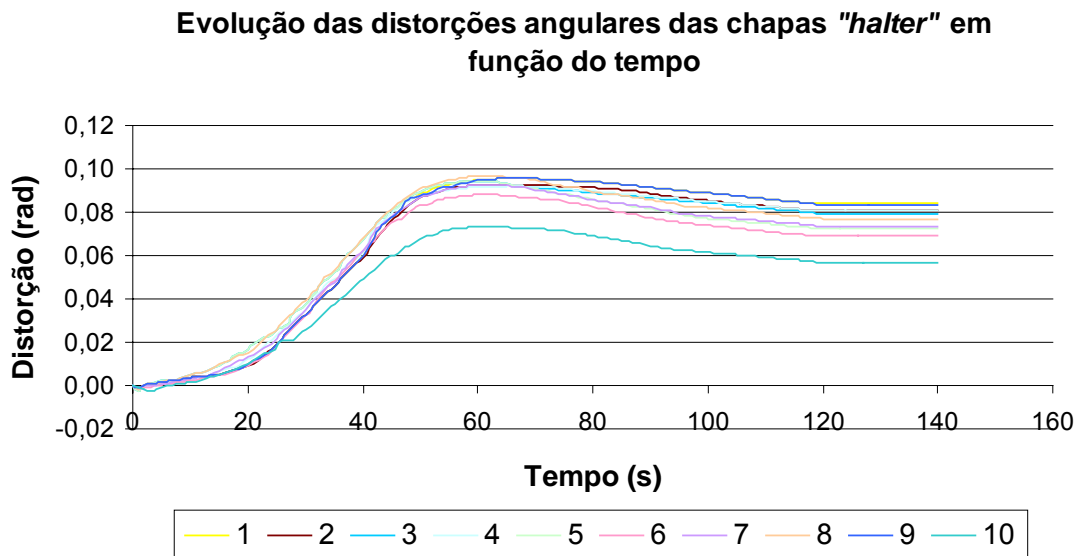
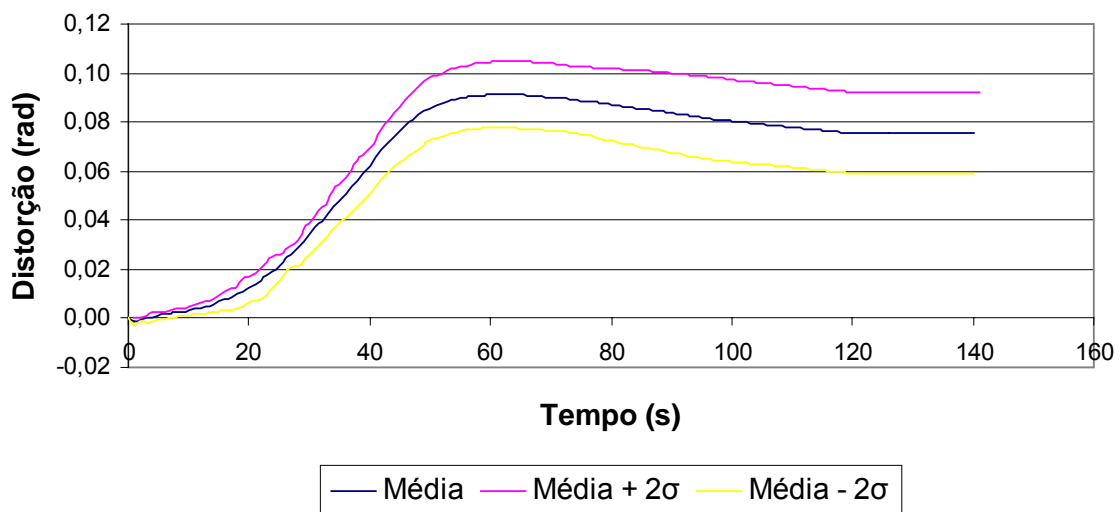


Figura 5.7 - Evolução das distorções angulares em função do tempo
(Chapas "halter" 1 a 10).

As curvas das distorções angulares dos testes 11 a 20, ficaram entre a média e mais ou menos duas vezes o desvio padrão (σ), sendo assim os resultados podem ser distribuídos em uma curva normal com confiabilidade de 95,45% (figura 5.8). Optou-se por essa distribuição, pois os resultados das distorções angulares ficaram enquadrados nessa faixa. Sendo que para uma distribuição da média $\pm \sigma$ também seria possível com um intervalo de confiança de 68%, assim como da média $\pm 3\sigma$ com um intervalo de confiança de 99% .

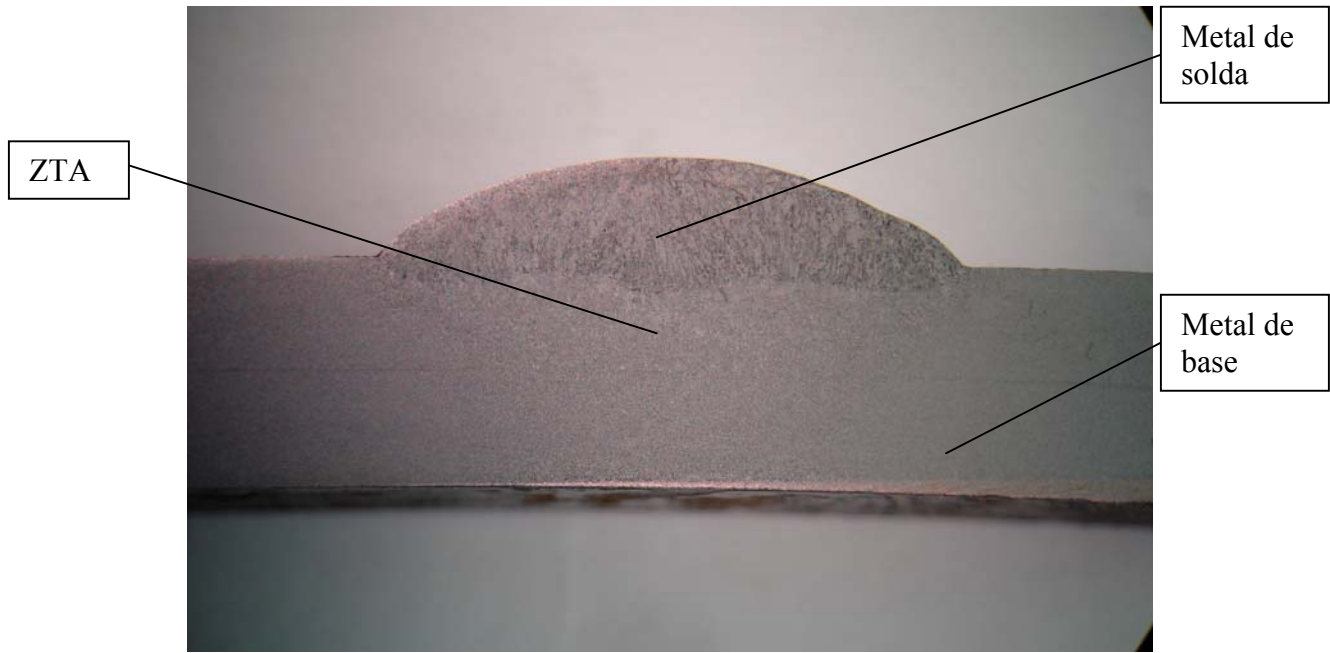
Evolução das médias das distorções angulares e respectiva média do dobro do desvio padrão das chapas "halter" em função do tempo



Nota: σ (Desvio padrão da amostra);

FIGURA 5.8 - Evolução das médias das distorções angulares e a respectiva média do dobro do desvio padrão experimental em função do tempo (Chapas "halter").

A macrografia e a micrografia das chapas “halter” foram bem semelhantes em termos de penetração do cordão de solda e constituintes às das chapas retangulares, como pode ser observado nas figuras (5.9 a 5.12), pois utilizou-se os mesmos parâmetros de soldagem variando-se somente a geometria.



Nota: ZTA (Zona termicamente afetada)

FIGURA 5.9 - Macrografia da chapa “halter” com um aumento de 5,2x.

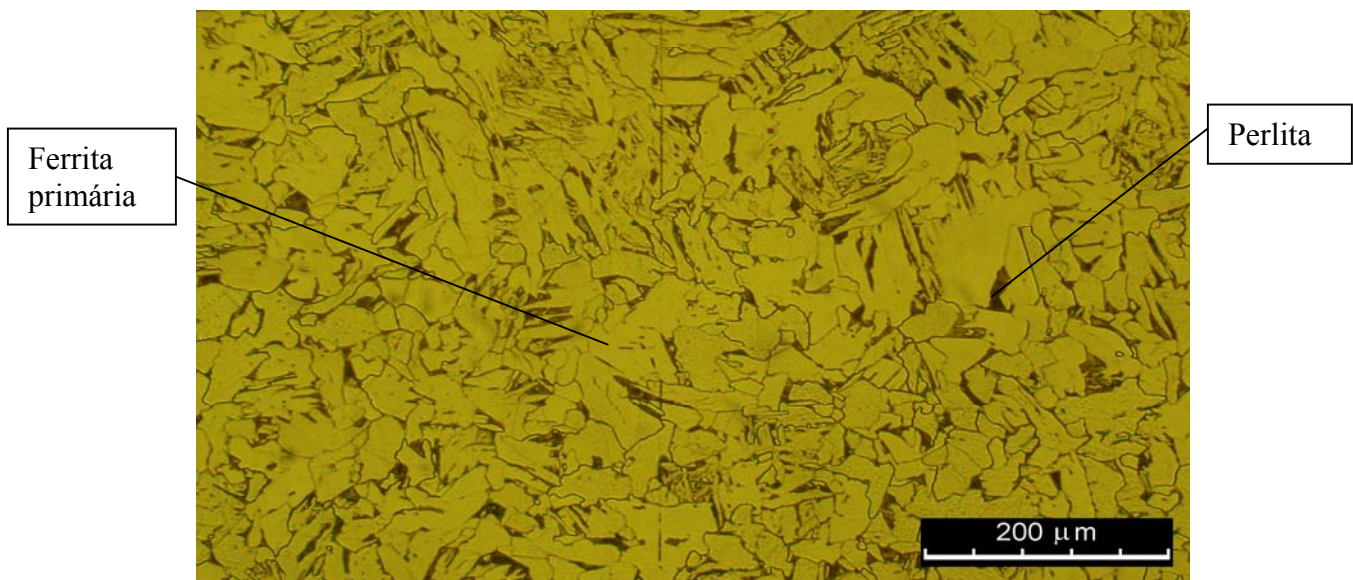


FIGURA 5.10 - Micrografia da chapa “halter” (zona termicamente afetada).

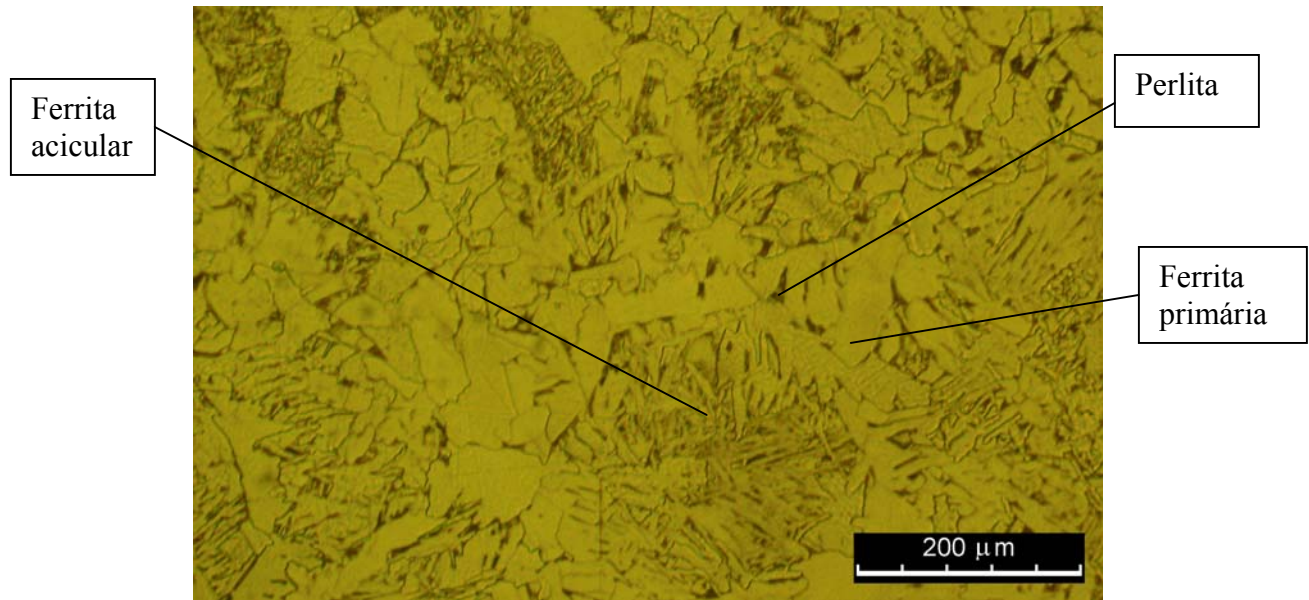


FIGURA 5.11 - Micrografia da chapa “halter” (linha fundida).

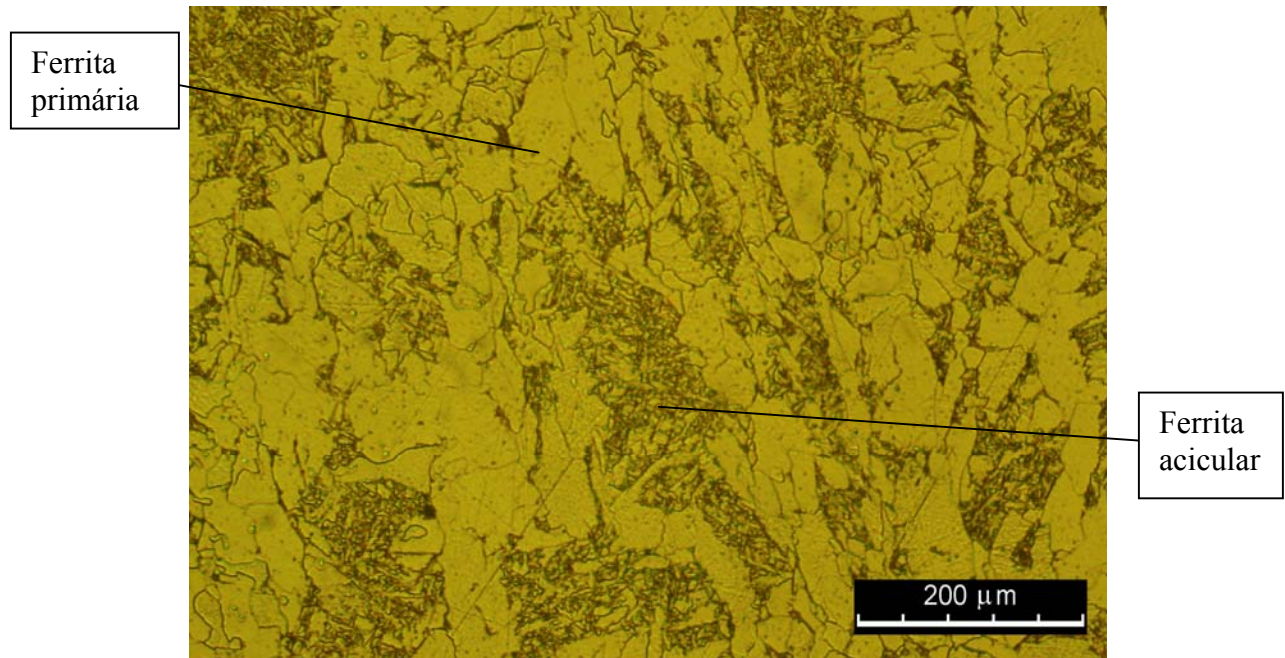


FIGURA 5.12 - Micrografia da chapa “halter” (metal de solda).

Nos testes 21 a 30, utilizou-se refrigeração forçada da poça de fusão com dióxido de carbono, pode-se observar o seguinte comportamento, conforme em Anexo figuras A21 a A30 e figura 5.13.

No início da soldagem em torno de 1s, as chapas, distorcem-se angularmente no sentido negativo (expansão), como aproximadamente nos outros testes.

A partir do 1s, a chapa começa a distorcer-se no sentido positivo (contração), como nos outros experimentos. A distorção angular máxima é reduzida, principalmente por diminuir as tensões térmicas longitudinais de tração que surgem na contração da chapa em relação aos testes 11 a 20, devido à injeção de dióxido de carbono sobre a poça de fusão durante a soldagem. A temperatura de trabalho do dióxido de carbono é de aproximadamente -75°C , com esse resfriamento o tempo de distorção angular positiva (contração) também diminuiu, em relação aos testes 11 a 20, em torno de 53s.

Após aproximadamente 53s, a chapa distorce-se no sentido negativo e se estabiliza em torno de 115s, que também é menor que o dos testes 11 a 20.

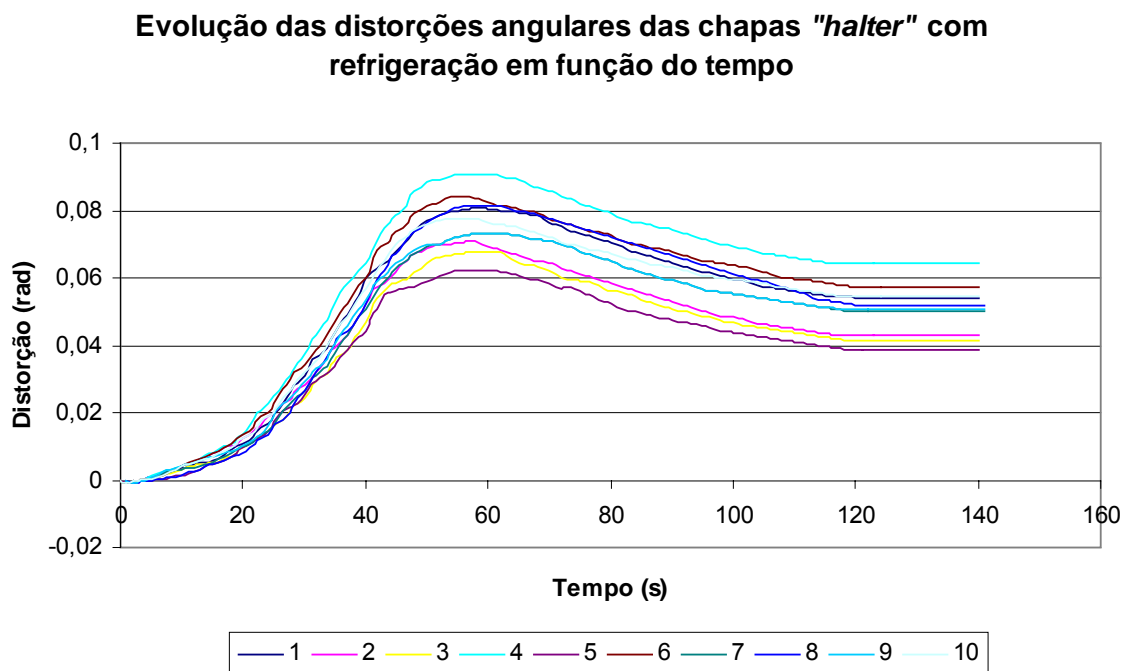


FIGURA 5.13 - Evolução das distorções angulares em função do tempo

(Chapas “*halter*” com refrigeração 1 a 10).

Para verificar se os resultados foram estatisticamente satisfatórios, também calculou-se a média das distorções angulares em função do tempo das chapas “*halter*” utilizando refrigeração da poça de fusão (testes 21 a 30), assim como seu desvio padrão. As curvas desses testes, ficaram entre a média e mais ou menos duas vezes o desvio padrão (σ), sendo assim, os resultados podem ser distribuídos em uma curva normal com confiabilidade de 95,45% (figura 5.14). Optou-se por essa distribuição, pois os resultados das distorções angulares ficaram enquadrados nessa faixa, sendo que para uma distribuição da média $\pm \sigma$, também seria possível com um intervalo de confiança de 68%, assim como da média $\pm 3\sigma$ com um intervalo de confiança de 99% .

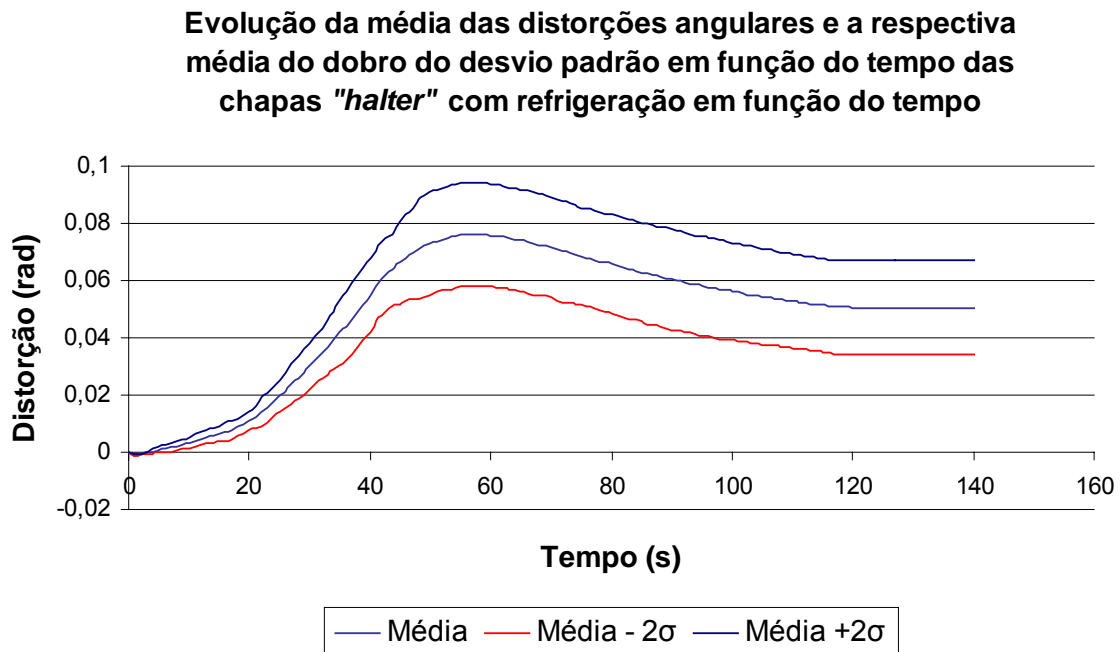


FIGURA 5.14 - Evolução das médias das distorções angulares e a respectiva média do dobro do desvio padrão experimental em função do tempo (Chapas “*halter*” com refrigeração).

Fazendo-se uma análise macrográfica e micrográfica, como ilustrado nas figuras 5.15 a 5.18 dos cordões de solda dos testes 21 a 30, observou-se que a zona termicamente afetada diminuiu devido ao resfriamento da poça de fusão durante a soldagem. Houve um menor crescimento de grãos da zona termicamente afetada, comparando-se aos corpos de prova soldados sem refrigeração. Em relação à microestrutura não foram observadas grandes mudanças a olho nu apesar do resfriamento da poça de fusão, porém a quantidade de ferrita acicular (partes mais escuras), assim como a quantidade de ferrita primária do metal de solda diminuíram, devido ao menor tempo de resfriamento na chapa por causa da refrigeração da poça de fusão com dióxido de carbono durante a soldagem.



Nota: ZTA (Zona termicamente afetada)

FIGURA 5.15 - Macrografia da chapa “halter” com refrigeração com aumento de 6,5x

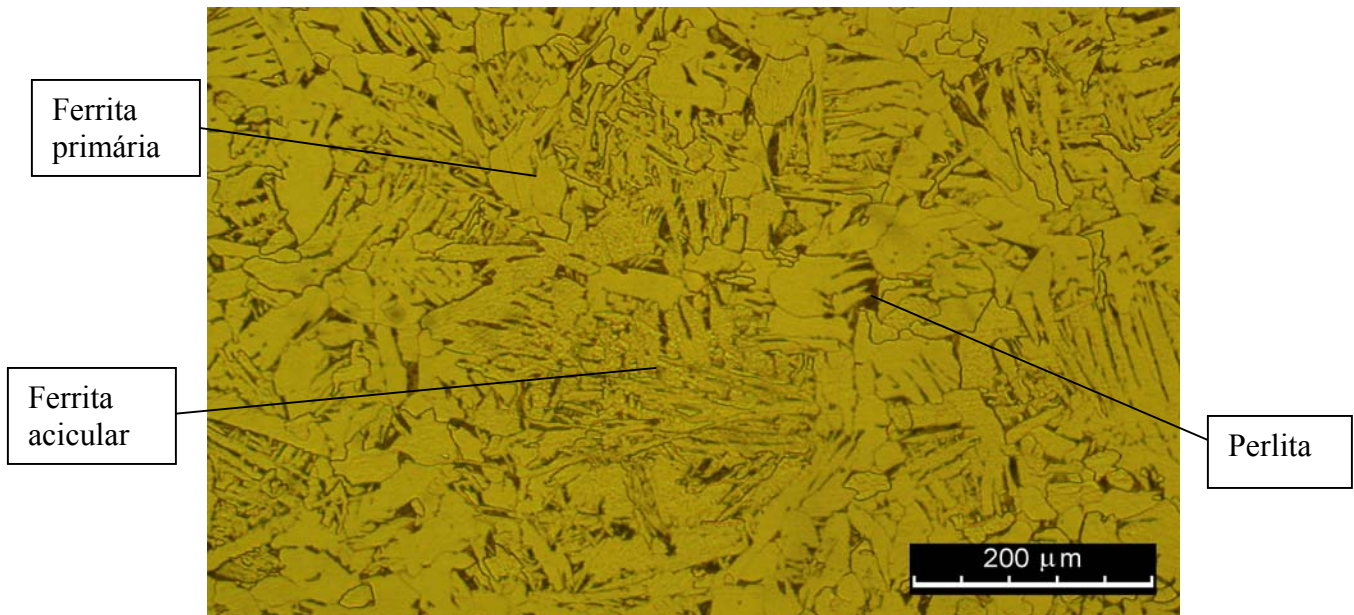


FIGURA 5.16 - Micrografia da chapa “halter” com refrigeração (zona termicamente afetada).

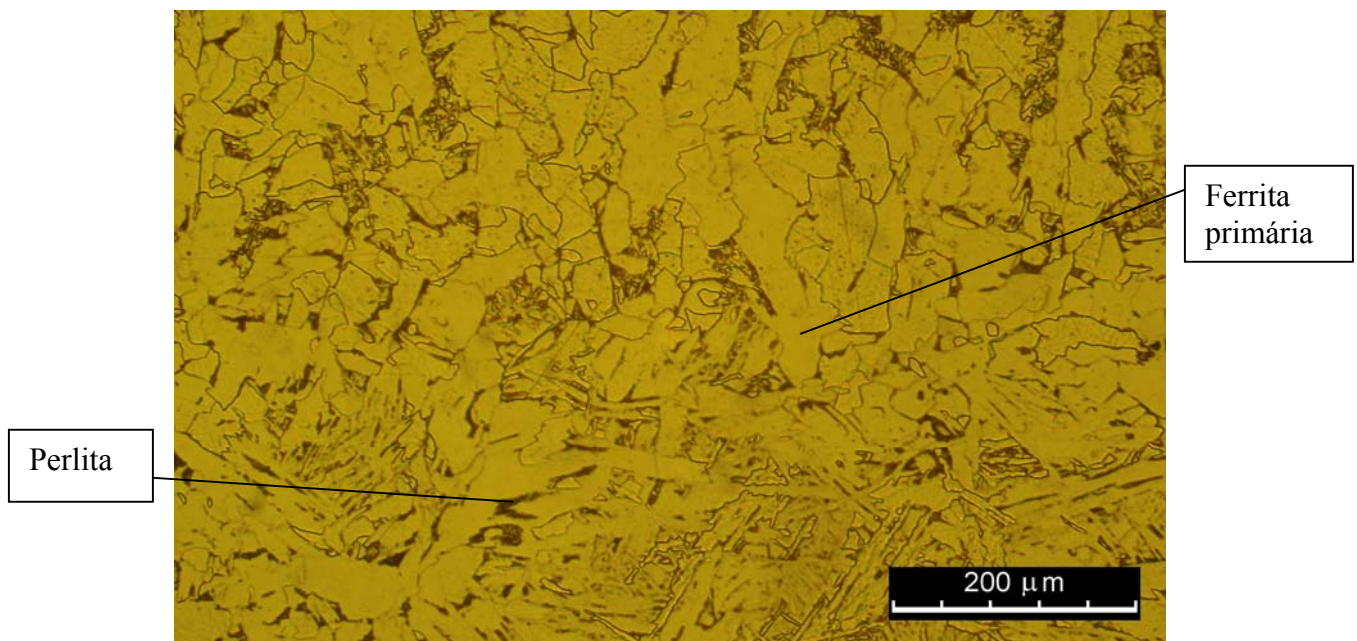


FIGURA 5.17 - Micrografia da chapa “halter” com refrigeração (linha de fusão).

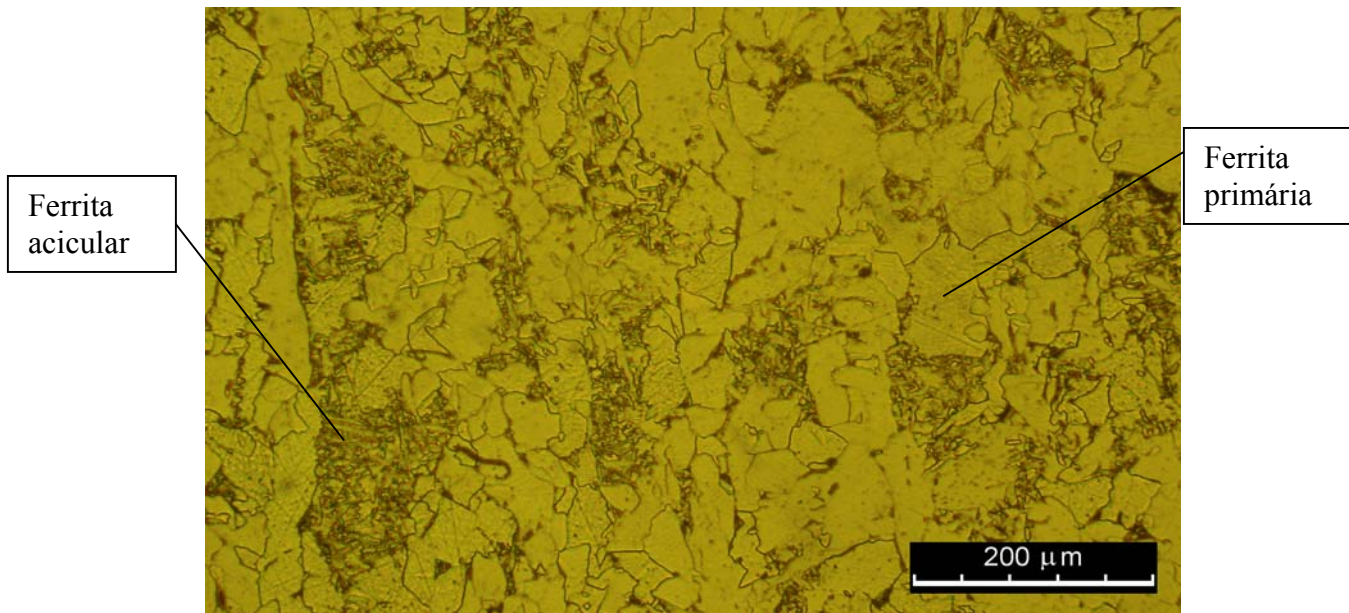


FIGURA 5.18 - Micrografia da chapa “halter” com refrigeração (metal de solda).

Analisou-se os resultados das médias das distorções angulares dos testes com chapas retangulares, chapas “halter” e chapas “halter” com refrigeração, como apresentado na figura 5.20. Pode-se observar que a distorção angular da geometria “halter” (0,075 rad.), foi aproximadamente oito vezes maior que a distorção angular da geometria retangular (-0,005 rad.), após a estabilização das distorções. Com a geometria retangular, o calor teria maior massa para se propagar por condução pela peça, estas regiões mais frias da vizinhança funcionariam como restrições e a distorção angular seria menor, ou seja, a geometria do corpo de prova funciona como agente de restrição à distorção angular (Dong e Tsai, 1996). O calor nas chapas “halter” se propagou de forma mais lenta devido às extremidades da região central que funcionaram como concentradores de temperatura e as partes mais frias, ao qual o calor poderia se propagar eram menores, sendo assim o calor teria menor massa para propagar, resultando em uma maior distorção angular.

Comparando-se a média das distorções angulares das chapas “halter” e “halter” com refrigeração, observa-se que a chapa “halter” com refrigeração teve uma distorção angular aproximada de 0,05 rad., aproximadamente 25% menor que as chapas “halter” que foi de

0,075 rad. como apresentado na figura 5.20. Pois com o resfriamento as tensões térmicas geradas devido ao processo de soldagem, proporcionam uma redução significativa nas tensões compressivas nas extremidades das chapas, que estão afastadas do cordão de solda, ocorrendo também um aumento da largura da zona de tração próximo ao cordão de solda. Isto foi atribuído ao aparecimento de uma zona de compressão ao redor da solda por causa do rápido resfriamento da mesma, gerando uma menor distorção angular da chapa (van der Aa et al., 2005).

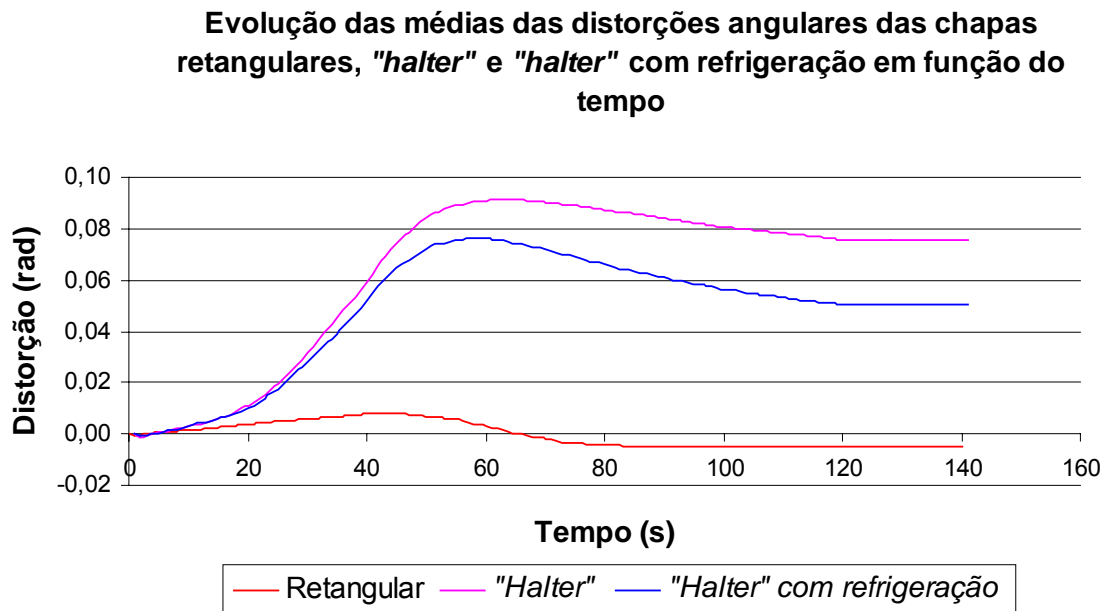


FIGURA 5.20 - Evolução das médias das distorções angulares em função do tempo (Chapas retangular, "halter" e "halter" com refrigeração).

INCERTEZA DE MEDIÇÕES

O dispositivo empregado para medir a distorção angular mostrou-se repetitivo, quando os parâmetros de soldagem não são modificados. O perfeito posicionamento dos corpos de prova na bancada e travamento com “sargentos”, podem ter gerado pequenas variações entre os testes, resultando em pequenas fontes de erros, aproximadamente 2 mm de incerteza. A projeção do laser no papel milimetrado iluminou uma região circular de aproximadamente 4mm de diâmetro sendo que a leitura da distorção foi feita em milímetros da parte central mais escura e em intervalos de 1s, considerou-se uma incerteza de medição dos resultados aproximada de 5mm. A fixação do papel milimetrado no anteparo com fita adesiva também pode ter causado incerteza de medição de 5mm aproximadamente. A temperatura ambiente pode ter influenciado nos resultados, pois alguns testes foram feitos em dias diferentes.

6- CONCLUSÕES

1- De acordo com os testes experimentais observou-se que as geometrias dos corpos de prova influenciam nas distorções angulares de chapas soldadas. Isto pode ser verificado comparando-se os resultados dos testes 1 a 10 em média (0,005 rad.) com os testes 11 a 20 em média (0,075 rad.), após a estabilização da distorções angulares das chapas.

2- O resfriamento forçado da poça de fusão com dióxido de carbono durante a soldagem em chapas de aço de baixo carbono produziu em média uma distorção angular de (0,05 rad.), ou seja, uma diminuição de 25% em relação à chapa “*halter*” sem refrigeração em média (0,075 rad.).

3- O resfriamento da poça de fusão durante a soldagem resultou em mudanças na microestrutura do metal de solda, mas não nos seus constituintes.

7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1 - Utilizar o resfriamento forçado da poça de fusão com dióxido de carbono juntamente com um estudo de sequências de soldagem para que se diminua o aporte térmico diminuindo as distorções durante a soldagem;
- 2 - Obter um modelo matemático capaz de prever a evolução da distorção angular;
- 3- Monitorar a evolução da distorção angular em diferentes materiais e diferentes espessuras, com velocidades diferentes de soldagem e comprimento de cordões diferentes;
- 4 - Utilizar outro tipo de sensor ou equipamento capaz de monitorar a evolução da distorção angular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aa, E. M. van der, M.J.M. Hermans, M.J.M, Richardson, I.M. Welding with a Trailing Heat Sink: How to Optimise the Cooling Parameters? Netherlands Institute for Metals Research, Delft, The Netherlands and Delf University of technology, Delft, the Netherlands, **2005**.

Anderson, Tony. Thermal distortion in aluminum welded structures. Welding Journal 82 (2): 28-30, **2003**.

Antunes, A.E.B., Tensões residuais na soldagem; aspectos básicos, J. Braz. Soc. Mechanical Sciences, (17) 4, p.394-403, **1995**.

AWS. Welding Handbook; Welding technology. Miami: American Welding Society, 8° ed. V.1, **1987**.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Miami [EUA]. Welding Handbook; Welding Technology. 8° ed. [s.n.]: V.1, 638p., **1991**.

Chang, I. H. Analysis and control of root gap during butt welding. Ph.D. thesis, M.I.T., Cambridge, Mass, **1988**.

Conrardy, C. and Dull, R. Control of distortion in thin ship panels. Journal of Ship Production 13(2):85-92, **1997**.

DeGramo, E.P., Merian, J.L., and Jonassen, F., “The effect of weld length upon the residual of unrestrained butt welds” , Welding Journal, (25) 8, Research Supplement, 485s-486s, **1946**.

Dong, Y. and Tsai, C.L. Finit element modeling of residual stresses in pipe girth welds. AWS Convection: Welding Mechanic and Design, p.44-52, **1996**.

Duffy, D.K., “Distortion removal in structural weldments”, M.S. Thesis, M.I.T., May **1970**.

Felizardo, I. Estudo da evolução dos campos de temperatura gerados durante a soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 110p. Dissertação de mestrado, Departamento de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, **1997**.

Guan, Q., Zhang, C.X., and Guo, D. L, Dynamic control of welding distortion by moving spot heat sink, *Welding in the World*, 33(4), 308-313 (**1994**).

Guyot, F., “A note on the shrinkage and distortion of welded joints”, *Welding Journal*, 26(9), 519s-529 (**1947**).

Hashimoto, T. and Fujishiro, Y., “An experimental of line heating designed with the table orthogonal array L (2^3)”, *Journal of the society of Naval Architects of Japan*, 104 201-225 (**1959**).

Iwamura, Y., “Reduction of transverse shrinkage in aluminum butt welds”, M.S. Thesis, M.I.T., May **1974**.

Johnson, E. K., “Study of flame heating of steel plate”, Thesis for M.S. degree, M.I.T., may, **1971**.

Jung, G.H. and Tsai, C.L. Fundamental studies on the effect of distortion control plans on angular distortion in fillet welded T-joints. *Welding Journal* 83 (7): 213-s to 223-s, **2004**.

Kihara, H., Watanabe, M., Masubuchi, K., and Satoh, K. Researches on welding stress and shrinkage distortion in Japan. 60 th. Anniversary Series of the Society of Naval Architects of Japan (**1959**).

Kim, S.-D., NA, S. –J. Effect of weld pool deformation on weld penetration in stationary gas tungsten arc welding, *Welding journal*, Miami, p.174-193, May, **1992**.

Lee, H.W. and Kang, S.W. The relationship between residual stresses and transverse weld cracks in thick steel plate. *Welding Journal* 82 (8): 225-s to 230-s, **2003**.

Lucas, B. Et al. Distorção : técnicas corretivas. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, n.9, p.11-13, Set. **1998**.

Marques, P.V. Tecnologia da soldagem. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, p. 77-81, **1991**.

Masubuchi, K. Analysis of welded structures- residual stresses, distortion and their consequences. Oxford, England / New York, USA: Pergamon Press, **1980**.

Masubuchi, K., “Research activities examine residual stresses and distortion in welded structures”, *Welding Journal*, Cambridge, Mass., p.41 – 47, Dec. **1991**.

Matsui, S., “Investigation of shrinkage, restraint stresses and cracking in arc welding” Ph.D. Thesis at Osaka University, 1964 (in Japanese) *input* Masubuchi, **1980**.

Miyachi, H. Control of thermal forces acting on tack welds during butt welding. Ph.D. thesis, M.I.T., Cambridge, Mass, **1989**.

Michaleris, P. and Sun, X. Finite element analysis of thermal tensioning techniques mitigating weld buckling distortion *Welding Journal*, Miami, p.451-456, Nov., **1997**.

Modenesi, P.J., “Efeitos mecânicos do ciclo térmico”, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, p.3, **2001**.

Naka, T., Shrinkage and Cracking in Welds, Tokyo, Komine Publishing Co., 1950 (in Japanese) *input* Masubuchi, **1980**.

Okumura, T. and Taniguchi, C. Engenharia de soldagem e aplicações. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 456p. Cap.5, p.166: Distorções e tensões residuais devido à soldagem, **1982**.

Park, S.W. In-process control of distortion during aluminum butt welding. M.S. thesis, M.I.T., Cambridge, Mass, **1988**.

Prasad, N.Silva and Narayanan, T.K. Sankara. Finite Element Analysis of Temperature Distribution during Arc Welding Using Adaptive Grid Technique. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Tecnology, Madras, India, **1996**.

Radaj, Dieter. Heat effects of welding.[s.1]: Springer- Verlag, **1992**.

Rogana, W.G. Monitoramento da distorção angular em solda sobre chapa engastada de aço carbono. Belo Horizonte: UFMG, 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, área processos de Fabricação) – Centro de Pós-Graduação da Escola de engenharia da UFMG, **1999**.

Sasayama, T. , Masubuchi, K., and Moriguchi, S., “Longitudinal deformation of a long beam due to fillet welding”, Welding Journal, 34, 581s-582s (**1955**).

Satoh, K., Matsui, S., Terai, K., and Iwamura.,Y., “Water cooling effect on angular distortion caused by process of line heating in steel plates”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 126, 446-458 (**1969**).

Tanaka, Jinkichi. Decrease in residual stresses, change in mechanical properties and cracking due to stress relieving heat treatment of HT80 steel. Technical Research Centre, Nippon Kokan K, K. 1-1 Suehire-cho, Tsurumi-Ku, Yokohama, Japan, **1972**.

ANEXO

Gráficos das distorções angulares em função do tempo das chapas retangulares
Testes 1 a 10

Chapa retangular 1

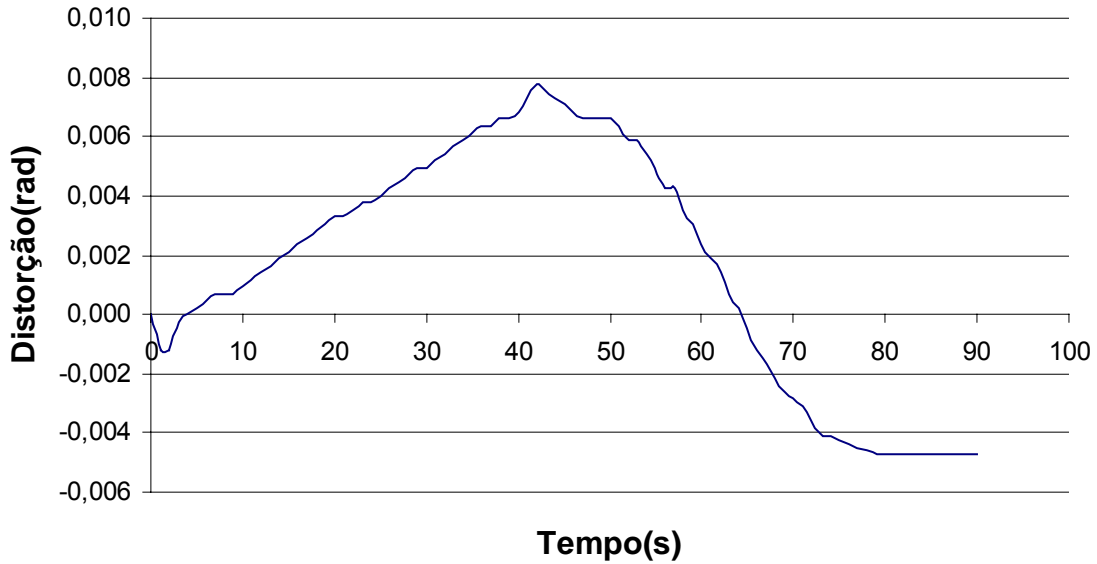


Figura A1 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa retangular 2

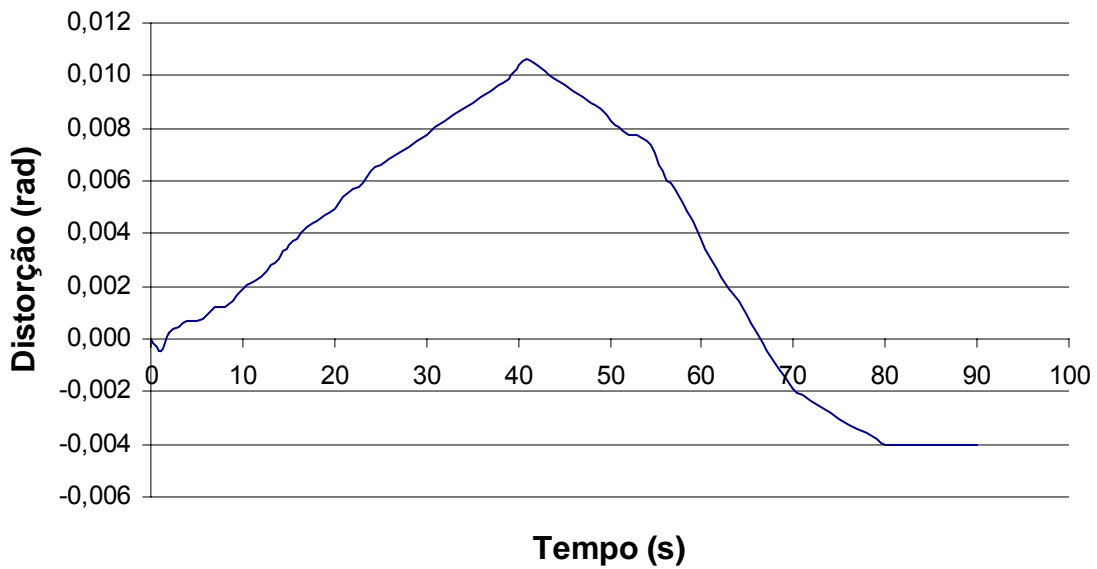


Figura A2 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa retangular 3

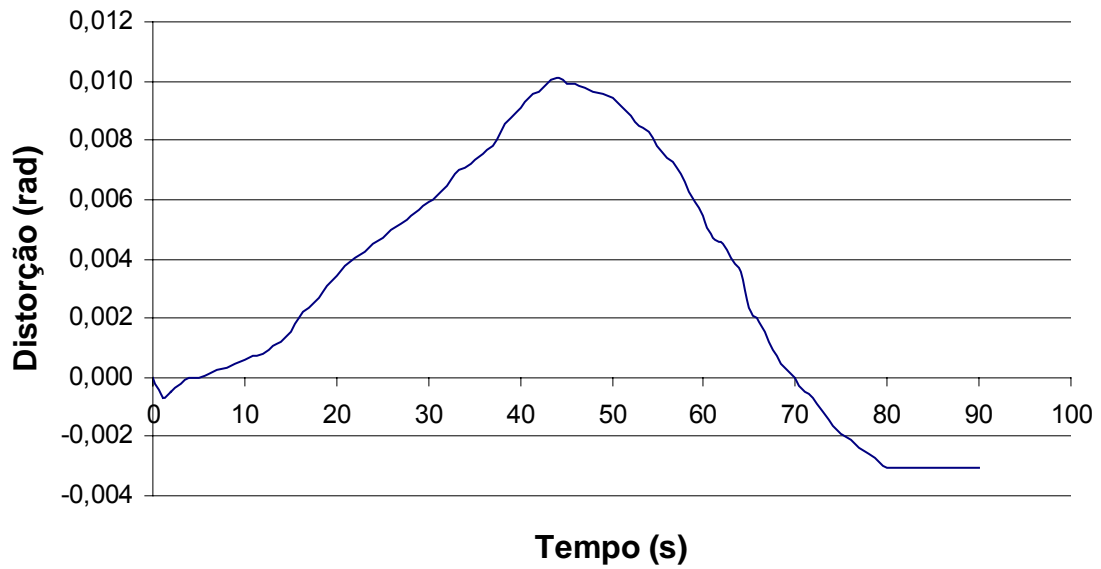


Figura A3 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa retangular 4

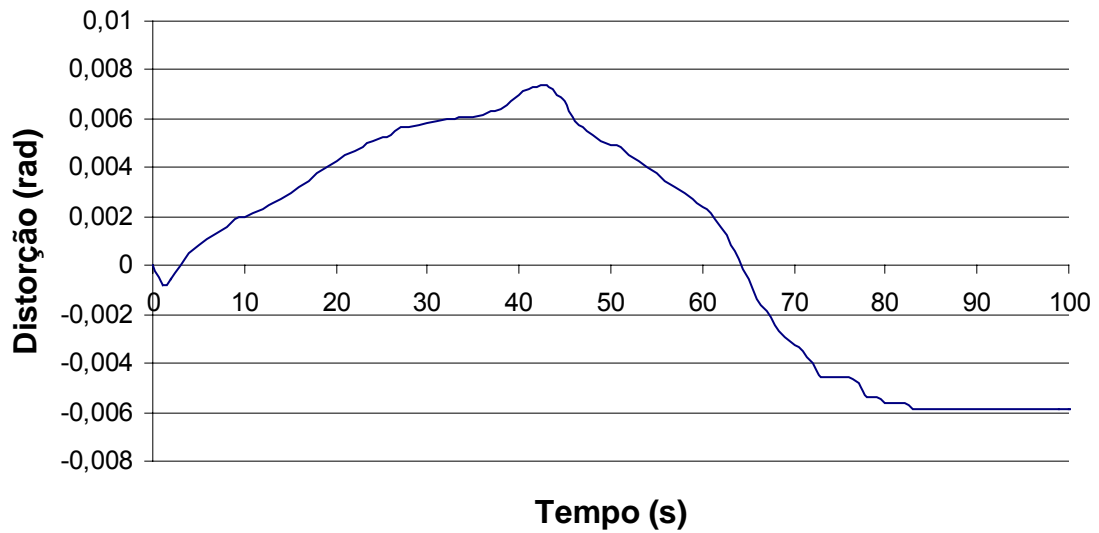


Figura A4 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa retangular 5

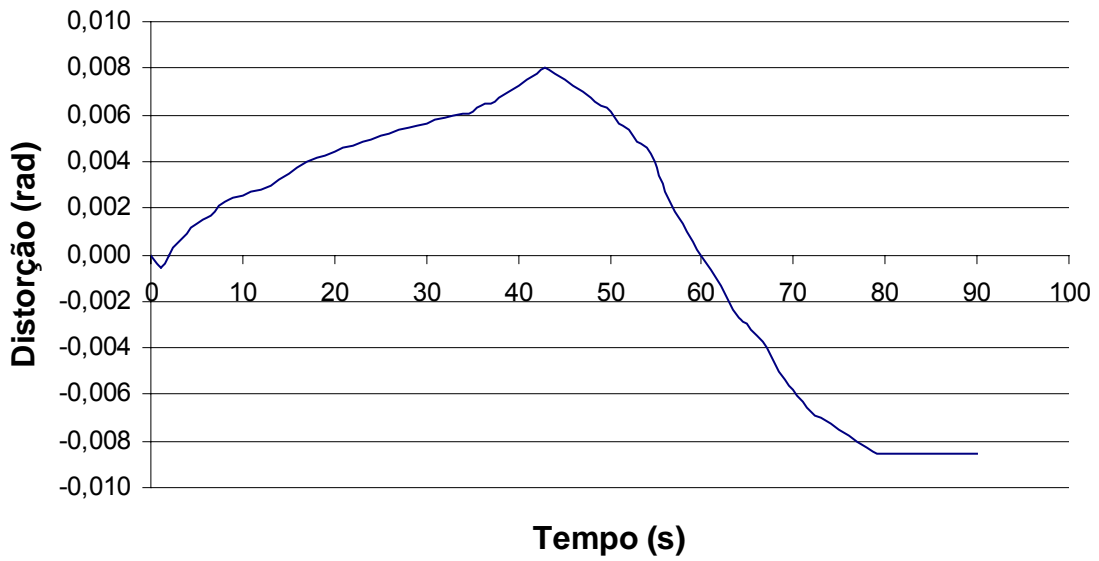


Figura A5 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa retangular 6

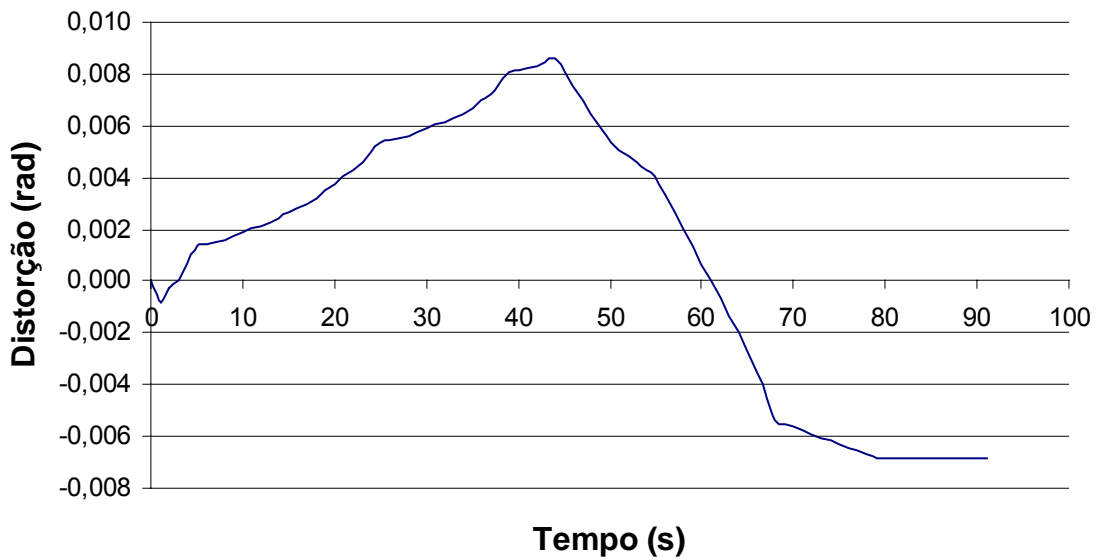


Figura A6 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa retangular 7

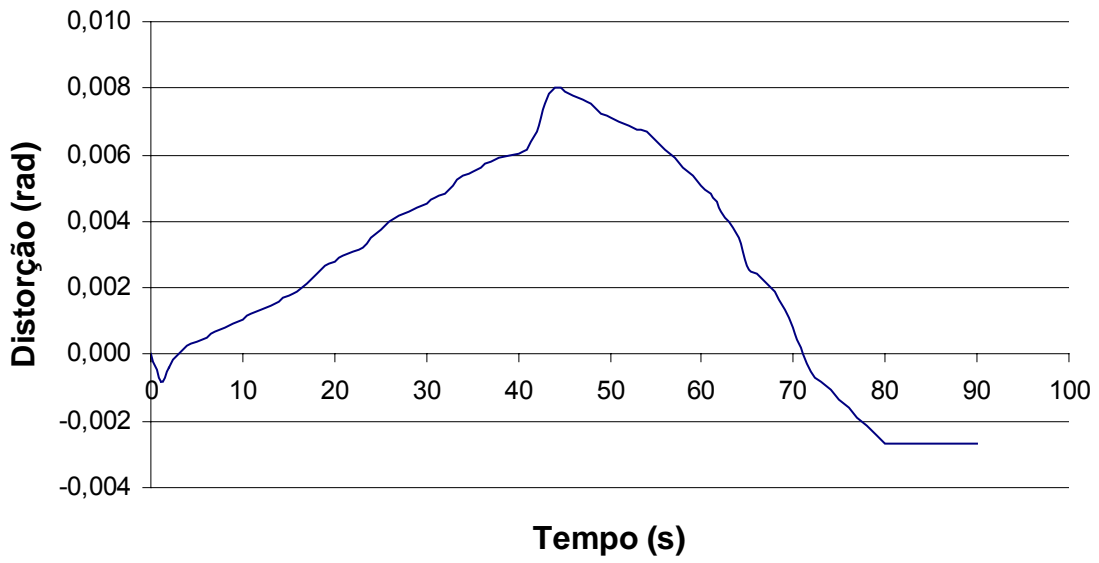


Figura A7 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa retangular 8

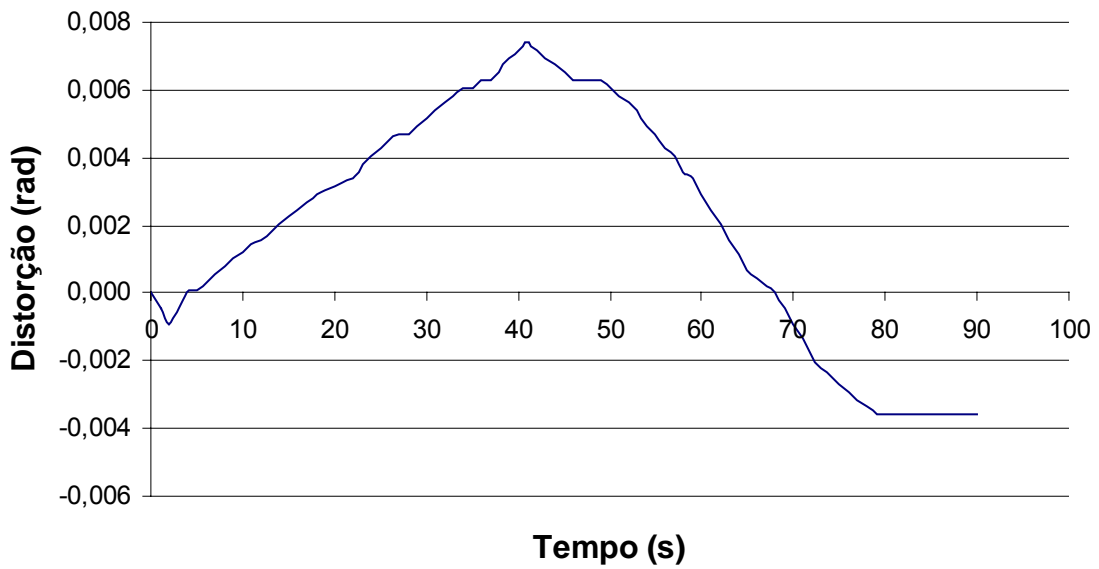


Figura A8 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa retangular 9

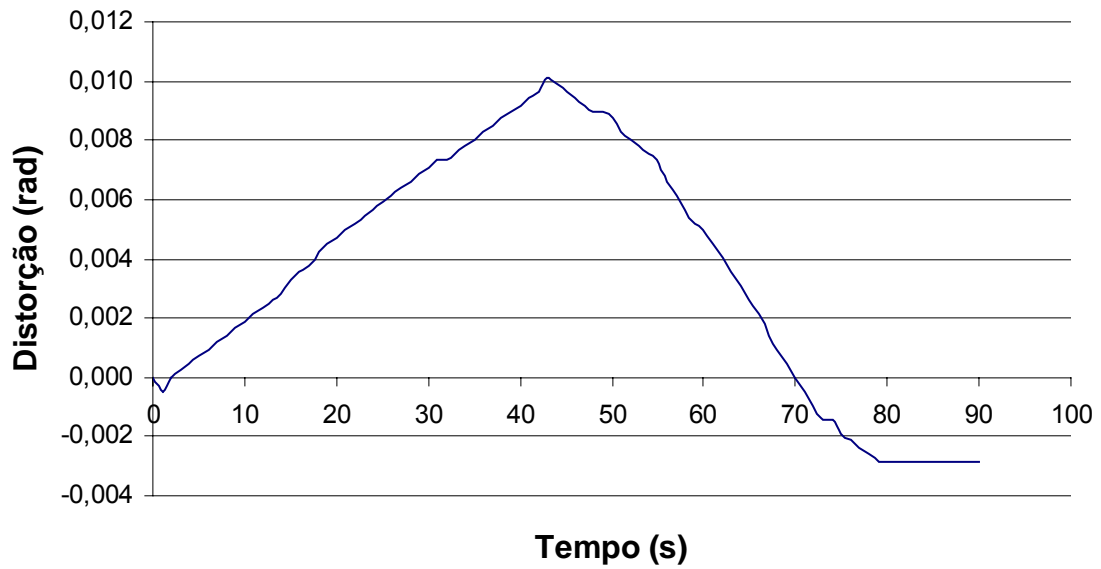


Figura A9 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa retangular 10

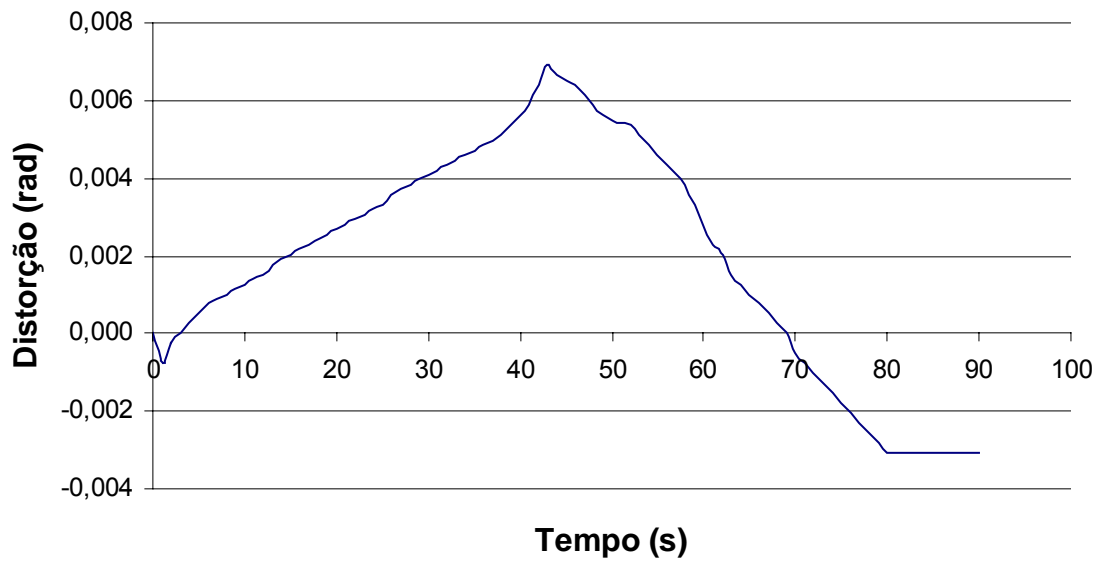


Figura A10 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Gráficos das distorções angulares em função do tempo das chapas "halter"
Testes 11 a 20

Chapa "halter" 1

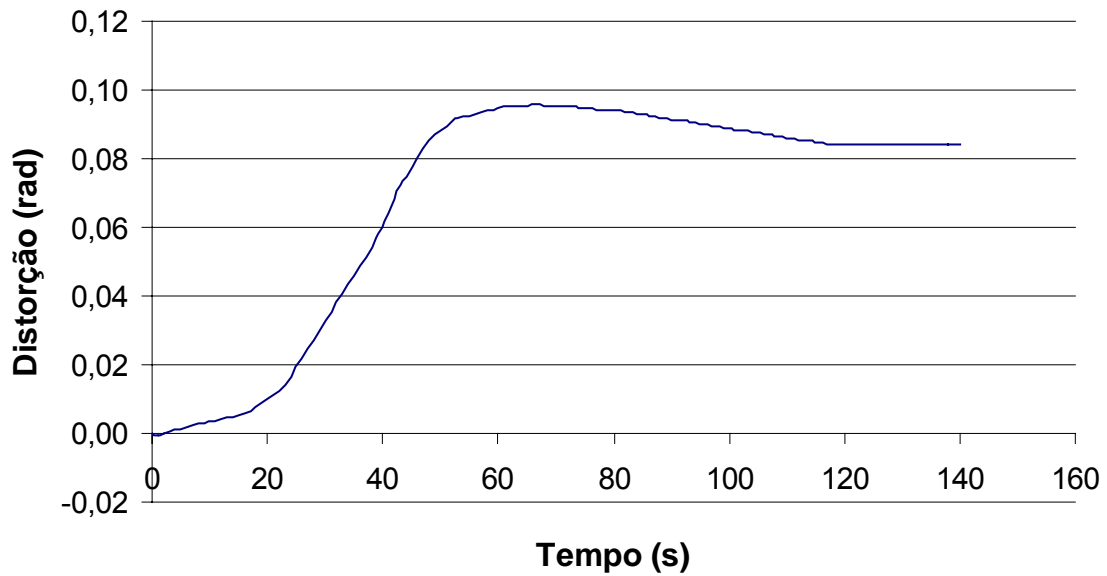


Figura A11 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" 2

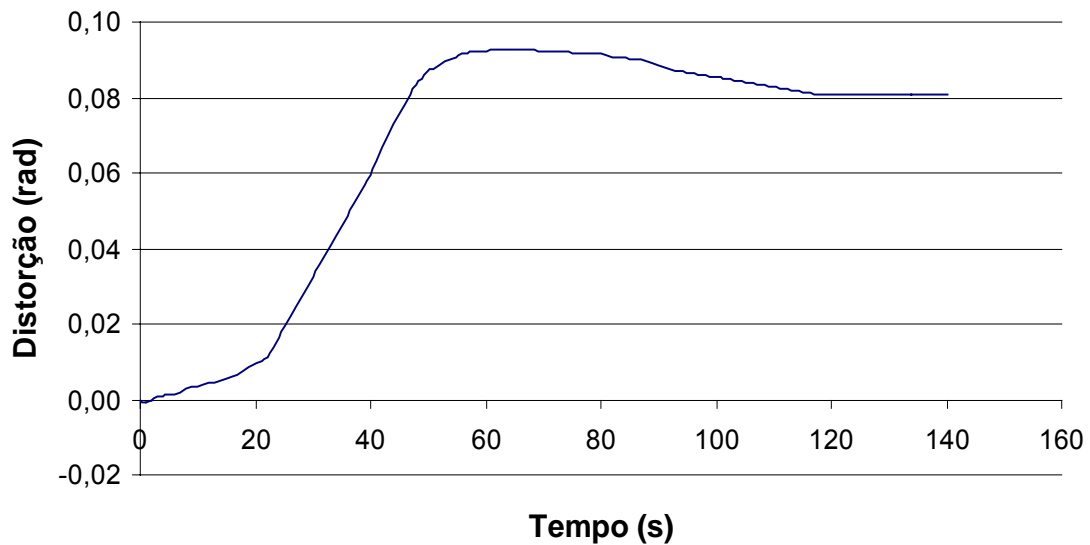


Figura A12 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" 3

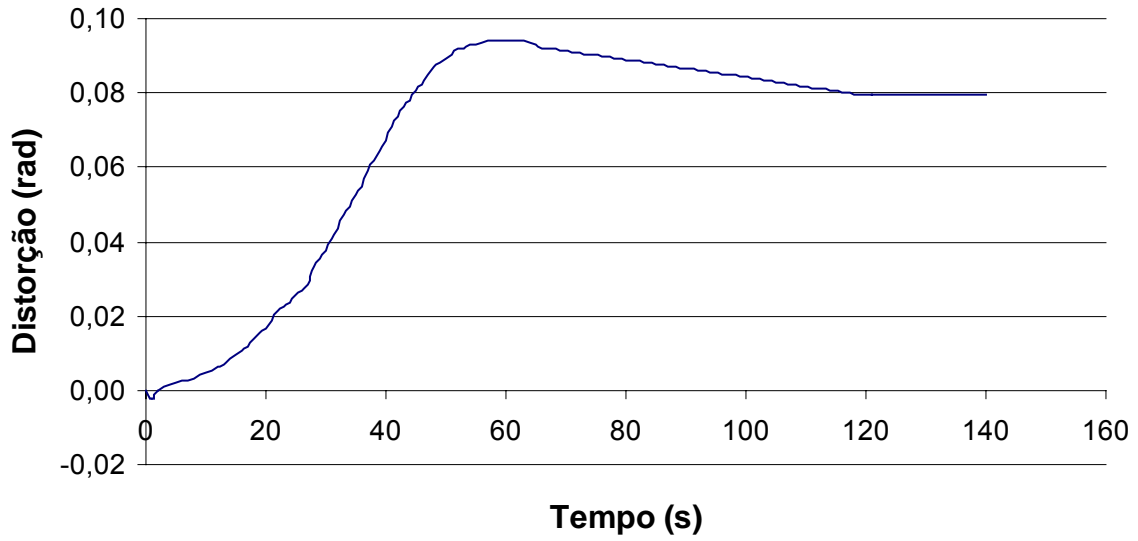


Figura A13 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" 4

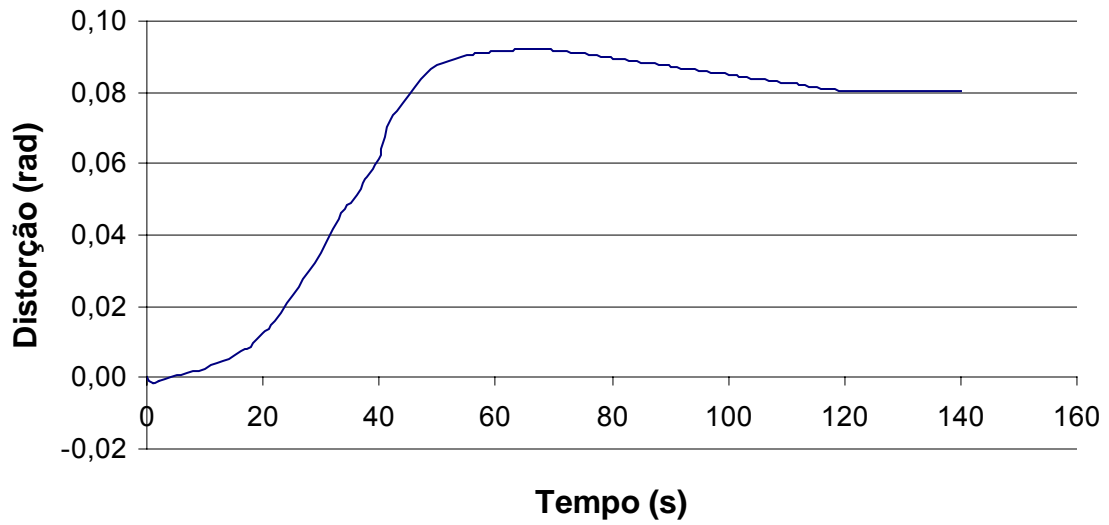


Figura A14 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" 5

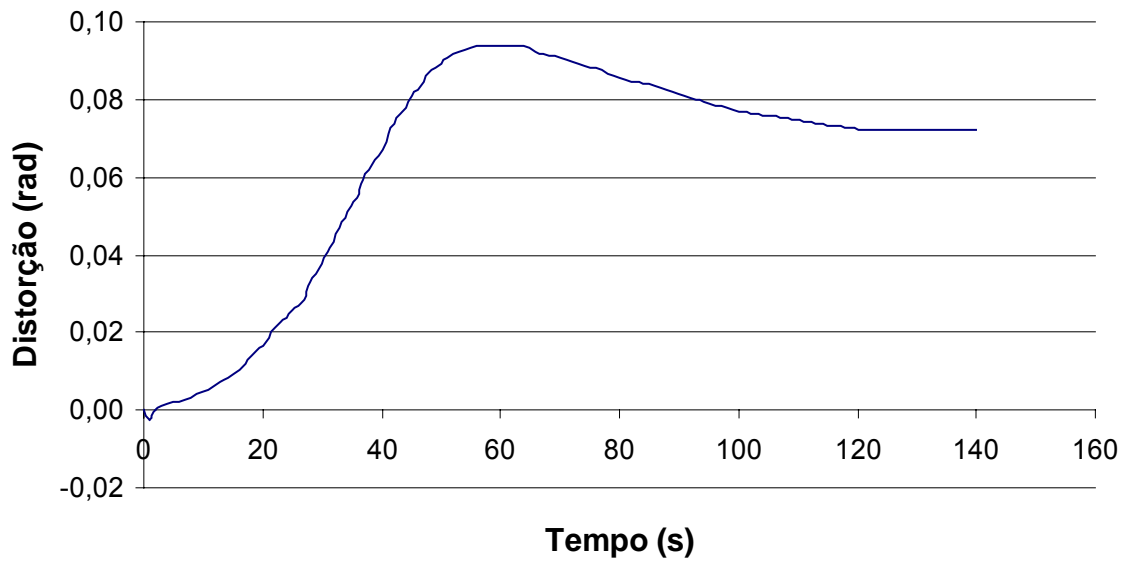


Figura A15 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" 6

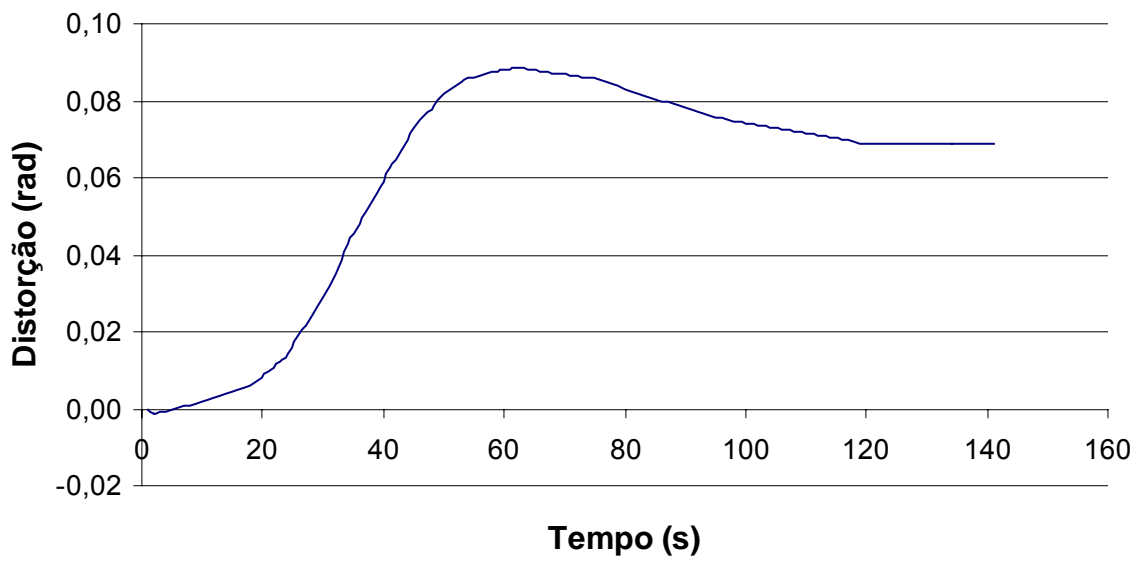


Figura A16- Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" 7

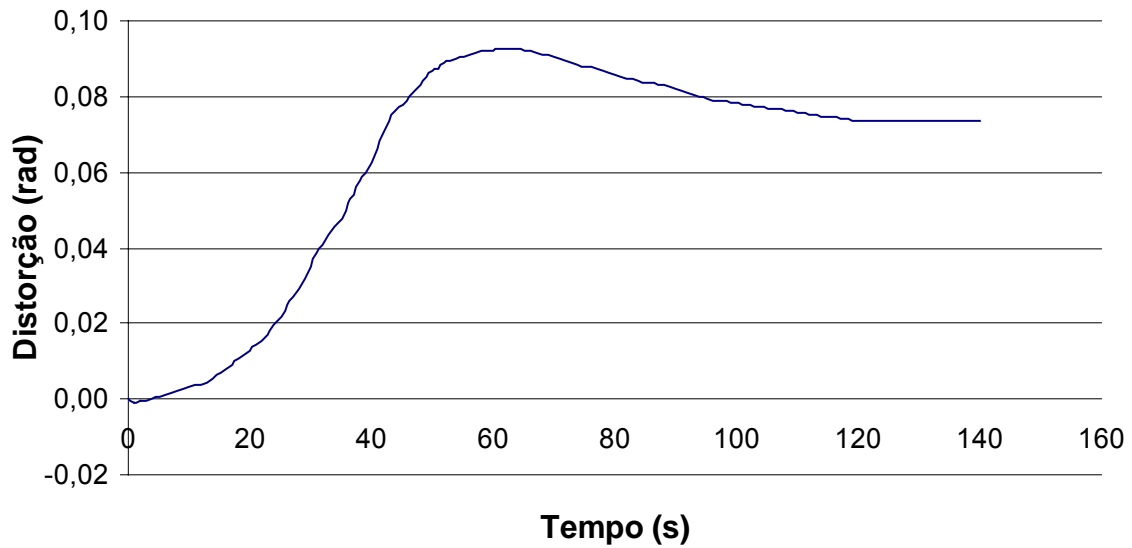


Figura A17 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" 8

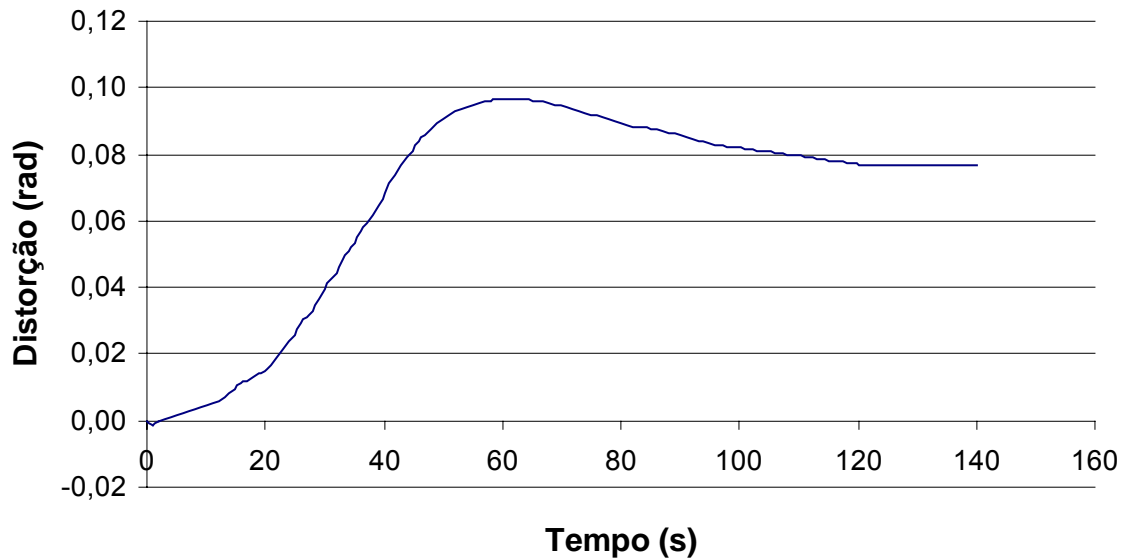


Figura A18 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" 9

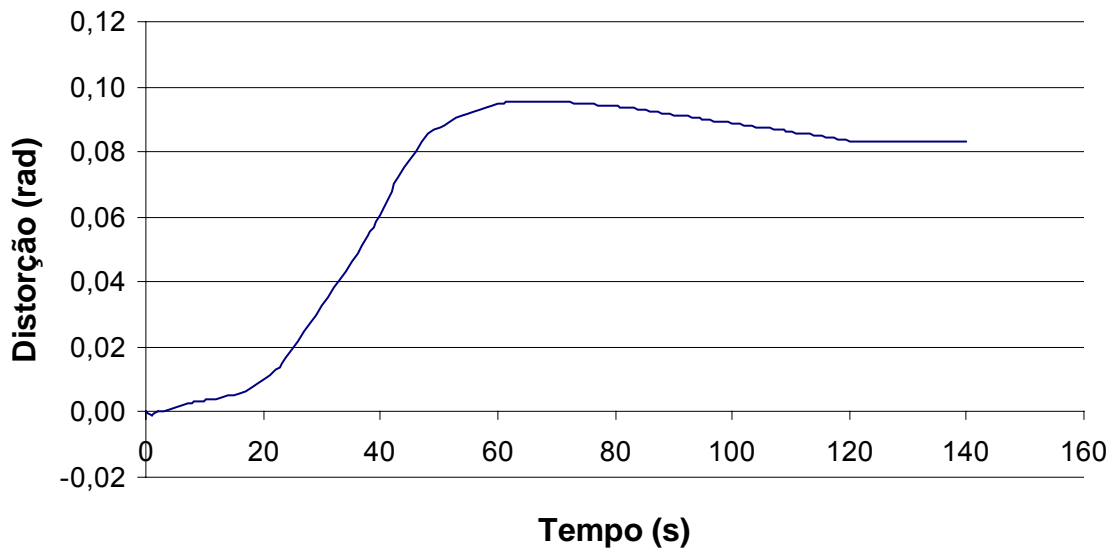


Figura A19 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" 10

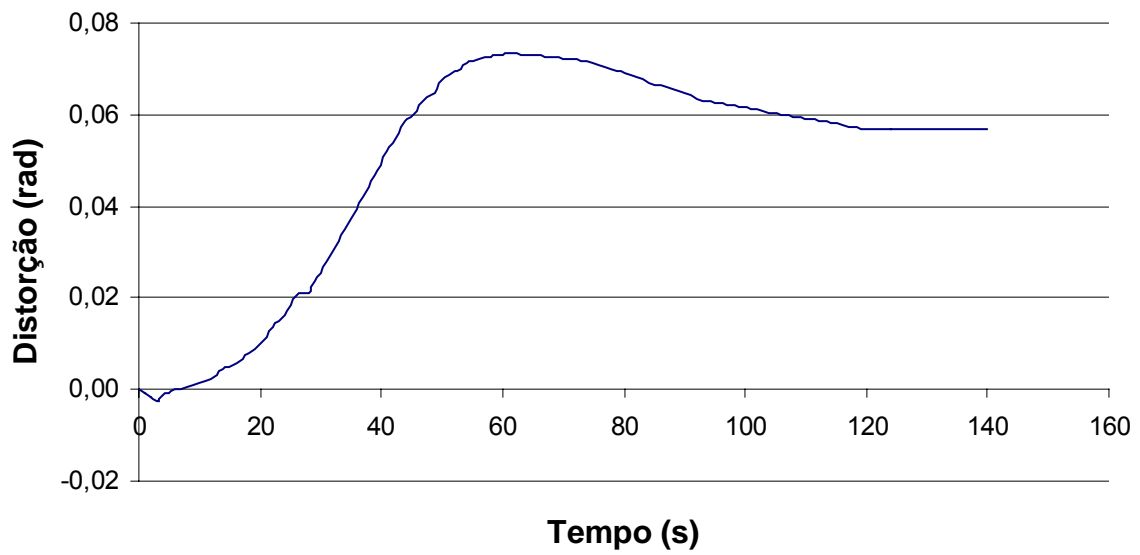


Figura A20 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Gráficos das distorções angulares em função do tempo das chapas "halter" utilizando refrigeração forçada da poça de fusão com dióxido de carbono
Testes 21 a 30

Chapa "halter" refrigerado 1

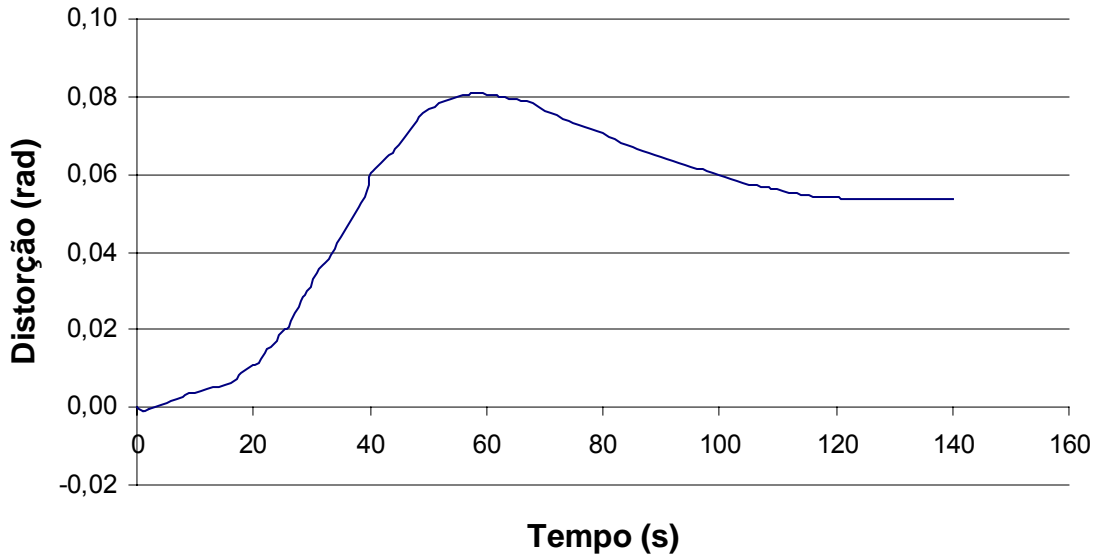


Figura A21 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" refrigerado 2

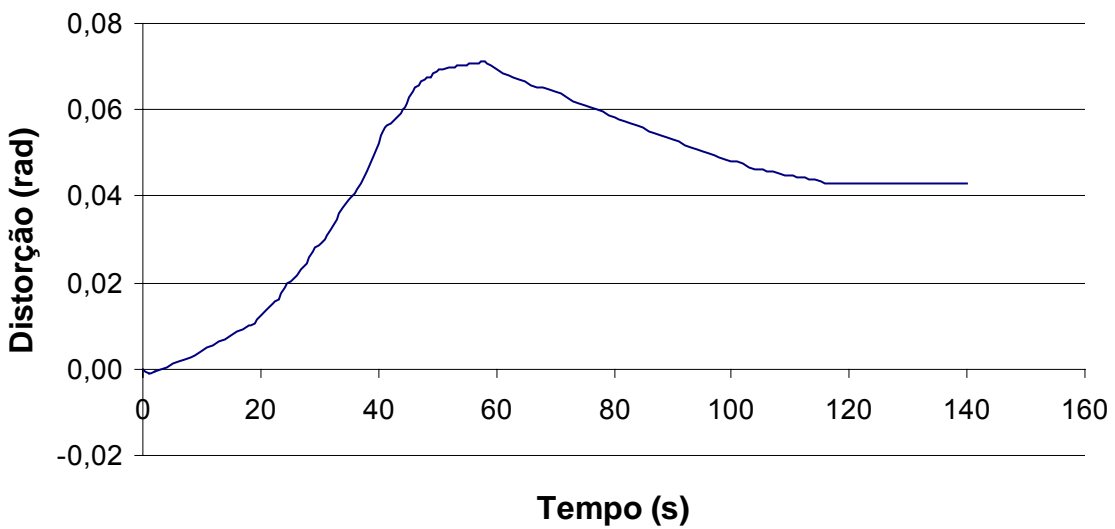


Figura A22 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" refrigerado 3

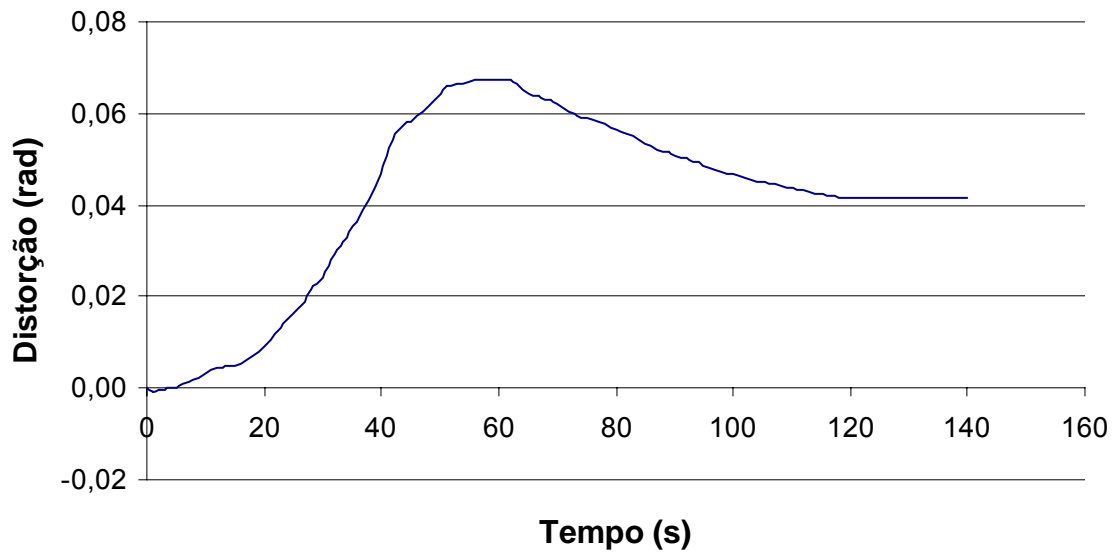


Figura A23 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" refrigerado 4

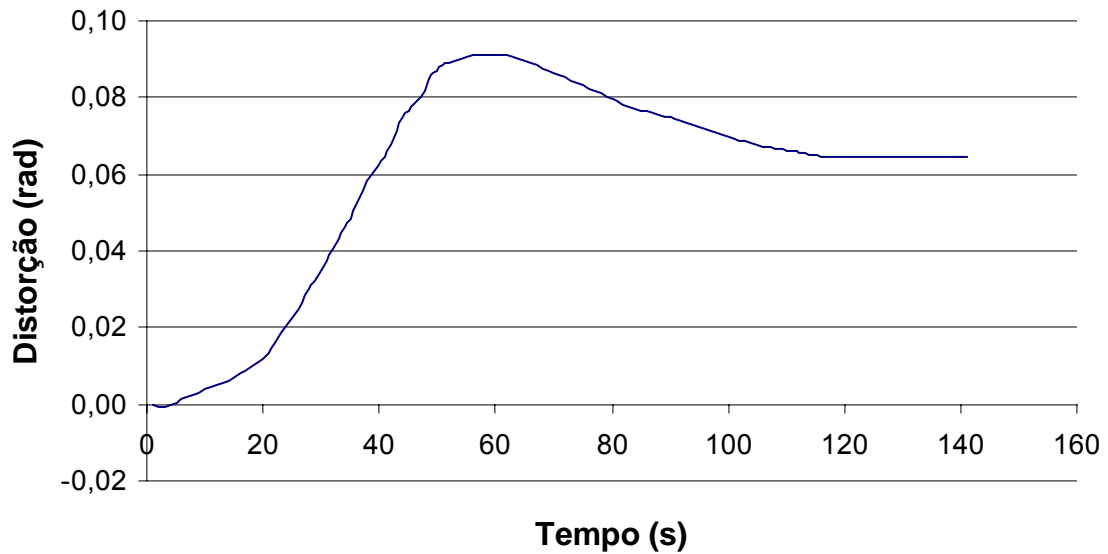


Figura A24 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" refrigerado 5

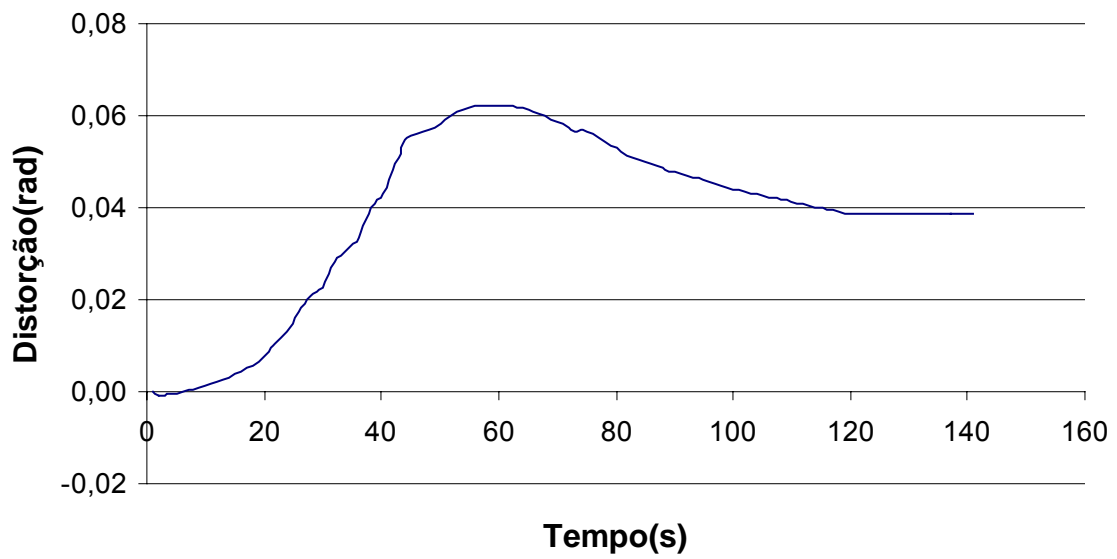


Figura A25 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" refrigerado 6

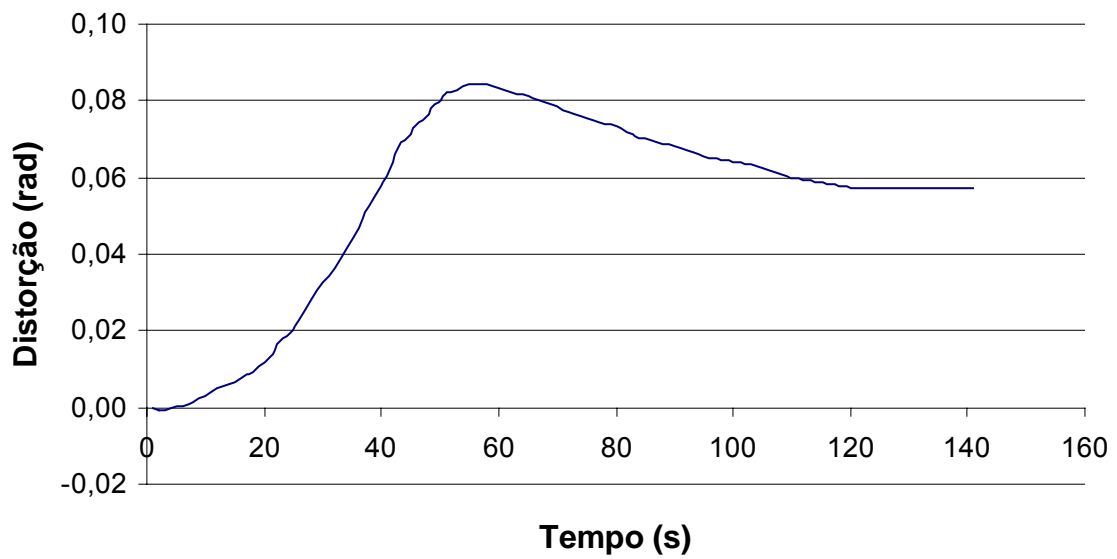


Figura A26 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" refrigerado 7

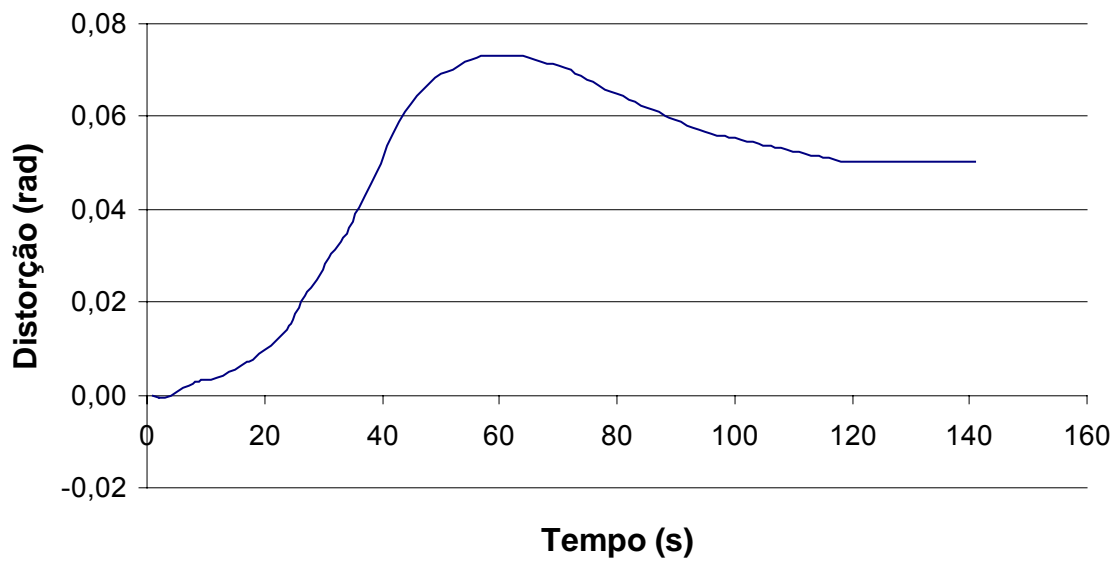


Figura A27- Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" refrigerado 8

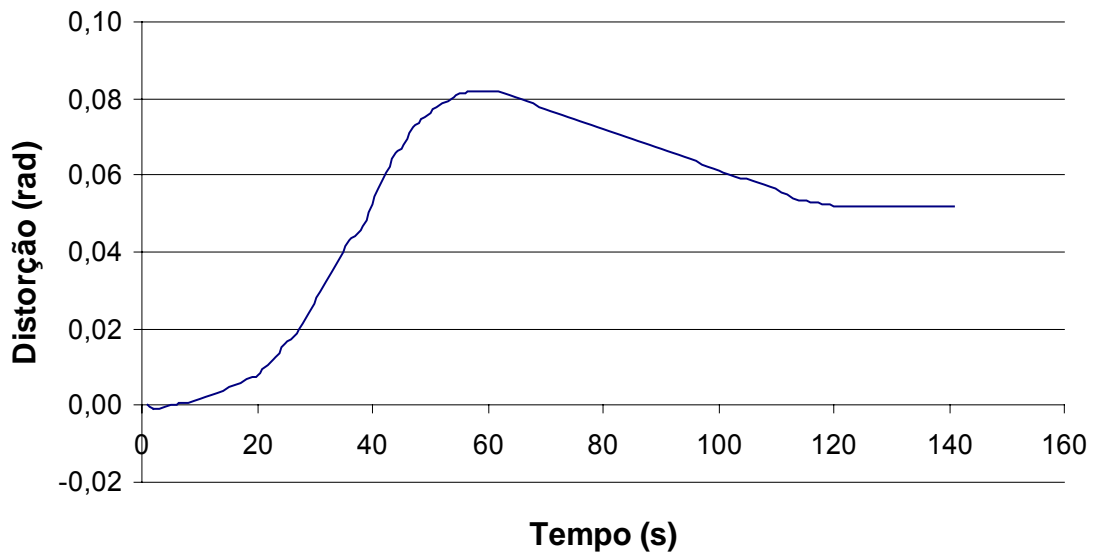


Figura A28 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" refrigerado 9

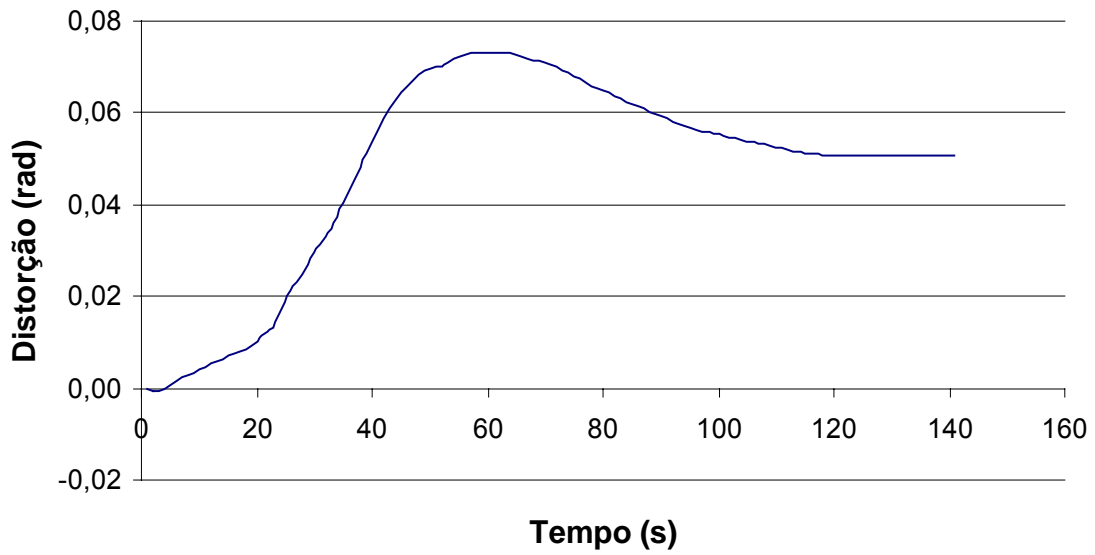


Figura A29 - Evolução da distorção angular em função do tempo

Chapa "halter" refrigerado 10

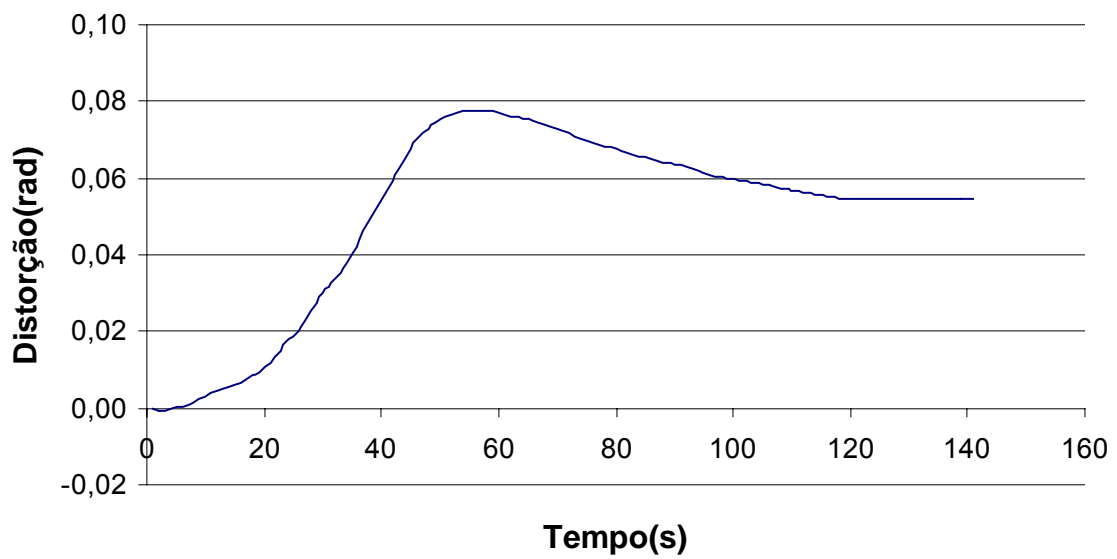


Figura A30 - Evolução da distorção angular em função do tempo

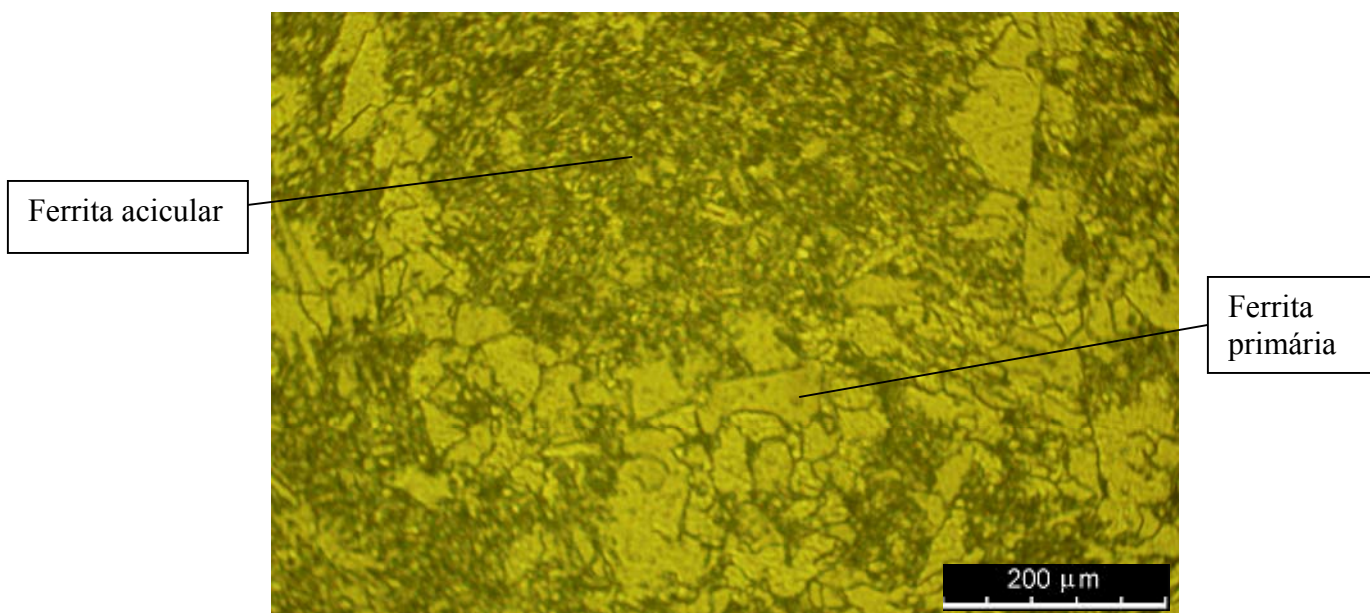


Figura A31 - Micrografia da chapa retangular 2 (metal de solda)

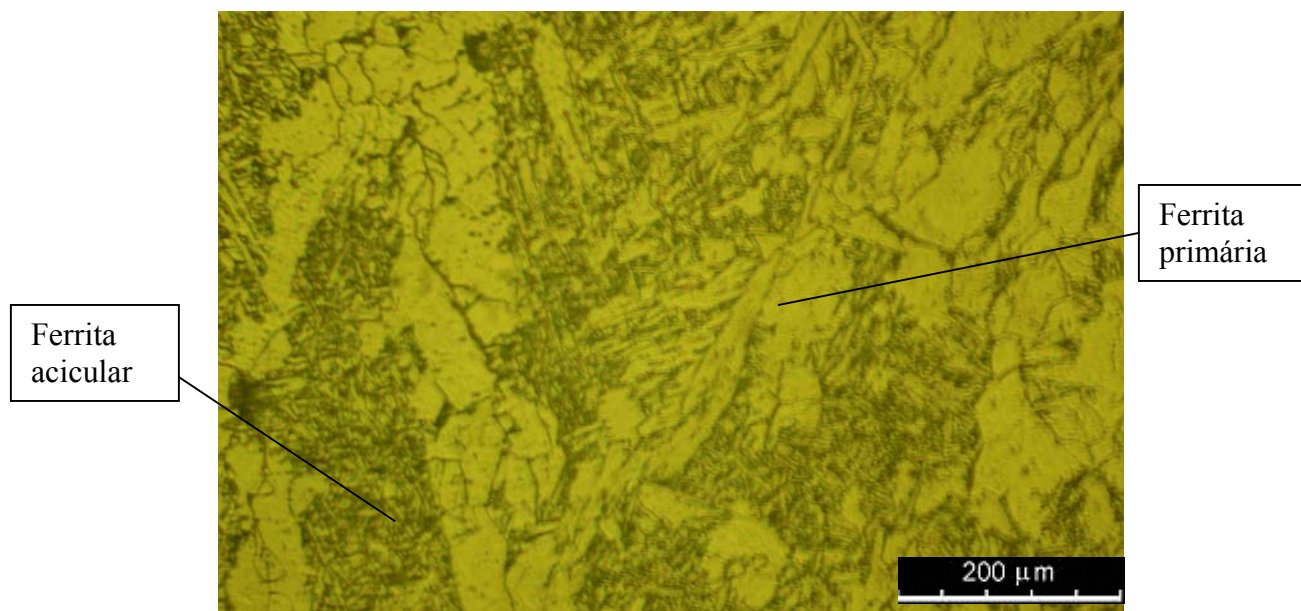


Figura A32 - Micrografia da chapa retangular 3 (metal de solda)

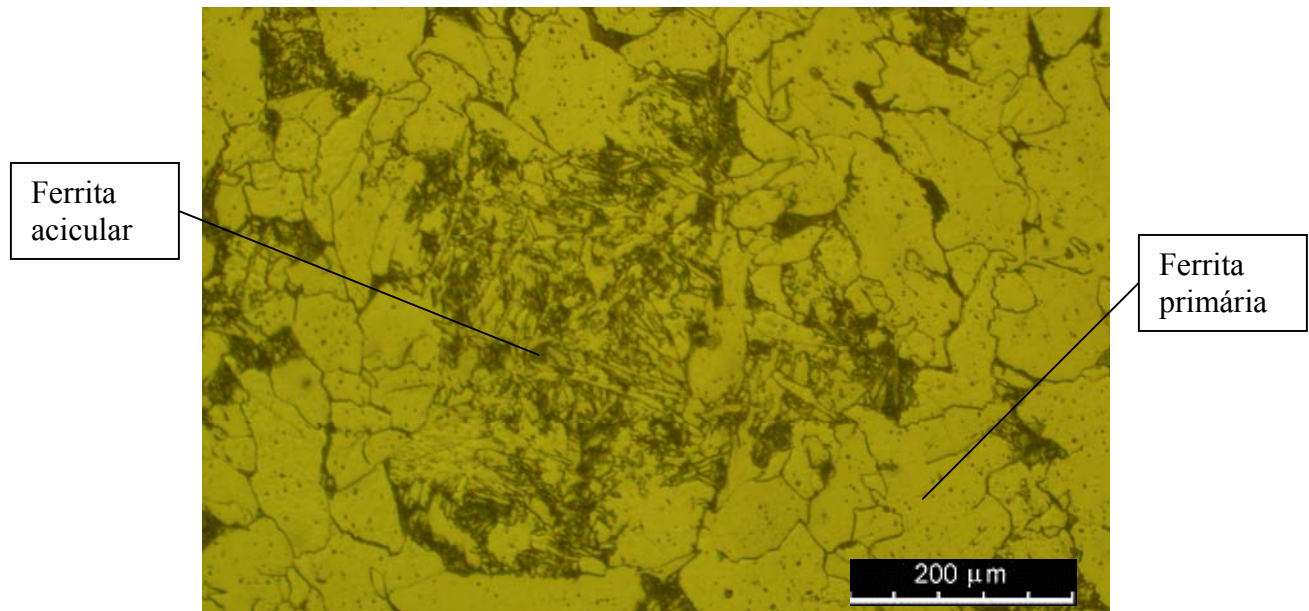


Figura A33 - Micrografia da chapa "halter" 2 (metal de solda)

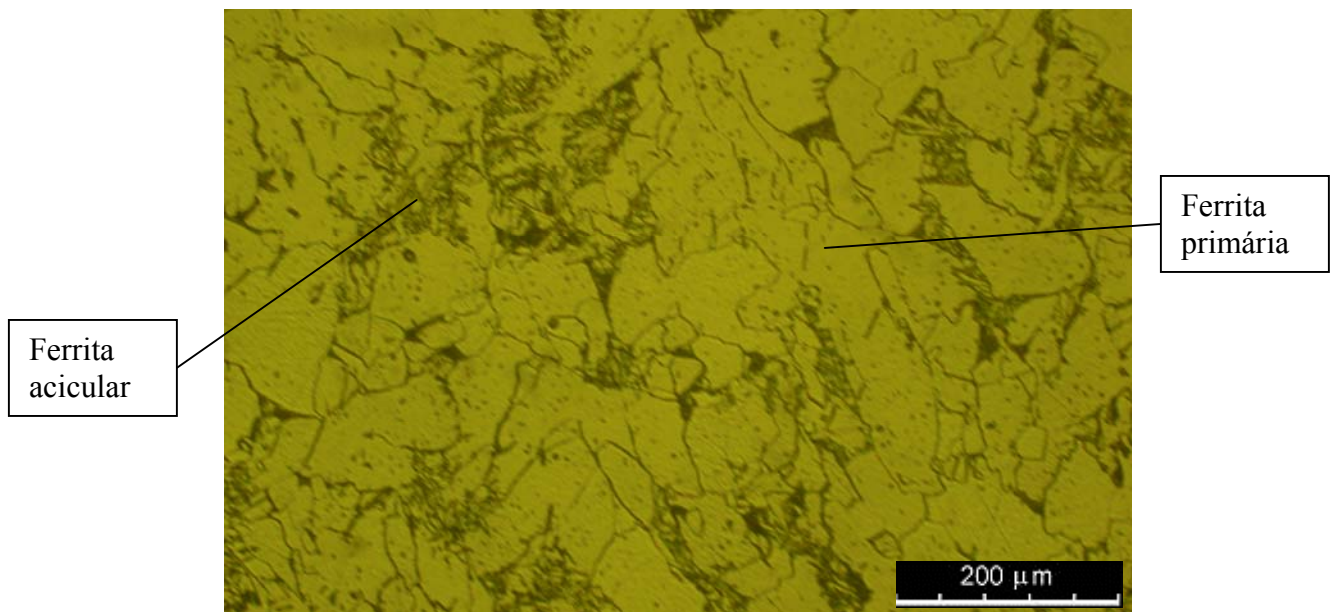


Figura A34 - Micrografia da chapa "halter" 3 (metal de solda)

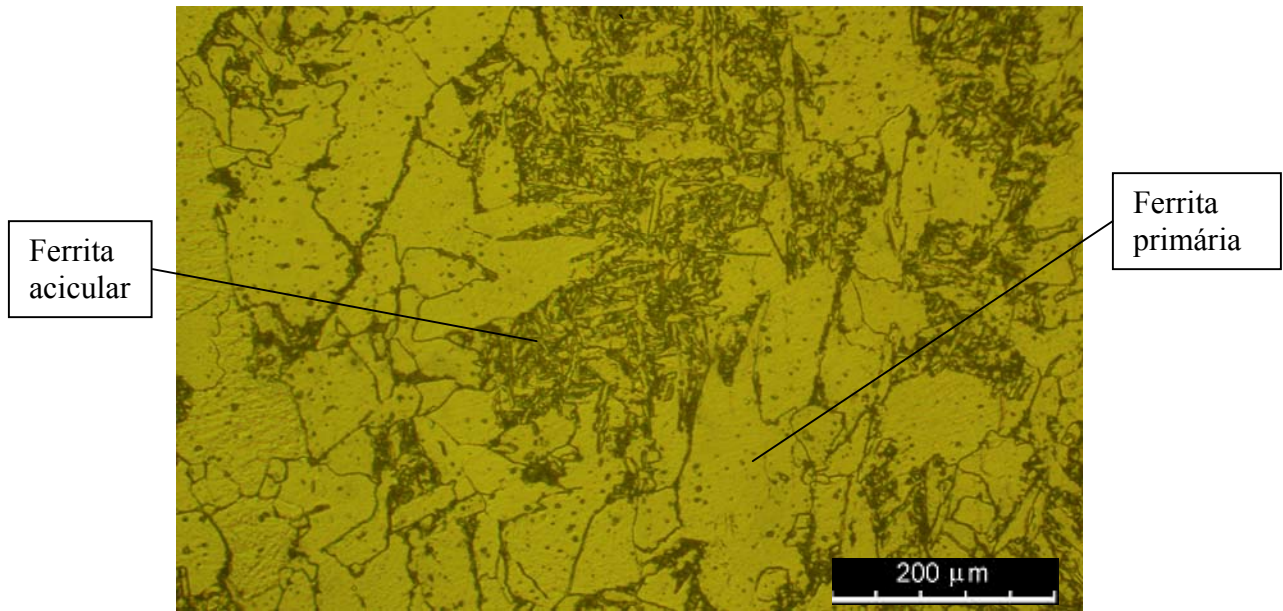


Figura A35 - Micrografia da chapa “halter” com refrigeração 2
(metal de solda)

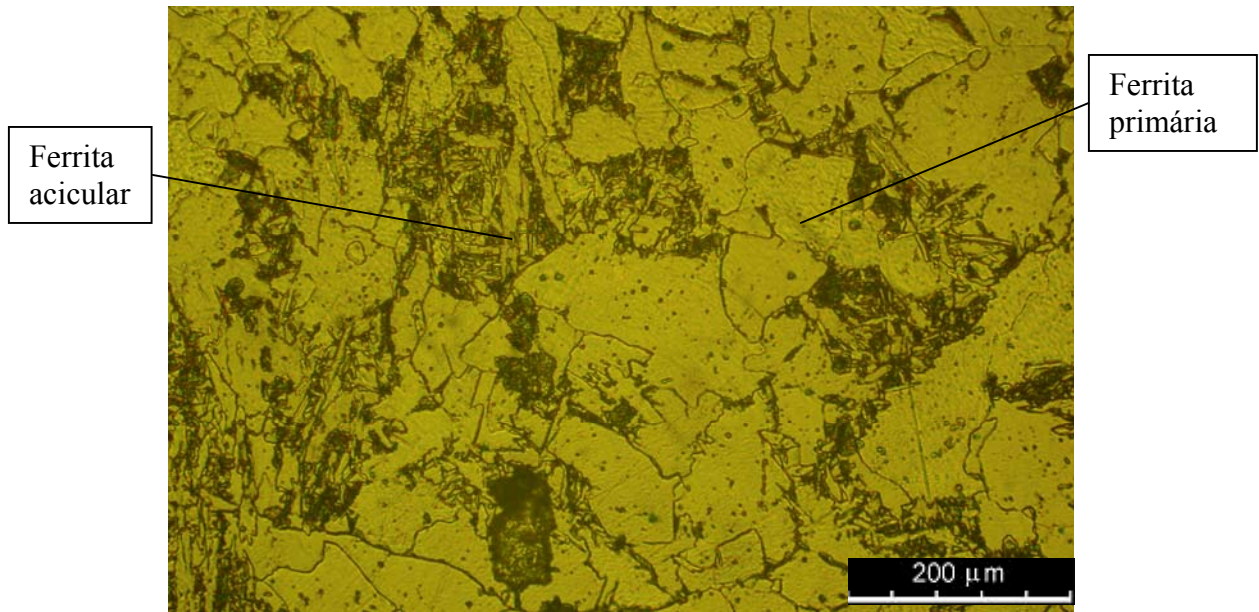


Figura A36 - Micrografia da chapa “halter” com refrigeração 3
(metal de solda)