



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS NAVAIS POR LINHAS DE CALOR
UTILIZANDO A TEORIA SIMPLIFICADA TERMO-ELÁSTICO-PLÁSTICA**

EDSON FERNANDO PEREIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim

Dissertação submetida à Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Recife – Pernambuco

Fevereiro 2012

“ESTUDO DA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS NAVAIS POR LINHAS DE CALOR
UTILIZANDO A TEORIA SIMPLIFICADA TERMO-ELÁSTICO-PLÁSTICA”

EDSON FERNANDO PEREIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERERO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE)

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)

Prof. Dr. FRANCISCO ILO BEZERRA CARDOSO (UPE)

Linhas de calor produzidas por uma chama oxiacetilênica podem conformar uma chapa plana de aço transformando-a em qualquer segmento curvo.

Edson Fernando 2011

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo dom da vida.

À minha esposa, Goreti, pelo incentivo.

Aos meus filhos Hugo e Felipe, pela compreensão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Leite Rolim, pela orientação e acompanhamento deste trabalho.

Aos professores Drs. Francisco Ilo, Ricardo Sanguinetti pelo acompanhamento

Ao PPGEM (Programa de pós-graduação em engenharia mecânica) pelo apoio e utilização dos instrumentos e equipamentos dos laboratórios.

Aos meus amigos do mestrado, Aníbal Correia, André Câmara pela ajuda

A todos que contribuíram direta e indiretamente, especialmente aos cunhados Paulo Jorge e Vicente Jorge.

RESUMO

Nos projetos dos navios modernos a geometria dos elementos do casco, especificamente proa e popa, é um fator preponderante, pois devem apresentar formas que favoreçam uma baixa resistência na movimentação dos navios nos mares garantindo um melhor desempenho nos deslocamentos. Atualmente, as formas curvas da proa e popa são projetadas por programas computacionais específicos de modelagem em três dimensões que determinam os diversos raios de suas curvaturas, servindo de orientação para o detalhamento de sua fabricação. O complexo processo de fabricação das chapas de aço com curvaturas específicas para proa e popa exige uma associação com diversos processos de conformação a frio, tais como o dobramento e a calandragem. Geralmente, os processos de conformação a frio não são capazes executar todas as operações de curvaturas. Então, necessariamente faz-se o uso do processo de linhas de calor para obter as curvas especificadas no detalhamento do projeto da proa e popa dos navios. O processo de conformação de chapas por linhas de calor consiste de um método que utiliza uma fonte de calor em movimento com o objetivo de provocar na região aquecida uma dilatação elástica e plástica que resulta em uma deformação permanente. Neste trabalho foram realizadas conformações em chapas por linhas de calor analisando-se seus mecanismos termomecânicos, assim como também utilizado um modelamento matemático para previsão do comportamento das deformações utilizando a teoria termo-elástico-plástica, como meio de minimizar as imprecisões nas formas finais ditadas em projeto. Para tanto, foi desenvolvida uma máquina semi-automática usada na simulação de experimentos de linhas de calor, onde foram controlados os parâmetros importantes no processo, tornando possível realçar a aplicabilidade de um sistema automatizado para aplicação prática das linhas de calor. Uma máquina de medição por coordenadas foi utilizada para obtenção dos perfis das linhas formadas pelas coordenadas de pontos transversais, antes e depois da aplicação do processo das linhas de calor, os quais foram comparados com aqueles previstos por um modelo matemático, concluindo-se que o método aplicado é capaz de prever as deformações provenientes pela aplicação de linhas de calor, obtendo assim, a confirmação de que a metodologia aplicada neste trabalho consegue representar de maneira satisfatória a deformação causada pela aplicação de linha de calor em chapas metálicas.

Palavras-chave: Conformação de chapas, Linhas de calor, Tensões termo-elástico-plástica, Tecnologia de Construção Naval

ABSTRACT

The geometry of the hull elements, specifically the bow and the stern, in the projects of modern ships, is an essential issue, because they should present shapes to promote a low resistance on the ships' movements at sea, ensuring better performance for shipping. Currently, the curved shapes of the bow and stern are designed by computer programs using specific modeling in three dimensions that determine the various aspects of their curvatures, in order to guide the detail of their manufacture. The complex manufacturing process of steel sheet with specific curvatures, for bow and stern, requires an association with several cold forming processes, such as bending and calendaring. Generally, cold forming processes cannot perform all operations of bends. So, it is necessary to use the heat lines process to get specified curves on the design detail of the bow and stern ship. The shaping of sheet by heat lines is a method that uses a moving heat source for which, on the heated area, plastic and elastic dilatation results in a permanent deformation. At this work, sheets were formed by heat lines by analyzing their thermomechanical mechanisms, as well as a mathematical modeling to predict the deformation behavior by using the theory of elasticity and plasticity, as a means to minimize inaccuracies at the final forms specified on the project. For this purpose, a semi-automatic engine was developed for the simulation of heat lines, where the significant parameters were controlled in the process, making it possible to enhance the applicability of an automated system for the practical application of heat lines. Then, a coordinate measuring machine was used to obtain profiles of the plates deformed by application of heat lines, which were compared with those predicted by the mathematical model, concluding that the method used is capable of predicting the deformations derived by applying the heat lines, thereby obtaining the confirmation that the methodology applied in this work can represent in a satisfactory way the deformations caused by application of the heat line in metal sheets.

Keywords: Forming of plates, heat lines, stress thermo-elastic-plastic, Shipbuilding Technology

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	X
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	1
1.2. MOTIVAÇÃO.....	1
1.3. OBJETIVOS	2
1.4. JUSTIFICATIVA	3
1.5. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	3
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO NAVAL	5
2.1.1. OS NAVIOS E NOMENCLATURA DE UM NAVIO	5
2.1.2. UMA EXPOSIÇÃO DAS CHAPAS DA PROA DE NAVIO EM CONSTRUÇÃO	8
2.1.3. O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAINÉIS CURVOS NOS ESTALEIROS	10
2.2 UMA BREVE HISTÓRIA DAS PESQUISAS SOBRE A LINHA DE CALOR	14
2.3. AS DEFORMAÇÕES E TENSÕES RESIDUAIS NA LINHA DE CALOR	18
2.3.1. EXPANSÃO TÉRMICA DO METAL.....	18
2.3.2. TENSÕES TÉRMICAS NO AQUECIMENTO ASSIMÉTRICO.	19
2.3.3. DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES TÉRMICAS RESIDUAIS.	20
2.4. MODELO DAS TENSÕES TÉRMICAS PARA LINHA DE CALOR	23
2.4.1 TEORIA SIMPLIFICADA TERMO-ELÁSTICA-PLÁSTICA PARA DEFORMAÇÃO EM CHAPAS METÁLICAS	25
2.5. LINHA DE CALOR (GERAÇÃO, DISTRIBUIÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR)	28
2.5.1. CARACTERÍSTICAS DOS GASES ACETILENO E OXIGÊNIO	29
2.5.2. AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DA CHAMA OXIACETILÊNICA.....	30
2.5.3. FLUXO DE CALOR DA CHAMA OXIACETILÊNICA	32
2.5.4. GRADIENTES DE TEMPERATURAS.....	34
2.5.5. MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	37
2.5.6 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR NO CALORÍMETRO.	40
2.5.7 CONSIDERAÇÕES METALÚRGICAS DO AÇO NAVAL	42
2.5.8 ANISOTROPIA	46
3. METODOLOGIA	47
3.1. MATERIAIS	47
3.1.1. MATERIAIS DAS AMOSTRAS DE CHAPAS.....	47
3.1.2. CONSUMÍVEIS PARA AQUECIMENTO.....	47
3.2 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS	47
3.2.1 EQUIPAMENTOS PARA O SISTEMA DE GERAÇÃO DE CHAMA OXIACETILÊNICA	48
3.2.2 EQUIPAMENTOS PARA O CONTROLE DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA CHAMA	48
3.2.3 EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES INICIAIS E FINAIS DAS AMOSTRAS DE CHAPA.....	49
3.2.4 INSTRUMENTO PARA VISUALIZAÇÃO EM TEMPO REAL DAS DEFORMAÇÕES	49
3.2.5 INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO DO DIFERENCIAL DE TEMPERATURA DE ENTRADA E SAÍDA DE ÁGUA	49
3.2.6 EQUIPAMENTO PROTÓTIPO DE APLICAÇÃO DE LINHAS DE CALOR	50
3.3. MÉTODOS	55
3.3.1. EXPERIMENTO.....	55
3.3.2. DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR NO CALORÍMETRO.....	56
3.3.3. MEDIÇÃO DAS AMOSTRAS NA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	57
3.3.4. ROTEIRO PARA APLICAÇÃO DA LINHA DE CALOR NAS AMOSTRAS DE CHAPAS.....	59

3.3.5. MONTAGEM DOS TERMOPARES INFERIOR E SUPERIOR NA AMOSTRA DE CHAPA.....	59
3.3.6. MONTAGEM DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA	60
3.3.7. POSICIONAMENTO DAS AMOSTRAS NA MÁQUINA DE SIMULAÇÃO DE LINHA DE CALOR.....	61
3.3.8. SISTEMA PARA APLICAÇÃO DA LINHA DE CALOR NAS AMOSTRAS DE CHAPAS	61
3.3.9. SISTEMA PARA A VISUALIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM TEMPO REAL	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
4.1. DADOS DO GRADIENTE DE TEMPERATURA.....	64
4.2. ORGANIZAÇÃO DOS DADOS COLETADOS.	65
4.3. PADRÃO GRÁFICO PARA DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE DEFORMAÇÃO.	67
4.4. DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO FORMADO ENTRE A CHAPA CRUA E QUEIMADA	67
4.6. REGIÃO DA ZONA DE DEFORMAÇÃO RESIDUAL.	75
5. CONCLUSÕES	76
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
7. REFERÊNCIAS.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Desenho esquemático com as nomenclaturas naval LINO (2011)	6
Figura 2- Detalhe da curvatura das chapas da proa de um navio S.W.S. (2011).....	7
Figura 3- Arranjo das chapas da proa	8
Figura 4- Tipos de chapas conformadas.	9
Figura 5- Detalhe do processo de calandragem em chapa NSNET (1998).....	11
Figura 6- Detalhe da chapa com uma curvatura NSNET (1998).....	11
Figura 7- Detalhe de aplicação de linha de calor NSNET (1998)	11
Figura 8- Detalhe de um conjunto de chapas conformada por linhas de calor NSNET (1998)	12
Figura 9- Detalhe de montagem de chapas conformadas NSNET (1998)	12
Figura 10- Um layout da produção em um estaleiro.....	13
Figura 11- Cronograma de evolução e os pesquisadores de linha de calor.....	16
Figura 12- Placa retangular sujeita a um ciclo térmico	19
Figura 13 (a) e (b) - Diagrama de Montagem de três barras, MARQUES [2007].	21
Figura 14- Diagrama esquemático das tensões internas em função da temperatura, MARQUES [2007].	22
Figura 15- Adaptado do artigo de HSIAO (1997).	23
Figura 16 (a); (b); (c) e (d)- Ação cinemática de linha de calor, CLAUSEN (2000)	24
Figura 17- Esquema da linha de calor.....	25
Figura 18 (a) e (b) - Disco circular proposto por JANG <i>et al.</i> (1997)	26
Figura 19- Chapa deformada e ângulo de deformação JANG <i>et al.</i> (1997)	27
Figura 20- Esquema da geração, distribuição e transferência de calor.....	28
Figura 21- Variação da temperatura em função da distância, DEMEC. UFPR (2010)	30
Figura 22- Tipo de chamas: oxidante, neutra e redutora, adaptado do LINDE (2010)	31
Figura 23- Gradiente de temperatura na forma gaussiana GLIZMANENKO (1960)	32
Figura 24- Distribuição gaussiana, adaptado de GLIZMANENKO (1960).....	33
Figura 25- Experimento da distribuição de temperatura na superfície da chapa.....	34
Figura 26- Distribuição de temperatura sobre o topo da superfície da chapa, YU (2000).....	35
Figura 27- Fonte de calor em movimento constante, adaptado, ROSENTHAL (1946).	36
Figura 28- Diagrama de transferência para linha de calor.....	37
Figura 29- Gráfico do coeficiente de transferência de superfície verso temperatura de superfície CLAUSEN (2000)	40
Figura 30- Esquemático, KOU (2003), para um calorímetro mássico.	41
Figura 31- Diagrama TTT de um aço semelhante ao ASTM A-131, PILIPENKO (2001)	42
Figura 32- Designações, JANG <i>et al.</i> (1997), da região da zona de deformações residuais.	44
Figura 33- Esquema principal do protótipo de máquina de linha de calor.....	50
Figura 34- Acionamento elétrico do carro porta maçarico com controle de velocidade.	51
Figura 35- Carro porta maçarico móvel com o dispositivo de fixação do maçarico de aquecimento.	52
Figura 36- Apresentação do Sistema de gases oxigênio e acetileno.	52
Figura 37- Apresentação dos Acessórios do sistema de aquecimento.	53
Figura 38- Apresentação do Sistema de água de resfriamento.	54
Figura 39- Apresentação do Experimento com o calorímetro.	56
Figura 40- Esquema de medição das amostras na máquina de medidas por coordenadas.	57
Figura 41- Detalhe da medição no plano XY, no sentido y, na condição crua.	58
Figura 42- Detalhe da medição no plano XY, no sentido y, na condição queimada.....	58
Figura 43- Detalhe da soldagem do termopar na chapa.	60
Figura 44- Detalhe do conjunto de equipamento para coleta de dados, de temperatura.	60
Figura 45- Detalhe do posicionamento da amostra de chapa bi apoiada.....	61
Figura 46- Apresentação do Experimento com o esquema inicial da aplicação da linha de calor.	62
Figura 47- Apresentação do Experimento com a verificação da deformação em tempo real.....	63
Figura 48- Gráfico do gradiente de temperatura x tempo para chapa de 16 mm	64
Figura 49- Esquema para organização dos dados coletados.....	65
Figura 50- Padrão gráfico dos perfis transversais para ângulo de deformação	67
Figura 51- Gráfico da chapa espessura 8,0 mm crua e queimada na seção 25,0 mm	68
Figura 52- Gráfico da chapa espessura 8,0 mm crua e queimada na seção 55,0 mm	68
Figura 53- Gráfico da chapa espessura 8,0 mm crua e queimada na seção 75,0 mm	68
Figura 54- Interpretação das deformações inicial e final para chapa espessura 8,0 mm.	69
Figura 55- Gráfico da chapa espessura 12,7 mm crua e queimada na seção 35,0 mm	70

Figura 56- Gráfico da chapa espessura 12,7 mm crua e queimada na seção 65,0 mm	70
Figura 57- Gráfico da chapa espessura 12,7 mm crua e queimada na seção 95,0 mm.	70
Figura 58- Interpretação das deformações inicial e final para chapa espessura 12,7 mm.	71
Figura 59- Gráfico da chapa espessura 16,0 mm crua e queimada na seção 15,0 mm.	72
Figura 60- Gráfico da chapa espessura 16,0 mm crua e queimada na seção 45,0 mm.	72
Figura 61- Gráfico da chapa espessura 16,0 mm crua e queimada na seção 90,0 mm.	72
Figura 62- Interpretação das deformações inicial e final para chapa espessura 16,0 mm.	73
Figura 63- Região da zona de deformação residual.....	75

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do tema

A história das embarcações é paralela às histórias de aventuras dos seres humanos. Os grandes descobrimentos de novas terras estão associados ao uso das caravelas como meios de transporte. Segundo BRITO (2009), o transporte de pessoas entre os continentes, no século passado, está associado aos navios movidos a vapor. Atualmente, o transporte de cargas está associado aos navios de grande capacidade. De modo geral, navio é qualquer embarcação que transporte carga ou pessoas com objetivo comercial. Existem vários tipos de navios com características específicas em função da sua finalidade

O Brasil já foi um dos maiores construtores navais do mundo no fim dos anos 1970, afirma MARIANO (2010). Atualmente às perspectivas delineadas sugerem uma fase de crescimento vigoroso da produção de navios e plataformas graças não só a fatores conjunturais como o programa de modernização da frota, mas especialmente em função das possibilidades abertas pela descoberta das reservas de petróleo no pré-sal e pela exigência crescente da produção nacional de petróleo.

Para atender essa demanda os estaleiros brasileiros que buscam uma capacitação técnica, aumento da produtividade e eficiência na construção de embarcações de altíssimo nível de qualidade, necessitam que profissionais envolvidos tenham um entendimento dos processos de fabricação naval e contribuam para o desenvolvimento tecnológico da indústria naval em diversos setores.

1.2. Motivação

A geometria da proa, em navios antigos eram de forma triangular e reta. Com a evolução tecnológica, a proa foi modificada para formas curvas e sinuosas, geralmente na forma de um bulbo para melhorar o desempenho de avanço no mar, favorecendo uma importante redução no consumo de combustível.

Atualmente, nos projetos de navios são utilizadas ferramentas computacionais para cálculo estrutural e de desenho das formas geométricas da proa e popa, cujo fundamento é garantir a sinuosidade entre as diversas regiões curvas e elevação das qualidades náuticas reduzindo da resistência hidrodinâmica e aumentando a mobilidade e estabilidade dos navios modernos.

Na fabricação das peças com geometrias curvas, são utilizados os processos de conformação por dobramento e calandragem, os quais, não são capazes de conformar chapas com grandes variações das curvaturas, principalmente as curvas duplas e reversas.

Neste contexto entra o processo de conformação de chapas por linhas de calor, que é uma ferramenta de grande importância na obtenção da forma final das peças, o qual consiste de um método que utiliza uma fonte de calor em movimento com o objetivo de provocar na região aquecida uma dilatação elástica e plástica que resulta em uma deformação permanente na chapa de aço. Este processo, apesar das vantagens de sua aplicação, apresenta dificuldades de aplicação por conta da dificuldade no controle dos parâmetros envolvidos assim como também, a falta de automatização na aplicação das linhas de calor, ficando a qualidade das peças fabricadas na dependência da experiência do operador.

1.3. Objetivos

Objetivo geral

Estudar a conformação de chapas navais por linha de calor utilizando a teoria simplificada termo-elástica-plástica.

Objetivos específicos:

- Desenvolver um protótipo para realizar experimentos de aplicação de linha de calor em amostra de chapas;
- Determinar o fluxo de calor do processo por chama oxiacetilênica utilizando um calorímetro;
- Automatizar o processo de aplicação de linha de calor, para controle da velocidade de deslocamento da chama, indicação visual das deformações sofridas pelas amostras de chapa.
- Automatizar as indicações das temperaturas atingidas na parte superior e inferior da amostra de chapa durante o processo de aquecimento
- Automatizar e controlar a vazão de água de resfriamento durante a aplicação da linha de calor.
- Realizar aplicações de linhas de calor nas amostras de chapas de espessuras 8,0 mm; 12,7 mm e 16,0 mm;
- Avaliar as deformações iniciais e finais das amostras de chapas através de uma máquina de medição por coordenadas;
- Obter os ângulos de deformações geometricamente das amostras de chapas;

- Aplicar o método analítico proposto por JANG *et al.* (1997) para comparar com os resultados experimentais;

1.4. Justificativa

No trabalho realizado por VAZ (2010), onde é feito um estudo comparativo entre o método analítico e numérico do processo de curvatura de chapas através da aplicação de linhas de aquecimento, usando uma metodologia proposta por JANG *et al.* (1997) representa um trabalho na linha de raciocínio a que está sendo proposto neste trabalho. Entretanto, novas sugestões como: o projeto de um sistema automatizado para controle dos parâmetros de aplicação da linha de calor, medição do fluxo de calor através de um calorímetro, fazem com que os resultados obtidos sejam satisfatórios. Desta forma, confirma que a metodologia aplicada neste trabalho consegue representar de maneira satisfatória a deformação causada pela aplicação de linha de calor em chapas metálicas.

1.5. Desenvolvimento do trabalho

Todos os estaleiros mundiais fazem uso do processo das linhas de calor para conformação das chapas de aço da proa e popa com uma característica peculiar: a sua operacionalização é realizada de forma manual. Deste modo, o método de aplicação das linhas de calor na chapa de aço para atingir as formas curvas projetadas depende exclusivamente das habilidades dos operadores na sua execução, gerando muitos retrabalhos e imprecisões.

Para o presente trabalho foi desenvolvida uma máquina semi-automática para simulação dos experimentos com linhas de calor, na qual podem ser controlados os parâmetros: velocidade de deslocamento da tocha, a posição da tocha, utilização de um calorímetro para determinar o aporte térmico aplicado, sistema de resfriamento, medição do fluxo de água para resfriamento, medição de temperatura, afastamento da tocha em relação à amostra da chapa, tipo e diâmetro do bico de aquecimento, regulagem da pressão de saída dos gases oxigênio e acetileno, distância da fonte de calor ao bico de saída de água de resfriamento, espessura da amostra de chapa.

Aplicação de um modelo matemático simplificado, proposto por JANG *et al.* (1997), que trata da previsão do comportamento da deformação de chapas através das linhas de calor, foi utilizado para comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Uma máquina de medição por coordenadas tridimensional foi utilizada na medição das chapas antes e depois da aplicação das linhas de calor.

1.6. Estrutura do trabalho

Seguindo a seqüência de atividades descritas anteriormente, os capítulos seguintes desta dissertação estão dispostos dessa maneira.

No segundo capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os aspectos gerais da construção naval como: os navios e nomenclatura do navio, os tipos de chapas encontradas na proa e popa do navio, o processo de fabricação com a ênfase em painéis curvos da popa e proa e aplicação de linhas de calor para conformação.

Também, foi apresentado um breve histórico da evolução do processo de linhas de calor e as técnicas que vem sendo estudadas por pesquisadores de renome internacional, suas dificuldades e as suas expectativas. Seguindo, uma visão da linha de calor, em dois aspectos: quanto às deformações e tensões residuais e quanto ao fluxo de calor, seus princípios básicos do processo térmico, as propriedades térmicas do aço naval, das deformações decorrentes do aquecimento localizado e do controle de deformações.

Continuando, foi tratada a fundamentação teórica do processo por linhas de calor, os procedimentos que regem a previsão do comportamento da conformação de chapas de aço que são basicamente de mecanismos termomecânicos como: fonte de calor com chama oxiacetilênica em movimento linear constante, determinação de aporte térmico da chama, troca de calor da chama com o meio por convecção forçada e radiação, transiente tridimensional de condução térmica na chapa, variações físicas e mecânicas do material da chapa em função da temperatura, expansão e deformações plásticas permanentes da chapa.

No terceiro capítulo foi explanado sobre a análise experimental e analítica das linhas de calor, metodologia, descrições do método experimental utilizado para verificar a aplicação da linha de calor necessária para atingir os objetivos.

No quarto capítulo foram apresentados os resultados e discussões onde são apresentados os gráficos de comparação entre os resultados obtidos através do método experimental e de análise analítica, com o objetivo de avaliar e discutir suas vantagens e desvantagens.

As conclusões são apresentadas através da discussão dos resultados obtidos, destacando-se a viabilidade o uso do processo de conformação de chapas de aço por linhas de calor. Finalizando, seguem um capítulo com as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO NAVAL

Um estaleiro se caracteriza por ser uma indústria metal mecânica de grande porte, devido ao alto volume de processamento de aço. Segundo, SALOMÃO (2010), no seu artigo comenta que, que um estaleiro deve buscar o que existe de melhor no setor em tecnologia naval, investir em equipamentos e programas computacionais de última geração, também, fazer parcerias com importantes fabricantes internacionais de navios, para transferências de tecnologia de processos de fabricação naval.

Os altos investimentos em máquinas e equipamentos objetivam a redução do tempo de fabricação de estruturas navais, para uma maior produtividade, associado a uma demanda de mão-de-obra altamente especializada nos setores de corte de chapas, conformação de chapas, montagem de estruturas, soldagem e edificações de estruturas.

As instituições de ensino e de pesquisa devem formar profissionais nas diversas áreas do conhecimento naval, que segundo, CARDOSO (2009), abrange a área de soldagem e de processos correlatos, como; a conformação de chapas por linhas de calor.

Este trabalho, além de divulgar o processo de fabricação naval, especificamente na fabricação de painéis curvos com a utilização de linhas de calor para conformação de chapas, visa, também, motivar futuros profissionais para atuarem na área de processo de fabricação naval, divulgando o entendimento do processo de linha de calor.

2.1.1. Os navios e nomenclatura de um navio

Segundo FONSECA (2005), um navio é uma grande embarcação, composta estruturalmente de diversas partes; a proa (avante do navio), o casco (ao longo do navio), a popa (à ré do navio), superestrutura (Cabines e alojamento), os compartimentos de cargas, a praça de máquinas, as caldeiras, entre outras.

Cada navio tem sua modalidade específica de trabalho. Podemos citar, por exemplo, um navio petroleiro com capacidade para transportar grandes quantidades de produtos derivado de petróleo de uma região para outra, seu projeto estrutural, consiste de uma forma geométrica do casco modelada para conter grandes tanques de armazenamento.

As características técnicas básica de um navio petroleiro são a capacidade de carga, as dimensões geométricas como: calado (parte submersa), boca (largura), comprimento

total, pontal (altura lateral), comprimento entre tangente (comprimento da proa ao leme), na figura 1 está apresentada com mais detalhes as nomenclatura. LINO (2011) apresenta alguns termos técnicos navais mais utilizados neste trabalho e que facilitará a compreensão das características e nomenclatura específica utilizada nos navios.

A construção de navios envolve determinadas normas de projetos e certificadoras navais nacionais e internacionais. O casco do navio é geralmente projetado para ter uma melhor condição de qualidade hidrodinâmica, cuja característica principal é a navegabilidade, resistência mínima ao avanço no mar e a estabilidade.

Atualmente, os petroleiros dividem-se entre navios de um só casco e os de casco duplo. Nos primeiros, o próprio casco do navio é também a parede dos tanques de petróleo, enquanto nos navios de casco duplo duas paredes de aço separadas cumprem cada uma destas funções a de tanque de óleo e de lastro (Tanque específico projetado lateralmente para armazenar água do mar e equilibrar o navio). As normas internacionais estabeleceram uma legislação para que todos os petroleiros de casco simples devam ser transformados em duplo casco, para garantir que não haja derramamento de óleo no mar quando ocorrer uma colisão entre navios.

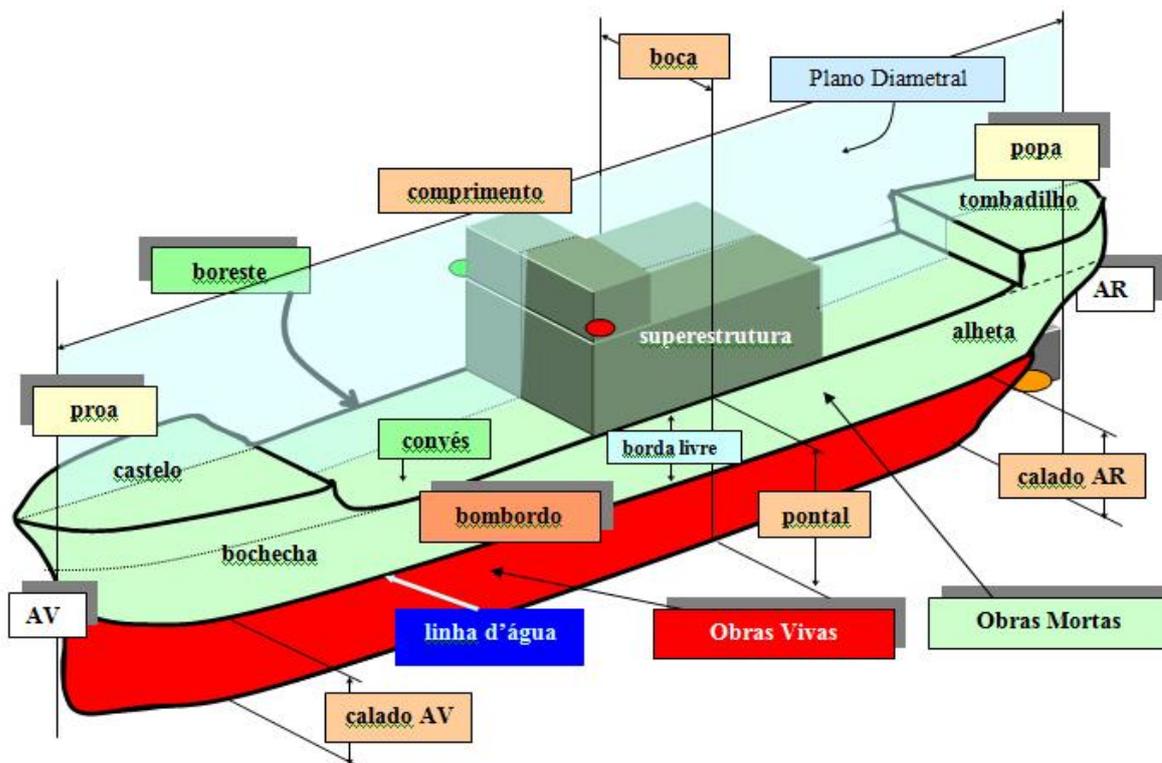


Figura 1- Desenho esquemático com as nomenclaturas naval LINO (2011)

Segundo LINO (2011) a proa de um navio é a parte anterior do navio no sentido de sua marcha normal. Tem a forma exterior adequada para mais facilmente fender o mar.

Enquanto que a popa é a parte posterior do navio. Tem a forma exterior adequada para facilitar a passagem dos filetes líquidos que vão encher o vazio produzido pelo navio em seu movimento, a fim de tornar mais eficiente à ação do leme e do hélice.

Na figura 2 está apresentando um detalhe da curvatura das chapas da proa de um navio de grande porte, onde se observa uma grande torção das chapas.



Figura 2- Detalhe da curvatura das chapas da proa de um navio S.W.S. (2011)

2.1.2. Uma exposição das chapas da proa de navio em construção

Num projeto de uma embarcação podem ser especificados vários tipos de chapas com curvaturas específicas para formar a geometria da proa do navio. Dentre as mais usadas podem ser citadas: chapas de simples curvatura, chapas de duplas curvaturas, chapas de curvaturas reversas, chapas tipo setor de cone, chapas torcidas, chapas tipo cilíndricas, chapas semi-curvas, entre outras. Na figura 3 está apresentando um arranjo de chapas da proa de um navio específico de pequeno porte.

Segundo MACHADO (2007) que fez um levantamento das chapas do costado de um petroleiro, dependendo do seu tamanho, pode-se encontrar; 224 peças de chapas planas, localizadas na região do casco; 76 peças de chapas com dupla curvatura, localizados na região entre o casco e a regiões da proa e popa e 36 peças chapas de triplas curvaturas, totalmente na região da proa e popa. Ainda complementa que: 11 % das chapas são chapas curvas e que no Japão gasta-se 6,9 horas homens por chapa curvada por linha de calor 2,7 horas homens por chapa conformada a frio.

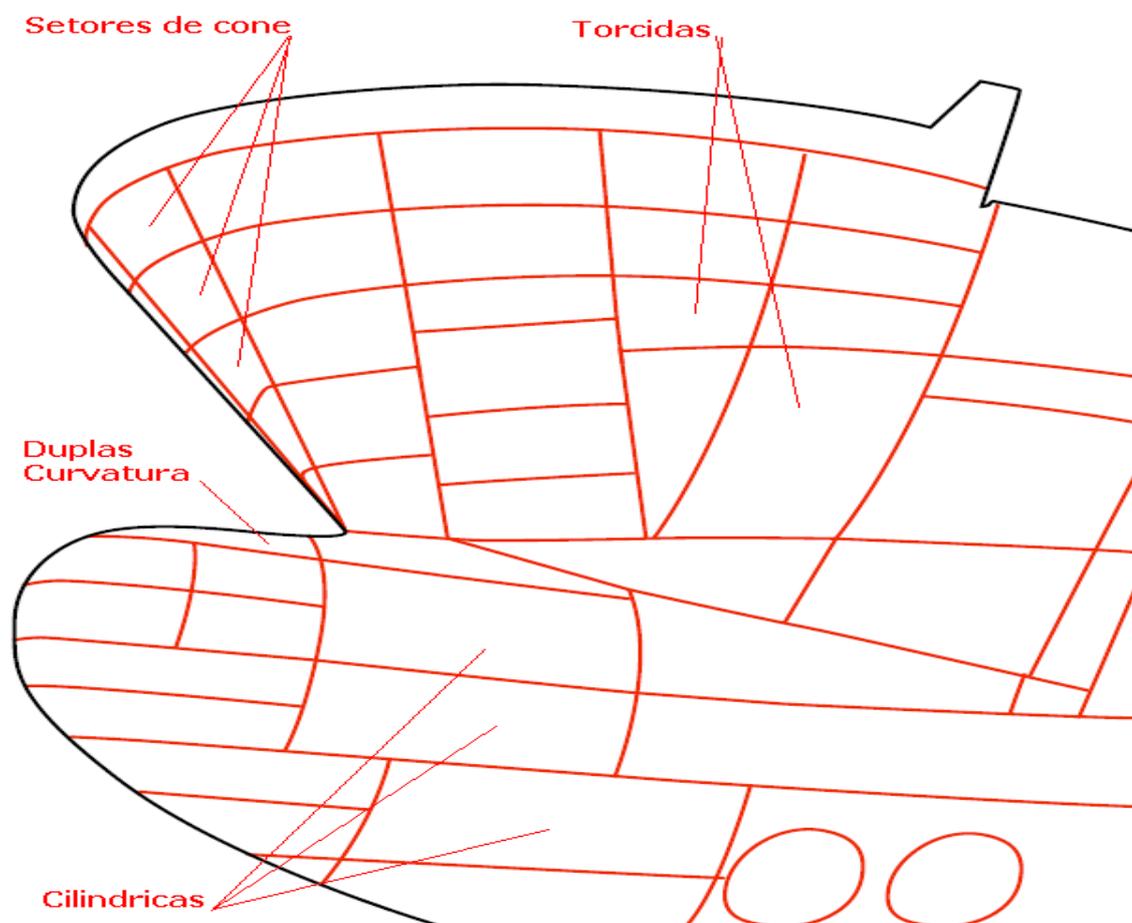


Figura 3- Arranjo das chapas da proa.

Uma classificação das diversas chapas quanto a conformação é apresentada por GORDO (2003). A figura 4 apresenta uma adaptação dos diversos tipos de chapas conformadas para se entender o processo de fabricação associado as conformações. Chapas Semi-esféricas ou côncavas que corresponde a uma chapa conformada uniformemente em todas as direções, muito utilizada em calotas de esfera, chapas cilíndricas as quais podem ser com e sem flecha. As com flecha subdividem-se em conchas ou em sela. Chapas torcidas caracterizam-se por as bainhas e os topos não serem paralelos.

Entende-se por bainhas o lado do comprimento da chapa e o topo o lado da largura da chapa; chapas cônicas ou setores de cones derivam da planificação de cones e as chapas semicurvas.

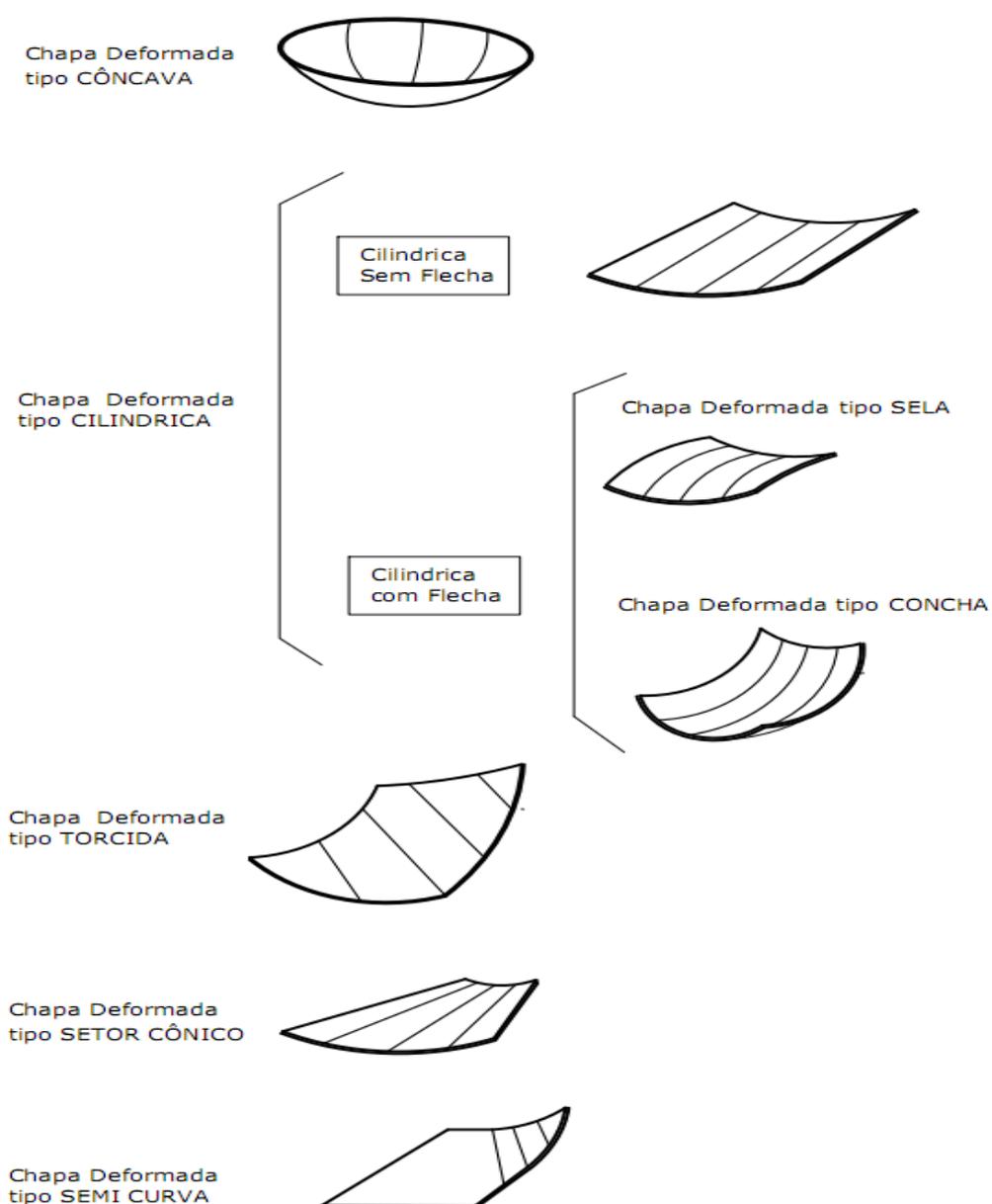


Figura 4- Tipos de chapas conformadas.

2.1.3. O Processo de fabricação de painéis curvos nos estaleiros

O processo de fabricação de painéis curvos no estaleiro inicia-se no estoque de matéria prima, onde, as chapas são selecionadas de acordo com sua espessura, largura e comprimento e enviadas para a seção de desempenos e estreitamento das chapas.

No setor de desempenho e estreitamento de chapas, são realizadas as correções das chapas que sofreram distorções e empenos causados pelo transporte e armazenamentos. Sendo este trabalho realizado por um laminador de rolos composto de uma série de rolos seqüenciais que visa à eliminação das imperfeições das chapas. Logo após, as chapas são enviadas para a seção de jato para retirar os óxidos de corrosão e executar uma pintura superficial resistente ao desgaste do processo fabril. Logo após, inicia-se o processo de corte ou esquadrejamento das chapas que visa cortar através dos sistemas térmicos como oxicorte, plasmas ou laser; comandados por sistemas de controle numérico por computador, as peças necessárias a fabricação. Após o corte, nas peças são marcadas com a identificação de desenhos, de posições para montagens ou enviadas para outros processos.

O processo de conformação de painéis curvos consiste em modificar a forma plana das chapas para formas especiais como: chapas de curvatura simples, chapas de curvaturas duplas, chapas de curvaturas reversas e chapas torcidas, entre outras.

A conformação de painéis curvos tem duas importantes variantes: a conformação mecânica e a conformação térmica. A conformação mecânica é realizada por prensas e calandras, enquanto que, a conformação térmica é realizada por uma chama oxiacetilênica, que segundo MARQUES (2007) é o resultado da queima do gás acetileno com o gás oxigênio provocando uma liberação de calor. Parte desse calor é transferida para a chapa aquecendo-a localmente e logo após recebe um resfriamento por água. Doravante denominaremos de linha de calor.

Em determinadas situações, que exigem conformação de chapas de grandes dimensões com curvaturas diferentes, na mesma chapa, e não existir equipamentos e máquinas adequados para executar a conformação, muitas vezes é necessário realizar operações de conformações combinadas. Na conformação mecânica e térmica combinada, a mecânica consiste no emprego de prensas ou calandras, conforme está apresentada na figura 5, com o intuito de pré conformar as chapas em uma curvatura simples, conforme a figura 6, para facilitar a conformação térmica. Já, a conformação térmica se baseia no princípio da deformação do material por aplicação de linhas de calor para complementar o processo de curvatura. Conforme se observa na figura 7, uma aplicação de linha de calor,

em uma chapa pré-conformada mecanicamente por calandra, onde se destaca o aquecimento por chama e simultaneamente a aplicação do resfriamento por água na seção transversal média da chapa curva com o objetivo de fabricar uma chapa do tipo concha.



Figura 5- Detalhe do processo de calandragem em chapa NSNET (1998)



Figura 6- Detalhe da chapa com uma curvatura NSNET (1998)



Figura 7- Detalhe de aplicação de linha de calor NSNET (1998)

Observa-se na figura 8, um conjunto de chapas de várias dimensões, com uma conformação do tipo concha, onde, se destacam as aplicações laterais de linhas de calor. Destaca-se pelas setas, que os raios internos nas extremidades de cada chapa são diferentes, além, de uma leve curvatura no comprimento. Entretanto, na figura 9, está apresentada a montagem do conjunto de chapas conformadas em um bloco. A importância da aplicação das linhas de calor nesta seqüência de fabricação, apresentada, foi fundamental, pois, as chapas de grandes dimensões com curvaturas diferentes para garantia de uma perfeita concordância na sua montagem.

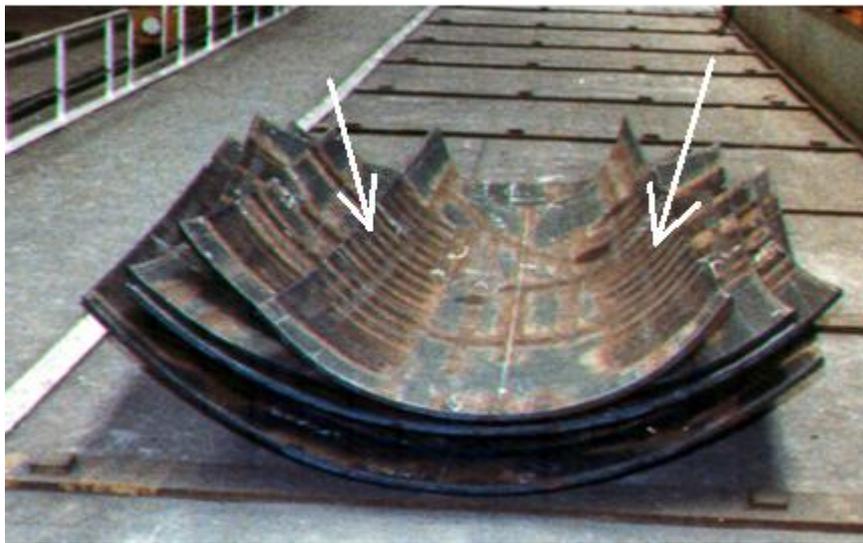


Figura 8- Detalhe de um conjunto de chapas conformada por linhas de calor NSNET (1998)

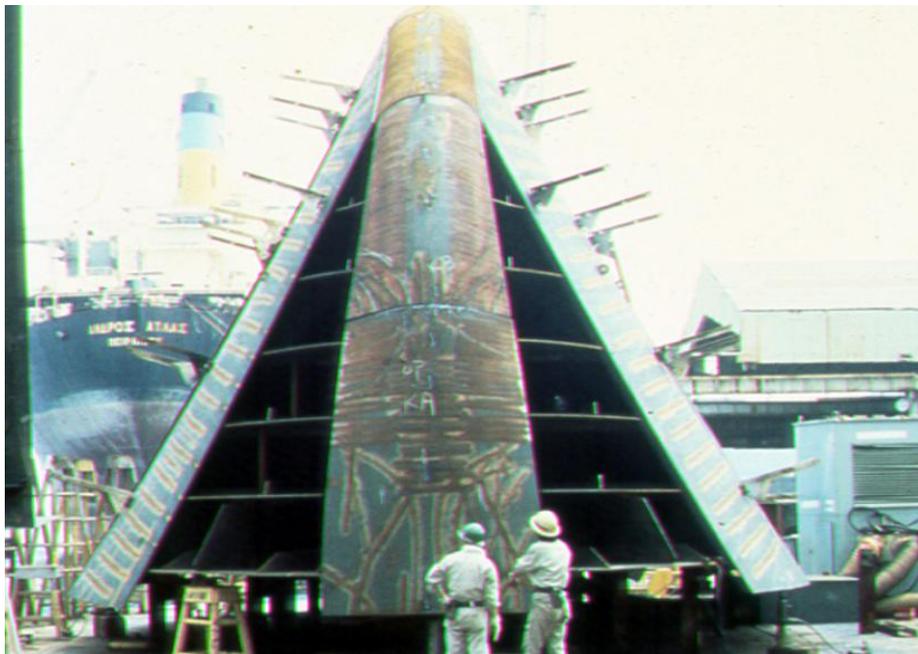


Figura 9- Detalhe de montagem de chapas conformadas NSNET (1998)

Na figura 10, tem-se um fluxo de fabricação de um estaleiro, onde se destaca com as seqüências de setas, a linha de fabricação de painéis curvos, adaptado do artigo de STUPELLO (2010). As chapas que necessitam de curvaturas específicas são enviadas para um setor de conformação de painéis curvos. Neste setor, dispõem de prensas e calandras de grande porte, além de uma mesa de conformação a quente, com placas de furos quadrados em ferro fundido onde são posicionadas e fixadas as chapas que receberão as linhas de calor. Além de todos os equipamentos necessários ao aquecimento e resfriamento.

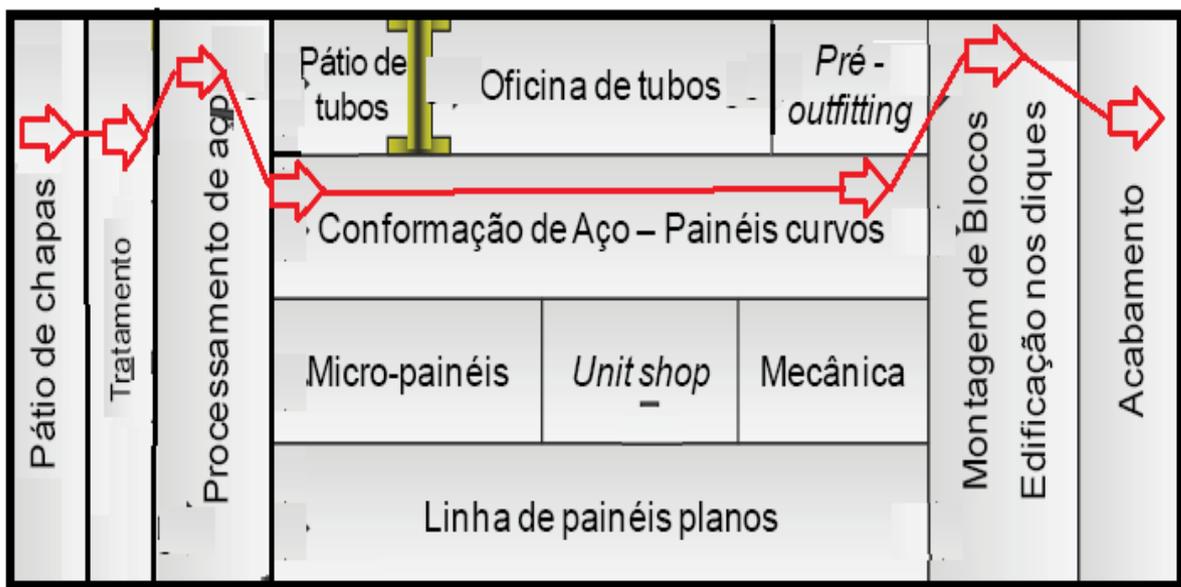


Figura 10- Um layout da produção em um estaleiro.

A seqüência posterior à conformação é a montagem do conjunto das chapas com a soldagem final das peças. A soldagem é o principal processo utilizado, pois a indústria naval executa soldas entre chapas, solda de painéis retos ou curvos, solda de subconjuntos, executa montagem de blocos, montagem de estruturas.

A escolha do processo de soldagem deve considerar os requisitos dos projetos, principalmente as normas aplicáveis de soldagem.

No transporte interno de produtos tais como; chapas, blocos, sub-montagem e edificações no estaleiro são utilizados vários equipamentos tais como; guindastes, esteiras, elevadores, pontes rolantes, pórticos, etc.

No quesito transporte interno, a condição de blocos maiores com um adequado dimensional e acabamento faz aumentar a produtividade dos estaleiros.

2.2 UMA BREVE HISTÓRIA DAS PESQUISAS SOBRE A LINHA DE CALOR

A história das pesquisas de linha de calor, os avanços nas práticas operacionais e nos métodos que ajudam a compreender parte do mecanismo são encontrados em duas vertentes: pela análise numérica térmica e pela análise estrutural. Na análise térmica os deslocamentos das chapas são produzidos em função do fluxo de calor e do gradiente de temperatura, enquanto que na análise estrutural os deslocamentos das chapas são produzidos em função das deformações e tensões residuais.

Em ambas, as linhas de pesquisas, as análises foram desenvolvidas por elementos finitos, entretanto, o conceito da análise estrutural por deformações e tensões residuais é mais evidenciado entre os pesquisadores, pela sua precisão e eficiência nos resultados.

Até hoje, poucos pesquisadores têm abordado o tema de pesquisa sobre a linha de calor no sentido de buscar um melhor controle do processo. HASHIMOTO (1958) e em HASHIMOTO (1961), apresentaram artigos técnicos sobre a conformação por linhas de calor no congresso da sociedade naval japonesa com o título sugestivo de uma nova técnica, que constituía basicamente um manual de operação sobre conformação de chapas.

A operacionalização da linha de calor evoluiu e se tornou prática recomendada para conformação de chapas com duplas curvaturas, principalmente após estudos de fatores significantes como: determinação da distância entre a tocha e a chapa de aço, variáveis de fluxo e razão do gás oxigênio/acetilênico, velocidade da tocha, e método de resfriamento o qual alavancou o uso do processo em diversos estaleiros mundiais. Contudo, sabia-se que era uma prática pouco eficiente e onerosa. Poucos caldeireiros eram especialistas nessa operação, entretanto, não se entendiam os fenômenos físicos do processo.

Um estudo sobre a fragilização de um aço naval foi realizado por KIHARA, H. (1973), que nos experimentos, utilizando a região aquecida, uma temperatura acima da transformação de fase 723°C , no processo de linha de calor, o aço naval mostrou-se bastante fragilizado.

Uma pesquisa encomendada pelo departamento de transporte dos Estados Unidos para entendimento da linha de calor, seus fundamentos e divulgação das práticas utilizadas nos estaleiros foi solicitada a CHIRILLO (1982), que após a realização dos estudos e divulgação dos processos houve uma redução, cerca de 40%, da quantidade de horas gastas na indústria naval. Foi criado um manual com diversos engenheiros e construtores de navios para entendimento dos fatores do processo. Quanto à mecanização e automação abordou o tema de controle e manutenção da constância de fatores críticos como: regulação

da distancia entre a tocha e a chapa, tipos de gás, regulagem da vazão dos gases acetileno e oxigênio, regulagem do fluxo de água de resfriamento e controle da velocidade de deslocamento da fonte e calor. Quanto ao grau de curvatura obtido em cada aplicação de linhas de calor abordou o tema do grau de tensão mecânica nas chapas depois da aplicação da linha de calor, o ângulo de deformação, a espessura, o tipo de material, etc. Quanto ao grau de deformação abordou os fatores determinantes do fluxo de calor e do resfriamento como: tipo e tamanho do bico da tocha, afastamento entre o bico e a chapa, velocidade da tocha, método de resfriamento, fluxo de resfriamento, afastamento entre o centro de aquecimento e o centro de resfriamento. Esses conteúdos foram repassados, através de treinamentos, aos operadores e caldeireiros de linhas de calor.

O fato notório, resultado das pesquisas de KIHARA (1973) e CHIRILLO (1982), foi que a certificadora americana dos construtores de navios, ABS autorizou e aceitou em 1983 a aplicação do processo de linhas de calor para conformação das chapas navais, entretanto a temperatura não deveria ultrapassar a 650°C.

Um método analítico foi desenvolvido por JANG *et al.* (1997) para prever as deformações de chapas devido à ação de uma linha de calor, que se baseia em deformações causadas pelas tensões residuais (inerente) oriundas da variação do gradiente de temperatura durante o aquecimento. Os resultados dos experimentos são compatíveis com as simulações. Entretanto, a grande desvantagem do método é a impossibilidade de medir o fluxo de calor consumido durante o processo oriundo de uma chama oxiacetilênica. Concluiu-se que, a proposta do método analítico era prever as deformações devido à aplicação da linha de calor, que pode ser usado no controle e simulação de conformação de chapa de superfícies curvas com alta produtividade e eficiência.

Vários pesquisadores sobre linha de calor destacam em seus trabalhos a importância do método analítico desenvolvido por JANG *et al.* (1997) de carregamento equivalente baseado nas tensões residuais (inerente). Por exemplo: HA (2007); YU (2000); SON (2007), entre outros. Na figura 11, apresenta o cronograma das pesquisas e os pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento do processo de linha de calor.

Na linha de pesquisa em soldagem, HA (2007) citou no seu artigo sobre o resultado confiável atingindo pela utilização do método de JANG *et al.*(1997) na pesquisa de deformação de soldagem. Basicamente, em suas pesquisas utilizou um processo de soldagem e analisou o comportamento da zona termicamente afetada quanto às tensões residuais (inerentes) e concluiu que o método é confiável para previsão das deformações por soldagem

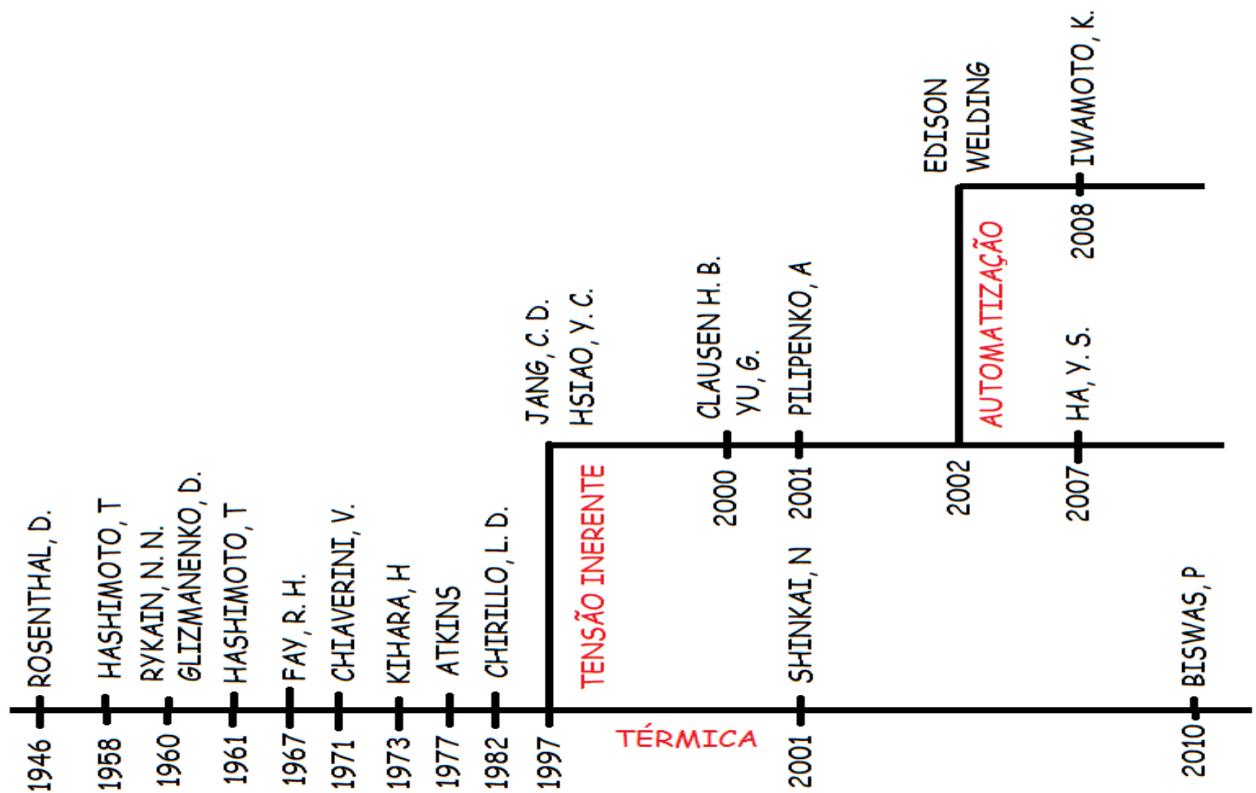


Figura 11- Cronograma de evolução e os pesquisadores de linha de calor.

Na linha de pesquisa de fontes alternativas de geração de calor, YU (2000), aplicou o método de tensões residuais de JANG *et al.* (1997), no desenvolvimento do estudo de conformação de chapa utilizando uma fonte laser e um programa de base de elementos finitos. Concluiu que com a aplicação do método obteve resultados satisfatórios e redução do tempo de simulação.

O processo de linhas de calor na ótica térmica, onde as deformações são estritamente em função do gradiente de temperatura da chapa e do fluxo térmico da fonte de calor. Esta linha de pesquisa que foi estudado por SHINKAI (2001), que no seu trabalho de pesquisa analisou o calor transferido pelo jato da chama sobre a chapa, através de uma tecnologia de medição do fluxo térmico por laser induzido por fluorescência, numa fonte de calor estacionária. Relata que os processos modernos podem ser calculados com aproximação, entretanto para conformação de chapa com a fonte em movimento ainda os processos não estão desenvolvidos.

A empresa EDISON WELDING, (2002), iniciou um programa de pesquisa de linha de calor com a demonstração de um protótipo de aplicação de linhas de calor semi-automático para uma tocha de chama oxiacetilênica. O projeto incluiu o desenvolvimento de uma tocha específica, e um sistema de armazenamento de dados com várias formas curvas para uso

em diversos estaleiros. Entretanto, pesquisas recente, não especificam a completa inserção dessa tecnologia nos estaleiros. BORZECKI, (2006) no congresso internacional de estruturas marítimas relatou que os estaleiros, ainda utilizam o processo manual de aplicação de linhas de calor e tem dificuldades de formação de novos técnicos para esse tipo de atividade. OKADA (2009), também no congresso internacional relatou que o custo atual para conformação de chapas por linhas de calor é muito alto, devido a diversos fatores, como: habilidades da força de trabalho, precisão e retrabalhos e velocidade de produção. Para tanto, sinalizou que as chapas curvas devem ser fabricadas na condição de minimizar as curvaturas, especialmente em apenas duas direções de curvaturas.

Os resultados experimentais foram satisfatórios com os resultados analíticos das deformações obtidas nas pesquisas de SON (2007), que utilizou o método de tensões residuais proposto por JANG et. al.(1997) em um processo de soldagem, considerando uma região de aquecimento de forma elíptica e utilizando o processo de fonte de calor a arco com eletrodo de tungstênio a proteção gasosa.

Uma tecnologia de suporte interativo entre o operador de linha de calor com um controle de medição das formas curvas em tempo real foi pesquisada por IWAMOTO (2008), o método consiste em marcadores virtuais posicionados na chapa que detectam a movimentação devido às deformações com alta precisão. Quando o operador aplica a linha de calor, o equipamento protótipo para a captura de imagem processa a informação da posição relativa dos marcadores, analisa se a curva está em conformidade com o projeto, e retorna a informação do sinal para o operador para corrigir possíveis desvio de trajetória.

Defensor da proposta do estudo das deformações das linhas de calor pela visão do cálculo térmico, BISWAS (2010), no seu artigo, faz uma análise dos métodos de entendimento do processo de linha de calor e confirma a complexidade do processo devido a vários fatores de controle no estudo das deformações residuais. Relata que tanto a análise térmica como a estrutural para previsão das deformações demandam muito tempo de simulação. Destaca que o método de JANG *et al.* (1997) na seqüência lógica, primeiramente determina-se as curvaturas necessárias, depois prever a superfície com a orientação das trajetórias a ser seguidas e finalmente avalia os pontos extremos da curva após aplicação das linhas de calor. Comenta que o método é inapropriado para superfícies complicadas e também, não analisa corretamente as condições de temperaturas. Entretanto, conclui que uma investigação da metodologia simplificada da linha de calor com a determinação das tensões residuais é mais eficiente e factível que uma extensiva análise numérica.

2.3. AS DEFORMAÇÕES E TENSÕES RESIDUAIS NA LINHA DE CALOR.

2.3.1. Expansão térmica do metal

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, conseqüentemente o volume do corpo, diminuam.

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:

$$\Delta l = L_i \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (1)$$

Onde:

Δl – Variação do comprimento [m].

L_i – 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.

Conforme, PILIPENKO (2001), para chapas de aço carbono navais, ASTM A 131 Grau AH 36, de alta tensão de escoamento, (315 a 355 MPa.), o coeficiente de expansão térmica tem um valor de $(11,7 \times 10^{-6} / k)$ na temperatura de 27°C, variando proporcionalmente com o aumento da temperatura.

A teoria simplificada termo-elástica-plástica proposta por JANG *et al.*(1997) consiste em um método de prever as deformações causadas pelo aquecimento localizado denominado por linha de calor. Uma das premissas do método é que o aumento de temperatura no processo resulta em uma expansão térmica do metal.

Segundo MARQUES (2007), as regiões aquecidas tendem a dilatar-se, mas a dilatação é dificultada pelas partes adjacentes submetidas a temperaturas menores, o que

causa o aparecimento de deformações elástica e eventualmente, plásticas na região aquecida.

Segundo MODENESI (2008), quando um objeto for aquecido e resfriado de modo uniforme e não existirem restrições às suas variações dimensionais, estas não resultam em efeitos mecânicos importantes no objeto. 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/ou distorções podem se desenvolver.

2.3.2. Tensões térmicas no aquecimento assimétrico.

Para prever as deformações causadas pelo aquecimento localizado assimétrico JANG *et al.* (1997), propôs que seria a aplicação direta da hipótese racional da teoria da elasticidade descrita por TIMOSHENKO & GOODIER (1980) simplificando, assim a teoria das deformações causadas pelas tensões térmicas residuais.

No método da supressão das deformações, TIMOSHENKO & GOODIER (1980), afirmam que; uma das causas que origina 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 & GOODIER (1980), para uma placa retangular submetida a um fluxo de calor de altura $2c$ e cujo plano médio coincide com o plano x, y , como é mostrada na figura 12 na qual, a temperatura T é uma função par de y , e independente de x e z .

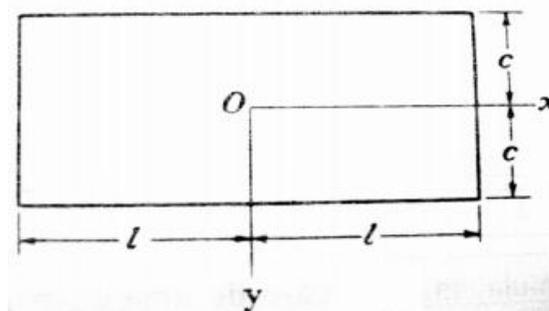


Figura 12- Placa retangular sujeita a um ciclo térmico

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 (2), desenvolvida por TIMOSHENKO & GOODIER (1980), que serão de compressão quando T for positivo.

$$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{\alpha \cdot E \cdot T}{1 - \nu} \quad (2)$$

Onde:

ν – Coeficiente de Poisson [-],

T – Variação de temperatura num ponto z [K],

E – Módulo de elasticidade [N.m⁻²],

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

σ_x e σ_y – Tensões térmicas devida ao efeito do calor (Trativa/Compressiva) [N.m⁻²].

Em outra das premissas, JANG *et al.* (1997) diz 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

2.3.3. Desenvolvimento de tensões térmicas residuais.

Segundo MARQUES (2007), que exemplifica num diagrama esquemático da montagem das três barras fixas o desenvolvimento de tensões residuais devido ao aquecimento. Concluindo que: um metal quando aquecido, suas dimensões aumentam proporcionalmente a variação 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.

Supondo três barras de um aço de baixo carbono de mesmo comprimento e seção e unidas em suas extremidades por duas bases, de forma que nenhuma pode se alongar ou contrair independentemente das outras, conforme figura 13(a). Se a barra central (2) for aquecida enquanto as externas forem mantidas a temperatura ambiente, essa tenderá a se dilatar, mas será impedida pelas outras através das bases, conforme figura 13(b). Assim, tensões de compressão se desenvolverão na barra central e, nas barras externas, tensões de tração de magnitude igual à metade do valor na barra central. Como as barras mantêm o mesmo comprimento aproximado, a dilatação térmica tem de ser compensada por

deformações elásticas até que a tensão na barra central atinge o limite de escoamento, esta barra passa a se deformar plasticamente.

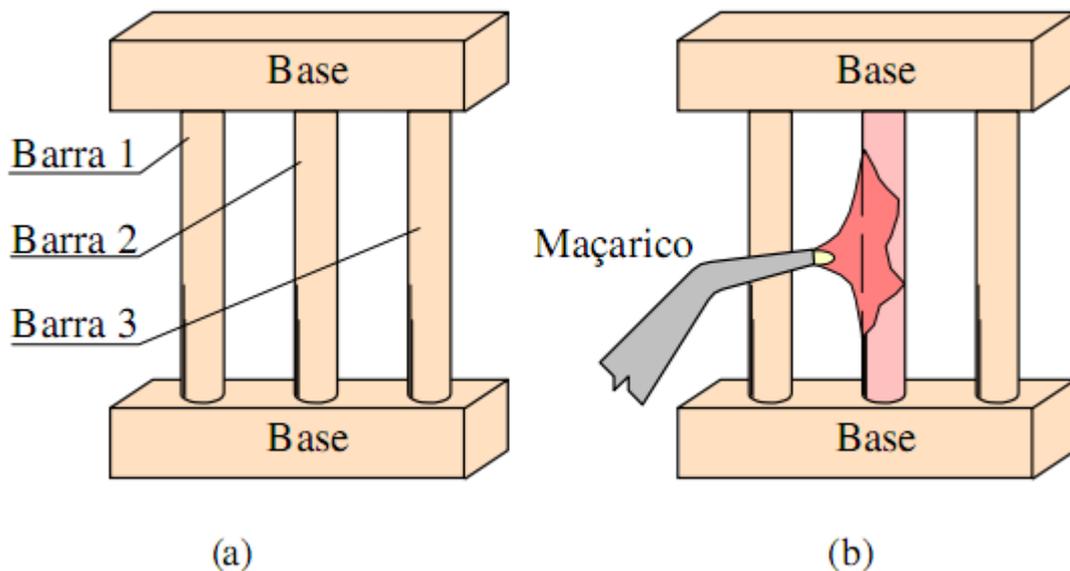


Figura 13 (a) e (b) - Diagrama de Montagem de três barras, MARQUES [2007].

Na figura 14, 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 começa a aumentar, a barra central tende a se expandir, sendo restringida pelas peças de maior seção e pelas barras laterais, que permaneceram à temperatura ambiente. Dessa forma, ela experimenta um esforço de compressão, que tende a aumentar com a elevação da temperatura, deformando-se elasticamente em compressão, até que as tensões internas atinjam o limite de escoamento em compressão no ponto B. Continuando o aquecimento, a dilatação térmica tende a prosseguir. Entretanto, como o nível de tensões internas atingiu o limite de escoamento, a barra central passa a se deformar plasticamente (deformação permanente) em compressão.

A barra sofre deformação plástica, uma diminuição em seu comprimento e um aumento em sua seção transversal, o que é compensado pela dilatação térmica. 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 termicamente. Assim, quando a temperatura começa a cair, o esforço de

compressão sentido pela barra tende a diminuir, até se anular, para uma dada temperatura acima da temperatura inicial no ponto D.

Enquanto, a temperatura continuar diminuindo e a barra tende a continuar a diminuir de comprimento, mas, como este foi diminuído por deformação plástica durante o aquecimento, a contração é restringida pelas barras transversais e laterais. Assim, a barra central passa a sentir um esforço de tração e uma deformação elástica crescentes, à medida que a temperatura continua caindo, até que o limite de escoamento em tração seja alcançado no ponto E. A partir daí a barra passa então a se deformar plasticamente em tração, até que a temperatura volte ao valor da temperatura ambiente.

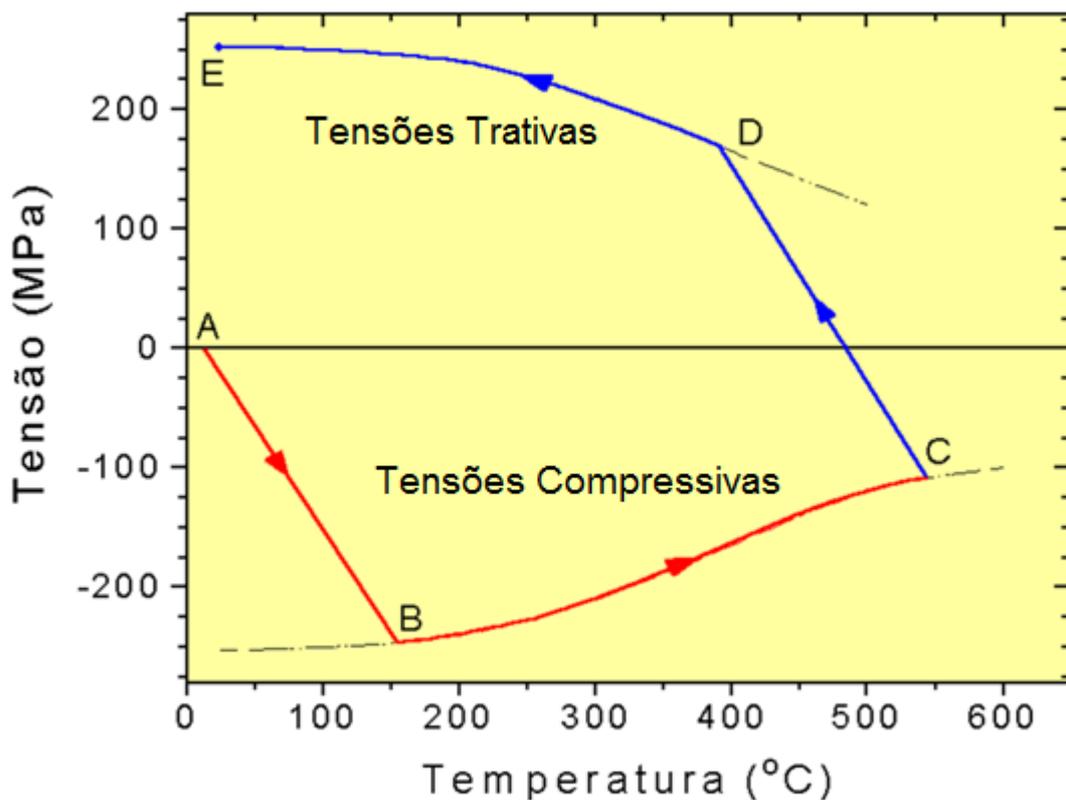


Figura 14- Diagrama esquemático das tensões internas em função da temperatura, MARQUES [2007].

Na conclusão MARQUES (2007), relata que 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. Para manter o equilíbrio, as barras laterais estão sujeitas a tensões de compressão

2.4. MODELO DAS TENSÕES TÉRMICAS PARA LINHA DE CALOR

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

A distribuição uniforme de temperatura sem restrições o corpo sólido expande 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 residuais. Enquanto que, uma distribuição irregular de temperatura com restrições o corpo sólido expande-se e contrai-se com resistência, gerando efeitos de tensões térmicas residuais.

Uma adaptação do modelo desenvolvido por HSIAO. (1997) pode ser descrito, conforme a figura 15. Durante um aquecimento local o metal aquecido se expande e encontra o metal das regiões frias que tende a frear essa expansão ao ponto de região aquecida sofre uma deformação plástica gerando-se tensões térmicas de compressão da parte aquecida atuando na parte fria.



Figura 15- Adaptado do artigo de HSIAO (1997).

Por outro lado, o calor da parte originalmente aquecida começa a resfriar 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 conseqüentemente diferentes deformações angulares.

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; figura 16(a), o material aquecido começa a amolecer abaixo do limite de escoamento e após algum tempo é expandido, figura 16 (b). Em seguida o material adjacente ainda está na tensão original impede a dilatação, então a chapa começa a crescer de espessura, figura 16 (c) e após o resfriamento o material recupera a tensão e se contrai termicamente curvando a chapa, figura 16 (d).

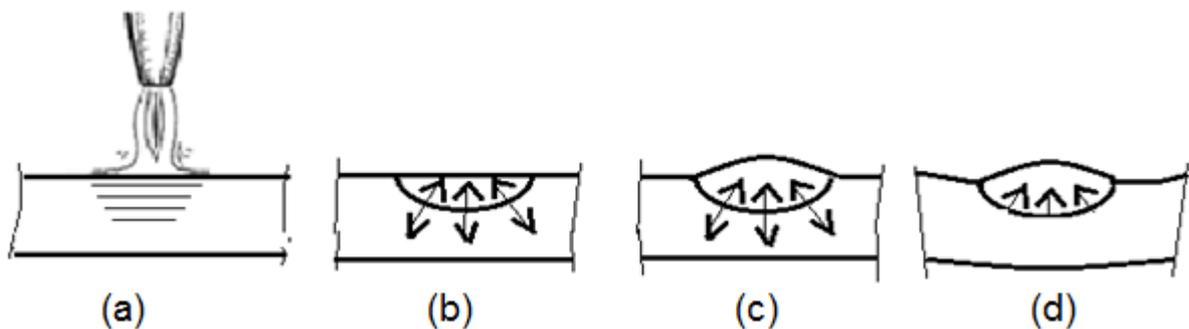


Figura 16 (a); (b); (c) e (d)- Ação cinemática de linha de calor, CLAUSEN (2000)

Também, relata CLAUSEN (2000), no seu artigo, que existem várias propostas de análises analíticas e numéricas para prever o comportamento das deformações em função da temperatura numa aplicação de linhas de calor. Destaca o trabalho de JANG *et al.* (1997) que usa um método de análise simplificado. Baseado em um disco simétrico com molas, representando a resistência da região fria à dilatação e expansão da região aquecida. Um furo na placa infinita que simula a ação do aquecimento resultando em tensões residuais unitárias, que são convertidas em um somatório de forças equivalentes que provoca as deformações. Conclui que o método de análise simplificado pode ser usado de maneira fácil para prever a deformação de chapa.

Em seu trabalho CLAUSEN (2000) obteve um resultado satisfatório dos cálculos numérico por elementos finito e as variações dos parâmetros de aquecimento e as deflexões

elásticas e plásticas. Também, obteve dados empíricos das tensões plásticas finais e determinou os parâmetros de aquecimento e fluxo de calor associado às tensões.

Uma mecanização do processo de conformação de chapas por linha de calor está representada na figura 17, e se baseia na aplicação de uma fonte de calor sobre uma superfície de uma chapa, seguido por um resfriamento. O equipamento é composto por um maçarico, que suporta um bico de chama oxiacetilênica, em movimento uniforme constante e que, à medida que esta fonte de calor se desloca a chapa se deforma, devido a um gradiente de temperatura e à expansão térmica não uniforme na chapa. Logo, em seguida, a região aquecida recebe um jato de água de resfriamento à temperatura ambiente, proveniente de uma tubulação afixada ao conjunto de maçarico que mantém a mesma velocidade da chama, produzindo esse resfriamento, uma deformação plástica na chapa.

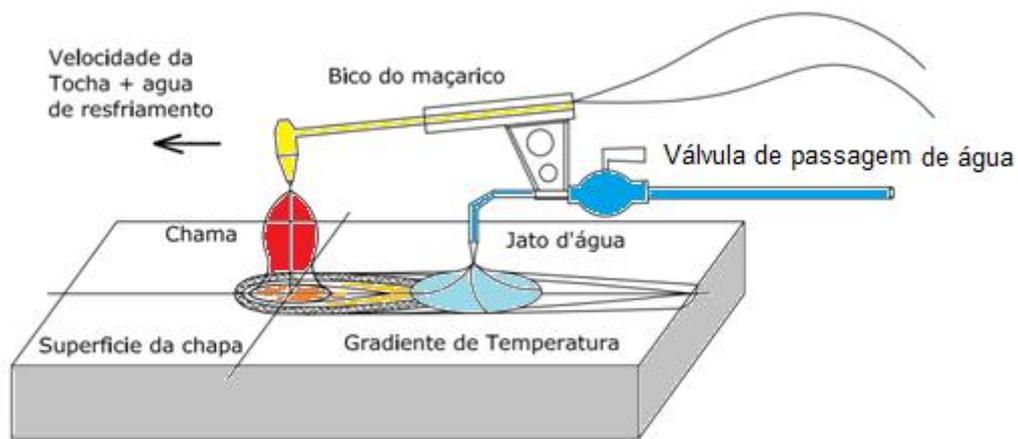


Figura 17- Esquema da linha de calor.

2.4.1 Teoria simplificada termo-elástica-plástica para deformação em chapas metálicas

Um modelo mecânico simplificado para explicar as deformações devido à aplicação da linha de calor em chapas metálicas foi proposto por JANG *et al.* (1997) com base nas seguintes hipóteses:

1. O processo elástico plástico é concentrado num disco circular sob a fonte de calor e a chapa é considerada infinita em duas dimensões.

2. O processo térmico elástico plástico ocorre dentro de uma região circular pequena e simétrica e a região elástica restante da chapa resiste à expansão e à contração da região circular plástica. A resistência da região elástica na zona plástica é modelada como um conjunto de molas ao seu redor como ilustrado na figura 18(a), proposta por JANG *et al.*

(1997). 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 18(b) proposta por JANG *et al.* (1997).

3. O aumento de temperatura no processo, que resulta em expansão térmica, pode ser pensado como um carregamento mecânico plástico na região plástica e, por outro lado, a diminuição de temperatura pode ser pensada como um descarregamento mecânico plástico. Este processo de descarregamento plástico é a causa da deformação residual que, em última análise, resulta na deformação angular da chapa.

4. A deformação angular final resulta da integração da deformação devido às tensões residuais do tipo macro, compressivas e trativas em cada disco. Os limites da integração são definidos pela região da deformação residual produzida durante o aquecimento, assumida como uma distribuição elíptica no plano da chapa perpendicular à linha de aquecimento. Esta distribuição é baseada em resultados experimentais e na solução de Rosenthal (1946).

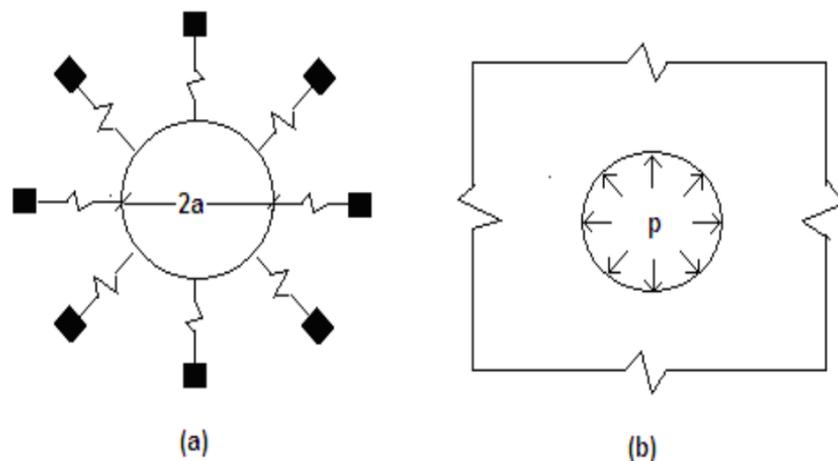


Figura 18 (a) e (b) - Disco circular proposto por JANG *et al.* (1997)

Uma amostra de chapa, de espessura (h), largura (L) e comprimento (B) foi selecionada por JANG *et al.* (1997), conforme representada na figura 19, para representar o ângulo de deformação, onde o aquecimento que foi conduzido através da linha de centro da amostra para fornecer uma deformação angular máxima e uniforme. A medida do ângulo entre os lados da amostra é a medida do ângulo de deformação resultado da aplicação da linha de calor.

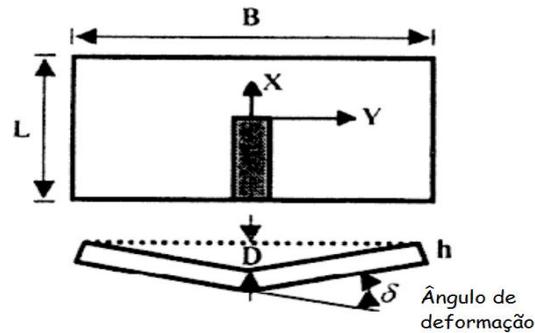


Figura 19- Chapa deformada e ângulo de deformação JANG *et al.* (1997)

Segundo, JANG *et al.* (1997), a sua teoria 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 *et al.* (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 (3), segundo JANG *et al.* (1997).

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

(3)

Onde:

δ – Deformação angular da chapa [rad.]

q – Fluxo de calor [Cal/seg.];

h – Espessura de chapa [mm];

ν – Velocidade de deslocamento da chama [mm/seg.];

c_1 – Constante = 1,05

c_2 – Constante = 0,25

ε^* – Constante da tensão residual do disco.

2.5. LINHA DE CALOR (GERAÇÃO, DISTRIBUIÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR).

No processo de linha de calor por chama oxiacetilênica a geração, distribuição e transferência de calor estão apresentadas na figura 20, onde um maçarico mistura o gás acetileno com o gás oxigênio em proporções iguais, que após a incidência de uma faísca, ocorre uma ignição, que gera uma chama, denominada de fonte de calor, com um determinado poder calorífico. As características da mistura dos gases justificam o estudo da geração do calor e os tipos de chamas formadas.

Entre o bico do maçarico e a superfície da chapa existe um fluxo de calor proporcional a temperatura, caracterizando uma distribuição gaussiana, em que, afastando-se do centro a temperatura é reduzida.

Como a fonte de calor desloca-se com velocidade constante sobre uma superfície da chapa, encontram-se regiões da chapa frias e quentes proporcionando um comportamento específico das trocas térmicas que podem ocorrer por condução, convecção e por radiação.

Na chapa as transferências de calor por condução apresentam uma gradiente de temperatura que ocasiona no resfriamento uma deformação plástica residual.

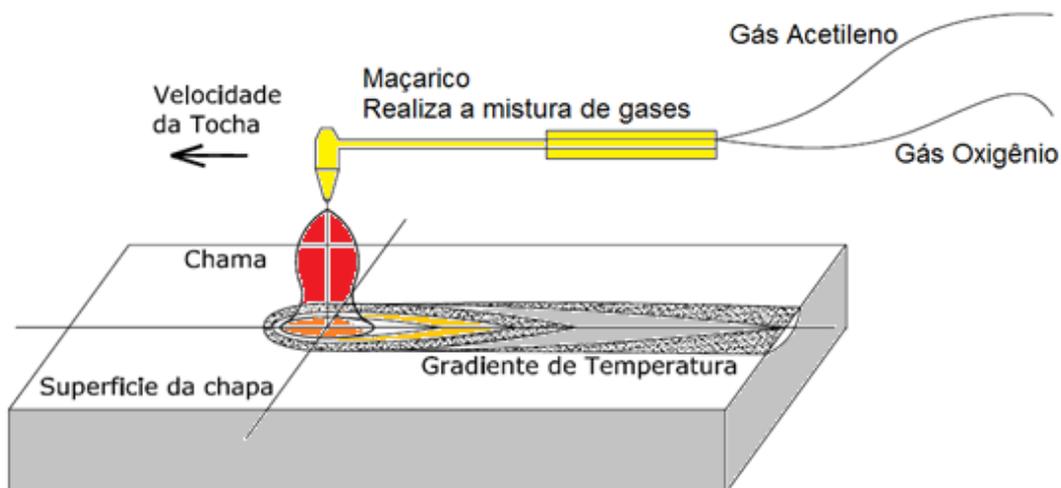


Figura 20- Esquema da geração, distribuição e transferência de calor.

Pesquisadores como: HASHIMOTO (1958), CHIRILLO (1982), JANG *et al.* (1997), SHINKAI, (2001), BISWAS (2010) realizam seus estudos sobre linhas de calor utilizando o processo por chama oxiacetilênica. Nas operações do processo por chama oxiacetilênica, a chama resultante dessa queima pode chegar a temperaturas em torno dos 3.200° C.

Conforme afirma CLAUSEN (2000), o processo por chama oxiacetilênica é o mais utilizado nas linhas de calor, porque é um processo de geração de calor mais barato e de fácil manutenção. Entretanto, de difícil controle dos parâmetros, quanto a sua repetição dos eventos.

Em seus experimentos, JANG *et al.* (1997) utilizou tochas específicas de chama oxiacetilênica. Movimentando-as sobre as chapas, mantendo-se constantes as características de regulagem das pressões e proporções de oxigênio e acetileno e a distancia da chapa o fluxo de calor é influenciado apenas pela variação da velocidade de deslocamento em determinadas condição de aquecimento.

2.5.1. Características dos gases acetileno e oxigênio

Segundo o catalogo da empresa WHITE MARTINS (2005), O gás combustível acetileno industrial C_2H_2 reage com o oxigênio O_2 produzindo uma quantidade de calor cerca de 106.500 Cal/mol e a reação química tem a seguinte formulação: $C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2 + 106.500 \text{ Cal/mol}$.

O gás combustível acetileno industrial C_2H_2 , à temperatura ambiente e pressão atmosférica é um gás altamente inflamável, não tóxico, incolor, menos denso do que o ar atmosférico. Devido as suas impurezas características, tem odor desagradável, semelhante ao do alho.

As propriedades físicas e químicas do acetileno, conforme o catalogo da empresa WHITE MARTINS (2005), são:

- Estado físico: Gasoso
- Densidade = 1,107 Kg/m³ a 21°C e 1 atm.
- Poder calorífico superior = 14.000 Kcal/m³
- Poder calorífico Inferior = 11.000 Kcal/m³
- Oxigênio necessário = 2,5 m³/m³
- Relação de Consumo de 1,1 a 1,5 m³/m³
- Velocidade de deflagração = 13,50 m/s.
- Temperatura máxima = 3100°C
- Potência do calor específico $10,9 \times 10^{-4} \text{ Kcal/m}^2 \cdot s$

Quando a gás acetileno é comparado com outros gases de combustão como o Propano e GLP (Gás liquefeito do Petróleo), ele se destaca devido à alta temperatura de combustão.

O gás acetileno C_2H_2 é usado nas operações de corte de metais, principalmente em chapas de aço carbono, denominado de oxicorte.

Em aplicações práticas de linhas de calor, para conformação de chapa ou desempenos eventuais de estruturas após a soldagem deve-se conhecer as regulagens de parâmetros recomendadas pelos fornecedores de maçaricos. Os parâmetros estão correlacionados com a espessura de chapa a ser trabalhadas, com pressão e vazão de saída dos gases acetileno e oxigênio, além das regulagens do tipo de chama.

2.5.2. As propriedades térmicas da chama oxiacetilênica

Uma chama oxiacetilênica apresenta basicamente duas regiões: um cone interno, também chamado de dardo, de forma bem definida e cor azulada, localizado logo após a frente do bico e uma segunda região, formando um envoltório externo difuso, conhecido como penacho, de cor laranja.

A temperatura da chama tem um efeito decisivo sobre todas as outras características. A chama não é constante e varia ao longo do eixo longitudinal (distância), por exemplo, a máxima temperatura, cerca de $3150^{\circ}C$ é bem próximo ao cone entre 2,0 à 6,0 mm, conforme demonstrado na figura 21.

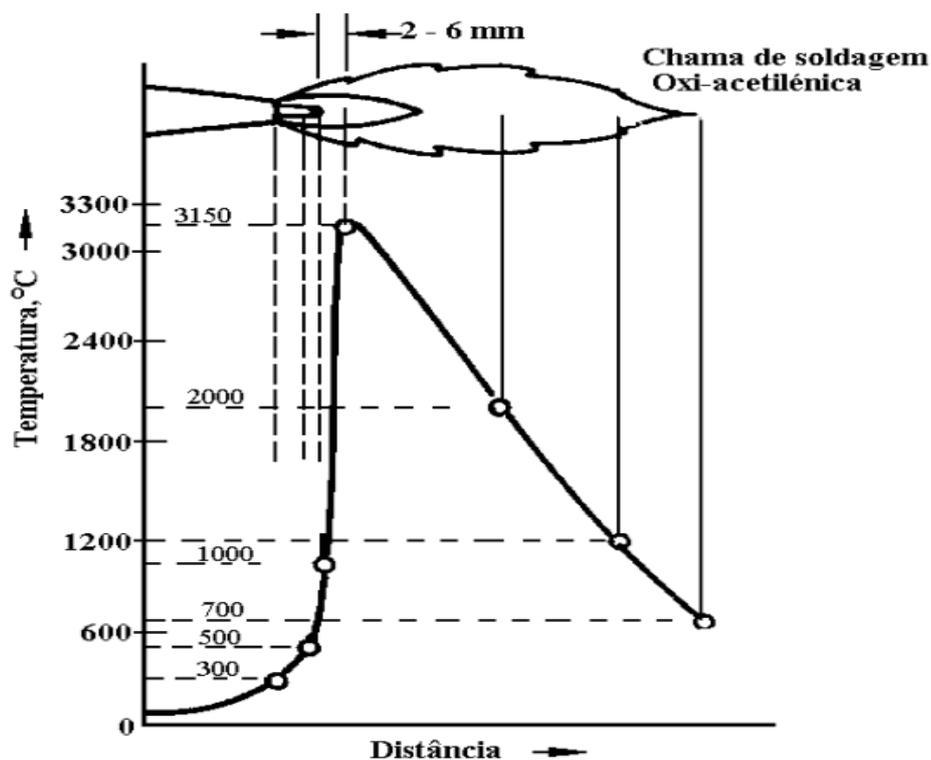


Figura 21- Variação da temperatura em função da distância, DEMEC. UFPR (2010)

A temperatura da chama depende da relação entre o volume de oxigênio e o volume de acetileno. A regulagem da chama R define-se, geralmente através da relação de consumo entre os valores de oxigênio e de acetileno que entram no maçarico

A regulagem da chama R é igual à razão entre o volume de oxigênio (O_2) pelo volume de acetileno (C_2H_2).

Se R é igual a 1,0 a chama é dita neutra, é a mais utilizada, sua a temperatura aproxima-se de $3014^{\circ}C$. Se R maior que 1,0 a chama é oxidante produz um ruído característico, e atinge maior temperatura cerca de $3150^{\circ}C$. Se R menor que 1,0 a chama é dita redutora ou carburante, cuja temperatura é um pouco menor que $3014^{\circ}C$.

Na figura 22 estão apresentados os tipos de chama redutora, neutra e oxidante. Geralmente a temperatura máxima de $3150^{\circ}C$, se obtém com uma regulagem da chama oxidante entre os valores de $R=1,1$ à $R=1,2$. Para a utilização da condição de aquecimento deve ser utilizada a condição de regulagem da chama oxidante

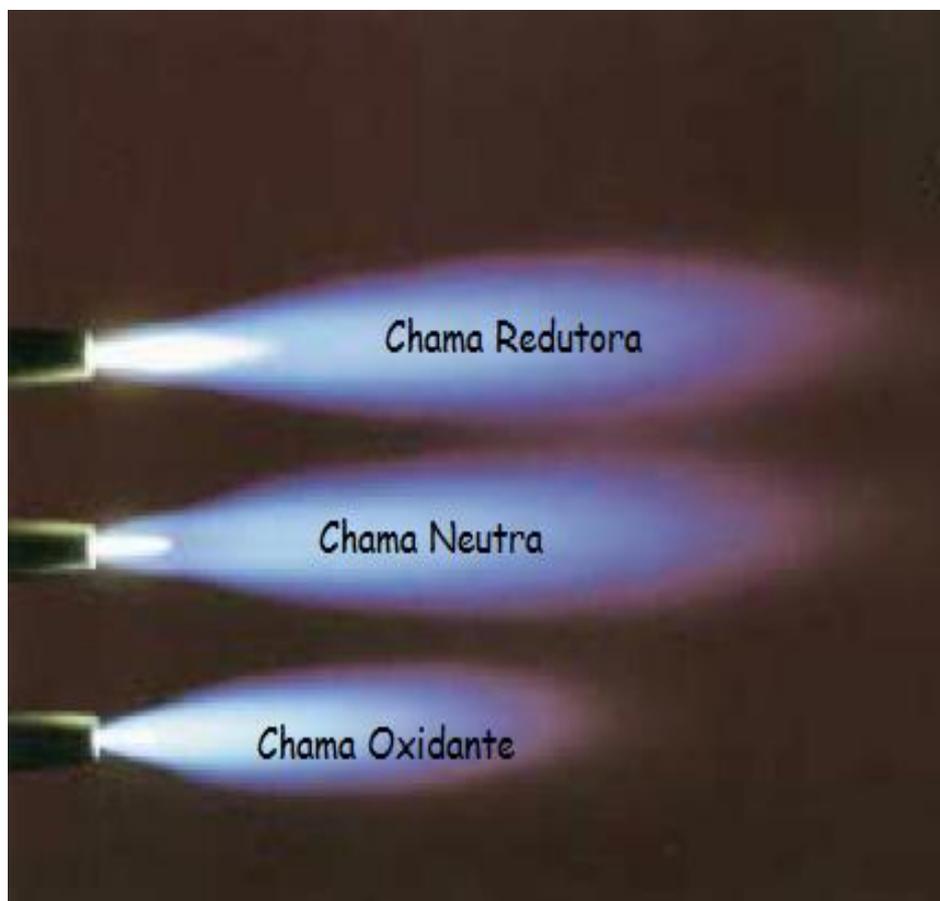


Figura 22- Tipo de chamas: oxidante, neutra e redutora, adaptado do LINDE (2010)

2.5.3. Fluxo de calor da chama oxiacetilênica

Uma idéia, de que, o fluxo de calor produzido pelo processo de chama oxiacetilênica tem uma distribuição gaussiana foi desenvolvida por RYKAIN (1960).

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 para análise da distribuição de temperatura e do calor gerado pela fonte de chama oxiacetilênica.

Na figura 23, está mostrando o perfil de medição das temperaturas, onde, o eixo horizontal representa os afastamentos em relação ao centro da chama, e o eixo vertical representa as temperaturas atingidas.

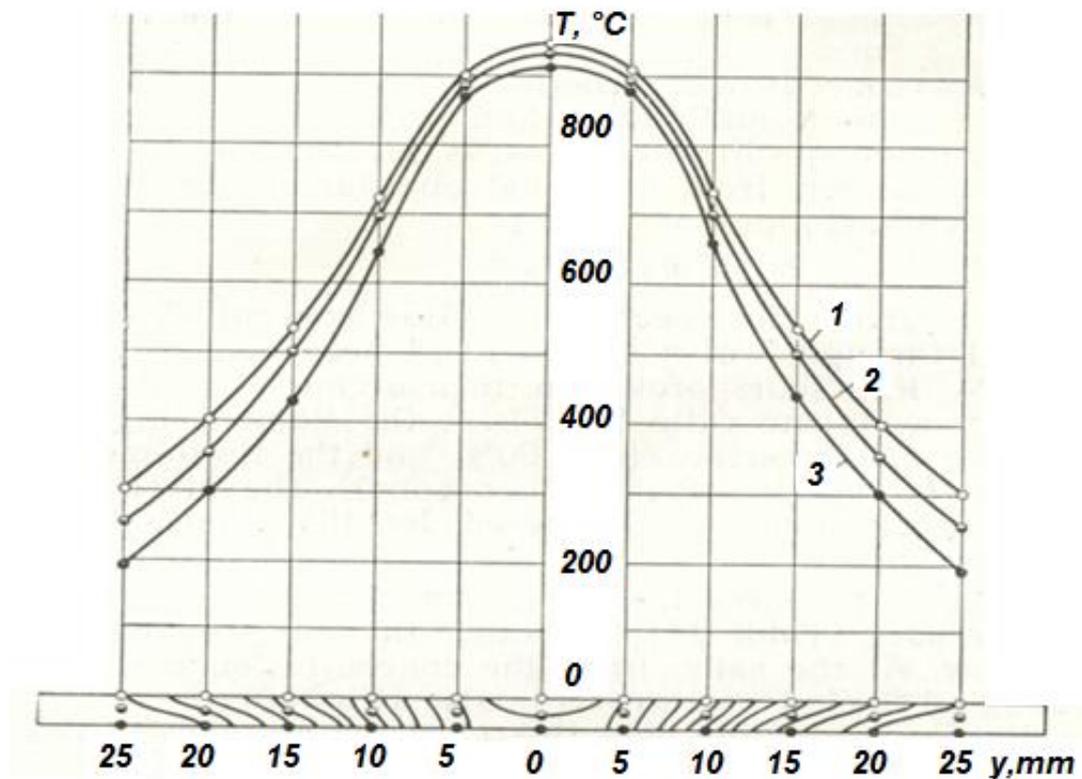


Figura 23- Gradiente de temperatura na forma gaussiana GLIZMANENKO (1960)

A temperatura média da amostra de chapa distribuída na direção normal da chama obedece à lei de distribuição gaussiana, conforme figura 24. O fluxo de calor é aproximadamente proporcional aos instantâneos de temperatura na zona aquecida e pode ser expresso pela equação 4, conforme GLIZMANENKO (1960):

$$q_2(r) = q_{2m} \cdot e^{-kr^2} \quad (4)$$

Onde:

$q_2(r)$ - Fluxo de calor específico no ponto central da zona de aquecimento
[Cal/m² - s.];

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

e - Base do logaritmo natural, 2, 718;

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

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

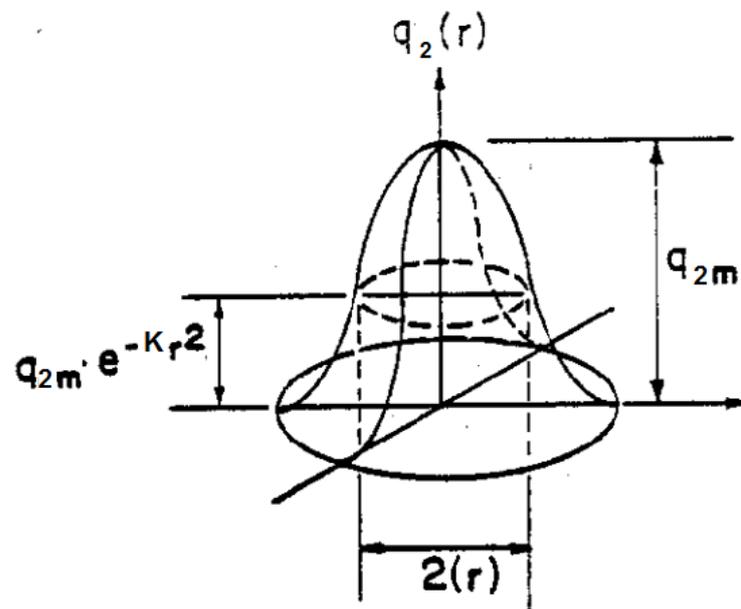


Figura 24- Distribuição gaussiana, adaptado de GLIZMANENKO (1960)

Considerando o calor efetivo liberado por uma tocha simples, com uma chama perpendicular a superfície da chapa e uma relação de vazão do gás acetileno e de oxigênio iguais, RYKAIN (1960) especificou algumas propriedades térmicas do processo de chama oxiacetilênica, para uma velocidade constante. As propriedades se apresentam conforme a tabela 1. 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 1- Propriedades Térmicas da chama Oxiacetilênica

Vazão de Acetileno Litro/hora	Calor Efetivo Liberado Caloria/sec	Eficiência %
150	380	72
250	600	68
400	720	51
600	920	44
1000	1270	36
1700	1750	29
2600	2250	25

FAY (1967), descreveu uma síntese sobre o fluxo de calor produzido pelo processo de chama oxiacetilênica utilizando um calorímetro para medição da quantidade de calor em diferentes tipos de chamas.

2.5.4. Gradientes de temperaturas

A idéia da distribuição gaussiana foi adotada por JANG *et al.* (1997) para exemplificar o fluxo de calor. Entretanto, complementou que o fluxo de calor é axissimétrico na região da chama, conforme descrito por RYKAIN (1960), mas a distribuição da temperatura em volta do ponto de aplicação da tocha na chapa não é axissimétrica devido ao efeito da movimentação de translação da chama. Conforme está apresentado na figura 25, que corresponde a uma região recentemente aquecida.

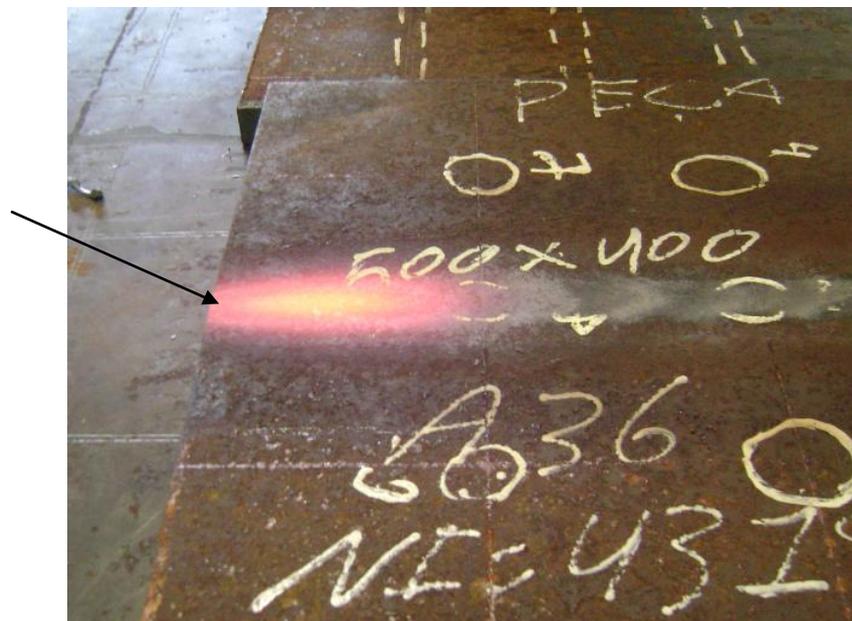


Figura 25- Experimento da distribuição de temperatura na superfície da chapa.

Na figura 26 extraída do artigo de YU (2000) se observa as isotérmicas que são de forma circular no centro e elíptica quando afastadas do centro.

Quando se fornece água de resfriamento logo após o deslocamento da fonte, durante o processo de aquecimento por chama oxiacetilênica, a região isotérmica elíptica configura-se como circular. Esta condição de axissimétria é necessária para desenvolvimento da teoria simplificada proposta por JANG et. al.(1997).

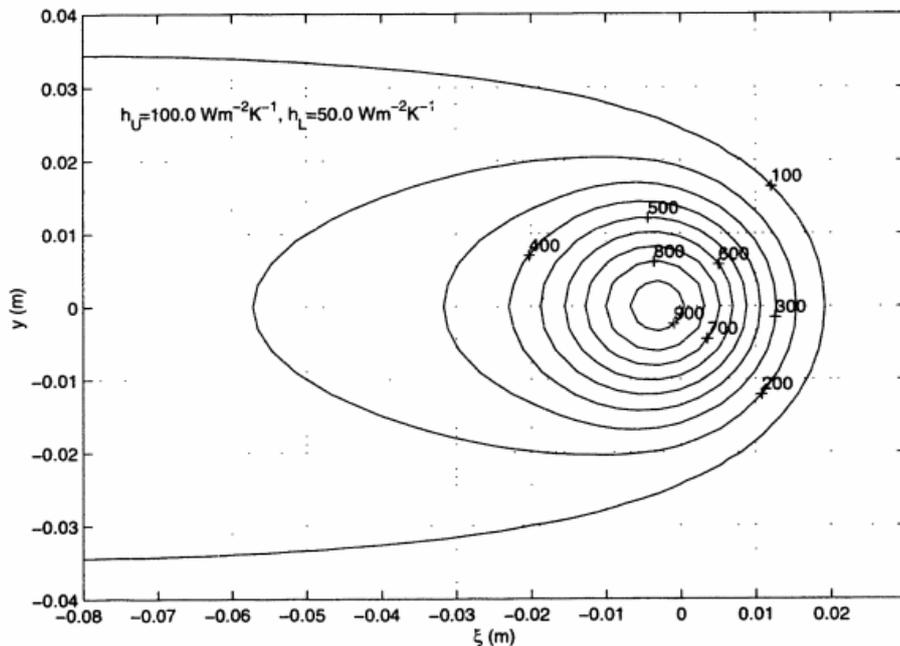


Figura 26- Distribuição de temperatura sobre o topo da superfície da chapa, YU (2000).

Na análise do fenômeno físico associado à linha de calor existem duas variantes, a primeira destaca-se o fluxo de calor injetado pela chama sobre a superfície da chapa e a segunda variante, a da condução de calor pela chapa. Ambas, fundamentais para as deformações termo elásticas plásticas, embora, atualmente ainda não desenvolvido o estudo da distribuição de temperatura considerando simultaneamente as duas variantes.

A proposta de estudo de SHINKAI (2001) foi verificar a distribuição da temperatura da chama oxiacetilênica estacionária, próxima a região da chapa num processo de fluxo de calor e sua condução pela chapa simultaneamente. Concluiu no seu artigo, que ambas as variantes podem ser estimadas e que um aumento do fluxo de calor, em extremo espaço de tempo corresponde ao aumento de temperatura na chapa. Entretanto, numa visão geral, as temperaturas diferem entre o fluxo de calor e a condução térmica.

Segundo, YU (2000) em seu artigo, afirma que a determinação do campo de temperatura é pré-requisito na previsão da deformação final da chapa e o método proposto

por ROSENTHAL (1946), pode ser aplicado para a distribuição de temperatura na chapa com a fonte em movimento.

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 finita, foram estudados por ROSENTHAL (1946) que, conforme está representado na figura 27.

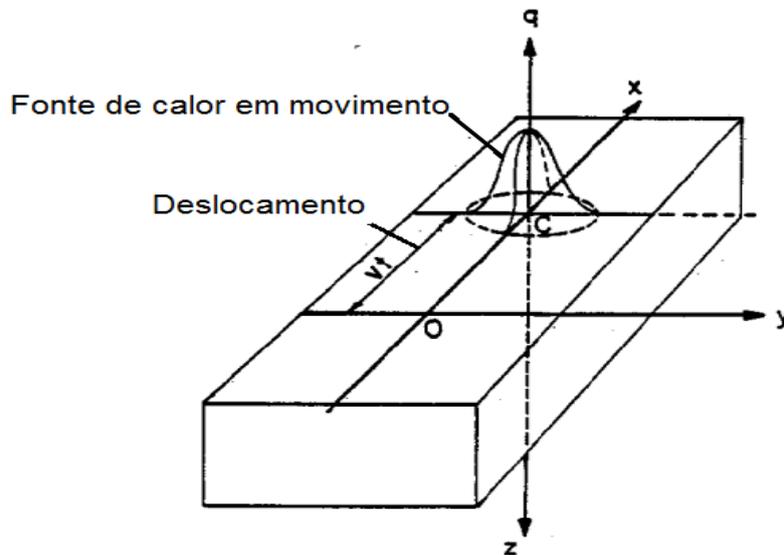


Figura 27- Fonte de calor em movimento constante, adaptado, ROSENTHAL (1946).

Várias considerações 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 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 com o 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 na equação (5), conforme ROSENTHAL (1946), em:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi k R} e^{-\frac{v(w+R)}{2a}} \quad (5)$$

Onde:

T – Temperatura [°C];

T_0 – Temperatura Inicial [°C];

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

k – Condutividade térmica [];

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

w – Distancia na direção x com velocidade da fonte v ($w = x - vt$)

v – Velocidade de deslocamento [mm/s.];

x – Distancia na direção x [mm];

y – Distancia na direção y [mm];

z – Distancia na direção z [mm];

t – Tempo [s];

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

2.5.5. Modos de transferência de calor

A transferência de calor para linha de calor, conforme CLAUSEN (2000) pode ocorrer em três modos: na condução, convecção e radiação, para linha de calor, está representado na figura 28. A Condução de calor nos meios sólidos trata-se da transmissão de calor átomo a átomo, num meio material, ocorrendo sempre de um ponto de maior potencial energético (maior temperatura) para um de menor potencial (menor temperatura).

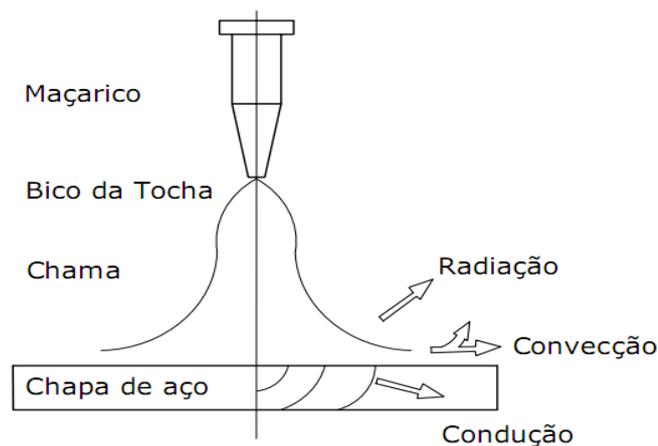


Figura 28- Diagrama de transferência para linha de calor.

A Condução de calor é regida pela primeira lei da termodinâmica em que o estado da energia é conservado. O fluxo de calor e a gradiente de temperatura são relacionados pela

lei de Fourier, conhecida pela equação de governo para problemas térmicos, segundo HOLMAN (1983) como:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

Onde:

ρ – Densidade do material [Kg/m³];

c_p – Calor específico [J. Kg⁻¹.K⁻¹];

T – Temperatura [K];

t – Tempo [s];

λ – Condutividade térmica [J.m⁻¹ s⁻¹ .K⁻¹];

x – Direção no comprimento [m];

y – Direção perpendicular [m];

z – Direção da espessura [m]

A convecção trata-se da transmissão de calor que ocorre entre um fluido líquido ou gasoso em movimento. A convecção pode ser natural ou forçada. Diz-se que a convecção é natural quando o movimento do fluido ocorre unicamente devido a variações de seu peso específico (densidade). Na convecção forçada o movimento do fluido é provocado por um equipamento externo.

No processo de convecção a quantidade de calor que flui é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre o material sólido e a região do fluido não “perturbado” pelo deslocamento do fluido

A chama oxiacetilênica é uma fonte concentrada de calor. Quando a chama é direcionada perpendicularmente numa chapa a transferência de calor resulta no aumento da temperatura da chapa é função de dois modos de transferência por convecção e radiação forçada. GLIZMANENKO (1960) afirma que a porção de radiação pode ser desprezível, e cerca de 5,0 a 10,0 % contribui apenas para o aumento da temperatura da chapa.

Um estudo sobre a transferência de calor por convecção e radiação no processo de conformação por linha de calor, foi efetuado por YU (2000), que comparou com diversas amostras de chapas de aço as perdas de calor por convecção e radiação numa temperatura

média de 500°C. Concluiu que as perdas por convecção e radiação são da mesma magnitude.

Segundo, CLAUSEN (2000) a taxa de transferência de convecção forçada é diretamente proporcional do gradiente de temperatura entre a chama e a chapa e também da velocidade com que os gases saem do maçarico e choquem com a chapa. A convecção sobre a superfície da chapa não depende das características do comprimento da chapa.

A consideração básica usada em alguns problemas de transferência é que o calor transferido por convecção para uma superfície pode ser descrito em geral pelo postulado de Newton do resfriamento, que tem a seguinte expressão (7), conforme HOLMAN (1983).

$$Q = h_f (T_s - T_b) \quad (7)$$

Onde:

Q – Quantidade de calor [W/m^2]

h_f – Coeficiente de transferência de calor que variam com a temperatura [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$];

T_s – Temperatura da superfície [K];

T_b – Temperatura da massa de ar aquecida [K].

No artigo de CLAUSEN (2000) apresenta um gráfico do coeficiente de transferência de calor em função da temperatura. Na figura 29, o gráfico descreve a variação do coeficiente de transferência em função da temperatura da superfície da chapa. Observa-se que acima de 300°C, praticamente o valor se mantém constante $h_f = 7,00 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Radiação térmica ou irradiação térmica (quando incidente sobre um corpo) é a radiação eletromagnética emitida por um corpo causada pelo maior potencial térmico do mesmo. A energia radiante incidente sobre um corpo é em parte absorvida, refletida e transmitida através do corpo.

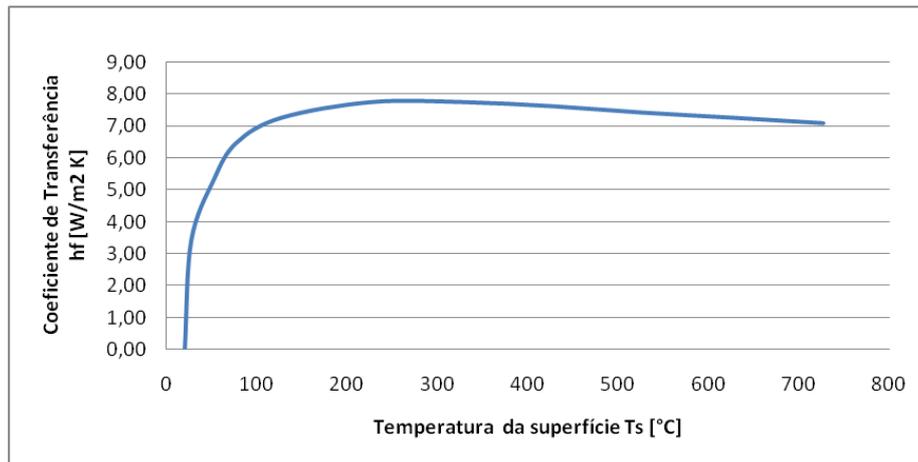


Figura 29- Gráfico do coeficiente de transferência versus temperatura de superfície CLAUSEN (2000)

A energia radiante absorvida por um corpo se transforma em calor, contribuindo para aumentar sua temperatura, no entanto as parcelas transmitidas e refletidas não sofrem mudança em seus comprimentos de onda. O calor irradiado pode ser modelado através da lei de Stefan-Boltzmann de Radiação pela equação (8) segundo HOLMAN (1983)

$$Q_r = \int \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_B^4) dA \quad (8)$$

Onde;

Q_r – Quantidade de calor de radiação [W];

A – Área [m²];

ε – Emissividade;

σ – Constante de Stefan-Boltzmann. [W. m⁻². K⁴]

T_s – Temperatura da superfície da chapa [K];

T_B – Temperatura dos gases [K];

Segundo CLAUSEN (2000) que afirma, sobre uma análise precisa do calor perdido não é muito crucial para o modelo térmico, pois, a quantidade de calor perdida é muito pequena quando comparado a transferência por condução sobre a chapa de aço. Assim, o calor perdido sobre a superfície da chapa de aço não induz a significante deformações.

2.5.6 Método de determinação da quantidade de calor no calorímetro.

Vários métodos têm sido empregados para determinar a quantidade de calor de uma fonte de calor e sua eficiência, KOU (2003) desenvolveu um tipo de calorímetro com um fluxo

mássico de água para determinar a quantidade de calor de uma fonte térmica. Neste calorímetro, água é utilizada para remover calor da peça aquecida e a quantidade de calor deve ser determinada pelo cálculo do aumento da temperatura e pela taxa de fluxo de água.

Na figura 30 está representado um calorímetro com um fluxo mássico de água.

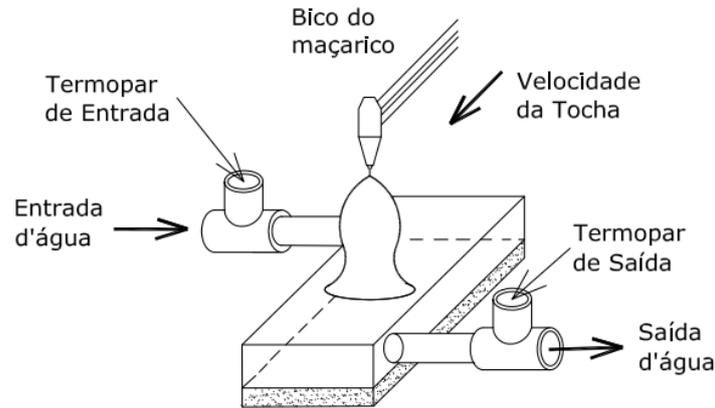


Figura 30- Esquemático, KOU (2003), para um calorímetro mássico.

A água é introduzida no calorímetro com uma vazão constante, a água passa pela parte interna do calorímetro, sendo que na entrada e na saída da água é instalado um dispositivo de medição de temperatura da água. À medida que a fonte de calor se desloca aquecendo a superfície do calorímetro, a água absorve o calor, gerando uma diferença de temperatura na entrada e saída da água.

A quantidade de calor absorvida pelo calorímetro deve ser determinada utilizando a seguinte equação de balanço de energia (9), segundo KOU (2003) por:

$$Q_{(t)} = \int w.c.(T_s - T_e)dt \quad (9)$$

Onde:

$Q_{(t)}$ – Quantidade de Calor [cal/s];

W – Fluxo de mássico de água [Kg/s.];

C – Calor específico da água [J/kg-K]

T_s – Temperatura de saída de água [°C];

T_e – Temperatura de entrada de água [°C];

t – Tempo [s]

2.5.7 Considerações metalúrgicas do aço naval

A importância de se controlar a temperatura de aquecimento de uma linha de calor pode ser entendida a partir das transformações metalúrgicas que podem ser produzidas durante resfriamento da linha de calor na chapa conformada. As possíveis seqüências térmicas e as microestruturas resultantes do resfriamento na linha de calor podem ser previstas no diagrama TRC do aço estudado ou, na ausência deste, um diagrama TTT pode aproximar os resultados.

Na figura 31, apresenta um diagrama TTT para um aço semelhante ao aço naval ASTM A-131, onde as constituintes resultantes das transformações da austenita nas diferentes faixas de temperaturas aparecem nas seguintes regiões do diagrama, conforme PILIPENKO (2001).

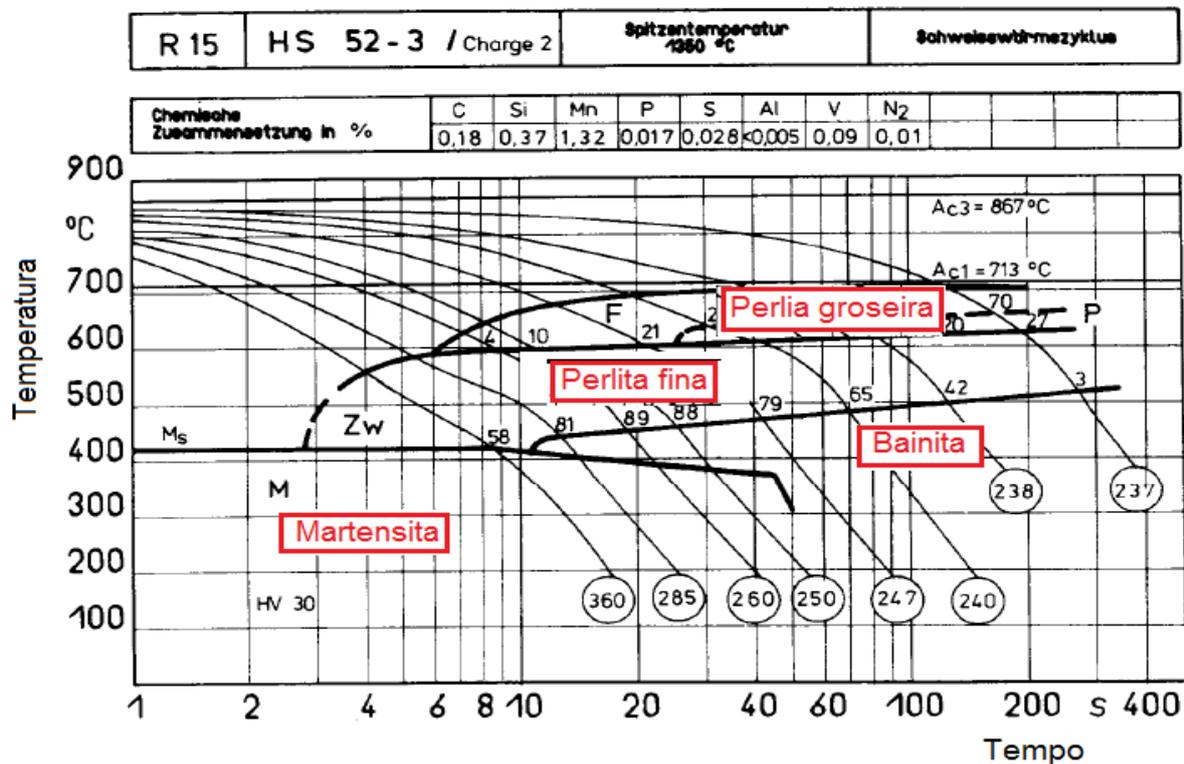


Figura 31- Diagrama TTT de um aço semelhante ao ASTM A-131, PILIPENKO (2001)

De acordo com o diagrama da figura 31 um aquecimento acima da zona crítica poderá produzir a decomposição da austenita em diferentes fases que dependem da velocidade de resfriamento. Velocidades maiores que 360°C/s, que certamente são atingidas devido o resfriamento produzido pelo jato d'água sobre a linha (imediatamente após seu aquecimento) poderão produzir a fase martensítica. Velocidades lentas (menores que 250°C/s) produzidas

por resfriamento natural ou ar soprado poderão produzir estruturas grosseiras, como a perlita grossa, que comprometem a tenacidade a fratura da zona aquecida.

Deste modo, fica evidente que o aquecimento de uma linha de calor jamais poderá atingir a zona crítica; ou seja, deve ser inferior a linha A_{C1} , que para o aço em estudo vale 713°C . Se considerarmos ainda as modificações morfológicas produzidas pelo coalescimento de lamelas da perlita fina que podem engrossar durante aquecimento acima de 600°C , esta deverá ser o limite de temperatura para o aço estudado.

De acordo com o diagrama da figura 31, a região compreendida entre as temperaturas entre 713°C e 600°C , forma-se a perlita grossa por decomposição da austenita (em resfriamento) ou coalescimento da perlita fina durante aquecimento até esta faixa de temperatura. Entre as temperaturas de 600°C e 400°C forma-se unicamente a perlita fina; sendo, portanto este o domínio de temperatura que devemos realizar o aquecimento para a conformação por linhas de calor.

No trabalho de ATKINS (1977) foi demonstrado que um aço ASTM A 131, quando aplicado uma linha de calor, a região aquecida a uma temperatura abaixo de 723°C e resfriada por água imediatamente não retorna a condição original. Pois, o aço sofre modificações das propriedades mecânicas através de alterações na microestrutura.

A associação americana de navios ABS (1982) aprovou que a aplicação das linhas de calor para todos os aços da norma ASTM-131 são permitidas para a fabricação de navios, desde que o resultado dessa aplicação não provoque uma excessiva degradação das propriedades do material, em particular quantos os requisitos de tensões de escoamento e teste de impacto. São aprovados procedimentos onde a temperatura máxima de aquecimento não ultrapasse a 650°C .

Dois trabalhos científicos de KIHARA (1973) apresentam resultados das fragilizações nos aços navais ASTM-A131, da classe de alta tensão de ruptura (50 Kg/mm^2), cujos graus A, D, E, e conclui sobre os efeitos da aplicação da linha de calor.

- 1- É evidente o efeito direto do aquecimento localizado da linha de calor nas deformações termo-elástico-plásticas nos aços.
- 2- Quando a temperatura da região aquecida pela linha de calor, ultrapassar a linha A_{C1} , do gráfico de transformações, temperatura e tempo (TTT), acima de 723°C , existe

fragilizações dependentes do modo de resfriamento. No resfriamento por ar as fragilizações são bem menores que o resfriamento por água.

- 3- No resfriamento por água as fragilizações são superficiais se a temperatura for inferior a 650°C.
- 4- Existe uma transformação microestrutural, quando a região aquecida é imediatamente resfriada por água, que é observada nos resultados dos testes de impacto.

Para a determinação do perfil geométrico da zona de deformação residual deve-se conhecer a região isotérmica em torno da tocha, na chapa, que foi idealizada como uma meia elipse, proposto por ROSENTHAL (1946) e comprovada pelos experimentos de JANG *et al.* (1997).

Os resultados experimentais para a região isotérmica são descritos na figura 32, adaptada do artigo de JANG *et al.* (1997), e pode ser usada para calcular a zona de deformação residual, que correspondem à uma temperatura crítica de aquecimento.

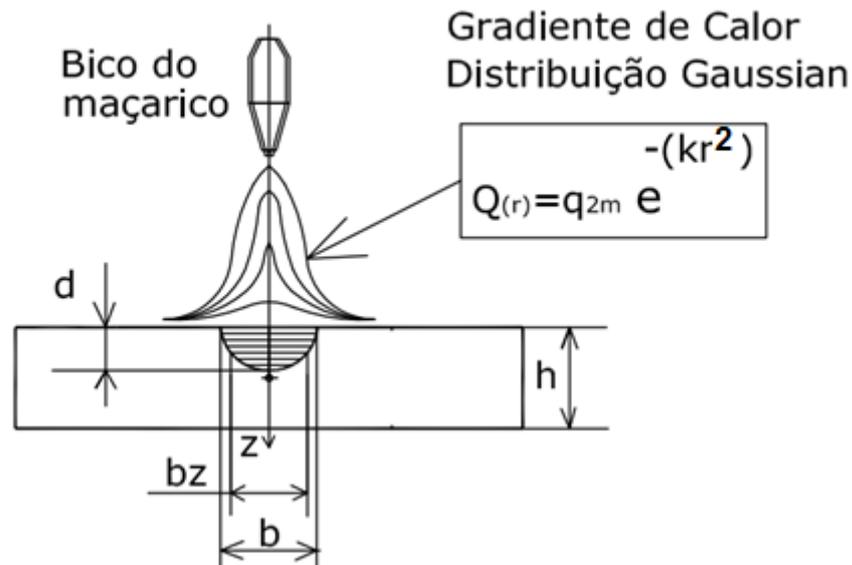


Figura 32-Designações, JANG *et al.* (1997), da região da zona de deformações residuais.

As expressões 9 e 10, apresentadas por JANG *et al.* (1997), 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.

$$\frac{b}{h} = c_1 \sqrt{\frac{q}{vh^2}} \quad (10)$$

$$\frac{d}{h} = c_2 \frac{q}{vh^2} \quad (11)$$

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

O perfil da geometria da zona de deformações residual é assumido como uma forma elíptica que pode ser dimensionada pela expressão (11), conforme JANG *et al.* (1997), por:

$$b_z = b \sqrt{1 - \frac{1}{d^2} \left(z + \frac{h}{2} \right)^2} \quad (12)$$

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]

2.5.8 Anisotropia

As propriedades mecânicas de uma chapa, após um processo de laminação podem variar conforme a direção em que se retira o corpo de prova para ensaio. Este fenômeno é descrito como anisotropia que aparece por causa da orientação preferencial dos planos e direções cristalinas do metal após grandes deformações.

O índice de anisotropia plástica r pode ser obtido nas orientações de 0° , 45° e 90° do sentido de laminação da amostra de chapa, conforme a norma ASTM E517.

Em um trabalho desenvolvido por AMOROS (2008), que analisou os índices de anisotropia para chapa de aço carbono plana laminada após o corte a laser, observou para as orientações a 0° , 45° e 90° o valor do índice de anisotropia foi de 0,90; 0,95 e 0,92 respectivamente, cujo valor médio de 0,93 e com uma anisotropia planar de - 0,03.

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Materiais das amostras de chapas

Para o experimento foram utilizadas várias chapas com geometria retangular do aço naval ASTM A 131 grau AH36, por ser um dos aços mais utilizados na fabricação de painéis navais.

Este material foi fornecido pelo Estaleiro Atlântico Sul, com dimensões 100 mm x 300 mm e espessuras variando de 8,0 mm, 12,7 mm, 16,0 mm. A tabela 2 apresenta a composição química do aço, segundo as especificações recomendadas pela norma ASTM A 131 [2004]

Tabela 2 – Composição química da amostra do aço ASTM A131 grau AH36 (ASTM 2004)

C	Cr	Mn	Ni	Si	V	Al	Cu	S	P	Sn	Nb
0,130	0,026	1,418	0,012	0,346	0,056	0,028	0,015	0,007	0,023	0,002	0,020

3.1.2. Consumíveis para aquecimento

O gás acetilênico e o gás oxigênio que foram utilizados nos experimentos foram produzidos pela empresa WHITE MARTINS, sendo que, fornecido em cilindros de volume de 10 m³ de gás.

3.2 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS

Os equipamentos e os instrumentos que foram utilizados nos experimentos são classificados, como:

- Equipamentos para o sistema de geração de chama oxiacetilênica;
- Equipamentos para o controle da velocidade de deslocamento da chama
- Equipamento para medição das deformações iniciais e finais das amostras de chapa;
- Instrumento para visualização em tempo real das deformações
- Instrumentos para medição do diferencial de temperatura de entrada e saída de água de resfriamento e do gradiente de temperatura nas amostras de chapa, durante aplicação da linha de calor.
- Equipamento protótipo de aplicação de linhas de calor

3.2.1 Equipamentos para o sistema de geração de chama oxiacetilênica

- 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;
- Regulador de pressão para gás acetilênico marca CONDOR, modelo RA-51 AC, para pressão máxima de 141 Kgf/cm², acoplado com manômetro de alta pressão, cuja escala de 0 á 25 Kgf/cm², com divisão de escala de 0,5 Kgf/cm² e manômetro de baixa pressão de 0 á 10 Kgf/cm², com divisão de escala 0,05 Kgf/cm², referência 073040;
- Válvula corta fogo com retenção de fluxo para regulador de gás, modelo CONDOR VCF- RG, referência 093610;
- Regulador de pressão para gás oxigênio marca CONDOR, modelo RO-50 OX, para pressão máxima de 200 Kgf/cm², acoplado com manômetro de alta pressão cuja escala de 0 á 250 Kgf/cm², com divisão de escala de 5 Kgf/cm² e manômetro de baixa pressão de 0 á 14 Kgf/cm², com divisão de escala 0,2 Kgf/cm², referência 074741;
- Válvula corta fogo com retenção de fluxo para regulador de gás, modelo CONDOR VCF- RO; referência 083550;
- Mangueira germinada, cujo fabricante IBIRA, para gás acetileno e oxigênio, de diâmetro 8,0 mm, pressão máxima de 300 PSI (20,9 Kgf/cm²);
- Válvula corta fogo com retenção de fluxo para maçarico, modelo CONDOR VCF- MG, referência 082660;
- Válvula corta fogo com retenção de fluxo para maçarico, modelo CONDOR VCF- MO, referência 075250.
- Indicador de fluxo para oxigênio marca WHITE MARTINS.

3.2.2 Equipamentos para o controle da velocidade de deslocamento da chama

- 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 das amostras de chapa

- 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 Instrumentos para medição do diferencial de temperatura de entrada e saída de água de resfriamento e do gradiente de temperatura nas amostras de chapa, durante aplicação da linha de calor

- O coletor de dados é um dispositivo que recebe os sinais elétricos de tensão analógica dos termopares e faz a conversão em sinal digital em função do tempo. O sinal digital é correlacionado com uma escala de temperatura. Para esse fim, foi utilizado 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, a regulagem da máquina procedeu-se conforme indicação do fabricante; uma potência de 30% com 25 ciclos por segundo em um impulso no LTSM- Laboratório de termometria e simulações termomecânicas do DEMEC-UFPE

3.2.6 Equipamento protótipo de aplicação de linhas de calor

O equipamento protótipo para aplicação da linha de calor foi desenvolvido, a partir de uma estrutura simples de cantoneiras de aço carbono para suportar diversos sistemas que compõem o processo de aplicação de linha de calor, tais como: sistema elétrico de acionamento, sistema de transporte por carro porta maçarico móvel, sistema de gases, sistema de aquecimento, sistema de água de resfriamento. Na figura 33 estão apresentados os principais esquemas da máquina.

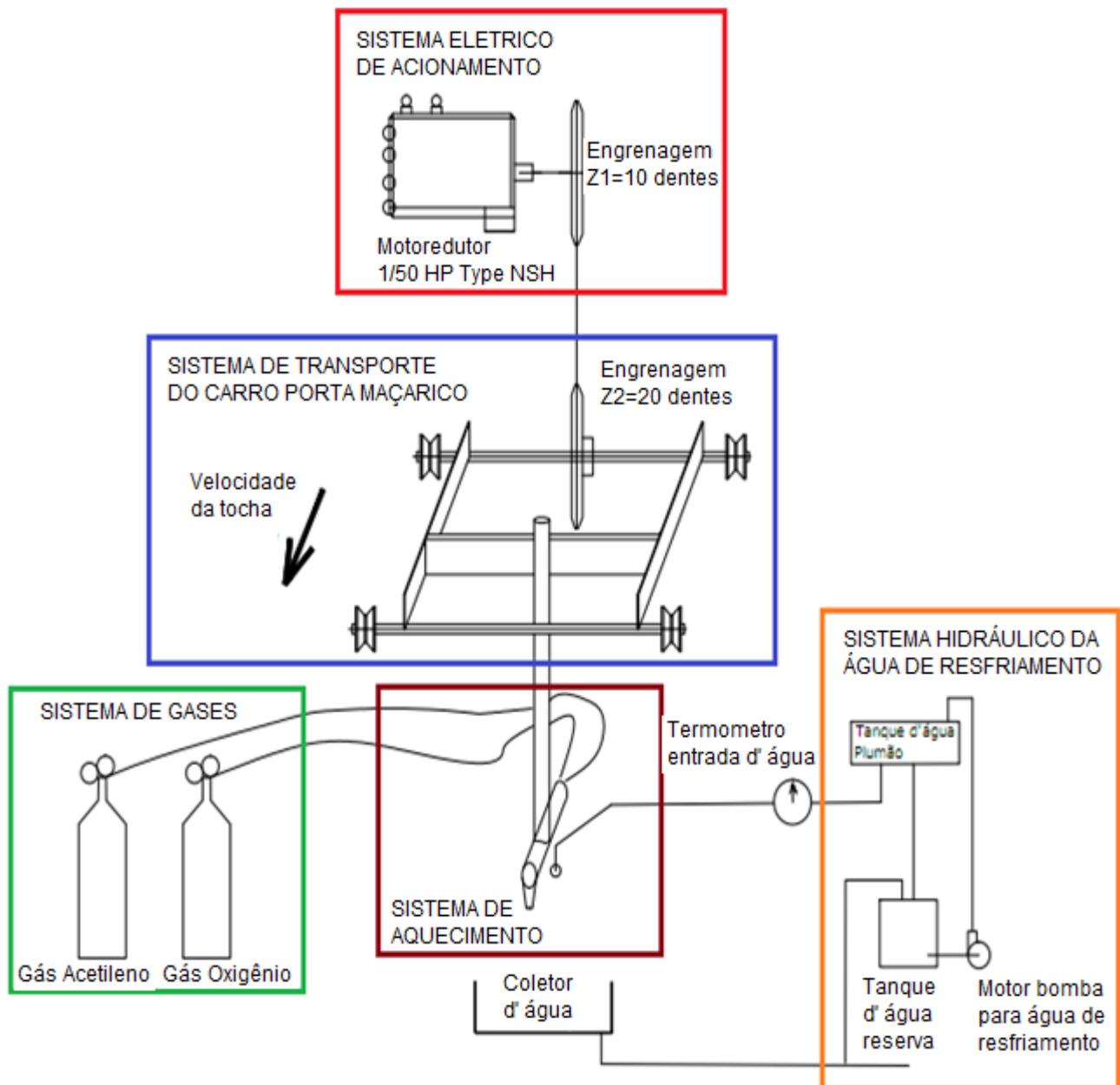


Figura 33- Esquema principal do protótipo de máquina de linha de calor.

O sistema de acionamento do carro porta maçarico na máquina é composto de motor elétrico e redutor que aciona as correntes de transmissão entre o eixo do motor e o eixo das roldanas, provocando um deslocamento linear sobre trilhos, um dispositivo elétrico de potenciômetro regula o controle da velocidade, do motor mantendo-o sempre com velocidade constante. Este dispositivo garante faixas de velocidades entre 2,0 a 51,5 mm/seg. Na figura 34 está representado o sistema de acionamento do carro porta maçarico transportador com controle de velocidade.

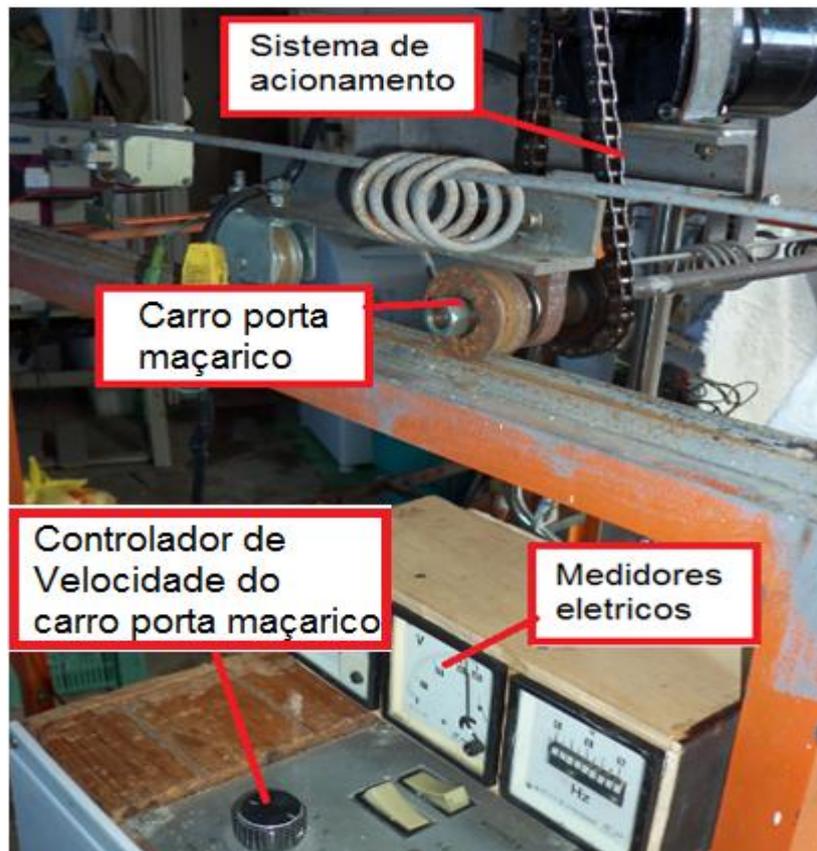


Figura 34- Acionamento elétrico do carro porta maçarico com controle de velocidade.

O sistema de transporte do carro porta maçarico móvel é composto de uma estrutura metálica apoiada por quatro roldanas, que são guiadas por um trilho, sendo que as roldanas traseiras são unidas a um eixo que recebe o acionamento do motor elétrico.

O carro porta maçarico móvel suporta um dispositivo de fixação do maçarico de aquecimento e outro do sistema de água de resfriamento. Todo o conjunto do carro porta maçarico móvel se desloca em velocidade constante regulada pelo sistema de acionamento. Na figura 35, está representado o carro porta maçarico móvel com o dispositivo de fixação do maçarico de aquecimento.

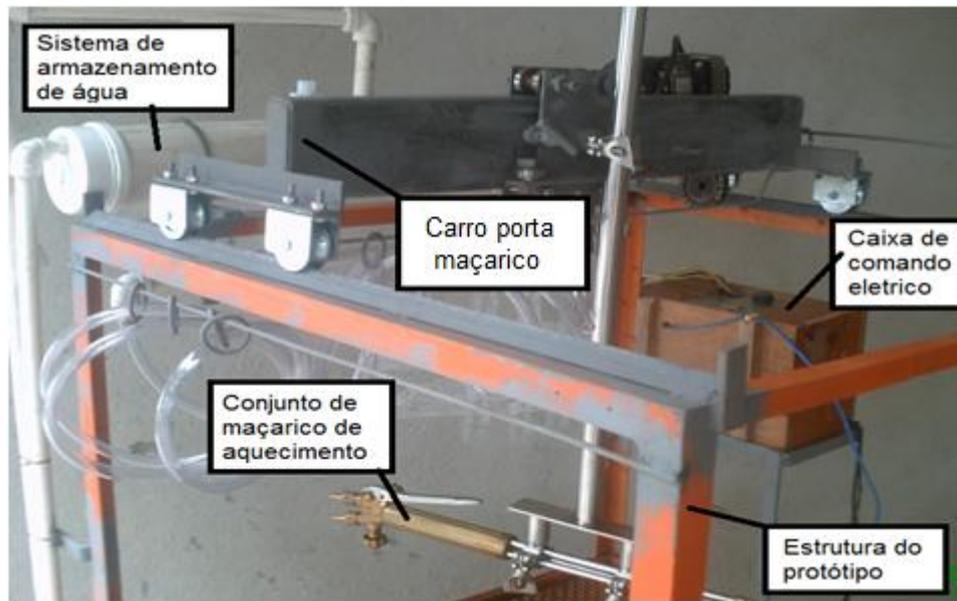


Figura 35- Carro porta maçarico móvel com o dispositivo de fixação do maçarico de aquecimento.

O sistema de gases é composto por cilindros de gás acetileno e gás oxigênio, ambos dispõem de válvulas reguladoras de pressão, para controlar a formação do tipo de chama no maçarico, as mangueiras são apropriadas para o tipo de gás, verde para o gás oxigênio e vermelhas para o acetileno, próximo ao maçarico são instaladas nas mangueiras válvulas corta chamas para evitar retorno de chama aos cilindros de gases. Na figura 36 mostra os cilindros de gases acetileno e oxigênio



Figura 36- Apresentação do Sistema de gases oxigênio e acetileno.

As pressões de saída dos gases variam conforme o bico do maçarico, a espessura de chapa, o tipo de maçarico, geralmente a pressão do gás acetileno é regulada na faixa de 0,3 a 0,7 Kg/cm², enquanto que, a pressão para o gás oxigênio entre 2,0 a 5,5 Kg/cm².

O sistema de aquecimento é composto por um maçarico de aquecimento, no início do maçarico tem um bico onde se inicia a chama oxiacetilênica, ao final são acopladas as mangueiras de gás acetileno e de oxigênio.

A regulação da vazão do gás acetileno e do gás oxigênio é realizada na parte traseira do maçarico pelas válvulas de controle de vazão que são partes integrantes do corpo do maçarico. Para acender o maçarico, inicialmente deve-se abrir a válvula de regulação de vazão do gás acetileno, provocar uma faísca, logo após abrir a regulação do gás oxigênio nesta etapa, a abertura das válvulas se define qual o tipo de chama a ser utilizada.

Na figura 37, apresenta os acessórios que compõem o sistema de aquecimento com destaque para o maçarico e o bico de aquecimento, integrado com o sistema de resfriamento e com os registradores de temperatura.

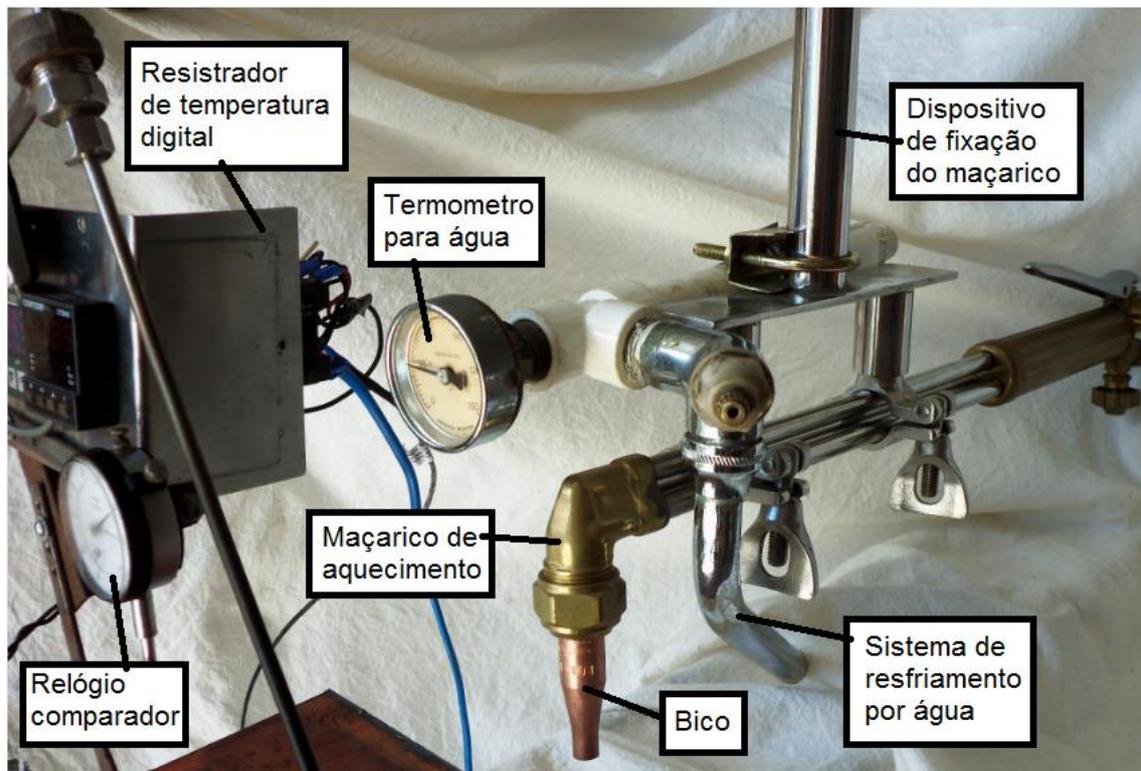


Figura 37- Apresentação dos Acessórios do sistema de aquecimento.

O sistema de água de resfriamento é composto de um circuito fechado de recirculação de água, onde se tem um tanque de armazenamento de água, que alimenta uma bomba centrífuga, e esta envia água para um tanque pulmão na parte superior, fazendo chegar água próximo ao sistema de aquecimento. A água é reaproveitada numa bacia de contenção e direcionada para o tanque de armazenamento para recirculação. Na figura 38, apresenta os detalhes do sistema de água de resfriamento.

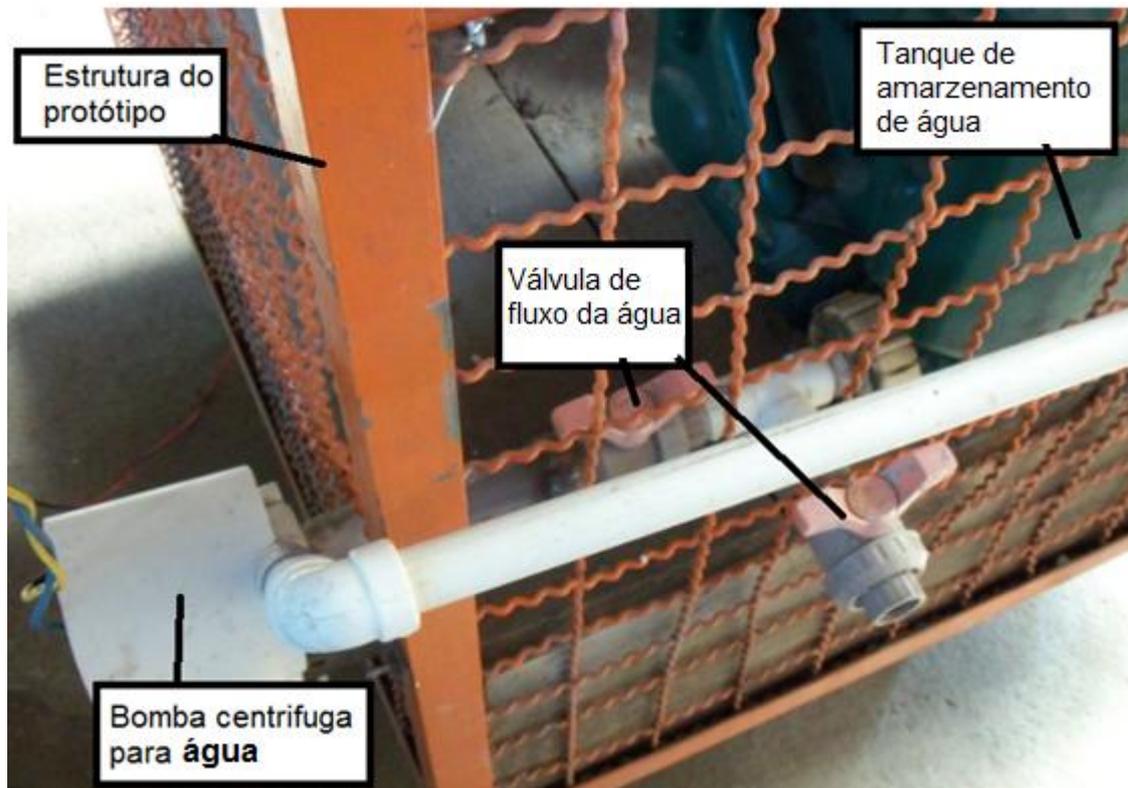


Figura 38- Apresentação do Sistema de água de resfriamento.

Os sistemas apresentados para o processo de linha de calor visam o controle dos seguintes parâmetros:

- Velocidade constante no deslocamento da fonte de calor;
- Afastamento constante entre a chama e a amostra de chapa;
- Geração de intensidade de calor uniforme;
- Regulagem da vazão de gases acetileno e oxigênio;
- Grau de resfriamento pela circulação de água;
- Distância entre a fonte de aquecimento e a fonte de resfriamento;
- Controle da vazão de água de resfriamento, etc.

3.3. MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados as etapas do planejamento da execução dos experimentos, assim como a descrição do esquema de medição das amostras na máquina de medidas por coordenadas, com o objetivo de obtenção dos parâmetros para comparação com os ângulos de deformações obtidos nas condições de crua e queimada, e que servirão de amostragem para a análise e serão confrontados com os resultados experimentais e analíticos.

3.3.1. Experimento

O planejamento dos experimentos foi elaborado em quatro etapas básicas:

Primeira etapa: Compreendeu a análise da fonte de calor com a utilização de um calorímetro, para se determinar a quantidade de calor liberada pela fonte oxiacetilênica utilizada. Abrangeu a calibração da fonte de calor, a regulagem da vazão dos gases e intensidade da chama, ajuste da velocidade do deslocamento da fonte de calor e análise da distribuição de calor na amostra.

Segunda etapa: Verificou-se a medição das coordenadas de pontos ao longo de linhas transversais das amostras de chapa na condição de chapa crua para determinação do perfil inicial. Para isso, foi utilizada a máquina de medição por coordenadas.

Terceira etapa: Foi aplicada a linha de calor nas amostras, utilizando o protótipo de máquina de aplicação de linha de calor, para controle dos parâmetros e acompanhamento das evidências durante o experimento. Nesta etapa, registraram-se os valores transmitidos dos termopares para levantamento de dados da temperatura em função do tempo, e também observar as variações dimensionais, em tempo real, pela indicação relógio comparador.

Quarta etapa: Foi verificada a medição das coordenadas de pontos ao longo de linhas transversais das amostras de chapas queimadas para determinar o perfil final na máquina de medição por coordenadas, cujos resultados servirão de base para a determinação do ângulo de deformação de cada amostra de chapa.

3.3.2. Determinação da quantidade de calor no calorímetro.

Para determinar a quantidade de calor no evento de aquecimento por linha de calor foi utilizado um calorímetro o qual foi construído a partir de um tubo retangular de aço carbono revestido externamente com um isolante térmico, exceto na parte superior. Contém uma entrada de água com a vazão controlada e um termopar para medir a temperatura de entrada da água. Do outro lado, uma saída de água também com um termopar para medir a temperatura de saída de água. A chama oxiacetilenica percorre todo o calorímetro com uma velocidade constante transferindo calor para a água. Na figura 39 apresenta a realização do experimento com um calorímetro.

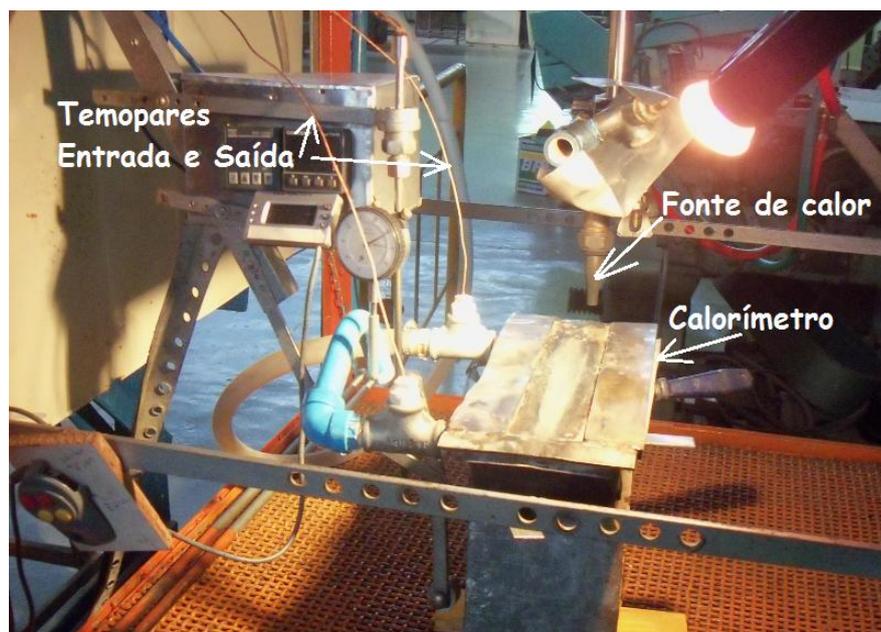


Figura 39- Apresentação do Experimento com o calorímetro.

Cinco experimentos foram realizados utilizando o calorímetro, mantendo a regulagem de vazão e pressão dos gases acetileno e oxigênio, o tipo da chama, o afastamento do bico a superfície do calorímetro, obteve-se os seguintes parâmetros:

- Velocidade de deslocamento da fonte de calor média de $2,37 \pm 0,8$ mm/s;
- Vazão média de água de $31,80 \pm 3,5$ g/s;
- Temperatura de entrada da água 30°C ;
- O somatório das temperaturas de saída da água em relação à temperatura de entrada em função do tempo de duração do experimento ficou estabelecido em um gráfico acumulativo

A quantidade de calor determinada pela equação (9) da página 41 teve um valor médio de $414,02 \pm 12,0$ cal/s, a qual foi utilizada como aporte térmico em todo o experimento.

3.3.3. Medição das amostras na máquina de medição por coordenadas

Inicialmente, cada amostra de chapa, antes do experimento foi avaliada individualmente os perfis das coordenadas de pontos ao longo de linhas transversais da chapa, na qual, foi denominada de chapa na condição crua.

Após a aplicação da linha de calor, também, foi avaliada individualmente os perfis das coordenadas de pontos ao longo de linhas transversais da chapa, sendo denominada de chapa na condição queimada.

Para avaliar o perfil das coordenadas de pontos ao longo de linhas transversais da chapa, entre as chapas na condição crua e queimada foi idealizado um esquema de medição por coordenadas, onde xy representa o plano de apoio das chapas e o eixo z, representa os afastamentos dos pontos em relação ao plano xy, onde, o eixo y representa o passo de cada medição. Também, a amostra de chapa foi subdividida em seções afastada do eixo y, para facilitar as medições. Para cada seção, tem-se um valor correspondente entre os afastamentos dos pontos em relação ao plano xy, (eixo z) e o passo da medição (eixo y). Na figura 40, apresenta o esquema de medição das amostras com destaque o sentido de aplicação da linha de calor.

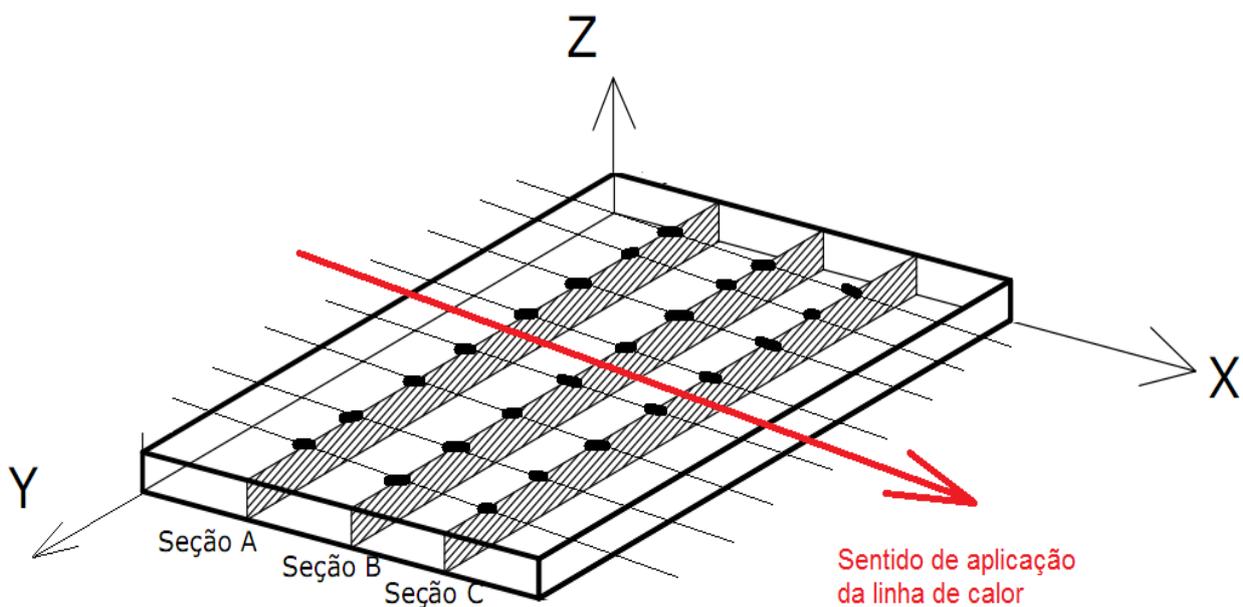


Figura 40- Esquema de medição das amostras na máquina de medidas por coordenadas.

Na figura 41, apresenta um detalhe da medição no plano xy, mesa de apoio da chapa, no sentido y, para determinação das coordenadas de pontos ao longo de linhas transversais das amostras na condição de chapa crua. Enquanto que, na figura 42, apresenta a condição queimada.

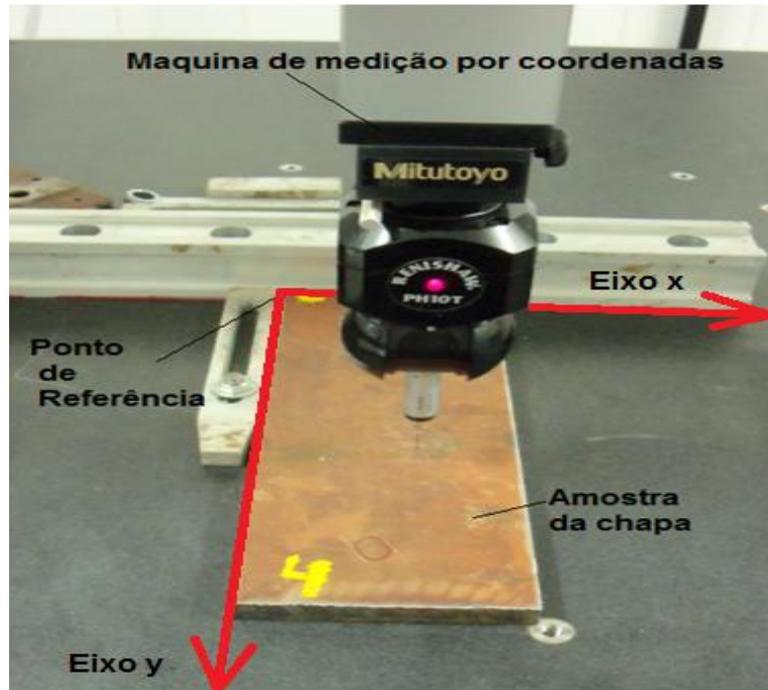


Figura 41- Detalhe da medição no plano XY, no sentido y, na condição crua.

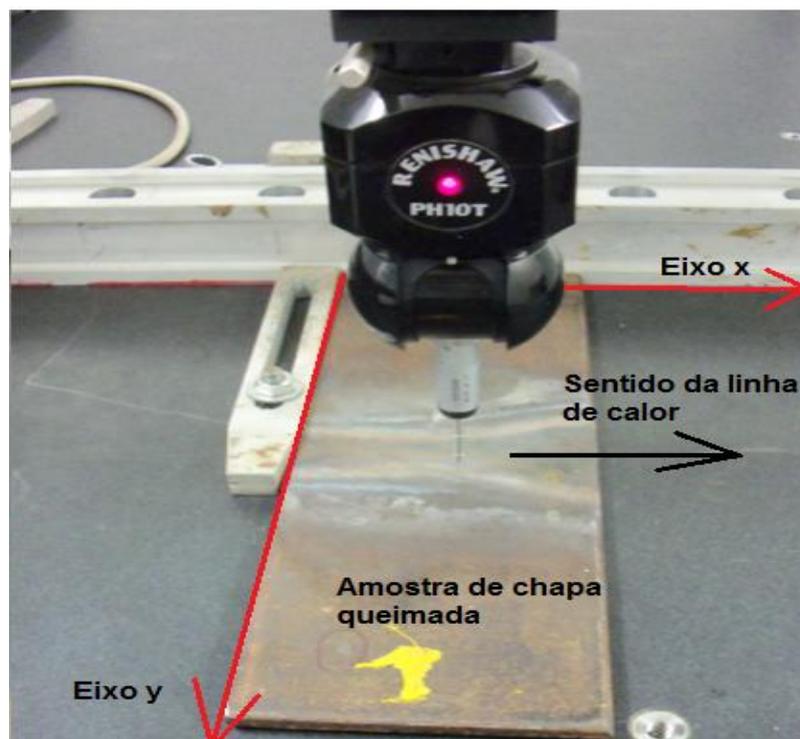


Figura 42- Detalhe da medição no plano XY, no sentido y, na condição queimada.

3.3.4. Roteiro para aplicação da linha de calor nas amostras de chapas

A aplicação de linha de calor nas amostras de chapas foi realizada em cinco momentos. No primeiro momento, procedeu-se a montagem dos termopares nas faces inferior e superior de cada chapa, seguido da montagem dos medidores de temperatura. No terceiro momento, foi posicionada a amostra de chapa na máquina de simulação de linha de calor. No quarto momento, regulou-se o equipamento oxí acetilênico para garantir a intensidade da chama na aplicação da linha de calor nas amostras de chapas conforme as condições ideais atingidas no calorímetro. No quinto momento, foi aplicada a linha de calor em cada amostra de chapa e concluindo com a coleta de dados, tanto das temperaturas atingidas como das deformações. Cada etapa desse roteiro será descrita na seqüência.

3.3.5. Montagem dos termopares inferior e superior na amostra de chapa

O termopar utilizado foi do tipo Cromel-Alumel. A fixação dos termopares na amostra de chapa foi realizada por um conjunto de solda de resistência tipo MP-25 BANTECH do LTSM- Laboratório de termometria e simulações termomecânicas do DEMEC-UFPE, a regulagem da máquina procedeu-se conforme indicação do fabricante, ou seja: uma potência de 30% com 25 ciclos por segundo em um impulso. Na figura 43 ilustra o procedimento de soldagem dos termopares.

A solda por resistência é um processo que envolve a aplicação conjunta de pressão mecânica e passagem de uma corrente elétrica com intensidade e duração adequada. A passagem de corrente elétrica provoca aquecimento provocando certa quantidade de fusão entre as peças, a pressão mecânica garante a continuidade do circuito elétrico e junção das peças.

Tomando por referência as indicações de posicionamento do termopar do artigo de JANG et. al.(1997) que também utilizou um processo de chama oxiacetilenica em seus experimentos, a partir de chapas de 12,7 mm de espessura, verificou-se que na distância paralela de 20 mm da linha de calor é possível obter consideráveis valores de temperatura.

Portanto, na amostra de cada chapa foi fixado por solda e resistência um termopar na posição central em ambos os lados da espessura da chapa.



Figura 43- Detalhe da soldagem do termopar na chapa.

3.3.6. Montagem do sistema de medição da temperatura

O coletor de dados é um dispositivo que recebe os sinais elétricos de tensão analógica dos termopares e faz a conversão em sinal digital em função do tempo. O sinal digital é correlacionado com uma escala de temperatura. Para esse fim, foi utilizado o DATATAKER DT80, do LTSM- Laboratório de termometria e simulações termomecânicas do DEMEC-UFPE. Na figura 44 pode-se observar o conjunto dos equipamentos para coleta de dados.



Coletor de dados
DATATAKER DT80

Entrada para
termopar

Figura 44- Detalhe do conjunto de equipamento para coleta de dados, de temperatura.

Diversos cuidados especiais foram tomados para garantir as entradas de sinais nos coletores de dados, tais como: exportação dos dados para o programa de computador específico, contato perfeito do termopar na amostra de chapa, localização correta no quadro de entradas do coletor, proteção especial do termopar contra a chama oxiacetilênica da fonte de calor e proteção do instrumento quanto à irradiação do calor.

3.3.7. Posicionamento das amostras na máquina de simulação de linha de calor

O posicionamento das amostras de chapas na máquina de linha de calor foi apoiada nas duas extremidades, na figura 45 apresenta as duas extremidades apoiadas e equidistantes garantindo a simetria em ambos os sentidos das amostras para que as deformações se apresentem em ambos os lados.



Figura 45- Detalhe do posicionamento da amostra de chapa bi apoiada.

3.3.8. Sistema para aplicação da linha de calor nas amostras de chapas

Inicialmente a amostra de chapa foi posicionada na máquina de linha de calor na temperatura ambiente de 32°C. Na seqüência seguinte, procedeu-se da aplicação da linha de calor, que consistiu de uma fonte de calor com uma intensidade de calor $414,02 \pm 12,0$ Cal/s, que percorreu a largura da amostra da chapa de 100 mm, a uma velocidade constante de $2,37 \pm 0,8$ mm/s, logo após, a aplicação da linha de calor, um bico injetor com vazão

mássica média de água de $31,80 \pm 3,5$ g/s, distante de 120 mm da chama, resfriava a amostra de chapa.

Na figura 46 é apresentado um esquema inicial, onde mostra os principais elementos da realização da aplicação de linha de calor na amostra de chapa

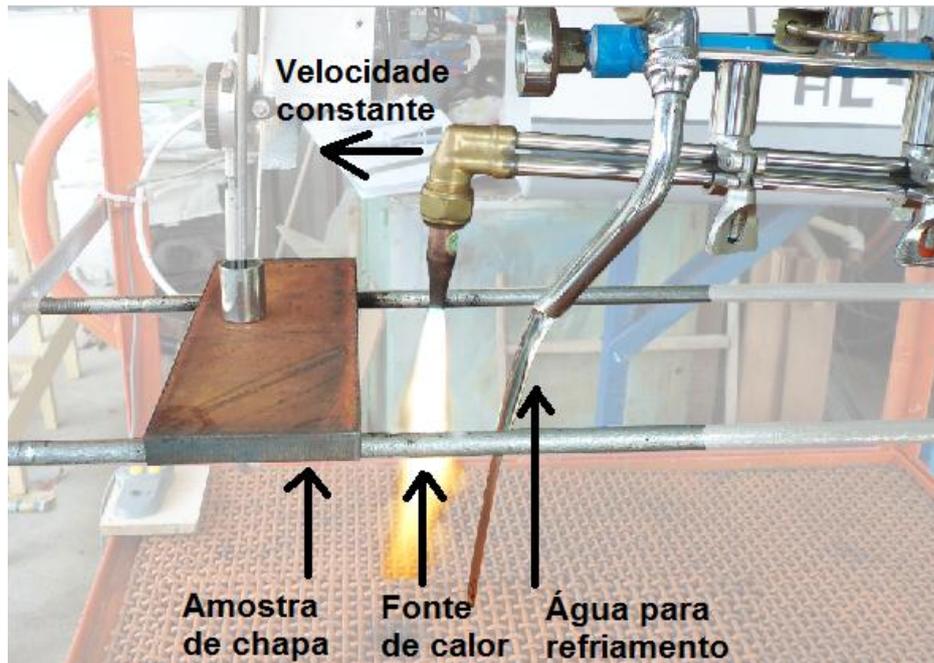


Figura 46- Apresentação do Experimento com o esquema inicial da aplicação da linha de calor.

Esse procedimento foi repetido para todas as amostras de chapas com espessuras de 8,0mm, 12,7mm, 16,0 mm. Paralelamente, foi coletado dado do gradiente de temperatura, tempo de execução de cada evento do experimento, os quais foram armazenados eletronicamente.

3.3.9. Sistema para a visualização da deformação em tempo real

Paralelamente a realização da aplicação de linhas de calor nas amostras de chapas, apenas com um caráter de visualização das deformações em tempo real, foi verificada através de um relógio comparador estrategicamente posicionado durante a passagem da fonte de calor.

Na figura 47, pode-se notar na seqüência dos quadros que as deformações, registrada no relógio comparador, apresentou no início da aplicação da linha de calor uma pequena

variação. Porém, logo após, a aplicação da água de resfriamento as deformações se intensificaram.

A movimentação do ponteiro do relógio comparador no terceiro quadro, em relação ao primeiro, registra uma deformação acentuada após o resfriamento



Figura 47- Apresentação do Experimento com a verificação da deformação em tempo real.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

A organização deste capítulo foi elaborada de forma seqüencial aos eventos realizados nos experimentos. Inicialmente será apresentando um gradiente de temperatura da passagem da tocha pelo ponto de medição para se determinar a máxima temperatura atingida na parte de aquecimento e na parte oposta ao aquecimento.

Na seqüência, apresenta-se o levantamento dos dados das coordenadas de pontos ao longo de linhas transversais das amostras de chapas nas condições cruas e queimadas, em tabelas, seguindo a elaboração de gráficos dos perfis dos pontos coletados, onde se pode determinar dos ângulos entre os perfis das condições cruas e queimadas.

4.1. Dados do gradiente de temperatura

Numa condição de amostra de chapa com espessura 16,0 mm foram obtidos os dados do gradiente de temperatura com a instalação dos termopares na zona de calor e no lado oposto a zona de calor. Os valores medidos estão apresentados no gráfico da figura 48.

No tempo de 782 s, que representa o momento da passagem da chama pelo ponto de medição de temperatura foi atingida a máxima temperatura de 430,26°C, na zona de calor e a temperatura de 291,18°C no lado oposto a zona de calor. Compatível com a recomendação teórica de não ultrapassar a temperatura de 650°C em aplicações de linha de calor.

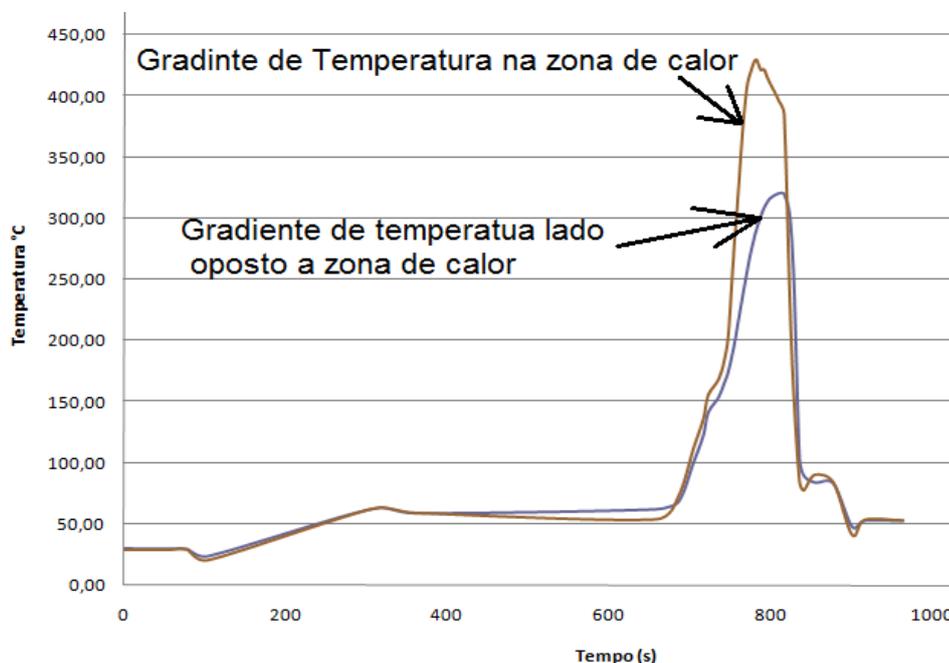


Figura 48- Gráfico do gradiente de temperatura x tempo para chapa de 16 mm

Também, pode-se observar uma rápida queda de temperatura, logo após o aquecimento na temperatura máxima, isto, se deve a passagem do jato de água de resfriamento.

4.2. Organização dos dados coletados.

Na figura 49 apresenta amostra de chapa, na mesma espessura, em duas condições, crua e queimada, para uma mesma seção em ambas as condições, foram obtidas as coordenadas dos pontos respectivamente as medições do passo de 5,0 mm, no eixo y e as alturas no eixo z.

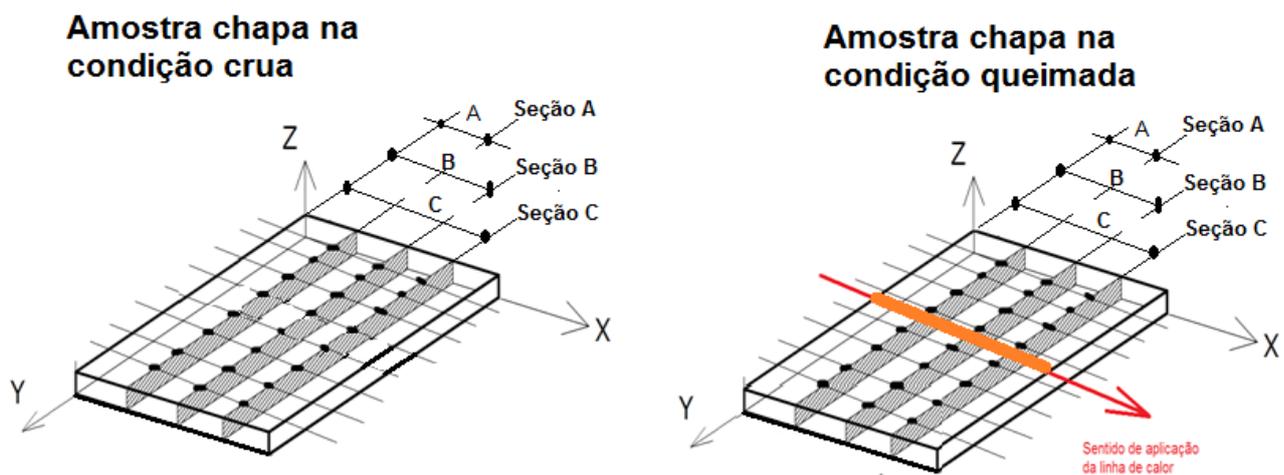


Figura 49- Esquema para organização dos dados coletados

As coordenadas dos pontos obtidos na máquina de medição de coordenadas das amostras de chapas, nas espessuras específicas e nas condições crua e queimada, na seção, ao longo de cada linha estão sendo apresentadas os dados nas tabelas 4, 5 e 6.

Na tabela 4 apresenta os resultados obtidos da chapa de espessura de 8,0 mm, para as seções de 25,0 mm, de 55,0 mm e de 75,0 mm, em ambas as condições, crua e queimada, com as suas respectivas cotas no eixo y e no eixo z.

Na tabela 5 apresenta os resultados obtidos da chapa de espessura de 12,7 mm, para as seções de 35,0 mm, de 65,0 mm e de 95,0 mm, em ambas as condições, crua e queimada, com as suas respectivas cotas no eixo y e no eixo z.

Na tabela 6 apresenta os resultados obtidos da chapa de espessura de 16,0 mm, para as seções de 15,0 mm, de 45,0 mm e de 90,0 mm, em ambas as condições, crua e queimada, com as suas respectivas cotas no eixo y e no eixo z.

Tabela 4 – Dados coletados da chapa de 8,0mm na condição crua e queimada

Dados coletados da chapa de 8,0 m de espessura na condição Crua e queimada								
Seção à 25,0 mm			Seção à 55,0 mm			Seção à 75,0 mm		
Cota Y	Cota Z		Cota Y	Cota Z		Cota Y	Cota Z	
Comp	Crua	Queimada	Comp.	Crua	Queimada	Comp	Crua	Queimada
28,00	8,30	8,20	34,00	8,40	8,40	32,00	8,30	8,40
43,00	8,50	8,37	59,00	8,60	8,60	42,00	8,40	8,40
58,00	8,60	8,40	99,00	8,80	8,80	77,00	8,70	8,50
73,00	8,80	8,44	139,00	8,90	8,90	112,00	8,80	8,30
118,00	9,00	8,40	164,00	8,80	8,80	157,00	8,80	8,00
178,10	9,00	8,30	184,00	8,80	8,80	187,00	8,70	8,20
228,10	8,80	8,80	219,00	8,70	8,70	217,00	8,60	8,50
253,10	8,60	8,90	259,00	8,50	8,40	267,00	8,30	8,80
293,00	8,30	9,10	294,00	8,10	8,10	297,00	8,00	8,90

Tabela 5 – Dados coletados da chapa de 12,7mm na condição crua e queimada

Dados coletados da chapa de 12,7 mm na condição Crua e queimada								
Seção à 35,0 mm			Seção à 65,0 mm			Seção à 95,0 mm		
Cota Y	Cota Z		Cota Y	Cota Z		Cota Y	Cota Z	
Comp	Crua	Queimada	Comp	Crua	Queimada	Comp	Crua	Queimada
28,00	12,60	12,80	26,00	12,70	12,70	25,00	12,70	12,70
58,00	12,60	12,80	37,00	12,70	12,70	50,00	12,70	12,70
103,00	12,70	12,80	67,00	12,70	12,70	80,00	12,70	12,70
138,00	12,70	12,70	102,00	12,70	12,70	120,00	12,70	12,60
168,00	12,70	12,90	142,00	12,70	12,70	180,00	12,70	12,90
203,00	12,70	13,40	187,00	12,70	13,20	210,00	12,70	13,30
243,00	12,70	13,70	222,00	12,70	13,90	250,00	12,70	13,80
283,00	12,60	14,20	272,00	12,70	14,10	291,00	12,70	14,20

Tabela 6 – Dados coletados da chapa de 16,0 mm na condição crua e queimada

Dados coletados da chapa 16,0 mm de espessura na condição Crua e queimada								
Seção à 15,0 mm			Seção à 45,0 mm			Seção à 90,0 mm		
Cota Y	Cota Z		Cota Y	Cota Z		Cota Y	Cota Z	
Comp	Crua	Queimada	Comp	Crua	Queimada	Comp	Crua	Queimada
25,00	16,40	16,50	25,00	16,60	16,50	27,00	16,40	16,20
40,00	16,50	16,60	50,00	16,90	16,60	50,00	16,60	16,40
80,00	16,80	16,70	80,00	17,10	16,70	80,00	16,80	16,40
115,00	16,70	16,70	120,00	17,30	16,70	122,00	17,00	16,30
150,00	17,00	16,70	160,00	17,40	16,70	162,00	17,00	16,30
180,00	17,00	17,00	200,00	17,30	17,00	202,00	16,90	16,90
235,00	16,70	17,30	240,00	17,10	17,30	242,00	16,80	16,90
285,00	16,30	17,40	280,00	16,70	17,40	282,00	16,40	17,00

4.3. Padrão gráfico para determinação do ângulo de deformação.

Após o levantamento de dados, realizou-se a construção dos gráficos dos perfis transversais de cada amostra de chapa nas condições de chapa crua e queimada, com o objetivo de se determinar o ângulo entre as duas condições.

No gráfico apresentado de forma esquemática, conforme mostra a figura 50, a representação gráfica entre os resultados obtidos na análise do comportamento dos perfis transversais na condição crua e queimada. Pode-se observar que existe um ângulo de deformação entre os perfis crua e queimada, este ângulo é objeto fundamental desse estudo, conforme foi apresentado na figura 19, página 27, e está vinculado ao cálculo de teoria simplificada termo-elástico-plástica.

Esta representação é válida para todas as amostras de chapas estudadas além de, representar as seções, expressam a magnitude das deformações e seu posicionamento.

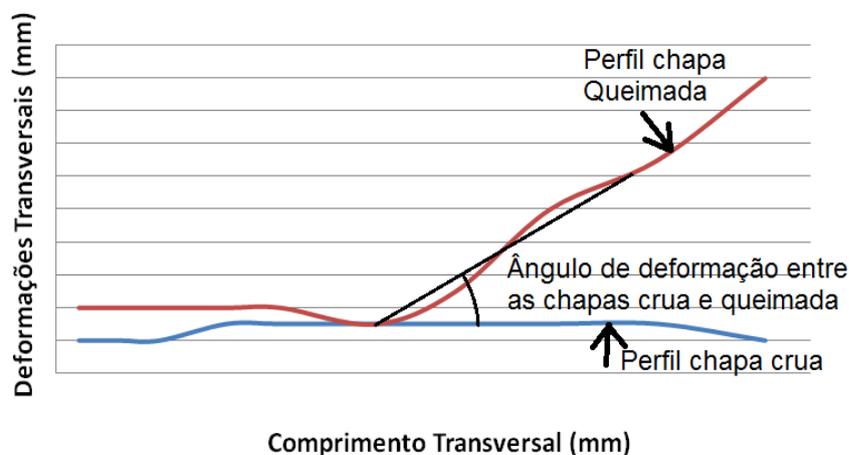


Figura 50- Padrão gráfico dos perfis transversais para ângulo de deformação

4.4. Determinação do ângulo formado entre a chapa crua e queimada

As amostras de chapa do experimento tiveram espessuras de 8,0 mm, 12,7 mm e de 16,0 mm e foram analisadas nas condições, cruas e queimadas, cujos resultados estão apresentados na seqüência.

Para a amostra de chapa de espessura 8,0 mm, o ângulo formado pelo perfil da chapa crua e queimada relativa à seção a 25,0 mm, corresponde a $0,74^\circ$, conforme se apresenta na figura 51. Enquanto que, na seção a 55,0 mm, corresponde a 0° , conforme apresentado na figura 52. Entretanto que, na seção a 75,0 mm, corresponde a $0,64^\circ$, conforme indicado na figura 53. Adotou-se um ângulo médio de $0,72^\circ \pm 0,05^\circ$ para esta espessura de chapa.

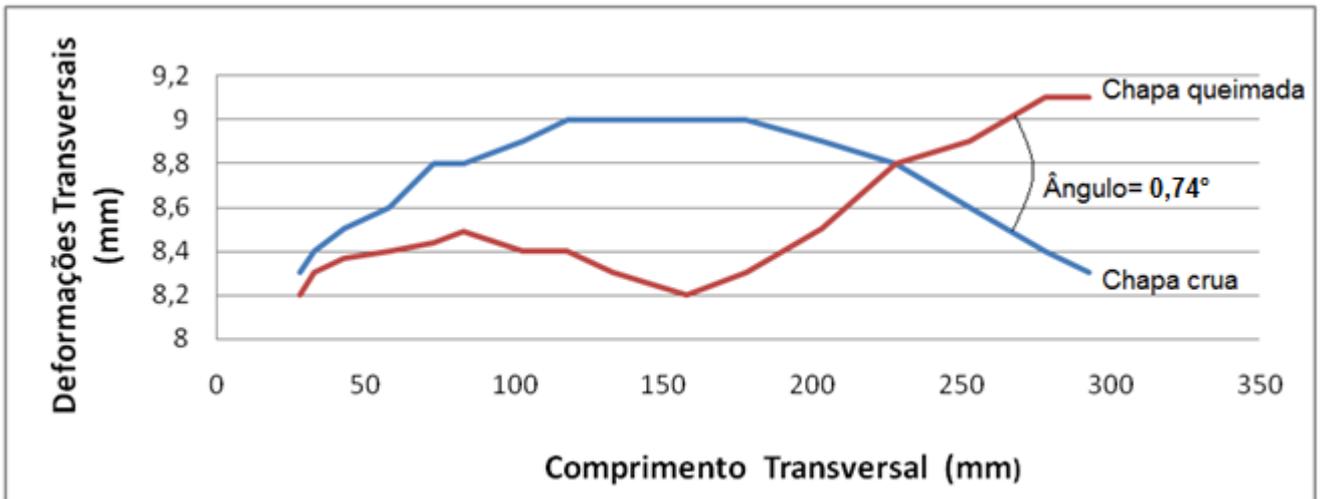


Figura 51- Gráfico da chapa espessura 8,0 mm crua e queimada na seção 25,0 mm

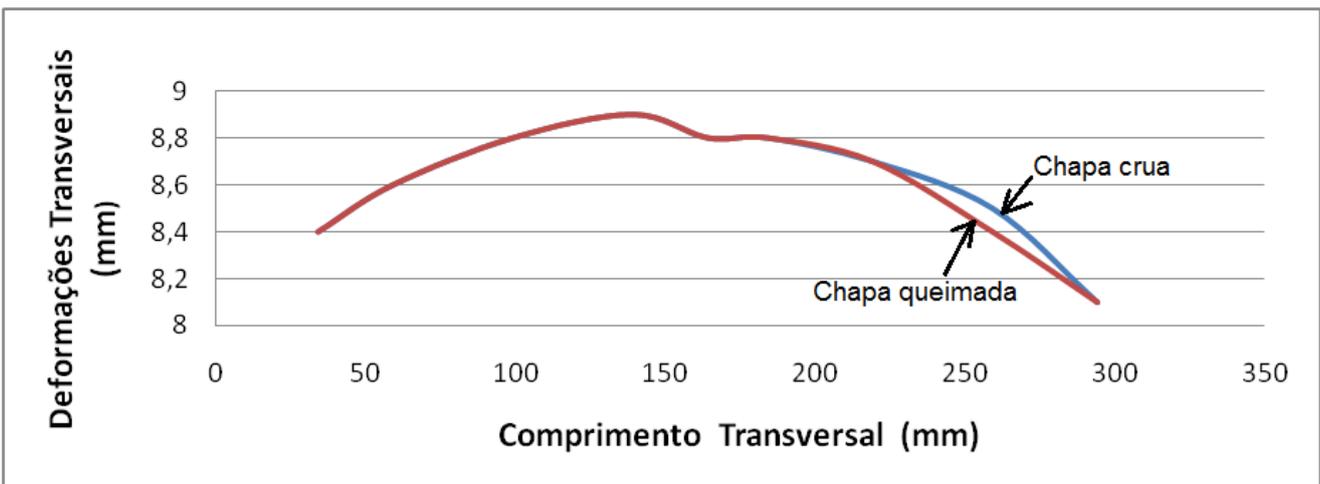


Figura 52- Gráfico da chapa espessura 8,0 mm crua e queimada na seção 55,0 mm

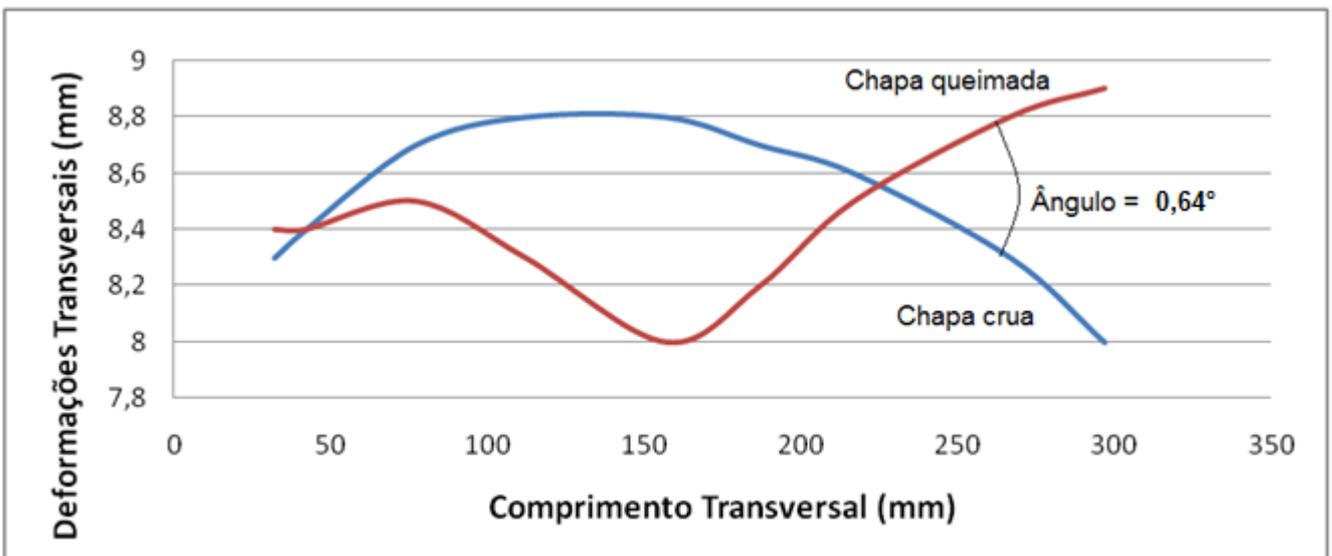


Figura 53- Gráfico da chapa espessura 8,0 mm crua e queimada na seção 75,0 mm

Notou-se que a amostra de chapa de 8,0 mm, quando analisada na máquina de coordenadas, na condição de crua, apresentou uma curvatura em toda a sua extensão partindo de centro para as extremidades nas seções a 25,0 mm; 55,0mm e 75,0 mm. Essa curvatura está relacionada às deformações causadas pelo processo de corte térmico da peça para a dimensão da amostra da chapa.

Verificou-se ainda que, a amostra de chapa na condição de queimada, na seção a 25,0 mm a deformação pelo lado direito foi acentuada e assimétrica. Ao passo que, na seção a 75,0 mm a deformação foi simétrica. Essa assimetria entre duas seções deve-se ao fato da intensidade de calor ser excessiva para a espessura e contribuiu para uma deformação descontínua.

Observou-se que na seção a 55,0 mm, parte central da amostra, não ocorreu deformações significantes entre a condição crua e queimada.

Na figura 54, apresenta-se uma representação esquemática das deformações inicial e final para a amostra de chapa de espessura de 8,0 mm.

A irregularidade das deformações deve-se que a amostra de chapa, inicialmente na condição crua, não estava plana e também, ao fato de que a intensidade de calor foi exagerada para a espessura da chapa, e que a região aquecida ultrapassou a linha neutra da espessura.

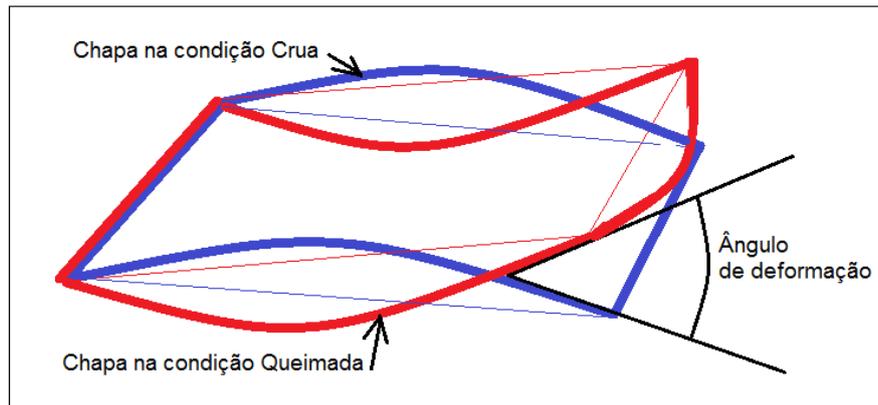


Figura 54- Interpretação das deformações inicial e final para chapa espessura 8,0 mm.

Para a amostra de chapa de espessura 12,7 mm, o ângulo formado pelo perfil da chapa crua e queimada relativa à seção a 35,0 mm, corresponde a $0,63^\circ$, conforme se apresenta na figura 55. Enquanto que, na seção a 65,0 mm, corresponde a $0,62^\circ$, conforme se apresenta na figura 56. Entretanto que, na seção a 95,0 mm, corresponde a $0,77^\circ$, conforme indica na figura 57. Adotou-se um ângulo médio de $0,67^\circ \pm 0,09^\circ$ para esta espessura de chapa.

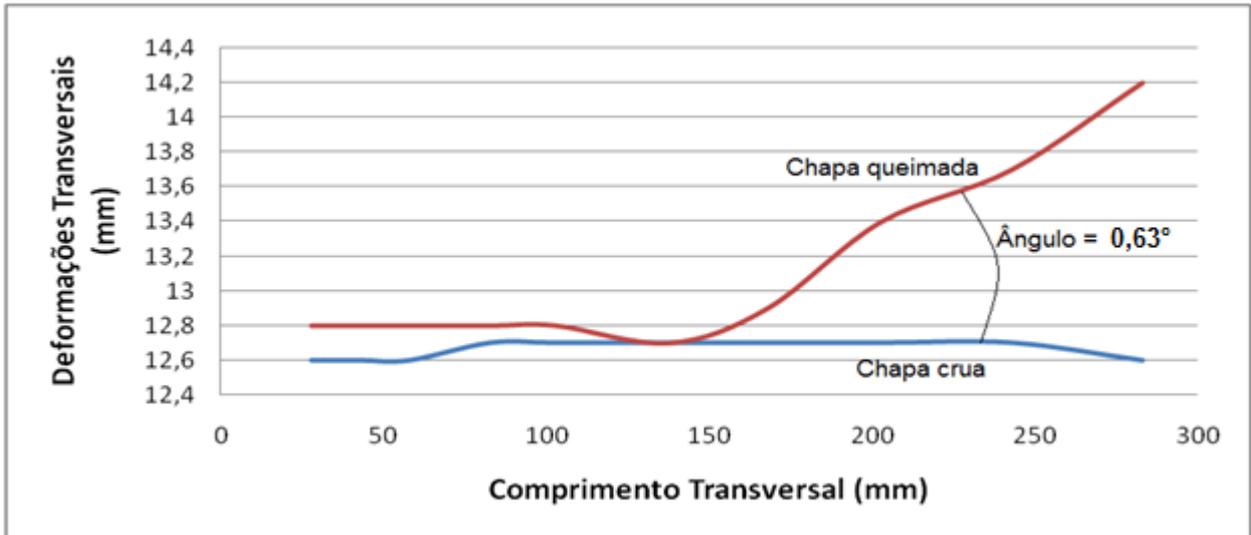


Figura 55- Gráfico da chapa espessura 12,7 mm crua e queimada na seção 35,0 mm

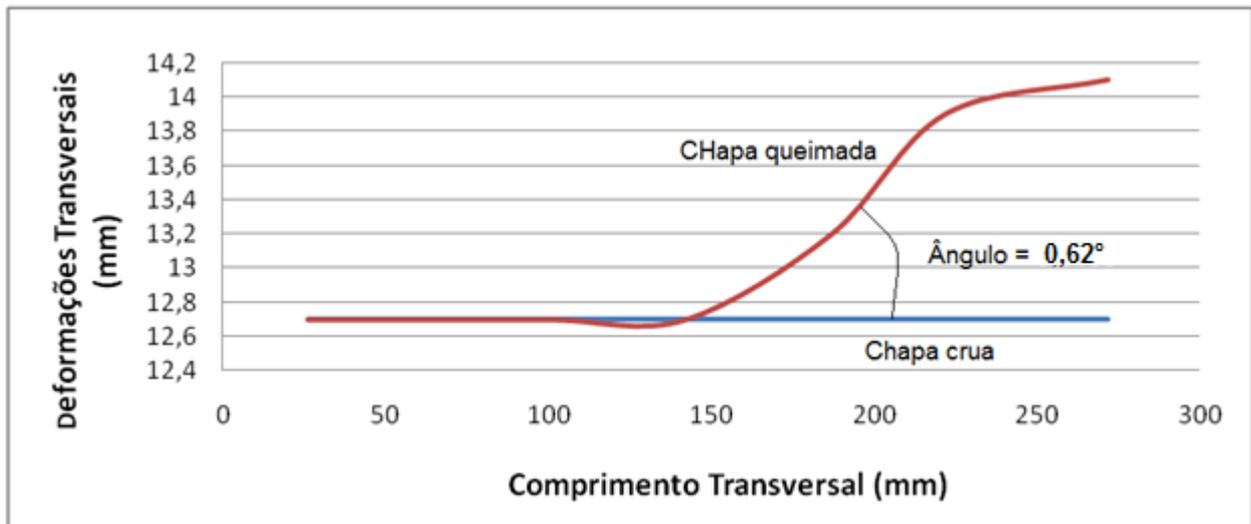


Figura 56- Gráfico da chapa espessura 12,7 mm crua e queimada na seção 65,0 mm

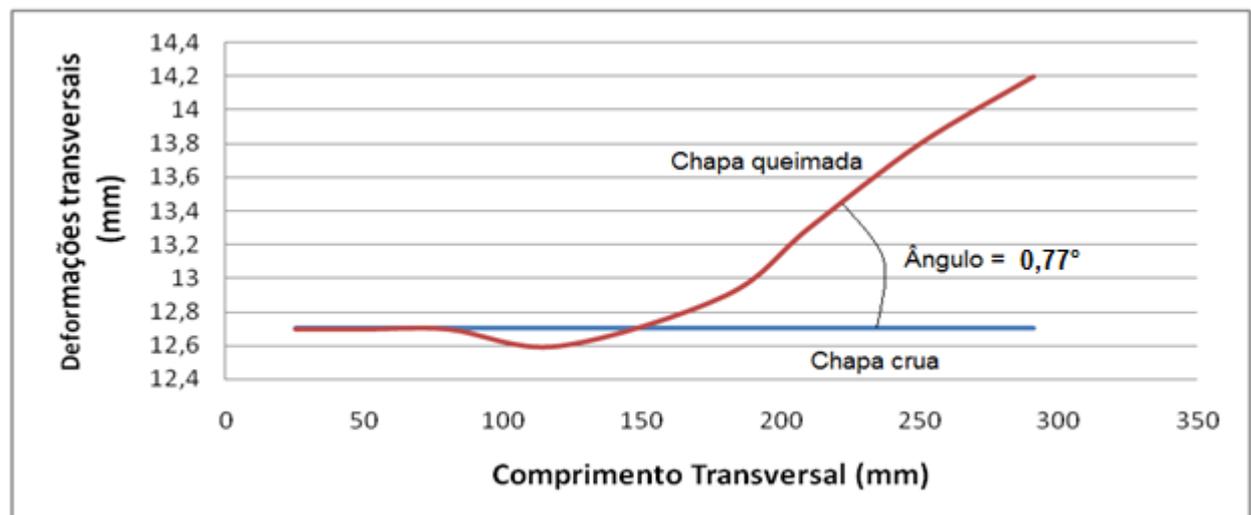


Figura 57- Gráfico da chapa espessura 12,7 mm crua e queimada na seção 95,0 mm.

Observou-se que a amostra de chapa de 12,7 mm, quando analisada na máquina de coordenadas, na condição de crua, apresentou uma superfície plana em toda a sua extensão. Este fato está relacionado, também, ao processo de corte térmico da peça para dimensão da amostra da chapa, e mostra que o corte estava ajustado perfeitamente a espessura da chapa, eliminando as deformações.

Notou-se ainda que, a amostra de chapa na condição de queimada, nas seções a 35,0 mm; 65,0 mm e 95,0 mm, a deformação pelo lado direito foi acentuada e assimétrica.

A regularidade das deformações na amostra de chapa de 12,0 mm deve-se ao fato de que a intensidade de calor foi aplicada adequadamente para a espessura da chapa, e que a região aquecida não ultrapassou a linha neutra da espessura.

Na figura 58, apresenta-se uma representação esquemática das deformações inicial e final para a amostra de chapa de espessura de 12,7 mm, com a finalidade de visualização em três dimensões das deformações iniciais e das deformações sofridas após a aplicação da linha de calor

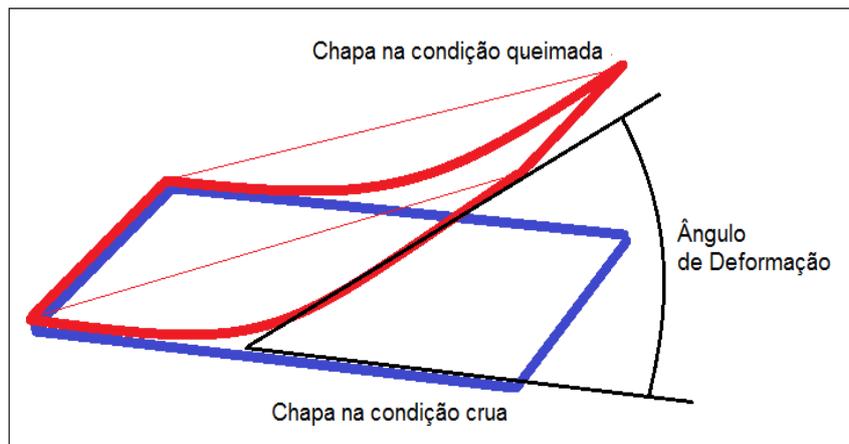


Figura 58- Interpretação das deformações inicial e final para chapa espessura 12,7 mm.

Para a amostra de chapa de espessura 16,0 mm, o ângulo formado pelo perfil da chapa crua e queimada relativa à seção a 15,0 mm, corresponde a $0,60^\circ$, conforme se apresenta na figura 59. Enquanto que, na seção a 45,0 mm, corresponde a $0,50^\circ$, conforme se apresenta na figura 60. Entretanto que, na seção a 90,0 mm, corresponde a $0,72^\circ$, conforme indica na figura 61. Adotou-se um ângulo médio de $0,55^\circ \pm 0,05^\circ$ para esta espessura de chapa.

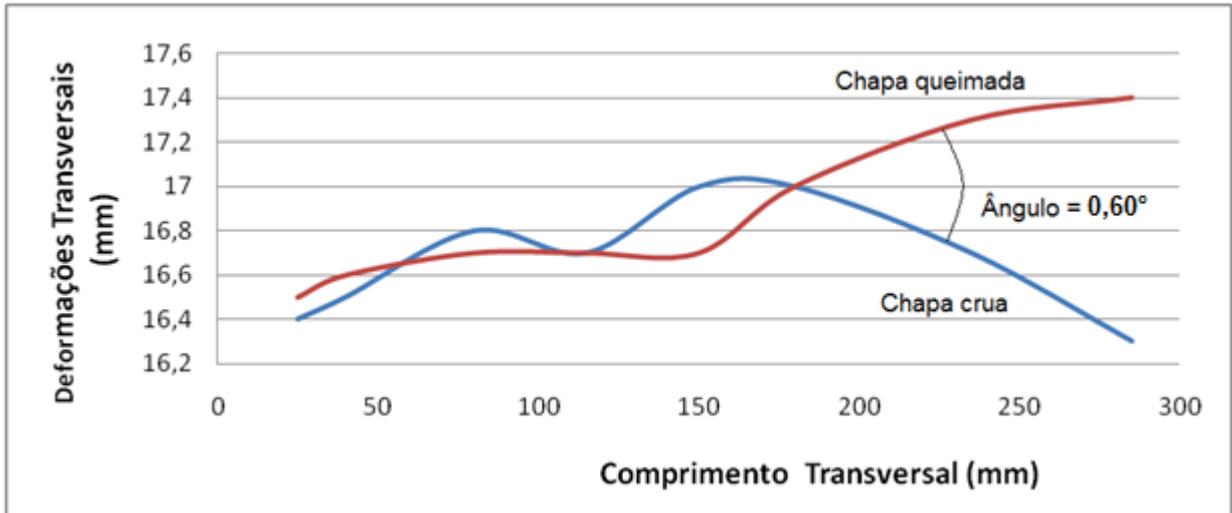


Figura 59- Gráfico da chapa espessura 16,0 mm crua e queimada na seção 15,0 mm.

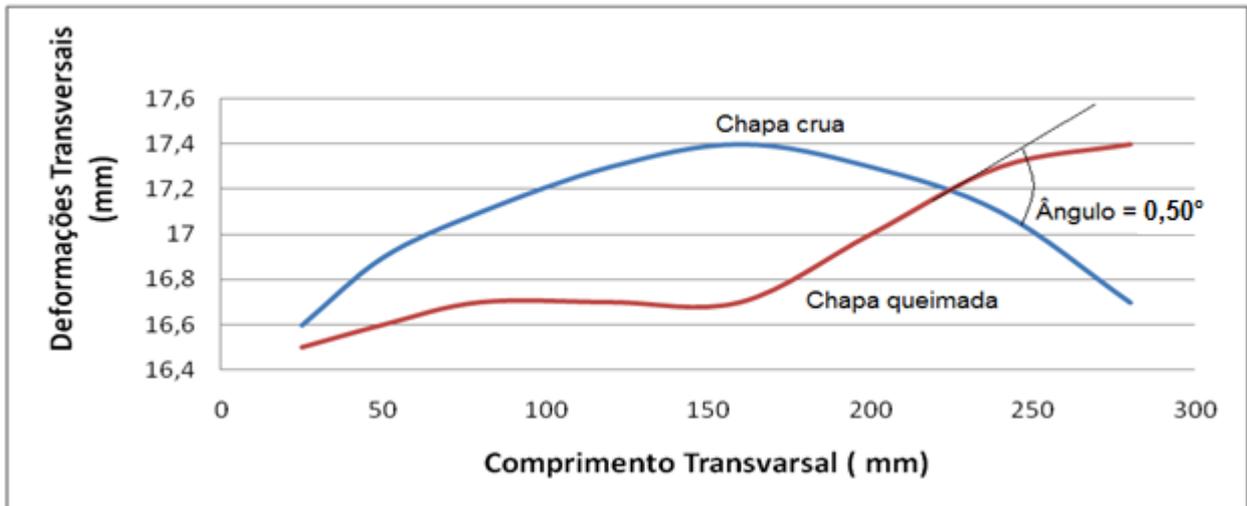


Figura 60- Gráfico da chapa espessura 16,0 mm crua e queimada na seção 45,0 mm.

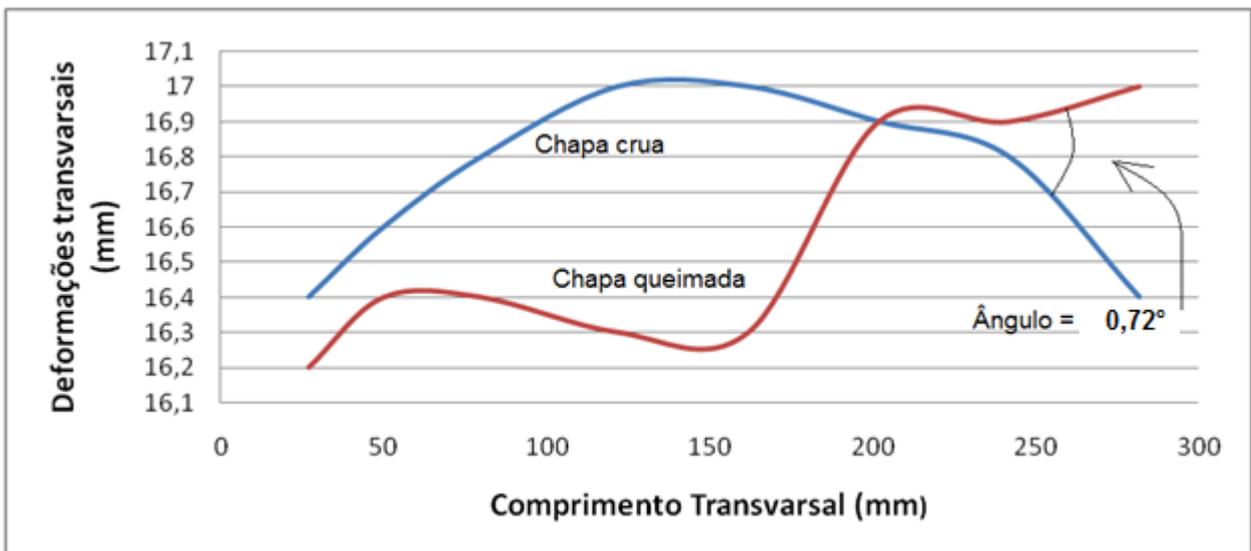


Figura 61- Gráfico da chapa espessura 16,0 mm crua e queimada na seção 90,0 mm.

Observou-se que a amostra de chapa de 16,0 mm, quando analisada na máquina de coordenadas, na condição de crua, apresentou uma curvatura em toda a sua extensão partindo de centro para as extremidades nas seções a 25,0 mm; 55,0mm e 75,0 mm. Essa curvatura está relacionada às deformações causadas pelo processo de corte térmico da peça para a dimensão da amostra da chapa.

Verificou-se ainda que, a amostra de chapa na condição de queimada, nas seções a 15,0 mm; e 45,0 mm a deformação pelo lado direito foi acentuada e assimétrica. Ao passo que, na seção a 90,0 mm a deformação foi acentuada e assimétrica, porém, com traços de ondulações em ambos os lados. Na figura 62, apresenta-se uma representação das deformações inicial e final para a amostra de chapa de espessura de 16,0 mm.

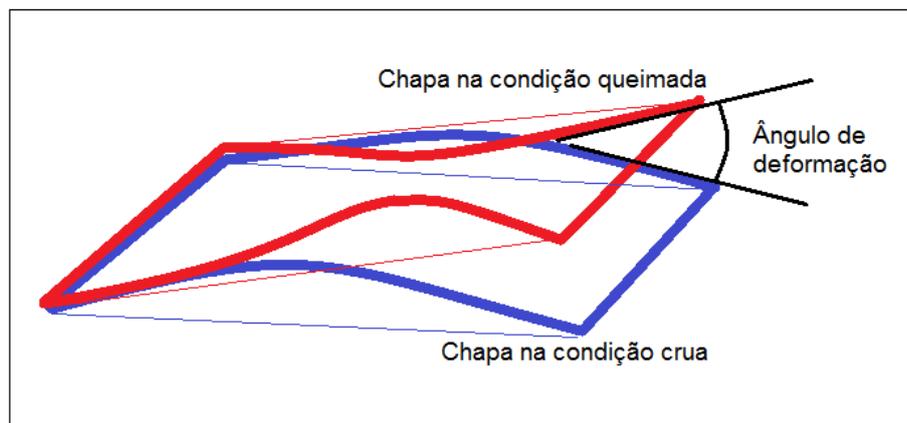


Figura 62- Interpretação das deformações inicial e final para chapa espessura 16,0 mm.

Na tabela 7, está expresso um resumo do ângulo de deformação obtido no experimento entre as amostras de chapas cruas e queimadas. Observou-se que uma intensidade de calor foi aplicada de forma constante, porém, a deformação do ângulo foi inversamente proporcional a espessura. Isto é. Aumentando-se a espessura obteremos menor deformações angular para uma aplicação constante de calor.

Tabela 7 – Ângulo de deformação do experimento

Espessura de Chapa	Ângulo de deformação médio
8,0 mm	0, 72° ± 0,05°
12,7 mm	0, 67° ± 0,09°
16,0 mm	0, 55° ± 0,05°

Os gráficos apresentados nas figura 54, figura 58 e figura 62, representam uma interpretação geométrica das deformações iniciais e finais para cada espessura. Observa-se que as amostras de chapas de 8,0 mm e 16,0 mm de espessura, na condição crua apresentaram com uma curvatura, este fato, deve-se ao calor gerado pelo processo de corte, deixando as chapas com imperfeições na deformação, após aplicação da linha de calor, na condição de queimada. Enquanto que, na chapa de 12,7 mm, na condição crua, a superfície foi plana gerando um resultado simétrico nas deformações. Dessa forma, as deformações finais têm influência do estado inicial da chapa, quanto mais plana mais simétrica as deformações.

4.5. Comparação dos resultados experimentais e analíticos

Na tabela 8, apresenta os ângulos das deformações que obtidos através dos métodos experimentais. Estes foram comparados com os ângulos de deformações do resultado dos cálculos do modelo matemático e analisado com ângulos da literatura especializada do artigo de JANG *et al.* (1997).

Neste trabalho, foi utilizada a expressão (3) da página 27 para estimar as deformações angulares nas diversas amostras de chapas, as quais estão apresentadas na tabela 8, referente à coluna do ângulo de deformação do cálculo do modelo matemático.

Tabela 8- Comparação dos resultados experimentais e analíticos.

Espessura da chapa	Ângulo de deformação na chapa queimada	Ângulo de deformação do calculado do modelo Matemático	Ângulo de deformação extraído do artigo de JANG et. al.(1997)
8,0 mm	0, 72° ± 0,05°	0, 89°	Não Aplicado
12,7 mm	0, 67° ± 0,09°	0, 65°	1, 36°
16,0 mm	0, 55° ± 0,05°	0, 46°	0, 67°

Observou-se que as deformações obtidas através de meios experimentais e através do cálculo do modelo matemático se apresentaram coerência nos resultados. Neste caso, os resultados são coerentes, devido ao fato, de que foi utilizada a máxima intensidade de calor de $414,02 \pm 12,0$ Cal/s a uma velocidade de movimentação da chama de $2,37 \pm 0,8$ mm/s para ambas as espessuras das amostras de chapa.

Porém, quando os resultados experimentais comparados ao artigo de JANG *et al.* (1997), não foram coerentes, observa-se que, a quantidade de calor no artigo foi estimada

em 1300,0 cal/s, e também, para a chapa de 12,7 mm foi utilizada uma velocidade de movimentação da chama de 3,8 mm/s. já para a chapa de 16,0 mm a velocidade foi de 4,07 mm/s.

4.6. Região da zona de deformação residual.

A região da zona de deformação residual estimada pelas equações 10 e 11, na página 45, para a espessura da amostra de chapa, $h=16,0$ mm seria um valor para $b= 13,76$ mm, $d= 2,72$ mm. Entretanto, no experimento foi visualizada $b= 17,1$ mm e $d= 2,6$ mm, conforme figura 63. Nesta região, que apresenta dimensões maiores deve-se ao fato do uso do bico com múltiplas saídas da chama, comum em bicos de corte, diferentemente de bicos de única saída de chama, ideal para aplicações de linha de calor.

A região da zona de deformação residual, também é influenciada pela variação da velocidade de deslocamento do fluxo de calor. No caso, foi mantida uma velocidade constante, conforme as indicações do trabalho de JANG *et al.* (1997).

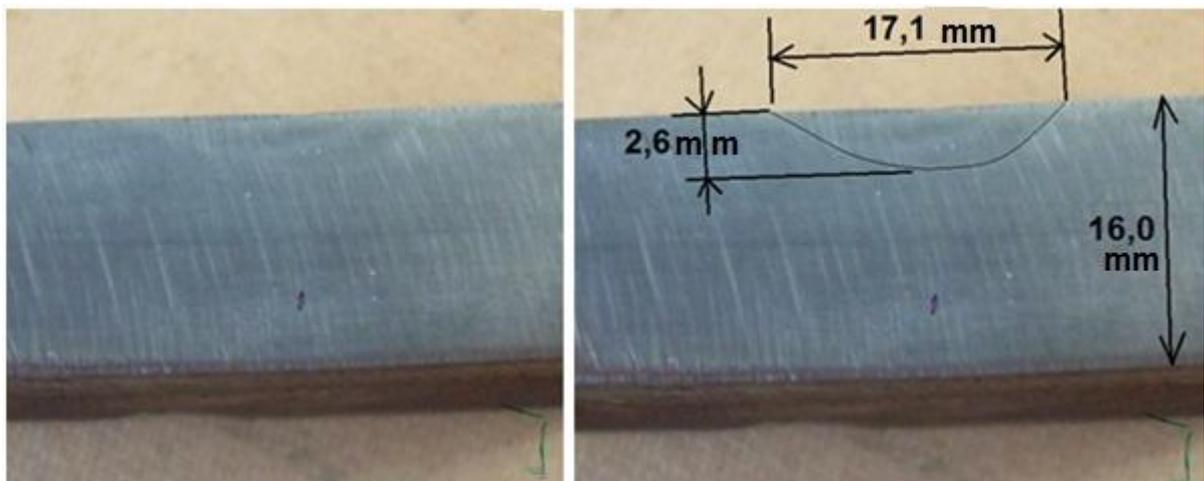


Figura 63- Região da zona de deformação residual

A região da zona de deformação residual não atingiu a temperatura de transformação de fase acima de 723°C. Entretanto, a temperatura atingida foi de 430,26°C, conforme figura 48, página 65, a região em destaque da zona de deformação residual, conforme figura 63, pode ser explicada como um aspecto do efeito da microestrutura de coalescimento do aço naval.

Quanto à anisotropia, sabe-se que existe uma variação das propriedades mecânicas em função da orientação de laminação da chapa. Entretanto, para as amostras de chapas do neste trabalho para aplicação de linha de calor a anisotropia foi desconsiderada.

5. CONCLUSÕES

O método proposto neste trabalho demonstrou-se eficaz para realizar conformações de chapas metálicas através de linha de calor. Proporcionando afirmações de grande interesse tecnológico. Como:

- A utilização do equipamento protótipo para aplicação da linha de calor garantiu os controles dos parâmetros no processo de linha de calor.
- O método analítico utilizado foi condizente para prever o comportamento das deformações por linhas de calor em chapas metálicas.
- O resfriamento por água após aplicação da linha de calor contribuiu para maximizar as deformações plásticas.
- Existe uma relação de proporcionalidade inversa entre a espessura da chapa metálica e as deformações plásticas produzidas.
- Existe uma relação de proporcionalidade entre a quantidade de calor e a intensidade de deformação.
- A utilização do calorímetro representou uma condição equivalência de transferência de calor, numa aplicação direta da chama na chapa.
- Os perfis das deformações para cada seção transversal não são uniformes.
- As deformações finais sofrem influência no estado de deformação inicial da chapas
- Os ângulos de deformações, encontrados nas seções transversais diferem entre si devido ao efeito de restrição de deslocamento na parte central da chapa.
- A região aquecida não sofre mudanças cristalográficas, não provoca uma degradação do metal o que pode ser considerado um aspecto metalúrgico de coalescimento microestrutural do aço naval.
- Um gradiente de temperatura, tal que, é proporcional a quantidade de calor absorvida e se origina tensões térmicas internas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O monitoramento da conformação de chapas metálicas durante o processo de linhas de calor e suas influências sobre os resultados analíticos e experimentais está associado diretamente ao acompanhamento da evolução das deformações elásticas e plásticas ao decorrer do processo e que ainda demandam esforços de pesquisas visando o aperfeiçoamento e a ampliação do domínio de sua aplicação. Pois, atualmente ainda persistem operações praticas em níveis industriais na base de erros e acertos.

Neste sentido, sugere-se o desenvolvimento de alguns temas que possam aperfeiçoar ou dar continuidade a este trabalho de pesquisa.

- O desenvolvimento de sistemas capazes de quantificar a intensidade de calor absorvida pela chapa metálica, fluxo de calor liberado pela chama em movimento e sua propagação tanto, no meio ambiente e na chapa.
- Uma análise numérica tri-dimensional de condução de calor irradiada pelos sólidos semi-infinitos numa fonte móvel com a utilização de programas computacionais de elementos finitos.
- O estudo do comportamento das chapas conformadas por linhas de calor com geometria complexa do tipo côncavo e convexa em uma mesma peça metálica, onde o foco deste tema seria a pesquisa das trajetórias para uma melhor deformação plásticas utilizando os recursos de programas computacionais de elementos finitos comerciais e utilização de recursos automatizados.
- A utilização de praticas de automatização do processo de linhas de calor seguido uma trajetória pré-determinada, onde se controlaria a velocidade de movimentação da chama, o controle da intensidade de calor que seria aplicada na chapa e controle do resfriamento para atingir o máximo das deformações. O foco deste tema seria o desenvolvimento de sistemas de instrumentações capazes de controlar automaticamente a trajetória e a aplicação das linhas de calor.
- Determinação das tensões residuais em componentes soldados após aplicação da linha de calor para correção de deformações aplicando a técnicas de medição de tensões residuais utilizando a máquina de medição por coordenadas.

7. REFERÊNCIAS

- ABS (1982) *American Bureau of shipping*, Carta enviada ao director do The National Shipbuilding Research Program, L.D CIRILLO. The National Shipbuilding Research Program U.S. Department of transportation. Maritime Administration
- ASTM Standards A131/A 131 M-04a (2004) *Standard Specification for Structural Steel for Ships*. Sub committees A 01:02. Book Standards 01:04.
<http://www.astm.org/Standards/A131.htm>, Acesso em 18/01/2011
- AMOROS, R. T. (2008) *Avaliação de Tensões residuais em chapas planas de aço carbono, destinado a processos de corte a Laser pelo método da Anisotropia planar*. LATEC, Instituto de tecnologia para o desenvolvimento. Paraná
- ATKINS, M. (1977) *Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steel*, *British Steel Corp*. ASM American Society for Metals, Metals Park, OHIO 44073
- BRITO, T. M. (2009). *Multimodalidade Turística*, Editora IESDE Brasil. S. A. 1ª Edição, pag. 9.
- BISWAS, P. (2010). *Numerical and Dimensional Analysis for Prediction of Line Heating Residual Deformations*. Department of Ocean Engineering and Naval Architecture, IIT. Kharagpur , India.
- BORZECKI, T. (2006). *Specialist Committee V.3 fabrication technology*. 16 th. International Ship and Offshore Structures Congress 20-25 august 2006, SOUTHAMPTON, UK
- CARDOSO, F. I. B.; (2009). “*Pernambuco em Desenvolvimento a construção é união e metais*”. Publicada pela Revista Tecno New, Rio de Janeiro. Pág. 74
- CHIAVERINI, V.; (1971) *Aços Carbonos e Aços Liga*, 3ª. Edição. ABS.(Associação Brasileira de Metais), Paginas 41 à 52.

CHIRILLO, L. D.; (1982), *Line Heating*. The National Shipbuilding Research Program, U.S. Department of transportation. Maritime Administration

CLAUSEN, H. B. (2000). *Plate Forming by Line Heating*, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark. KGS. LYNGBY.

DEMEC-UFPR (2010); *Solda a gás*; [ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_ NOTURNO / TM 354/ soldagem%20 Oxiacetilenica.pdf](ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO_TM_354/soldagem%20Oxiacetilenica.pdf). Acesso em 18/01/2010.

EDISON WELDING; (2002). *Project Portfolio 2011*. National Shipbuilding Research Program. Ship production Technologies. Line Heating System, Pg. 46.

FONSECA, M. M. (2005). *Arte Naval*, Serviço de Documentação da Marinha do Brasil, volume I, 7ª Edição. Rio de Janeiro.

FAY, R. H. (1967). *Heat Transfer form Fuel Gas Flames*, Welding Research Supplement, 1967

GLIZMANENKO, D. (1960). *Gas Welding and Cutting*. Peace Publishers-Moscow, page, 135-136.

GORDO, J. (2003); *Enformação à Calores*. [http://www.mar.ist.utl.pt/jgordo/tecest/ Enforma%C3%A7%C3%A3o2003.pdf](http://www.mar.ist.utl.pt/jgordo/tecest/Enforma%C3%A7%C3%A3o2003.pdf). Acesso em 18/01/2010

HASHIMOTO, T (1958). *An Experiment of line Heating Design With the Table Orthogonal Array L32*, The society of naval architects of Japan, November 1958

HASHIMOTO, T (1961) *Line Heating Method-A New Technique Taking the Place of Smith Work*, The society of naval architects of Japan , Volume 5, pg. 53-71

HA, Y. S., (2007) *Analysis of Post-Weld Deformation at the Heat-Affected Zone Using External Forces Based on The Inherent Strain*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. Vol, No 4 pp 56-62

HOLMAN, J. P. (1983) *Transferência de Calor*. Editora McGraw-Hill do Brasil. 6ª. Edição, São Paulo, 1983, páginas 01 á 24.

HSIAO, Y. C. (1997). *Finite Element Analysis of Laser Forming*, Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering and the Department of Mechanical.

IWAMOTO K.; (2008) *Interactive Support using a video See-through Head Mounted Display for Plate Bending by Line Heating*. IEEE, International Conference on Systems, Man and Cybernetics CMS.

JANG-GYE-SHIN; JANG HYUN; SUNG KUN PARK, (1999) *Numerical thermoplastic Analysis of line heating processes for Saddle-Type Shell with the Application of an Artificial neural network.*Journal of ship production, vol. 15, n°1, pp. 10-20 (13 ref.)

JANG, C. D.; SEO, S.I.; KO, D.E.(1997) *A Study on Prediction of Deformations of Plates Due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis*. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering. National University, Seoul, Korea. Journal of ship production. 1997, vol. 13, n°1, pp. 22-27.

KIHARA, H.; KUROKAWA, T.; NAKAJIMA, M. (1973) *Efect of Fabrication Procedures in Assembling of Ship of Ship Hull Structure on Notch Toughness of Steel Plate – Report n° 3 – Efect of Line Heating Condition on Notch Toughness of Steel Plate*. U. S. Department of Transportation Maritime Administration. in Cooperation with, Todd Pacific Shipyard Corporation

KIHARA, H.; KUROKAWA, T.; NAKAJIMA, M. (1973). *Effect of Fabrication Procedures in Assembling of Ship of Ship Hull Structure on Notch Toughness of Steel Plate – Report n° 2 – Thermoplastic Deformation and Local Brittleness due to Line-Heating*.

KOU, S. (2003). *Welding Metallurgy*. 2a. Edition, John Wily & Sons. New York 2003, 473 p.

LINO, E. ; (2011) *Nomenclatura dos Termos Náuticos*, Universo do Petróleo, 2011, Fonte: <http://www.universodopetroleo.com.br/2011/02/nomenclatura-dos-termos-nauticos.htm>.

Acesso em 13/08/2011.

LINDE (2010). Catalogo: *Acetylene. There is no better fuel gas for oxy-fuel gas processes*. <http://www.fs.uni-mb.si/dokument.aspx?id=32>. Acesso em 18/01/2011

MACHADO, G; OLIVEIRA, A. C.; (2007) *Fabricação de painéis curvos pelo processo de Linhas de aquecimentos*, GEGN centro de estudos em gestão naval

MARIANO, A.(2010) *Indústria Naval os Próximos Passos*. Revista TN Petróleo: TNPETRÓLEO, n70, Jan/Fev 2010,

MODENESI, P. J. (2008). *Efeito Mecânico do Ciclo Térmico*, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento da Engenharia Metalúrgica e de Materiais, [2008]

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. ; BRACARENSE A. Q. (2007). *Soldagem: Fundamento e Tecnologia*. Editora UFMG, Minas Gerais, 2ª. Edição Revista e Ampliada, 2007, página 113-118

NSNET (1998) *Shipbuilding Picture Database*, 1988, <http://nsnet.com/shippicsP/view.php?searchcat=17&name=&caption=&Submit=Start+Search>. Acesso em 18/01/2011

OKADA, T. (2009) 17 th. International Ship and Offshore Structures Congress 16-21 August 2009 SEOUL, KOREA

PILIPENKO, A.; (2001) *Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding*. Their mitigation techniques, (NTNU), Norwegian University of Science and Technology, Department of machine design and Materials technology, July 2001.

RYKAIN, N.;(1960).*Calculation of Heat Process in Welding*, MOSCOW, USSR, MASHINOSTROENIJE

ROSENTHAL, D. (1946). *Theory of moving source of heat and its application to metal treatments*. Transactions of American Society of Mechanical Engineers, 68: 849-866, November 1946

SALOMÃO, A. (2010) *Revista Portos e Navios*, sobre o título “*Estaleiro Atlântico Sul quer competir com Coreanos*”. Disponível em: <http://www.portosenavios.com.br/site/noticias-do-dia/industria-naval-e-offshore>. Acesso em 20/10/2010

SHINKAI N.; TOMITA Y. ; OSAWA N.; HASHIMOTO K.; SAWQMURA J. (2001) *Experimental Study on Thermo-Flow Field During gas Flame Heating*, Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference Stavanger, Norway, June 2001.

SON, K; YUN, J.O.; KIM Y.M.; YANG Y.S; (2007) *Analysis of Angular Distortion in Line Heating*. International Journal of Mechanical Sciences , 2007.

SHACKELFORD, J. F. (2011) *Introdução à Ciências dos Materiais para Engenheiros*, PEARSON Education do Brasil, São Paulo, 3ª. Edição, 2011, pág. 164.

STUPELLO, B. (2010). *Definição da estrutura analítica de produto de um navio SEUXMAX em função dos ativos disponíveis no estaleiro*. Congresso COPINAVAL-SOBEMA Rio de Janeiro 2010.

S.W.S. (2011). *Revista Shipping World Shipbuilders 2011*. Publications IMAREST. Disponível em: <http://www.imarest.org/Newsroom.aspx>. Acesso em 18/01/2011

TIMOSHENKO & GOODIER (1980). *Teoria da Elasticidade*, Editora Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro, 3ª. Edição [1980], páginas 425-475.

UEDA, U. ; MURAKAWA, H.; RASHWAN, A. M. ; OKOMOTO, Y. ;(1991) (1992) *Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating*, Report I, II e III , JWRI, Welding Research Institute Osaka University, Ibaraki, Japan.
VAN VLACK, L. H. (1970). *Princípios de ciência dos materiais*. Editora Edgard Blucher Ltda. 15º edição. São Paulo, pág. 291-324.

VAZ, M. A.; (2010) *Estudo Analítico e Numérico de Curvatura de Chapas Através da Aplicação de Linhas de Aquecimento*. 23º Congresso Nacional de transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro, Outubro 2010.

WHITE MARTINS (2005). *Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos FISPQ n° P-4559-1, Acetileno Dissolvido*, Dez 2005, página 1-9. Ano 2005

YU, G.; (2000) *Modeling of Shell Forming by Line Heating*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering, 2000