



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDSON FERNANDO PEREIRA

**ESTUDO DO USO DA LINHA DE CALOR PARA CORREÇÕES
DAS DEFORMAÇÕES DE SOLDAGEM EM PAINÉIS NAVAIS**

Recife
2017

EDSON FERNANDO PEREIRA

**ESTUDO DO USO DA LINHA DE CALOR PARA CORREÇÕES
DAS DEFORMAÇÕES DE SOLDAGEM EM PAINÉIS NAVAIS**

Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Linha de pesquisa Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

Recife

2017

Catálogo na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

P436e Pereira, Edson Fernando.

Estudo do uso da linha de calor para correções das deformações de soldagem em painéis navais / Edson Fernando Pereira. - 2017.

171 folhas, il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Linhas de calor. 3. Correções de deformações por soldagem. 4. Tensões termo-elástico-plástica. 5. Soldagem em painéis navais. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti (Orientador). II. Rolim, Tiago Leite (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-134

“ESTUDO DO USO DA LINHA DE CALOR PARA CORREÇÕES DAS
DEFORMAÇÕES DE SOLDAGEM EM PAINÉIS NAVAIS”

EDSON FERNANDO PEREIRA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:

ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE/DEMEC)
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE/DEMEC) COORIENTADOR

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

DATA DA DEFESA: 26 de Janeiro de 2017

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE/DEMEC)

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE/DEMEC)

Prof. Dr. OSCAR OLIMPIO DE ARAÚJO FILHO (UFPE/DEMEC)

Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA (UFPE/DEMEC)

Prof. Dr. ROBERTO DE ARAÚJO ALÉCIO (IFAL)

Prof. Dr. FRANCISCO ILO BEZERRA CARDOSO (UPE)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que, com a plenitude de sua sabedoria, ofereceu-me a oportunidade de desenvolver esta tese.

Aos Professores Doutores Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira e Tiago Leite Rolim orientadores desta investigação, integrante do Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Pesquisadores do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq, aqui registro minha gratidão, pelo apoio e incentivo, pelas oportunidades e os valiosos ensinamentos.

Aos meus Pais, (in memoriam), Arlinda Adelaide Pereira e Fernando Francisco Pereira, um agradecimento todo especial, resultantes dos incomensuráveis sacrifícios de vida, que me possibilitou novos horizontes.

A minha extraordinária esposa, Maria Goreti Jorge da Silva e aos meus filhos Hugo Jorge Pereira e Felipe Jorge Pereira pela compreensão nos momentos de ausência e incentivo.

Aos Professores Doutores Oscar Olímpio de Araújo Filho, Yogendra Prasad Yadava, Roberto de Araújo Alécio e Francisco Ilo Bezerra Cardoso, por participarem da banca. Em especial, a Dra. Tetyane Gurova pela realização dos experimentos de tensões residuais.

Aos meus colegas da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPE, em especial Paternak de Sousa Barros, pelos momentos de estudo em conjunto, descontração, amizade, motivação e tensões compartilhadas.

RESUMO

Na indústria naval as operações de soldagem são controladas por procedimentos específicos, que produzem soldas de qualidade, que reduzem as deformações, contudo, existe a possibilidade de deformações dimensionais nas estruturas soldadas. Neste contexto, um processo operacional para correção das deformações dimensionais das estruturas é a aplicação do processo de linhas de calor, que devido a sua facilidade de aplicação e versatilidade é mais utilizado nos estaleiros mundiais. Uma lacuna observada na literatura acadêmica é a falta do elo entre o estudo das deformações de soldagem e correções por linha de calor. Pois, existe um grande número de artigos que, estudam deformações por soldagem independente das correções dimensionais aplicando a teoria termo-elástico-plástica. A proposta é o estudo da linha de calor como correção em painéis navais deformados pelo processo de soldagem, onde são abordadas as relações entre as deformações por soldagem e as correções por linhas de calor. A metodologia aplicada está relacionada com experimentos baseados em quatro aspectos básicos: No primeiro, determinação dos parâmetros da aplicação da linha de calor associada ao controle e simulação. Segundo, medição das deformações por solda e medições das correções por linha de calor. Terceiro, a caracterização das microestruturas na zona aquecida por efeitos térmicos das soldas e das linhas de calor. Por fim, as avaliações das relações entre as deformações por soldagem e as correções por linhas de calor. Os principais resultados neste estudo foram à determinação, para a linha de calor, do fluxo térmico, em função da velocidade de deslocamento, das temperaturas dos ciclos térmicos, das microestruturas correspondentes às temperaturas atingidas, das tensões residuais, das deformações residuais em função do tipo de resfriamento e da espessura. Conclui-se que, neste estudo das correções das deformações de soldagem por linhas de calor contribuirão para o desenvolvimento do estado da arte do processo de fabricação na indústria naval brasileira.

Palavras-chave: Linhas de calor. Correções de deformações por soldagem. Tensões termo-elástico-plástica. Soldagem em painéis navais.

ABSTRACT

In the shipbuilding industry welding operations are controlled by specific procedures which produce quality welds that reduce the distortion, however, there is the possibility of dimensional deformation of the welded structures. In this context, an operational process for correcting the dimensional deformations of the structures is the application of heat lines process, which due to its ease of application and versatility is most used in the world's shipyards. A gap observed in the academic literature is the lack of a link between the study of welding deformation and corrections by line of heat. Because there is a large number of articles which, by an independent study deformations of the weld dimensional corrections applying thermal elastic-plastic theory. The proposal is the study of the heat line as a correction in naval panels deformed by the welding process, which addresses the relationship between the deformation by welding and corrections heat lines. The methodology applied is related to experiments based on four basic aspects: In the first, determination of the heat line of application parameters associated with the control and simulation. Second, measurement of deformation by welding and measurements of corrections per line of heat. Third, the microstructures characterization of the zone heated by thermal effects of welding heat and lines. Finally, assessments of the relationship between the deformation by welding and corrections by lines of heat. The main results of this study were to determine, to the line of heat, heat flow, depending on the travel speed, the temperature of thermal cycles, the corresponding microstructures to temperatures achieved, the residual stresses, the residual strains due to the type of cooling and thickness. So, in this correction study of welding deformation by heat lines will contribute to the development of the art state manufacturing process in the Brazilian naval industry.

Key words: Lines heating. Deformation correction by welding, Thermo-elastic plastic stresses. Marine panels welding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Aplicação de linhas de calor para correção durante a fabricação.....	21
Figura 2- Montagem de dois painéis para compor um bloco.	22
Figura 3- Aplicação de linha de calor para correção no convés de navio	22
Figura 4- Proa de um navio com deformações devido a soldagem	25
Figura 5- Exemplo de um painel naval	26
Figura 6 – Notação e Referência de Tolerância do painel	27
Figura 7 – Tolerância de fabricação: (A) do perfil T e (B) da Flambagem.....	28
Figura 8- Análise do modelo térmico, distribuição gaussiana 3D.	29
Figura 9- Distribuição gaussiana.	31
Figura 10- Fases das tensões térmicas entre aquecimento e resfriamento	33
Figura 11- Placa retangular sujeita a um ciclo térmico	35
Figura 12- Linha de calor e o ângulo de deformação (Deflexão).	36
Figura 13 - Disco circular (A) Conjunto de molas (B) Pressão uniforme	37
Figura 14- Geometria da região de tensão inerente.	37
Figura 15- Fonte de calor em movimento constante.....	38
Figura 16 – Representação das cargas equivalentes.....	42
Figura 17- Tensões Plásticas na movimentação de fonte de calor.....	43
Figura 18 - Diagrama de Montagem de três barras.	44
Figura 19- Diagrama das tensões internas em função da temperatura.	45
Figura 20- Diagrama das tensões internas em função da temperatura interrompida.	46
Figura 21- Desenvolvimento das tensões residuais da soldagem	47
Figura 22- Características Térmicas em função da temperatura	48
Figura 23- Características Mecânicas em função da Temperatura.....	49
Figura 24- Esquema principal do protótipo de máquina de linha de calor.	52
Figura 25 – Detalhe do calorímetro de fluxo mássico de água.	53
Figura 26- Fluxograma do planejamento dos estudos básicos.....	57
Figura 27- Detalhes do sistema de aquecimento elétrico no calorímetro.	58
Figura 28 – Detalhe do calorímetro para determinar a quantidade de calor.	59
Figura 29 – Esquema das curvas ciclo térmico e repartição térmica.	60
Figura 30- Detalhe da utilização da câmara termográfica.	61
Figura 31- Esquema das variáveis do processo por linhas de calor.	62

Figura 32 – Método de obtenção das “microestruturas padrão”.	63
Figura 33- Sequência de medições das tensões residuais.	65
Figura 34- Medição dos planos referenciais antes a após aplicação da linha de calor.	66
Figura 35 - Esquema dos tipos de resfriamento da linha de calor	67
Figura 36 – Linha de calor com resfriamento sequencial.	67
Figura 37 - Soldagem (A) Cordão (B) Filete externo e (B) Filete interno.	69
Figura 38 - Esquema deformações das chapas por linhas de calor	71
Figura 39- Esquema deformações das chapas por soldagem.	71
Figura 40 - Esquema das correções das chapas soldadas por linhas de calor	72
Figura 41 – Medição das chapas soldadas na Máquina de Medição por Coordenadas.	73
Figura 42 - Esquema de deformação dos filetes e da deformação residual.	73
Figura 43 - Medição da perna dos filetes na direção horizontal.	74
Figura 44 - Curvas características da quantidade de calor.	77
Figura 45 -- Ciclo térmico da linha de calor, Bico nº 2, Velocidade 5,3 mm/s.	81
Figura 46 -- Ciclo térmico da linha de calor, Bico nº 2, Velocidade 13,4 mm/s.	81
Figura 47 -- Ciclo térmico da linha de calor, Bico nº 8, Velocidade 5,3 mm/s.	82
Figura 48 -- Ciclo térmico da linha de calor, Bico nº 8, Velocidade 13,4 mm/s.	82
Figura 49 - Curvas de repartição térmica da linha de calor, bico nº 2.	84
Figura 50 - Curvas de repartição térmica da linha de calor, bico nº 8.	84
Figura 51 – Curvas de repartição térmica para os bico numero 2 e 8 .	85
Figura 52- Fluxo térmico em função da temperatura da repartição térmica.	87
Figura 53 – Ciclo térmico e Dissipação da chapa 12,7 mm, Bico nº 2 e Velocidade 5,3 mm/s.	88
Figura 54 - Ciclo térmico e Dissipação da chapa 12,7 mm, Bico nº 2 e Velocidade 13,4 mm/s.	88
Figura 55 - Ciclo térmico e Dissipação da chapa 12,7 mm, Bico nº 8 e Velocidade 5,3 mm/s.	89
Figura 56 - Ciclo térmico e Dissipação da chapa 12,7 mm, Bico nº 8 e Velocidade 13,4 mm/s.	89
Figura 57 - Curva de ciclo térmico da linha de calor, bico 2, espessura 12,7 mm	91
Figura 58 - Curvas de repartição térmica da linha de calor, bico 2, espessura 12,7 mm.	91

Figura 59 - Curvas do ciclo térmico da linha de calor	92
Figura 60- Medição da temperatura por câmara termográfica Bico8vel5,3esp3.	93
Figura 61- Medição da temperatura por câmara termográfica Bico2vel5,3esp3-7365.	94
Figura 62– Aspecto da linha de calor na superfície da chapa	96
Figura 63- Detalhe da geometria das regiões aquecida e termicamente afetada.	98
Figura 64 – Medição das temperaturas nos pontos abaixo da superfície.	98
Figura 65 – Localização das regiões para observação da microestrutura	100
Figura 66 – Microestrutura das regiões 200x, com uma escala de 100 micrometros.	100
Figura 67–Localização das regiões na observação da Microdureza.	101
Figura 68- Microestrutura do aço, 200x, nas temperaturas entre 500°C a 900°C...	103
Figura 69 – Correlação regiões da linha de calor versus microestrutura	105
Figura 70 - Resultados da Magnetização das amostras 1 e 2 “crua” e “queimada”	106
Figura 71- Quadro das tensões do estado plano.....	108
Figura 72 - Resultados das tensões residuais por Difração por RX na chapa 1.	108
Figura 73 - Resultados das tensões residuais por Difração por RX na chapa 1.	109
Figura 74- Resultados das tensões residuais por Difração por RX na chapa 2.	109
Figura 75 - Resultados das tensões residuais por Difração por RX na chapa 2.	110
Figura 76 – Modelo de gráfico de deflexões transiente oriundos dos experimentos.	112
Figura 77- Transiente de três tipos resfriamento, para Bico nº 2 e velocidade 5,3 mm/s.....	113
Figura 78- Transiente de Três tipos resfriamento, para Bico nº 2 e velocidade 13,4 mm/s.....	114
Figura 79- Transiente de três tipos resfriamento, para Bico nº 8 e velocidade 5,3 mm/s.....	114
Figura 80- Transiente de três tipos resfriamento, para Bico nº 8 e velocidade 13,4 mm/s.....	115
Figura 81- Transiente das deformações Bico nº 2, na chapa 12,70 mm.....	118
Figura 82- Transiente das deformações Bico nº 8, na chapa 12,70 mm.....	119
Figura 83 – Comparação das transientes de linhas de calor do bico nº 2 e 8,.....	120
Figura 84 - Comparação das transientes de linhas de calor do bico nº 2 e 8,	121
Figura 85 – Transiente da soldagem. (Cordão de solda).....	124

Figura 86 – Transiente da soldagem em ângulo, na espessura de 7,93 mm.....	126
Figura 87 - Transiente da soldagem em ângulo, na espessura de 12,70 mm.	127
Figura 88 - Transiente da soldagem em ângulo, na espessura de 15,88 mm.	127
Figura 89 - Transiente da soldagem em ângulo, na espessura de 19,05 mm.	128
Figura 90 – Região geométrica para aplicação linhas de calor para correção.....	130
Figura 91- Medição na MMC das amostras de chapas após a linha de calor.....	135
Figura 92 – Perfil das chapas de 7,93 mm, na condição inicial, soldada e após linha de calor.	136
Figura 93 - Perfil das chapas de 12,70 mm, na condição inicial, soldada e após linha de calor.	137
Figura 94 - Perfil das chapas de 15,88 mm, na condição inicial, soldada e após linha de calor.	138
Figura 95 - Perfil das chapas de 19,05 mm, na condição inicial, soldada e após linha de calor.	139
Figura 96 – Mudança de perfil da chapa de 7,93 mm (Soldada e após a Linha de Calor).....	141
Figura 97 – Fluxograma do procedimento operacional.....	142
Figura 98 – Parâmetros da Linha de Calor.....	144
Figura 99 – Fluxo Específico de calor	145
Figura 100 – Esquema geral dos resultados da linha de calor	154
Figura 101- Esquema dos resultados Soldagem e correção por linha de calor	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tolerância de fabricação e máxima derivação.	28
Tabela 2 - Propriedades Térmicas da chama Oxiacetilênica	32
Tabela 3 - Características Térmicas e Mecânicas em função da Temperatura	49
Tabela 4 – Composição química da amostra do aço ASTM-A131-gra-AH36 (2014)	50
Tabela 5 - Dado dos experimentos no calorímetro.	75
Tabela 6 – Quantidade de calor (kJ)	76
Tabela 7 - Fluxo de calor médio (W) por Bico	78
Tabela 8 – Aporte térmico das linhas de calor (J/cm).	78
Tabela 9 – Dados técnicos dos bicos 2 e 8 escolhidos.	80
Tabela 10 – Temperatura máxima de pico e taxa de resfriamento dos bicos 2 e 8.	83
Tabela 11 – Resultados das temperaturas utilizando chapas de 1,6 e de 12,7 mm.	90
Tabela 12- Condição de Bico número 8 e velocidade de 13,4 mm/s	93
Tabela 13- Condição de Bico número 8 e velocidade de 5,3 mm/s	94
Tabela 14- Condição de Bico número 2 e velocidade de 13,4 mm/s	95
Tabela 15- Condição de Bico número 2 e velocidade de 5,3 mm/s.	95
Tabela 16– Comparação entre medições por termopar e por câmara termográfica.	95
Tabela 17- Medições das regiões aquecidas (Meia elipse)	97
Tabela 18- Composição química pelo ensaio de microscopia ótica.	99
Tabela 19 - Deformações Inerentes Residuais utilizando o bico nº 2.	115
Tabela 20- Deformações Inerentes Residuais utilizando o bico nº 8.	116
Tabela 21- Deformações residuais Bico nº 2, sem resfriamento, chapas de 9,50 mm a 19,05 mm.	116
Tabela 22- Deformações residuais Bico nº 8, sem resfriamento, chapas de 9,50 mm a 19,05 mm.	117
Tabela 23 - Deformações residuais Bico nº 2, resfriamento sequencial + 90,0 mm, chapas de 9,50 mm a 19,05 mm.	117
Tabela 24- Deformações residuais Bico nº 8, resfriamento sequencial +90,0 mm, chapas de 9,50 mm a 19,05 mm.	117
Tabela 25- Dado das características do cordão de solda	122
Tabela 26 - Dado das características do filete (solda em ângulo).	122
Tabela 27 – Resultado das deformações Inerente e residual do cordão de solda.	125

Tabela 28 – Resultado das deformações Inerente e residual da soldagem tipo ângulo	128
Tabela 29 – Estimativa para correção das deformações.	131
Tabela 30 – Experimentos de aplicação da linha de calor na chapa 7,93 mm	132
Tabela 31 - Experimentos de aplicação da linha de calor na chapa 12,70 mm	133
Tabela 32 - Experimentos de aplicação da linha de calor na chapa 15,88 mm	133
Tabela 33 - Experimentos de aplicação da linha de calor na chapa 19,05 mm	134
Tabela 34- Medições da declividade da reta em (Radianos).	140
Tabela 35- Medições da declividade da reta (Graus).	141
Tabela 36 – Distribuição Gaussiana.....	145
Tabela 37 – Cálculo da temperatura de pico	146
Tabela 38 – Formulações das Características Termomecânica da chapa.....	147
Tabela 39 - Cálculo da Geometria da região inerente para o bico 2.	148
Tabela 40 - Cálculo da Geometria da região inerente para o bico 8.	149
Tabela 41 – Cálculo das deformações Inerentes	150
Tabela 42 – Cálculo das deformações angulares para o bico número 2.	150
Tabela 43 - Cálculo das deformações angulares para o bico número 8.	151
Tabela 44 – Cálculo dos momentos de dobramento para o bico número 2	151
Tabela 45 - Cálculo dos momentos de dobramento para o bico número 8.....	152

LISTA DE ABREVIATURAS E SILGAS

<i>ASTM</i>	American Society Testing and Materials.
<i>AWS</i>	American Welding Society.
<i>COPPE</i>	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e pesquisa da UFRJ.
<i>FCAW</i>	Flux Cored Arc Welding.
<i>GMAW</i>	Gas Metal Arc Welding.
<i>Hz.</i>	Hertz.
<i>IEC.</i>	International Electrotechnical Commission.
<i>IP.</i>	International Protection.
<i>MB</i>	Megabyte.
<i>MMC</i>	Máquina de Medição de Coordenadas.
<i>SAW</i>	Submerged Arc Welding.
<i>UFRJ</i>	Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

b_z	Largura da zona de deformação residual em função a coordenada z .
b	Máxima largura da zona de deformação residual.
c	Coeficiente específico da água.
c_1	Constante índice 1.
c_2	Constante índice 2.
d	Máxima profundidade da zona de deformação residual.
e	Base do logaritmo natural.
E	Módulo de elasticidade.
E_x	Modulo de Young na região inerente na direção x .
E_y	Modulo de Young na região inerente na direção y .
H	Energia de soldagem.
h	Espessura da chapa.
I	Corrente de soldagem.
kd	Coeficiente de distribuição normal à curva.
km	Constante da mola do modelo;
Li	Comprimento inicial do corpo.
m	Massa de água.
q	Fluxo de calor da fonte de aquecimento.
$q_2(r)$	Fluxo de calor específico no ponto central de aquecimento.
q_{2m}	Máximo fluxo de calor específico no ponto central.
Q	Quantidade de calor absorvida.
R	Distância para o centro do aquecimento da tocha.
R_n	Distância para o centro do aquecimento da tocha componente n .
R'_n	Distância para o centro do aquecimento da tocha componente n' .
r	Distância radial do ponto extremo da chama.
rd	Raio do disco da região da tensão inerente.
t	Tempo.
T	Temperatura.

T_0	Temperatura Inicial.
T_{0a}	Temperatura Inicial da água.
T_{fa}	Temperatura final da água.
T_x	Temperatura na direção do eixo x.
V	Tensão de soldagem.
v	Velocidade de deslocamento da chama.
V_s	Velocidade de soldagem
w	Distância relativa na direção x devida à velocidade da fonte.
x	Distância na direção x.
y	Distância na direção y.
z	Distância na direção z.
Z	Coordenada na direção da medida da espessura.

Símbolos Gregos

α	Coeficiente de dilatação térmica linear.
Δl	Variação do comprimento.
Δt	Variação da temperatura.
δ	Deformação angular da chapa.
θT	Variação de temperatura num ponto.
ε^*	Deformação residual.
ε_x^*	Deformação residual em função da coordenada x.
ε_y^*	Deformação residual em função da coordenada y.
η	Rendimento.
κ	Difusibilidade térmica.
λ	Condutividade térmica.
αx	Tensão térmica devida ao efeito do calor, no eixo x.
σy	Tensão térmica devida ao efeito do calor, no eixo y.
σ_y	Tensão de escoamento da região de inerente tensão.
ν	Coeficiente de Poisson.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	20
1.2	MOTIVAÇÃO	21
1.3	OBJETIVO GERAL	23
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO NAVAL	25
2.1.1	O Processo de fabricação de painéis nos estaleiros	26
2.1.2	Recomendações das Normas Certificadoras Navais para fabricação.	27
2.2	CONCEITOS DA ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA.	29
2.2.1	Análise Térmica	30
2.2.2	Tensões Inerentes e o Calculo de Carga Equivalente.....	36
2.2.3	Análise Mecânica.....	43
2.2.4	Desenvolvimento de tensões residuais.	44
2.2.5	Calculo da Energia de Soldagem (Heat Input).	47
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	MATERIAIS.....	48
3.1.1	Materiais das amostras de chapas	48
3.1.2	Consumíveis para aquecimento e para soldagem.....	50
3.2	EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS.....	50
3.2.1	Equipamentos para o sistema de geração de chama oxiacetilênica	50
3.2.2	Equipamento para o controle da velocidade de deslocamento.....	51
3.2.3	Equipamento para medição das deformações iniciais e finais.	51
3.2.4	Instrumento para visualização em tempo real das deformações	51
3.2.5	Equipamento protótipo de aplicação de linhas de calor	52
3.2.6	Instrumentos para medição do diferencial de temperatura	52
3.2.7	Calorímetro de fluxo mássico de água.	53
3.2.8	Equipamento para soldagem no processo GMAW	54
3.2.9	Câmara termográfica	54
3.2.10	Instrumentos de ensaio micrográfico.....	55

3.2.11 Forno de resistência.	55
3.2.12 Equipamento de Difração de raios-X.	55
3.2.13 Durômetro de Bancada.	56
3.2.14 Fluxômetro de Gases.	56
3.3 MÉTODOS	57
3.3.1 Determinação da quantidade de calor nas linhas de calor.	58
3.3.2 Medição do gradiente de temperatura nas linhas de calor.	59
3.3.2.1 <i>Medição da temperatura por termopares</i>	60
3.3.2.2 <i>Medição da temperatura por câmara termográfica</i>	61
3.3.3 Características inerentes das linhas de calor	61
3.3.3.1 <i>Geometria da região aquecida e termicamente afetada</i>	62
3.3.3.2 <i>Micrografia do aço naval</i>	63
3.3.3.3 <i>Tensões residuais antes e após aplicação da linha de calor</i>	64
3.3.4 Medições das deformações por tipo de resfriamento.	66
3.3.5 Recomendações de soldagem para o processo GMAW (arame sólido).	68
3.3.6 Correções das deformações por soldagem.	70
3.3.7 Medições na Máquina de Medição por coordenadas (MMC)	72
3.3.8 Procedimento Operacional das deformações.	74
3.3.9 Comparações dos resultados experimentais e cálculos analíticos	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR.	75
4.2 MEDIÇÃO DO GRADIENTE DE TEMPERATURA.	79
4.2.1 Medição utilizando Termopares	79
4.2.1.1 <i>Medição temperatura por termopares</i>	79
4.2.1.2 <i>Determinação das curvas de repartição térmica</i>	83
4.2.1.3 <i>Calculo do fluxo térmico função temperatura da repartição térmica</i>	86
4.2.1.4 <i>Dissipação em função espessura da chapa</i>	87
4.2.1.5 <i>Temperatura e repartição térmica da chapa de espessura 12,70 mm</i>	90
4.2.1.6 <i>Comportamento do ciclo térmico da linha de calor com resfriamento</i>	92
4.2.2 Medição utilizando Câmara Termográfica	92
4.3 CARACTERÍSTICAS INERENTES DAS LINHAS DE CALOR	96
4.3.1 Geometrias das regiões aquecidas e termicamente afetada	96
4.3.2 Composição química / Micrografia / Microdureza / Microestrutura	99

4.3.2.1	<i>Composição química</i>	99
4.3.2.2	<i>Micrografia</i>	99
4.3.2.3	<i>Microdureza</i>	101
4.3.2.4	<i>Microestrutura do aço naval</i>	102
4.3.2.5	<i>Correlação entre a microestrutura e regiões da linha de calor</i>	104
4.3.2.6	<i>Tensões residuais antes e após aplicação da linha de calor</i>	106
4.3.2.7	<i>Resultados das tensões residuais através do método magnético</i>	106
4.3.2.8	<i>Resultados das tensões residuais por difração por raios-X</i>	107
4.4	MEDIÇÕES DAS DEFORMAÇÕES POR TIPO DE RESFRIAMENTO	111
4.4.1	Modelo padronizado dos gráficos de deformações por linhas de calor	111
4.4.2	Deformações dos tipos de resfriamentos, na chapa de 12,70 mm	113
4.4.3	Deformações dos resfriamentos, nas chapas de: 9,50 mm a 19,05 mm	116
4.4.4	Deformações por tipo de resfriamento, na chapa de 12,70 mm	118
4.4.5	Análise das deformações, sem resfriamento, na chapa de 12,70 mm	119
4.5	SOLDAGEM: SOLDA EM ÂNGULO E EM CORDÃO DE SOLDA	122
4.5.1	Parâmetros de Soldagem	122
4.5.2	Resultado das deformações dos cordões de solda	123
4.5.3	Resultado das Soldagens Filetes (soldas em ângulo)	125
4.5.3	Correções das deformações por soldagem	130
4.5.3.1	<i>Estimativa para Correções das deformações por soldagem por Ângulo</i>	131
4.5.3.2	<i>Experimentos realizados para correções por soldagem em Ângulo</i>	131
4.5.3.3	<i>Medições na Maquinas de Medições de Coordenadas(MMC)</i>	134
4.5.3.4	<i>Procedimento Operacional de Correção das Deformações</i>	142
4.6	CÁLCULOS ANALÍTICOS	143
4.6.1	Cálculos Analíticos da linha de calor segundo (JANG, SEO e KO, 1997)	143
4.6.1.1	<i>Indicação das dimensões das chapas</i>	144
4.6.1.2	<i>Dados operacionais do processo de linha de calor</i>	144
4.6.1.3	<i>Curva gaussiana do fluxo de calor</i>	145
4.6.1.4	<i>Distribuição da temperatura</i>	146
4.6.1.5	<i>Características termomecânicas da chapa</i>	147
4.6.1.6	<i>Identificação da geometria da região inerente</i>	148
4.6.1.7	<i>Identificação das deformações inerente</i>	149
4.6.1.8	<i>Identificação das deformações angulares</i>	150

4.6.1.9	<i>Cálculos dos momentos de dobramentos devido à linha de calor</i>	151
4.7	DISCUSSÕES SOBRE CORREÇÕES DAS DEFORMAÇÕES.....	152
5	CONCLUSÕES	156
6	TRABALHOS FUTUROS	160
	REFERÊNCIAS	161
	APÊNDICE	170

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A indústria naval, recentemente implantada em nossa região, produz navios petroleiros, navios gaseiros, casco de plataforma e navios sondas perfuratriz.

Os estaleiros são estruturados em função da sua capacidade de produção de determinado tipo de navios. Durante a fabricação estes navios são divididos em megablocos, blocos gigantes, que são subdivididos em vários blocos pequenos, que são constituídos de painéis reforçados, cavernas e suportes, (RICHARD, 1995).

Na fabricação de painéis reforçados, cerca de 80% das soldas são em ângulo, em ambos os lados, para fixar os perfis enrijecedores nas chapas planas. Os processos de soldagem que, pela grande quantidade de calor aplicada numa mesma região, podem gerar deformações dimensionais, além das recomendações das normas de inspeção, necessitando de correções, (SEONG, JEON e NA, 2013).

Um método operacional para correção das deformações dimensionais dos painéis é o processo de linhas de calor, que devido a sua facilidade de aplicação e versatilidade é mais utilizado nos estaleiros mundiais, (HEMMATI e SHIN, 2007). Porém, deve-se observar que nessa região aquecida pelo aporte térmico da solda e da linha de calor a estrutura naval sofre efeitos térmicos, que causam tensões residuais, deformações e alterações microestruturais na chapa, e serão objetos de estudo e pesquisa desta tese, dando continuidade ao estudo sobre conformação de chapas navais por linhas de calor, (TONKOVIC, PERIC e SURJAK, 2012).

Entretanto, observa-se atualmente na literatura científica, que as pesquisas nesta área se direcionam para previsão das deformações em estruturas simples e complexas, aplicando o método de elementos finitos (FEM), usando a teoria termo-elástico-plástica. Outras analisam a sequência de soldagem para a menor deformação, (IJUSHIMA, OKADA e ITOL, 2012).

Fazem-se também, análises das deformações por linhas de calor, utilizando o método FEM, correlacionadas às deformações por soldagem e recuperação por linhas de calor em painéis navais, (VEGA, ALEXANDRA e JUAN, 2012).

Nesta pesquisa são apresentadas as técnicas de utilização da linha de calor como correção de elementos estruturais em painéis navais deformados pelo

processo de soldagem. Serão abordadas as relações entre as deformações por soldagem e correção por linhas de calor.

1.2 MOTIVAÇÃO

Na indústria naval as operações de soldagem de painéis reforçados, geralmente são controladas por procedimentos específicos, que produzem soldas de qualidade e reduzem as deformações. Contudo, existe a possibilidade de deformações dimensionais, que vão além das recomendações das normas de inspeção, necessitando de correções. Na Figura 1, mostra uma operação de correção das deformações dimensionais de um painel naval na fabricação.

Figura 1- Aplicação de linhas de calor para correção durante a fabricação.



Fonte: (LINDE AG, 2000)

A Figura 2, mostra a montagem de dois painéis, um plano e outro curvo. Observa-se que no detalhe o painel plano necessitou de aplicação de linhas de calor para ajuste da montagem.

Os diversos painéis que compõem um pequeno bloco são fabricados em vários pontos de trabalhos.

Na montagem deste conjunto de painéis podem ocorrer variações dimensionais e deformações que impedem a montagem do bloco, então são necessárias as correções pela aplicação do processo de linha de calor.

Figura 2- Montagem de dois painéis para compor um bloco.



Fonte: (NSNET, 2008)

Na edificação dos megabloco a soldagem circunda toda a seção transversal do navio, sendo executada por vários processos de soldagem, automáticas e/ou manuais.

Pode existir desnivelamento, desalinhamento devido ao peso do megabloco e ocorrer deformações que serão minimizadas pela aplicação direta da linha de calor no megabloco, (CHIRILLO, 1982), (MACHADO e TANIGUCHI, 1982).

Uma aplicação de linhas de calor no convés de navio é mostrada na Figura 3. No detalhe observa-se que cada operador aplica linhas de calor paralelas e continua para correção de deformações.

Figura 3- Aplicação de linha de calor para correção no convés de navio



Fonte: (VOESTALPINE, 2012)

O nosso primeiro estudo foi baseado na conformação de chapas navais por linha de calor que é um processo auxiliar para a conformação das chapas navais da proa e popa. Dando sequência ao estudo, verifica-se que a linha de calor pode ser aplicada em outras operações como: correções dimensionais, ajuste para montagens, correções das deformações por soldagem e reparos (AVENT, 2003).

A motivação deriva do fato, que a aplicação de linhas de calor é um processo fundamental para a indústria naval, composto de características simples e versátil, geralmente utilizadas por caldeireiros navais experientes, que pode ser utilizada tanto para conformar chapas, quanto para corrigir deformações dimensionais, ajustar montagem de estruturas navais e correções de deformações por soldagem de painéis reforçados, (BISWAS, MANDAL e SHA, 2011).

O estudo permitirá também, um melhor conhecimento sobre um problema atual nos estaleiros que é um excessivo retrabalho de correção e ajuste das juntas dos painéis devido às deformações onerando os custos de produção.

1.3 OBJETIVO GERAL

Estudar e analisar através de experimentos a aplicação de linhas de calor para correções das deformações por soldagem, em condições semelhantes aos painéis navais reforçados, determinando-se: o fluxo térmico, os parâmetros de velocidade, de resfriamento, de gradientes de temperaturas, de aporte térmico e níveis de deformações associadas a ambos os processos de linhas de calor e de soldagem.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a eficiência do calorímetro de fluxo mássico de água para determinar a quantidade de calor da fonte térmica dos experimentos, conforme (KOU, 2003).
- Determinar os fluxos de calor e os aportes térmicos das linhas de calor, para as velocidades de deslocamento da tocha, entre 5,3 mm/s á 13,4 mm/s e tipo de bicos de maçarico entre o número 0 a 8, no calorímetro mássico;
- Determinar o histórico de temperatura, os gradientes de temperaturas e as repartições térmicas durante a aplicação das linhas de calor, ora por termopares ora por imagens termográficas.

- Produzir corpos de provas, em chapa de aço naval ASTM A 131 grau AH36, em perfis T, em diversas espessuras, com solda de ângulo, em ambos os lados pelo processo de soldagem por arco elétrico com proteção gasosa e arame tubular (FCAW), em duas versões automatizada e manual;
- Calcular as temperaturas, a partir de um modelo analítico e comparar com as obtidas nos experimentos com termopares e imagens termográficas.
- Determinar o perfil das deformações em função do tempo em três tipos de resfriamento, após passagem da fonte de calor, na condição de resfriamento sequencial, resfriamento oposto à fonte de calor e sem resfriamento.
- Medir e avaliar as deformações provocadas pela soldagem em ângulo, FCAW, na base do perfil T, através da máquina de medição de coordenadas;
- Aplicar linhas de calor na região oposta à soldagem para corrigir as deformações da soldagem; utilizando o protótipo de simulador de linhas de calor, com controle do fluxo de calor, velocidade de deslocamento e resfriamento.
- Analisar os efeitos microestruturais da região submetida à soldagem seguida por correção por linhas de calor, por macrografia e micrografia.
- Medir a microdureza em uma amostra, para verificar se há perda ou acréscimo de dureza, após a aplicação da linha de calor, baseado na dureza do metal base.
- Avaliar a relação entre as deformações por soldagem e correção por linhas de calor; em função do aporte térmico da solda.
- Determinar as tensões residuais, antes e após da aplicação da linha de calor, em amostra, para conhecer o comportamento e a influência das tensões residuais e suas prováveis deformações, para idealizar seus efeitos em painéis navais.
- Determinar as deformações oriundas do cordão de solda e da solda em ângulo, em função da espessura da chapa utilizando relógio comparador.
- Avaliar através da máquina de medição por coordenadas (MMC), os perfis das deformações, nas condições iniciais, como soldada e após aplicação da linha de calor.
- Comparar entre as soldagens e as linhas de calor os parâmetros de vinculação entre estes processos, para formatar uma sistemática de correção das deformações.
- Apresentar e calcular através da análise as correções das deformações proposto por (JANG, SEO e KO, 1997)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO NAVAL

Os navios são fabricados por partes, onde as chapas e perfis são previamente preparados, montados e soldados em painéis reforçados, formando pequenos blocos que, unidos por soldagens geram blocos gigantes e megablocos até a formação completa do navio.

Segundo (GELL, 1987) as tensões residuais tem uma influência significativa sobre as deformações nas estruturas de aço durante a fabricação. No convés de um navio, 63% das tensões são devidas as soldagens, 16% sobre elevações e montagens, 15% devido às cargas e 6% devida as ações de carga no mar.

Na Figura 4, apresenta a proa de um navio em um dique seco. No detalhe temos as soldas das fiadas e as soldas das cavernas. Também, observam-se reentrâncias oriundas da fabricação devido ao processo de soldagem que geram deformações e tensões residuais, que são comumente chamadas de efeito de flambagem, que posteriormente será apresentado na Figura 7 B.

Segundo (PEREIRA, 2012), as linhas de calor são utilizadas para a conformação de chapas navais para a fabricação de painéis curvos da proa e popa, podendo ter aplicação para correção ou endireitamento de painéis e partes do navio.

Figura 4- Proa de um navio com deformações devido a soldagem



Fonte: (INTERNATIONAL PAINT, 2007)

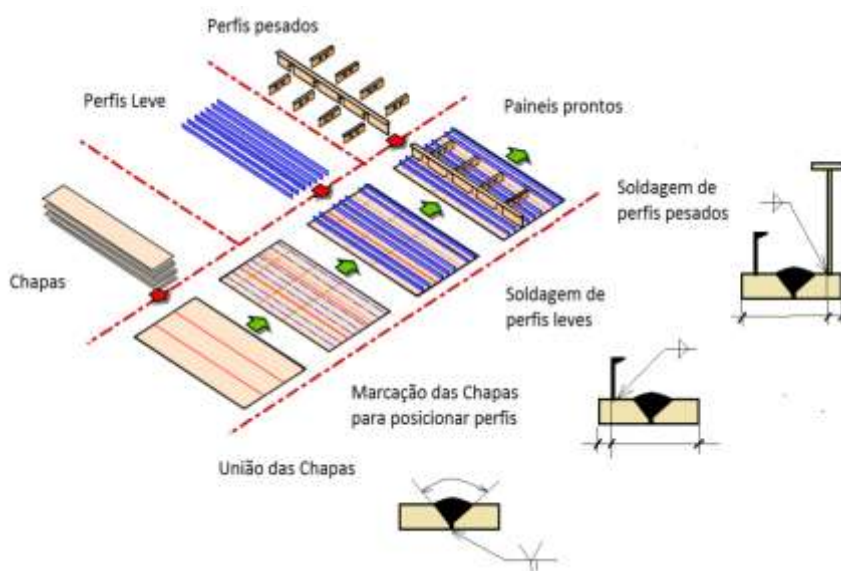
2.1.1 O Processo de fabricação de painéis nos estaleiros

Um painel naval é composto de chapas planas e de perfis laminados ou soldados que são fixados nas chapas como elemento enrijecedor pelo processo de soldagem em juntas de ângulo, em ambos os lados.

A Figura 5 exemplifica um processo de fabricação de um painel naval. Inicialmente as chapas navais, de dimensões comerciais são esquadrejadas, biseladas, e unidas através do processo de solda por arco submerso, unilateralmente ou bilateralmente, compondo painel plano, com várias chapas.

Posteriormente recebem uma marcação de posicionamento, onde são inseridos os perfis leves e pesados, e fixados pelas operações de montagem, ponteamento e de soldagem em ambos os lados, por uma solda de ângulo.

Figura 5- Exemplo de um painel naval



Fonte: (FAVARIN, REQUEIRA e SOGGIA, 2010) Adaptado pelo Autor (2016).

Segundo (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982), um navio cargueiro de 12.000 TPB (Toneladas de Porte Bruto), cerca de 80% das soldagens são em ângulo, o que corresponde a 60% na posição plana e horizontal, 15% na posição vertical e 5% a posição sobre cabeça. Enquanto que o restante em solda de topo.

Neste tipo de estrutura devem-se executar soldas por processos automatizados. Geralmente é utilizado o processo de soldagem por arco submerso (SAW) para soldagem das chapas. O processo de soldagem de arco por proteção gasosa (FCAW e/ou GMAW) automatizada para os perfis pesados na ligação alma e mesa, e na fixação dos perfis leves e pesados na chapa, compondo o painel. Existe a necessidade de complementação com um processo de soldagem manual para as demais fixações, de pequeno comprimento e inacessível às máquinas automáticas.

(CHENG, 2005), classificou as distorções de soldagem em: contrações transversais, contrações longitudinais, deformações angulares, dobramentos longitudinais, deformações rotacionais e deformações por flambagem.

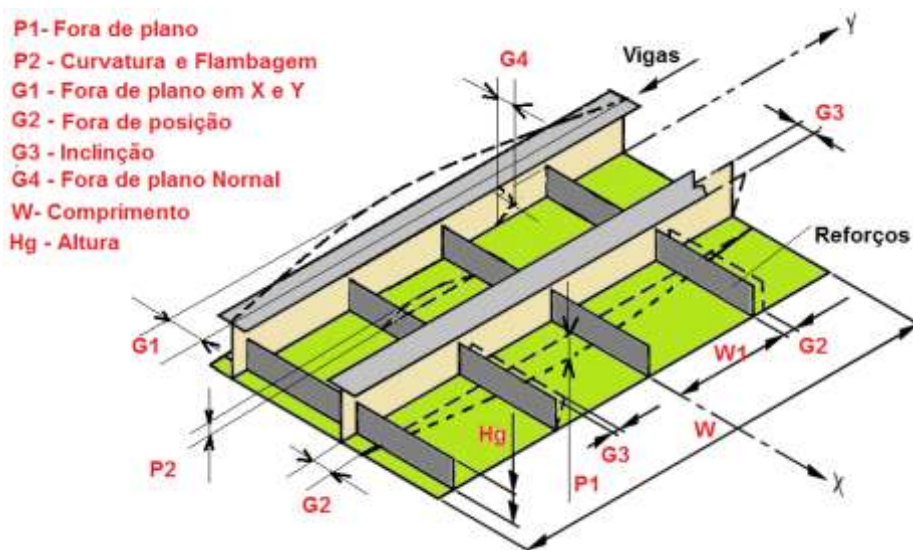
Nos painéis navais, estas distorções de soldagem podem ocorrer simultaneamente durante o processo de soldagem, mas, nosso interesse são as deformações dimensionais angulares que geram deformações por flambagem.

2.1.2 Recomendações das Normas Certificadoras Navais para fabricação.

A norma (NORSOK-STANDARD, 2000) define as tolerância de fabricação para painéis planos.

Na Figura 6 apresenta as referências alfanuméricas, das tolerâncias, enquanto que na Tabela 1 apresentam-se os valores das tolerâncias e as máximas derivações destas referências.

Figura 6 – Notação e Referência de Tolerância do painel



Fonte: (NORSOK-STANDARD, 2000) Adaptado pelo Autor (2016).

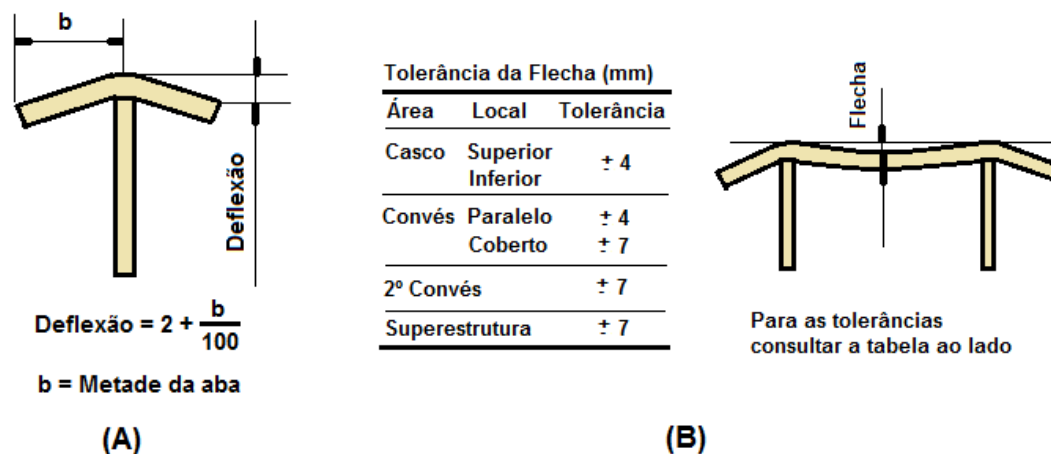
Tabela 1- Tolerância de fabricação e máxima derivação.

<i>Tipo de distorção</i>	<i>Notação</i>	<i>Referência</i>	<i>Tolerância mm</i>	<i>Máx. derivação mm</i>
CHAPA PLANA				
Fora do plano Arco	p1	W	± 0,15	± 15
Curvatura Local e Flambagem	p2	W1	± 0,5	± 5
VIGA E REFORÇO				
Fora do plano	g1	W	± 0,15	± 10
Posição de derivação	g2	Grade	± 0,8	± 10
Inclinação	g3	Hg	± 0,8	± 10
Fora do plano Normal do perfil	g4	Hg, W1	± 0,75	± 10

Fonte: (NORSOK-STANDARD, 2000)

As tolerâncias de fabricação para os perfis em T são calculadas pela expressão, indicada na Figura 7 A, enquanto que as tolerâncias da flambagem em determinadas áreas são apresentada na Figura 7 B.

Figura 7 – Tolerância de fabricação: (A) do perfil T e (B) da Flambagem.



Fonte: (NORSOK-STANDARD, 2000) Adaptado pelo Autor (2016).

As Figuras 6 e 7 e a Tabela 1 mostram as tolerâncias de fabricação de painéis navais, que pode ser referenciadas como base nas inspeções de fabricação do painel descrito na Figura 5, tanto nas chapas, como nos perfis, e em todo painel.

Pesquisas realizadas por (SANG, KANG e HAN, 2002) mostra que, pode-se aplicar a linha de calor, antes do processo de soldagem, realizando uma pré-deformação a estrutura minimizando as deformações residuais de soldagem.

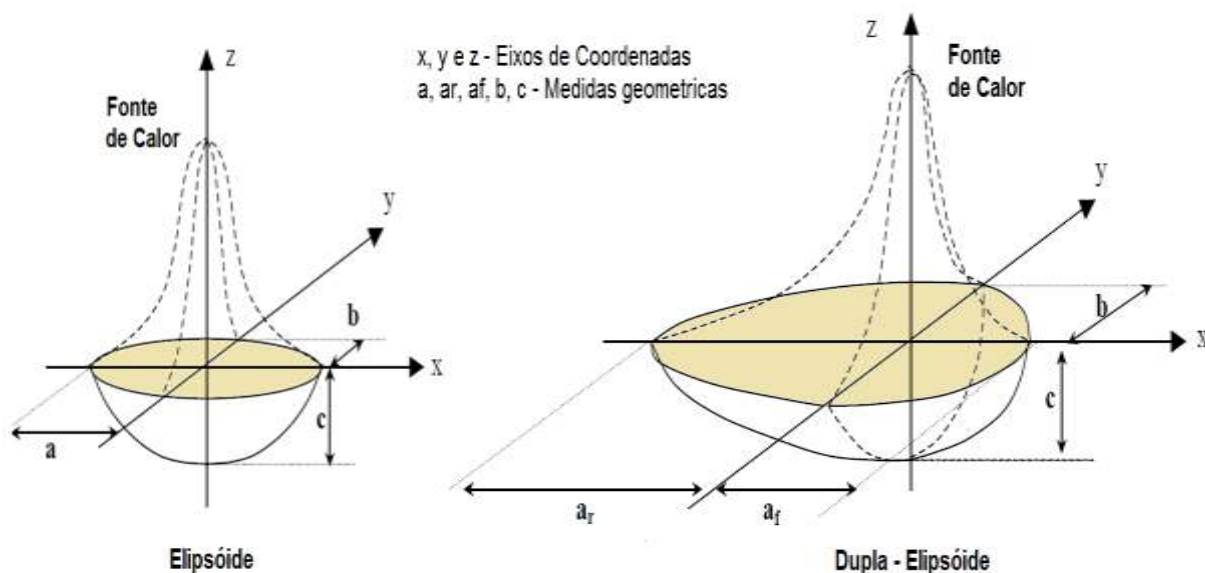
2.2 CONCEITOS DA ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA.

Neste tópico será apresentada uma síntese dos conceitos da análise térmica e mecânica, o desenvolvimento das tensões inerentes e o cálculo das cargas equivalentes na linha de calor.

A análise do modelo térmico, conforme Figura 8 deve ser definido pelos seguintes itens:

- Um modelo de duas dimensões x e y , (2D) ou de três dimensões x , y e z (3D), para condições espaciais;
- Um tipo da fonte de calor, para o arco elétrico de soldagem e para a chama oxiacetilênica da linha de calor;
- Um tipo de distribuição do calor geralmente a mais utilizada é a superficial gaussiana finita de raio determinado;
- Uma distribuição volumétrica do calor no metal, dupla-elipsoide para soldagem e elipsoide para linhas de calor;
- Um tipo de regime transiente em que a fonte se movimenta e a temperatura depende do tempo;
- Um regime quase estacionário, em que a distribuição de temperatura não depende do tempo, somente das variáveis do espaço.

Figura 8- Análise do modelo térmico, distribuição gaussiana 3D.



Fonte: (DEPRADEUX, 2004) Adaptado pelo Autor (2016).

Alguns pesquisadores desenvolveram estudos e simulações de análises térmicas, no processo de linhas de calor, conforme afirma (BISWAS, SARATHI e MANDAL, 2006), que permitem levar em consideração a dependência do metal com as propriedades termofísicas, como condutividade térmica, calor específico e densidade em relação à temperatura, além das trocas de calor como condução, convecção e radiação.

2.2.1 Análise Térmica

A ideia de calorímetro em quantificar a quantidade de calor absorvida e o fluxo térmico em pequena escala, foi sugerido por (SCHAFER, RINALDI e BEG, 2012).

Deve-se seguir o seguinte procedimento: utiliza-se uma chapa de aço, seleciona-se o tipo de bico, determina-se a velocidade de movimentação da tocha, aquece-se a chapa por linhas de calor e resfria-se diretamente numa determinada massa de água. Através de medição de termopares observa-se o incremento de temperatura num determinado tempo e aplica-se a equação (1) para quantificar quantidade de calor absorvida e para quantificar o fluxo térmico.

$$Q = c.m.(T_{fa} - T_{0a}) \quad (1)$$

Onde:

Q = Quantidade de calor absorvida [J].

c = Coeficiente específico da água = 4187. [J/kg K].

m = Massa de água [Kg].

T_{fa} = Temperatura final da água [°C].

T_{0a} = Temperatura Inicial da água [°C].

A temperatura média da amostra de chapa distribuída na direção normal da chama obedece à lei de distribuição gaussiana, conforme Figura 9. O fluxo de calor é aproximadamente proporcional aos instantâneos de temperatura na zona aquecida e pode ser expresso pela equação (2), conforme (GILZMANENKO e YEVSEYEV, 1960):

$$q_2(r) = q_{2m} \cdot e^{-kd \cdot r^2} \quad (2)$$

Onde:

$q_2(r)$ - Fluxo de calor específico no ponto central de aquecimento [Cal/m²s.];

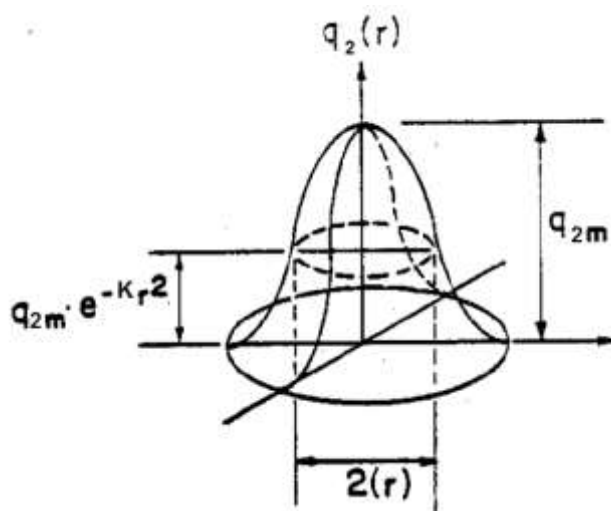
q_{2m} - Máximo fluxo de calor específico no ponto central [Cal/ m² - s.];

e - Base do logaritmo natural, 2, 1718;

r - Distância radial do ponto extremo da chama [m];

kd - Coeficiente de distribuição normal a curva [1/m²]

Figura 9- Distribuição gaussiana.



Fonte: (GILZMANENKO e YEVSEYEV, 1960)

Uma ideia de que o fluxo de calor produzido pelo processo de chama oxiacetilênica tem uma distribuição gaussiana foi desenvolvida por RYKAIN (1960 *apud* GILZMANENKO e YEVSEYEV, 1960 p 136 a 141).

Em seus experimentos, que consistiam em aquecer uma superfície de chapa em um lado, e executar medições de temperaturas no lado oposto da superfície ao de aquecimento, analisando a distribuição de temperatura em função do calor gerado pela fonte de chama oxiacetilênica.

O calor efetivo liberado por uma tocha simples, com uma chama perpendicular a superfície da chapa foi determinado em relação à vazão do gás acetileno e de oxigênio, em partes iguais. RYKAIN (1960 *apud* GILZMANENKO e YEVSEYEV, 1960 p 136 a 141) especificou as propriedades térmicas do processo de chama oxiacetilênica, para uma velocidade constante. Os valores se apresentam conforme a Tabela 2, onde, se observa que a vazão do gás acetileno é proporcional ao calor liberado efetivo, enquanto que, a eficiência da geração de calor diminui.

Tabela 2 - Propriedades Térmicas da chama Oxiacetilênica

<i>Vazão de Acetileno</i> <i>L/h</i>	<i>Calor Efetivo Liberado</i> <i>Cal/s</i>	<i>Eficiência</i> <i>%</i>
150	380	72
250	600	68
400	720	51
600	920	44
1000	1270	36
1700	1750	29
2600	2250	25

Fonte: (GILZMANENKO e YEVSEYEV, 1960)

Também, (FAY, 1967) fez experimentos sobre o fluxo de calor produzido pelo processo de chama oxiacetilênica e comprovou os resultados das medições do fluxo de calor, descritos na Tabela 2, em diferentes tipos de chamas.

Uma medição da temperatura das chamas oxi-combustíveis, incluindo as suas flutuações sobre a transferência de calor foi estudado por (BÄCKSTRÖM, JOHANSSON e ANDERSSON, 2012) e (CLAUSEN, 2001). Estes autores verificaram que as flutuações de temperaturas, não mostram nenhum efeito, sobre a transferência de calor por radiação. Comparação com as flutuações de temperatura em outros tipos de chamas também são relativamente pequenas.

Para a determinação da tensão térmica existem duas vias, conforme (HSIAO, 1997): uma com distribuição uniforme de temperatura sem restrições e outra distribuição irregular de temperatura com restrições.

Na distribuição uniforme de temperatura sem restrições o corpo sólido expande-se e contrai-se livremente, sendo que as deformações térmicas são

proporcionais ao coeficiente de dilatação térmica e a mudança de temperatura, mas não existem tensões térmicas, (SHINKAI, TOMITA e OSAWA, 2001).

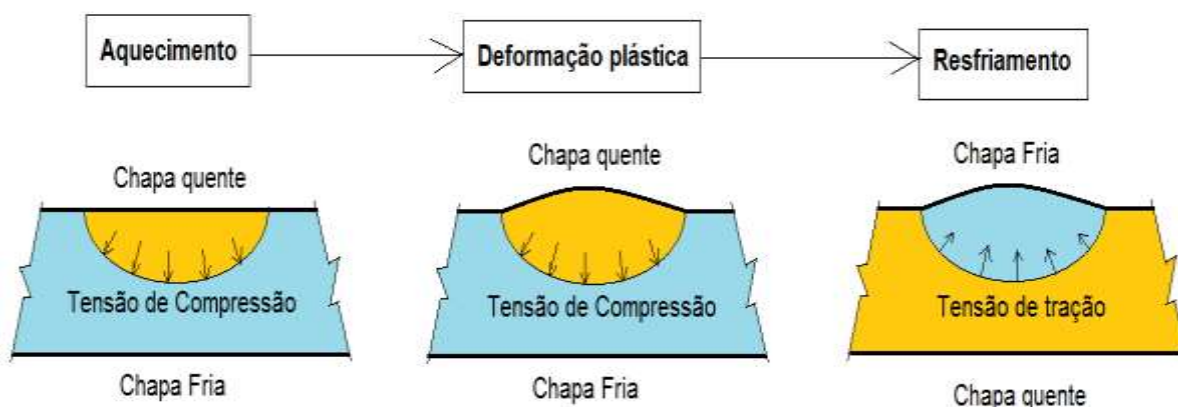
Por outro lado, uma distribuição irregular de temperatura com restrições, o corpo sólido expande-se e contrai-se com resistência, gerando efeitos de tensões térmicas.

Um modelo desenvolvido por (HSIAO, 1997) pode ser descrito, conforme a Figura 10, que durante um aquecimento local o metal aquecido se expande e encontra resistência do metal das regiões mais frias, que tende a frear essa expansão. A região aquecida sofre uma deformação plástica, gerando-se tensões térmicas de compressão imposta pela parte não aquecida que não se deformou.

Por outro lado, quando o calor da parte originalmente aquecida começa a esfriar, a tensão muda do tipo de compressão para tração. As tensões residuais e de deformações permanecem até no final do estágio de resfriamento. Isso é notado porque resultam forças e momentos de dobramentos no metal que deverá ser contrabalanceadas caso não existam forças externas.

Na conclusão do seu trabalho, (HSIAO, 1997) afirma que o modelo de aquecimento pode ser usado para diversos materiais e que na análise numérica os parâmetros podem ter diferentes combinações de potência de aquecimento e velocidade, obtendo consequentemente diferentes deformações angulares.

Figura 10- Fases das tensões térmicas entre aquecimento e resfriamento



Fonte: (HSIAO, 1997) Adaptado pelo Autor (2016).

A definição de uma linha de calor para (CLAUSEN, 2000) consiste em um método de conformação de chapas de duplas curvaturas pelo modo de aquecimento local. Quando a chapa é aquecida localmente, dois eventos acontecem; o material aquecido começa a amolecer abaixo do limite de escoamento e após algum tempo é expandido. Em seguida, o material adjacente ainda está na tensão original impede a dilatação, então a chapa sofre um aumento de espessura, e após o resfriamento o material recupera a tensão e se contrai termicamente curvando a chapa.

Geralmente, o aumento de temperatura nos materiais metálicos aumenta a amplitude de vibração dos átomos que constituem a rede cristalina. Este aumento da amplitude produz em média, um aumento do espaçamento cristalino, que expande o metal. Na contração, acontece o inverso, ao expor o corpo às temperaturas baixas o grau de agitação dos átomos diminui o que faz com que o espaço entre elas e, consequentemente o volume do corpo, diminuam, conforme equação (3).

As variações das dimensões de um corpo sólido, conforme (SHACKELFORD, 2011) pode-se obter através das formulações para expansão térmica linear, superficial e volumétrica. Para expansão linear temos:

$$\Delta l = Li.\alpha.\Delta t \quad (3)$$

Onde:

Δl – Variação do comprimento [m].

Li – Comprimento inicial do corpo [m];

α – Coeficiente de dilatação térmica linear [1/K];

Δt – Variação da temperatura [K].

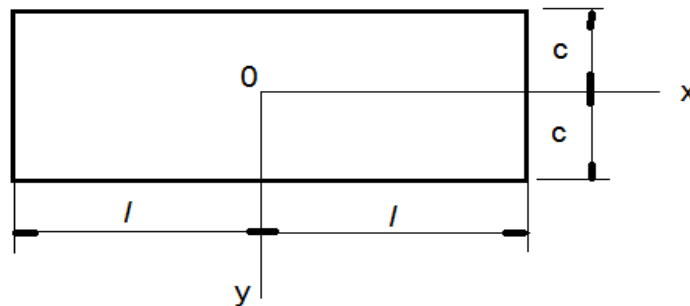
O coeficiente de dilatação linear, (α) depende de cada material. Quanto maior for o coeficiente da substância mais facilidade ela terá para se expandir ou contrair.

Para prever as deformações causadas pelo aquecimento localizado assimétrico, (JANG, SEO e KO, 1997) propôs a hipótese racional da teoria da elasticidade descrita por (TIMOSHENKO e GOODIER, 1980), simplificando assim, a teoria das deformações causadas pelas tensões térmicas residuais.

No método da supressão das deformações, (TIMOSHENKO e GOODIER, 1980) afirmam que uma das causas que originam tensões em um corpo é o aquecimento não uniforme.

A equação do cálculo das tensões térmicas máxima para estado plano de tensão, segundo descrevem (TIMOSHENKO e GOODIER, 1980), para uma placa retangular de comprimento $2l$ e de altura $2c$ submetida a um fluxo de calor em relação a um sistema de referência $x y$, como é mostrada na Figura 11, a temperatura T é uma função par de y , e independente de x e z .

Figura 11- Placa retangular sujeita a um ciclo térmico



Fonte: (TIMOSHENKO e GOODIER, 1980)

Considerando restrições de dilatação da placa nas direções x e z e livre para se expandir na direção y , as tensões são representadas pela equação (4), desenvolvida por (TIMOSHENKO e GOODIER, 1980), que serão de compressão quando θT for positivo.

$$\sigma_x = \sigma_y = - \frac{\alpha \cdot E \cdot \theta T}{1 - \nu} \quad (4)$$

Onde:

ν – Coeficiente de Poisson [-];

θT – Variação de temperatura num ponto z [K];

E – Módulo de elasticidade [N.m⁻²];

α – Coeficiente de expansão térmica [1/K];

σ_x – Tensões térmicas ao efeito do calor, no eixo x (Trativa/Compressiva) [N.m⁻²].

σ_y – Tensões térmicas ao efeito do calor, no eixo y (Trativa/Compressiva) [N.m⁻²].

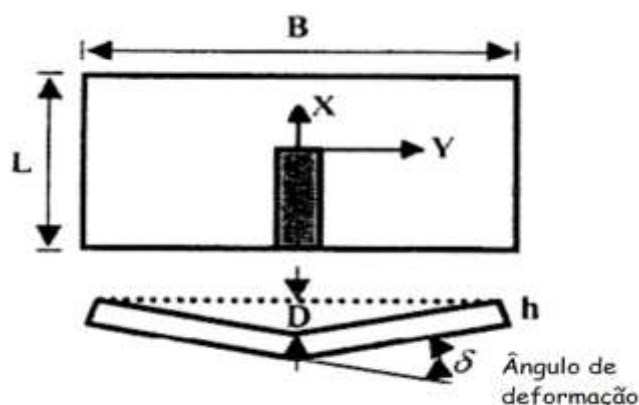
Em outra das premissas, (JANG, SEO e KO, 1997) afirma que a região não aquecida resiste à expansão da parte aquecida, causando uma deformação plástica

gerando tensões internas do tipo de compressão quando está no aquecimento e do tipo de tração quando está no resfriamento e a integração de todas essas tensões internas de compressão e de tração durante a trajetória da linha de calor provoca uma deformação angular final na chapa.

2.2.2 Tensões Inerentes e o Calculo de Carga Equivalente.

O método de análise simplificada termo-elástico-plástico foi apresentado por (JANG, SEO e KO, 1997), que é definido em função da tensão plástica residual em torno da aplicação em linhas de calor, conforme Figura 12. Sendo que, $L \times B$, largura e comprimento da chapa, nos eixos de coordenadas X e Y . E no eixo Z define-se h como a espessura e D como a deflexão após linha de calor, no detalhe central.

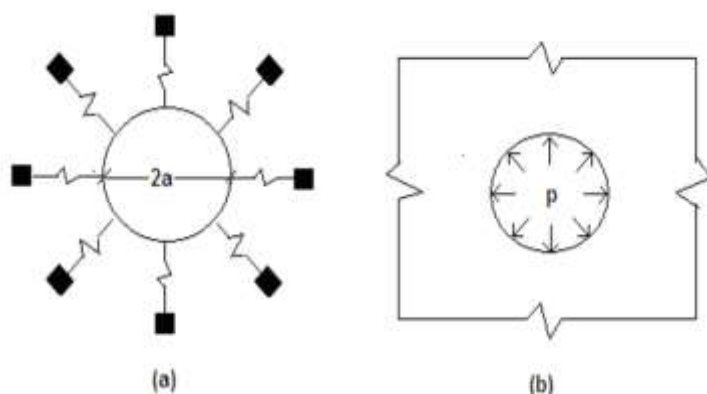
Figura 12- Linha de calor e o ângulo de deformação (Deflexão).



Fonte: (JANG, SEO e KO, 1997) Adaptada pelo Autor (2016).

O processo térmico elástico plástico ocorre dentro de uma região circular pequena e simétrica circundada por uma região elástica restante da chapa a qual resiste à expansão e à contração desta região circular plástica. A resistência da região elástica em torno da zona plástica é modelada como um conjunto de molas ao seu redor como ilustrado na Figura 13 A. A constante elástica K é calculada derivando-se o deslocamento radial de um orifício circular de uma chapa infinita sujeito a uma pressão uniforme p , como mostrado na Figura 13 B, segundo (JANG, SEO e KO, 1997),

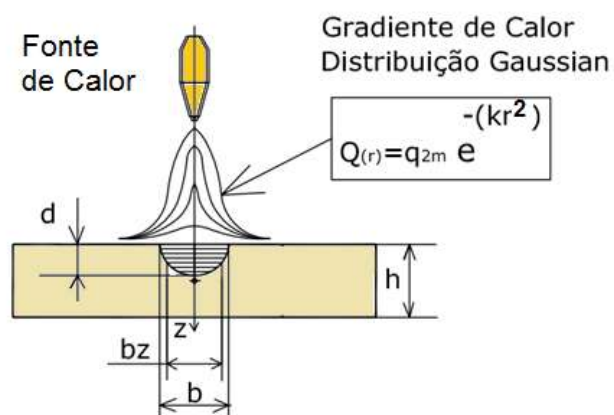
Figura 13 - Disco circular (A) Conjunto de molas (B) Pressão uniforme



Fonte: (JANG, SEO e KO, 1997)

A geometria da região da tensão inerente é gerada durante a passagem de uma fonte de calor por esta região, onde parte da energia calorífica é absorvida pelo metal, conforme mostra na Figura 14.

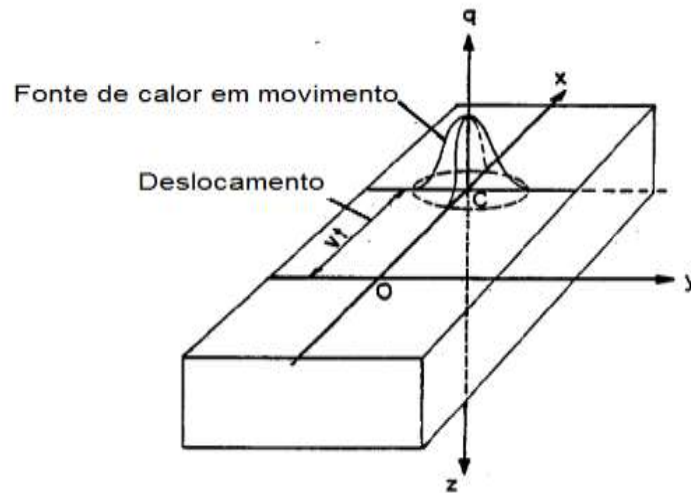
Figura 14- Geometria da região de tensão Inerente.



Fonte: Autor, 2013

Os efeitos da distribuição do fluxo de calor oriundo do processo por chama oxiacetilênica, com a fonte de calor em movimento com velocidade constante, sobre a chapa de dimensões finitas, foram estudados por (ROSENTHAL, 1946) que, está representado na Figura 15.

Figura 15- Fonte de calor em movimento constante.



Fonte: (ROSENTHAL, 1946)

Neste estudo várias simplificações foram assumidas. Primeiro, que as características do material aquecido, assim como a condutividade e calor específico são independente da temperatura. Segundo, que a velocidade com que a fonte se move e o fluxo de calor absorvido pela chapa é constante. Terceiro, um estado quase estacionário de fluxo de calor, onde a distribuição de temperatura não é constante em relação ao respectivo sistema de coordenada fixa do sólido aquecido e sim com a respectiva posição da fonte em movimento.

Assumido um estado quase estacionário a distribuição de temperatura pode ser expressa pela equação (5) desenvolvida por (JANG, KIM e YONG, 2007) baseada nas simplificações de (ROSENTHAL, 1946),

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda} e^{-\left(\frac{v}{2k}\right)w} \left[\frac{e^{-\left(\frac{v}{2k}\right)R}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{e^{-\left(\frac{v}{2k}\right)R_n}}{R_n} + \frac{e^{-\left(\frac{v}{2k}\right)R'_n}}{R'_n} \right) \right] \quad (5)$$

Onde:

T – Temperatura [°C];

T_0 – Temperatura Inicial [°C];

q – Fluxo de calor Absorvido [Cal/s.];

λ – Condutividade térmica [];

κ – Difusibilidade térmica [m^2s^{-1}]

R – Distância para o centro do aquecimento da tocha $R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2}$ [mm];

R_n – Distância para o centro componente $R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2 + (2nh + z)^2}$ [mm];

R'_n – Distância para o centro componente $R'_n = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2 + (2nh + z)^2}$ [mm];

h – Espessura da chapa (mm)

w – Distância na direção x com velocidade da fonte V ($w = x - vt$)

v – Velocidade de deslocamento da chama [mm/s];

x – Distância na direção x [mm];

y – Distância na direção y [mm];

z – Distância na direção z [mm];

t – Tempo [s];

As expressões 6 e 7, relacionam o fluxo de calor com a geometria elíptica da zona de deformação residual, com destaque para a espessura da chapa em função da largura máxima e da profundidade máxima na região da tensão inerente.

$$\frac{b}{h} = c_1 \sqrt{\frac{q}{vh^2}} \quad (6)$$

$$\frac{d}{h} = c_2 \frac{q}{vh^2} \quad (7)$$

Onde:

b – Máxima largura da zona de deformação residual [mm];

d – Máxima profundidade da zona de deformação residual [mm];

h – Espessura da chapa [mm];

q – Fluxo de calor [Cal/s.];

v – Velocidade de movimentação da chama [mm/s]

c_1 – Constante = 1,05;

c_2 – Constante = 0,25

A expressão do perfil da geometria da zona de deformações residual é assumida como uma forma elíptica que pode ser dimensionada pela expressão (8), por:

$$b_z = b \sqrt{1 - \frac{1}{d^2} \left(z + \frac{h}{2} \right)^2} \quad (8)$$

Onde:

b_z – Largura da zona de deformação residual em função a coordenada z [mm];

b – Máxima largura da zona de deformação residual [mm];

d – Máxima profundidade da zona de deformação residual [mm];

h – Espessura da chapa [mm];

z – Coordenada na direção da medida da espessura [mm]

As deformações da região da tensão inerente podem ser computadas através no modelo disco-e-mola pelas expressões (9) e (10).

$$\varepsilon^* = \alpha \cdot Tx - \sigma_y \left(\frac{1}{rd \cdot km} + \frac{1-\nu}{Ex} \right) \quad (9)$$

$$k = \frac{Ex}{rd(1+\nu)} \quad (10)$$

Onde:

ε^* - Deformação residual em função a coordenada [mm];

Tx – Temperatura na direção eixo x . [K];

α - Coeficiente de expansão térmico da tensão inerente. [];

σ_y - Tensão de escoamento da região de inerente tensão. [];

rd – Raio do disco da região da tensão inerente. [mm];

km - Constante da mola do modelo;

ν – Coeficiente de Poisson na região de inerente tensão.

Ex – Modulo de Young na região inerente na direção x .

A teoria de (JANG, SEO e KO, 1997) relata que a estimativa direta da quantidade de calor fornecido através da chama oxiacetilênica é difícil de obter com precisão, porque o calor fornecido depende da proporção de gases de descargas, tipo da tocha, altura do bico, entre outros parâmetros. Para contornar essas dificuldades, foi estimado um do fluxo de calor, baseado no poder calorífico da chama oxiacetilênica, que possibilitou o cálculo das deformações residuais.

A região isotérmica em torno da tocha foi idealizada por (JANG, SEO e KO, 1997), como uma meia elipse, onde, se atinge a máxima temperatura localizada, denominada de temperatura crítica.

A deformação angular pode ser estimada utilizando-se da equação (11), segundo (JANG, SEO e KO, 1997).

$$\delta = 2(1 - \nu^2) \cdot c_1 \cdot \sqrt{\frac{q}{\nu h^2}} \varepsilon^* \left[\frac{3\pi}{4} c_2 \frac{q}{\nu h^2} - 2 \left(\frac{c_2 q}{\nu h^2} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Onde:

δ – Deformação angular da chapa [rad.];

q – Fluxo de calor [Cal/seg.];

h – Espessura de chapa [mm];

ν – Coeficiente de Poisson na região de inerente tensão.

V – Velocidade de deslocamento da chama [mm/s];

c_1 – Constante = 1,05

c_2 – Constante = 0,25

ε^* – Deformação residual em função a coordenada [mm].

As cargas equivalentes unitárias das tensões inerentes são definidas na expressão (12), e o momento resultante na equação (13) para análise das deformações angulares.

$$f_y = \frac{1}{b} \int_{-h/2}^{h/2} E_y \varepsilon_y^* b_z d_z = \frac{\pi}{4} E_y \varepsilon_y^* a \quad (12)$$

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} E_x \varepsilon_x^* b_z z dz = \frac{1}{6} E_x \varepsilon_x^* dh \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{2d}{h} \right) \quad (13)$$

Onde:

ε_x^* - Deformação residual em função a coordenada x [mm];

ε_y^* - Deformação residual em função a coordenada y [mm];

E_x - Modulo de Young na região inerente na direção x;

E_y - Modulo de Young na região inerente na direção x.

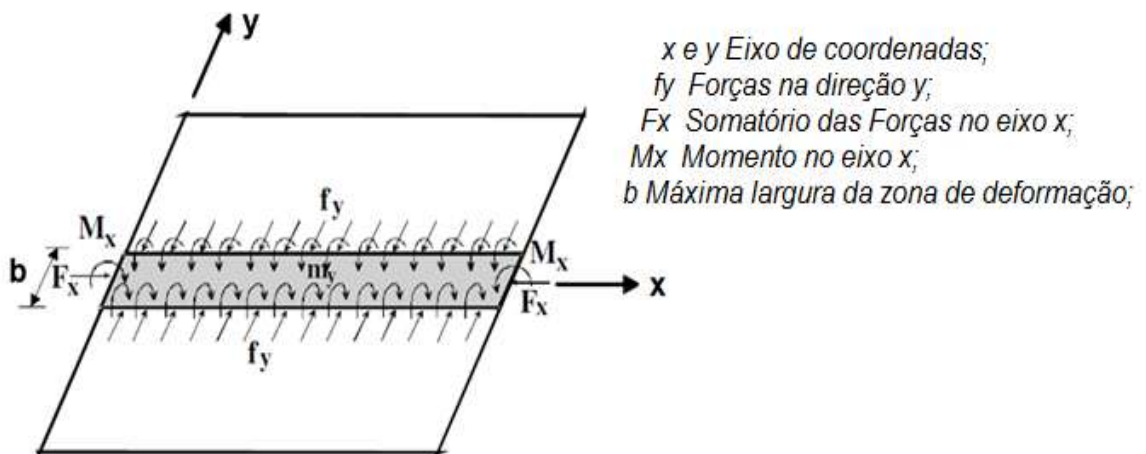
d - Máxima profundidade da zona de deformação residual [mm];

h - Espessura da chapa [mm];

a - Raio do disco da região da tensão inerente. [mm];

A representação gráfica das cargas equivalentes unitárias das tensões inerentes esta mostrada na Figura 16.

Figura 16 – Representação das cargas equivalentes.



Fonte: (JANG, SEO e KO, 1997)

Sabe-se que a dissipação do calor ocorre principalmente por condução. Nas chapas o calor flui das regiões aquecidas para o restante do material. A evolução de temperatura em diferentes pontos pode ser estimada no experimento utilizando os termopares tipo K.

2.2.3 Análise Mecânica.

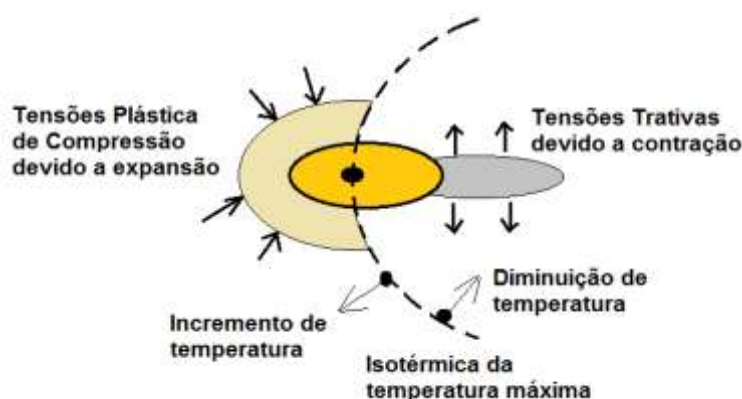
A análise mecânica consiste na resolução dos problemas de equilíbrio relacionados com as deformações. A deformação total pode ser expressa como o somatório das deformações elásticas, $\epsilon_{elástica}$; das deformações plásticas, $\epsilon_{plásticas}$; das deformações de transformação de fase, $\epsilon_{transformação}$, que neste trabalho não serão consideradas.

A deformação elástica pode ser determinada diretamente pela lei de Hook, utilizando-se o módulo de elasticidade dentro da faixa elástica do gráfico tensão versus deformação.

A deformação térmica pode ser determinada pela formulação da dilatação térmica, onde se utiliza o coeficiente de dilatação térmica e a variação de temperatura e pode produzir deformações elásticas e plásticas.

A deformação plástica é mais complexa para se determinar, mas a teoria da elasticidade fornece uma condição limite que caracteriza uma resposta elasto-plástica do material em conjunto com critério de escoamento de Von Mises (TIMOSHENKO e GOODIER, 1980), além da variação das propriedades mecânicas em função do gradiente da temperatura.

Figura 17- Tensões Plásticas na movimentação de fonte de calor



Fonte: (RADAJ, 1992) Adaptada pelo Autor (2016).

As tensões plásticas foram representadas por (RADAJ, 1992), de acordo com a movimentação da fonte de calor. Na Figura 17 observa-se a localização da isotérmica da temperatura máxima. Na frente desta, a temperatura é incrementada

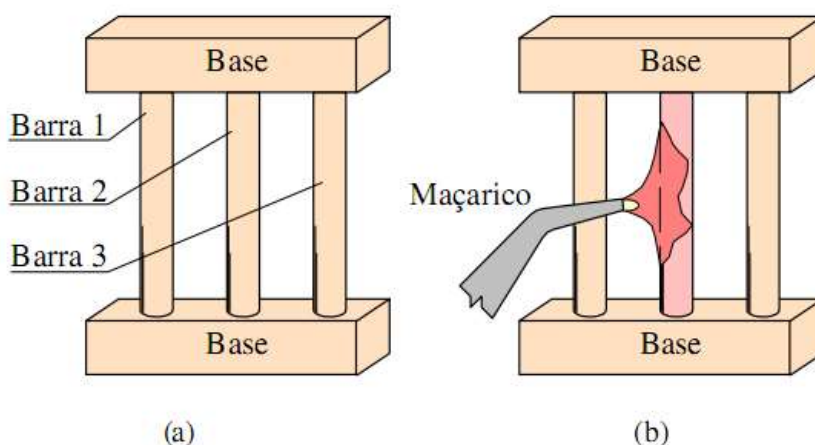
no material base, ocorrendo à expansão térmica de metal base, gerando tensões de compressão, devido à restrição do material base que se encontra em baixa temperatura. Após desta isotérmica, a temperatura diminui, gerando-se tensões trativas, devido à contração do metal quente.

2.2.4 Desenvolvimento de tensões residuais.

A Figura 18 mostra a duas barras metálicas de grande seção transversais unidas por três outras barras metálicas de menor seção transversal. Supondo que a barra central seja aquecida com um maçarico de maneira uniforme. Então, observa-se que tensões internas se desenvolvem. Segundo (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2007) afirma que os metais quando aquecidos, tendem a se expandir (dilatações térmicas), estas quando atinge o limite de escoamento (tensão mínima para deformações plásticas), o metal se deforma plasticamente e que o limite de escoamento tende a diminuir com o aumento de temperatura.

Se um objeto for aquecido e resfriado uniformemente e não existirem restrições às suas variações dimensionais, estas não resultam em efeitos mecânicos importantes na peça. Contudo, se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e distorções podem se desenvolver.

Figura 18 - Diagrama de Montagem de três barras.



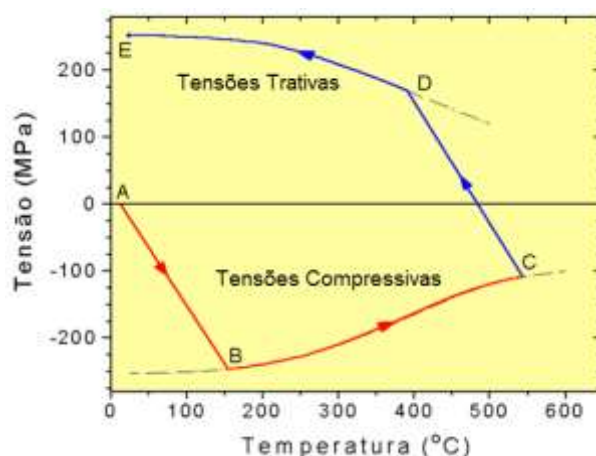
Fonte: (MODENESI, 2001)

Na Figura 19, está ilustrada a evolução do nível de tensão internas na barra central em decorrência da variação da temperatura. No início do aquecimento no ponto A, o nível de tensões internas é nulo. Quando a temperatura aumentar, a barra central tende a se expandir, sendo restringida pelas barras laterais. Dessa forma, a barra experimenta um esforço de compressão, deformando-se elasticamente em compressão, até que as tensões internas atinjam o limite de escoamento em compressão no ponto B. Continuando o aquecimento, a barra sofre deformação plástica, uma diminuição em seu comprimento e um aumento em sua seção transversal. Este processo continua até que cesse o aquecimento no ponto C, quando a barra estará submetida a esforços de compressão, da ordem do limite de escoamento em compressão na temperatura do final do aquecimento.

Cessado o aquecimento, a barra central tende a resfriar e, conseqüentemente, a se contrair. Assim, quando o esforço de compressão sentido pela barra tende a diminuir, até se anular, para uma dada temperatura acima da temperatura inicial no ponto D, continuando o resfriamento deformar-se plasticamente em tração, até que a temperatura volte ao valor da temperatura ambiente, no ponto E.

Ao final do processo, a barra central que inicialmente não estava submetida a nenhum esforço interno, agora apresenta tensões internas residuais da ordem do limite de escoamento à tração.

Figura 19- Diagrama das tensões internas em função da temperatura.



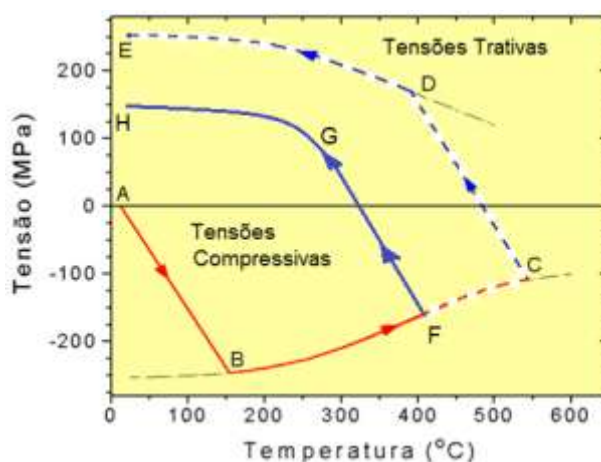
Fonte: (MODENESI, 2001)

Quando o aquecimento é interrompido a uma determinada temperatura e ao final do resfriamento a tensão térmica não é igual à tensão de escoamento do material, torna-se menor, afirma (SCOTTI, 2013).

A Figura 20 mostra o aquecimento que foi interrompido no ponto F. Nesta condição a barra central tende a resfriar e se contrair termicamente. Assim, o esforço de compressão tende a diminuir e até se anular, para temperatura acima da temperatura inicial no ponto G. Continuando o resfriamento, a barra deformar-se plasticamente em tração, até que a temperatura volte ao valor da temperatura ambiente, no ponto H.

Ao final do processo, a barra central que inicialmente não estava submetida a nenhum esforço interno, agora apresenta tensões internas residuais menores que o limite de escoamento à tração.

Figura 20- Diagrama das tensões internas em função da temperatura interrompida.



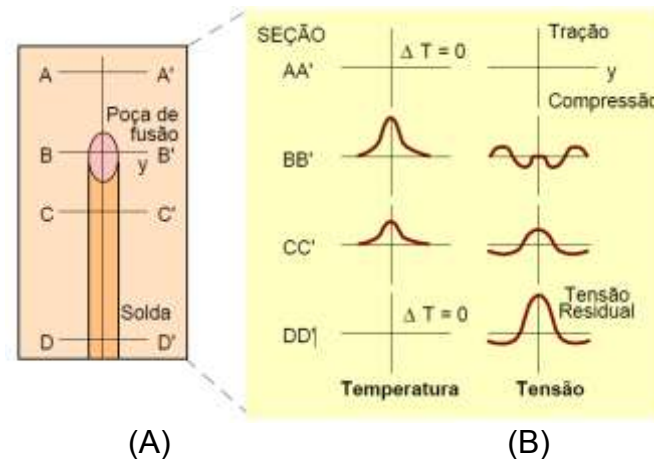
Fonte: (MODENESI, 2001)

O desenvolvimento das tensões residuais na soldagem devido ao aquecimento não é uniforme em uma junta de topo, segundo (MODENESI, 2001).

Na Figura 21B, mostra quatro seções, AA'; BB'; CC' e DD', onde na seção AA', o metal não aquecido está isento de tensões, na seção BB', junto à poça de fusão o metal aquecido tende a expandir, mas está restringido, gerando tensões compressivas próximas a ZTA, após a solidificação da solda o metal se contrai, então, na seção CC' as tensões de tração junto à solda aumenta de intensidade e no

resfriamento completo na seção DD' as tensões residuais no centro da solda chegam próxima a tensão de escoamento.

Figura 21- Desenvolvimento das tensões residuais da soldagem



Fonte: (MODENESI, 2001)

2.2.5 Calculo da Energia de Soldagem (Heat Input).

A energia de soldagem, definida como sendo a energia liberada pela fonte de calor por unidade de comprimento da solda, segundo define (VILLANI e MODENESI, 2014), é útil na avaliação dos efeitos metalúrgicos da operação de soldagem sobre o material soldado. A energia de soldagem, também chamada de aporte térmico (heat input) é um parâmetro definido na equação (14).

$$H = \eta \frac{V \cdot I}{v_s} \quad (14)$$

Onde:

H = Energia de soldagem. [J/cm];

V = Tensão de soldagem [Volts];

I = Corrente de soldagem [Ampères];

v_s = Velocidade de soldagem [cm/s],

η = fator adimensional de rendimento = 0,85.

3 METODOLOGIA

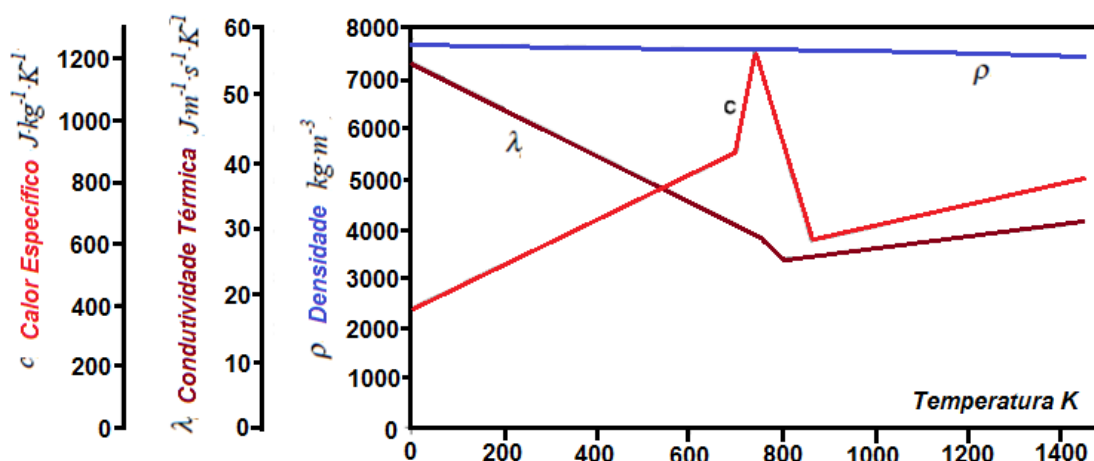
3.1 MATERIAIS

3.1.1 Materiais das amostras de chapas

No experimento foram utilizadas chapas do aço naval (ASTM A 131 GR AH36, 2014), que pertence à classe de altas tensões de escoamento (315 MPa), nas espessuras 7,93 mm; 9,50 mm; 12,70 mm; 15,88 mm e 19,05 mm. As amostras foram retiradas das chapas, no sentido da laminação, com um sobre metal, produzido pelo processo de corte oxiacetileno. Depois, as chapas foram serradas para retirada do excesso de metal, produzindo uma geometria retangular final 100,0 mm x 150,0 mm.

As propriedades do aço naval, (ASTM A 131 GR AH36, 2014) são apresentadas por (PILIPENKO, 2001). As propriedades termo físicas como: o calor específico, c [$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$], a condutividade térmica, λ [$\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] e a densidade, ρ [$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$] são dadas em função da temperatura estão mostradas na Figura 22.

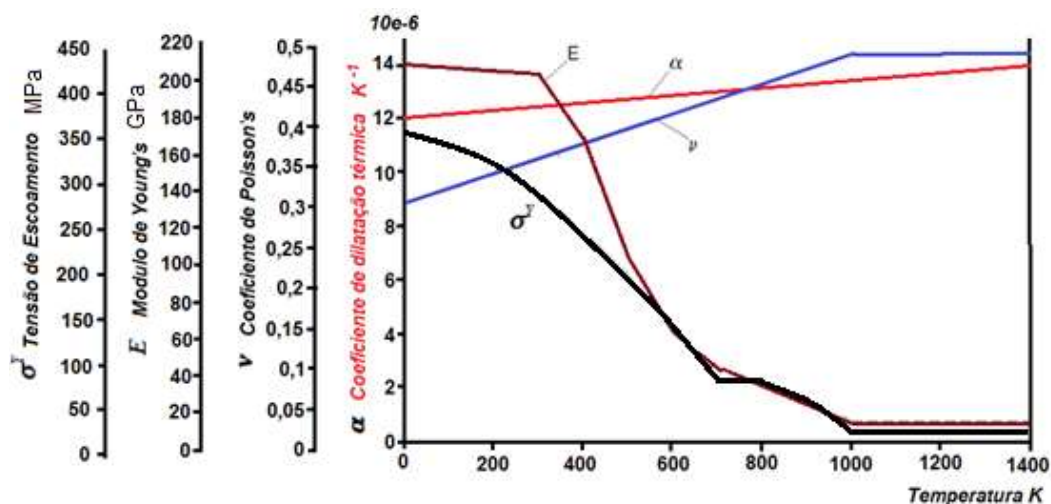
Figura 22- Características Térmicas em função da temperatura



Fonte: (PILIPENKO, 2001) Adaptada pelo autor (2016).

As propriedades termomecânicas, como: o coeficiente de expansão térmica, α [K^{-1}]; Modulo de elasticidade E [GPa.]; o coeficiente Poisson ν ; tensão de escoamento σ_y [MPa.] estão mostrados na Figura 23.

Figura 23- Características Mecânicas em função da Temperatura.



Fonte: (PILIPENKO, 2001) Adaptada pelo autor (2016).

A Tabela 3 sumariza as propriedades físicas e mecânicas em função da temperatura, para o aço naval (ASTM A 131 GR AH36, 2014)

Tabela 3 - Características Térmicas e Mecânicas em função da Temperatura

Temperatura °C	ρ densidade (kg/m ³)	λ Condutividade térmica (J/m s K)	c Calor específico (J/kg K)	α Coeficiente de dilatação térmica (1/K)	ν Coeficiente de Poisson	E= Módulo de Young (GPa)	σ_y = Tensão de escoamento (MPa)	κ Difusibilidade (m ² /s)
20	7769,00	54,009	453,044	12,008	0,288	209,488	350,226	1,92158E-05
100	7753,81	51,153	500,500	12,104	0,304	218,160	326,850	1,63746E-05
200	7734,82	47,583	559,820	12,224	0,324	209,560	298,890	1,34064E-05
300	7715,83	44,013	619,140	12,344	0,344	184,960	272,330	1,09762E-05
400	7696,84	40,443	678,460	12,464	0,364	150,360	247,170	8,98658E-06
500	7677,85	36,873	737,780	12,584	0,384	111,760	223,410	7,35759E-06
600	7658,86	33,303	797,100	12,704	0,404	75,160	201,050	6,02388E-06
700	7639,87	29,733	856,420	12,824	0,424	46,560	180,090	4,93194E-06
800	7620,88	26,163	915,740	12,944	0,444	31,960	160,530	4,03793E-06
900	7601,89	22,593	975,060	13,064	0,464	37,360	142,370	3,30598E-06
1000	7582,90	19,023	1034,380	13,184	0,484	68,760	125,610	2,70671E-06

Fonte: (PILIPENKO, 2001) Adaptada pelo autor (2016).

No certificado de qualidade do fornecedor da chapa, pode-se observar a composição química de uma amostra do aço naval, norma (ASTM A 131 GR AH36, 2014), apresentada na Tabela 4, pela espessura de 12,7 mm, laminadas pelo processo de laminação controlada (TMCP), as chapas apresentaram uma tensão de escoamento 412,2 MPa; tensão de ruptura 514,4 MPa; alongamento 26,5%; ensaio de impacto (Charpy) de 107 J médio, na temperatura de 0° C, além de um carbono equivalente de 0,32.

Tabela 4 – Composição química da amostra do aço ASTM-A131-gra-AH36 (2014)

% em peso												
C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Mo.	Cr	Ni	Nb	V	Ti
0,13	1,08	0,02	0,010	0,286	0,029	0,006	0,004	0,021	0,015	0,025	0,02	0,017

Fonte: (Autor, 2015)

3.1.2 Consumíveis para aquecimento e para soldagem.

A geração das linhas de calor foi utilizada os gases acetileno e oxigênio nos experimentos, fornecidos em cilindros de volume de 10 m³. Os consumíveis de soldagem para o processo GMAW foi o eletrodo AWS A 5.18 – ER70S-6 e a mistura Ar -25% CO₂ como gás de proteção.

3.2 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS

Os equipamentos, máquinas e os instrumentos, que foram utilizados nos experimentos são descrito nestes itens, como:

3.2.1 Equipamentos para o sistema de geração de chama oxiacetilênica

A fonte de calor foi obtida através de um maçarico de corte, na opção de chama de aquecimento, sem abertura do oxigênio para corte, pelos seguintes

motivos. Primeiro, a possibilidade de variar o fluxo de calor apenas com as trocas dos bicos. Segundo, os experimentos foram realizados em escalas laboratoriais que demandam pequenos fluxos de calor. Terceiro, os maçaricos de aquecimento manuais, tipo funilaria são recomendados para chapas finas, inadequados às experiências. Por fim, a medição do fluxo de calor, com os maçaricos de corte utilizados apenas para aquecimento, tiveram bons resultados quando comparados aos obtidos nas literaturas acadêmicas.

Portanto, foi utilizado:

- Maçarico de corte marca CONDOR tipo CO 3600, tipo misturador, com três tubos, comprimento 300 mm, referência CO 3600;
- Bico de corte número de série número 5, 6 e 8, cuja referência 1101, para gases acetileno e oxigênio;

3.2.2 Equipamento para o controle da velocidade de deslocamento.

- Transformador de tensão 220 V para 110 V;
- Placa para controle da velocidade 115 V – 1,4 A, 60 W, 50/60 Hz, acoplada com potenciômetro para variação de velocidade, chave reversora de mudança de sentido.
- Motor redutor 1/50 HP de base simples, acoplado com um sistema de transmissão por corrente ao eixo de carro porta maçarico.

3.2.3 Equipamento para medição das deformações iniciais e finais.

- A máquina de medição por coordenadas, utilizada para executar medições das amostras, foi do laboratório de engenharia mecânica LAMECO-DEMEC-UFPE, de fabricação MITUTOYO, modelo CRYSTA-547, com certificado de calibração número 17.880-11.

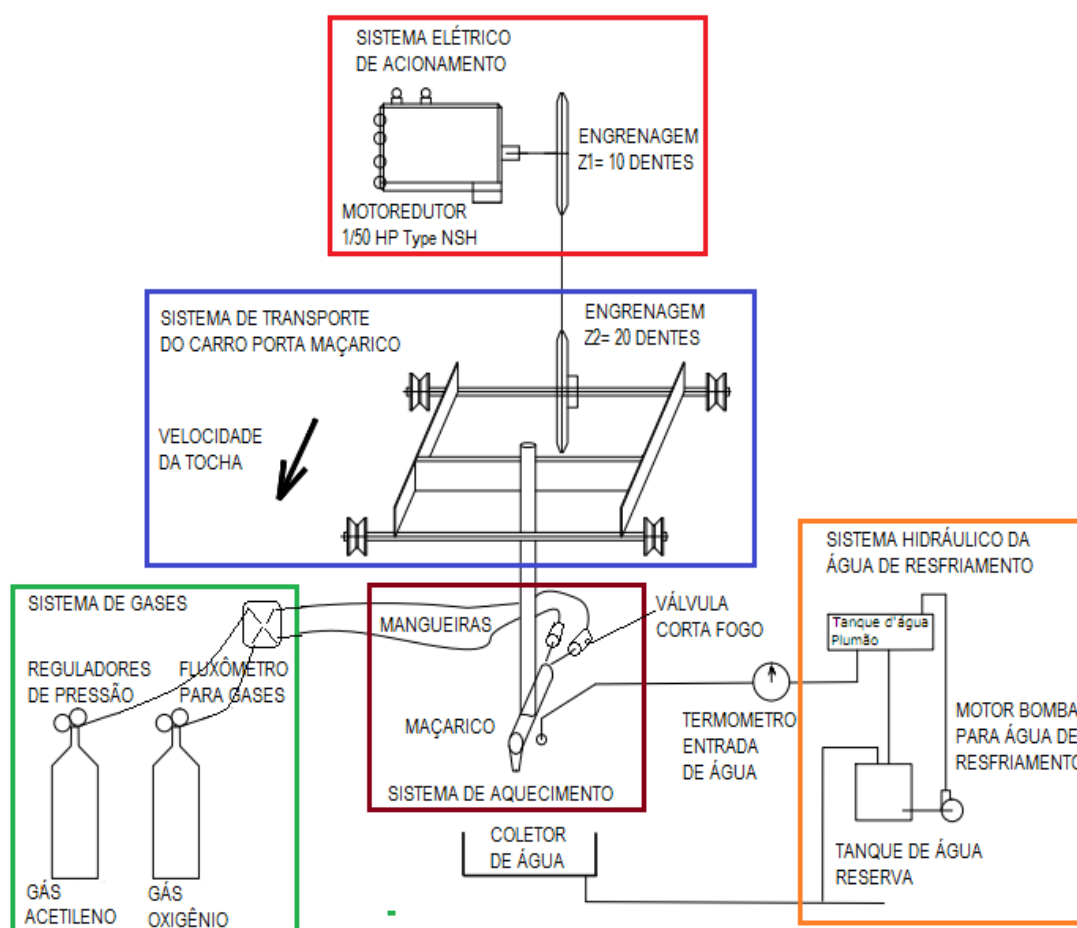
3.2.4 Instrumento para visualização em tempo real das deformações

- Relógio comparador marca MITUTOYO, mostrador contínuo, resolução 0,01 mm, exatidão $\pm 10 \mu\text{m}$, Mostrador: 0-100 (100-0), referência 2046S.

3.2.5 Equipamento protótipo de aplicação de linhas de calor

O equipamento protótipo para aplicação da linha de calor foi desenvolvido, com diversos sistemas como: sistema elétrico de acionamento, sistema de transporte por carro porta maçarico móvel, sistema de gases, sistema de aquecimento, sistema de água de resfriamento, (MASUBUCH, IMAKITA, *et al.*, 1988). A Figura 24, que apresenta esquematicamente os principais componentes da máquina.

Figura 24- Esquema principal do protótipo de máquina de linha de calor.



Fonte: (Autor, 2015)

3.2.6 Instrumentos para medição do diferencial de temperatura

- O coletor de dados utilizado foi o DATATAKER DT80, serie 3 DATA LOGGER, do LTSM- Laboratório de termometria e simulações termomecânicas do DEMEC-UFPE.

- A fixação dos termopares na amostra de chapa foi realizada por um conjunto de solda de resistência tipo MP-25 BANTECH, do Laboratório de termometria e simulações termomecânicas do DEMEC-UFPE.

3.2.7 Calorímetro de fluxo mássico de água.

Para determinar a quantidade de calor nos eventos de medição do rendimento e no aquecimento por linha de calor foi utilizado um calorímetro, projetado e fabricado a partir de um tubo retangular de aço carbono revestido externamente com um isolante térmico, carbonato de cálcio, exceto na parte superior. Nas bordas tem uma capa protetora refratária de aço inox.

O calorímetro contém uma entrada de água para uma vazão controlada e uma conexão para termopar, para medir a temperatura de entrada da água. Do outro lado, uma saída de água, também com uma conexão para termopar para medir a temperatura de saída de água, conforme Figura 25.

Figura 25 – Detalhe do calorímetro de fluxo mássico de água.



Fonte: (Autor, 2015)

3.2.8 Equipamento para soldagem no processo GMAW

O equipamento para soldagem a arco com proteção gasosa foi utilizado o existente no departamento de mecânica da Universidade Federal de Pernambuco: A Máquina de solda modelo SMASHWELD 318, fabricante ESAB, constituída das seguintes características:

- Tensão da rede 220, 380 V -50/60 Hz;
 - Faixa de corrente / tensão 50 A / 17 V – 420 A / 35 V;
 - 35% do fator de trabalho 315 A / 29,8 V;
 - 60% do fator de trabalho 270 A / 25,5 V;
 - 100% do fator de trabalho 220 A / 25 V;
 - Fator de potência na corrente máxima de 0,96;
 - Classe de Proteção IP23;
 - Normatização IEC 60974-1
 - Alimentador de arame:
 - Faixa de velocidade arame 1,5 a 22 m/mim;
 - Mecanismo de avanço de arame de 02 roldanas;
 - Faixa de diâmetro de arame sólido 0,60 a 1,2 mm;
- Complementando o processo, diversos equipamentos de segurança individual.

3.2.9 Câmara termográfica

A câmara termográfica utilizada pertence o departamento de energia térmica da Universidade Federal de Pernambuco, modelo ThermaCAM S45, fabricante FLIR SYSTEMS, constituída das seguintes características:

- Campo de visão 24° / 18°;
- Distância mínima para foco 0,3 m;
- Regulagem do foco manual ou automático;
- Tipo de detector 320 x 240 pixels;
- Faixa de temperatura de medição:
 - Campo 1 de -40°C a +120°C;
 - Campo 2 de 0° a +500°C
 - Campo 3 de +350°C a +1500°C

- Tolerância $\pm 2^\circ \text{C}$ ou $\pm 2\%$;
- Emissividade 0,1 a 1,0;
- Tamanho da memória de cartão 256 MB;
- Tipo de arquivo das imagens JPEG, 14 Bit.

3.2.10 Instrumentos de ensaio micrográfico.

O microscópio eletrônico utilizado para a observação foi o Olympus BX51M, com iluminação refletida / transmitida, com sistema óptico UIS2 (corrigido ao infinito), graduação mínima de 1,0 mm para uma rotação de 100,0 mm e com controle binocular inclinável.

3.2.11 Forno de resistência.

O forno mufla para aquecimento das amostras de chapa foi utilizado o tipo QUIMIS Q318M micro processado, com faixa inicial de trabalho em 300°C e temperatura máxima de trabalho até 1200°C , com sensores de temperatura tipo K. O forno é construído em chapa de aço tratada, revestida com epóxi eletrostático, com Isolação térmica, com resistências fio Kanthal® e controlador eletrônico micro processado de temperatura, permitindo a programação de rampas e patamares.

3.2.12 Equipamento de Difração de raios-X.

Os experimentos de medições das tensões residuais foram realizados no laboratório da UFRJ - COPPE, com o objetivo de analisar as tensões residuais, antes e depois, das chapas serem submetidas à aplicação de linhas de calor.

Dois equipamentos foram aplicados: um de medição por magnetização e outro por difração de raios-X.

O equipamento portátil magnético é composto por um sensor magnético, uma unidade de controle, um computador para visualizar os resultados do mapeamento em tempo real. Foi empregado o efeito inverso de magnetostrição, com sensor do tipo MAS (sensor magnético-anisotrópico) que permite observar as variações de magnetização do material ferromagnético sujeito às tensões mecânicas.

O equipamento por difração de raios-X, dupla exposição, ângulo de convergência dos feixes de raios-X de 50°, linhas difratadas no intervalo angular de 2θ de 148° a 164°,

Características Técnicas do Conjunto RAYSTRESS consiste em: Tubo de raios-X: Cr (padrão), Tensão: 20-25kV, corrente: 0.1-2 mA, Tempo de exposição: 5 min (aços), Fonte de alta tensão com tubo de raios-X: 50 mm (diâmetro) x370 mm, peso 2.5 kg, Unidade de controle: 200x120x80 mm, peso 1.0 kg, Precisão de medição: 10 MPa, Resfriamento do tubo de raios-X: ao ar, Alimentação: CA 110-250 V, 50-60 Hz. Tempo de montagem do equipamento para trabalho no campo: no máximo 3 min.

3.2.13 Durômetro de Bancada.

A medição da microdureza foi realizada pelo microdurômetro automático marca INSIZE modelo ISH – TDN 1000. Foi realizada uma sequência de três medições, logo após, obtida a média da microdureza, com valores de dureza na escala Vickers com carga de 300 g por 15 segundos.

3.2.14 Fluxômetro de Gases.

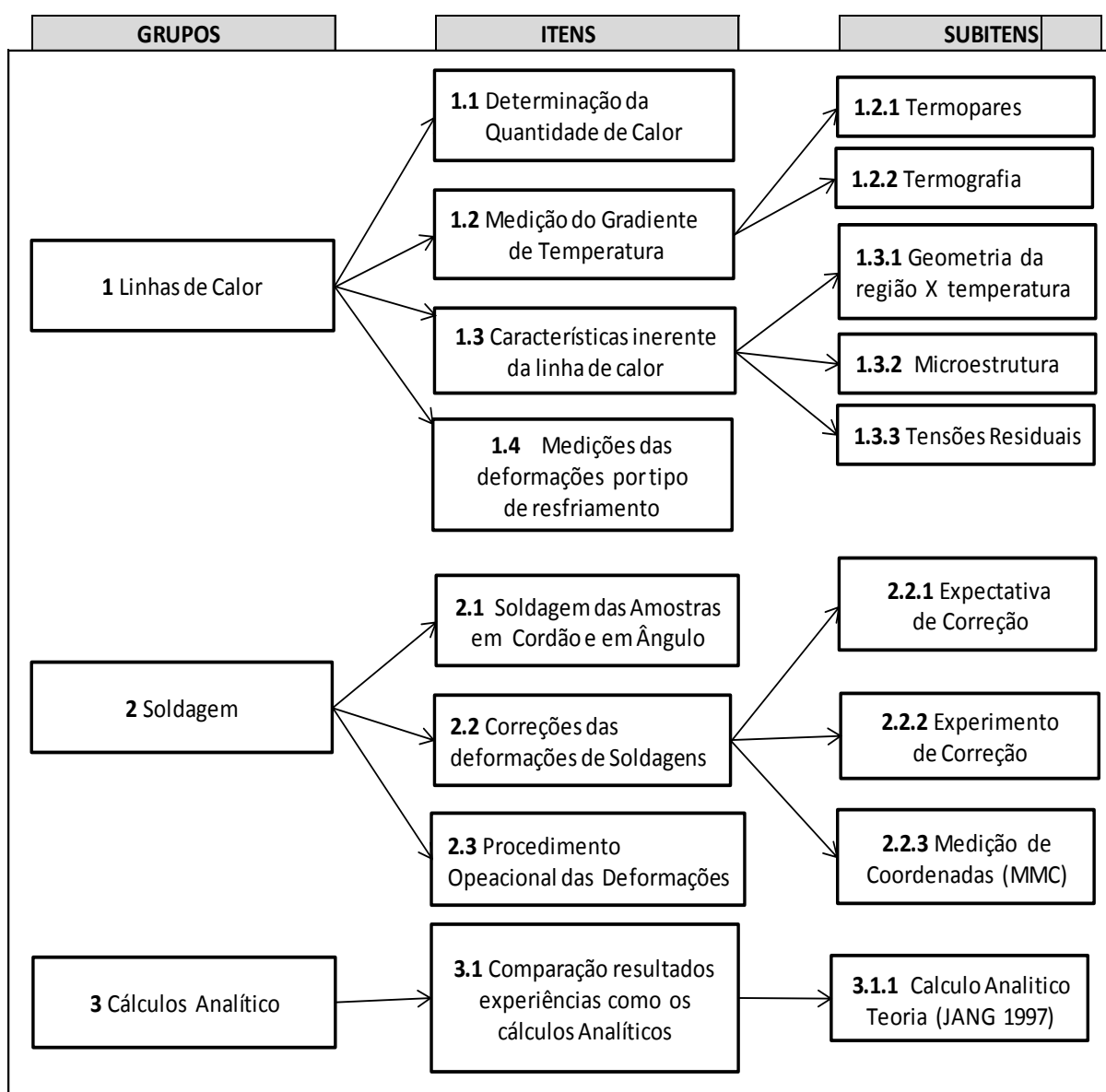
A medição dos gases oxigênio e acetileno foram realizados por fluxômetros de corpo de latão cromado, com escala de 0 a 15,0 litros/min, com Venturi em plástico translúcidos e esfera de aço inoxidável, suportando uma pressão máxima de 3,5 Kg/cm².

3.3 MÉTODOS

Os métodos utilizados na pesquisa foram planejados em três grupos de estudos básicos, subdividido em linhas de calor, soldagem e cálculos analítico-numéricos, como mostra na Figura 26, com os respectivos itens e subitens.

Neste capítulo é apresentado individualmente um sumário dos diversos métodos experimentais de cada grupo, como foram realizados para obtenção do êxito na pesquisa.

Figura 26- Fluxograma do planejamento dos estudos básicos.



Fonte: (Autor, 2015)

3.3.1 Determinação da quantidade de calor nas linhas de calor.

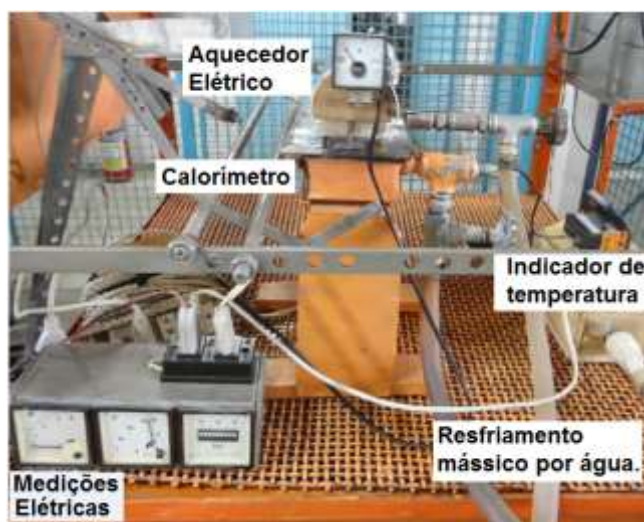
(Método utilizado para o grupo 1, item 1.1, conforme Figura 26)

A determinação do rendimento térmico e da quantidade de calor nas linhas de calor foram medidas previamente utilizando protótipo de um calorímetro, descrito anteriormente, baseado no princípio de balanço de energia, descrito por (KOU, 2003).

Os experimentos foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa, a determinação do rendimento com aquecimento elétrico, e na segunda etapa, a determinação da quantidade de calor das linhas de calor.

Na primeira etapa foi determinado o rendimento real do calorímetro. Foi feito um aquecimento inicial por resistência elétrica para dissipar energia produzida pelo efeito Joule. Depois de aquecido, o calorímetro transferiu calor para a água circundante. Desta forma foi possível a medição da quantidade de energia, possibilitando a medição do rendimento térmico do calorímetro. Os detalhes do sistema elétrico de aquecimento, de medição de temperatura e de resfriamento mássico por água são mostrados na Figura 27.

Figura 27- Detalhes do sistema de aquecimento elétrico no calorímetro.



Fonte: (Autor, 2015)

Na segunda etapa, foram determinadas as quantidades de calor especificamente para as linhas de calor, utilizando o calorímetro. Foram observadas as variações dos tipos dos bicos e as velocidades de deslocamento da tocha, (Doravante, a palavra tocha será um conjunto maçarico aceso com chama neutra oxiacetilênica), conforme mostra a Figura 28.

Figura 28 – Detalhe do calorímetro para determinar a quantidade de calor.



Fonte: (Autor, 2015)

Os bicos de maçarico, números 0, 2, 4, 6 e 8 foram utilizados, na opção de chama de aquecimento, sem abertura do oxigênio para corte, prevendo as possibilidades de variar o fluxo de calor apenas com as trocas dos bicos.

As velocidades de deslocamento da tocha de 5,3 mm/s; 7,8 mm/s; 10,2 mm/s e 13,4 mm/s foram escolhidas em função da capacidade instalada do moto redutor do simulador de linhas de calor.

3.3.2 Medição do gradiente de temperatura nas linhas de calor.

(Método utilizado para o grupo 1, item 1.2, conforme Figura 26)

A medição dos gradientes de temperatura devido às linhas de calor foi determinada utilizando-se dois métodos. Foram utilizados termopares do tipo K conjuntamente com os instrumentos para medição de temperatura e outro com a utilização de uma câmara termográfica.

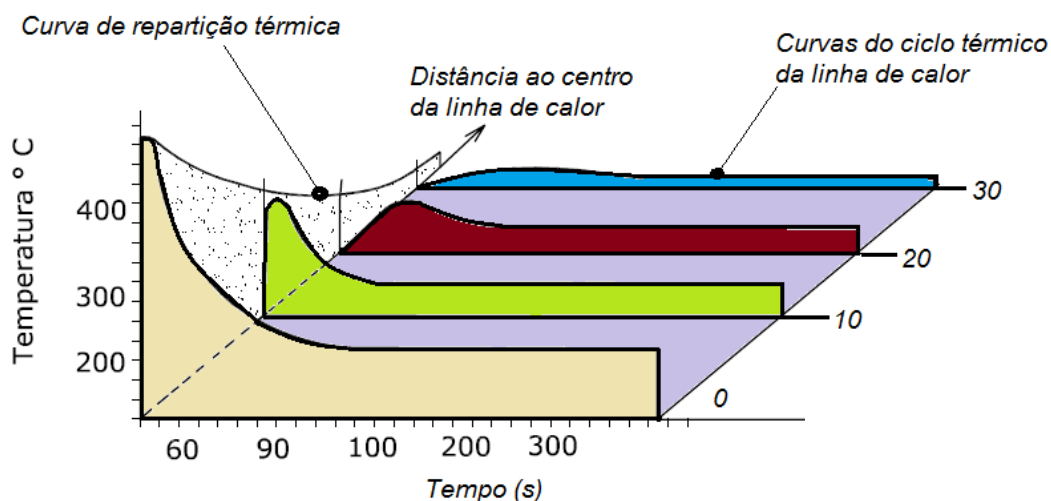
3.3.2.1 Medição da temperatura por termopares

(Método utilizado para o grupo 1, item 1.2, subitem 1.2.1, conforme Figura 26)

As medições das temperaturas por termopar tipo K, foram medidas por um conjunto de quatro termopares, em três posicionamentos diferentes e independentes. Um conjunto posicionado diretamente na chama junto à superfície das amostras de chapa, outro conjunto, posicionado na profundidade de 1,6 mm e finalmente no lado oposto a chama, cuja profundidade corresponde a espessura das amostras de chapa.

Nestes experimentos foram produzidos os denominados “ciclos térmicos da linha de calor”, para registrar as variações das temperaturas em função do tempo, e “repartição térmica da linha de calor”, para registrar as variações das temperaturas com a distância ao centro da zona aquecida, na direção da linha de calor, conforme esquema da Figura 29.

Figura 29 – Esquema das curvas ciclo térmico e repartição térmica.



Fonte: (Autor, 2015)

3.3.2.2 Medição da temperatura por câmara termográfica.

(Método utilizado para o grupo 1, item 1.2, subitem 1.2.2, conforme Figura 26)

As medições das temperaturas utilizando a câmara termográfica foram feitas com esta afastada a 800,0 mm da região aquecida. Registravam as temperaturas, em fotos digitais, nas profundidades das amostras de chapa em 1,0 mm; 2,0 mm; 3,0 mm e 5,0 mm em relação à superfície aquecida pela chama, no lado oposto da espessura, conforme Figura 30.

Figura 30- Detalhe da utilização da câmara termográfica.



Fonte: (Autor, 2015)

3.3.3 Características inerentes das linhas de calor

(Método utilizado para o grupo 1, item 1.3, conforme Figura 26)

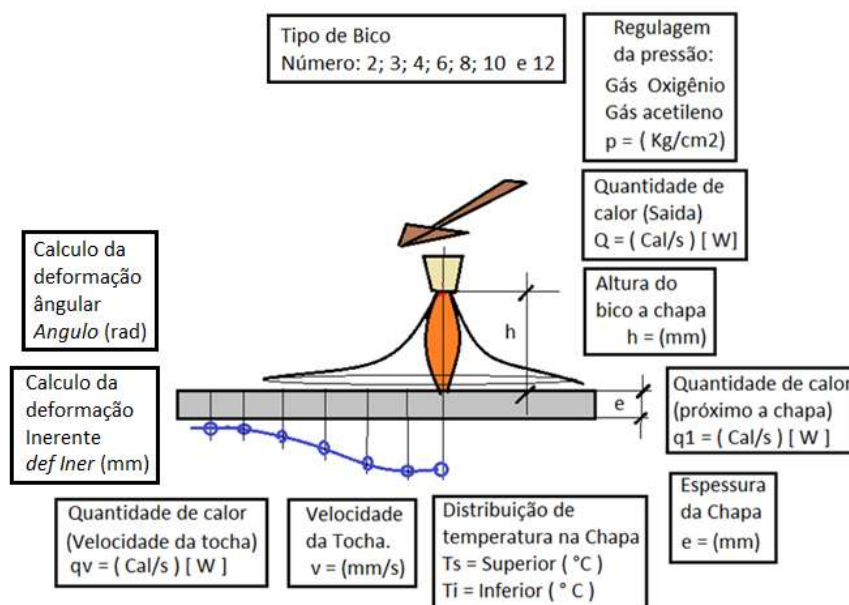
Nos itens anteriores, deste capítulo foram evidenciados os métodos para determinação da quantidade de calor pelo calorímetro e os gradientes de temperatura por termopares ou por câmaras termográficas. Ambas, são as bases fundamentais para observar as características inerentes das linhas de calor conjuntamente com as regulagens das variáveis do processo.

As regulagens das variáveis do processo das linhas de calor são iniciadas pela seleção do tipo do bico de aquecimento. Em seguida, vem à regulagem da pressão

e da vazão dos gases acetileno e oxigênio, compatível com os bicos, a determinação da quantidade de calor fornecida pela chama, a quantidade de calor fornecido próximo à chapa, a distribuição de temperatura correspondente a espessura da amostra de chapa e na velocidade de deslocamento da chama. A Figura 31 mostra um esquema das variáveis do processo.

As características inerentes podem ser atribuídas a quatro itens: primeiro, a geometria da região aquecida e da zona afetada termicamente, segundo, a macro e a microestrutura e terceiro, calorimetria diferença de fluxo de energia verso o tempo, no quarto as tensões residuais. Ambas dependem; da quantidade de calor aplicada e dos gradientes de temperaturas atingidos, que dependem da regulação das variáveis do processo.

Figura 31- Esquema das variáveis do processo por linhas de calor.



Fonte: (Autor, 2015)

3.3.3.1 Geometria da região aquecida e termicamente afetada.

(Método utilizado para o 1, item 1.3, subitem 1.3.1, conforme Figura 26)

A geometria da região aquecida foi observada após aplicação das linhas de calor nas amostras das chapas. Depois foram retirados, pelo processo de serragem, os corpos de prova transversais, mas dimensões de 12,7 mm x 50 mm e submetidos ao ensaio de macrografia.

Os corpos de provas retirados foram preparados, tirando os excessos de rebarbas, lixados, com lixas número 220, 400, 600 e 1000, polidos com pasta de polimento e submetidos ao ataque do reagente Nital a 5%, que evidenciaram as micrografia das regiões aquecidas e as regiões afetadas termicamente.

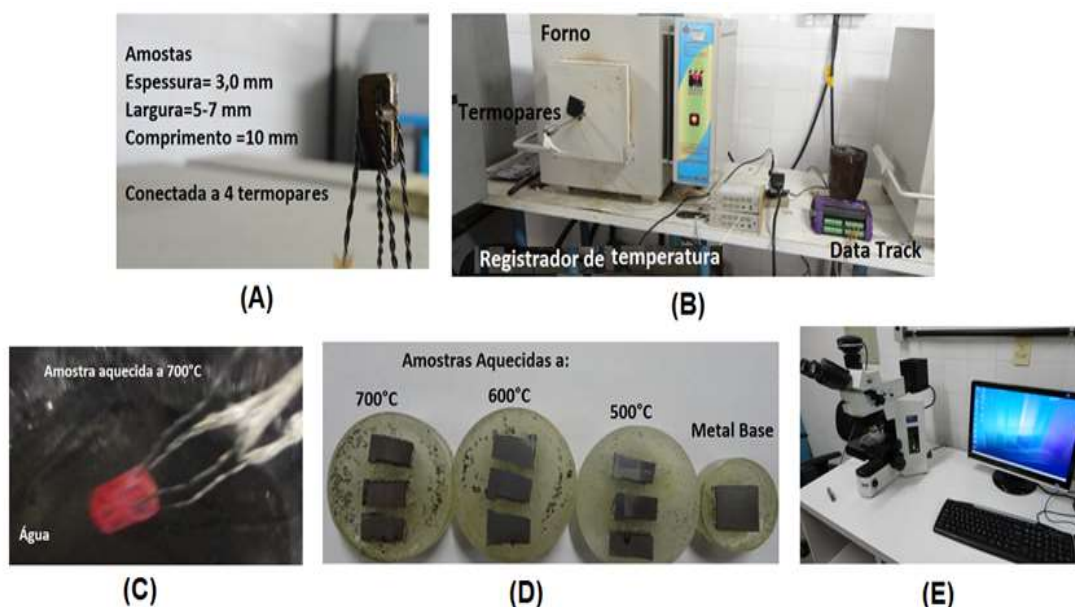
3.3.3.2 Micrografia do aço naval

(Método utilizado para o grupo 1, item 1.3, subitem 1.3.2, conforme Figura 26)

As experiências para determinar as microestruturas do aço ASTM A 131 grau AH36, foram realizadas através do aquecimento de amostra de chapas nas temperaturas de 500°C, 600°C, 700°C, 800°C e 900°C para servir de referência padrão e posterior comparação com as microestruturas das chapas após aplicação das linhas de calor.

Neste experimento, que doravante denominou-se de “microestruturas padrão”, amostras da chapa ASTM A 131 grau AH36, nas dimensões 3,0 mm de espessura, largura entre 5,0 mm a 7,0 mm e comprimento de 10 mm, foram conectadas a quatro termopares, conforme Figura 32 A.

Figura 32 – Método de obtenção das “microestruturas padrão”.



Em: (A) Amostras; (B) Forno; (C) Resfriamento; (D) Embutimento; (E) Microscópio.

Fonte: (Autor, 2015)

Seguidamente, cada amostra foi individualmente introduzida, em um forno de resistência, com controle de temperatura, conforme Figura 32 B, após atingir os patamares de temperatura de 500°C, 600°C, 700°C, 800°C e 900°C, três amostras por temperatura, depois foram resfriadas bruscamente, em água, conforme Figura 32 C. Posteriormente, as amostras foram embutidas, em grupo, correspondentes a cada temperatura, seguidamente lixados e polidos, conforme Figura 32 D, depois as amostras foram submetidas à observação no microscópio eletrônico Figura 32 E.

Em outro experimento, as chapas de aço ASTM A 131 grau AH36 foram aplicadas as linhas de calor, destacadas a região aquecida pela ação linha de calor, preparadas em novos corpos de provas, para observar o efeito da mudança da microestrutura na linha de calor e compara com as “microestruturas padrão”.

3.3.3.3 *Tensões residuais antes e após aplicação da linha de calor*

(Método utilizado para o do grupo 1, item 1.3, subitem 1.3.3, conforme Figura 26)

No quarto item das características inerentes, foram realizados experimentos para conhecer o comportamento e obtenção dos níveis das tensões residuais antes e após aplicação da linha de calor numa chapa de aço ASTM A 131 grau AH36, espessura 12,7 mm, por dois métodos de medição de tensão residuais, o método de magnetização e o método por difração por raios-X.

Este experimento foi realizado no laboratório de tecnologia submarina da Coppe, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, sobre a supervisão da Dra. TETYANA GUROVA.

Inicialmente as amostras de chapa foram preparadas, no laboratório de mecânica da UFPE, nas dimensões de 70,0 mm X 200,0 mm, sendo que cortadas numa serra de fita com resfriamento, em sentidos de laminação diferentes, um longitudinal e outro transversal.

Em seguida, foi feita uma análise dimensional na máquina de medição por coordenadas, depois foram realizadas as marcações de referências para medições das tensões residuais pelo método de magnetização criando-se um retângulo subdividido em quadrados menores medidos 10,0 x 10,0 mm na área de estudo.

Enquanto que para o método de difração por raios-X foram preparados quadrados através de polimento eletrolítico (um tratamento que retira a camada superficial com tensões residuais introduzidas por usinagem ou polimento

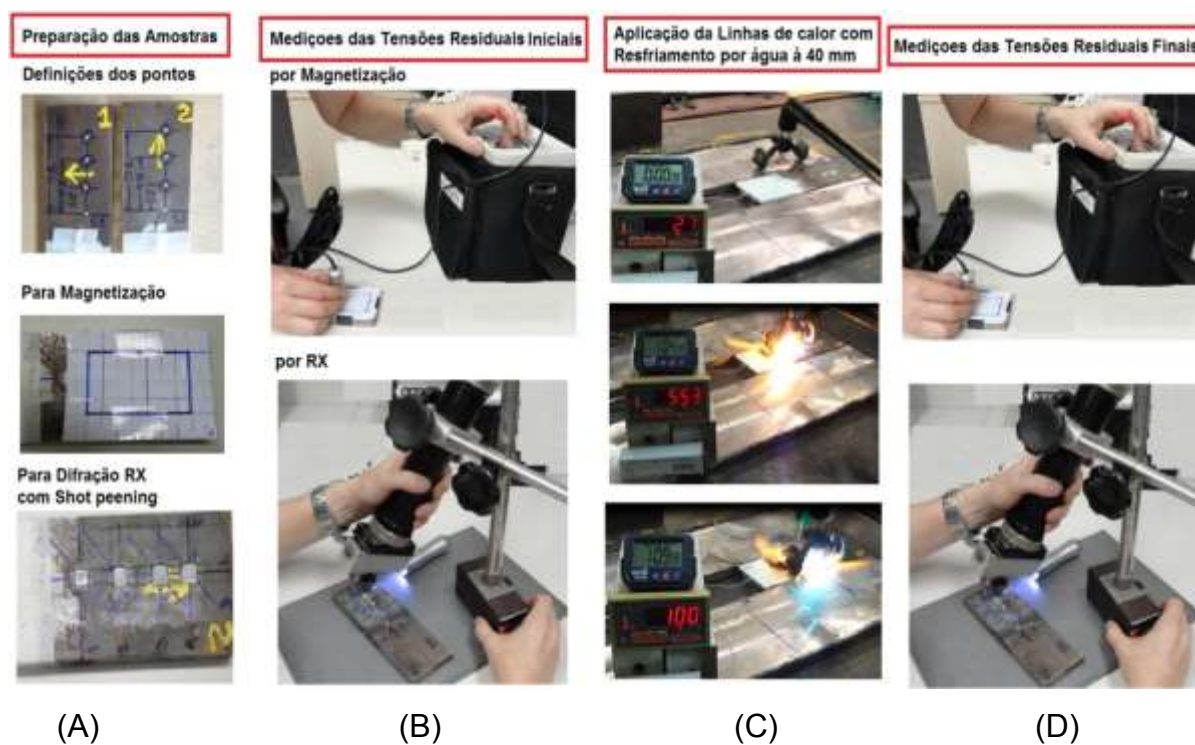
mecânico), nos pontos na linha média distanciados de 25,0 mm; 50,0 mm e 70 mm, na qual foram traçados três eixos, na diagonal, longitudinal e transversal para medição das tensões residuais.

Os procedimentos das medições das tensões residuais consistiram inicialmente das medições das amostras com sentidos de laminação diferentes na condição como fornecidas, denominadas de “cruas”. Após aplicação da linha de calor, com aquecimento por maçarico e com resfriamento subsequente caracterizando a condição denominada de “queimadas”, foram feitas novas medições.

A sequência das atividades realizadas, como a preparação das amostras com sentidos de laminação diferentes. Na Figura 33 A preparação para os métodos de magnetização e difração por raios –X. Na Figura 33 B medições das tensões iniciais em ambos os métodos. Na Figura 33 C aplicação da linha de calor com resfriamento subsequente e na Figura 33 D medições das tensões residuais finais.

Figura 33- Sequência de medições das tensões residuais.

Em (A) Preparação; (B) Magnetização; (C) Aplicação Linha de Calor; (D) Tensões.



Fonte: (Autor, 2015)

A Figura 34 mostra a sequência na análise dimensional antes e após aplicação da linha de calor utilizando a máquina de medição por coordenadas.

Figura 34- Medição dos planos referenciais antes a após aplicação da linha de calor.



Fonte: (Autor, 2015)

3.3.4 Medições das deformações por tipo de resfriamento.

(Método utilizado para o do grupo 1, item 1.4, conforme Figura 26)

Os tipos de resfriamentos podem ser classificados em três modos distintos; sem resfriamento, lado oposto e sequencial. Quando a chama percorre um deslocamento, aquecendo uma chapa, sem a presença de um jato de água, para resfriamento Figura 35 A, denomina-se de linha de calor sem resfriamento. Quando a chama percorre um deslocamento, aquecendo uma chapa, e existir um jato de água incidindo no lado oposto da chapa, conforme Figura 35 B, então, denomina-se linha de calor com resfriamento no lado oposto.

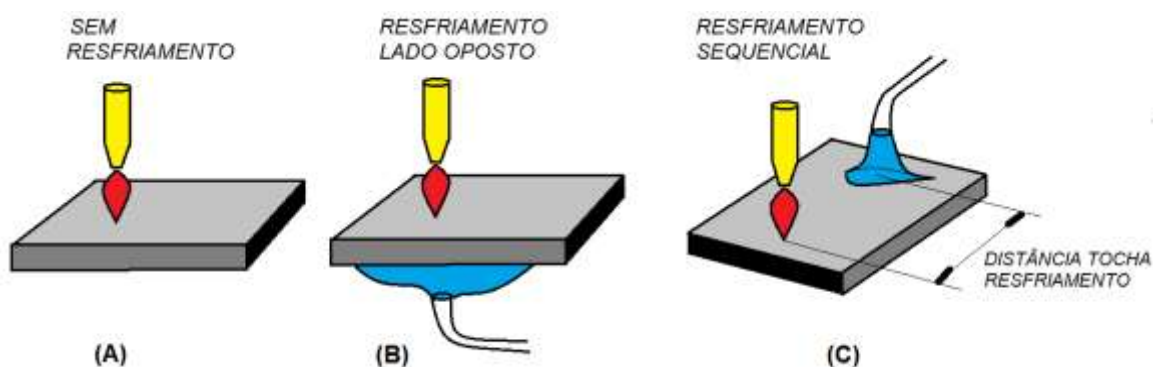
Quando a chama percorrer o seu deslocamento, aquecendo uma chapa, e logo em seguida um jato de água, acompanhando a certa distância, conforme Figura 35 C, denomina-se linha de calor com resfriamento sequencial.

O método para as medições das deflexões e deformações residuais por linhas de calor consiste em deslocar uma tocha de aquecimento, como uma velocidade de

deslocamento constante, incidindo calor, no sentido do deslocamento, sobre a superfície da amostra de chapa.

Figura 35 - Esquema dos tipos de resfriamento da linha de calor

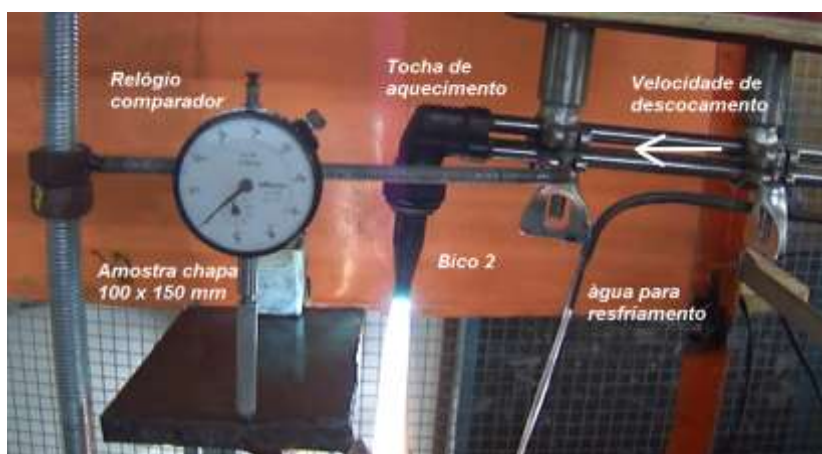
Em: (A) Sem Resfriamento; (B) Resfriamento oposto; (C) Resfriamento Sequencial.



Fonte: (Autor, 2015)

A Figura 36 apresenta um tipo de resfriamento sequencial, onde a tocha de aquecimento desloca-se em velocidade de deslocamento constante, um relógio comparador, na temperatura ambiente, posicionado paralelamente ao sentido da linha de calor, na extremidade da amostra de chapa, registrar-se as deflexões e as deformações, em função do tempo. Esses dados obtidos podem-se gerar gráficos das deflexões transientes.

Figura 36 – Linha de calor com resfriamento sequencial.



Fonte: (Autor, 2015)

As deformações durante a soldagem têm um comportamento, no sentido longitudinal, ascendente no início da soldagem e descendente durante a soldagem. Enquanto isso, no sentido transversal, descendente no início da soldagem e ascendente durante a soldagem. Essas deformações são provenientes de uma deformação plástica, causada pela restrição à expansão do material próximo a zona de fusão, conforme observou (MASUBUCHI, 1996).

Na sequência, os gráficos de deformações transientes foram descritos por (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2007), que considera as distorções de peças soldadas são desvios, devido às tensões transientes, que resultam em deformações plásticas e que após o término da soldagem, as peças ficam submetidas a tensões transientes elásticas (residuais).

3.3.5 Recomendações de soldagem para o processo GMAW (arame sólido).

(Método utilizado para o do grupo 2, item 2.1, conforme Figura 26)

O método da soldagem das amostras de chapa consistiu em executar um cordão de solda, e outra, condição de solda em ângulo, pelo processo GMAW (Arame Sólido) automático, num conjunto de amostra de chapa, para medir as deflexões e deformações residuais, conforme sugerido por (JANG, KIM e YONG, 2007).

Ambos, o método para medições das deflexões por soldagem, em função do tempo, de um ponto na extremidade da amostra de chapa e o método de medição da deformação residual por soldagem, consistiram em deslocar uma tocha de soldagem, com uma velocidade de deslocamento constante, soldando, no sentido do deslocamento. Um relógio comparador, distanciado a 120,0 mm da solda registrava as deflexões e a deformações residuais de cada experimento.

Os cordões de solda foram realizados, na superfície superior das amostras de chapas, com espessuras de 7,93 mm; 9,50 mm; 12,70 mm; 15,88 mm e 19,05 mm, conforme Figura 37 A, e seguindo as recomendações de soldagem indicada por (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992), com as seguintes características:

Serviço: Soldagem em aço naval; Material: ASTM A131AH36;

Processo: GMAW (Arame Sólido) Automático;

Posição: Plana; Tipo = Cordão de Solda;

Metal de Adição: Classificação do consumível AWS 5.18 ER70S-6;

Diâmetro = 1,2 mm; Polaridade = CC+;

Velocidade de Soldagem = 85,68 cm/mim (1,428 cm/s);

Gás de Proteção = Star Gold; Vazão = 20 Litros/mim.

Rendimento do processo adotado = 0,85.

As soldas em ângulo, (doravante denominado de Filete) foram realizadas, na superfície inferior das amostras de chapas, com espessuras de 7,93 mm; 9,50 mm; 12,70 mm; 15,88mm e 19,05 mm, em dois estágios; filete externo, conforme a Figura 37 B e filete interno, conforme Figura 37 C.

As recomendações de soldagem em ângulo foram baseadas as indicações de (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992), com as seguintes características:

Serviço: Soldagem em aço naval; Material: ASTM A131AH36;

Processo: GMAW (Arame Sólido) Automático;

Posição: Plana; Tipo de Junta= ângulo; Comprimento da perna = 5,0 mm.

Metal de Adição: Classificação do consumível AWS 5.18 ER70S-6;

Diâmetro = 1,2 mm; Polaridade = CC+;

Velocidade de Soldagem= 13,62 cm/mim a 24 cm/mim (0,227 cm/s a 0,4 cm/s);

Gás de Proteção = Star Gold; Vazão = 20 Litros/mim.

Rendimento do processo adotado = 0,85

Figura 37 - Soldagem (A) Cordão (B) Filete externo e (B) Filete interno.



(A)



(B)



(C)

Fonte: (Autor, 2015)

3.3.6 Correções das deformações por soldagem.

(Método utilizado para o do grupo 2, item 2.2, conforme Figura 26)

Os estudos para correção das deformações oriundas do processo de soldagem por linhas de calor foram realizados em três séries de experimentos distintos.

Primeiro, uma série de experimentos relacionados com as medições das deflexões e da deformação residual por linha de calor.

Segundo, outra série de experimentos relacionados com as medições das deflexões e da deformação residual por soldagem.

Por fim, uma série de experimentos de correções entre as deflexões residuais de soldagem com as deflexões das linhas de calor, para avaliar nos resultados obtidos, o quanto foi corrigido.

Estes experimentos envolveram a determinação do fluxo térmico da linha de calor, montagem das amostras de chapas, medições das condições iniciais antes da soldagem, aplicação do processo de soldagem, medições das deflexões e deformações residuais após soldagem, análise das deflexões e deformações residuais das linhas de calor, aplicação adequada da linha de calor para correção das deformações, verificação do nível de correção das deformações.

Este método permite determinar as características das linhas de calor para correção, como a intensidade de calor, tipo de bico, velocidade de deslocamento, o número de vezes a ser aplicado, o tipo de resfriamento e a eficiência da correção, entre outros.

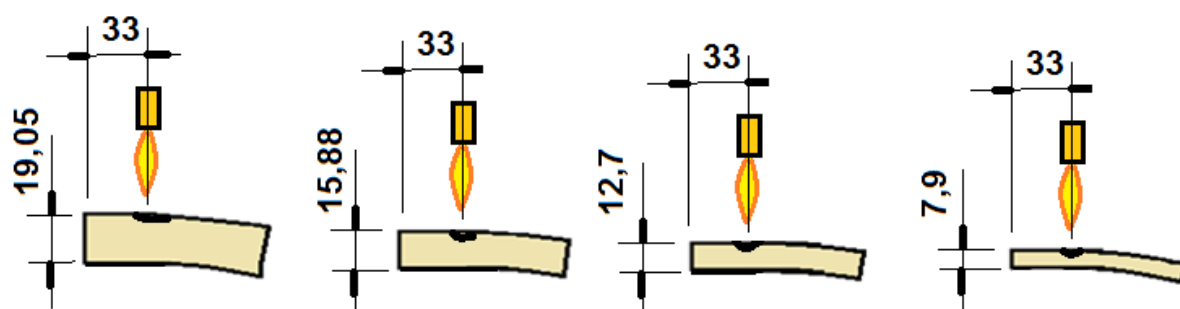
Diferentemente dos estudos experimentais de (JANG, SEO e KO, 1997) aplicando a teoria termo- elástico-plástica, para determinação das deformações residuais em aplicações das linhas de calor, neste estudo, analisa-se a relação entre as deformações de soldagem e as possibilidades de correções destas deformações aplicando-se o processo de linhas de calor.

Portanto, necessita-se estudar o comportamento das deformações por linhas de calor, o comportamento das deformações por soldagem, em dois momentos, um em solda cordão e outro em solda em ângulo e analisar entre as possíveis correções das deformações por linha de calor devida os processos de soldagem.

Descreveremos a seguir os métodos utilizados na soldagem em ângulo e na aplicação da linha de calor para correção:

Os experimentos das medições das deflexões e da deformação residual por linha de calor foram realizados conforme mostra no esquema da Figura 38. Foram considerados variações de fluxo de calor da fonte térmica, entre 461,15 J/s a 4.697,29 J/s, com variações de espessura de 7,93 mm; 12,70 mm; 15,88 mm e 19,05 mm, nas condições resfriamento sequencial, no lado oposto e sem resfriamento. Também, foram consideradas as variações das velocidades de deslocamento da tocha entre 5,3 mm/s a 13,4 mm/s.

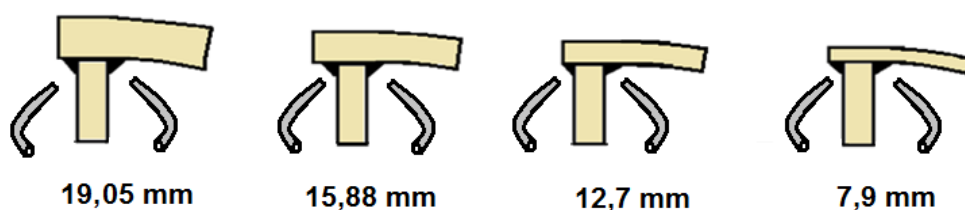
Figura 38 - Esquema deformações das chapas por linhas de calor



Fonte: (Autor, 2015)

Os experimentos das medições das deflexões e da deformação residual por soldagem foram realizados conforme mostra no esquema da Figura 39. Foram consideradas as variações do aporte térmico, entre 108,8 J/cm a 208,6 J/cm, com variações de espessura de 7,93 mm; 12,70 mm; 15,88 mm e 19,05 mm. Também, foram consideradas as variações de velocidades de deslocamento de soldagem entre 2,27 mm/s a 3,8 mm/s.

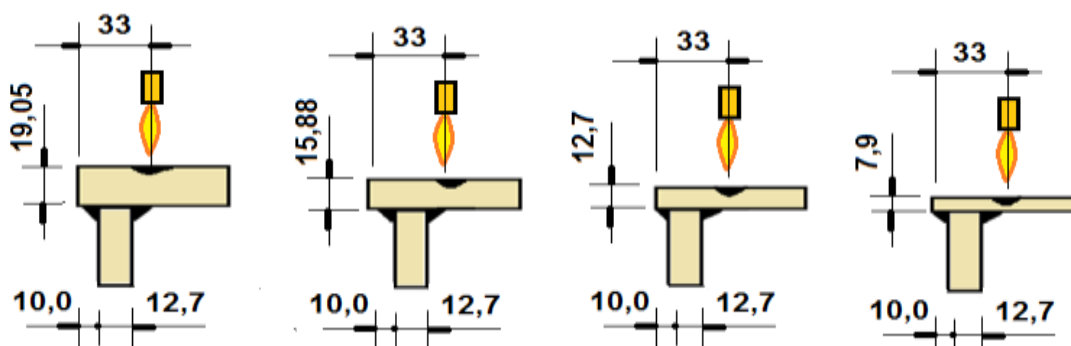
Figura 39- Esquema deformações das chapas por soldagem.



Fonte: (Autor, 2015)

As características das linhas de calor para correção foram determinadas conforme mostra no esquema da Figura 40. Foi considerada a localização da linha de calor, como também a intensidade de calor, tipo de bico, velocidade de deslocamento, o número de vezes a ser aplicado, o tipo de resfriamento, etc.

Figura 40 - Esquema das correções das chapas soldadas por linhas de calor



Fonte: (Autor, 2015)

Após as comparações entre os resultados dos experimentos das medições das deflexões por soldagem com os resultados das deformações residuais por linha de calor foram realizados cálculos analíticos de deformação angular, sugerido por (JANG, SEO e KO, 1997) para verificar as correlações entre os métodos experimentais e analíticos.

Além das deflexões e deformações, outros parâmetros foram analisados como repartição térmica das linhas de calor, históricos de temperaturas, curvas de tendências, medições na máquina de medições por coordenadas, entre outros, que serão apresentados no capítulo resultados e discussões.

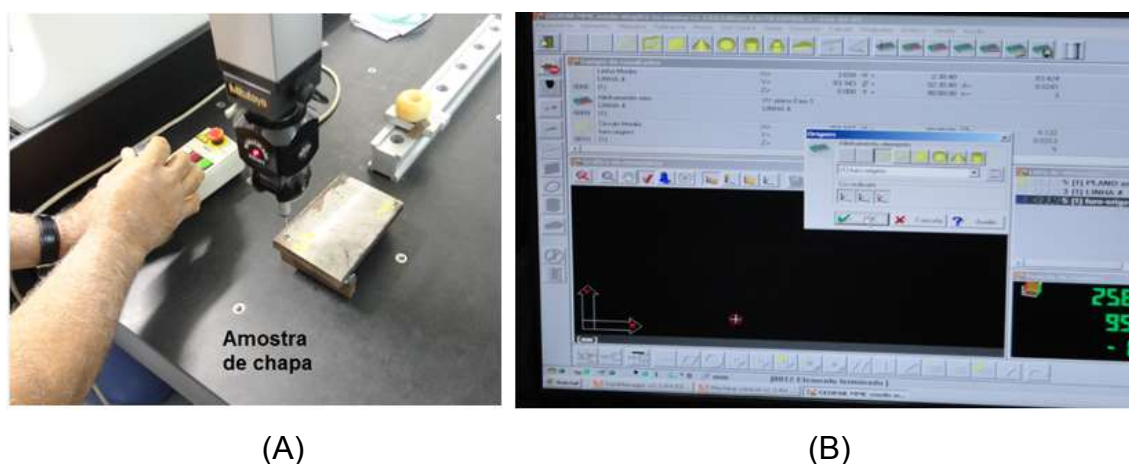
3.3.7 Medições na Máquina de Medição por coordenadas (MMC).

(Método utilizado para o do grupo 2, item 2.2, item 2.2.3, conforme Figura 26)

As análises das deformações por soldagem foi utilizado um relógio comparador, para medições durante o experimento, e uma máquina de medição por coordenadas, para medições antes e depois dos experimentos.

A utilização do relógio comparador é mostrada na Figura 37, enquanto que, na Figura 41 A, mostra a utilização e na Figura 41 B, mostra uma das telas do software internamente instalado na máquina de medição por coordenadas (MMC).

Figura 41 – Medição das chapas soldadas na Máquina de Medição por Coordenadas.



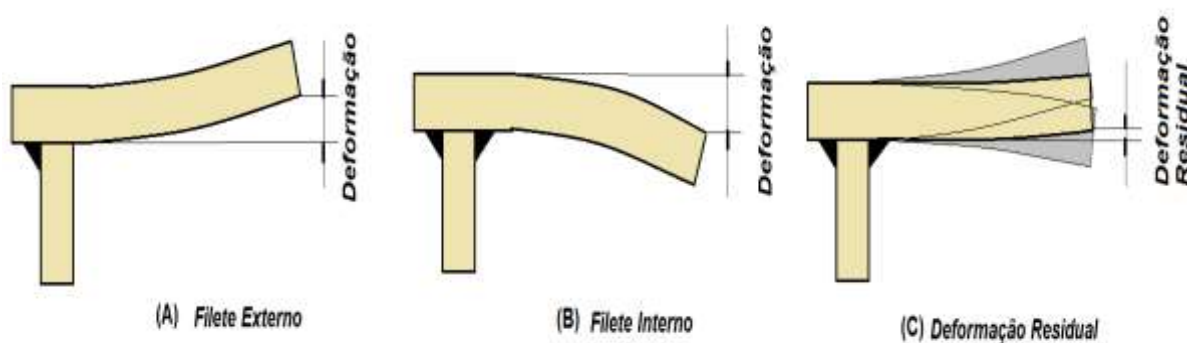
Fonte: (Autor, 2015)

O esquema das medições das deflexões e da deformação residual produzida pela soldagem do filete externo é mostrado esquematicamente na Figura 42 A, onde se observa uma deformação progressiva a em relação à face inferior da chapa.

A Figura 42 B mostra a deformação do filete interno, que verifica uma deformação contaria ao filete externo. Por fim, na Figura 42 C o resultado da deformação residual, fruto da resultante diferencial entre a soldagem do filete externo e interno.

Figura 42 - Esquema de deformação dos filetes e da deformação residual.

Em: (A) Filete externo; (B) Filete Interno; (C) Filete Residual.



Fonte: (Autor, 2015)

As dimensões das pernas dos filetes internos e externos foram medidas com um calibre, nas direções vertical e horizontal, conforme mostra na Figura 43.

As dimensões dos filetes apresentam variações entre 4,2 mm a 5,5 mm.

Figura 43 - Medição da perna dos filetes na direção horizontal



Fonte: (Autor, 2015)

Os parâmetros para soldagem em ângulo em diversas velocidades de solda e os respectivos perfis resultantes da soldagem foram apresentados por (PEREIRA, SALAZAR e MENDES, 2014), concluindo que, a garganta teórica diminui com o aumento da velocidade de soldagem.

3.3.8 Procedimento Operacional das deformações.

(Método utilizado para o do grupo 2, item 2.3, conforme Figura 26)

O procedimento operacional consiste em um fluxograma, onde apresenta as sequências de como determinar as características da linha de calor e associa-las às deformações oriundas dos tipos de soldagem. O procedimento será apresentado no capítulo resultados e discussões.

3.3.9 Comparações dos resultados experimentais e cálculos analíticos.

(Método utilizado para o do grupo 3, item 3.1, item 3.1.1, conforme Figura 26)

Os resultados das experiências com soldagem, medições das deflexões e deformações, conjuntamente com os cálculos analíticos serão apresentados no próximo capítulo resultados e discussões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

A organização deste capítulo foi elaborada de forma sequencial aos eventos realizados nos experimentos, semelhante ao fluxograma de planejamento mostrado na Figura 26, com três grupos de estudos básicos, subdividido em: linhas de calor, soldagem e cálculos analíticos, com os respectivos itens e subitens.

4.1 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR.

(Resultado do grupo 1, item 1.1, conforme Figura 26)

Na primeira etapa, montou-se um sistema composto de aquecimento elétrico por resistência em conjunto com o calorímetro de fluxo mássico. Este sistema foi capaz de mensurar a energia fornecida da fonte elétrica e a energia térmica absorvida pelo fluxo mássico. Assim, pode-se determinar o rendimento do calorímetro baseado na relação entre a energia absorvida pela energia fornecida da fonte elétrica.

Foi determinado um rendimento de 58,3%, numa vazão mássica de 0,135 Kg/s, na qual serviu de base, para calcular a quantidade de calor do processo de linhas de calor variando a velocidade de deslocamento e em função das variações dos bicos.

Na Tabela 5, observa-se uma correlação entre a variação da vazão mássica e o respectivo rendimento.

Tabela 5 - Dado dos experimentos no calorímetro.

<i>Vazão Mássica</i>	<i>Rendimento Total</i>
<i>(Kg/s)</i>	<i>%</i>
0,019	55,7
0,062	54,5
0,087	55,3
0,135	58,3

Fonte: (Autor, 2015)

A variação da vazão mássica não influencia no cálculo do rendimento, apenas altera as temperaturas de saída da água no calorímetro.

Observa-se que, para um aumento da vazão mássica de água de 0,019 a 0,135 (Kg/s) o rendimento total sofre uma variação apenas de 3,8 %, sendo insignificante, permanecendo entre 54,5% a 58,3%.

Numa segunda etapa, um sistema de maçarico com chama em deslocamento, denominado de linha de calor, sobre o calorímetro, conforme apresentado no item anterior 3.3.1 e na Figura 28 foi capaz de mensurar a energia da fonte térmica absorvida pelo fluxo mássico a quantidade de calor nas tochas.

Os resultados da quantidade de calor em função do número do bico e velocidades de deslocamentos da tocha são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantidade de calor (kJ)

<i>Velocidade da tocha mm/s</i>	<i>Quantidade de Calor (kJ)</i>				
	<i>Bico 0</i>	<i>Bico 2</i>	<i>Bico 4</i>	<i>Bico 6</i>	<i>Bico 8</i>
5,3	31,31	97,79	129,41	182,02	234,63
7,8	13,54	69,34	91,40	137,32	183,23
10,2	11,72	37,88	71,06	103,64	136,22
13,4	10,15	31,73	61,92	73,36	84,79

Fonte: (Autor, 2015)

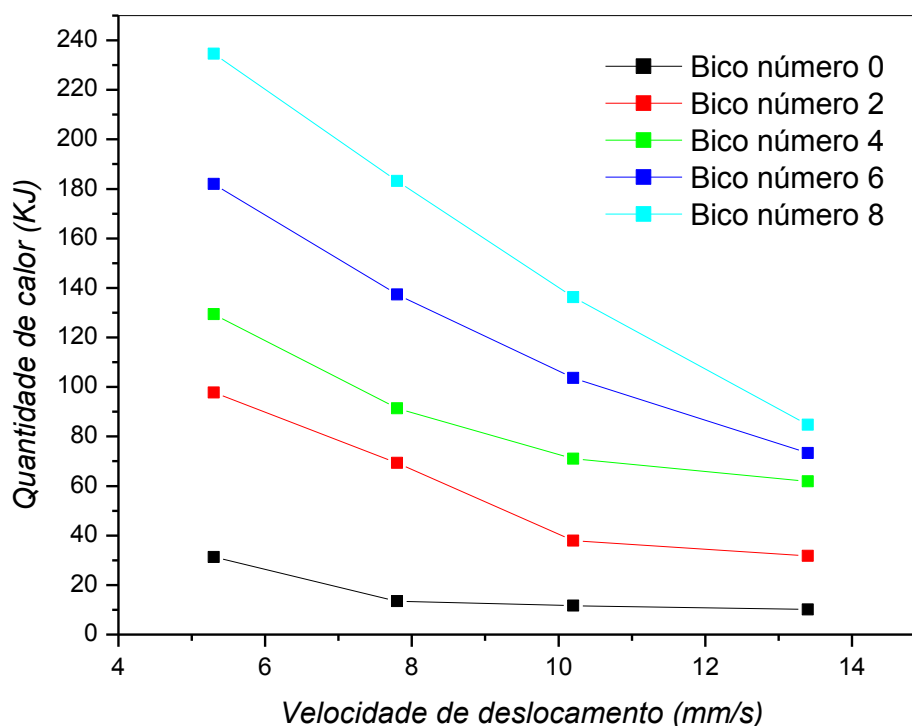
Observa-se que para uma velocidade constante o aumento do bico corresponde a um aumento da quantidade de calor, em contrario, mantendo-se um bico constante um aumento de velocidade corresponde a um decréscimo da quantidade de calor.

A quantidade de calor diminui proporcionalmente com um aumento das velocidades de 5,3 mm/s para 13,4 mm/s. Assim, implica em substancial variação da quantidade de calor em função das velocidades de deslocamento da tocha.

A diferença de quantidade de calor entre as velocidades 5,3 mm/s e 13,4 mm/s corresponde a uma variação média de 66,0% para todos os bicos.

A Figura 44 apresenta as curvas características da quantidade de calor em função do número do bico e das velocidades de deslocamentos da tocha.

Figura 44 - Curvas características da quantidade de calor



Fonte: (Autor, 2015)

Experimentos realizados por (BISWAS, MANDAL e SHA, 2010) e em (BISWAS, MANDAL e SHA, 2011) mostrou que, o fluxo térmico tem uma tendência de aumento, com a velocidade de deslocamento da tocha. Confirmou esta afirmação realizando experimentos com fluxo variando entre 3.000 W a 8.000 W, em velocidades de deslocamento variando entre 5,0 mm/s a 20 mm/s.

Estudos realizados por (BÄCKSTRÖM, JOHANSSON e ANDERSSON, 2012) onde apresenta as medidas da temperatura do gás, incluindo as flutuações na transferência de calor em chamas oxiacetilenicas, que conclui que são variáveis e recomenda pesquisas futuras sobre estas flutuações.

Estudos realizados por (GILZMANENKO e YEVSEYEV, 1960) afirmam que: para um aumento da velocidade de deslocamento da tocha, entre 5,0 mm/s a 8,3 mm/s, o fluxo de calor tem-se um acréscimo de 10 % a 15 %.

Por outro lado, pequenas variações da distância da tocha a chapa no deslocamento e variações do cone da chama, devido a variações do fluxo de gases acetileno e oxigênio podem provocar perdas entre 10 % a 20 % ou maiores.

Assim, foi possível calcular um fluxo médio de calor, após a realização de cinco experimentos cada, entre as velocidades de deslocamento da tocha, no intervalo de 5,3 mm/s a 13,4 mm/s, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Fluxo de calor médio (W) por Bico

<i>Bico</i>	<i>Fluxo Médio de calor (W)</i>
0	419,48 ± 165,31
2	1475,45 ± 250,56
4	2.357,37 ± 680,48
6	3.241,20 ± 533,71
8	4.125,04 ± 806,54

Fonte: (Autor, 2015)

O aporte térmico é uma medida de energia por unidade de comprimento. Então, pode-se estimar um aporte térmico para as linhas de calor, em função do número do bico e das velocidades de deslocamentos da tocha, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Aporte térmico das linhas de calor (J/cm).

<i>Velocidade</i>	<i>Aporte térmico da linha de calor (J/cm)</i>				
mm/s	Bico 0	Bico 2	Bico 4	Bico 6	Bico 8
5,3	952,9	2976,0	3938,2	5539,2	7140,2
7,8	394,5	2020,5	2663,3	4001,1	5339,0
10,2	396,1	1280,7	2402,2	3503,7	4605,2
13,4	344,1	1076,3	2100,5	2488,3	2876,2

Fonte: (Autor, 2015)

Observa-se que, mantendo um bico constante, o aporte térmico diminui proporcionalmente com um aumento das velocidades de deslocamento da tocha entre 5,3 mm/s a 13,4 mm/s.

Simulações realizadas por (VEGA, 2009) observaram que, para uma chapa de 20 mm de espessura, um aumento da velocidade de deslocamento da chama reduziu o aporte térmico. Exemplificou, para velocidades das chamas a 3,0 mm/s; 6,0 mm/s e 9,0 mm/s têm um aporte térmico de calor 10,5 KJ/mm; 7,6 KJ/mm e 6,2 KJ/mm, respectivamente.

4.2 MEDIÇÃO DO GRADIENTE DE TEMPERATURA.

(Resultado do grupo 1, item 1.2, conforme Figura 26)

Os principais fatores que governam a qualidade da fabricação de produtos por linhas de calor são a velocidade de movimentação da fonte de calor, a potência de aquecimento e o caminho de aquecimento, segundo afirmam (CHOI, LEE e DOH, 2012). Quando a velocidade de movimentação da fonte de calor cresce, o pico de temperatura decresce.

4.2.1. Medição utilizando Termopares.

(Resultado do grupo 1, item 1.2, subitem 1.2.1, conforme Figura 26)

4.2.1.1 Medição temperatura por termopares.

As pesquisas se concentraram na utilização dos bicos números 2 e 8, variando as velocidades entre 5,3 mm/s e 13,4 mm/s para os estudos, porque, representam uma amostra significativa do fluxo médio de todos os bicos, especialmente entre os bico 2, 4, 6 e 8.

Nas pesquisas de (MACHADO e TANIGUCHI, 1982) determinaram a faixa de velocidade mínima aceitável, entre 3,3 mm/s a 7,5 mm/s das aplicações das linhas de calor nas chapas de espessuras de 4,76 mm, 6,35 mm e 7,94 mm, em a temperatura de 700°C, não afetam as propriedades metalúrgicas do material.

A Tabela 9, mostra os dados técnicos das condições dos bicos escolhidos.

Os sinais elétricos dos termopares tipo K, para coleta dos picos de temperaturas foram registrados pelo coletor de dados DATATAKER DT80.

Os bicos de número 2 e 8 estão associados às velocidades de deslocamento da tocha de 5,3 mm/s e a 13,4 mm/s. Também, apresenta a associação da quantidade de calor, do fluxo de calor e do aporte térmico a cada bico.

Nestes experimentos, os termopares tipo K foram fixados a uma profundidade de espessura de 1,6 mm, das amostras das chapas, a uma distância de 0,0 mm; 10,0 mm; 20,0 mm; 30,0 mm e 40,0 mm na direção transversal da linha de calor.

Tabela 9 – Dados técnicos dos bicos 2 e 8 escolhidos.

<i>Tipo de Bico</i>	<i>Bico 2</i>		<i>Bico 8</i>	
Velocidade mm/s	5,3	13,4	5,3	13,4
Quantidade de calor kJ	97,79	31,73	234,63	84,79
Fluxo médio de calor W	1.475,45 $\pm$ 250,56		4.125,04 $\pm$ 806,54	
Aporte térmico J/cm	2.976,0	1.076,3	7.140,2	2.876,2

Fonte: (Autor, 2015)

Os resultados dos ciclos térmico das linhas de calor são mostrados nas seguintes figuras:

Na Figura 45, a condição de bico número 2 e velocidade de 5,3 mm/s.

Na Figura 46, a condição de bico número 2 e velocidade de 13,4 mm/s.

Na Figura 47, a condição de bico número 8 e velocidade de 5,3 mm/s.

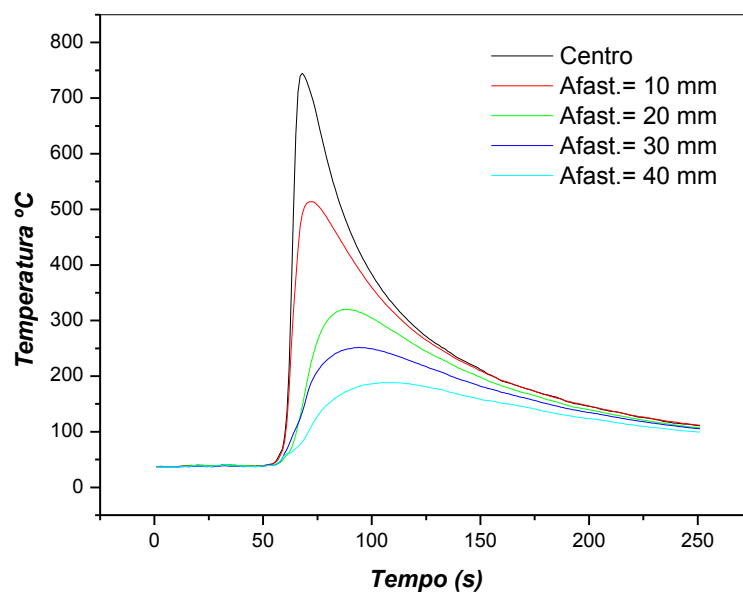
Na Figura 48, a condição de bico número 8 e velocidade de 13,4 mm/s.

A velocidade de resfriamento, num gráfico de ciclo térmico, conforme (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2007) é obtida pela derivada (ou Inclinação) em uma determinada temperatura da curva de resfriamento.

Os cálculos das taxas de resfriamentos, dos experimentos foram considerados no intervalo de tempo, em que a temperatura máxima de pico reduz-se a 20% e a 50%.

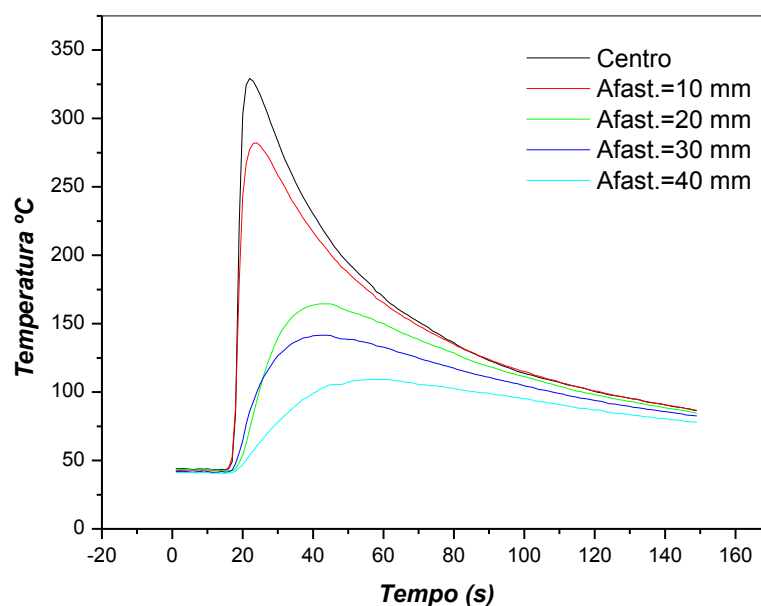
Foram analisadas nas condições de tipo de bico números 2 e 8 e de velocidade de deslocamento da tocha 5,3 mm/s e 13,4 mm/s em cada bico.

Figura 45 -- Ciclo térmico da linha de calor, Bico nº 2, Velocidade 5,3 mm/s.



Fonte: (Autor, 2015)

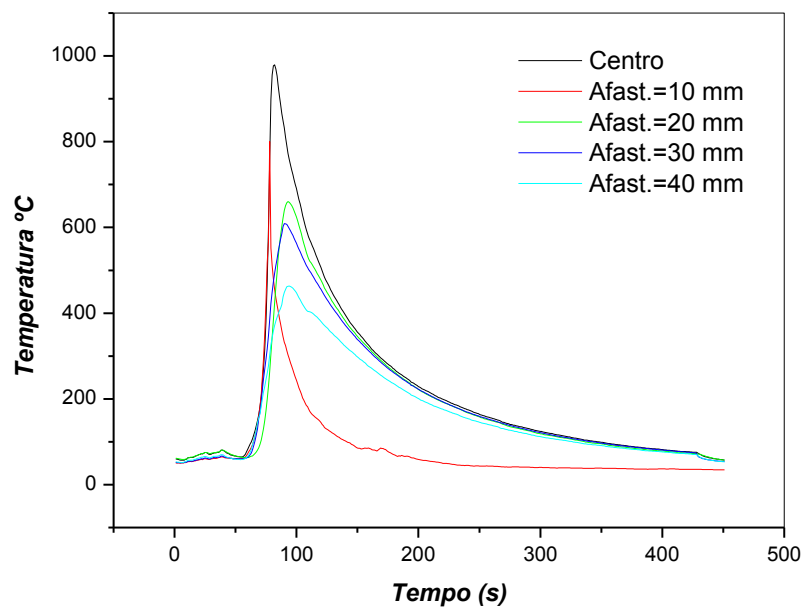
Figura 46 -- Ciclo térmico da linha de calor, Bico nº 2, Velocidade 13,4 mm/s.



Fonte: (Autor, 2015)

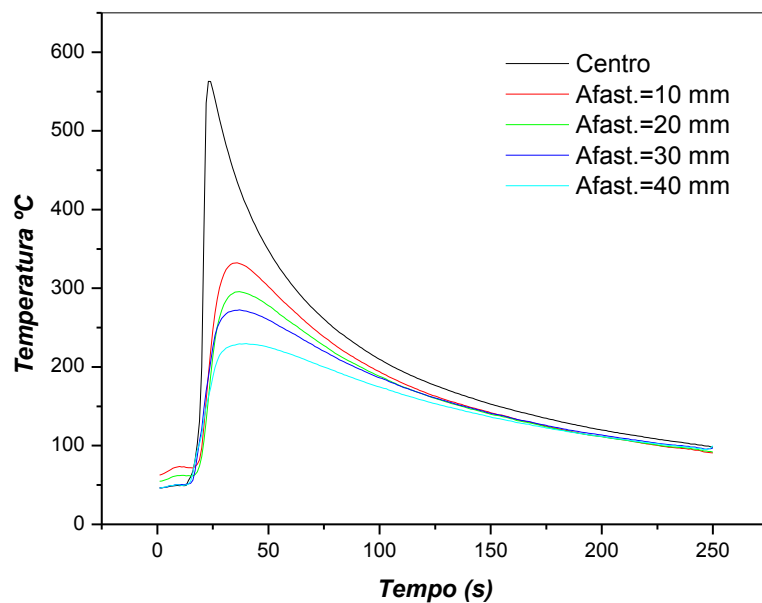
As taxas de resfriamentos nas condições de Bico nº 2, nas velocidades 5,3 mm/s e 13,4 mm/s, foram de 10,22 °C/s e 4,56 °C/s, respectivamente.

Figura 47 -- Ciclo térmico da linha de calor, Bico nº 8, Velocidade 5,3 mm/s.



Fonte: (Autor, 2015)

Figura 48 -- Ciclo térmico da linha de calor, Bico nº 8, Velocidade 13,4 mm/s.



Fonte: (Autor, 2015)

As taxas de resfriamentos nas condições de Bico nº 8, nas velocidades 5,3 mm/s e 13,4 mm/s, foram de 12,62 °C/s e 7,30 °C/s, respectivamente.

As temperaturas máximas de pico, medidas a uma espessura de 1,6 mm e as taxa de resfriamento, obtidas pelas curvas do ciclo térmico da linha de calor são mostradas na Tabela 10.

Tabela 10 – Temperatura máxima de pico e taxa de resfriamento dos bicos 2 e 8.

<i>Tipo de Bico</i>	<i>Bico 2</i>	<i>Bico 8</i>	<i>Bico 2</i>	<i>Bico 8</i>
Velocidade mm/s	5,3	13,4	5,3	13,4
Temperatura de pico Máxima °C	740,0	334,0	971,0	538,0
Na espessura = 1,6 mm Taxa de resfriamento °C/s	10,22	4,56	12,62	7,30

Fonte: (Autor, 2015)

Observa-se nos resultados, que no ciclo térmico, na condição do bico número 2, na velocidade de deslocamento da tocha de 5,3 mm/s a taxa de resfriamento foi de 10,22°C/s. Enquanto que, no bico número 8, na velocidade de deslocamento da tocha de 5,3 mm/s a taxa de resfriamento foi de 12,62°C/s.

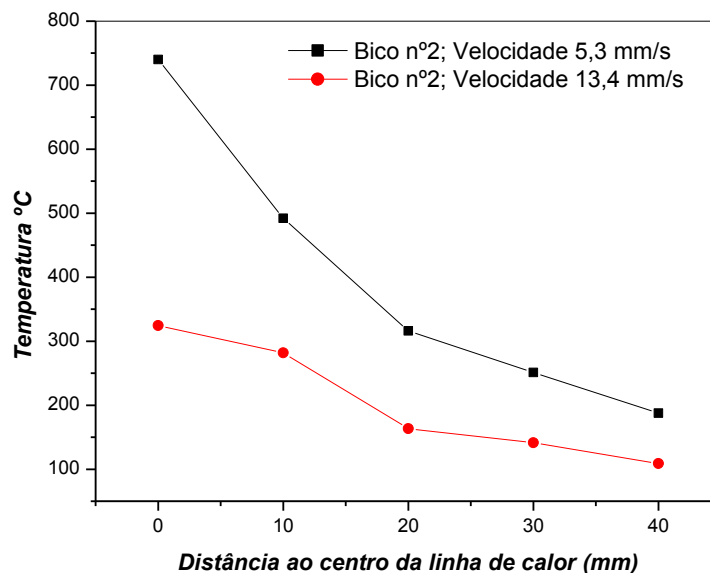
No contexto geral, a temperatura máxima de pico e a taxa de resfriamento são diretamente proporcionais à quantidade de calor, porém inversamente proporcionais para um aumento da velocidade de deslocamento da tocha.

4.2.1.2 *Determinação das curvas de repartição térmica.*

As curvas de repartição térmica representam os níveis de energias térmicas, em intensidade, em pico de temperatura e na taxa de resfriamento, em função da distância ao centro de aplicação da linha de calor.

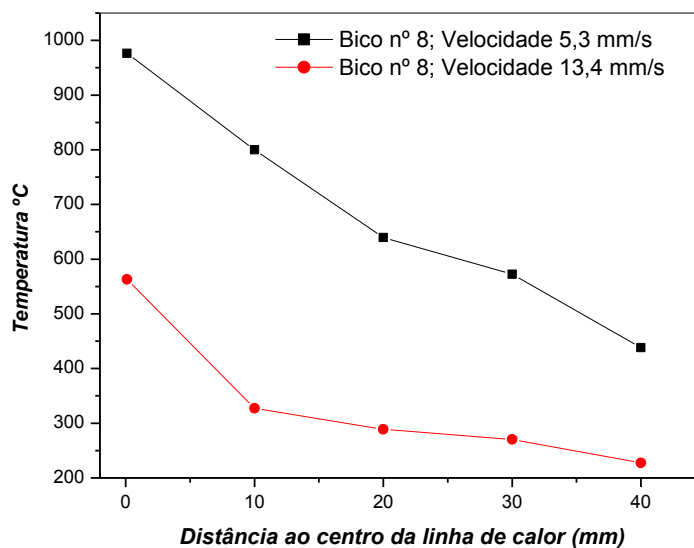
Os resultados da repartição térmica da linha de calor, são mostrados na Figura 49, para o bico 2 e na Figura 50 para o bico 8, onde apresenta-se a variação da temperatura máxima de pico com a distância ao centro da linha de calor, na direção transversal, com diferentes velocidades de deslocamento da tocha.

Figura 49 - Curvas de repartição térmica da linha de calor, bico nº 2.



Fonte: (Autor, 2015)

Figura 50 - Curvas de repartição térmica da linha de calor, bico nº 8.



Fonte: (Autor, 2015)

Observam-se as seguintes características, nas curvas de repartição térmica com a utilização do bico número 2, em função do aumento da velocidade de deslocamento da tocha, de 5,3 mm/s e 13,4 mm/s.

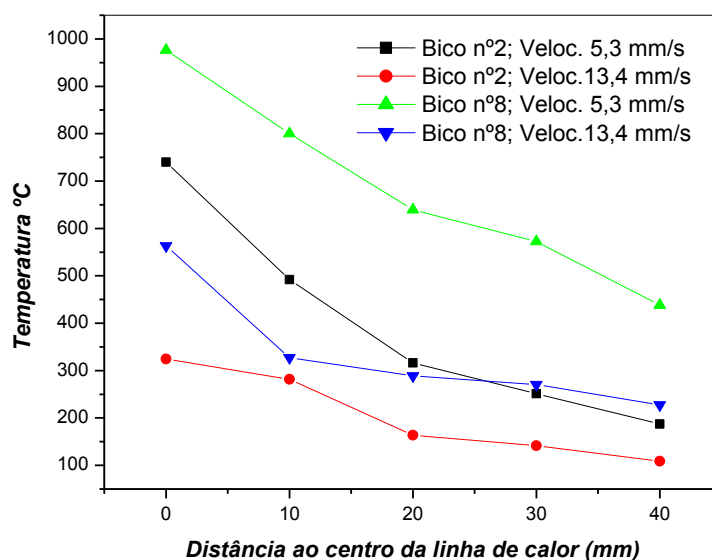
- O fluxo de calor médio foi de $1475 \pm 250,56$ W
- A temperatura de pico no centro diminui de $740,0^{\circ}\text{C}$ para $334,0^{\circ}\text{C}$.
- Houve uma redução na taxa de resfriamento de $10,22^{\circ}\text{C/s}$ para $4,56^{\circ}\text{C/s}$.
- O perfil da curva, para a velocidade de $5,3$ mm/s ficou largo.

As seguintes características, nas curvas de repartição térmica com a utilização do bico número 8, em função do aumento da velocidade de deslocamento da tocha, de $5,3$ mm/s e $13,4$ mm/s.

- O fluxo de calor médio foi de $4.125,4 \pm 806,54$ W
- A temperatura de pico no centro diminui de $971,0^{\circ}\text{C}$ para $538,0^{\circ}\text{C}$.
- Houve uma redução na taxa de resfriamento de $12,62^{\circ}\text{C/s}$ para $7,30^{\circ}\text{C/s}$.
- O perfil da curva, para a velocidade de $5,3$ mm/s ficou largo.

A Figura 51 mostra um resumo das curvas de repartição térmica para os bicos números 2 e 8, com velocidades de $5,3$ mm/s e $13,4$ mm/s. Observa-se que as curvas apresentam variações de níveis de energia, consequentemente variações de temperatura e taxas de resfriamentos.

Figura 51 – Curvas de repartição térmica para os bico numero 2 e 8 .



Fonte: (Autor, 2016)

O parâmetro velocidade de deslocamento da tocha influencia os resultados das curvas de ciclo térmico e de repartição térmica das linhas de calor, conforme os parâmetros de intensidade de energia, de pico de temperatura e da taxa de aquecimento.

4.2.1.3 *Calculo do fluxo térmico função temperatura da repartição térmica.*

(CLAUSEN, 2001), modelou a determinação do fluxo térmico do gás da tocha, utilizando os princípios termomecânicos de condução e convecção, desprezando a componente da radiação.

Nos cálculos do fluxo térmico considerou as parcelas térmicas independentes da seguinte maneira:

Primeiro, determinou uma distancia ideal de afastamento, raio igual a 10 mm, e considerou as temperaturas obtidas na curva de repartição térmica.

Segundo, determinou a parcela térmica devido à condução, sendo o coeficiente de condução de $k(t) = 38 \text{ W/mK}$, conforme (INCROPERA e DEWITT, 1996).

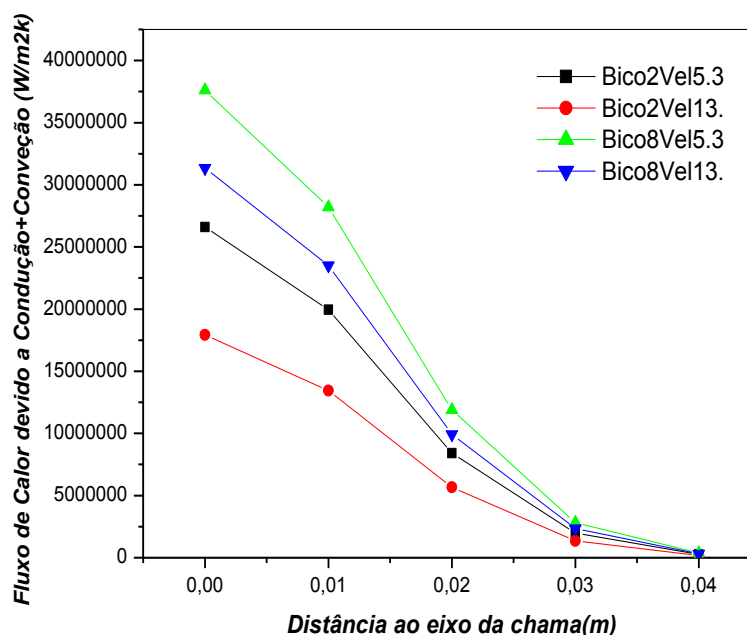
Terceiro, determinou a parcela térmica devido à convecção, sendo que o coeficiente de convecção, em função da temperatura, $h(t) = 7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Por fim, as parcelas de condução e convecção foram adicionadas e distribuídas nas curvas distribuição gaussianas para o fluxo de calor em função dos afastamentos.

Realizamos a modelagem da determinação do fluxo térmico do gás da tocha conforme (CLAUSEN, 2001), considerando uma distância ao eixo de 10 mm (0,01 m), as temperaturas da repartição térmica, resultado da Tabela 10, o coeficiente de convecção, em função da temperatura, $h(t) = 7 \text{ W/m}^2\text{K}$, conforme (CLAUSEN, 2001) e o coeficiente de condução de $k(t) = 38 \text{ W/mK}$, conforme (INCROPERA e DEWITT, 1996), gerando-se curvas de distribuição gaussianas para o fluxo térmico, conforme equação (2).

Na Figura 52, mostra o resultado da modelagem da determinação do fluxo de calor (W/m^2), onde se determinou que o fluxo de calor, na distribuição gaussianas na distância de 0,01 m, para o bico 2, na velocidade de 5,3 mm/s e 13,4 mm/s são de 2088,43 W e 1407,81 W, respectivamente e para o bico 8, nas mesmas velocidade são 2.953,82 W e 2462,47 W.

Figura 52- Fluxo térmico em função da temperatura da repartição térmica.



Fonte: (Autor, 2016)

4.2.1.4 Dissipação em função espessura da chapa.

Nas linhas de calor, mantendo-se o mesmo fluxo térmico e a mesma velocidade da tocha, um aumento de espessura, exibe altas taxas de dissipação de calor, resultando em maiores a taxa de resfriamento, consequentemente diminuindo o pico de temperatura afirmam (BISWAS, SARATHI e MANDAL, 2006).

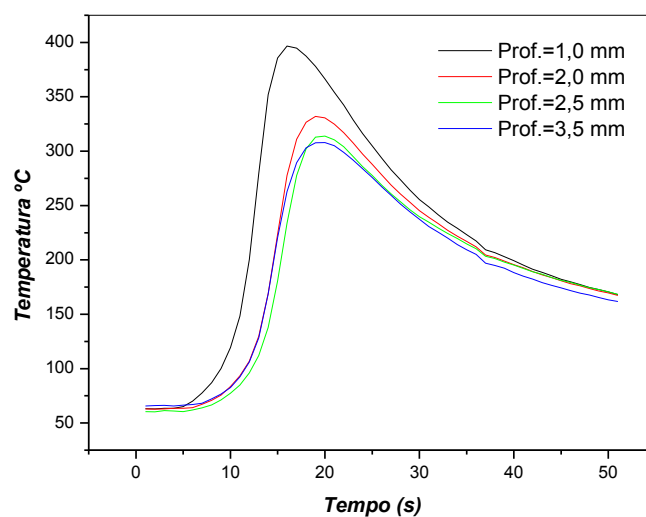
Um experimento para medição das temperaturas foi realizado, posicionando na chapa de espessura 12,70 mm, quatro termopares, nas profundidades de 1,0 mm; 2,0 mm; 2,5 mm e 3,5 mm, distanciados em 5,0 mm, de cada termopar e no sentido da direção da linha de calor.

Os resultados das curvas dos ciclos térmicos das linhas de calor são mostrados nas seguintes figuras: Na Figura 53, a condição de bico número 2 e velocidade de 5,3 mm/s. Na Figura 54, a condição de bico número 2 e velocidade de 13,4 mm/s. Na Figura 55, a condição de bico número 8 e velocidade de 5,3 mm/s. Na Figura 56 a condição de bico número 8 e velocidade de 13,4 mm/s.

Os cálculos das taxas de resfriamentos foram considerados no intervalo de tempo, em que a temperatura máxima de pico reduz-se a 20% e a 50%, e foram

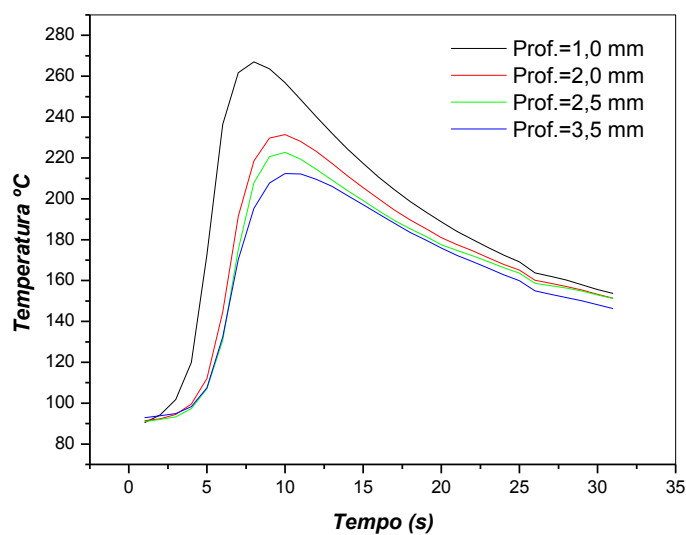
analisadas nas condições de tipo de bico 2 e 8 e de velocidade de deslocamento da tocha 5,3 mm/s e 13,4 mm/s em cada bico.

Figura 53 – Ciclo térmico e Dissipação da chapa 12,7 mm, Bico nº 2 e Velocidade 5,3 mm/s.



Fonte: (Autor, 2016)

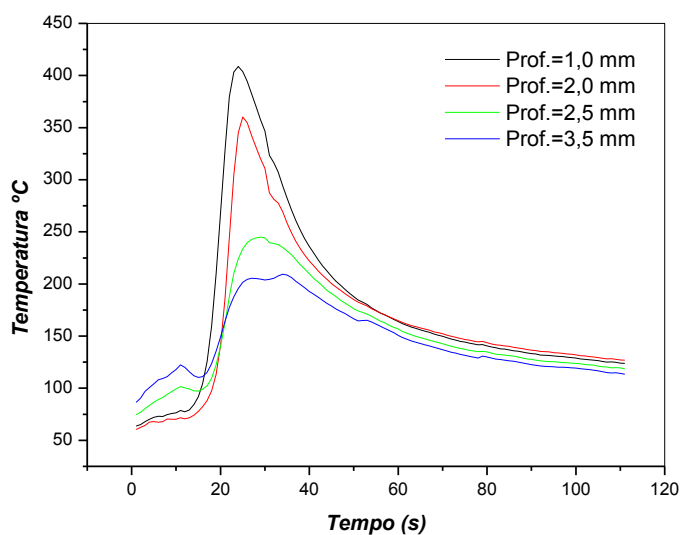
Figura 54 - Ciclo térmico e Dissipação da chapa 12,7 mm, Bico nº 2 e Velocidade 13,4 mm/s.



Fonte: (Autor, 2016)

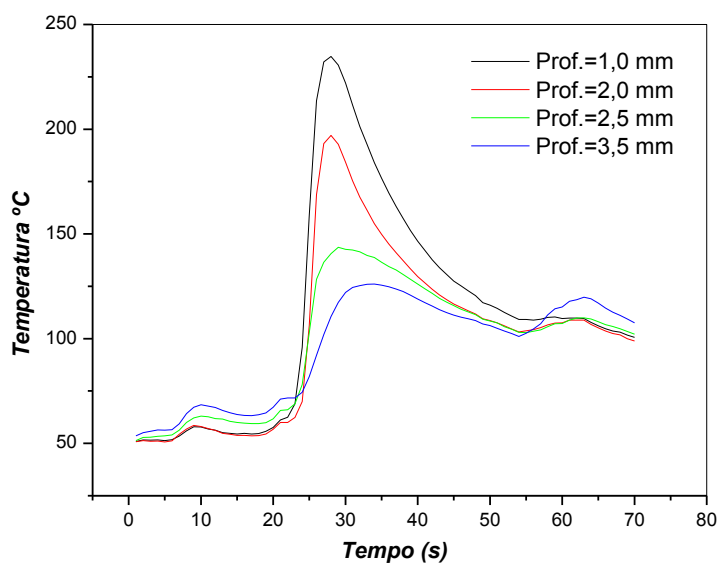
As taxas de resfriamentos nas condições de Bico nº 2, nas velocidades 5,3 mm/s e 13,4 mm/s, foram de 7,18 °C/s e 3,49 °C/s, respectivamente.

Figura 55 - Ciclo térmico e Dissipação da chapa 12,7 mm, Bico nº 8 e Velocidade 5,3 mm/s.



Fonte: (Autor, 2016)

Figura 56 - Ciclo térmico e Dissipação da chapa 12,7 mm, Bico nº 8 e Velocidade 13,4 mm/s.



Fonte: (Autor, 2016)

As taxas de resfriamentos nas condições de Bico nº 2, nas velocidades 5,3 mm/s e 13,4 mm/s, foram de 7,56 °C/s e 4,66 °C/s, respectivamente.

Na Tabela 11 mostra o resultado da diferença entre os picos de temperaturas, entre as condições de linha de calor nas chapas de espessura 1,6 mm e na chapa de espessura de 12,7 mm, na profundidade de 1,0 mm.

Tabela 11 – Resultados das temperaturas utilizando chapas de 1,6 e de 12,7 mm.

<i>Tipo de Bico</i>	<i>Bico 2</i>		<i>Bico 8</i>	
Velocidade (mm/s)	5,3	13,4	5,3	13,4
Temperatura de pico °C Na espessura = 1,6 mm	740,0	334,0	971,0	538,0
Temperatura de pico Máxima °C Na espessura = 12,70 mm na profundidade de 1,0 mm	396,6	268,0	403,4	232,1
Taxa de Resfriamento °C/s Na espessura = 1,6 mm	10,22	4,56	12,62	7,30
Taxa de Resfriamento °C/s Na espessura = 12,7 mm na profundidade de 1,0 mm	7,18	3,49	7,56	4,66

Fonte: (Autor, 2016)

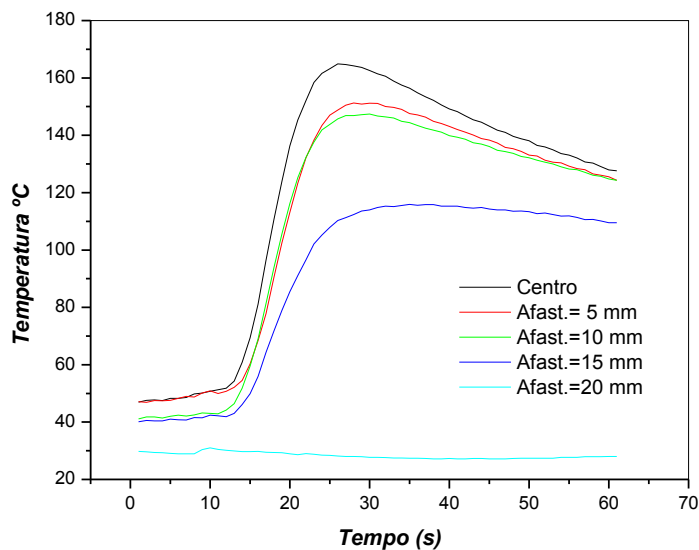
Os experimentos mostram que a temperatura decrescente, com um aumento de velocidade de deslocamento.

Um aumento de fluxo térmico, também, a temperatura decresceu, com um aumento de velocidade de deslocamento. Observam-se as mesmas tendências, descritas acima, quando se utilizou uma chapa de espessura de 12,7 mm.

4.2.1.5 Temperatura e repartição térmica da chapa de espessura 12,70 mm.

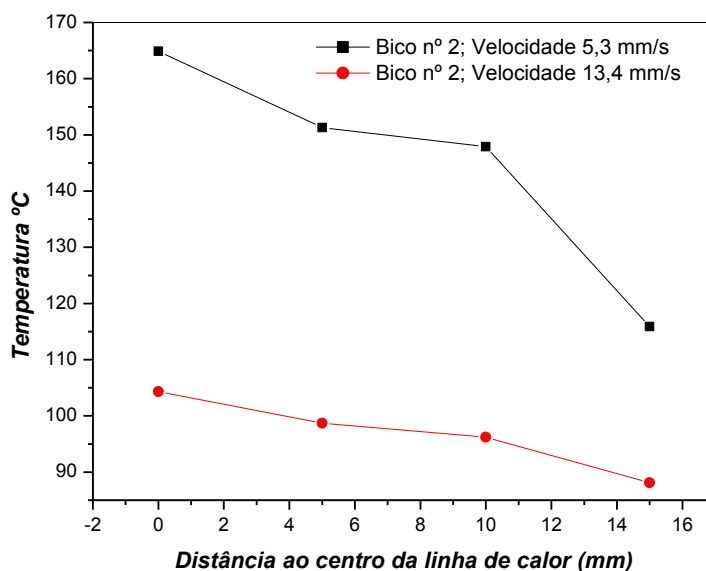
Os resultados mais significativos com os termopares posicionados na profundidade da espessura 12,7 mm, na Figura 57, que mostra a curva do ciclo térmico da linha de calor e na Figura 58 a repartição térmica da linha de calor.

Figura 57 - Curva de ciclo térmico da linha de calor, bico 2, espessura 12,7 mm



Fonte: (Autor, 2015)

Figura 58 - Curvas de repartição térmica da linha de calor, bico 2, espessura 12,7 mm.



Fonte: (Autor, 2015)

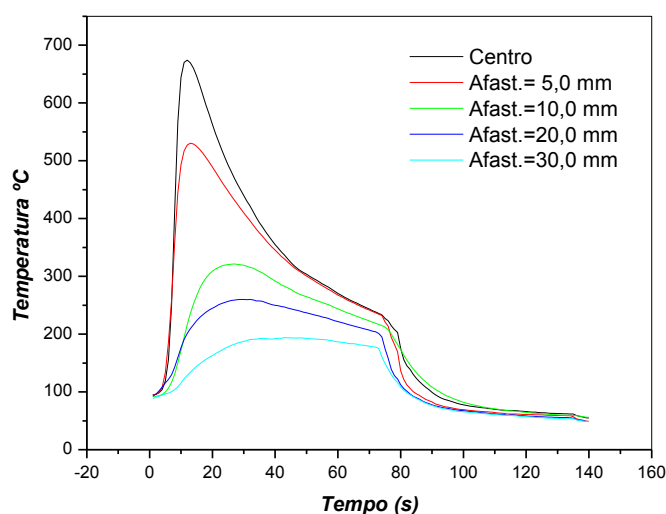
A temperatura obtida de 165 °C, no centro e na profundidade de 12,7 mm, é devida a grande dissipação térmica, em função da espessura da chapa.

4.2.1.6 Comportamento do ciclo térmico da linha de calor com resfriamento.

O comportamento do ciclo térmico da linha de calor, quando aplicada com um resfriamento sequencial, forçado por água, utilizando um bico nº 2, deslocando-se com velocidade de 5,3 mm/s, é mostrado na Figura 59.

Também, é mostrado que, as temperaturas medidas com termopares afastados transversalmente do sentido da linha de calor, no intervalo de 70 s a 90 s, que todos os ciclos térmicos reduzem as temperaturas rapidamente na aplicação do resfriamento.

Figura 59 - Curvas do ciclo térmico da linha de calor



Fonte: (Autor, 2015)

4.2.2 Medição utilizando Câmara Termográfica.

(Resultado do grupo 1, item 1.2, subitem 1.2.2, conforme Figura 26)

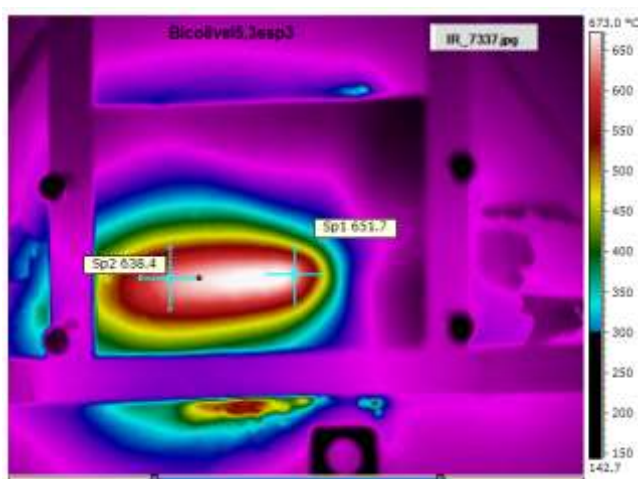
No sistema de medição de temperatura por câmara termográfica, as fotos mostram o valor momentâneo da temperatura, em pontos ou em regiões predefinidas. Entretanto, no sistema de termopares podem-se registrar valores discretos de um ou vários pontos.

As medições das temperaturas utilizando a câmara termográfica registravam as temperaturas, em fotos digitais, nas espessuras das amostras de chapa em: 1,0 mm;

2,0 mm; 3,0 mm e 5,0 mm medidas pela superfície aquecida pela chama, pelo lado oposto.

A Figura 60 mostra um exemplo da foto digital (Bico8vel5,3esp3) tirada pela câmara termográfica, na condição de bico número 8, com a velocidade de deslocamento de 5,3 mm/s e chapa de espessura 3,0 mm, onde se observa dois pontos em destaque (Sp1 e Sp2), afastado a uma distância, que corresponde as indicações das temperaturas 651,70 °C e 638,40 °C.

Figura 60- Medição da temperatura por câmara termográfica Bico8vel5,3esp3.



Fonte: (Autor, 2015)

Apresentamos na Tabela 12 e na Tabela 13 as medições das temperaturas pela câmara termográfica, na condição de utilização do Bico número 8, para as velocidades de 13,4 mm/s e 5,4 mm/s, respectivamente, nas profundidades das amostras de chapa em: 1,0 mm; 2,0 mm; 3,0 mm e 5,0 mm.

Tabela 12- Condição de Bico número 8 e velocidade de 13,4 mm/s

<i>Espessura da chapa</i>	<i>1,0 mm</i>	<i>2,0 mm</i>	<i>3,0 mm</i>	<i>5,0 mm</i>
Temperatura Sp1	693,90 °C	581,90 °C	353,10 °C	305,60 °C
Temperatura Sp2	575,30 °C	529,40 °C	336,40 °C	300,00 °C
Distância (Sp1- Sp2)	25,80 mm	29,24 mm	25,80 mm	37,84 mm

Fonte: (Autor, 2015)

Tabela 13- Condição de Bico número 8 e velocidade de 5,3 mm/s

<i>Espessura da chapa</i>	<i>1,0 mm</i>	<i>2,0 mm</i>	<i>3,0 mm</i>	<i>5,0 mm</i>
Temperatura Sp1	1195,80 °C	968,90 °C	651,70 °C	436,50 °C
Temperatura Sp2	1015,60 °C	937,80 °C	638,40 °C	420,00 °C
Distância (Sp1- Sp2)	24,08 mm	44,72 mm	53,32 mm	28,8 mm

Fonte: (Autor, 2015)

A Figura 61 mostra um exemplo da foto digital (Bico2vel5,3esp3-7365) tirada pela câmara termográfica, na condição de bico número 2, com a velocidade de deslocamento de 5,3 mm/s e chapa de espessura 3,0 mm, onde se observa dois pontos em destaque (Sp1 e Sp2), afastado a uma distância, que corresponde as indicações das temperaturas 650,00 °C e 651,90 °C.

Figura 61- Medição da temperatura por câmara termográfica Bico2vel5,3esp3-7365.



Fonte: (Autor, 2015)

Na Tabela 14 e na Tabela 15 apresentamos as medições das temperaturas pela câmara termográfica, na condição de utilização do Bico número 2, para as velocidades de 13,4 mm/s e 5,4 mm/s, respectivamente, nas profundidades das amostras de chapa em: 1,0 mm; 2,0 mm; 3,0 mm e 5,0 mm.

Tabela 14- Condição de Bico número 2 e velocidade de 13,4 mm/s

<i>Espessura da chapa</i>	<i>1,0 mm</i>	<i>2,0 mm</i>	<i>3,0 mm</i>	<i>5,0 mm</i>
Temperatura Sp1	853,10 °C	494,40 °C	375,50 °C	300,00 °C
Temperatura Sp2	831,50 °C	485,50 °C	361,80 °C	300,00 °C
Distância (Sp1- Sp2)	19,50 mm	24,00 mm	23,75 mm	32,30 mm

Fonte: (Autor, 2015)

Tabela 15- Condição de Bico número 2 e velocidade de 5,3 mm/s.

<i>Espessura da chapa</i>	<i>1,0 mm</i>	<i>2,0 mm</i>	<i>3,0 mm</i>	<i>5,0 mm</i>
Temperatura Sp1	Não Aplicado	781,00 °C	651,00 °C	389,50 °C
Temperatura Sp2	Não Aplicado	758,00 °C	651,90 °C	379,20 °C
Distância (Sp1- Sp2)	Não aplicado	32,2 mm	26,60 mm	20,64 mm

Fonte: (Autor, 2015)

Num caso específico as temperaturas obtidas na espessura de 2,0 mm, por câmara termográfica podem ser comparadas com os resultados obtidos com o sistema de termopar na espessura de 1,6 mm, na qual se observa similaridades entre as temperaturas, conforme Tabela 16.

Tabela 16– Comparação entre medições por termopar e por câmara termográfica

<i>Tipo de Bico</i>	<i>Bico 2</i>		<i>Bico 8</i>	
Velocidade (mm/s)	5,3	13,4	5,3	13,4
Temperatura Termopar Chapa na espessura de 1,6 mm	740,0 °C	334,0 °C	971,0 °C	538, 0 °C
Temperatura Câmara Termográfica Chapa na espessura de 2,0 mm	781,0 °C	494,0 °C	968,9 °C	581,9 °C
Percentual de Comparação	5,24%	32,38%	0,21%	7,99%

Fonte: (Autor, 2015)

4.3 CARACTERÍSTICAS INERENTES DAS LINHAS DE CALOR

(Resultado do grupo 1, item 1.3, conforme Figura 26)

O processo de linha de calor afeta as propriedades do aço naval. Vários experimentos realizados por (SCHAFER, RINALDI e BEG, 2012) mostram que existe alterações na microestrutura, quando as temperaturas ultrapassam os 650°C, e se compara essas propriedades antes e depois da aplicação da linha de calor.

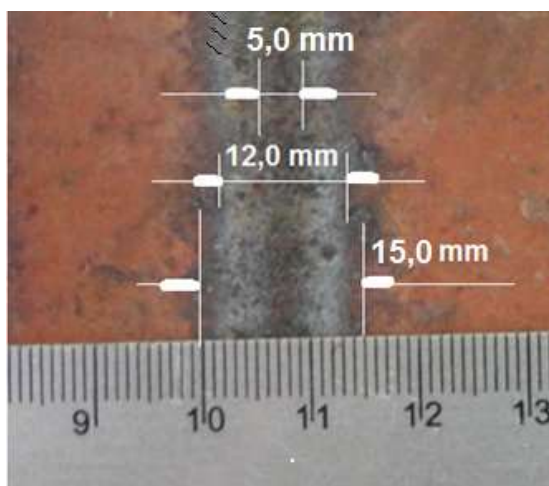
4.3.1 Geometrias das regiões aquecidas e termicamente afetada.

(Resultado do grupo 1, item 1.3, subitem 1.3.1, conforme Figura 26)

Na aplicação da linha de calor, utilizando um bico 8, na velocidade de 5,3 mm/s, a intensidade do fluxo de calor igual a $4.125,04 \pm 806,54$ W, afastamento bico a superfície da chapa de 20,0 mm, geralmente, observa-se o aspecto da superficial da chapa após a aplicação da linha de calor, conforme Figura 62.

Descrevendo e medindo as regiões em destaque com régua, aparece uma região escura, mais aquecida e com largura de 5,0 mm. Duas faixas acinzentadas, em ambos os lados, de largura total de 12,0 mm, e uma terceira levemente escura e oscilante, de largura total de 15,0 mm, correspondendo à região termicamente afetada, conforme Figura 62.

Figura 62– Aspecto da linha de calor na superfície da chapa



Fonte: (Autor, 2015)

A Tabela 17 apresenta as dimensões das regiões aquecidas em função das velocidades de deslocamento da tocha, calculadas pelo software (SMARTWELD, 2011)

Observa-se que, em ambos os cálculos, para um mesmo bico a largura e a profundidade praticamente se mantém constante, numa mesma velocidade.

Porém, com um aumento da velocidade a largura e a profundidade reduzem-se drasticamente, mas se mantém constante, para mesma velocidade.

A mudança para um número de bico maior acarreta um acréscimo da largura e da profundidade, mas mantêm-se as mesmas condições de variações anterior determinadas.

Tabela 17- Medições das regiões aquecidas (Meia elipse)

<i>Tipo de Bico</i>		<i>Bico 2</i>		<i>Bico 8</i>	
Velocidade (mm/s)		5,3	13,4	5,3	13,4
Espessura 12,7 mm (Software)	Largura (mm)	8,86	5,32	13,70	8,78
	Profundidade (mm)	1,40	0,51	3,36	1,36

Fonte: (Autor, 2015)

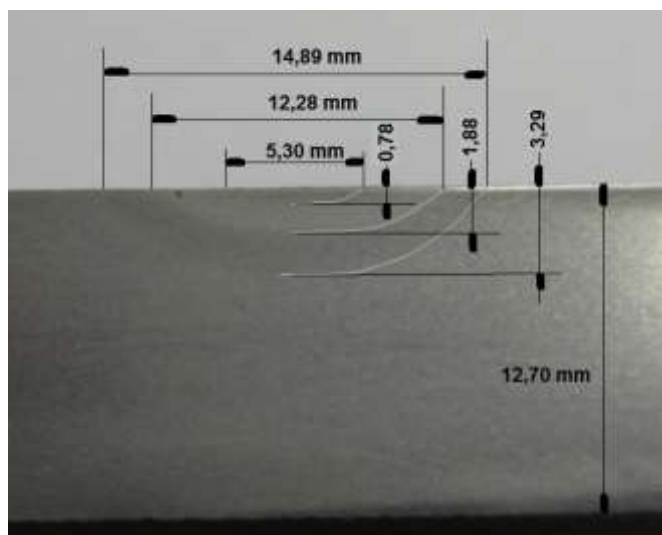
Um ensaio macrografico foi realizado na seção transversal à aplicação da linha de calor mostra as regiões aquecida e termicamente afetadas são destacadas na Figura 63.

A região aquecida foi subdividida em duas partes. Isto, devido ao fenômeno físico do reflexo de fluxo de calor, incidindo na superfície da chapa que gera uma onda senoidal, criando uma condição de maior e menor temperatura.

Neste caso, observa-se a região aquecida, subdividida em duas partes, uma mais escura, devido ao contato direto com a chama, de largura de 5,0 mm e com a profundidade de 0,78 mm, e outra acinzentada clara, reflexo do fluxo de calor, de largura 12,28 mm e com a profundidade de 1,88 mm.

A Figura 63 mostra a região termicamente afetada, cinza escuro, de largura 14,89 mm e com a profundidade de 3,29 mm.

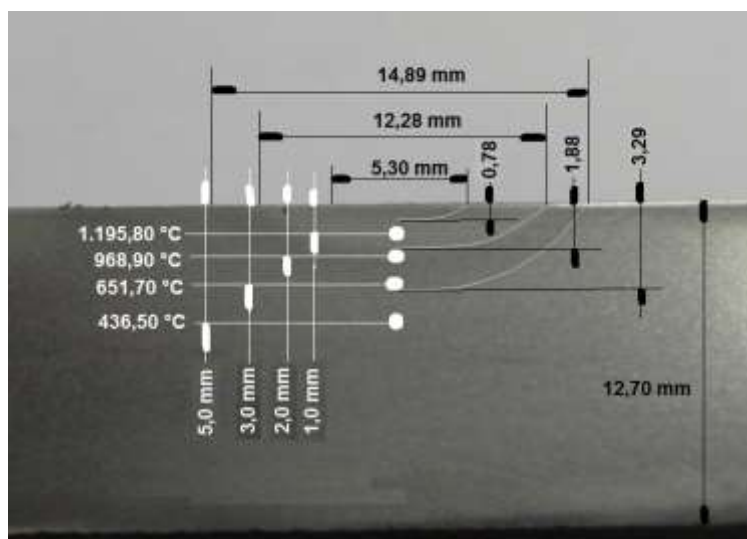
Figura 63- Detalhe da geometria das regiões aquecida e termicamente afetada.



Fonte: (Autor, 2015)

Na Figura 64 mostra a inserção dos valores na imagem das temperaturas medidas pela câmara termográfica em relação às profundidades.

Figura 64 – Medição das temperaturas nos pontos abaixo da superfície.



Fonte: (Autor, 2015)

Observa-se que, na região aquecida diretamente pela chama, na profundidade de 1,0 mm, que atingiu uma temperatura de 1195,0 °C.

A segunda região aquecida, na profundidade de 2,0 mm, correspondente a largura de 12,28 mm e profundidade 1,88 mm, atingiu a temperatura de 968,90 °C.

A região termicamente afetada, na profundidade de 3,0 mm, correspondente à largura de 14,89 mm e profundidade 3,29 mm a temperatura atingiu 651,70 °C. A temperatura na profundidade de 5,0 mm atingiu 436,50 °C.

Mais adiante, discutiremos as microestruturas encontradas no aço (ASTM A 131 GR AH36, 2014) após a aplicação da linha de calor.

4.3.2 Composição química / Micrografia / Microdureza / Microestrutura.

4.3.2.1 Composição química

A Tabela 18, mostra os resultados obtidos após ensaio de microscopia ótica da amostra utilizada nos experimentos, na condição como recebida, apresentou a composição química, e um carbono equivalente de 0,30, segundo os relatórios emitidos pelo próprio ensaio de microscopia ótica.

Tabela 18- Composição química pelo ensaio de microscopia ótica.

% em peso																		
C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Mo.	Cr	Ni	Nb	V	Ti						
0,003	6	1,25	0,025	0,049	0,325	0,031	0,064	0,003	1	0,031	9	0,013	7	0,024	0,000	5	0,011	9

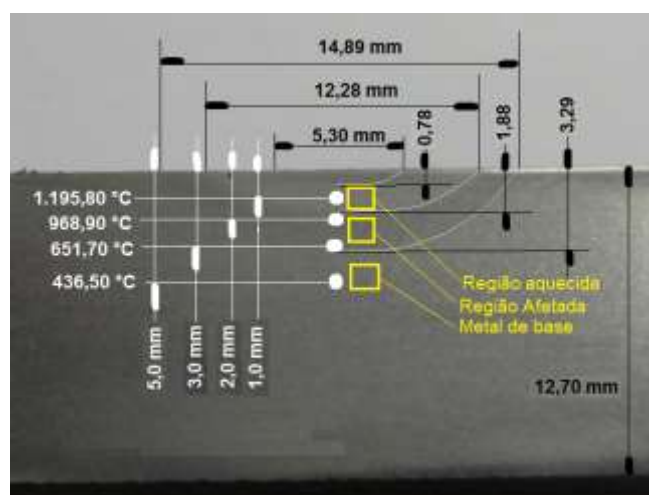
Fonte: (Autor, 2015)

4.3.2.2 Micrografia

(Resultado do grupo 1, item 1.3, subitem 1.3.2, conforme Figura 26)

Na Figura 65 mostra a inserção dos valores na imagem de uma correlação entre a geometria e as regiões aquecidas, termicamente afetadas e do metal de base, para estudo das micrografias.

Figura 65 – Localização das regiões para observação da microestrutura

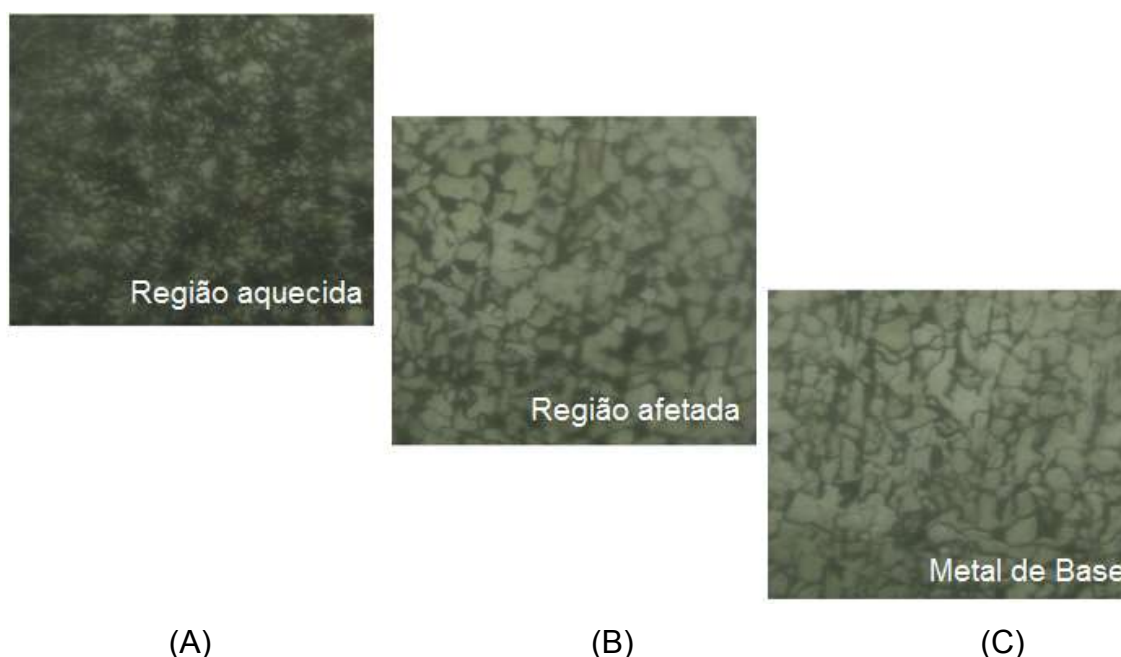


Fonte: (Autor, 2015)

A região aquecida atingiu uma temperatura de 1.115,80 °C, seguindo de um resfriamento rápido por água, apresentou uma microestrutura peculiar pode ser explicada pelo efeito da recristalização de subgrãos de ferrita (redução de tamanho) e dispersamento do teor de perlita, conforme Figura 66 A.

Figura 66 – Microestrutura das regiões 200x, com uma escala de 100 micrometros.

Em: (A) Região Aquecida; (B) Região Afetada termicamente; (C) Metal Base.



(A)

(B)

(C)

Fonte: (Autor, 2015)

Na região afetada termicamente, que atingiu uma temperatura de 968,90 °C apresentou uma condição que não foi atingida pela plastificação, porém o efeito textura, presente nos grãos ferríticos desapareceu, conforme Figura 66 B.

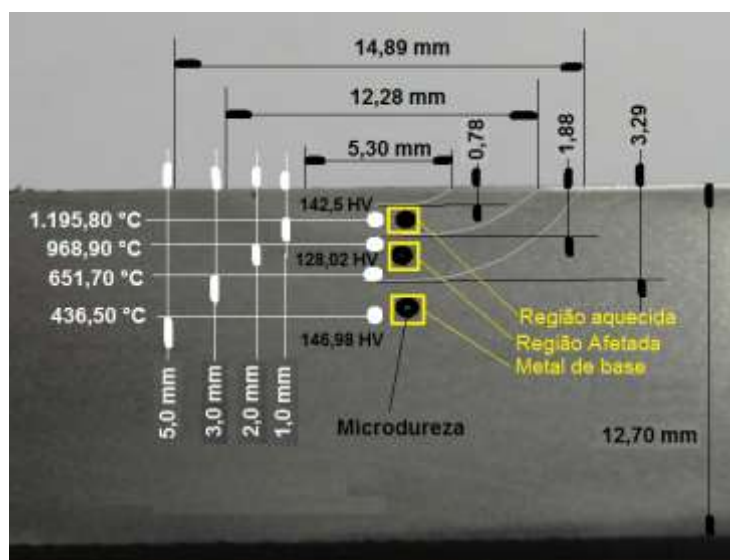
Na região do metal de base, que atingiu a temperatura de 436,50°C, que apresentou uma microestrutura composta basicamente por grãos ferríticos equiaxiais, levemente enriquecidos de pelita nos contornos e ligeiramente alongados no sentido de laminação, devido ao processo termomecânico que este material é submetido durante a sua fabricação, conforme Figura 66 C.

Experiências realizadas por (SCHAFER, RINALDI e BEG, 2012) para observações de microestrutura, com chapa de aço naval, com espessura de 20,0 mm, detectaram na microestrutura, precipitação de cementita terciária no limite de grãos, após aplicação da linha de calor.

4.3.2.3 Microdureza

Na Figura 67, mostra a inserção dos valores na imagem de uma correlação entre a geometria e as regiões de estudo da microdureza. Os resultados das microdurezas das diferentes zonas foram os seguintes: para o metal base, 146,98 HV, para a região termicamente afetada, 128,02 HV, que teve uma redução de 12,89% e na região aquecida, 142,5 HV, que registrou uma redução de 3,14%.

Figura 67–Localização das regiões na observação da Microdureza.



Fonte: (Autor, 2015)

Testes de microdureza foram realizados por (SCHAFER, RINALDI e BEG, 2012) na profundidade de 2,0 mm, nas chapas de aço naval, de 20,0 mm de espessura, mostraram que, a microdureza sofre uma redução média de 20% após a aplicação da linha de calor.

4.3.2.4 *Microestrutura do aço naval.*

(Resultado do grupo 1, item 1.3, subitem 1.3.2, conforme Figura 26)

Foram realizadas diversas experiências para determinar as microestruturas deste aço naval, em várias temperaturas. As microestruturas resultantes são mostradas na Figura 68.

Para isto, foram confeccionadas várias amostras de chapas e submetidas ao forno elétrico, aquecidas nas temperaturas de 500°C, 600°C, 700°C, 800°C e 900°C, depois de estabilizadas na temperatura foram resfriadas bruscamente em água.

Depois, preparadas e polidas seguidamente realizado um ataque químico em cada amostra e observadas no microscópio ótico.

A norma (ABS, 2007) recomenda a temperatura máxima de 650,0°C, para aplicações na linha de calor sem degradar o material da chapa naval.

A microestrutura do metal base na temperatura de 30°C apresenta-se grão grosseiro de ferrita primária (FP) e ferrita intergranular (FI) entre os veios de perlita (P) alinhados devido ao processo de laminação, conforme Figura 68 A.

A microestrutura da amostra aquecida a 500°C se apresenta diversificada constituída de grão de perlita (P) mais concentrados (circulares) e grãos de ferrita primária (FP) mais acentuada, praticamente a perlita (P) indicadora do sentido de laminação alinhada fica menos visível, conforme Figura 68 B.

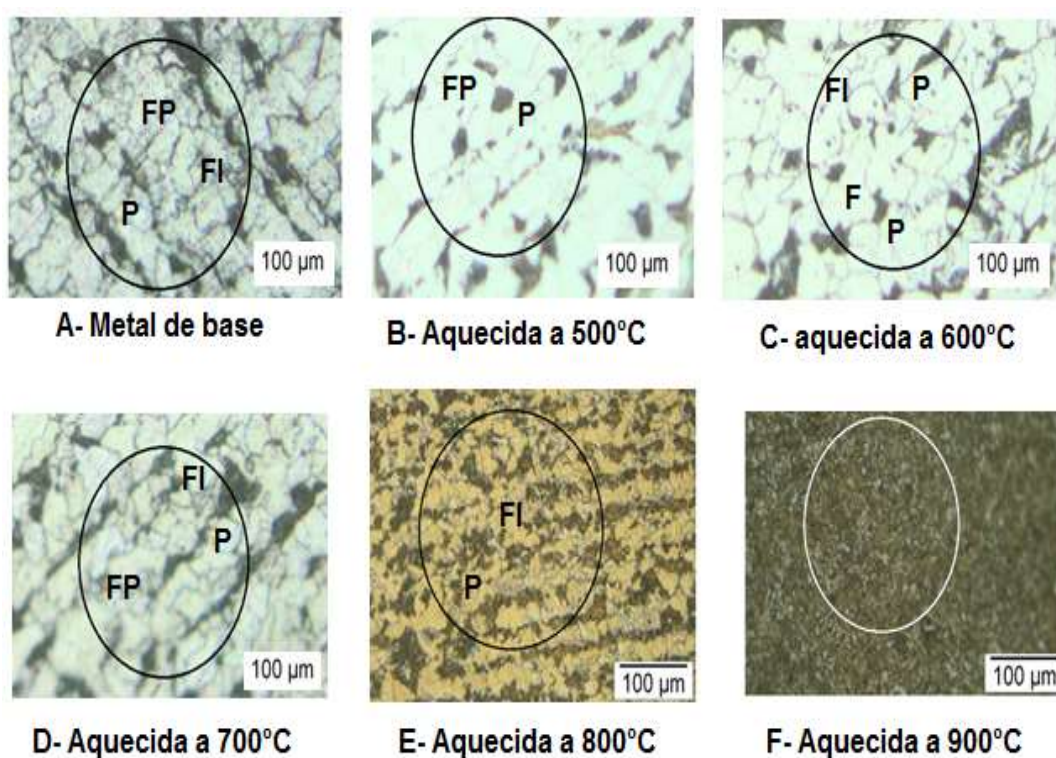
A microestrutura da amostra aquecida a 600°C se apresenta com perlita (P) em três modos, primeiro, concentrada e alongada com extremidades afinadas, segundo, nos contornos de grãos de ferrita intergranular (FI), terceiro, concentrações diversificada, maiores espalhadas e desinforme, conforme a Figura 68 C.

A microestrutura da amostra aquecida a 700°C se apresenta bastante semelhante ao metal base como grão de ferrita primária (FP) e ferrita intergranular (FI) entre os veios de perlita (P) alinhados devido ao processo de laminação. Persiste a concentração espalhadas e desinforme da perlita (P), conforme a Figura 68 D.

A microestrutura da amostra aquecida a 800 °C se apresenta os grãos de perlita (P) e os grãos de ferrita intreganular (FP) com tamanhos semelhantes, também se apresenta a perlita (P) alinhada no sentido de laminação e a formação de grãos pequenos de ferrita (FI) ilhados sobre a perlita (P), conforme a Figura 68 E.

A microestrutura da amostra aquecida a 900°C apresenta a transformação de toda a ferrita em perlita, praticamente uma microestrutura carbonizada, conforme a Figura 68 F.

Figura 68- Microestrutura do aço, 200x, nas temperaturas entre 500°C a 900°C.



Fonte: (Autor, 2015)

Experimentos realizados por (SCHAFFER, RINALDI e BEG, 2012) que estudou as micrografias de cinco tipos de aços navais, em três amostras de aços navais de baixa resistência e em duas amostras de aço navais de alta resistência, em duas espessuras básicas de 20 mm e de 50 mm.

Os aços navais na espessura de 20 mm, de baixa resistência foram aquecidos na temperatura entre 800°C a 850°C, enquanto que, os de alta resistência foram aquecidos a 650°C a 700°C, ambos por um por um longo período de permanência.

Os aços navais na espessura de 50 mm, de baixa resistência foram aquecidos na temperatura entre 850°C a 900°C, enquanto que, os de alta resistência foram aquecidos a 650°C a 700°C, ambos, por um curto período de permanência.

Os cinco aços analisados sofreram algumas mudanças na microestrutura, como consequência do aquecimento aplicado, com as seguintes características significativas em que foram observadas:

Primeiro, aos aços de baixa resistência, com microestrutura de metal de base ferríticos-perlítica, sofreram um refinamento do grão que podem ser vistos claramente, bem como uma redução da espessura das bandas de Perlita, o que dá origem a um novo arranjo micro estrutural para ambas as espessuras.

Segundo, em aços de alta resistência, com microestrutura Bainítica temperada foram parcialmente perdidas na área aquecida, transformando-se em uma formação ferrítica e perlítica com grão fino para ambas as espessuras.

Em resumo, o processo de linha de calor afeta as propriedades dos aços navais, de modo geral, inclusive na análise da microestrutura comparando as propriedades do material antes e após a aplicação do processo de aquecimento (PATTEE, EVANS e MONROE, 1970).

4.3.2.5 *Correlação entre a microestrutura e regiões da linha de calor.*

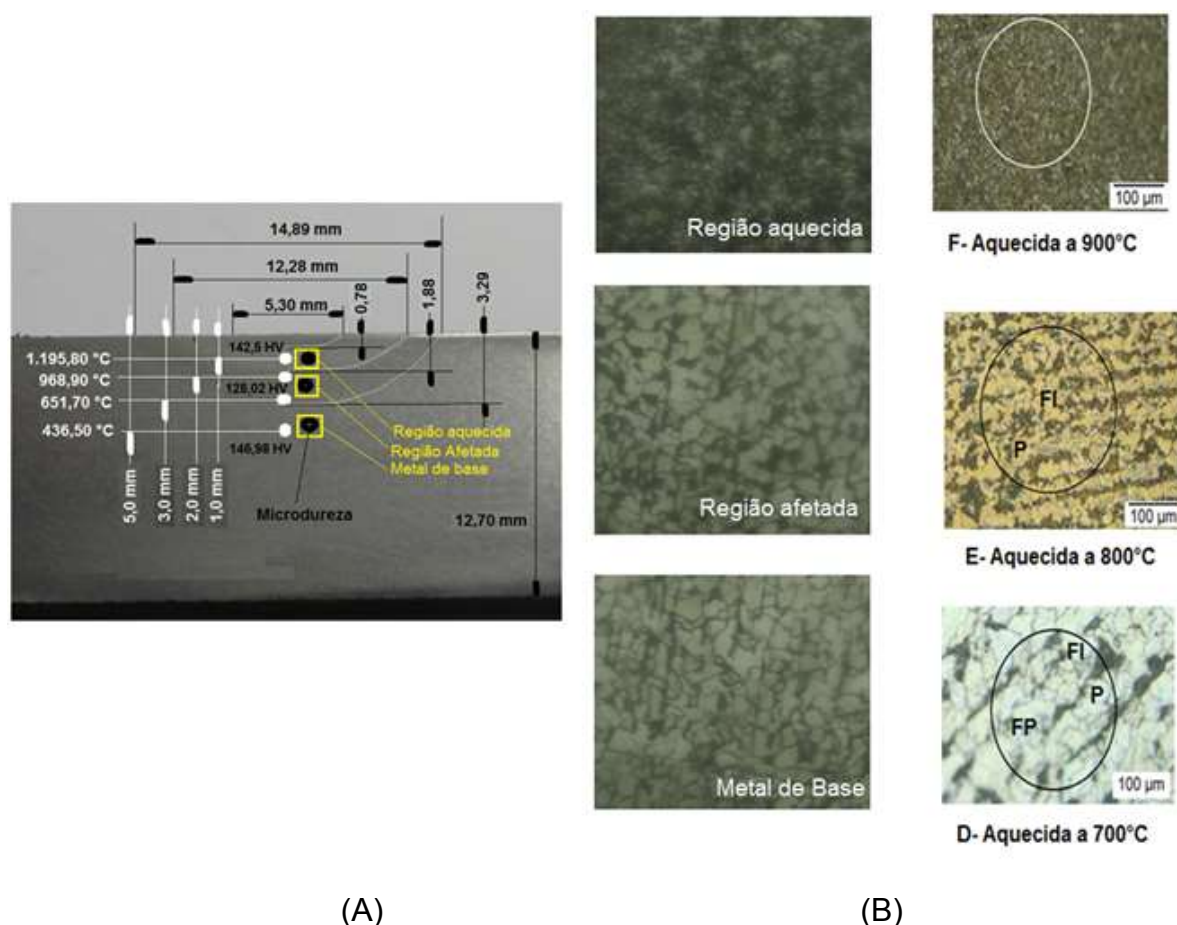
Nestes experimentos busca-se o conhecimento sobre o processo de linha de calor, pois no nosso país, não existe trabalhos relacionados com linhas de calor, aplicado à conformação de chapas, na indústria de construção naval.

Por outro lado, esta sequência de experimentos, sobre as linhas de calor, assemelha-se com os praticados na área de soldagem.

A Figura 69, na parte A, mostra a uma correlação entre a geometria de aquecimento da linha de calor, com as temperaturas atingidas nas profundidades de 1,0 mm até 5,0 mm e os resultados das micros-dureza.

A Figura 69, na parte B, mostra uma correlação entre a microestrutura da linha de calor, nas regiões aquecida, afetada termicamente e de metal de base, para a condição de bico número 8 e com velocidade de 5,4 mm/s, e os resultados das microestruturas do aço naval aquecido em forno.

Figura 69 – Correlação regiões da linha de calor versus microestrutura



Fonte: (Autor, 2016)

Análises de microestruturas foram realizadas por (CONNOR, URBAN e KAUFMANN, 2008) em experiências, que consistia em provocar um dano estrutural no aço, e logo em seguida, executar um reparo por linhas de calor.

Nas condições de: um ciclo de Danos/Reparo; dois ciclos de Danos/Reparos e três ciclos de Danos/Reparos foram observaram que, em ambas não houve mudanças significativas da microestrutura ao longo da espessura do material, apenas na superfície da chapa, onde foram aplicadas as linhas de calor, houve um superaquecimento, alterando a microestrutura.

Então, concluíram que as linhas de calor provocam alterações microestruturais na superfície do aço, provocada pelo superaquecimento e um subsequente resfriamento.

4.3.2.6 Tensões residuais antes e após aplicação da linha de calor

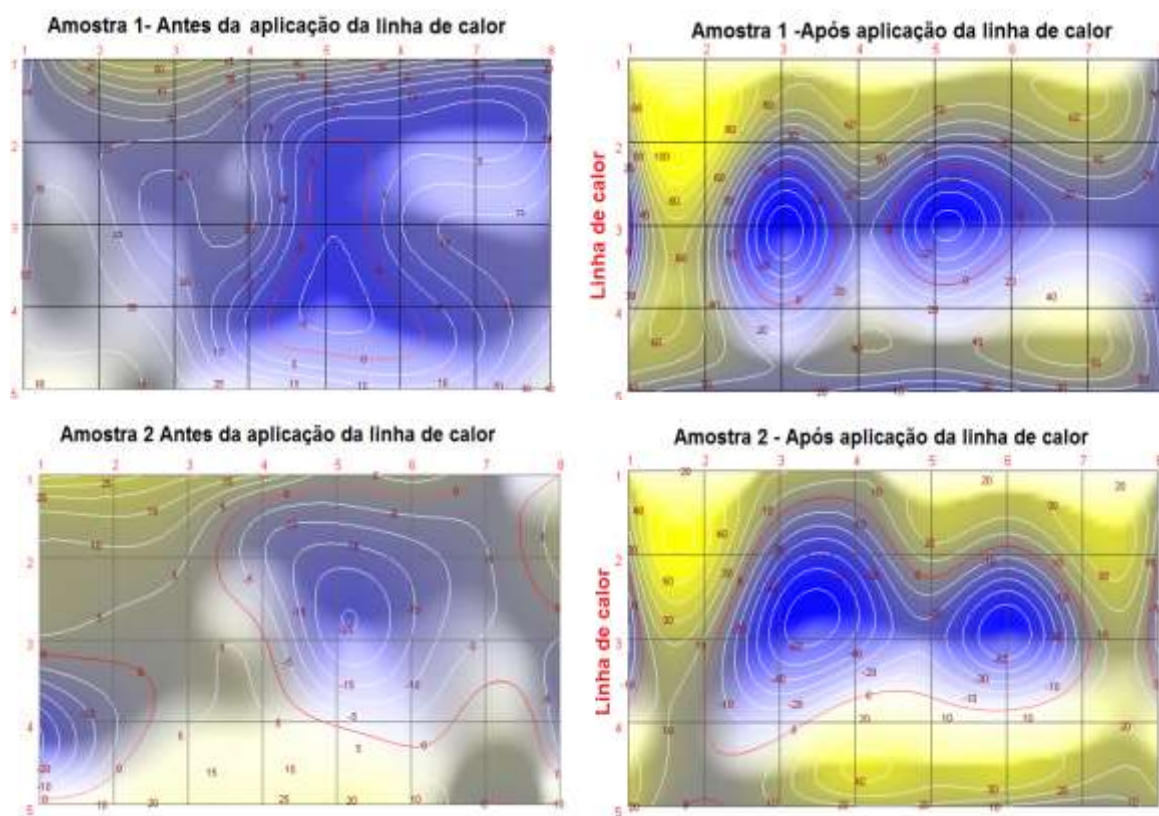
(Resultado do grupo 1, item 1.3, subitem 1.3.4, conforme Figura 26)

4.3.2.7 Resultados das tensões residuais através do método magnético.

A técnica da Magnetização foi apresentada por (GUROVA, SERGEN e ANATOLI, 2009), que consiste em medição das tensões residuais, onde um sensor magnético-anisotrópico permite observar as variações de magnetização do material ferromagnético sujeito às tensões mecânicas.

A Figura 70 mostra os resultados das tensões residuais medidas pela técnica da Magnetização, onde os experimentos foram realizados no laboratório da COPPE-UFRJ. Na amostra 1, a linha de calor foi aplicada no mesmo sentido de laminação, enquanto que, na chapa 2, a linha de calor foi aplicada no sentido transversal de laminação, ambas na metade das chapas, onde indicada.

Figura 70 - Resultados da Magnetização das amostras 1 e 2 “crua” e “queimada”



Fonte: (Autor, 2014)

Percebe-se que houve alteração de magnetização antes e depois da aplicação da linha de calor.

Comparando as amostras 1 e 2, antes da aplicação da linha de calor, mostra que, na amostra 1, os quadrantes longitudinal números 4, 5 e 6 tem destaque positivos, enquanto que, na amostra 2, os mesmos quadrantes longitudinais apresentam-se negativos. Diante disto, o efeito do sentido de laminação influenciou a forma em convexa e côncava, respectivamente, no corte das chapas.

Além deste aspecto, comparando as amostras 1 e 2, após da aplicação da linha de calor, mostra que, na amostra 1 os destaque positivos estão próximos, enquanto que, na amostra 2, os destaques positivos estão mais afastados. Diante disto, o efeito do sentido de laminação influenciou a concentração de magnetização.

4.3.2.8 Resultados das tensões residuais por difração por raios-X.

A tecnologia não destrutiva de medição das tensões RAYSTRESS é caracterizada pelo uso do equipamento de raios-X, desenvolvido por (GUROVA, SERGEN e ANATOLI, 2009), sendo o equipamento mais compacto existente no mercado mundial.

O Método empregado consiste em: Difração de raios-X, dupla exposição, ângulo de convergência dos feixes de raios-X de 50° , linhas difratadas no intervalo do ângulo, entre 148° a 164° .

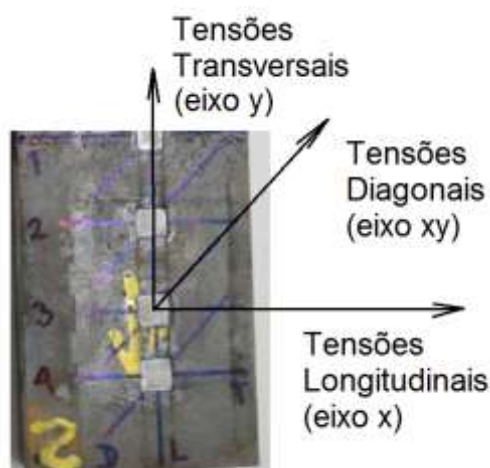
O conjunto operacional do RAYSTRESS permite realizar medições em praticamente qualquer condição de campo, para superfícies das peças e construções de geometria complexa e em locais de medição de difícil acesso, que tem as seguintes características: o procedimento é não destrutivo, o equipamento é portátil, existe a possibilidade da medição in loco, obtém o valor absoluto da tensão medida longitudinal, transversal e cisalhante e tem precisão de medição.

A Figura 71, mostra as tensões longitudinais (eixo x) e transversais (eixo y) e as tensões em diagonais (eixo xy) que foram medidas pelo equipamento de difração por raios-X.

Os cálculos das tensões cisalhantes, das tensões normais I e II e das tensões de Von Mises, foram considerados na condição de estado plano de tensões.

Doravante, a expressão “crua” refere-se antes da aplicação da linha de calor, enquanto que, a expressão “queimada” refere-se após aplicação da linha de calor.

Figura 71- Quadro das tensões do estado plano

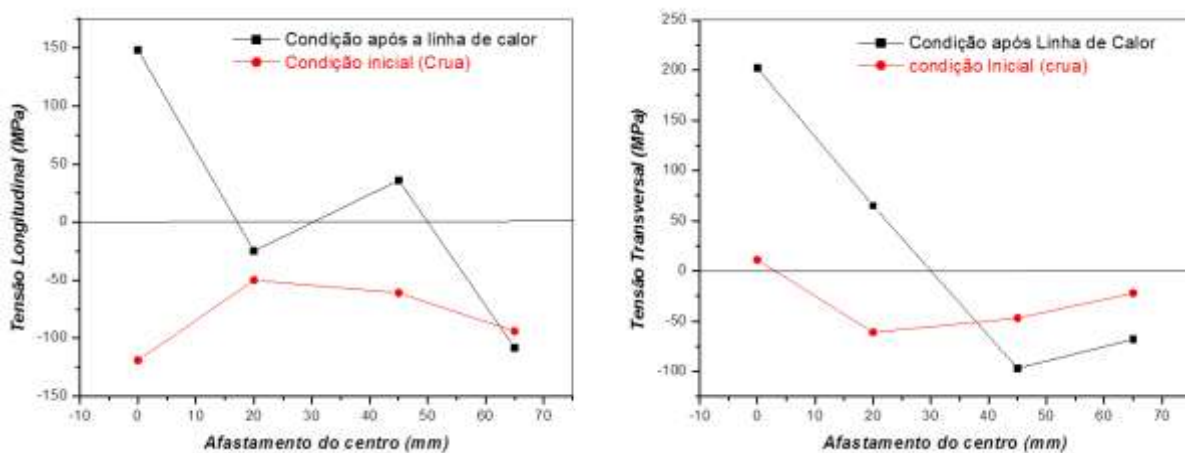


Fonte: (Autor 2015)

A Figura 72 apresenta os resultados das medidas das tensões longitudinais e transversais, por difração de raios-X, da amostra da chapa 1, na condição inicial, antes da aplicação da linha de calor e após aplicação da linha de calor.

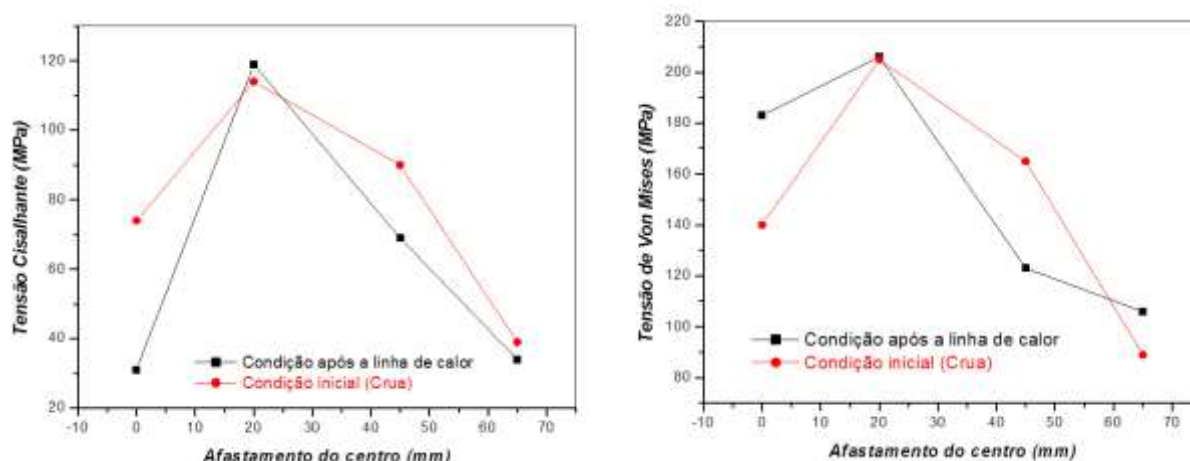
Enquanto que, na Figura 73 mostra os resultados das medidas das tensões cisalhantes, por difração de raios-X, e o resultado dos cálculos das tensões Von Mises na chapa 1, na condição inicial, antes da aplicação da linha de calor e após aplicação da linha de calor.

Figura 72 - Resultados das tensões residuais por Difração por RX na chapa 1.



Fonte: (Autor 2015)

Figura 73 - Resultados das tensões residuais por Difração por RX na chapa 1.

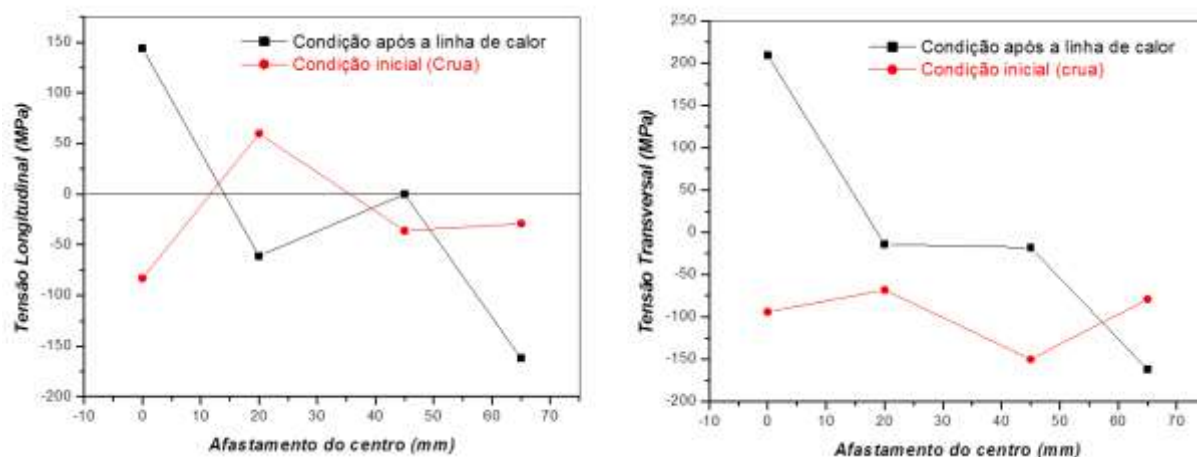


Fonte: (Autor 2015)

A Figura 74 apresenta os resultados das medidas das tensões longitudinais e transversais, por difração de raios-X, da amostra da chapa 2, na condição inicial, antes da aplicação da linha de calor e após aplicação da linha de calor.

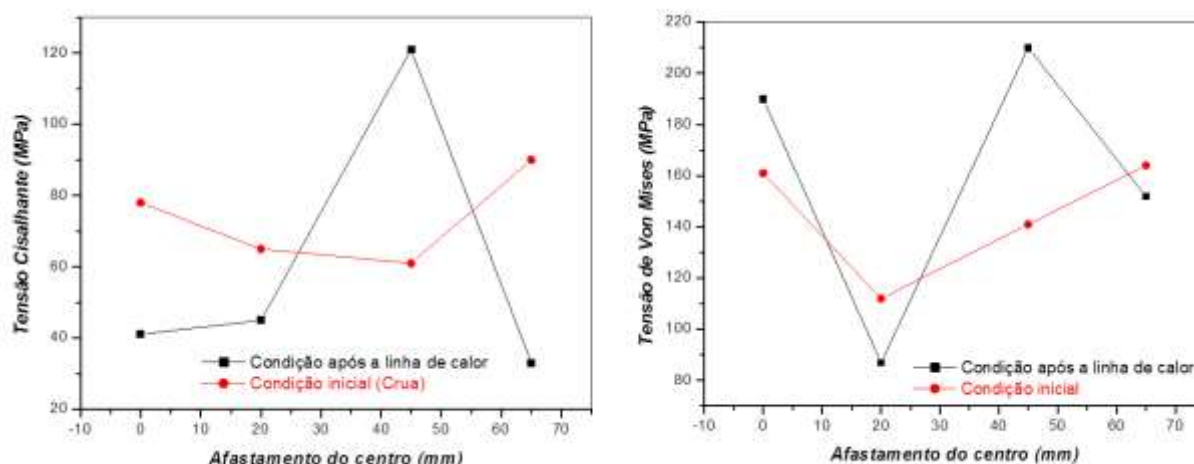
Enquanto que, na Figura 75 mostra os resultados das medidas das tensões cisalhantes, por difração de raios-X, e o resultado dos cálculos das tensões Von Mises na chapa 2, na condição inicial, antes da aplicação da linha de calor e após aplicação da linha de calor.

Figura 74- Resultados das tensões residuais por Difração por RX na chapa 2.



Fonte: (Autor 2015)

Figura 75 - Resultados das tensões residuais por Difração por RX na chapa 2.



Fonte: (Autor 2015)

Observa-se que na linha de calor com resfriamento subsequente o aporte térmico aquece a região da chapa que se expande gerando forças de compressão que provocam uma deformação descendente em relação à superfície da amostra.

Durante o resfriamento, a região aquecida se esfria contraindo-se gerando forças trativas que provocam uma recuperação que pode implicar em valores de deformações ascendentes ou descendentes em relação à superfície da amostra. Essas forças estão associadas às tensões residuais.

As deformações provocadas pela aplicação da linha de calor dependem das variáveis do processo como: aporte térmico, velocidades de deslocamento, do resfriamento, do material das amostras e de fatores dimensionais de todo o conjunto, que podem gerar deformações ascendentes ou descendentes, além da influência do sentido de laminação nas chapas das amostras.

As técnicas de magnetização e difração por raios-X podem evidenciar as tensões residuais decorrentes da aplicação da linha de calor.

Em ambas as técnicas, foram mostrados que na parte central das chapas as tensões eram trativas e afastando-se do centro, assumiam um comportamento alternado, oscilando entre trativas e compressivas, evidenciando que estas variações são decorrentes dos sentidos de laminação das amostras das chapas.

Na técnica de magnetização, quando as linhas de calor são aplicadas no mesmo sentido da laminação as tensões têm uma tendência de magnetizar na parte central por serem tensões trativas. Observa-se uma aproximação, entre os centros das tensões, resultando em uma máxima tensão de Von Mises.

Quando as linhas de calor são aplicadas no sentido transversal da laminação as tensões assumem um comportamento alternado, devido o espaço entre elas. As tensões de Von Mises oscilam entre trativas e compressivas.

A técnica de difração por raios-X mostrou que os valores das diferenças das tensões von Mises na parte central as tensões são trativas de 48 MPa.

Quando as linhas de calor são aplicadas no mesmo sentido da laminação e as tensões tem uma tendência com o afastamento se tornarem negativas em -42 MPa.

Por outro lado, quando as linhas de calor são aplicadas em chapas com sentido transversal da laminação, as tensões na parte central são trativas de 29 MPa, com o afastamento, oscilam-se entre compressivas de -25 MPa e trativas 69 MPa.

O aporte térmico aplicado nas amostras foi suficiente para geração de deformações plásticas e que as tensões residuais obtidas pelas técnicas de magnetização e de difração de raios-X apresentaram comportamentos diferentes, considerando-se o sentido da aplicação da linha de calor em relação ao sentido de laminação da chapa.

4.4 MEDIÇÕES DAS DEFORMAÇÕES POR TIPO DE RESFRIAMENTO.

(Resultado do grupo 1, item 1.4, conforme Figura 26)

4.4.1 Modelo padronizado dos gráficos de deformações por linhas de calor.

A Figura 76 mostra um exemplo de um gráfico de deflexões transiente, onde as deflexões podem ser deformações ascendentes e descendentes, em função do tempo, referenciada na parte superior da chapa, enquanto que, as deformações residuais são os deslocamentos finais.

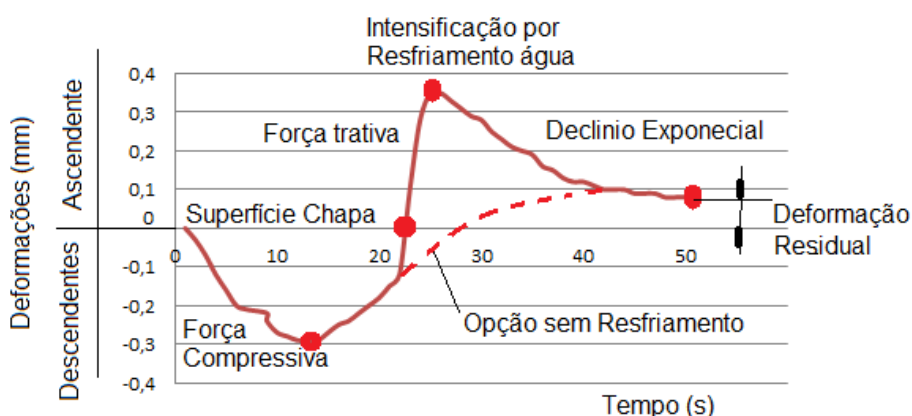
As deflexões descendentes se caracterizam por ocorrência de tensões plástica de compressão, enquanto que as deflexões ascendentes por tensões elásticas trativas, ambas em relação a superfície aquecida.

Dependendo do tipo de resfriamento, os gráficos das deflexões transientes têm perfis diferentes. Nas descrições do exemplo da Figura 76 serão utilizadas nos gráficos doravante elaborados. Contudo, gráfico apresenta um resfriamento sequencial, com o registro das deflexões compressivas e trativas, a intensificação pelo resfriamento, declínio exponencial e da deformação residual produzida pela linha de calor.

A chama, por exemplo, com aporte térmico de 4100,0 J/cm, deslocando-se na velocidade de 5,3 mm/s, percorre aquecendo a amostra da chapa, no intervalo de tempo 0 s a 24 s, provocando uma deflexão compressiva (-0,3 mm) e trativa de (+0,2 mm), em seguida o jato de água de resfriamento, no intervalo de tempo 24 s a 25 s, intensifica a deflexão (+0,35 mm), após a passagem do resfriamento, no intervalo de tempo 25 s a 50 s, existe um declínio exponencial da deflexão, onde se revela a deformação residual (+0,08 mm).

Quanto à representação da opção sem resfriamento na Figura 76 é ilustrativa, apenas para diferenciar o comportamento da opção com resfriamento.

Figura 76 – Modelo de gráfico de deflexões transiente oriundos dos experimentos.



Fonte: (Autor, 2015)

Os gráficos de deformações transientes para linha de calor podem ser pesquisados, de forma semelhante aos aplicados na soldagem, basicamente será o conteúdo deste trabalho.

As medições das deflexões e deformações dependem das regulagens das variáveis do processo das linhas de calor como: quantidade de calor fornecida pela

chama, velocidade de deslocamento, tipo de resfriamento, entre outros. Os resultados de todas as experiências serão apresentados neste capítulo de resultados e discussões.

4.4.2 Deformações dos tipos de resfriamentos, na chapa de 12,70 mm.

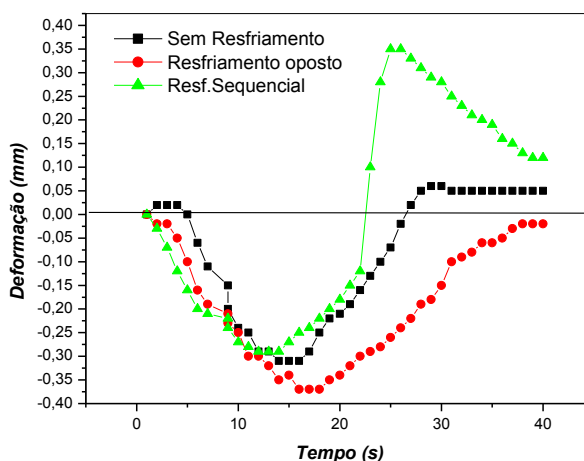
Dissemos que, numa linha de calor existem três tipos de resfriamentos, que podem ser classificados de modos distintos como: sequencial, lado oposto e sem resfriamento, que todos têm deformações inerentes diferenciadas.

Linhas de calor foram aplicadas em várias amostras de chapa de espessura de 12,7 mm. Foram usados os bicos de número 2 e 8, com duas possibilidades de velocidades de deslocamento da tocha de 5,3 mm/s e de 13,4 mm/s, para evidenciamos as deformações inerentes.

Obteve-se como resultado uma distribuição de deformações inerente em função do tempo, produzidas pela linha de calor, com os três modos distintos de resfriamento sequencial, lado oposto e sem resfriamento.

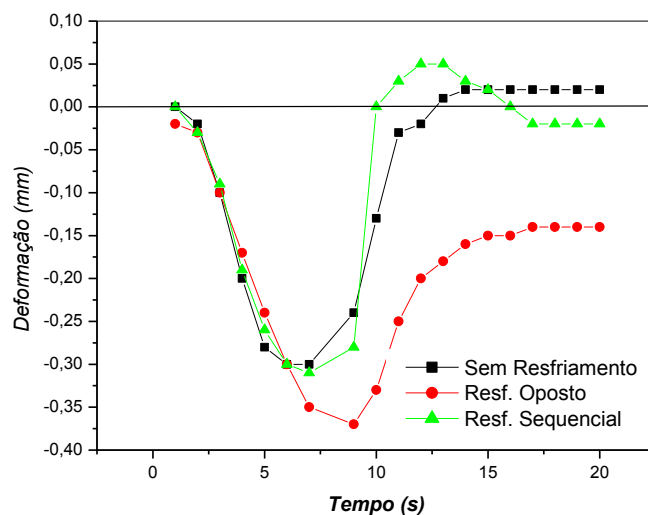
A Figura 77 mostra os comportamentos das deformações inerentes, dos três tipos de resfriamento para a condição de bico número 2 e velocidade de 5,3 mm/s; enquanto que, a Figura 78 mostra as deformações para a condição de velocidade de 13,4 mm/s.

Figura 77- Transiente de três tipos resfriamento, para Bico nº 2 e velocidade 5,3 mm/s.



Fonte: (Autor, 2015)

Figura 78- Transiente de Três tipos resfriamento, para Bico nº 2 e velocidade 13,4 mm/s.

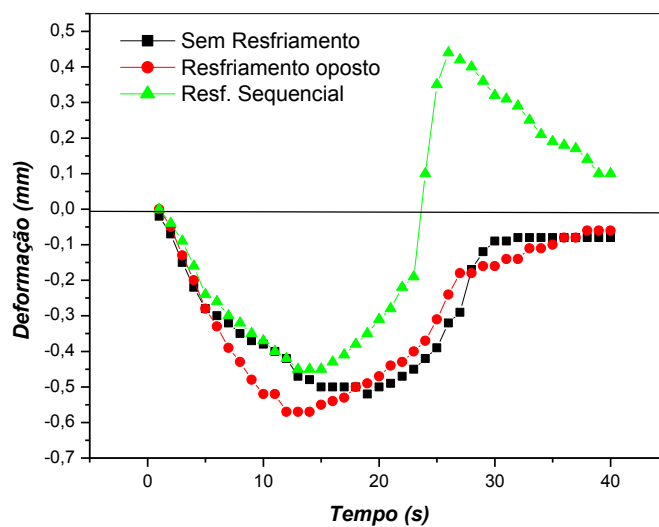


Fonte: (Autor, 2015)

Na Figura 79 mostra os comportamentos das deformações inerentes, dos três tipos de resfriamento para a condição de bico número 8 e velocidade de 5,3 mm/s.

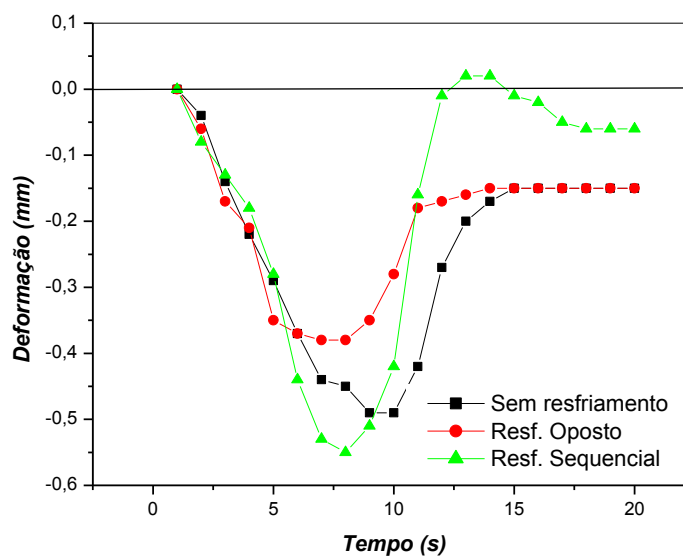
Enquanto que, na Figura 80 mostra as deformações para a condição de velocidade de 13,4 mm/s.

Figura 79- Transiente de três tipos resfriamento, para Bico nº 8 e velocidade 5,3 mm/s.



Fonte: (Autor, 2015)

Figura 80- Transiente de três tipos resfriamento, para Bico nº 8 e velocidade 13,4 mm/s.



Fonte: (autor, 2015)

Na Tabela 19 sintetiza as deformações inerentes residuais para o bico número 2. Enquanto que, na Tabela 20 as deformações inerentes residuais para o bico número 8.

Observa-se que, o resfriamento do lado oposto à superfície de aplicação da linha de calor sempre irá produzir uma deflexão contrária máxima.

Tabela 19 - Deformações Inerentes Residuais utilizando o bico nº 2.

<i>Bico número 2</i>	<i>Deformações Inerentes Residual (mm)</i>	
Velocidade (mm/s)	5,3	13,4
Sem Resfriamento	+ 0,05	+ 0,02
Resfriamento Oposto	- 0,02	- 0,14
Resfriamento Sequencial + 90 mm	+ 0,12	- 0,02

Fonte: (Autor, 2015)

Tabela 20- Deformações Inerentes Residuais utilizando o bico nº 8.

<i>Bico número 8</i>	<i>Deformações Inerentes Residual (mm)</i>	
Velocidade (mm/s)	5,3	13,4
Sem Resfriamento	- 0,08	- 0,15
Resfriamento Oposto	- 0,06	- 0,15
Resfriamento Sequencial + 90 mm	+ 0,10	- 0,06

Fonte: (Autor, 2015)

Observa-se que, na condição da linha de calor com o bico número 8 e velocidade de 13,4 mm/s, todas as deflexões foram negativas.

4.4.3 Deformações dos resfriamentos, nas chapas de: 9,50 mm a 19,05 mm.

A Tabela 21 e a Tabela 22, mostra a variação das deformações residuais, onde se aplicou as linhas de calor, sem resfriamento, na espessura da chapa entre 9,50 mm á 19,05 mm.

A Tabela 23 e a Tabela 24, mostra a variação das deformações residuais, onde se aplicou as linhas de calor, com resfriamento sequencial afastado de +90,0 mm, na espessura da chapa entre 9,50 mm á 19,05 mm.

Tabela 21- Deformações residuais Bico nº 2, sem resfriamento, chapas de 9,50 mm a 19,05 mm.

<i>Bico 2</i>	<i>Velocidade</i>	<i>Velocidade</i>
<i>Sem Resfriamento</i>	<i>(5,3 mm/s)</i>	<i>(13,4 mm/s)</i>
Espessura da chapa = 9,50 mm	+0,10	-0,03
Espessura da chapa = 12,70 mm	+0,05	+0,02
Espessura da chapa = 15,88 mm	-0,04	-0,04
Espessura da chapa = 19,05 mm	+0,01	+0,003

Fonte: (Autor, 2015)

Tabela 22- Deformações residuais Bico nº 8, sem resfriamento, chapas de 9,50 mm a 19,05 mm.

<i>Bico 8</i>	<i>Velocidade</i>	<i>Velocidade</i>
<i>Sem Resfriamento</i>	<i>(5,3 mm/s)</i>	<i>(13,4 mm/s)</i>
Espessura da chapa = 9,50 mm	0,00	-0,12
Espessura da chapa = 12,70 mm	-0,08	-0,15
Espessura da chapa = 15,88 mm	+0,03	-0,14
Espessura da chapa = 19,05 mm	0,00	0,00

Fonte: (Autor, 2015)

Tabela 23 - Deformações residuais Bico nº 2, resfriamento sequencial + 90,0 mm, chapas de 9,50 mm a 19,05 mm.

<i>Bico 2</i>	<i>Velocidade</i>	<i>Velocidade</i>
<i>Resfriamento Sequencial +90,0 mm</i>	<i>(5,3 mm/s)</i>	<i>(13,4 mm/s)</i>
Espessura da chapa = 9,50 mm	+0,08	-0,02
Espessura da chapa = 12,70 mm	+0,12	-0,02
Espessura da chapa = 15,88 mm	-0,02	+0,02
Espessura da chapa = 19,05 mm	0,00	0,00

Fonte: (Autor, 2015)

Tabela 24- Deformações residuais Bico nº 8, resfriamento sequencial +90,0 mm, chapas de 9,50 mm a 19,05 mm.

<i>Bico 8</i>	<i>Velocidade</i>	<i>Velocidade</i>
<i>Resfriamento Sequencial +90,0 mm</i>	<i>(5,3 mm/s)</i>	<i>(13,4 mm/s)</i>
Espessura da chapa = 9,50 mm	0,00	-0,17
Espessura da chapa = 12,70 mm	+0,10	-0,06
Espessura da chapa = 15,88 mm	-0,10	-0,18
Espessura da chapa = 19,05 mm	0,00	0,00

Fonte: (Autor, 2015)

4.4.4 Deformações por tipo de resfriamento, na chapa de 12,70 mm.

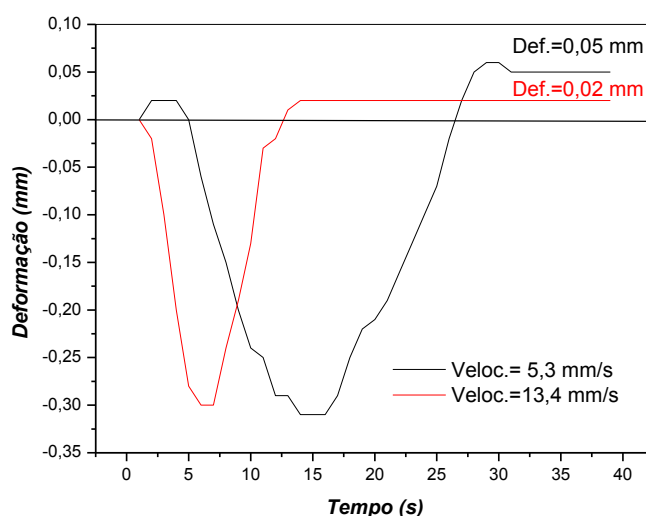
O comportamento transiente das deformações, na condição do bico número 2, realizado na amostra de chapa de 12,70 mm, para as velocidades de 5,3 mm/s e 13,4 mm/s, está mostrado na Figura 81.

Observa-se que as forças compressivas provocam deformações descendentes próximas de -0,30 mm, para ambas as velocidades, porém para um aumento de velocidade, o tempo de atuação, obviamente reduz-se drasticamente. Também, as deformações residuais apresentaram 0,05 mm e 0,02 mm para as velocidades de 5,3 mm/s e 13,4 mm/s respectivamente.

O comportamento transiente das deformações, na condição do bico número 8, realizado na amostra de chapa de 12,70 mm, para as velocidades de 5,3 mm/s e 13,4 mm/s, está mostrado na Figura 82.

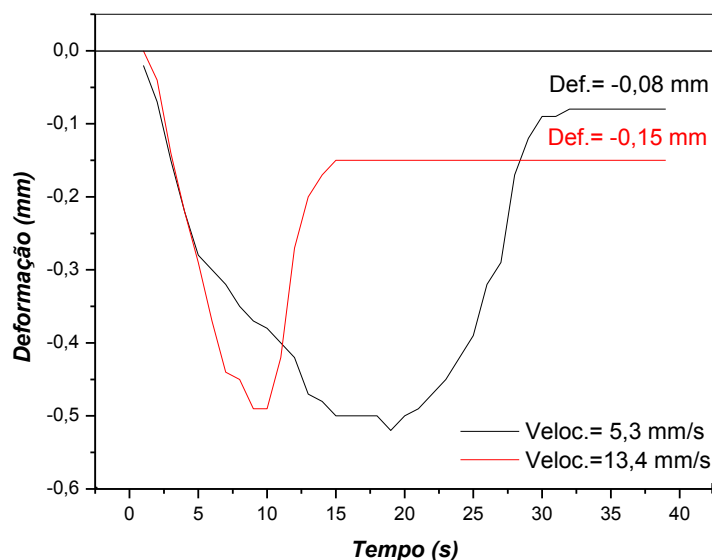
Observa-se que as forças compressivas provocam deformações descendentes próximas de -0,50 mm, para ambas as velocidades. As deformações residuais apresentaram -0,08 mm e -0,15 mm para as velocidades de 5,3 mm/s e 13,4 mm/s respectivamente.

Figura 81- Transiente das deformações Bico nº 2, na chapa 12,70 mm.



Fonte: (Autor, 2015)

Figura 82- Transiente das deformações Bico nº 8, na chapa 12,70 mm.



Fonte: (Autor, 2015)

Resumindo, para a velocidade 5,3 mm/s, aumentando-se o aporte térmico do bico número 2 para o bico número 8 (279,6 J/mm para 714,02 J/mm), aumenta-se a deformação inerente (efeitos compressivos de -0,31 para -0,51 mm).

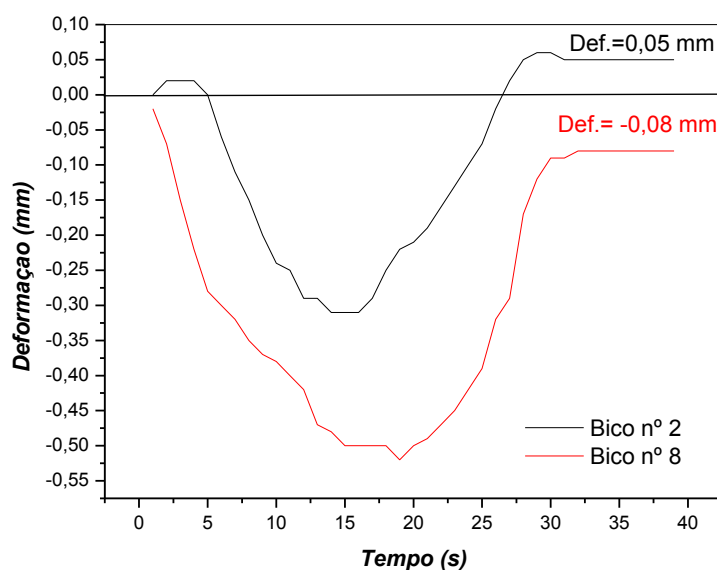
Já as deformações residuais têm a tendências de serem compressivas (Valores negativos).

4.4.5 Análise das deformações, sem resfriamento, na chapa de 12,70 mm.

A Figura 83 mostra a comparação das linhas de calor, entre o transiente das deformações dos bicos de números 2 e de 8, com a velocidade constante de 5,3 mm/s. Observa-se que:

- 1) O tempo da deflexão, obviamente, é o mesmo 30 s; pois, as condições estão na mesma velocidade.
- 2) As forças compressivas provocam deformações descendentes de -0,30 mm para o bico número 2 e -0,50 para o bico número 8, pois os aportes térmicos são diferentes.
- 3) O aporte térmico aplicado no bico número 2, de 2.976,0 J/cm é menor que o aplicado no bico número 8, de 7.140,2 J/cm, com isso as deformações são maiores no bico numero 8.

Figura 83 – Comparação das transientes de linhas de calor do bico nº 2 e 8, na velocidade de 5,3 mm/s



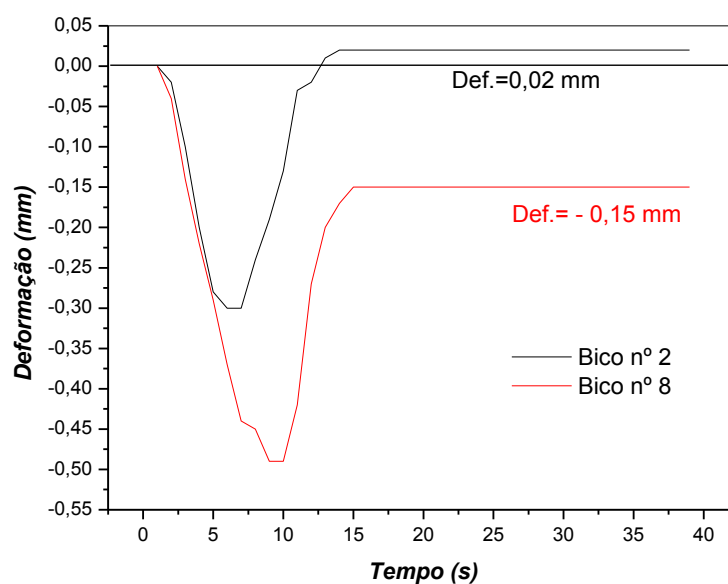
Fonte (Autor, 2015)

- 4) As deformações residuais dos bicos números 2 e 8 são 0,05 mm e -0,08 mm, respectivamente.
- 5) As temperaturas medidas pelo sistema de termopar são 740,0 °C e 971,0 °C, para os bicos de número 2 e 8, respectivamente.
- 6) As tensões térmicas do bico número 8 são maiores que a do bico número 2, (assunto a ser tratado mais adiante).
- 7) As diferenças totais da deflexão, parte elástica e plástica são 0,36 mm e 0,44 mm para os bicos de número 2 e 8 respectivamente.
- 8) Estimativas das tensões de escoamento, expressa na Tabela 3, podem ser avaliadas, no bico número 2, na temperatura de 740,0 °C, é de 180,09 MPa e para o bico número 8, na temperatura de 971,0 °C, é de 142,3 MPa.

Agora, na Figura 84 mostra a comparação das linhas de calor, entre o transiente das deformações dos bicos de números 2 e de 8, com a velocidade constante de 13,4 mm/s. Observa-se que:

- 1) O tempo da deflexão, obviamente, é o mesmo 13 s; pois, são da mesma velocidade.

Figura 84 - Comparação das transientes de linhas de calor do bico nº 2 e 8, na velocidade de 13,4 mm/s



Fonte (Autor, 2015)

- 2) As forças compressivas provocam deformações descendentes de -0,30 mm para o bico número 2 e -0,50 mm para o bico número 8;
- 3) O aporte térmico aplicado no bico número 2, de 1.076,3 J/cm é menor que o aplicado no bico número 8, de 2.876,2 J/cm.
- 4) As deformações residuais dos bicos números 2 e 8 são 0,02 mm e -0,15 mm, respectivamente.
- 5) As temperaturas medidas pelo sistema de termopar são 334,0 °C e 538,0 °C, para os bicos de número 2 e 8, respectivamente.
- 6) As tensões térmicas do bico número 8 são maiores que a do bico número 2, (assunto a ser tratado mais adiante).
- 7) As diferenças totais da deflexão, parte elástica e plástica são 0,32 mm e 0,35 mm para os bicos de número 2 e 8 respectivamente.
- 8) Estimativas das tensões de escoamento, expressa na Tabela 3, podem ser avaliadas, no bico número 2, na temperatura de 334,0 °C, é de 248,0 MPa e para o bico número 8, na temperatura de 538,0 °C, é de 223,4 MPa.

4.5 SOLDAGEM: SOLDA EM ÂNGULO E EM CORDÃO DE SOLDA.

(Resultado do grupo 2, item 2.1, conforme Figura 26)

4.5.1 Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros elétricos e aportes térmicos do cordão de solda, em função da espessura das amostras são mostrados na Tabela 25. Enquanto que, na Tabela 26 são mostrados os parâmetros do Filete (solda em ângulo).

Tabela 25- Dado das características do cordão de solda

<i>Espessura</i> (mm)	<i>Tensão</i> (V)	<i>Corrente</i> (A)	<i>Potencia</i> (W)	<i>Aporte</i> (J/mm)	<i>Aporte</i> (J/cm)
7,93	19,6	160,0	3.136,00	186,7	1866,7
9,50	19,6	156,0	3.057,60	182,0	1820,0
12,70	19,2	164,0	3.148,80	187,4	1874,3
15,88	20,4	128,0	2.611,20	155,4	1554,3
19,05	19,2	192,0	3.744,00	219,4	2194,3

Fonte: (Autor, 2015)

Tabela 26 - Dado das características do filete (solda em ângulo).

<i>Espessura</i> (mm)	<i>Tensão</i> (V)	<i>Corrente</i> (A)	<i>Potencia</i> (W)	<i>Velocidade</i> (cm/s)	<i>Aporte</i> (J/cm)
7,93 (Filete externo)	19,6	145	2.842,00	0,227	10.641,85
7,93 (Filete interno)	19,6	140	2.744,00	0,400	5.831,00
12,70 (Filete externo)	19,2	152	2.918,40	0,243	10.208,39
12,70 (Filete interno)	20,4	128	2.611,20	0,227	9.777,62
15,88 (Filete externo)	19,2	144	2.764,80	0,280	8.393,14
15,88 (Filete interno)	19,6	140	2.744,00	0,385	6.085,18
19,05 (Filete externo)	19,6	136	2.665,60	0,303	7.477,75
19,05 (Filete interno)	20,0	132	2.640,00	0,380	5.905,23

Fonte: (Autor, 2015)

4.5.2 Resultado das deformações dos cordões de solda.

O desenvolvimento dos experimentos com os cordões de solda foi motivado pela semelhança com o processo de linhas de calor, quanto às deflexões, às deformações inerentes e às deformações residuais.

Na soldagem, quando a espessura da chapa decresce a tensão residual, nas áreas próxima da zona de fusão, aumenta provocando distorções angulares, transversais e longitudinais, segundo afirma (ARRIGA, 2009).

Nos experimentos utilizou-se cordão de solda nas amostras de chapa, de 7,93 mm; 9,50 mm; 12,70 mm; 15,88 mm e 19,05 mm, pelo processo GMAW (Arame Sólido) automático, para medir as deflexões, em função do tempo, seguindo as mesmas características dimensionais utilizadas para a linha de calor.

As deformações inerentes e as deformações residuais estão representadas na Figura 85. As deflexões na soldagem é um comportamento em movimento elástico da chapa na extremidade em descendente e ascendente. A deformação inerente ocorre quando a deflexão atinge o menor estágio na fase elástica, enquanto a deformação residual ocorre na fase plástica, permanente.

Os valores dessas deformações inerentes à soldagem influem de modo inversamente proporcional nas deformações residuais finais, sendo que todas em função da espessura de chapa.

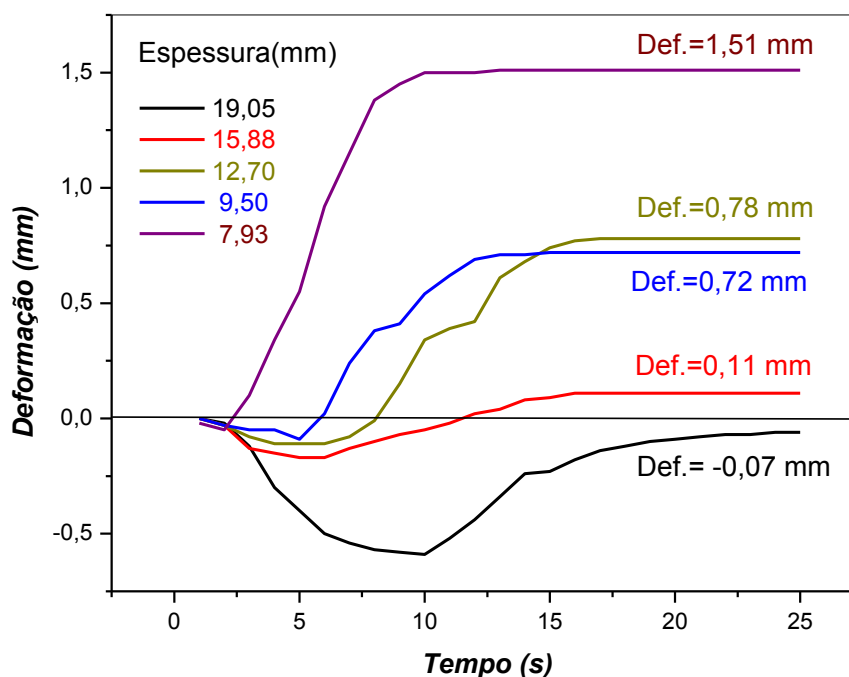
A distorção angular (Ângulo em radianos, que pode se convertido trigonometricamente em deformações residuais) é segundo (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982) gerada pela diferença de temperatura entre as faces superior e inferior da chapa, que provocam variações nos níveis de contração no sentido da espessura da chapa.

(OKUMURA e TANIGUCHI, 1982), também, afirma que a temperatura máxima atingida numa condição de soldagem, (similares aos nossos experimentos de soldagem), com uma tensão de 28 V e 170 A, na velocidade de soldagem 15 cm/mim (0,25 cm/s), atinge uma temperatura superior a 1400°C.

Portanto, o tempo de resfriamento de 800°C a 500°C chega a 7,0 s, enquanto o resfriamento de 800°C a 300°C atinge 20,0 s.

Estudos experimentais realizados por (OKUMOTO, MASANORI e HIDEKAZU, 2011) afirma que, mesmo com um excelente controle da sequência de soldagem, necessita-se do uso da linha de calor para correções das deformações.

Figura 85 – Transiente da soldagem. (Cordão de solda).



Fonte: (Autor, 2015)

Observa-se na Tabela 27 que, no caso da amostra de chapa fina, espessura de 7,93 mm a deformação residual é de 1,51 mm, enquanto que na espessura da chapa de 19,05 mm teve uma deformação residual de -0,07 mm, isto, deve-se a restrições impostas pelo próprio metal de base.

O aporte térmico das soldagens (Cordões de solda), em nossos experimentos apresentou uma média de $1.861 \pm 652,64$ J/cm, observa-se que, com o aumento da espessura da amostra da chapa as intensidades das deformações residuais diminuíram.

As forças compressivas atuantes na soldagem provocam deformações inerente negativas crescente (apenas para as grandes espessuras) e a medida que aumenta-se a espessura da chapa, fato observado na espessura de 7,93 mm uma deformação inerente de -0,02 mm, enquanto que na espessura de 19,05 mm, tem-se um valor de -0,59 mm.

Então, deduz-se que, as deformações inerentes são inversamente proporcionais as deformações residuais. Também, as deformações inerentes crescem à medida que se aumenta a espessura da chapa.

Tabela 27 – Resultado das deformações Inerente e residual do cordão de solda.

<i>Espessura de Chapa</i>	<i>Deformação inerente (mm)</i>	<i>Deformação Residual (mm)</i>
7,93 mm	- 0, 02	1,51
9,50 mm	- 0,09	0,72
12,70 mm	- 0,13	0,78
15,88 mm	- 0,17	0,11
19,05 mm	- 0,52	- 0,07

Fonte (Autor, 2015)

Quando se compara as deformações residuais, numa soldagem (Cordão de solda), as deformações residuais produzidas por linhas de calor verifica-se que são menores.

Por exemplo, a deformação residual no cordão de solda, em uma chapa de 12,7 mm, foi de +0,78 mm, enquanto que, na linha de calor, sem resfriamento, utilizando um bico número 2, e velocidade de 5,3 mm/s, (Tabela 20), não ultrapassa a +0,05 mm.

Por outro lado, o fluxo térmico da soldagem (Cordão de solda) foi maior que mínimo obtido pela linha de calor. Por exemplo, na soldagem tipo cordão obteve-se o fluxo de 3.148,80 W, (Tabela 25), para a chapa 12,7 mm, enquanto que, o fluxo térmico da linha de calor, (Tabela 7) correspondente à deformação residual de 0,05 mm foi $1.475,45 \pm 250,56$ W.

A temperatura atingida, nestas condições, (Tabela 11), da linha de calor foi de 740,0 °C, acima da temperatura recomendada pelas normas das classificadoras.

Então, fica evidente que, a linha de calor, nesta condição, não atinge as deformações residuais necessárias, para correção em apenas uma aplicação. Faz-se necessário, um estudo aprofundado da correlação entre os resultados dos fluxos térmicos das soldagens tipo cordão com as linhas de calor.

4.5.3 Resultado das Soldagens Filetes (soldas em ângulo).

Numa análise numérica computacional, (MICHALERIS e DEBICCARI, 1997) estimou que as distorções oriundas da soldagem, em ângulo, nos painéis navais, geravam forças proporcionais às dimensões da solda em ângulo, ao módulo de elasticidade, ao coeficiente de dilatação térmica e as variações de temperatura.

A teoria termo elástico plástico foi simulada por (WANG, RASHED e MURAKAWA, 2011), para aplicações em soldagem, através da análise numérica (FEM), utilizando o comportamento das distorções oriundas do processo de soldagem em ângulo.

Em nossos experimentos pode-se observar que as distorções devidas as soldagens em ângulo são inversamente proporcionais as espessuras das chapas, para valores com aporte térmicos próximos.

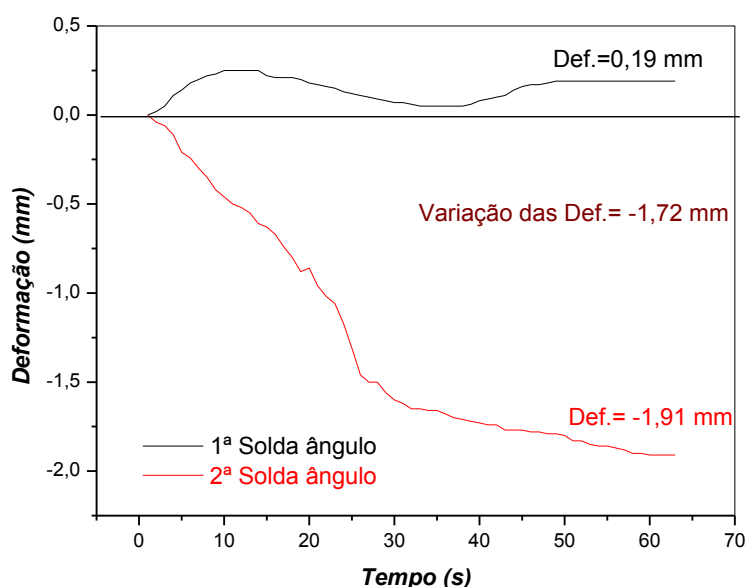
As soldas em ângulo foram realizadas, na superfície inferior das amostras de chapas, com espessuras de 7,93 mm; 12,70 mm; 15,88 mm e 19,05 mm, em dois estágios.

Primeiramente com um filete externo e logo após um filete interno, seguindo a especificação do procedimento de soldagem, anteriormente apresentado, que tiveram como resultados.

No gráfico da Figura 86, o transiente da soldagem, na espessura de 7,93 mm, no gráfico da Figura 87, o transiente da soldagem, na espessura de 12,70 mm,

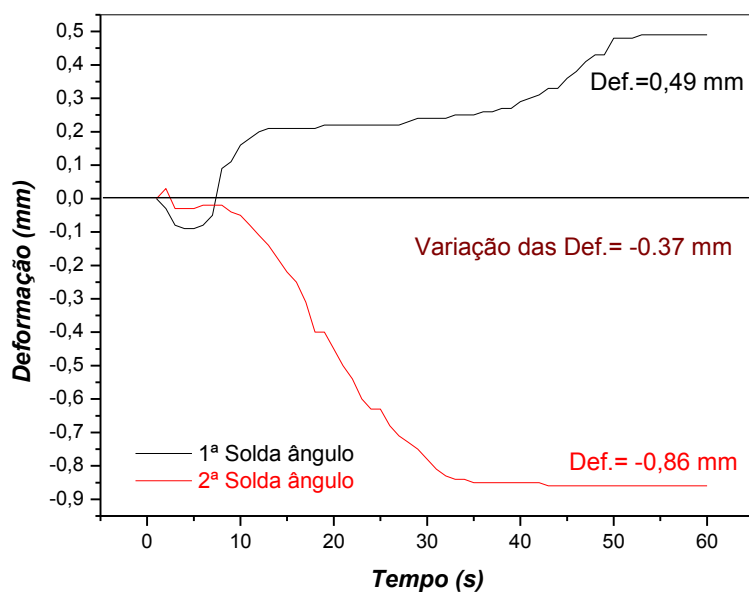
No gráfico da Figura 88, o transiente da soldagem, na espessura de 15,88 mm, e no gráfico da Figura 89, o transiente da soldagem, na espessura de 19,05 mm.

Figura 86 – Transiente da soldagem em ângulo, na espessura de 7,93 mm.



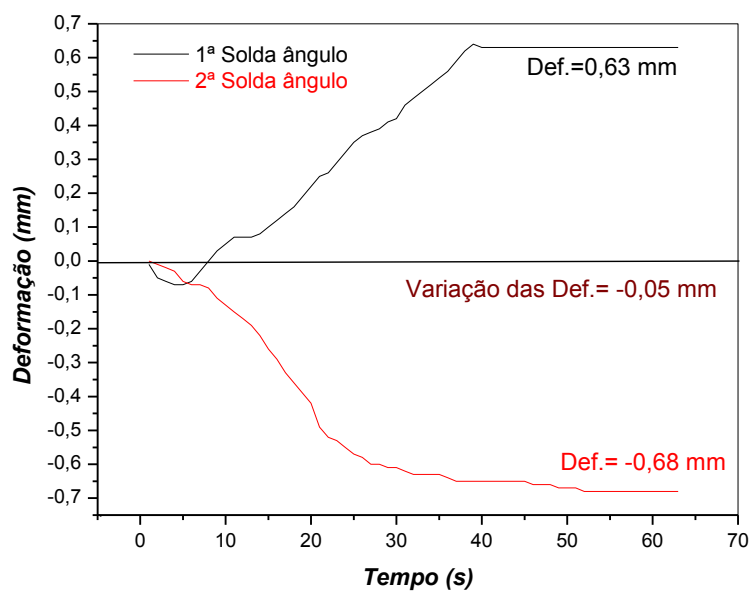
Fonte: (Autor, 2014)

Figura 87 - Transiente da soldagem em ângulo, na espessura de 12,70 mm.



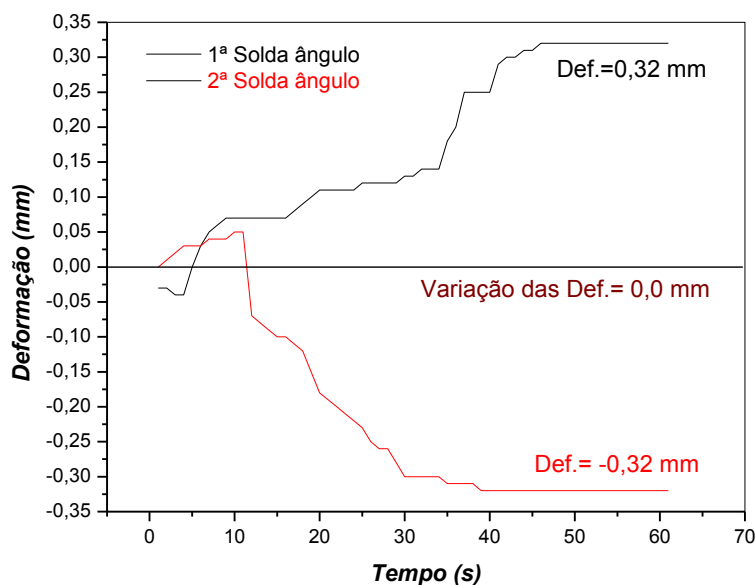
Fonte: (Autor, 2015)

Figura 88 - Transiente da soldagem em ângulo, na espessura de 15,88 mm.



Fonte: (Autor, 2015)

Figura 89 - Transiente da soldagem em ângulo, na espessura de 19,05 mm.



Fonte: (Autor, 2015)

Observa-se que, na soldagem dos filetes externos a deformação teve uma tendência de valores positivos, em relação à superfície inicial da chapa, conforme Tabela 28, enquanto que na soldagem dos filetes externos a tendência a valores negativos. A diferença entre os valores positivos e negativos representa a deformação residual.

Tabela 28 – Resultado das deformações Inerente e residual da soldagem tipo ângulo

<i>Espessura da Chapa (mm)</i>	<i>1º Filete Deformação (mm)</i>	<i>2º Filete Deformação (mm)</i>	<i>Diferença da deformação entre o 1º e 2º filete (mm)</i>
7,93	+0,49	-1,91	-1,72
12,70	+0,49	-0,86	-0,37
15,88	+0,63	-0,68	-0,05
19,05	+0,32	-0,32	0,0

Fonte: (Autor, 2015)

O aporte térmico das soldagens em ângulo apresentou uma média de 8.040,02 $\pm$ 4.874,45 J/cm, observa-se que, com o aumento da espessura da amostra da chapa as intensidades das deformações residuais diminuíram.

Então, deduz-se que, as deformações residuais, na soldagem em ângulo são inversamente proporcionais as espessuras da chapa.

Quando se compara as deformações residuais, por soldagem em ângulo, com as deformações obtidas pelas linhas de calor, verifica-se que são menores.

Por exemplo, a diferença da deformação residual, entre os dois filetes, na chapa de 12,7 mm, foi de -0,37 mm, enquanto que, para a linha de calor, sem resfriamento, não ultrapassou a +0,05 mm.

Por outro lado, o aporte térmico da soldagem em ângulo foi maior que o máximo obtido pela linha de calor.

Por exemplo, na soldagem em ângulo, para a chapa de 12,7 mm, no primeiro filete, obteve-se o aporte de 10.208,39 J/cm, enquanto que, no segundo filete, o aporte foi de 9.777,62 J/cm.

O máximo aporte das linhas de calor (Bico nº 8 e velocidade de 5,3 mm/s, correspondente a deformação residual de - 0,08 mm) foi 7.140,2 J/cm.

Faz-se necessário, um estudo aprofundado da correlação entre os resultados das soldagens em ângulo e em cordão de solda, com as linhas de calor.

No entanto foi observado que a condição de soldagem (Cordão de solda) teve condições oposta a da soldagem em filete (solda em ângulo).

(OKUMURA e TANIGUCHI, 1982), afirma que, nos processos de fabricação de navios é imperativa a redução das distorções devido à soldagem, pois a sua remoção geralmente é onerosa, aloca mão de obra e desperdiça tempo nas operações.

Recomenda vários métodos de remoção das distorções, inclusive a utilização da linha de calor para desempenho, principalmente as oriundas das juntas soldadas em ângulo.

(WANG, RASHED e MURAKAWA, 2011), também, recomenda a linha de calor para remoção das distorções.

4.5.3 Correções das deformações por soldagem

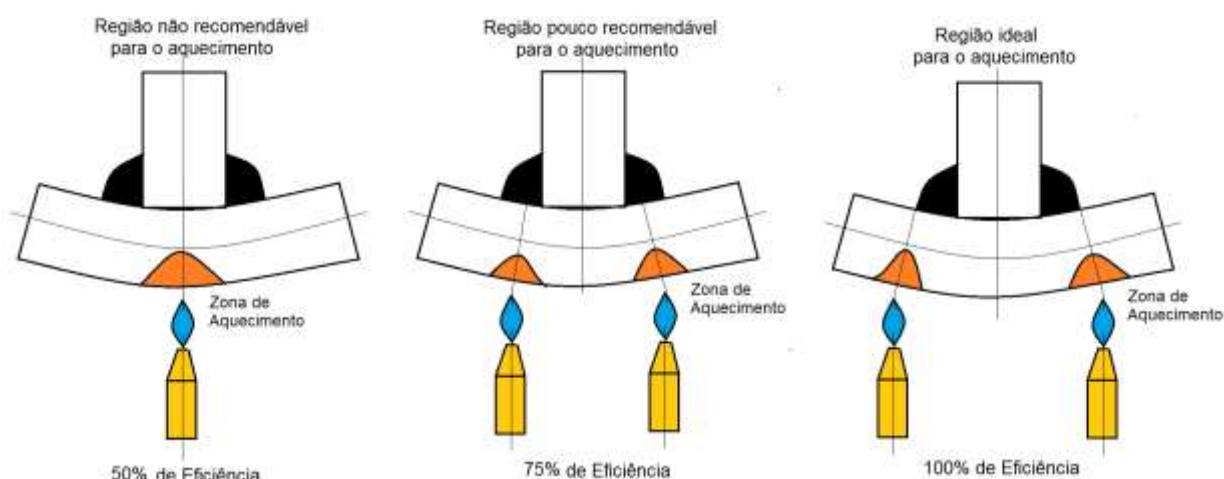
(Resultado do grupo 2, item 2.2, conforme Figura 26)

Foi utilizado o método de correção das deformações oriundas da soldagem baseado no catalogo técnico (HARRIS, 2000), que apresenta diversos métodos de aplicação de linhas de calor para correções de deformações oriundas de soldagem.

O método operacional clássico consiste em aplicar as linhas de calor no lado oposto à soldagem, para obter a contra deformação, mas, faz-se necessário determinar o posicionamento e o caminho da aplicação.

As três regiões com possibilidades de aplicar a linha de calor, especialmente para correções das deformações oriundas da soldagem em ângulo é explanada por (PINTO, 1990), conforme Figura 90. A região ideal, com uma eficiência de 100%, é no lado oposto, a uma distância do eixo da viga correspondendo à metade da espessura da alma, adicionado uma perna da solda filete.

Figura 90 – Região geométrica para aplicação linhas de calor para correção



Fonte: (PINTO, 1990) Adaptado pelo autor (2016).

Os experimentos de conformação de chapas do tipo sela foram realizados por (JANG, MOON e KO, 2000), que utilizou a simulação numérica da teoria termo elástica plástica, onde se verificou a necessidade de um grande número de aplicações de linha de calor, tanto na parte superior como na parte inferior, com vários tombamentos para obter a curvatura pretendida.

4.5.3.1 Estimativa para Correções das deformações por soldagem por Ângulo.

(Resultado do grupo 2, item 2.2, subitem 2.2.1, conforme Figura 26)

Nesta questão, abordaremos o aspecto dimensional, onde, uma chapa foi soldada em ângulo sofreu deformações residuais, conforme Tabela 29. Então, a aplicação da linha de calor será aplicada para recuperação destas deformações.

Tabela 29 – Estimativa para correção das deformações.

<i>Espessura Chapa (mm)</i>	<i>Diferença residual (mm)</i>	<i>Aplicação das linhas de calor para correção das deformações por <u>solda</u> <u>em Ângulo</u>.</i>	<i>Estimativa das deformações residuais (mm)</i>
7,93	-1,72	Bico 2, chapa 9,5 mm, Sem resfriamento, com velocidade de 5,3 mm/s, (+0,10 mm), 18 linhas de calor.	$18 \times (+0,10) = +1,80$
12,70	-0,37	Bico 2, chapa 12,7 mm, Sem resfriamento, com velocidade de 5,3 mm/s, (+0,05 mm), 08 linhas de calor.	$08 \times (+0,05) = +0,40$
15,88	-0,05	Bico 2, chapa 15,88 mm, Sem resfriamento, com velocidade de 5,3 mm/s, (+0,03 mm), 01 linhas de calor.	$01 \times 0,03 = + 0,03$
19,05	0,0	Bico 2, chapa 19,05 mm, Sem resfriamento, com velocidade de 5,3 mm/s, (0,00 mm) nenhuma linhas de calor.	$0 \times 0,00 = 0,00$

Fonte: (Autor, 2016)

4.5.3.2 Experimentos realizados para correções por soldagem em Ângulo.

(Resultado do grupo 2, item 2.2, Subitem 2.2.2, conforme Figura 26)

Foi comprovado por (CHIRILLO, 1982), em experimentos que a superposição, na condição de defasagem das linhas de calor, não gera adversidades nas propriedades mecânicas do material, ao invés disso, normalmente acarreta uma melhora. Por outro lado, o efeito do dobramento tem apreciáveis reduções em relação à primeira linha de calor.

Nas Tabela 30 até a Tabela 33 mostram as condições e o número de aplicação da linha de calor para recuperação das deformações.

Tabela 30 – Experimentos de aplicação da linha de calor na chapa 7,93 mm

<i>Espessura</i>	<i>Diferença</i>	<i>Aplicação das linhas de calor para</i>	<i>Deformações residuais</i>
<i>Chapa</i>	<i>residual</i>	<i>correção das deformações</i>	<i>dos experimentos</i>
<i>(mm)</i>	<i>(mm)</i>	<i>por <u>solda em Ângulo</u>.</i>	<i>realizados (mm)</i>
7,93	-1,72	Bico nº 2, chapa 9,5 mm, Sem resfriamento, com velocidade de 5,3 mm/s, (+0,10 mm), 18 linhas de calor.	1º Passe (+0,07)
			2º Passe (+0,05)
			3º Passe (+0,03)
			4º Passe (+0,12)
			5º Passe (+0,08)
			6º Passe (+0,12)
			7º Passe (+0,05)
			8º Passe (+0,06)
			9º Passe (+0,06)
			10º Passe (+0,08)
			11º Passe (+0,15)
			12º Passe (+0,08)
			13º Passe (+0,12)
			14º Passe (+0,08)
			15º Passe (+0,10)
			16º Passe (+0,09)
			17º Passe (+0,10)
			18º Passe (+0,08)
			19º Passe (+0,05)
			20º Passe (+0,03)
			21º Passe (+0,08)

Fonte: (Autor, 2016)

Tabela 31 - Experimentos de aplicação da linha de calor na chapa 12,70 mm

<i>Espessura</i>	<i>Diferença</i>	<i>Aplicação das linhas de calor</i>	<i>Deformações residuais</i>
<i>Chapa</i>	<i>residual</i>	<i>para correção das deformações</i>	<i>dos experimentos</i>
<i>(mm)</i>	<i>(mm)</i>	<i>por <u>solda em Ângulo.</u></i>	<i>realizados (mm)</i>
12,70	-0,37	Bico nº 2, chapa 12,70 mm, Sem resfriamento, com velocidade de 5,3 mm/s, (+0,05 mm), 08 linhas de calor.	1º Passe (+0,04)
			2º Passe (+0,05)
			3º Passe (+0,05)
			4º Passe (+0,05)
			5º Passe (+0,08)
			6º Passe (+0,03)
			7º Passe (+0,05)
			8º Passe (+0,08)
			9º Passe (+0,08)
			Total = + 0,46

Fonte: (Autor, 2016)

Tabela 32 - Experimentos de aplicação da linha de calor na chapa 15,88 mm

<i>Espessura Chapa (mm)</i>	<i>Diferença residual (mm)</i>	<i>Aplicação das linhas de calor para correção das deformações por <u>solda em Ângulo.</u></i>	<i>Deformações residuais dos experimentos realizados (mm)</i>
15,88	-0,05	Bico nº 2, chapa 15,88 mm, Sem resfriamento, com velocidade de 5,3 mm/s, (+0,03 mm), 01 linhas de calor.	1º Passe (+0,05)
			2º Passe (+0,05)
			Total = + 0,10

Fonte: (Autor, 2016)

Um algoritmo de cálculo para determinação dos parâmetros operacionais da linha de calor foi realizado por (MACHADO e OLIVEIRA, 2007), onde mostra que o ângulo de deformação é diretamente proporcional ao quadrado da vazão de gás e inversamente proporcional ao quadrado da velocidade de deslocamento, ao cubo da espessura da chapa e a distância de aplicação.

Tabela 33 - Experimentos de aplicação da linha de calor na chapa 19,05 mm

<i>Espessura Chapa (mm)</i>	<i>Diferença residual (mm)</i>	<i>Aplicação das linhas de calor para correção das deformações por <u>solda em Ângulo</u>.</i>	<i>Deformações residuais dos experimentos realizados (mm)</i>
19,05	0,0	Bico nº 2, chapa 19,05 mm, Sem resfriamento, com velocidade de 5,3 mm/s, (0,00 mm) nenhuma linhas de calor.	0 x 0,00 = 0,00

Fonte: (Autor, 2016)

Nota-se claramente que as chapa finas exigem um maior número de aplicação de linhas de calor

Afirma (DIMAS, GORDO e SOARES, 2006) que, existem vários métodos que permitem efetuar o levantamento das deformações de casco de navios, de painéis, de anteparas de grandes dimensões, em locais de difícil acesso.

Um método econômico é o da fotografia digital, com precisão de centésimo de milímetros, embora seja ainda incipiente nos estaleiros, pode detectar as deformações.

4.5.3.3 *Medições na Maquinas de Medições de Coordenadas(MMC).*

(Resultado do grupo 2, item 2.2, Subitem 2.2.3, conforme Figura 26)

Neste momento de nossa verificação, pretende-se perceber através da MMC (maquina de medições por coordenadas), as condições iniciais e finais das correções das deformações das soldagens, através da utilização da linha de calor.

Inicialmente, as amostras de chapas, no estado natural foram medidas, na maquina de medição por coordenadas, depois após a soldagem e finalmente após a aplicação da linha de calor, conforme Figura 91.

Foi mostrado por (TUBINO, 2013) que a carta de controle é simplesmente um gráfico de acompanhamento com uma linha superior e uma linha inferior em cada lado da linha média do processo, sendo fundamental para detectar as imprecisões do processo.

Figura 91- Medição na MMC das amostras de chapas após a linha de calor



Fonte: (autor, 2016)

Na série de gráficos da Figura 92 até o gráfico da Figura 95 mostra-se o comportamento dos perfis transversais iniciais, dos perfis transversais à soldagem e os perfis transversais à linha de calor, para as chapas de 7,90 mm; 12,70 mm; 15,88 mm e 19,05 mm, medidos na (MMC), máquina de medição por coordenadas.

Neste ponto, podem-se verificar os resultados das deformações obtidas pela condição inicial após o corte da chapa pelo processo oxiacetilenico, as deformações após a soldagem do processo GMAW, em ângulos dos filetes externo e interno e da recuperação das deformações da soldagem após aplicação da linha de calor. .

Por exemplo, na chapa de espessura de 7,93 mm apresentou uma variação próxima da média, significando uma planeza, com um leve abaulamento, que projetou pouca inclinação em relação à mesa de referência, apesar de ter a superfície parcialmente aplainada por usinagem.

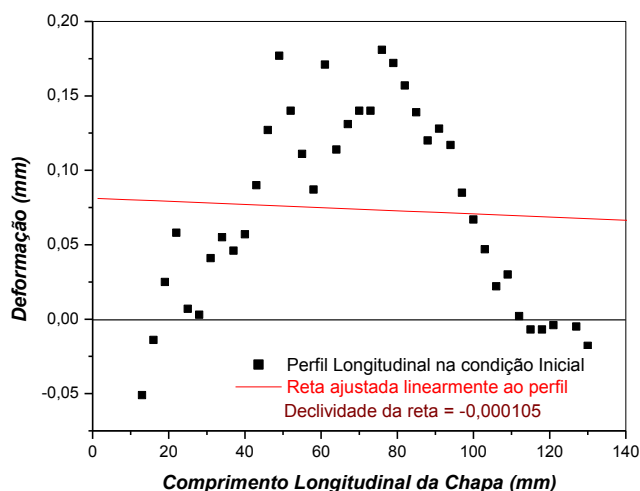
Quando esta chapa de espessura de 7,93 mm foi medida novamente na MMC, após a soldagem, o abaulamento foi acentuado devido às deformações oriundas do processo de soldagem. A inclinação em relação à mesa de referência aumentou, mostrando uma significativa variação das deformações devida às soldagens em ângulo.

Finalmente, a medição na MMC, após aplicação de várias linhas de calor, para correção a chapa de 7,93 mm apresentou uma inclinação oposta da soldagem.

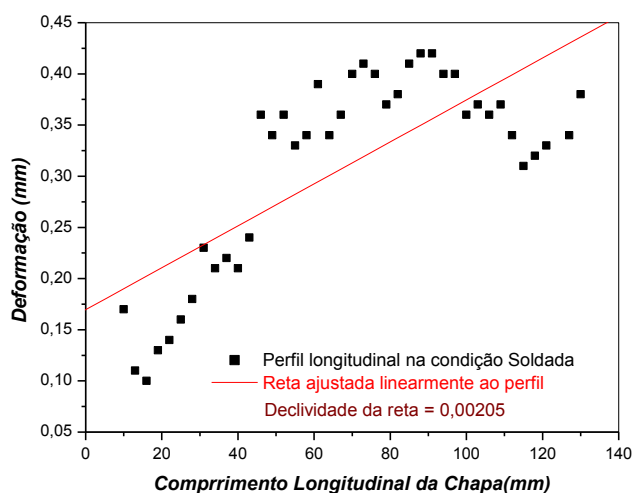
Nesta sistemática, observou-se que as correções dependem das condições iniciais das chapas. O processo de soldagem alterou o perfil da chapa inicial, contribuiu para acentuar as irregularidades iniciais e a linha de calor manteve as irregularidades, mas provocou uma mudança de inclinação aproximando da horizontal.

Também, mostra que a sistemática acima adotada, foi capaz de verificar as deformações obtidas pelos processos aplicados. Porque na MMC foram gerados planos a partir da superfície das chapas.

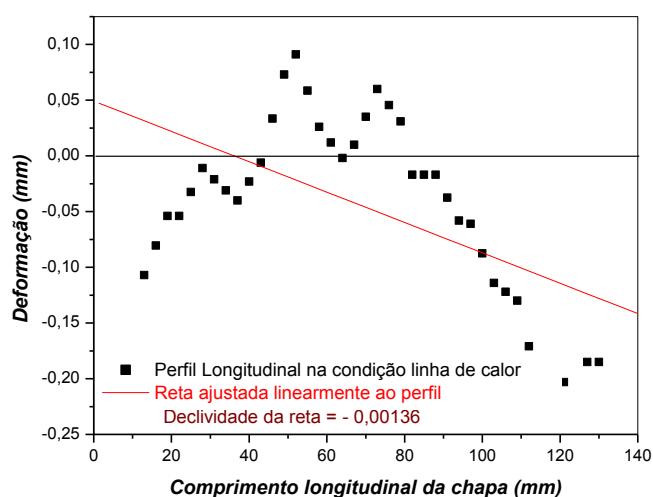
Figura 92 – Perfil das chapas de 7,93 mm, na condição inicial, soldada e após linha de calor.



(A) Condição Inicial

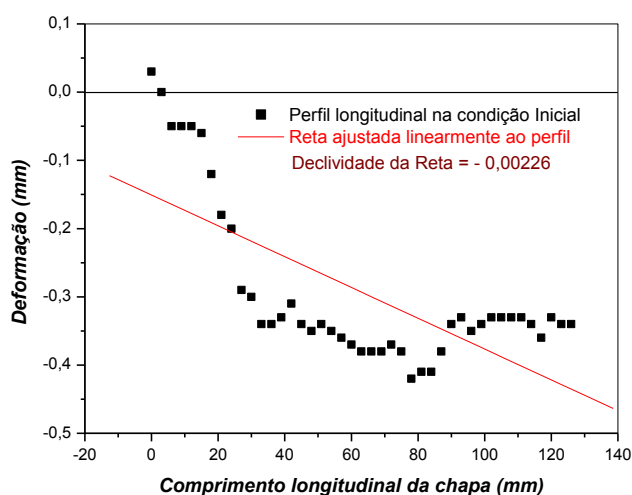


(B) Condição soldada

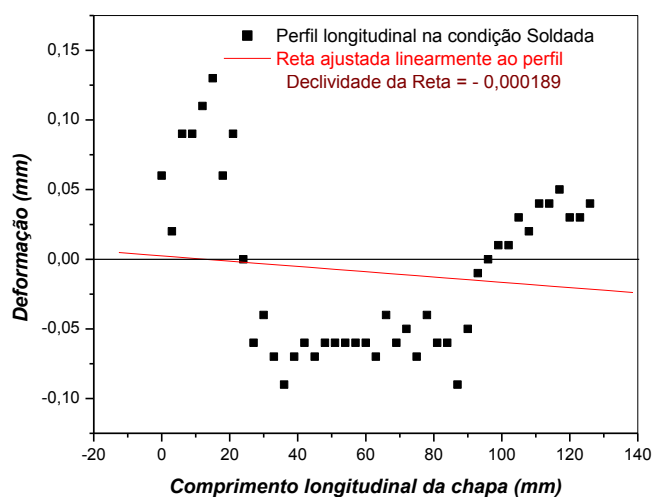


(C) Condição após a linha de calor

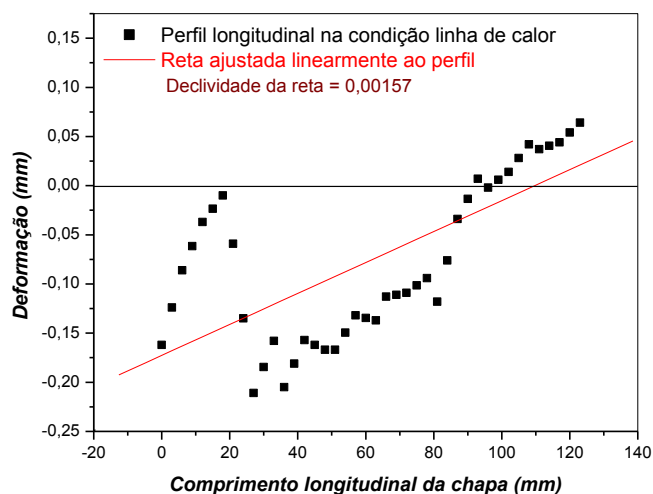
Figura 93 - Perfil das chapas de 12,70 mm, na condição inicial, soldada e após linha de calor.



(A) Condição Inicial

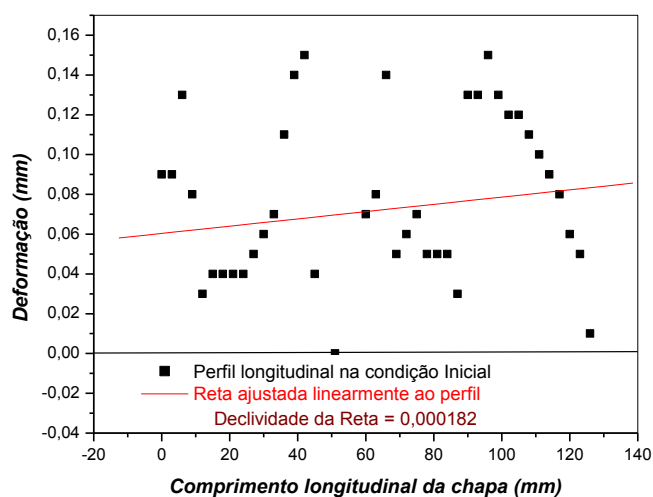


(B) Condição Soldada

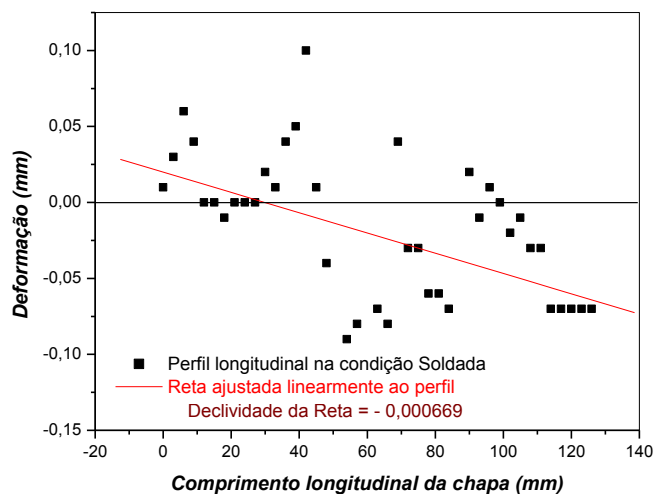


(C) Condição após a linha de calor

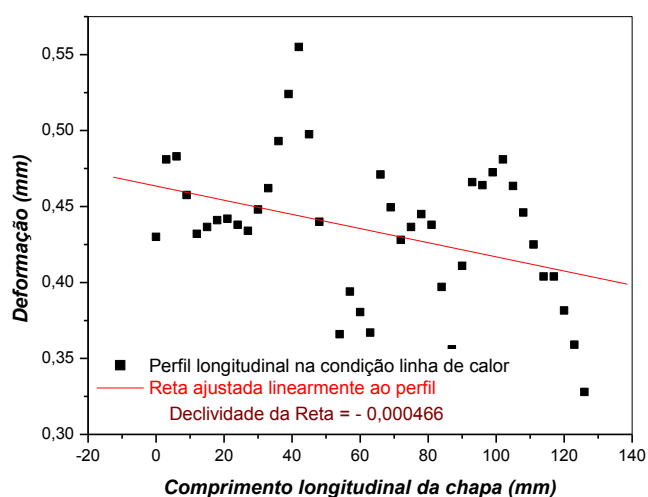
Figura 94 - Perfil das chapas de 15,88 mm, na condição inicial, soldada e após linha de calor.



(A) Condição Inicial

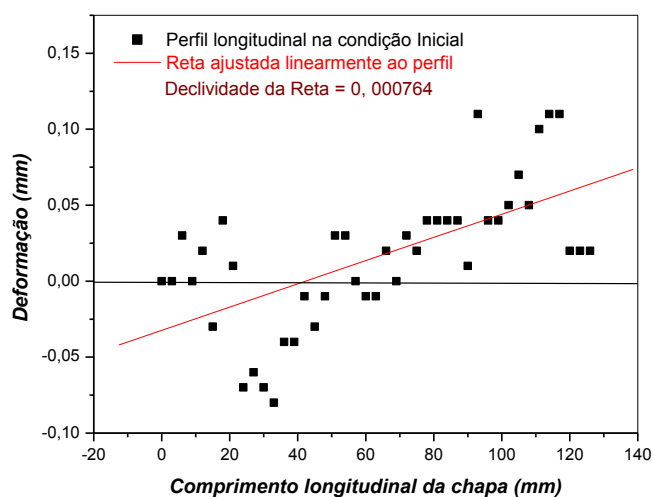


(B) Condição Soldada

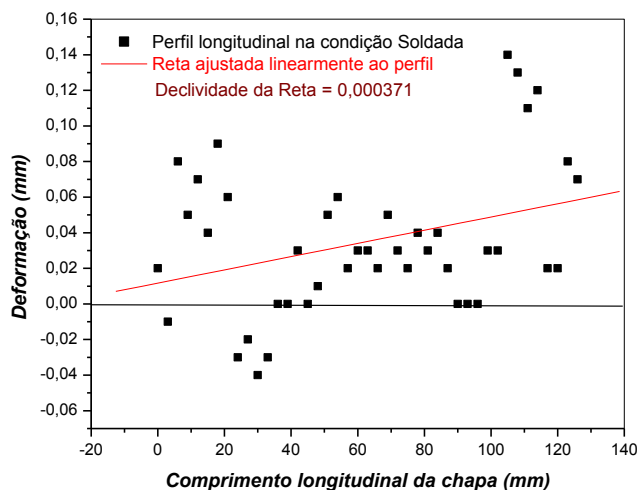


(C) Condição após a linha de calor

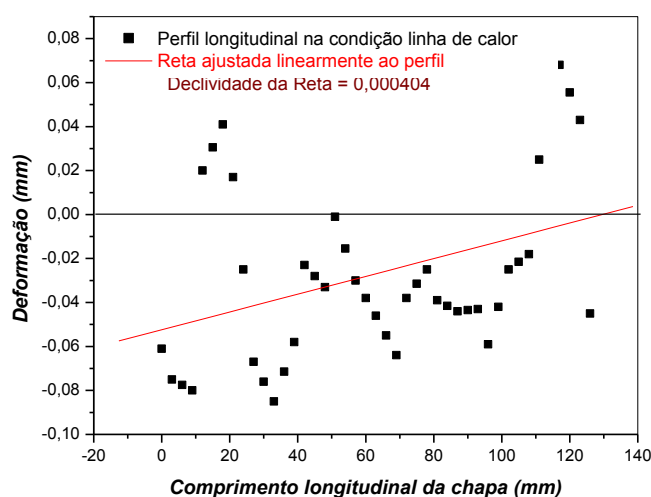
Figura 95 - Perfil das chapas de 19,05 mm, na condição inicial, soldada e após linha de calor.



(A) Condição Inicial



(B) Condição Soldada



(C) Condição após a linha de calor

Na Tabela 34 mostra as declividades encontradas como resultado da interpolação linear dos pontos do perfil da chapa. Enquanto que, a Tabela 35 mostra as mesmas declividades em graus.

Tabela 34- Medições da declividade da reta em (Radianos).

<i>Espessura (mm)</i>	<i>Condição Inicial</i>	<i>Diferença Condição inicial e soldagem</i>	<i>Condição Soldagem</i>	<i>Diferença Condição Soldagem e linha de calor</i>	<i>Condição linha de calor</i>
7,93	-0,000105	-0,002155	0,002050	0,003410	-0,001360
12,7	-0,002260	-0,002071	-0,000189	-0,000346	0,000157
15,88	0,000182	0,000851	-0,000669	-0,000203	-0,000466
19,05	0,000764	0,000393	0,000371	-0,000033	0,000404

Fonte: (Autor, 2016)

Sabe-se que as deformações provocadas por soldagem em ângulo numa chapa fina são elevadas. Isto é, facilmente comprovado pela

Tabela 35, na espessura de chapa de 7,93 mm, pelo grau resultante da inclinação da reta negativa de (- 0,0123476), antes e após da soldagem.

Por outro lado, aplicamos 18 (dezoito) vezes à linha de calor, na chapa de 7,93 mm, para conseguirmos um grau de inclinação da reta de (0,195384) para correção de soldagem.

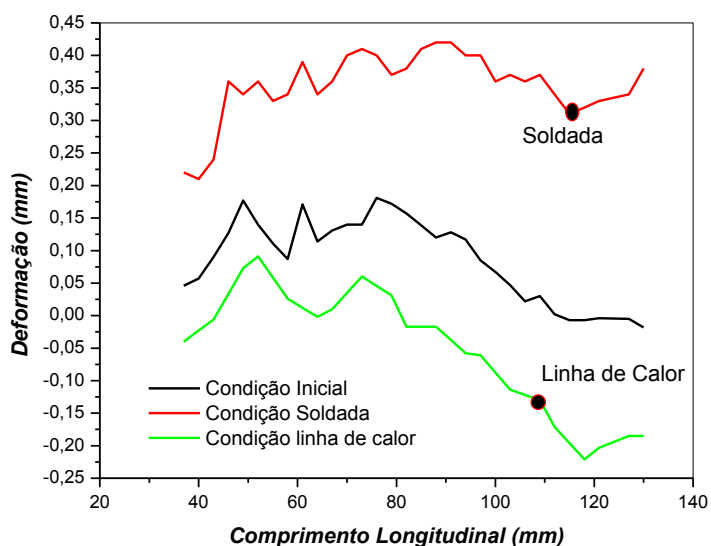
Tabela 35- Medições da declividade da reta (Graus).

<i>Espessura (mm)</i>	<i>Condição Inicial</i>	<i>Diferença Condição inicial e soldagem</i>	<i>Condição Soldagem</i>	<i>Diferença Condição Soldagem e linha de calor</i>	<i>Condição linha de calor</i>
7,93	-0,006016	-0,123476	0,117460	0,195384	-0,077925
12,7	-0,129492	-0,118663	-0,010829	-0,019825	0,008996
15,88	0,010428	0,048760	-0,038332	-0,011631	-0,026701
19,05	0,043775	0,022518	0,021257	-0,001891	0,023148

Fonte: (Autor, 2016)

Observa-se a mudança significativa do perfil entre a condição soldada e após a linha de calor, como mostrado na Figura 96.

Figura 96 – Mudança de perfil da chapa de 7,93 mm (Soldada e após a Linha de Calor)



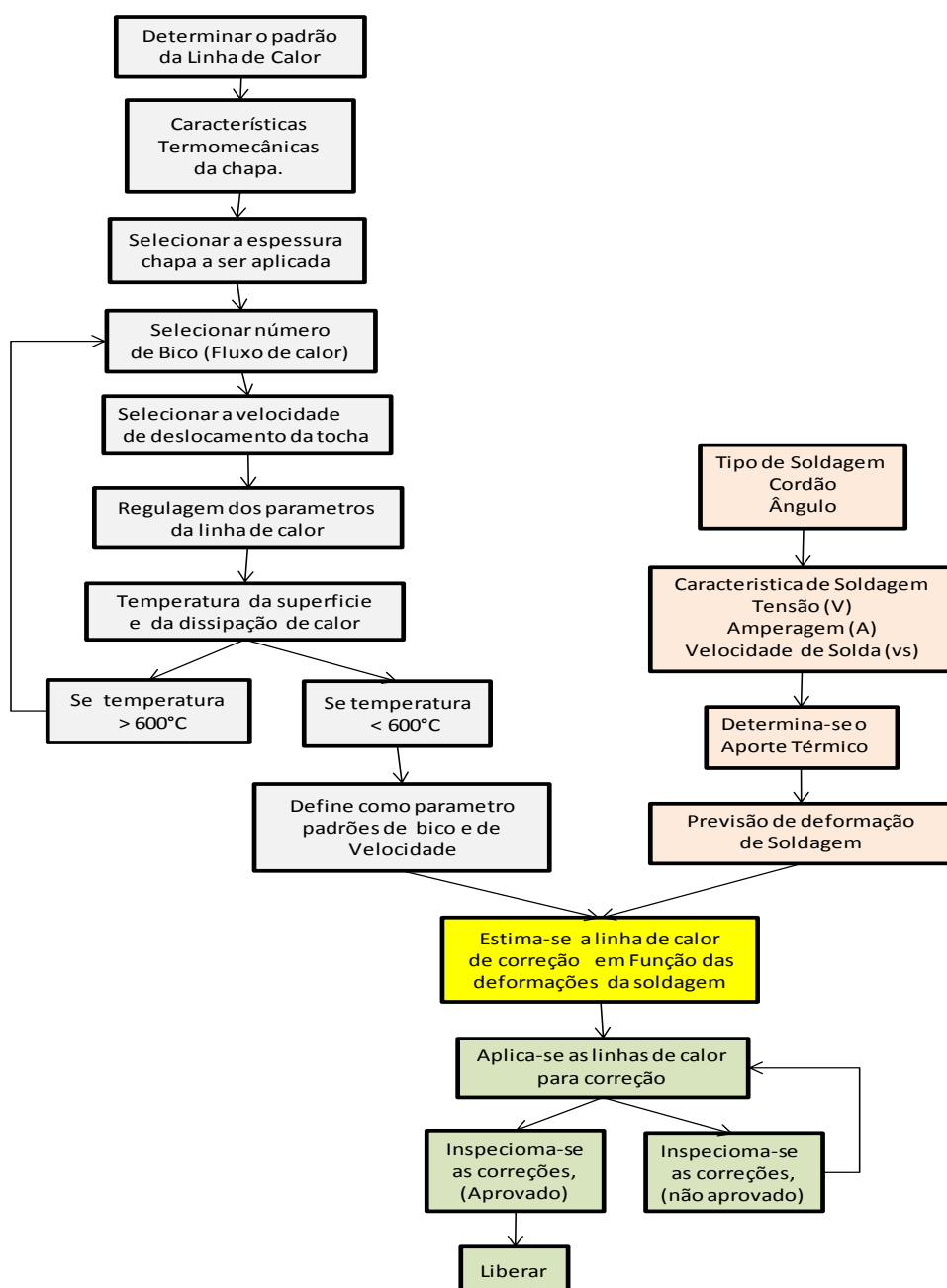
Fonte: (Autor, 2016)

4.5.3.4 Procedimento Operacional de Correção das Deformações.

(Resultado do grupo 2, item 2.3, conforme Figura 26)

Neste fluxograma do procedimento operacional, descrito na Figura 97, aborda uma sistemática de correção das deformações por soldagem, aliado a previsão dos padrões pré-definidos das linhas de calor.

Figura 97 – Fluxograma do procedimento operacional



Fonte: (Autor, 2016)

Os padrões definem a potência, função do fluxo térmico (número de bico), e também de regulação dos parâmetros, como altura da chama à chapa e velocidade de deslocamento da tocha, que caracterizam uma linha de calor, com estes conjuntos de dados.

No fluxograma, em destaque, existe um ponto de encontro, com as necessidades de correção dos processos de soldagem, as possibilidades de correção pelas linhas de calor e de análise e inspeção das correções.

Diante disso, os padrões das linhas de calor servem para auxiliar uma escolha rápida e eficiente de correção das deformações por soldagem. Pode-se servir de base para estudos analíticos, conforme descreve (YU, ANDERSON e MAEKAWA, 2001).

4.6 CÁLCULOS ANALÍTICOS

(Resultado do grupo 3, item 3.1, conforme Figura 26)

4.6.1 Cálculos Analíticos da linha de calor segundo (JANG, SEO e KO, 1997)

(Resultado do grupo 3, item 3.1, item 3.1.1, conforme Figura 26)

Destacamos que algumas das unidades utilizadas, neste tópico, não estão conforme o (SI) Sistema Internacional de medidas. Manteremos as unidades para não alterar as constantes das formulações da teoria de (JANG, SEO e KO, 1997).

Como expresse anteriormente, na revisão bibliográfica, a parte da análise térmica e dos cálculos analíticos seguem a sequência baseadas na tese de (JANG, SEO e KO, 1997) em:

- Indicação das dimensões da chapa;
- Dados operacionais do processo de linha de calor;
- Curva gaussiana do fluxo de calor;
- Distribuição da temperatura;
- Características termomecânicas da chapa;
- Identificação da geometria da região inerente;
- Identificação das deformações inerente;
- Identificação das deformações angulares;
- Identificação das cargas e momentos equivalentes.

4.6.1.3 Curva gaussiana do fluxo de calor

A curva gaussiana será dimensionada pela Tabela 36, baseada no gráfico da Figura 99.

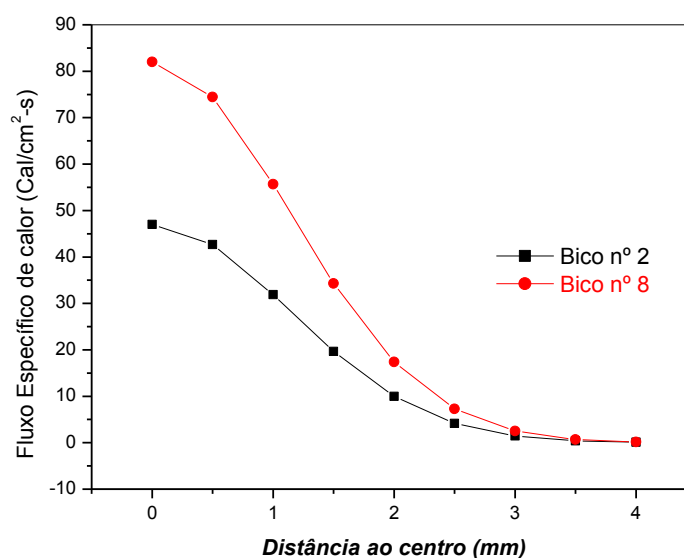
Tabela 36 – Distribuição Gaussiana

Nº Bico	$q_2(r) = q_{2m} \cdot e^{-kr^2}$
Bico 2	$352,97 \pm 75,86 \text{ Cal/s}$
Bico 8	$986,85 \pm 172,94 \text{ Cal/s}$

Fonte: (Autor, 2016)

Como o raio da parte aquecida é igual a 25 mm, então para o bico 2 teremos um rendimento de 72%, enquanto para o bico 8 teremos 44%, conforme mostra na Figura 99.

Figura 99 – Fluxo Específico de calor



Fonte: (Autor, 2016)

4.6.1.4 Distribuição da temperatura

Dados de entrada

T_0 – Temperatura Inicial = 30 °C;

λ – Condutividade térmica = 53 J/m.s.°C, para a temperatura de 30°C.
= 36,4 J/m.s.°C, para a temperatura de 500°C.

k – Difusibilidade térmica = 1,66x 10e(-5) m²s⁻¹, para a temperatura de 30°C.
= 6,56x 10e(-6) m²s⁻¹, para a temperatura de 500°C.

x – Distância na direção x = 50,0 mm;

y – Distância na direção y= 120,0 mm;

z – Distância na direção z= sentido da espessura da chapa = 2,0 mm;

w – Distância na direção x com velocidade da fonte V ($w = x - vt$)

Dados de saída

T – Temperatura [°C]; conforme a Tabela 37, a distribuição da temperatura segue o desenvolvimento de (JANG, SEO e KO, 1997)

Tabela 37 – Cálculo da temperatura de pico

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda} e^{-\left(\frac{v}{2k}\right)w} \left[\frac{e^{-\left(\frac{v}{2k}\right)R}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{e^{-\left(\frac{v}{2k}\right)R_n}}{R_n} + \frac{e^{-\left(\frac{v}{2k}\right)R'_n}}{R'_n} \right) \right]$$

Nº Bico	Velocidade	Temperatura Crítica
Bico 2	5,3 mm/s	738,18 °C
	13,4 mm/s	483,72 °C
Bico 8	5,3 mm/s	972,26 °C
	13,4 mm/s	712,93 °C

Fonte: (Autor, 2016)

4.6.1.5 Características termomecânicas da chapa

As características termomecânicas da chapa seguem as formulações, conforme a Tabela 38. Onde:

ρ - densidade, [Kg-m⁻³];

λ - condutividade térmica [J/m-s-k];

c - calor específico [J/Kg-K],

α - coeficiente de expansão térmica [K⁻¹];

E - Modulo de elasticidade [Gpa];

ν - coeficiente Poisson's

σ_y - Tensão de escoamento [Mpa.];

θ - Difusibilidade [m²/s]

C_{cv} - Capacidade calorífica Volumétrica [J/m³K];

Tabela 38 – Formulações das Características Termomecânica da chapa

<i>Característica termomecânica da chapa</i>	<i>Expressão da linha de tendência gráfica</i> <i>Característica termomecânica função temperatura</i>	<i>R²</i>
ρ - densidade [Kg-m ⁻³]	$\rho = (-0,1899 (T)) + 7.772,8$	0,9607
λ - condutividade térmica [J/m-s-k]	$\lambda = (-0,0357 (T)) + 54,723$	0,9987
c - calor específico [J/Kg-K]	$c = 0,5932 (T) + 441,18$	0,5238
θ - Difusibilidade [m ² /s]	$\theta = 0,00002 e^{0,002(T)}$	0,9991
C_{cv} - Capacidade calorífica Volumétrica [J/m ³ K]	$C_{cv} = 5401,1 (T) + 3000000$	1,0
σ_y - Tensão de escoamento [Mpa].	$\sigma_y = 0,0000006(T)^3 - 0,0008(T)^2 - 0,0457 (T) + 346,52$	0,9975
E - Modulo de Elasticidade (modulo de YOUNG) [Gpa]	$E = 0,000001(T)^3 - 0,0014 (T)^2 + 0,2641(T) + 204,76$	0,9808
α – Coeficiente de dilatação térmica [1/K],	$\alpha = 0,0012 (T) + 11,984$	0,9916
ν - coeficiente Poisson	$\nu = 0,0002 (T) + 0,284$	0,9842

Fonte: (Autor, 2016)

4.6.1.6 Identificação da geometria da região inerente

A geometria da região inerente conforme Tabela 39, para o bico número 2. Enquanto que a Tabela 40, para o bico número 2.

Dados de entrada:

C1= 1,05 e C2= 0,25

Dados de saída:

b – Máxima largura da zona de deformação residual [mm];

d – Máxima profundidade da zona de deformação residual [mm];

h – Espessura da chapa [mm];

v – Velocidade de movimentação da chama [mm/s]

Calculado pela teoria de (JANG, SEO e KO, 1997).

Tabela 39 - Cálculo da Geometria da região inerente para o bico 2.

Bico 2	Velocidade	Largura b (mm) $\frac{b}{h} = c_1 \sqrt{\frac{q}{vh^2}}$	Profundidade d (mm) $\frac{d}{h} = c_2 \frac{q}{vh^2}$
Chapa	5,3 mm/s	8,85 mm	1,77 mm
9,5 mm	13,4 mm/s	5,32 mm	0,64 mm
Chapa	5,3 mm/s	8,85 mm	1,40 mm
12,70 mm	13,4 mm/s	5,32 mm	0,51 mm
Chapa	5,3 mm/s	8,85 mm	1,11 mm
15,88 mm	13,4 mm/s	5,32 mm	0,41 mm
Chapa	5,3 mm/s	8,85 mm	0,98 mm
19,05 mm	13,4 mm/s	5,32 mm	0,25 mm

Fonte: (Autor, 2016)

Tabela 40 - Cálculo da Geometria da região inerente para o bico 8.

Nº Bico 8	Velocidade	Largura b (mm) $\frac{b}{h} = c_1 \sqrt{\frac{q}{\nu h^2}}$	Profundidade d (mm) $\frac{d}{h} = c_2 \frac{q}{\nu h^2}$
Chapa 9,55 mm	5,3 mm/s	13,7 mm	4,25 mm
	13,4 mm/s	8,78 mm	1,72 mm
Chapa 12,70 mm	5,3 mm/s	13,7 mm	3,36 mm
	13,4 mm/s	8,78 mm	1,36 mm
Chapa 15,88 mm	5,3 mm/s	13,7 mm	2,68 mm
	13,4 mm/s	8,78 mm	1,08 mm
Chapa 19,05 mm	5,3 mm/s	13,7 mm	2,25 mm
	13,4 mm/s	8,78 mm	0,90 mm

Fonte: (Autor, 2016)

4.6.1.7 Identificação das deformações inerente

Dados de entrada

a — Raio do disco da região da tensão inerente= 5,0 mm;

k — Constante da mola do modelo, função temperatura;

α — Coeficiente de expansão térmico da tensão inerente função temperatura;

σ_y - Tensão de escoamento da região de inerente tensão função temperatura;

ν — Coeficiente de Poisson 's na região de inerente tensão, função temperatura;

E — Modulo de Young's na região inerente na direção x, função temperatura.

Dados de saída

ε^* - Deformação residual em função da coordenada [mm];

Tabela 41 – Cálculo das deformações Inerentes

Bico	Velocidade	T máxima	$\varepsilon^* = \alpha T - \sigma_Y \left(\frac{1}{ak} + \frac{1-v}{E} \right)$
Bico 2	5,3 mm/s	738,18 °C	0,00642
	13,4 mm/s	483,72 °C	0,00376
Bico 8	5,3 mm/s	972,26 °C	0,00900
	13,4 mm/s	712,93 °C	0,00627

Fonte: (Autor, 2016)

4.6.1.8 Identificação das deformações angulares

Os resultados das deformações angulares e das deformações residuais em função das velocidades de deslocamentos estão apresentados na Tabela 42, para o bico número 2 e na Tabela 43, para o bico número 8.

Tabela 42 – Cálculo das deformações angulares para o bico número 2.

Bico 2 Fluxo médio de Calor = 1.475,45 ± 250,56 W			
$\delta = 2(1 - \nu^2) \cdot c_1 \cdot \sqrt{\frac{q}{\nu h^2}} \varepsilon^* \left[\frac{3\pi}{4} c_2 \frac{q}{\nu h^2} - 2 \left(\frac{c_2 q}{\nu h^2} \right)^2 \right]$			
Bico 2	Velocidade	Deformação Angular (Radianos)	Deformação Residual (mm)
Chapa	5,3 mm/s	0,00330	0,198
9,50 mm	13,4 mm/s	0,00056	0,033
Chapa	5,3 mm/s	0,00149	0,089
12,70 mm	13,4 mm/s	0,00024	0,014
Chapa	5,3 mm/s	0,00078	0,047
15,88 mm	13,4 mm/s	0,00012	0,007
Chapa	5,3 mm/s	0,00046	0,027
19,05 mm	13,4 mm/s	0,00007	0,004

Fonte: (Autor, 2016)

Tabela 43 - Cálculo das deformações angulares para o bico número 8.

<i>Bico 8 Fluxo de Calor = 4.125,04 ± 806,54 W</i>			
$\delta = 2(1 - \nu^2) \cdot c_1 \cdot \sqrt{\frac{q}{\nu h^2}} \varepsilon^* \left[\frac{3\pi}{4} c_2 \frac{q}{\nu h^2} - 2 \left(\frac{c_2 q}{\nu h^2} \right)^2 \right]$			
Bico 2	Velocidade	Deformação Angular (Radianos)	Deformação Residual (mm)
Chapa	5,3 mm/s	0,01348	0,800
9,50 mm	13,4 mm/s	0,0035	0,210
Chapa	5,3 mm/s	0,00733	0,440
12,70 mm	13,4 mm/s	0,00158	0,090
Chapa	5,3 mm/s	0,00415	0,049
15,88 mm	13,4 mm/s	0,0084	0,050
Chapa	5,3 mm/s	0,0025	0,150
19,05 mm	13,4 mm/s	0,00049	0,029

Fonte: (Autor, 2016)

4.6.1.9 Cálculos dos momentos de dobramentos devido à linha de calor.

Os resultados das determinações momentos em função das velocidades de deslocamentos estão apresentados Tabela 44 e na Tabela 45.

Tabela 44 – Cálculo dos momentos de dobramento para o bico número 2

<i>Bico 2</i>	<i>Velocidade</i>	$M_y = \frac{1}{6} E_y \varepsilon_y^* d h \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{2d}{h} \right)$
Chapa	5,3 mm/s	18.483,57 Kg x mm
9,50 mm	13,4 mm/s	7.113,87 Kg x mm
Chapa	5,3 mm/s	17.165,84 Kg x mm
12,70 mm	13,4 mm/s	9.619,37 Kg x mm
Chapa	5,3 mm/s	16.684,76 Kg x mm
15,88 mm	13,4 mm/s	9.450,04 Kg x mm
Chapa	5,3 mm/s	14.654,98 Kg x mm
19,05 mm	13,4 mm/s	8.654,96 Kg x mm

Fonte: (Autor, 2016)

Tabela 45 - Cálculo dos momentos de dobramento para o bico número 8.

<i>Bico 8</i>	<i>Velocidade</i>	$M_y = \frac{1}{6} E_y \varepsilon_y^* d h \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{2d}{h} \right)$
Chapa	5,3 mm/s	16.493,02 Kg x mm
9,50 mm	13,4 mm/s	19.860,59 Kg x mm
Chapa	5,3 mm/s	18.727,12 Kg x mm
12,70 mm	13,4 mm/s	26.241,80 Kg x mm
Chapa	5,3 mm/s	19.273,76 Kg x mm
15,88 mm	13,4 mm/s	28.916,70 Kg x mm
Chapa	5,3 mm/s	19.628,13 Kg x mm
19,05 mm	13,4 mm/s	30.584,96 Kg x mm

Fonte: (Autor, 2016)

Em ambos os bico 2 e 8, para velocidade de 5,3 mm/s, à medida que aumenta a espessura da chapa existe uma tendência de crescimento dos momento de dobramento devido ao calor, sendo que mais acentuado no bico 2.

Entretanto nos bico 2 e 8, para velocidade de 13,4 mm/s, à medida que aumenta a espessura da chapa existe uma tendência de crescimento e diminuição dos momento de dobramento devido ao calor, sendo que mais acentuado no bico 8.

4.7 DISCUSSÕES SOBRE CORREÇÕES DAS DEFORMAÇÕES.

Os experimentos e simulações foram realizados para ampliar o entendimento da correção das deformações oriundas do processo de soldagem, por linhas de calor.

Os resultados obtidos serão discutidos, nesta seção na sequência:

1. A criação e utilização do equipamento protótipo para aplicação da linha de calor contribuiu, para garantir os controles dos parâmetros no processo de linha de calor.
2. A determinação da quantidade e do fluxo de calor, por um calorímetro, das linhas de calor revelam que: o fluxo de calor da chama oxacetilênica, cresce proporcional ao número do bico.

3. Na medição dos gradiente de temperatura, por termopares, para determinação dos ciclos térmicos e das repartições térmicas, que revelam ser a temperatura dependente proporcionalmente ao número de bico e inversamente proporcional a velocidade de deslocamento.

4. As curvas de repartições térmicas, para a linha de calor, fornecem dados para comparação entre as condições de variação de número do bico e de velocidade de deslocamento.

5. A dissipação de calor, nas linhas de calor é inversamente proporcional a espessura da chapa, quanto mais espessa a chapa, mais rapidamente esta tenderá a se resfriar, e reduzir o pico da temperatura superficial.

6. A utilização do processo termográfico comprova que a temperatura depende proporcionalmente ao número de bico e inversamente proporcional a velocidade de deslocamento. Também, que a temperatura reduz-se com o aumento da espessura devido à dissipação de calor.

7. A geometria da região aquecida e a região termicamente afetada variam proporcionalmente ao fluxo térmico.

8. No aquecimento do aço naval, nas temperaturas de 500°C a 900°C, verificaram-se alterações das microestruturas, observadas no microscópio eletrônico, onde as temperaturas menores que 700°C pode-se considerar que não houve mudanças significativas na microestrutura, diferentemente das temperaturas acima de 700°C.

9. Na análise da tensão residual antes e após aplicação da linha de calor, em duas amostras de chapa do aço naval, com sentidos de laminação ortogonais, pelos processos de magnetização e difração de raios -X, apresentaram níveis de tensões residuais que caracterizaram a geração de deformações plásticas entre 206 e 210 MPa, próximo da aplicação da linha de calor.

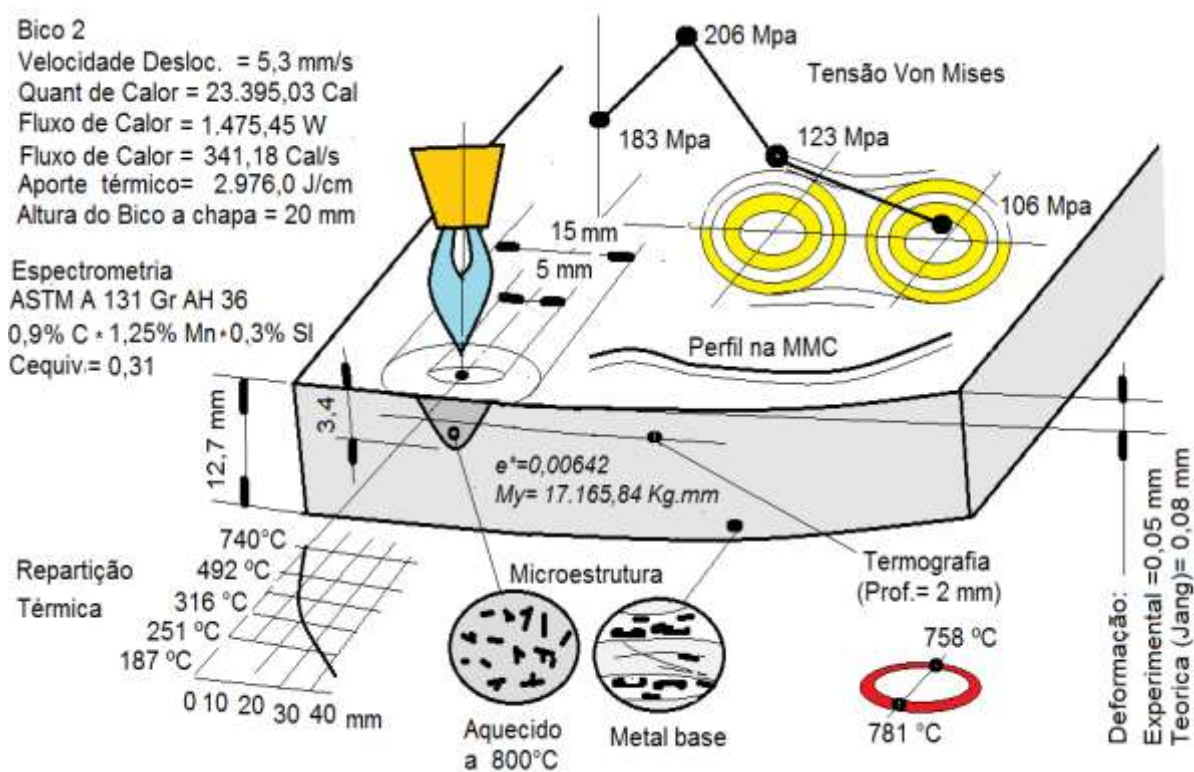
10. As deformações residuais, após a aplicação da linha de calor, mantendo-se a espessura da chapa, dependem do fluxo térmico, do tipo de resfriamento e da velocidade de deslocamento. Portanto, as intensidades das deformações variam mais significativamente no resfriamento sequencial por água, intensidades medianas na condição sem resfriamento e pouca intensidade na condição de resfriamento no lado oposto a linha de calor.

11. As deformações residuais após a aplicação da linha de calor tende a diminuir com o aumento da espessura da chapa, dependem do fluxo térmico, do tipo de

resfriamento; da velocidade de deslocamento e da dissipação do calor. Portanto, se apresentam de forma aleatória, sem previsão confiáveis nos resultados.

12. Na Figura 100 mostra os resultados dos experimentos da linha de calor, em forma de esquema geral, da condição de bico número 2 e velocidade de deslocamento de 5,3 mm/s.

Figura 100 – Esquema geral dos resultados da linha de calor



Fonte (Autor, 2016)

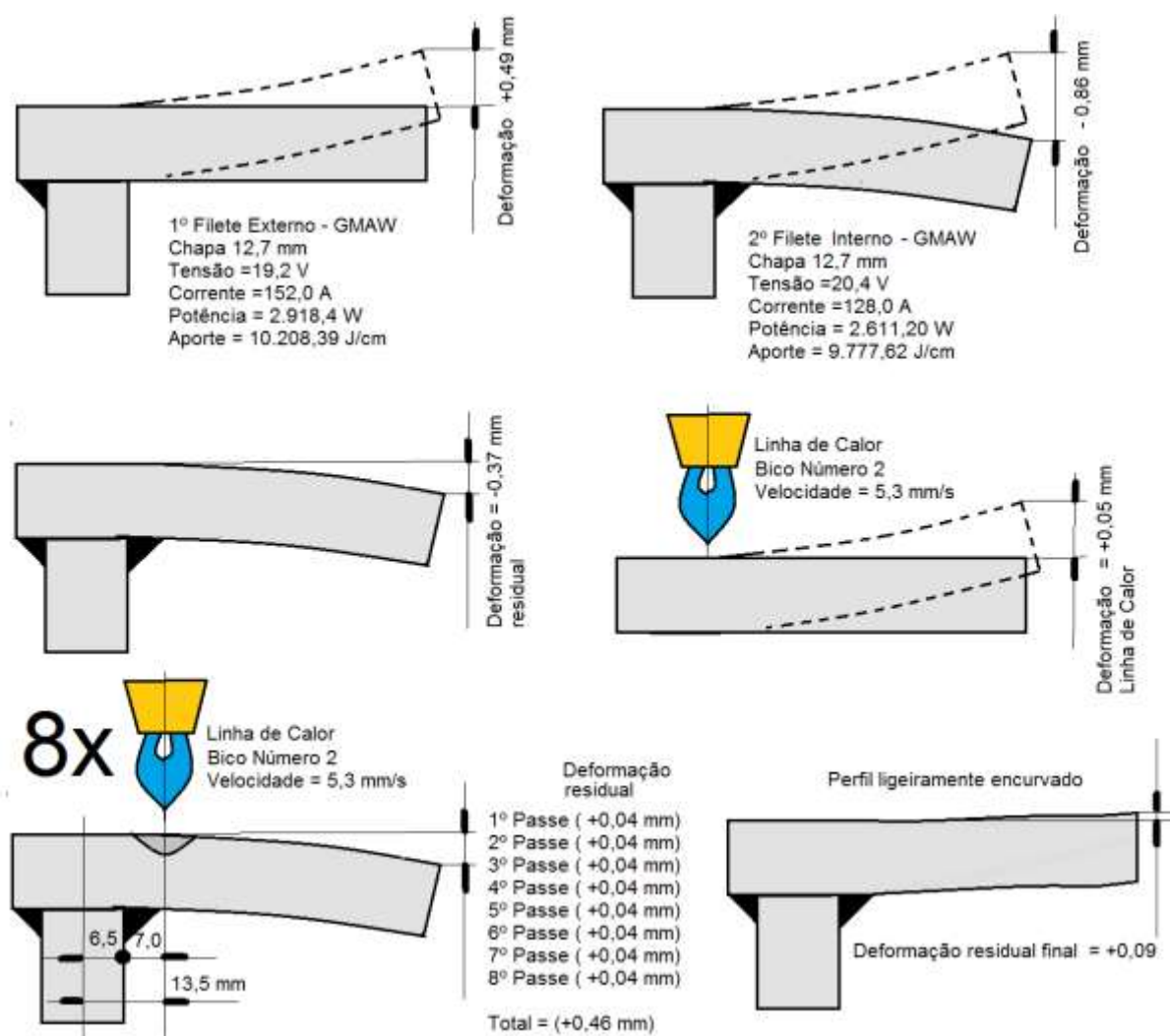
13. Na soldagem em ângulo, o primeiro filete deforma a chapa ascendente, enquanto que, o segundo filete deforma a chapa descendente, gerando um resíduo de deformação, que essas deformações residuais totais são inversamente proporcionais à espessura da chapa.

14. O método operacional clássico para corrigir as deformações por soldagem em ângulo consiste em aplicar as linhas de calor no lado oposto à soldagem, para obter a contra deformação, mas, faz-se necessário determinar o posicionamento e o caminho da aplicação.

15. Podem-se criar padrões para as linhas de calor que define a potência, função do fluxo térmico (número de bico), também regulagem dos parâmetros, como altura da chama a chapa e velocidade de deslocamento da tocha, que caracterizam uma linha de calor, para prever as necessidades de correção dos processos de soldagem.

16. Na Figura 101 mostra os resultados dos experimentos da correção das deformações por soldagem por linha de calor, em forma de esquema geral, da condição de solda filete e da linha de calor bico número 2 e velocidade de deslocamento de 5,3 mm/s.

Figura 101- Esquema dos resultados Soldagem e correção por linha de calor



Fonte (Autor, 2016)

5 CONCLUSÕES

Nesta tese, realizou-se um estudo sobre a utilização da linha de calor para correção das deformações oriunda dos processos de soldagem em painéis navais.

Neste estudo das linhas de calor, determinou-se: a quantidade de calor, o fluxo térmico, o aporte térmico, as temperaturas dos ciclos térmicos, as microestruturas correspondentes às temperaturas atingidas, as tensões residuais, as deformações residuais em função do tipo de resfriamento e da espessura, o comportamento das deformações das soldagens tipo cordão e ângulo em função do tempo, o método de correções das deformações de soldagem por linhas de calor, o perfil decorrente das condições das chapas iniciais, antes e após da soldagem e aplicação da linha de calor, por fim, efetuado o cálculo analítico, com base, na teoria termo-elástico-plástica.

Para isso, necessitou-se o desenvolvimento de um protótipo de calorímetro e de um simulador de linhas de calor, com diversos dispositivos, para controle dos parâmetros da linha de calor e realização dos experimentos.

A quantidade de calor varia proporcionalmente em função do número de bico. Entre os bicos números de 0 ao 8, numa velocidade constante de 5,3 mm/s, houve um aumento de 31,31 kJ a 234,63 kJ.

A quantidade de calor varia inversamente proporcional em função da velocidade de deslocamento. Entre as velocidades de 5,3 mm/s a 13,4 mm/s, no bico número 2, houve uma redução de 97,79 kJ a 31,73 kJ.

O fluxo térmico médio das linhas de calor variou de $419,48 \pm 165,31$ W a $4.125,04 \pm 806,4$ W, com as mudanças do bico número 0 ao 8.

O aporte térmico varia proporcionalmente em função do número de bico. Entre os bicos números de 0 ao 8, numa velocidade constante de 5,3 mm/s, houve um aumento de 952,9 J/cm a 7.14,20 J/cm.

O aporte térmico varia inversamente proporcional em função da velocidade de deslocamento. Entre as velocidades de 5,3 mm/s a 13,4 mm/s, no bico número 2, houve uma redução de 2.976,0 J/cm a 1.076,30 J/cm.

A temperatura máxima no ciclo térmico, medidas por termopares, na profundidade de 1,6 mm, varia inversamente proporcional a velocidade de deslocamento. No bico número 2, o aumento da velocidade de 5,3 mm/s a 13,4

mm/s, houve uma redução de 740,0°C a 334,0°C. Enquanto que, no bico número 8 houve uma redução de 971,0°C a 538,0°C.

A temperatura máxima no ciclo térmico, medidas por câmara termográfica, na profundidade de 2,0 mm, varia inversamente proporcional a velocidade de deslocamento. No bico número 2, o aumento da velocidade de 5,3 mm/s a 13,4 mm/s, houve uma redução de 781,0°C a 491,0°C. Enquanto que, no bico número 8 houve uma redução de 968,9°C a 581,9°C.

A comparação entre as medições das temperaturas, por termopares e por câmara termográfica se mostrou similares, com variação média de 4,48%. Exceto, na condição de bico número 2, na velocidade de 13,4 mm/s que apresentou a variação de 32,38%.

As microestruturas são distintas nas temperaturas entre 500°C a 900°C. No metal de base apresenta-se grão grosseiro de Ferrita e Perlita alinhado devido o processo de laminação. Na temperatura de 600°C os grãos de Perlita apresentam-se em concentrações diversificadas. Enquanto que, na temperatura de 800°C apresenta uma recristalização. Já na temperatura de 900°C ocorre um efeito textura, onde os grãos ferríticos não se destacam.

As tensões residuais foram medidas por dois métodos um por magnetização e outro por difração de raios-X. O método qualitativo de magnetização apresentou variações de tensões residuais, nas condições iniciais e após aplicação da linha de calor, como também, na variação do sentido de laminação da chapa.

No método quantitativo de difração por raios-X foram medidas as tensões longitudinais, transversais, cisalhantes e calculados as tensões de Von Mises.

Observou-se que, nas chapas, cujo sentido de laminação na mesma direção à linha de calor apresentou as tensões de Von Mises, afastando-se do centro, valores de: 183 Mpa; 206 Mpa; 123 Mpa e 106 Mpa. Por outro lado, as chapa com sentido de laminação transversal à linha de calor, apresentou tensões de: 190 Mpa; 87 Mpa; 210 Mpa e 152 Mpa.

Portanto, o sentido de laminação da chapa influencia as tensões residuais das linhas de calor.

As deformações residuais na chapa, decorrente da aplicação da linha de calor dependem do fluxo térmico, da velocidade de deslocamento, da espessura da chapa e também, do tipo de resfriamento.

Observou-se que, as deformações em função do tempo tiveram comportamentos diferenciados em relação aos tipos de resfriamentos e as espessuras. A opção sem resfriamento apresentou uma tendência das deformações residuais serem melhores aplicadas do que nos resfriamentos sequencial e no lado oposto.

O tempo de deflexão das deformações apresentaram 30 s e 13 s para as velocidades de deslocamentos de 5,3 mm/s e 13,4 mm/s, respectivamente. Portanto, as deformações residuais tiveram valores mais positivos na velocidade de deslocamento de 5,3 mm/s.

Assim, obtivemos para o bico número 2 com velocidade de deslocamento de 5,3 mm/s, sem resfriamento, nas chapas de espessuras: 9,50 mm; 12,70 mm; 15,88 mm e 19,05 mm, um melhor padrão de deformação residual de + 0,10 mm; +0,05 mm; -0,04 mm e +0,01 mm, respectivamente.

Na soldagem, obviamente, as deformações residuais são inversamente proporcionais às espessuras, porém o comportamento das deformações das soldagens tipo cordão e ângulo em função do tempo mostraram-se distintos.

Na soldagem tipo cordão, as deformações foram progressivas ascendentes, enquanto que, na soldagem em ângulo, os filetes externos os comportamentos foram progressivos ascendentes, diferentemente dos filetes interno, que foram progressivos descendentes.

As soldagens em ângulo nas espessuras de chapa de: 7,93 mm, 12,70 mm, 15,88 mm e 19,05 mm apresentaram uma deformação residual final de: -1,72 mm, -0,37 mm, -0,05 mm e 0,0 mm, respectivamente. Com objeto deste estudo, cabe-se a correção dessas deformações de soldagem por linhas de calor.

O método de correção das deformações de soldagem em ângulo por linhas de calor necessitou de controle de parâmetros como: do fluxo térmico, da velocidade de deslocamento, da espessura da chapa, do tipo de resfriamento, do tipo da soldagem e sobre tudo, da localização e do número da aplicação da linha de calor.

A aplicação em repetidas vezes da linha de calor em grande número é uma necessidade para a correção, porém os resultados de cada aplicação não são uniformes.

A correção mais crítica foi da chapa de espessura 7,93 mm soldada em ângulo, que necessitou de 18 (dezoito) vezes da aplicação das linhas de calor.

A localização da aplicação influencia nos resultados. Foi utilizada nestes experimentos uma distância do eixo central correspondendo à metade da espessura, adicionado à perna do filete.

Os perfis observados na máquina de medição por coordenadas das condições das chapas iniciais, antes e após da soldagem e depois da aplicação da linha de calor mostrou-se distintos, onde se destaca no aspecto do declive da reta aproximada e da influência do nível de deformações residuais e da espessura da chapa a ser corrigida.

Por fim, efetuados os cálculos analíticos conforme a teoria termo-elástico-plástica, e encontramos dados similares nas experiências realizadas em: distribuição gaussiana, temperatura de pico, geometria da região inerente e deformações angulares.

Nesta tese, pode-se observar que foi realizado três análises, interligadas, para correções das deformações, inicialmente na visão da aplicação da linha de calor, seguidamente, na visão da soldagem e por fim, os cálculos analíticos da teoria termo-elástico-plástica.

Então, concluímos que os objetivos propostos foram atingidos.

6 TRABALHOS FUTUROS

O monitoramento da correção das deformações de soldagem pelo processo de linhas de calor e suas influências sobre os resultados numéricos e experimentais está associado diretamente ao acompanhamento da evolução das deformações termo-elástico-plástica.

Neste sentido, sugere-se como continuação da pesquisa, nos seguintes aspectos:

- Executar experimentos com a utilização do gás natural liquefeito (GNL), com o poder calorífico de 9.200 Kcal/m^3 e/ou gás liquefeito do petróleo (GLP), com o poder calorífico de 22.244 Kcal/m^3 e comparar os resultados com o gás oxiacetileno.
- Pré-determinar os padrões de linhas de calor com regulagem dos parâmetros, para analisar tanto para conformação de chapa como correção por linhas de calor.
- Estudar os efeitos da repetição em várias vezes, da aplicação das linhas de calor e sua influência o aço naval.
- Estudar a correlação entre os resultados dos fluxos térmicos das soldagens tipo cordão com os fluxos térmicos das linhas de calor.
- Melhorar o estudo das linhas de calor nas condições de resfriamentos, principalmente com refrigeração por água muito utilizado na conformação de chapas.
- Automatizar a linha de calor para movimentação no plano XY, neste estudo apenas foi realizado deslocamento linear.
- Estudar o efeito das tensões residuais na soldagem, para complementação das tensões residuais da linha de calor.
- Fazer experimento com estruturas modulares pequenas, simulando painéis navais, onde seria aplicada soldagem em ângulo, com um mínimo de deformações para posteriormente fazer correções por linhas de calor.
- Criar novo sistema de fixação das amostras para medição na máquina de medição por coordenadas. Sugerimos que as amostras de chapas fossem fixadas em suportes, idênticos nas condições iniciais, por soldagem e após linhas de calor.
- Uma análise numérica bi-dimensional de condução de calor móvel com a utilização de programas computacionais de elementos finitos, (Análise numérica mais apurada).

REFERÊNCIAS

ABS. American Bureau of Shipping. In: _____ **Rules of Materials and Welding, Part 2, Chapter 4, Preparation Welding 3, Forming**. Houston USA: ABS Plaza, 2007. p. 439.

ARRIGA, I. H. **Welding Sequence Analysis**. AGH University of Science and Technology. New Zealand, p. 225 Disponível em: <
<http://winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy2/10088/full10088.pdf>>, Acesso em 20 jan 2014. 2009.

ASTM A 131 GR AH36. **Standard Specification for Structural Steel for Ships**. American Society for Testing and Materials Standard (ASTM). West Conshohocken, PA 19428-2959, United States., p. 1-6. 2014.

AVENT, R. **Heat Straightening of Steel: From Art to Science**. Federal Highway Administration (FHWA). USA, p. 1-21. 2003. (Disponível em:<
<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/steel.cfm>> Acesso em : 12 jul 2011).

BÄCKSTRÖM, D.; JOHANSSON, R.; ANDERSSON, K. J. F. **Gas Temperature and Radiative Heat Transfer in Oxy-fuel**. Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Sweden. Denmark, 2016, p. 12. 2012.
(Disponível em:< <http://orbit.dtu.dk/files/51539378>> Acesso em:10 fev2016).

BISWAS, P.; MANDAL, N. R.; SHA, O. P. **Numerical And Dimensional Analysis for Prediction of Line Heating Residual Deformations**. Kharagpur India. 2010.

BISWAS, P.; MANDAL, N. R.; SHA, O. P. **Thermo-mechanical and Experimental Analysis of Double Pass Line Heating**. Habin Engineering Univerty and Springer. Verlag Berlin Heidelberg, p. 190-198. 2011.

BISWAS, P.; SARATHI, P.; MANDAL, N. R. **Experimental and Three Dimensional Finite Element Analysis of Thermal History of Oxy-acetylene Line Heating Process**. Journal of Marine Science and Application. [S.l.]. 2006. (DOI

10.1007/s11804-010-9008-x, Disponível em : < <http://thirdworld.nl> >, acesso em: 18 ago 2012).

CHENG, W. **In-Plane Shrinkage Strains and their Effects on Welding Distortion in Thin-Wall Structure**. Ohio USA, p. 1 - 289. 2005. (Disponível em:< https://etd.ohiolink.edu/ap/10?0::NO:10:P10_ACCESSION_NUM:osu1124049585 >, Acesso em: 30 jun 2013).

CHIRILLO, L. D. **Line Heating**. USA Departament of Transportation, p. 1-86. 1982. (Disponível em : < <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a443648.pdf> >, Acesso em: 16 fev 2010).

CHOI, Y. H.; LEE, Y. W.; DOH, D. H. **Temperatture Distribution and Thermal Stresses in Various Conditions of Moving Heating Source During Line Heating Process**. [S.l.], p. 82-87, Volume 21, Issue 1. 2012. (Disponível em :< <http://link.springer.com/article/10.1007/s11630-012-0522-9> > , acesso em 12 jan 2014).

CLAUSEN, H. B. **Plate Forming by Line Heating**. Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark. KGS. [S.l.], p. 166. 2000. (Disponível em:< <http://orbit.dtu.dk/files/5446521/Clausen.pdf>>, Acesso em:12 maio2012).

CLAUSEN, H. B. **Numerical Methods for Plate Forming by Line Heating**. Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark. Dinamarca, p. 102-110. 2001. (Disponível em : < <http://orbit.dtu.dk/en/publications> >acesso em: 07 ago2010).

CONNOR, R. J.; URBAN, M. J.; KAUFMANN, E. J. **Heat-Straightening Repair of Damaged Steel Bridge Girders:Fatigue and Fracture Performance**. NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) REPORT 604. WASHINGTON, D.C., p. 253. 2008. (Disponível em: < <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/160020.aspx> >, Acesso em: 07 fev 2012).

DEPRADEUX, L. **Simulation Numerique du Soudage - Acier 316L**. L' Institut national des Sciences Appliquees de Lyon. LYON- France, p. 1-231. 2004. (Disponível em: < <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2004ISAL0014/these.pdf> >, Acesso em:10 jul 2014).

DIMAS, D. M.; GORDO, J. M.; SOARES, C. G. **Levantamento de Deformações em Painéis reforçados por Fotografia Digital**. Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa- Portugal, p. 1-16. 2006. (Disponível em: < <http://www.mar.ist.utl.pt/jgordo/Artigos/digital.pdf> >Acesso em: 09 out 2012).

FAVARIN, J.; REQUEIRA, C.; SOGGIA, L. **Metodologia para Elaboração de Projeto de Estaleiro**. CEGN Centro de Estudos em Gestão Naval. São Paulo, p. 1-21. 2010. (Disponível em: < <http://www.maritime-rh.com/fmi-home-page.html> >, Acesso em 09 set 2013).

FAY, R. H. **Heat Transfer form Fuel Gas Flames**. Welding Research Supplement. New York - USA, p. 380-383. 1967.

GELL, T. **Stress Redistribution in Flame-cut Or Welded Thin Plates Subjected to External Loading**. Inglaterra: Chalmers University of Tecnology, 1987.

GILZMANENKO, D.; YEVSEYEV, G. **Gas Welding and Cutting**. 1º. ed. MOSCOW: PEACE PUBLISHERS, v. 1, 1960. 431 p.

GUROVA, T.; SERGEN, F.; ANATOLI, L. **Nova técnica de Mapeamento das tensões Mecânicas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

HARRIS. **Flame Straightening – Technical information**. Lincon Elettric UK Harris Calorific. Disponível em: <http://www.harrisproductsgroup.com/en/Catalogs.aspx> Acesso em: 12/05/2012, p. 1-10. 2000.

HEMMATI, S. J.; SHIN, J. G. **Estimation of Flame Parameters for Flame Bending process**. International Journal of Mchine Tools & Manufacturing. SCIENCE DIRECT [www. elsevier.com](http://www.elsevier.com), p. 799 - 804. 2007.

HSIAO, Y. C. **Finite Element Analysis of Laser Forming**. Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering and the Department of Mechanical. [S.I.]. 1997. (Disponível em: < <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/17440> >, Acess in 10 maio 2012).

IJUSHIMA, K.; OKADA, T.; ITOL, S. **Heat Conduction Analysis of Welding Moving Head Source Problem Using Idealized Explicit FEM**. ISOPE International Society of Offshore and Polar Engineers. Rhodes, Greece, p. 232 - 237. 2012.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e científicos Editora S. A. , 1996.

INTERNATIONAL PAINT. **Ship Costa Romantica, News Letter IP nº 14 International Marine Coating, 2007**. United Kingdom. 2007. (Disponível em: < www.international-marine.com/newsmedia/documents >, Acesso em 15 ago 2013).

JANG, C. D.; KIM, L.; YONG, T. **Welding Distortion Analysis of Hull Blocks Using Equivalent Load Method Based on Inherent Strain**. ABS American Bureau of Shipping. Houston, Texas, United States of America. 2007. (Disponível em : < <http://www.shipstructure.org/pdf/2007symp03.pdf> >, Acesso em: 25 fev 2010).

JANG, C. D.; MOON, S. C.; KO, D. E. **Acquisition of Line Heating Information for Automatic Plate Forming**. USA, p. 1- 6. 2000. (Disponível em: < <https://pdfs.semanticscholar.org/0fdb/ea5587a77b545769495b8465067b2b23da39.pdf> >, Acesso em: 25 fev 2010).

JANG, C. D.; SEO, S. I.; KO, D. E. **A Study on Prediction of Deformations of Plates Due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis**. SNAME Journal of Ship Production. Seoul, Korea, p. 22-27, Vol. 13, No. 1,. 1997. (Disponível em : < <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?>> Acesso em 12 jan 2010).

KOU, S. **Welding Metallurgy**. Canada.: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.

LINDE AG. **ACETYLENE. There is no better fuel gas for oxy-fuel gas processes**. Germany. 2000. (Disponível em: < www.fs.uni-mb.si >, Acesso em: 14 nov 2010).

MACHADO, G.; OLIVEIRA, A. C. **Fabricação em Painéis Curvos pelo Processo de Linha de Aquecimento**. CEGN - Centro de Estudo em Gestão Naval. São Paulo, p. 24. 2007. (Disponível em: < <http://docplayer.com.br/4085385-Fabricacao-de-paineis-curvos-pelo-processo-de-linhas-de-aquecimento.html> >, Acesso em 12/012/2012).

MACHADO, G.; TANIGUCHI, C. Analise das Condições de Desenpeno de painéis estruturais soldados de chapas finas. **Revista Politécnica NDPN - EPUSP- Editada pelo Gremio Politecnico**, São Paulo, v. No. 181, p. 20-25, 1982.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Minas Gerais- MG: Editora UFMG Universidade Federal Minas Gerais, 2007.

MASUBUCH, K. et al. **Development of an Intelligent System for Flame Straightening Panel, Structura- Devices and Algorithms to be Used with Robots**. SNAME Journal of Ship Production. Jersey- city- NJ- USA, p. 219-227, Vol. 4, No. 4. 1988. (Disponível em : < <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?> >Acesso em : 25 jul 2012).

MASUBUCHI, K. **Prediction and control of Residual Stresses and Distortion in welded Structure**. JWRI. Osaka - Japan, p. 1-15, vol 25, nº2. 1996. (Disponível em : < <https://www.researchgate.net/publication/29678193> >Aceso em 04 jan 2012).

MICHALERIS, P.; DEBICCARI, A. **Prediction of Welding Distortion**. Chicago ILL - USA, p. 1-12. 1997. (Disponível em: <

<https://canteach.candu.org/Content%20Library/20053410.pdf> >, Acesso em: 06 ago 2012).

MODENESI, P. J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. UFMG - IEM - UNIFEI. Belo Horizonte- Minas Gerais, p. 1-025. 2001. (Disponível em: < <http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/tensaoresidual.pdf> >, Acesso em: 26 dez 2012).

NORSOK-STANDARD. **M-101 - Structural Steel Fabrication Rev. 4**. Majorstua-NORWAY: Norwegian Technology Center, 2000. ISBN Disponível em : < <http://www.standard.no/en/sectors/energi-og-klima/Petroleum/NORSOK-Standard-Categories/M-Material/M-1013/>>, Acesso em: 09 set 2010.

NSNET. **Maritime New and Information**. USA. 2008. (Disponível em: < www.nsnet.com/shippisco/index >, Acesso em: 18 set 2012).

OKUMOTO, Y.; MASANORI, S.; HIDEKAZU, M. **Reduction of Welding Distortion based on Theoretical Predictions Using Inherent Deformation Method**. ISOPE- International Society of Offshore and Polar Engineers- Hawaii- USA. [S.l.], p. 138. 2011. (Disponível em: < <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISOPE-I-11-142> >, Acesso em: 14 dez 2013).

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro, Brasil: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Única Edição, 1982.

PATTEE, H. E.; EVANS, R. M.; MONROE, R. E. **Effect of Flame and Mechanical Straightening on Material Properties of Weldments**. Ship Structure Committee SSC-207. [S.l.], p. 1- 50. 1970. (Disponível em: < <http://www.shipstructure.org/pdf/207.pdf> >, Acesso em : 26 dez 2010).

PEREIRA, E. F.; SALAZAR, W.; MENDES, A. **Estudo da Soldagem em Ângulo pelo Processo FCAW (Flux Cored Arc Welding) Automatizado na Fabricação de Paineis e Blocos Navais**. CONEM 2014 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia MG, p. 1-9. 2014. (ANAIS).

PEREIRA, E. P. **Estudo da Conformação de Chapas Navais por Linhas de Calor Utilizando a Teoria Simplificada Termo-Elástica-Plástica**. UFPE- Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado. Recife-Pernambuco-BRASIL. 2012.

PILIPENKO, A. **Computer Simulation of Residual Stress and Distortion of Thick Plates in Multi-Electrode Submerged arc Welding. Their Mitigation Techniques**. Trondheim, Norway. 2001. (Disponível em: < <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:126204/FULLTEXT01.pdf> >, Acesso em: 09 ago 2010).

PINTO, M. S. **Desempeno pelo Processo de Contração do Material**. Itajaí SC: Estaleiro Itajaí S. A. Superintendencia de Planejamento, 1990.

RADAJ, D. **Heat Effects of Welding: temperature field, residual Stress, Distortion**. ISBN: 978-3-642-48642-5 (Print) 978-3-642-48640-1. [S.l.]. 1992. (Disponível em: < <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-48640-1> >, Acesso em: 04 ago 2012).

RICHARD, L. **Ship Production**. Second. ed. USA- Centreville, Maryland: Cornell Maritime Press, Inc, v. 1, 1995.

ROSENTHAL, D. **Theory of moving source of heat and its application to metal treatments**. Transactions of American Society of Mechanical Engineers,. [S.l.], p. 68: 849-866,. 1946.

SANG, I. K.; KANG, J. K.; HAN, J. M. **Development of Welding Deformation Control Method for Hull Structure of Ro/Ro Passenger Ferry**. The International Society of Offshore and Polar Engineers, Kitakushu, Japan. [S.l.], p. 10. 2002. (Disponível em: < <http://www.iso-pe.org/publications/proceedings/ISOPE/ISOPE%202002/Volume4/4050p314.pdf> >, Acesso em: 05 jan 2012).

SCHAFER, D.; RINALDI, V.; BEG, D. **Optimisation and Improvement of the flame straightening Process (Optistraight)**. Luxembourg, p. 1- 152. 2012. (Disponível em:

< <http://www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2007/OPTISTRAIGHT/OPTISTRAIGHT.html> >, Acesso em : 15 jan 2014).

SCOTTI, A. **Geração de Tensões Térmicas em Soldagem: Tensões e Deformações Explicadas pelo Modelo de 5 Barras**. Recife=PE, p. 1 -9. 2013. (Disponível em : < <http://www.scielo.br/pdf/si/v19n1/a10v19n1.pdf> >, Acesso em: 12 dez 2014).

SEONG, W. J.; JEON, Y. C.; NA, S. J. **Ship-Hull Plate Forming of Saddle Shape by Geometrical Approach**. Journal of Materials Processing Technology. ELSEVIER www.elsevier.com, p. 1885-1893. 2013.

SHACKELFORD, J. F. **Introdução à Ciências dos Materiais para Engenheiros**. São Paulo: PEARSON Education do Brasil, 2011. 3ª. Edição, 2011, pág. 164. p.

SHINKAI, N.; TOMITA, Y.; OSAWA, N. **Experimental Study on Thermo-Flow Field During Gas Flame Heating**. ISOPE. [S.I.], p. 595-601. 2001. (Disponível em: < <http://www.isope.org/publications/proceedings/ISOPE/ISOPE%202001/pdffiles/papers/431.pdf> >, Acesso em: 12 jul 2012).

SMARTWELD. **Desktop Weld Optimization Software for automated welding**. [S.I.]. 2011. (Disponível em: < Desktop Weld Optimization Software for automated welding >, Acesso em: 12 jan 2012).

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Teoria da Elasticidade**. 3ª. Edição [1980], páginas 425-475. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1980.

TONKOVIC, Z.; PERIC, M.; SURJAK, I. **Numerical and Experimental Modeling of a T-joint Fillet Welding Process**. QIRT 11º International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Disponível em: www.ndt.net/article/qirt2012/papers/QIRT-2012-245.pdf. 2012. (Acesso 2015).

TUBINO, R. **Controle Estatístico Manutenção e Confiabilidade de Processos**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

VEGA, A. **Development of Inerent Deformation Database for Automatic Forming of Thick Steel Plates by Line Heating Considering Complex Heating Patterns**. OSAKA JAPON. 2009.

VEGA, A.; ALEXANDRA, C.; JUAN, B. **Numerical Analysis of the Staightening Process of Thin Plate Structures by Elastic FEM based on the Inherent Strain Method**. JWRI- Joiming and Welding Reasearch Institute. Osaka Universty - Japan, p. 61 - 67. 2012.

VILLANI, P.; MODENESI, P. **Algumas Equações Úteis em Soldagem**. UFMG. São Paulo-SP, p. 1 - 12. 2014. (Disponível em : < <http://www.scielo.br/pdf/si/v19n1/a11v19n1.pdf> >, Acesso em: 28 ago 2015).

VOESTALPINE. **steel ALFORM STRIP**. Germany disponível em: www.voestalpine.com/stahl/en/The-Steel-Division/Download. 2012.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **SOLDAGEM PROCESSO E METALURGIA**. São Paulo: EDGARD BLUCHER LTDA, 1992.

WANG, J.; RASHED, S.; MURAKAWA, H. **Investigation of Buckling Deformation of Thin Plate Welded Structures**. Osaka Japan. 2011. (<http://www.isopec.org/ocean&polarupdates/2011/11tpc-1105wang.pdf>. Aceso em 22/07/2014).

YU, G.; ANDERSON, R. J.; MAEKAWA, T. **Efficient Simulation of Shell Forming by Line Heating**. Cambridge , MA USA.: Pergamon- International Journal of Mechanical Sciences, 2001. ISBN [www. elsevier.com](http://www.elsevier.com).

APÊNDICE

TRABALHOS PUBLICADOS

REDUÇÃO DA INSPEÇÃO DIMENSIONAL EM PAINÉS NAVAIS COM O USO DE DISPOSITIVOS PARA CONTROLE DE DEFORMAÇÃO NA SOLDAGEM

Edson Fernando Pereira

11ª COTEQ – Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos de 10 a 13 de maio de 2011. Porto de Galinhas.

AUTOMATIZAÇÃO NA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS POR LINHA DE CALOR

Edson Fernando Pereira, Tiago Leite Rolim.

VII CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 31 de julho a 03 de Agosto 2012, São Luís – Maranhão.

PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS POR LINHAS DE CALOR.

Edson Fernando Pereira, Tiago Leite Rolim.

VII Feira e Congresso de Corte e Conformação de Metais de 01 a 04 de Outubro 2013 Expor Center Norte –São Paulo –Pavilhão Verde/Branco.

ANALISE E INSPEÇÃO DIMENSIONAL DAS DEFORMAÇÕES NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS POR LINHAS DE CALOR.

Edson Fernando Pereira

12ª COTEQ – Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos de 18 a 21 de Julho de 2013. Porto de Galinhas.

CONFORMAÇÃO DE CHAPAS POR LINHAS DE CALOR DO AÇO ASTM A 131 GRAU AH36 E SUA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Edson F. Pereira, Ricardo A. Sanguinetti Ferreira, Tiago L. Rolim.

21º CBECIMAT Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos materiais de 09 a 13 de Novembro 2014. Cuiabá- MT.

INSPEÇÃO DE CHAPAS NAVAIS APÓS APLICAÇÃO DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR LINHAS DE CALOR NOS ESTALEIROS

Edson F. Pereira¹, Ricardo A. Sanguinetti Ferreira², Tiago L. Rolim³.

18º Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção – 2014- São Paulo

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR LINHAS DE CALOR

Edson F. Pereira, Tetyana Gurova, Ricardo A. Sanguinetti Ferreira, Tiago L. Rolim.

13ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos de 15 a 18 de Julho 2015. Praia de Paiva, Ipojuca-PE.

PRÊMIO EDUARDO HENRIQUE ACIOLLY CAMPUS DE MELHOR TRABALHO TÉCNICO DO ESTADO DE PERNAMBUCO NO COTEQ 2015. COM O ARTIGO *“ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR LINHAS DE CALOR”*

EM ANÁLISE SUBMISSÃO A REVISTA SOLDAGEM E INSPEÇÃO DO ARTIGO *“ESTUDO DA CORREÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE SOLDAGEM PELO PROCESSO DE LINHA DE CALOR: COMPARAÇÕES ENTRE AS DEFLEXÕES”.*

Edson Fernando Pereira, Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, Tiago Leite Rolim. 2016.

ESTUDO DA MICROESTRUTURA DO AÇO NAVAL ASTM A-131 GRAU AH36 AQUECIDO ATÉ AS TEMPERATURAS DE CONFORMAÇÃO

Edson F. Pereira, Ricardo A. Sanguinetti Ferreira, Tiago L. Rolim, Yogendra Prasad Yadava, Paternak de Sousa Barros.

22º CBECIMAT Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos materiais de 06 a 10 de Novembro 2016. Natal- RN.

EM ANÁLISE SUBMISSÃO A REVISTA JOURNAL MARINE STRUCTURES

Experimental and Analytical Temperature Measurements in Naval Steel Plates processed by line

Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, Edson Fernando Pereira, Tiago Leite Rolim, Oscar Olímpio de Araújo Filho, Paternak Barros, Yogendra Prasad Yadava