



FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC

ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM

SALVATORE VERDE

**TÉCNICAS DE MINIMIZAÇÃO DE DISTORÇÕES
INDUZIDAS POR SOLDAGEM**

Salvador 2014

SALVATORE VERDE

TÉCNICAS PARA A MINIMIZAÇÃO DE DISTORÇÕES INDUZIDAS POR SOLDAGEM

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de especialização em Engenharia de Soldagem, da Faculdade Tecnologia do SENAI, como requisito para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem. Área de Concentração: Engenharia de Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Eng. Manoel Carrera Neto (CIMATEC).

Convidado: Prof. Dr. Charles Chemale Yurgel. (CIMATEC).

Convidado: Prof. Dr. Calos Augusto de Souza (CIMATEC).

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

V483t

Verde, Salvatore

Técnicas de minimização de distorções induzidas por soldagem /
Salvatore Verde. – Salvador 2015.

110 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Carreira

Monografia (Especialização em Engenharia de Soldagem) –
Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia SENAI -
CIMATEC, Salvador, 2014.

Inclui referencias.

1. Distorções. 2. Soldagem. 3. Análise MEF. I. Faculdade de
Tecnologia SENAI - CIMATEC. II. Carreira Neto, Manoel. III. Título.

CDD: 671.52

SALVATORE VERDE

TÉCNICAS PARA A MINIMIZAÇÃO DE DISTORÇÕES INDUZIDAS POR SOLDAGEM

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de especialização em Engenharia de Soldagem, da Faculdade Tecnologia do SENAI, como requisito para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem. Área de Concentração: Engenharia de Soldagem.

Aprovado em 19 de Marco 2015.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Eng. Manoel Carrera Neto – Orientador _____.
Doutor em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo, Brasil.
Faculdade Tecnologia SENAI CIMATEC.

Prof. Dr. Charles Chemale Yurgel – Convidado _____.
Doutor em Engenharia de Minas Metalúrgica e Materiais pela Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil.
Faculdade Tecnologia SENAI CIMATEC.

Prof. Dr. Calos Augusto de Souza – Convidado _____.
Doutor em Engenharia Mecânica pela Université Pierre et Marie Curie, LISE / CNRS, França.
Faculdade Tecnologia SENAI CIMATEC.

Dia _____ de _____ do ano _____

Dedicato alla memória di mia madre Maria

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu uma mãe incrível.

À minha mãe, pela dedicação total que teve pela família, pelos sacrifícios feitos ao longo de toda a sua vida, e que agora finalmente possa descansar em paz, até o dia da ressurreição.

À minha esposa Rita e à sua família que tiveram a paciência de ficar ao meu lado me dando suporte nos momentos difíceis.

Ao orientador Professor Dr. Manuel Carreira Neto, pela sabia orientação, pela qualidade didática e de conteúdo das aulas de soldagem necessárias para o entendimento dos assuntos tratado neste trabalho.

Ao pessoal do SENAI-CIMATEC, especialmente à coordenadora do curso de especialização em engenharia de soldagem, M.Sc. ADRIANA de Almeida Halfeld Vieira, pelo constante e dedicado apoio no trabalho experimental, aos Professores e Drs. Charles Chemale Yurgel e Carlos Augusto De Souza, e ao meu amigo soldador Gildasio Santana Soares, pelo suporte dado na realização dos experimentos.

Aos professores da UFBA, em especial modo ao Professor. Dr. Alberto Borges Vieira Junior pela sabedoria científica e humana.

A quem direta ou indiretamente contribui à realização deste trabalho.

“Penso 99 vezes e nada descubro. Deixo de pensar, mergulho no silêncio, e a verdade me é revelada.”
(Albert Einstein).

RESUMO

As distorções induzidas pela soldagem impactam negativamente sobre a precisão de fabricação, a estética, e o processo de produção. Neste trabalho são apresentadas técnicas práticas de minimização das distorções, na fase de projeto, fabricação e pós-soldagem. Apresenta-se, também, uma técnica numérica de previsão de distorções induzidas pela soldagem. Neste contexto analisaram-se numericamente as deformações induzidas por soldagem de uma junta T realizada com chapa de aço ASTM A36 e soldada com processo MAG manual. Retomou-se uma análise numérico-experimental desenvolvida anteriormente pelo mesmo autor, na qual se tinha o propósito de fazer a predição de tensões residuais. Entretanto neste trabalho, focalizou-se a atenção sobre a predição das distorções. Além da análise termomecânica não linear elastoplástica, realizada no trabalho anterior, foram efetivadas três análises numéricas lineares elásticas, também estruturadas no método dos elementos finitos, mas fundamentadas no Método do Volume de Contração. Consideraram-se para as três análises elásticas, três sequências de soldagem diferentes, sendo a primeira igual àquela abordada na análise termomecânica. Os valores experimentais e numéricos das distorções obtidos na análise elastoplástica foram comparados com os obtidos por meio da análise elástica linear efetivada considerando a primeira sequência e resultaram em boa concordância entre eles. As duas subseqüentes análises elásticas lineares efetivadas considerando as outras duas sequências de soldagem mostraram resultados de distorções decrescentes com respeito à primeira. Observou-se também que o tempo empregado pela análise linear elástica foi dez vezes menor que da elastoplástica. Confirmou-se que o Método da Contração de Volume, oferece resultados numéricos preciosos que podem nortear a escolha da sequência de soldagem que causa o menor grau de distorções em tempos rápidos, representando de fato, uma ótima ferramenta de previsão de distorções de grandes componentes soldados, que pode melhorar a qualidade de processos industriais.

Palavras chave: Distorções. Soldagem. Análise MEF.

ABSTRACT

Welding distortion has negative impact on fabrication accuracy, external appearance and production. In this study a wide collection of technique to minimize welding distortion throughout design, fabrication and post welding stages is presented. A numerical technique was also been performed to predict welding distortion. Welding induced strain in T-joint fillet weld of ASTM 36 steel using manual GMAW are numerically investigated. A previous work performed by the author was considered, in which the main purpose was the residual stress prediction. Differently, in this paper, the focus has been the welding distortion. Beside the thermo mechanical elastic-plastic analysis, previously performed, more three numerical linear elastic analyses have been accomplished, structured on the finite element method also, but based on the Volume Shrinkage Method. Three different welding sequences were investigated for each of the linear elastic analysis, with the first sequence used also in the elastic-plastic analysis. The experimental e numerical results of distortion obtained from elastic-plastic analysis were compared with the linear elastic one, performed on the first welding sequence, resulting in good agreement. The subsequent two linear elastic analysis performed on the others two welding sequences, had shown decreasing distortion magnitude compared to the first one. The computational time has also been ten times lesser than the elastic-plastic analysis time. After all the Volume Shrinkage Method has shown precious results, which helps to find out the welding sequence that cause the lower distortions in a very quickly manner, indeed representing a useful tool to predict welding distortion in large structure, that can improve industrial quality processes.

Keywords: distortion. Welding. FEM analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 TIPOS BÁSICO DE DISTORÇÕES: (A) CONTRAÇÃO TRANSVERSAL, (B) CONTRAÇÃO LONGITUDINAL, (C) DISTORÇÃO ANGULAR. (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).	15
FIGURA 2.2 (A) FLEXÃO DE VIGA 'T', (B) FLAMBAGEM DE CHAPAS FINAS. (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012)	16
FIGURA 2.3 ROTAÇÃO DURANTE A SOLDAGEM PARA (A) BAIXO E (B) ALTO APORTE TÉRMICO. (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).	16
FIGURA 2.4 FLEXÃO DE VIGA. (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).	17
FIGURA 2.5 DISTORÇÃO ANGULAR EM JUNTA EM "T DE AÇO CARBONO. (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).	17
FIGURA 2.6 ZONA DE FUSÃO DE UMA JUNTA DE TOPO ONDE APLICAR AS CONTRAÇÕES. (ADAPTADO	19
FIGURA 2.7 CONTRAÇÃO DEVIDA AS DEFORMAÇÕES INERENTES. (ADAPTADO MURUKAWA, 2011).	20
FIGURA 2.8 DISTORÇÕES INERENTES. (ADAPTADO MURUKAWA, 2011).	20
FIGURA 2.9 ESTRUTURA COMPLEXA OBTIDAS COM SOLDAGEM DE JUNTA TIPO A E B. (ADAPTADO	21
FIGURA 2.10 MODELO DO DUPLO ELIPSOIDE DE GOLDAK	22
FIGURA 2.11 ARQUITETURA DO SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO (ADAPTADO DE ISLAM, 2014).	23
FIGURA 3.1(A) USAR CONFORMAÇÃO, (B) USAR PERFIL LAMINADOS (TWI,2014)	24
FIGURA 3.2(A) REDUÇÃO DO VOLUME DE SOLDA, (B) ÚNICO PASSE DE SOLDA (TWI, 2014).	24
FIGURA 3.3 USO DE CHANFRO OU FILETE SIMÉTRICO (TWI, 2014)	25
FIGURA 3.4 POSIÇÃO DA SOLDA EM PROXIMIDADE DO EIXO NEUTRO (TWI, 2014).	25
FIGURA 3.5(A) SOLDA DE FILETE INTERMITENTE, (B) INTERMITENTE-DEFASADA (TWI,2014)	25
FIGURA 3.6 AUMENTO % DO VOLUME DE SOLDA E DA DISTORÇÕES, (ADAPTADO BLODGETT,2014).	26
FIGURA 3.7 AUMENTO DE VOLUME EM SOLDA DE FILETE, (ADAPTADO BLODGETT, 2014).	26
FIGURA 3.8 REDUÇÃO DE VOLUME USANDO SOLDA DE PENETRAÇÃO, (ADAPTADO BLODGETT,2014).	27
FIGURA 3.9 VARIAÇÃO DO VOLUME DE SOLDA EM FUNÇÃO DA RAIZ E DO ÂNGULO DO CHANFRO, (ADAPTADO BLODGETT, 2014).	27
FIGURA 3.10 SOLDAGEM DE UM COMPONENTE NÃO SIMÉTRICO (ADAPTADO BLODGETT,2014).	28
FIGURA 3.11 TÉCNICAS DE FIXAÇÃO POR PONTO DE SOLDA. (TWI,2014).	30
FIGURA 3.12 SOLDA DE COMPONENTES IGUAIS COSTA A COSTA. (TWI,2014).	30
FIGURA 3.13 ENRIJECIMENTO DA CHAPA. (TWI,2014).	31
FIGURA 3.14 VARIAÇÃO DA DISTORÇÃO ANGULAR COM O NÚMERO DE PASSOS. (TWI,2014).	31
FIGURA 3.15 SEQUENCIAS DE SOLDAGEM QUE MINIMIZAM AS DISTORÇÕES, A) PASSE RÉ, B) INTERPASSE. (TWI,2014).	32
FIGURA 3.16 PRÉ-DEFORMAÇÃO DE A) JUNTA DE FILETE, B) JUNTA DE TOPO, C) PRÉ-ROTAÇÃO EM JUNTA DE TOPO. (TWI,2014)...	32
FIGURA 3.17 PRÉ-ENCURVAMENTO OBTIDO POR MEIO DE CACHORRO E CALÇOS. (TWI,2014).	32
FIGURA 3.18 TIPO DE RESTRIÇÕES. (TWI,2014)	33
FIGURA 3.19 INCREMENTO DE VOLUME DE MATERIAL EM FUNÇÃO DO REFORÇO. (ADAPTADO BLODGETT,2014).	34
FIGURA 3.20 AUMENTO % DE VOLUME A) DA ABERTURA DE RAIZ, B) DO ÂNGULO DE CHANFRO. (ADAPTADO BLODGETT,2014) ..	35
FIGURA 3.21 AUMENTO % DO VOLUME DE SOLDA EM FUNÇÃO DA ABERTURA DE RAIZ E DO ÂNGULO DE CHANFRO VARIANDO SIMULTANEAMENTE. (ADAPTADO BLODGETT,2014).	35

FIGURA 3.22 MÉTODO POR RESFRIAMENTO COM ÁGUA. (ADAPTADO ADAK,2010)	35
FIGURA 3.23 COMPARAÇÃO DOS VALORES DAS DISTORÇÕES. (ADAPTADO ADAK,2010).....	36
FIGURA 3.24 RESFRIAMENTO VIAJANTE ATRÁS DA POÇA DE FUSÃO. (ADAPTADO OKANO, 2012).....	36
FIGURA 3.25 PRÉ-AQUECIMENTO NA RAIZ. (ADAPTADO OKANO, 2008)	37
FIGURA 3.26 MÉTODO DAS TENSÕES DE TRAÇÃO DE ORIGEM TÉRMICA. (ADAPTADO MICHELARIS,1997).	37
FIGURA 3.27 PRÉ-TENSIONAMENTO MECÂNICO (ADAPTADO PARK, 2012).....	38
FIGURA 3.28 MODELO DE PAINEL NAVAL CURVADO. (ADAPTADO DENG,2010).....	38
FIGURA 3.29 EIXOS DE CURVATURA DO PAINEL. (ADAPTADO DENG,2010).....	39
FIGURA 3.30 BLOCO DE NAVIO (ADAPTADO SHIN,2011).	39
FIGURA 3.31 ESTAGIO DA CONSTRUÇÃO DO BLOCO DA CASA NAVAL (ADAPTADO SHIN,2011).	40
FIGURA 3.32 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM A) DO PERFIS À VIGA, B) MODIFICADA SOLDANDO A VIGA AOS PERFIS. (ADAPTADO SHIN,2011)	40
FIGURA 3.33 DEFINIÇÃO DA RIGIDEZ DO PERFIL (ADAPTADO TSEI, 1999).	41
FIGURA 3.34 MODELO DO PAINEL COM PERFIS, B) SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM OBTIDA POR MEIO DA APLICAÇÃO DO JRM. (ADAPTADO DE TSEI,1999)	41
FIGURA 3.35 COMPONENTE DE TUBULAÇÃO E PASSE DE SOLDAGEM (ADAPTADO DENG, 2013).	42
FIGURA 3.36 SEQUENCIAS DE SOLDAGEM (ADAPTADO DENG, 2013).	42
FIGURA 3.37 CORREÇÃO DE ABAULAMENTO DE UMA JUNTA “T” COM PRENSA. (TWI, 2014).	45
FIGURA 3.38 CORREÇÃO POR MEIO DE AQUECIMENTO LOCALIZADO. (TWI, 2014).....	46
FIGURA 3.39 TÉCNICA DE AQUECIMENTO A) POR PONTOS, B) POR LINHA, C) POR CUNHAS. (TWI,2014).	47
FIGURA 3.4040 EXEMPLO DE APLICAÇÃO, A) PERFIL LAMINADOS, B) CHAPA, C) ESTRUTURA PLANA. (TWI,2014)	47
FIGURA 4.1 CORPO DE PROVA PARA DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS RESIDUAIS.	49
FIGURA 4.2 CHAPAS CORTADAS E ESMERILHADAS	49
FIGURA 4.3 AS CHAPAS DEPOIS TER SUBMETIDAS À TRATAMENTO DE ALIVIO DE TENSÕES FORAM PONTEADAS COM PROCESSO MAG CONTROLANDO O ESQUADREJAMENTO INICIAL DE 90°.....	50
FIGURA 4.4 SOLDAGEM COM PROCESSO MIG/MAG	52
FIGURA 4.5 PROPRIEDADES DO AÇO ASTM A36 (HONG ET AL., 1998, APUD BEZERRA, 2006).....	54
FIGURA 4.6 TENSÃO – DEFORMAÇÃO TOTAL.....	55
FIGURA 4.7 ENTALPIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	57
FIGURA 4.8 ELEMENTO SOLID70	58
FIGURA 4.9 ELEMENTO SOLID 185.	58
FIGURA 4.10 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	59
FIGURA 4.11 ELEMENTO SURF152 COM OS NÓS ADICIONAIS	60
FIGURA 4.12 EXTRA NÓS PARA A SIMULAÇÃO DOS EFEITOS RADIATIVOS.	60
FIGURA 4.13 DESLOCAMENTO DA FONTE DE CALOR	61
FIGURA 4.14 MODELAGEM DA FONTE DE CALOR	62
FIGURA 4.15 CONDIÇÕES DE VINCULO	63
FIGURA 4.16 FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DA ROTINA DA ANÁLISE TERMOMECÂNICA.....	64

FIGURA 4.17 SEQUÊNCIAS DE SOLDAGEM ANALISADAS.	65
FIGURA 5.1 COMPARAÇÃO DA ZONA FUNDIDA OBTIDA NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE DO PRIMEIRO FILETE.	66
FIGURA 5.2 COMPARAÇÃO DA ZONA FUNDIDA OBTIDA NUMERICAMENTE E EXPERIMENTALMENTE DO SEGUNDO FILETE.	67
FIGURA 5.3 ZONA DE APLICAÇÃO DA CONTRAÇÃO TÉRMICA.	67
FIGURA 5.4 CAMPO DE TEMPERATURA DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM	68
FIGURA 5.5 VALORES NUMÉRICOS DOS DESLOCAMENTOS ORTOGONAIS À CHAPA HORIZONTAL, NA SUPERFÍCIE SUPERIOR.	69
FIGURA 5.6 ISOVALORES DE DESLOCAMENTOS OBTIDOS DA ANÁLISE NUMÉRICA.....	69
FIGURA 5.7 DESLOCAMENTOS REAIS NA PEÇA APÓS A SOLDAGEM DAS EXTREMIDADES.	70
FIGURA 5.8 DISTORÇÃO ANGULAR APLICANDO A SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM A.....	71
FIGURA 5.9 DISTORÇÃO ANGULAR APLICANDO A SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM B.....	72
FIGURA 5.10 DISTORÇÃO ANGULAR APLICANDO A SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM C.....	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 4-1 ESPECIFICAÇÃO DE SOLDAGEM	51
TABELA 4-2 VALORES DA ENTALPIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	56
TABELA 5-1 DESLOCAMENTO MÁXIMO NAS TRÊS SEQUENCIAS DE SOLDAGEM.....	74
TABELA 5-2 USO DE RECURSOS.	74

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	OBJETIVOS GERAIS.....	14
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2.	CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE DISTORÇÕES NA SOLDAGEM.....	15
2.1.	TIPOS DE DISTORÇÕES	15
2.2.	EFEITOS DAS PROPRIEDADES DOS METAIS NA DISTORÇÃO.....	17
2.3.	INTRODUÇÃO A ANÁLISE NUMÉRICA PARA PREVISÃO DE DISTORÇÕES.....	18
2.3.1	Método de volume ou da contração.....	18
2.3.1.	Método das deformações inerentes.....	19
2.3.2.	Análise termomecânica.....	21
2.3.3.	Sistema estruturados de elemento finitos e algoritmos de otimização	22
3.	CONTROLE E CORREÇÃO DA DISTORÇÃO – REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	23
3.1.	PROJETO DE JUNTAS SOLDADAS.....	24
3.2.	FABRICAÇÃO	28
3.3.	POST SOLDAGEM	44
4.	METODOLOGIA	48
4.1.	ANALISE EXPERIMENTAL.....	48
4.1.1.	Corpos de Prova	48
4.1.2.	Soldagem.....	50
4.2.	ANÁLISE NUMÉRICA.....	53
4.2.1.	Análise Termomecânica	53
4.2.1.1.	Definição do Material.....	53
4.2.1.2.	Geometria.....	57
4.2.1.3.	Modelagem dos fenômenos convectivos e radiativos.....	59
4.2.1.4.	Modelagem da fonte de Calor.....	61
4.2.1.5.	Condições de travamento	63
4.2.1.6.	Solução	63
4.2.2.	Método do volume de contração.....	64
5.	RESULTADOS	66
5.2.	RESULTADOS DA ANALISE MECÂNICA	69

5.2.1	Análise termomecânica.....	69
5.2.2	Método de contração de volume.....	70
5.3.	USO DE RECURSOS COMPUTACIONAIS	74
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
6.1.	CONCLUSÕES	75
6.2	SUGESTÕES PARA ATIVIDADES DE PESQUISA FUTURAS	76
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
8	ANEXO I – ROTINA APDL PARA ANÁLISE TÉRMICA	80
8.	ANEXO II – ROTINA APDL PARA ANÁLISE ESTRUTURAL.....	92
9.	ANEXO III – ROTINA APDL PARA ANÁLISE ELÁSTICA LINEAR	101

1. INTRODUÇÃO

O setor industrial, principalmente produtor de meios de transporte, visando oferecer produtos mais leves e resistentes, tais como carros, aviões e navios, emprega cada vez mais elementos metálicos esbeltos, como por exemplo, chapas finas de liga de aço ou alumínio. Com relação a fabricação, de acordo com Jackson (2011, p.2), o processo de soldagem para união destes elementos é considerado um dos métodos mais atraentes. Este tipo de processo faz com que se gere um campo de temperatura não homogêneo no componente causando por sua vez deformações e distorções na geometria deste. De acordo com o TWI, as deformações e distorções térmicas são um efeito negativo do processo de soldagem, sempre que causam custosos retrabalhos e dificultam a aplicação da robótica, que necessita de um acurado controle dimensional. Então, torna-se imprescindível um estudo teórico-prático das causas que geram estas deformações e distorções, bem como dos métodos que podem minimizá-las a partir da fase de projeto, durante a fabricação e no acabamento do produto. Uma grande contribuição ao desenvolvimento dos métodos citados é dada pela mecânica computacional. De acordo com Bezerra (2012, p.2) o processo de simulação computacional da soldagem é uma ferramenta indispensável no futuro para inovação de processos de soldagem, estruturas e materiais.

1.1. OBJETIVOS GERAIS

Neste contexto, no presente trabalho, tem-se como objetivo geral, fornecer um conjunto de técnicas de minimização de distorções de soldagem, sugeridas pelos códigos e pela literatura técnico-científica, visando contribuir para melhorar a compreensão das causas que geram as deformações e distorções e fornecer boas práticas para evitar retrabalhos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Além do objetivo principal, tem-se como objetivo específico a investigação numérica, aplicando uma análise elástica linear, fundamentada no Método de Contração, de uma junta em “T” com três tipos de sequências de soldagem

diferentes. A validação do método será feita comparando os resultados obtidos pela aplicação da análise considerando uma sequência consistente na soldagem de dois filetes, com os valores experimentais e numéricos obtidos de acordo com a análise experimental e numérica efetivada por Verde, Vieira Jr., Bandeira e Carreira Neto (2014)

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE DISTORÇÕES NA SOLDAGEM

2.1. TIPOS DE DISTORÇÕES

De acordo com Modenesi, Marques e Santos (2012, p.103), as distorções são alterações de forma e dimensões que componentes soldados sofrem por causa de deformações plásticas de origem térmicas induzidas pela soldagem. As distorções finais geralmente são sempre opostas e com magnitude da mesma ordem de grandeza do movimento de material que acontece durante a soldagem. Os autores definem três tipos de distorções básicas associadas à junta de topo e filete, a saber: contração lateral, contração transversal, e rotação angular, conforme apresentado na Figura 2.1.

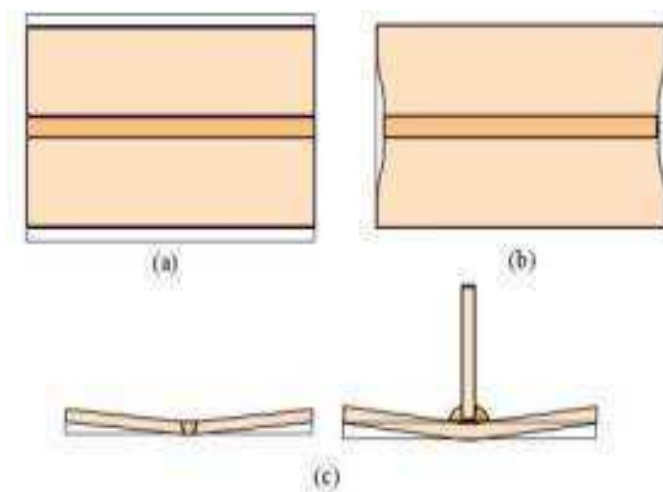


Figura 2.1 Tipos básicos de distorções: (a) Contração transversal, (b) contração longitudinal, (c) Distorção angular. (Modenesi, Marques, Santos, 2012).

Estas distorções básicas podem causar outras mais complexas em juntas soldadas reais tais como, a flexão de viga “T”, flambagem de chapas finas e rotação angular de chapas soldadas de topo, conforme mostrado na Figura 2.2.

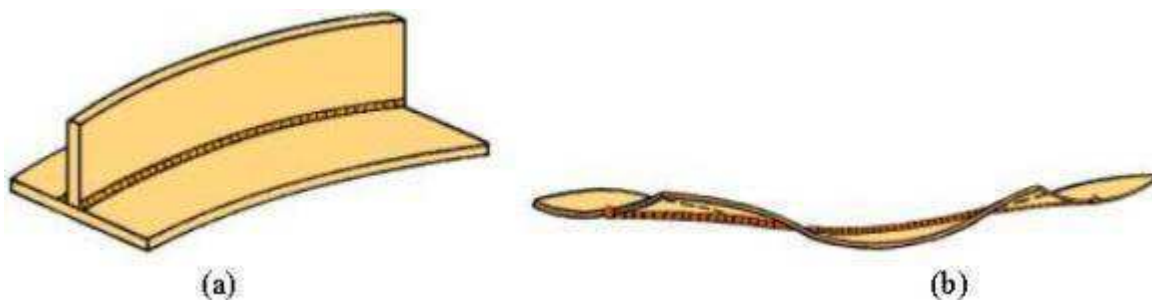


Figura 2.2 (a) Flexão de viga 'T', (b) Flambagem de chapas finas. (Modenesi, Marques, Santos, 2012)

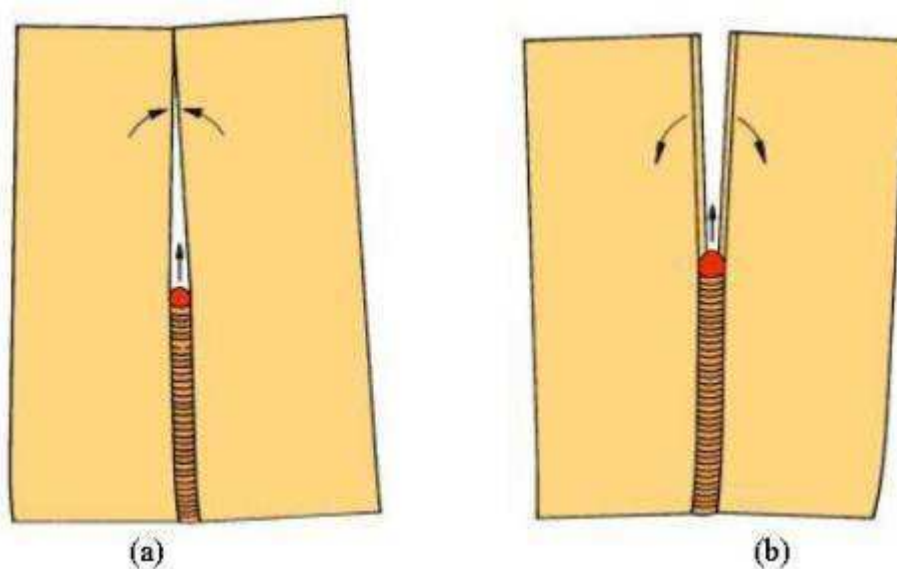


Figura 2.3 Rotação durante a soldagem para (a) baixo e (b) alto aporte térmico. (Modenesi, Marques, Santos, 2012).

Uma estimativa da contração transversal (C_t) em soldas de topo de aço carbono ou de baixa liga é determinável por meio da seguinte equação:

$$C_t = 0,2 \frac{A_w}{t} + 0,05f \quad 2.1$$

onde A_w é área da seção transversal de solda, t é a espessura da chapa e f é abertura da raiz do chanfro.

Para estimar a flecha Δ de uma viga soldada ao longo de todo o seu comprimento (L) (Figura 2.4) pode ser usada a seguinte equação:

$$\Delta = 0,005 \frac{A_w dL}{I}$$

2.2

onde d é a distância do centro de gravidade da solda em relação ao eixo neutro, e I é o momento de inércia.

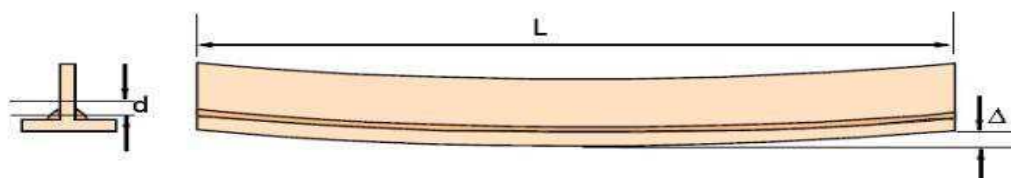


Figura 2.4 Flexão de Viga. (Modenesi, Marques, Santos, 2012).

Para uma junta em “T” soldada de filete nos dois lados, de aço carbono a distorção angular pode ser estimada com base no gráfico da figura 2.5:

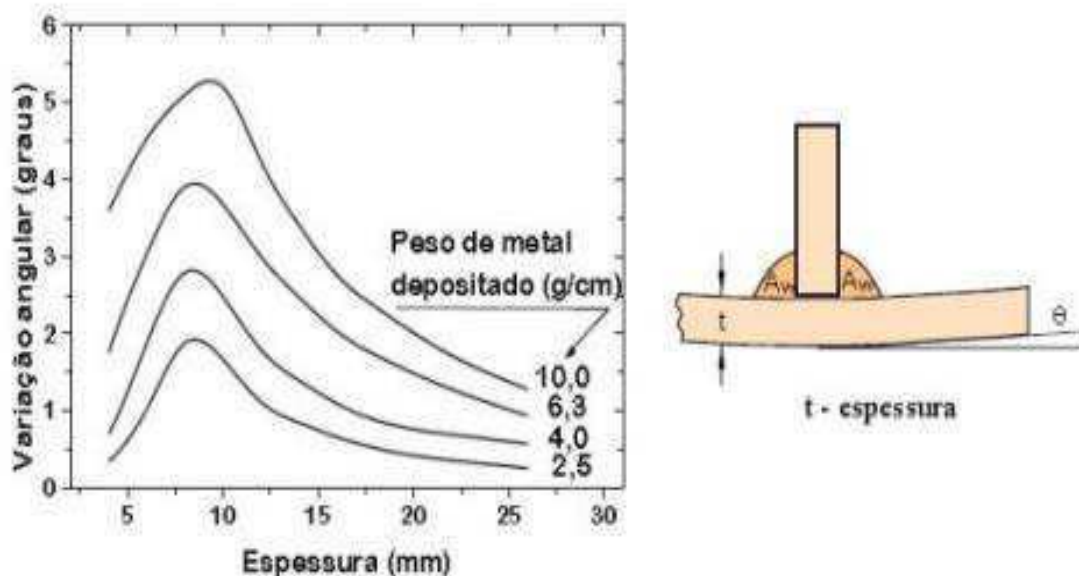


Figura 2.5 Distorção angular em junta em “T” de aço carbono. (Modenesi, Marques, Santos, 2012).

2.2. EFEITOS DAS PROPRIEDADES DOS METAIS NA DISTORÇÃO

Segundo Modenesi, Marques e Santos (2012, p.107), as propriedades dos metais que afetam significativamente as distorções são, o coeficiente de dilatação térmica (α), a tensão de escoamento (σ_y), o modulo de elasticidade (E) e o coeficiente de condutividade térmica (K). Um elevado coeficiente de dilatação térmica tende a induzir distorções maiores. Um baixo coeficiente de condutividade térmica determina elevados gradientes de temperaturas e, portanto um grau maior de distorção. Tensão de escoamento elevada possibilita tensões térmicas maiores e

consequentemente distorções maiores. Metais, que possuem um módulo de elasticidade elevado, tendem a resistir melhor à distorção.

2.3. INTRODUÇÃO A ANÁLISE NUMÉRICA PARA PREVISÃO DE DISTORÇÕES

De acordo com Jackson e Darlington (2009, p.2), os métodos de simulação numérica podem ser distintos em três tipos: 1) O método de volume ou da contração, 2) o método das deformações inerentes e 3) Análise transiente termomecânica elastoplástica. Mais recentemente têm sido aplicadas abordagens numéricas estruturadas em análises com elementos finitos e algoritmos genéticos visando aperfeiçoar os parâmetros de soldagem envolvidos na indução de distorções. No próximo subcapítulo apresentam-se alguns aspectos dos métodos mencionados.

2.3.1 Método de volume ou da contração

Este método pode ser usado com proveito quando um produto é na primeira fase de estudo e não é necessário conhecer com precisão as distorções. Assume-se que a contração ($\Delta\Theta$) é ocasionada aplicando na zona fundida, uma dilatação de igual magnitude, mas de verso contrário àquela induzida pelo processo de soldagem, ou seja:

$$\Delta\Theta = -\alpha\Delta T \quad 2.3$$

Onde α é coeficiente de dilatação e ΔT é a diferença de temperatura ambiente com a temperatura em que as propriedades mecânicas do material têm um valor de baixa magnitude. De acordo com Bachorski et al. (1999), a zona de fusão onde aplica a contração tem grande influência sobre os resultados finais e portanto deve ser avaliada experimentalmente ou com uma análise térmica (Figura 2.6). Depois a aplicação das distorções na zona fundida, realiza-se uma análise elástica linear que fornece os valores das distorções de todo o componente, cujos valores são em bom acordo com os valores experimentais. A vantagem deste método é a velocidade com que se obtêm os resultados, tornando-se de grande ajuda no estudo de sequências de soldagem que minimizam as distorções. Por outro lado não pode fornecer valores

numéricos de tensões residuais confiáveis, sendo que não se tem em consideração o histórico de carregamento.



Figura 2.6 Zona de fusão de uma junta de topo onde aplicar as contrações. (Adaptado BACHORSKY, 1999)

2.3.1. Método das deformações inerentes

De acordo com Murakawa et al. (2011), a deformação (ε) total durante o processo de soldagem é composta pelas seguinte parcelas: elástica (ε_e), plástica (ε_p), térmica (ε_t), fluência ou creep (ε_f), e transformações metalúrgicas (ε_m).

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_t + \varepsilon_f + \varepsilon_m \quad 2.4$$

Reajustando a 2.4 na seguinte forma:

$$\varepsilon - \varepsilon_e = \varepsilon_p + \varepsilon_t + \varepsilon_f + \varepsilon_m = \varepsilon^* \quad 2.5$$

que mostra que as deformações e as tensões residuais são causadas pelas deformações inerentes (ε^*). Na Figura 2.7 é apresentada a distribuição das deformações inerentes em um elemento de modelo numérico.

Em uma chapa fina as deformações induzidas pela soldagem, como a contração transversal, a contração longitudinal e a distorção angular, são causadas principalmente pelas deformações inerentes: ε_x^* e ε_y^* . Neste caso integrando estas deformações inerentes numa seção transversal da chapa, ortogonal à linha de soldagem e considerando-as constantes ao longo da espessura da chapa (h), têm-se as distorções inerentes, cuja representação gráfica está mostrada na Figura 2.8:

$$\text{Contração Transversal: } \delta_T^* = \frac{1}{h} \iint \varepsilon_y^* dx dz \quad 2.6$$

$$\text{Contração Longitudinal: } \delta_L^* = \frac{1}{h} \iint \varepsilon_x^* dx dz \quad 2.7$$

$$\text{Distorção Angular Transversal: } \theta_T^* = \frac{1}{h} \iint Z \varepsilon_y^* dx dz \quad 2.8$$

$$\text{Distorção Angular Longitudinal: } \theta_L^* = \frac{1}{h} \iint Z \varepsilon_x^* dx dz \quad 2.9$$

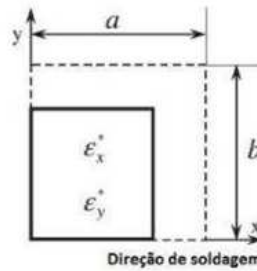


Figura 2.7 Contração devida as deformações inerentes. (Adaptado MURUKAWA, 2011).

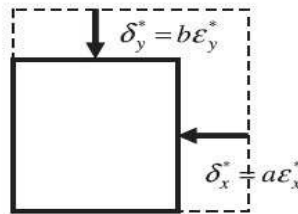


Figura 2.8 Distorções inerentes. (Adaptado MURUKAWA, 2011).

As distorções inerentes podem ser obtidas por meio de análise experimental ou análise numérica, no segundo caso tem-se uma abordagem mais econômica e rápida. Este método possibilita o estudo de estrutura complexas em tempos razoáveis. Com relação à Figura 2.9, assumindo-se que as distorções inerentes são constantes ao longo de solda longas, calculam-se ou medem-se os valores destas em juntas modelos que são usadas na estrutura complexa, neste caso a junta A e B. Posteriormente os valores obtidos são aplicados à estrutura complexa, como distorções iniciais, ao longo das linhas vermelhas tracejadas, e realiza-se uma análise elástica linear que fornece os valores das distorções da estrutura complexa.

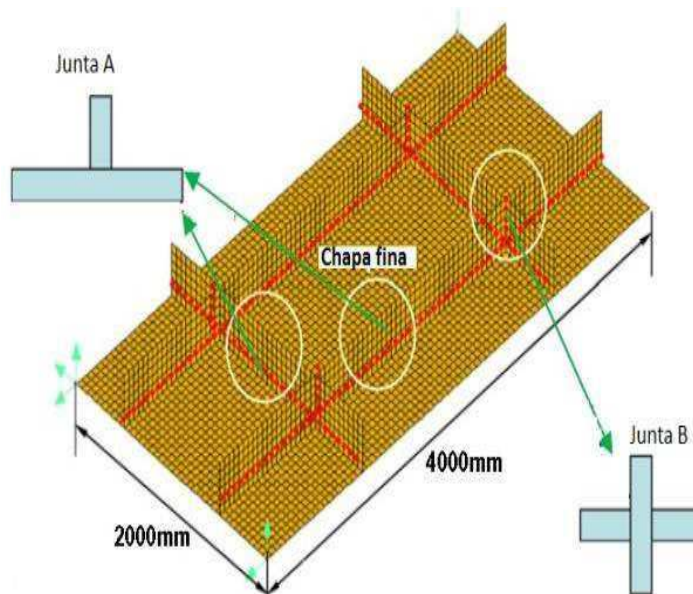


Figura 2.9 Estrutura complexa obtidas com soldagem de junta tipo A e B. (Adaptado MURUKAWA, 2011)

2.3.2. Análise termomecânica

Por Análise termomecânica de um corpo, entende-se a determinação do campo de deslocamentos que se originam quando sobre um componente se aplica uma energia térmica. No caso da soldagem, por exemplo, é de grande utilidade conhecer qual será o campo de deslocamentos, quando aplicada uma fonte de calor necessária para realizar as soldas. A solução deste problema é abordada com o uso de equações diferenciais. No problema térmico o objetivo é conhecer o campo de temperatura (T) no corpo quando se aplica uma fonte de calor. Aplicando o princípio de conservação da energia térmica a um volume elementar, pode ser formulada a seguinte equação:

$$\rho(T) \cdot C(T) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = k(T) \nabla^2 T(x, y, z, \tau) + \ddot{q}(x, y, z, \tau) \quad 2.10$$

Onde, q é o fluxo de calor por unidade de área que flui através a superfície do volume elementar, $\ddot{q}(x, y, z, \tau)$ é o calor que se gera por unidade de volume, τ é o tempo, C é o calor específico, ρ a densidade, K é a condutividade térmica.

No problema mecânico, o objetivo é conhecer o campo e deslocamentos. Aplicando as equações de equilíbrio ao volume elementar pode ser escrita a seguinte equação:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i - (3\lambda + 2\mu) \alpha \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + f_i \quad 2.11$$

Onde, u_i são os deslocamentos ($i=1,2,3$), f_i são as forças de volume, ε é a deformação, λ e μ as constantes de Lamé, α é o coeficiente de dilatação térmica.

Por meio destas equações podemos conhecer o campo de deslocamentos em função do aporte térmico suprido no componente durante a soldagem. A solução analítica para estas equações é quase impossível de se obter. Entretanto a aplicação do método dos elementos finitos, por meio de recursos computacionais permite obter valores numéricos das incógnitas extremamente confiáveis, desde que os valores de entrada sejam coerentes com a realidade física.

No caso de soldagem, a modelagem da fonte de calor, tem sido amplamente estudada, e um dos modelos mais aceito pela comunidade técnico-científica é o de Goldak, apud Takacs (2010), que sugeriu o seguinte modelo da Figura 2.10:



Figura 2.10 Modelo do duplo elipsoide de Goldak

2.3.3. Sistema estruturados de elemento finitos e algoritmos de otimização

Por meio de análises numéricas aos elementos finitos, calculam-se as distorções em função de parâmetros de soldagem, tais como, velocidade da tocha, diferença de potencial do arco elétrico, direção de soldagem, etc. Estes parâmetros devem obedecer a restrições impostas pelos requisitos de qualidade de soldagem, Considerando, por exemplo, o aporte térmico, este não pode ser menor de um determinado valor, porque poderia gerar falta de fusão, também não pode ser excessivo para não gerar possíveis trincas de liquação/solidificação na zona termicamente afetada. Isto pode ser traduzido numericamente se a temperatura na zona de fusão será maior da temperatura de “*liquidus*” da liga.

Islam, M. et al (2014), desenvolveram um trabalho do tipo apresentado, usando uma análise termomecânica acoplada com um algoritmo genético de otimização. O funcionamento do sistema prevê um programa gerador de dados de input, incluindo os parâmetros de soldagem e a geometria da junta, que passa estes dados ao programa de simulação de soldagem, que no caso foi o Simufact.welding®, uma vez que este conclui a análise termomecânica, os dados de output são analisados pelo programa de avaliação dos resultados da simulação, que passa os valores filtrados para o programa de otimização, que no caso é um algoritmo genético, que produz a geração próxima de parâmetros, que serão usados novamente como dados de input, até verificar as condições impostas de projeto, na Figura 2.11 é apresentada de forma esquemática a arquitetura do sistema.

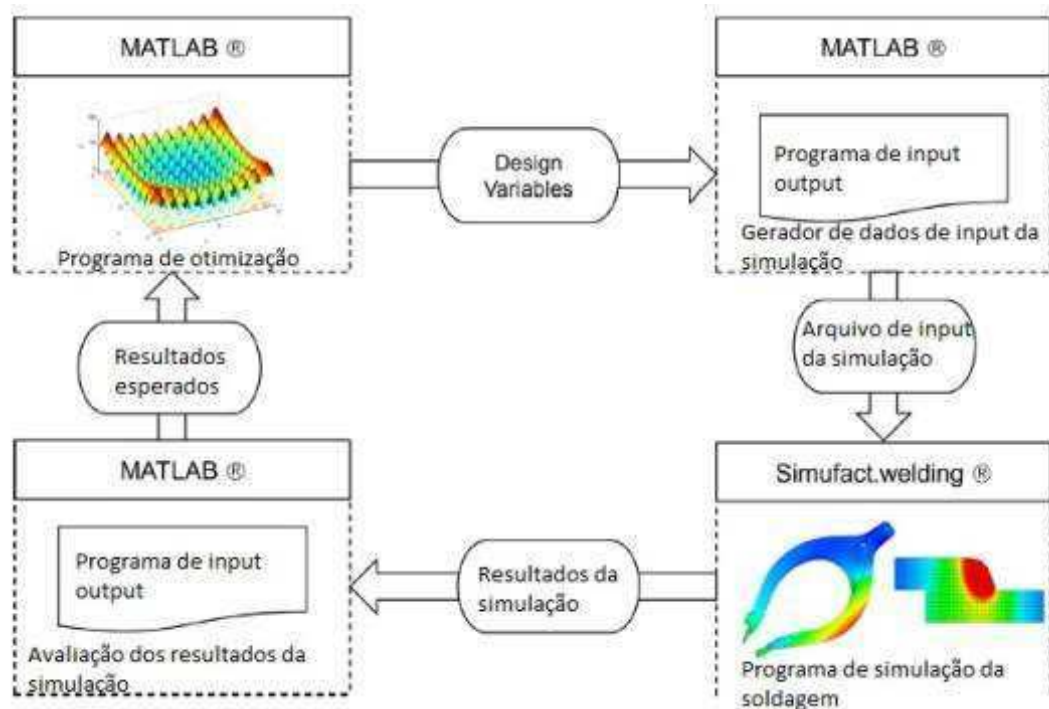


Figura 2.11 Arquitetura do sistema de otimização (Adaptado de ISLAM, 2014).

3. CONTROLE E CORREÇÃO DA DISTORÇÃO – REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Nas últimas décadas deu-se muita ênfase para tentar minimizar as distorções de componentes soldados. Vários trabalhos analisaram várias medidas que podem ser aplicadas no projeto de junta soldada, na fabricação e após a soldagem. Neste contexto segue um conjunto de técnicas práticas.

3.1. PROJETO DE JUNTAS SOLDADAS

De acordo com Modenesi, Marques e Santos (2012, p.108), a distorção do componente pode ser minimizada usando o menor número de soldas, conformando a chapa por exemplo (Figura 3.1a), ou usar perfis laminados (Figura 3.1b), usar chanfros que necessitam de menor material de adição (Figura 3.2a) e necessitam de um único passe (Figura 3.2b), usar chanfros simétricos (X, K, duplo U, etc.) (Figura 3.3), posicionar as soldas em proximidade da linha neutra ou simetricamente a esta, especificar o menor tamanho de solda compatível com as solicitações atuantes.

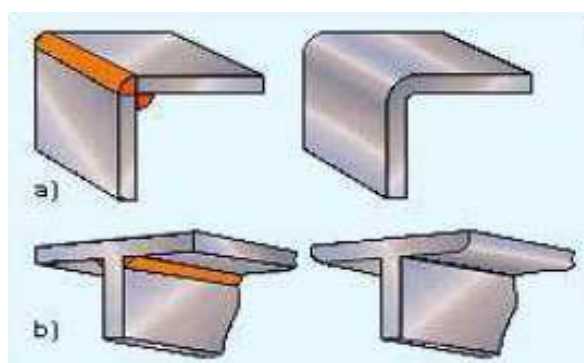


Figura 3.1(a) usar conformação, (b) usar perfil laminados (TWI,2014)

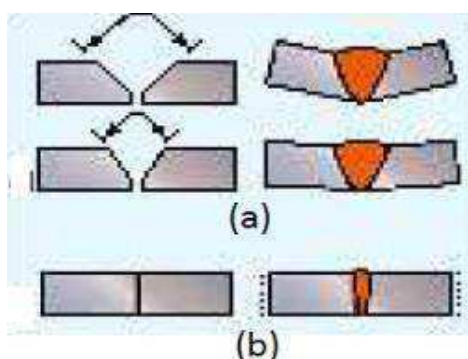


Figura 3.2(a) Redução do volume de solda, (b) único passe de solda (TWI, 2014).

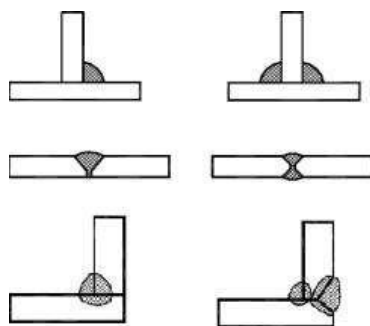


Figura 3.3 Uso de chanfro ou filete simétrico (TWI, 2014)

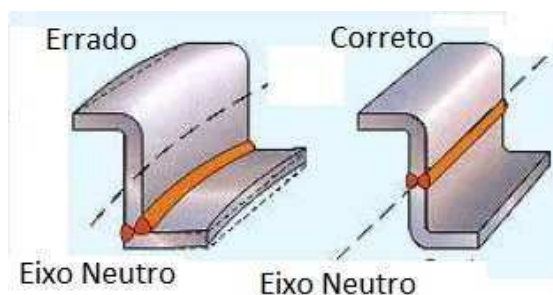


Figura 3.4 Posição da solda em proximidade do eixo neutro (TWI, 2014).

Também pode ser usada a solda de filete intermitente (Figura 3.5a) e intermitente-defasada, para limitar o volume de solda (Figura 3.5b):

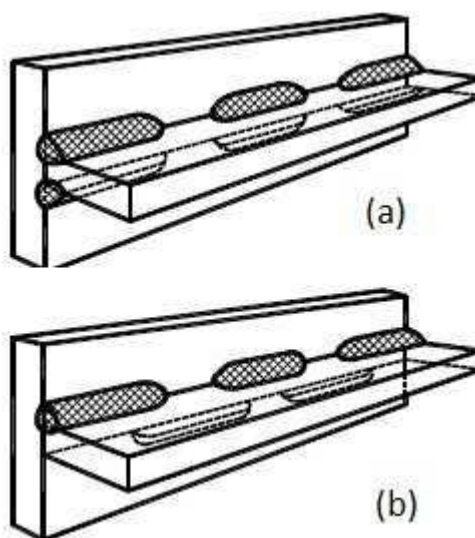


Figura 3.5(a) solda de filete intermitente, (b) intermitente-defasada (TWI,2014)

De acordo com Blodgett, o projeto de junta de filete não deve especificar dimensões superdimensionadas. Por exemplo se a solda ideal for de $\frac{1}{4}$ " mas o projetista especifica um aumento de $\frac{1}{16}$ ", ter-se-á um aumento do volume e da distorções igual a 56%, conforme mostrado na Figura 3.6:



Figura 3.6 Aumento % do volume de solda e da distorções, (Adaptado BLODGETT,2014).

Observando a Figura 3.7 nota-se que o filete com 5/16" de perna de 8" de comprimento, tem a mesma área de solda do filete com 1/4" de perna e 10" de comprimento, apresentando desta forma a mesma força resistente. Entretanto o volume de solda é cerca 56% maior no primeiro filete e isto vai causar aproximadamente um aumento de 56% de distorções também.

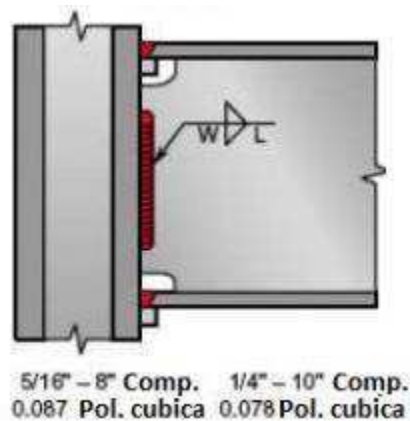


Figura 3.7 Aumento de volume em solda de filete, (Adaptado BLODGETT, 2014).

Quando a prioridade for a distorção, no lugar de solda de filete, pode ser usada a solda de penetração, que para uma mesma garganta, requer metade do volume de solda, conforme mostrado na Figura 3.8.

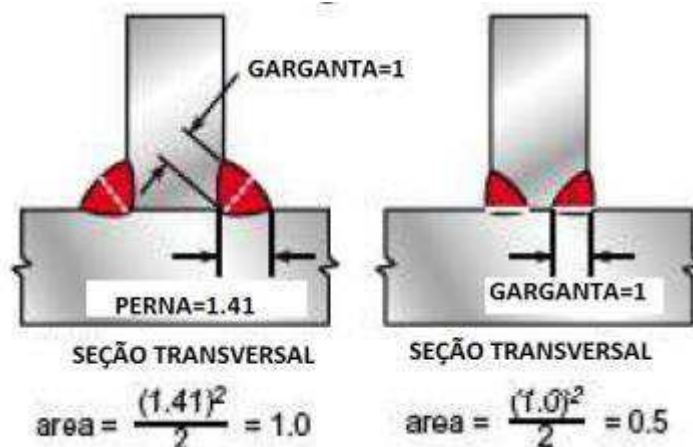


Figura 3.8 Redução de volume usando solda de penetração, (Adaptado BLODGETT,2014).

A dimensão da raiz e do ângulo do chanfro determina o volume de solda, conforme Figura 3.9. Para minimizar este volume, precisa escolher uma dupla ótima de valores. Pode ser observado que para chapa de 1/2" de espessura a dupla de valores que minimiza o volume de soldagem é $R=1/4"$ e $\alpha=45^\circ$. Já para uma chapa com espessura de 4" tem-se $R=1/2"$ e $\alpha=20^\circ$.

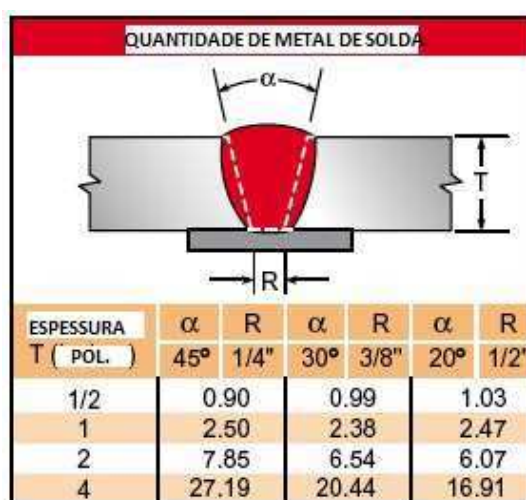


Figura 3.9 Variação do volume de solda em função da raiz e do ângulo do chanfro, (Adaptado BLODGETT, 2014).

Quando precisa soldar componentes não simétricos, como mostrado na Figura 3.10, em que o eixo neutro (E.N.) deste não é próximo ao centro de gravidade da solda (C.G.), pode se dividir a soldagem em mais fases. Neste caso a solda do componente não simétrico é dividida em duas fases. Na primeira fase solda-se a viga T, situada superiormente, verificando que o E.N. da viga T coincida, ou seja, quanto mais próximo, com o centro C.G. da solda. Sucessivamente se solda a viga a

T sobre a chapa de maior espessura, sempre verificando proximidade do C.G. da solda com o E.N. do componente.

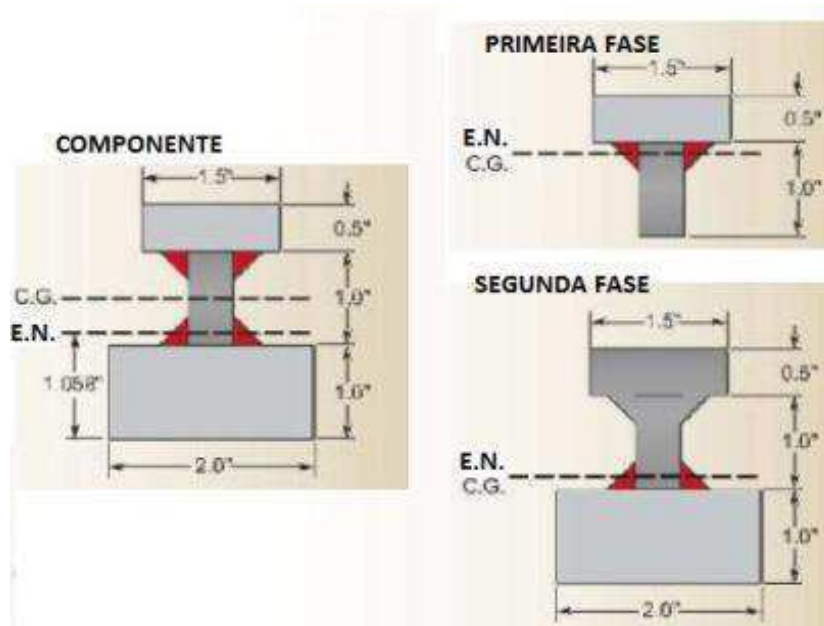


Figura 3.10 Soldagem de um componente não simétrico (Adaptado BLODGETT,2014).

3.2. FABRICAÇÃO

Neste paragrafo apresentam-se alguns métodos retirados dos códigos de soldagem e da bibliografia técnico-científica que possibilitam a minimização das distorções:

De acordo com a AWS D1.1, artigo C-3.2.1, para a solda de chapa fina, sugere-se o uso de processo de soldagem em curto circuito, que é caracterizado por níveis de corrente e diâmetro de eletrodo pequenos, gerando baixo aporte térmico e consequentemente distorções de magnitude menor. Conforme o artigo C.5.1.1, para chapa grossa, sugere-se a soldagem por eletro escória (ESW) ou eletro-gás (EGW), porque depositam o metal num passe único e com alta taxa de deposição, gerando baixo calor de aporte e, portanto pequenas distorções. De acordo com o artigo 5.21.4, a direção de soldagem deverá partir dos pontos em que os elementos têm mais restrição em relação aos outros que têm maior grau de liberdade. O artigo 5.21.5, sugere que a juntas pelas quais espera ser mais afetadas pela distorção deverão ser soldada prioritariamente. A restrição deverá ser a menor possível. No

artigo 5.21.6 sugere-se que as emendas de componentes de viga com mesa reforçada de perfil soldados seja realizada antes de ser soldados aos outros componentes da estrutura. Sugere-se também que a sequência de soldagem das emendas distribua as soldas de forma balanceada entre a alma e a mesa, bem como entre os eixos menor e maior do componente. A técnica do “Peening” pode ser aplicada sobre as camadas intermediárias do cordão, para o controle de tensões de contração em soldas de chapas grossas, com o intuito de prevenir distorções e trincas, conforme sugerido no artigo 5.27. Ressalta-se que esta técnica não pode ser aplicada sobre o passe de raiz e de acabamento, e a superfície do metal de base.

Com relação a ASME 2010 – section VIII – DIV.01, no artigo UW 39, é tratada a técnica de “Peening” de forma semelhante ao artigo 5.27 da AWS, ressaltando que o tratamento pode ser usado no passe de raiz e de acabamento se tivesse sido aplicado um tratamento térmico post soldagem e o “Peening” que não pode substituir nenhum tratamento térmico previsto pelo mesmo código.

Em relação à API 577, no artigo 5.4.1e, para a minimização de distorções sugere o uso do processo GMAW-MSM em curto circuito modificado. Este processo é caracterizado por produzir uma poça de fusão que esfria rapidamente, reduzida intensidade de respingos e turbulência da poça de fusão em comparação ao GMAW em curto circuito padrão. De fato, as fontes do GMAW-MSM, são controladas por meio de software, que mantem as características do arco em valores ótimos, monitorando e controlando a corrente no eletrodo. No artigo 10.10.1, sugere-se realizar pontos de solda com maior frequência em componentes de aço inox austenítico, sendo que este tem um coeficiente de expansão térmica 30% maior que aços carbono ou de baixa liga. No artigo 11.2.3.2, sugere-se o uso do amantecimento da superfície da junta, porque possibilita uma sequência de soldagem que pode reduzir as distorções. Durante a fase de montagem o TWI recomenda as seguintes boas práticas para o controle de distorções: uso de ponto de solda para pré-montagem para manter as aberturas da raiz da junta, soldar componentes iguais costa a costa para balancear a solda ao longo do eixo neutro do conjunto, enrijecimento do componente para prevenir distorções longitudinais em chapa fina soldada de topo, cordões longos não devem ser realizados de uma única

vez, sugere-se o uso do passo a ré e solda intermitente. Em relação aos pontos de solda, estes são necessários para manter a abertura da raiz constante ao longo da junta. São sugeridas três tipos de solda a ponto, conforme mostrado na Figura 3.11: dar ponto de solda do início até o fim da junta. Neste caso é necessário prender a chapa para manter a abertura da raiz, Figura 3.11a; dar um ponto de solda numa extremidade e depois usar o passe a ré para pontear o restante da junta, Figura 3.11b; dar um ponto de solda no centro e depois completar com passe a ré, Figura 3.11c.

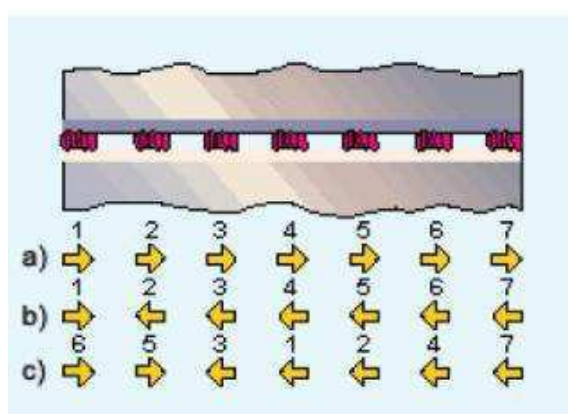


Figura 3.11 Técnicas de fixação por ponto de solda. (TWI,2014).

Na pré-montagem costa a costa, os componentes são unidos por meio de pontos de solda (Figura 3.12a) ou travados por meio de ganchos (Figura 3.12b), de forma que o baricentro da solda de cada componente coincida ou esteja próximo do eixo neutro do conjunto. Sugere-se aliviar as tensões residuais antes da separação dos componentes. No caso em que não se aliviam estas tensões é desejável aplicar um calço entre os componentes como mostrado na Figura 3.12b.

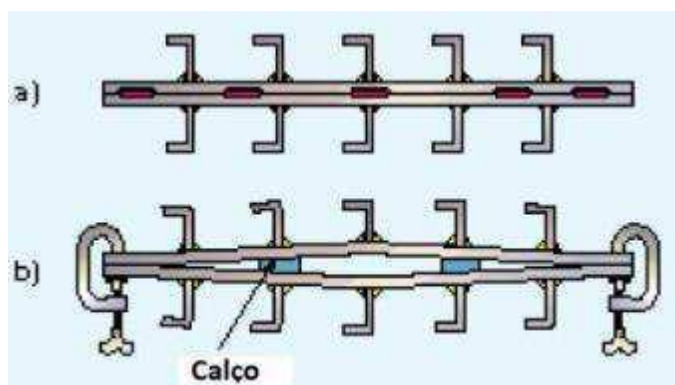


Figura 3.12 Solda de componentes iguais costa a costa. (TWI,2014).

No caso de solda de topo de chapa fina, estas após a soldagem podem fletir longitudinalmente, o enrijecimento com barra chata ou cantoneira pode reduzir esta flexão, salientando que devem ser fixada numa distância que não interfere com as operações de soldagem (Figura 3.13).

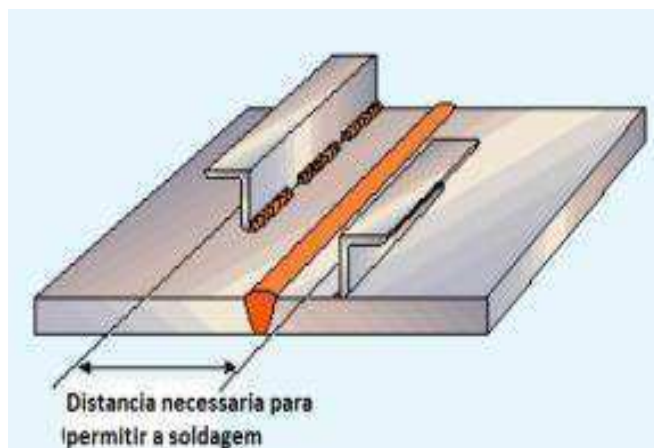


Figura 3.13 Enrijecimento da chapa. (TWI,2014).

Em relação à solda de filete, observa-se que a distorção angular aumenta com o incremento de número de passes, conforme Figura 3.14, desta forma, menor número de passes minimizam as distorções angulares.

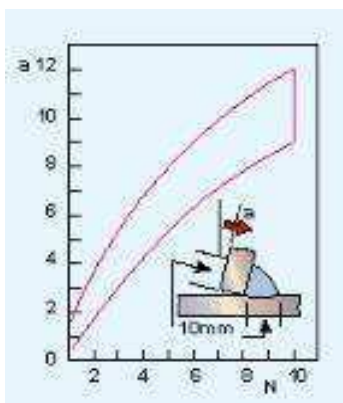


Figura 3.14 Variação da distorção angular com o número de passos. (TWI,2014).

Para solda de topo de chapa, sugere-se realizar a solda com passo ré (Figura 3.15a) ou interpasse (Figura 3.15b). É importante efetivar a soldagem em direção do ponto menos restrito.

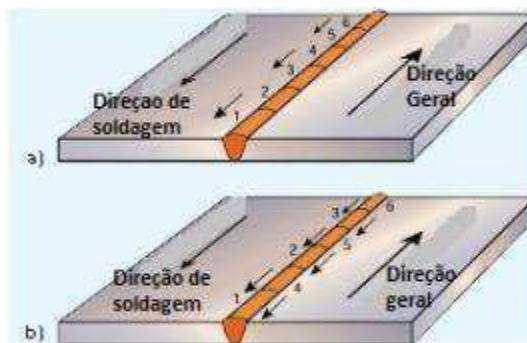


Figura 3.15 Sequencias de soldagem que minimizam as distorções, a) passe ré, b) interpasse. (TWI,2014).

Boas práticas que minimizam as distorções são também as seguintes: pré-deformação, pré-encurvamento e restrições.

Na pré-deformação (Figura 3.15), o componente é deformado de forma tal que quando soldado esteja na posição correta. Entretanto, a deformação inicial, que precisa aplicar é de difícil determinação, principalmente para estruturas complexas. Por outro lado não tendo restrições o nível de tensões residuais é bastante baixo e não se precisa de equipamentos caros.

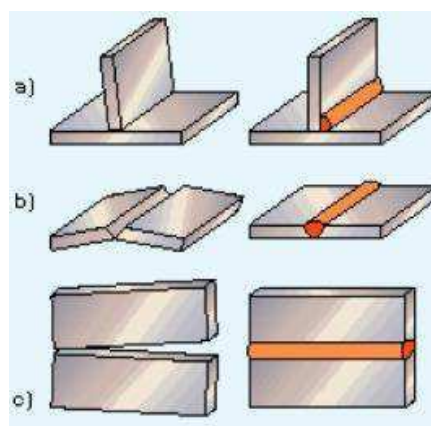


Figura 3.16 Pré-deformação de a) junta de filete, b) junta de topo, c) pré-rotação em junta de topo. (TWI,2014).

No pré-encurvamento, o componente é forçado a ter uma deformação contrária à que vai ter quando soldado. A Figura 3.17 mostra uma chapa soldada de topo, pré-encurvada por meio de cachorros e calços.



Figura 3.17 Pré-encurvamento obtido por meio de cachorro e calços. (TWI,2014).

O uso de restrições é a mais simples das medidas citadas anteriormente. Entretanto a aplicação deste método pode ocasionar um alto nível de tensões residuais que podem causar trincas em metais suscetíveis. Neste caso sugere-se estudar a sequência de soldagem que minimiza as distorções e o pré-aquecimento da junta. As restrições podem ser aplicadas facilmente usando: gabaritos de soldagem (Figura 3.18a), que devem ser de fácil instalação e remoção depois a soldagem, grampos flexíveis (Figura 3.18b), que podem ser usados para os ajustes das aberturas da junta durante a soldagem. Os cachorros soldados (Figura 3.18d) impedem distorções angular e contração lateral, ocasionando um alto nível de tensões residuais, portanto deve-se tomar cuidado para evitar fratura. No caso de cachorro com calços (Figura 3.18c), que impede apenas a distorção angular, o risco de fratura por trinca é muito mais reduzido. Também neste caso pode ser ocasionado um alto nível de tensões residuais, portanto poderia ser solicitada uma sequência aprovada de instalação e remoção das restrições, bem como um pré-aquecimento para evitar imperfeições de forma.

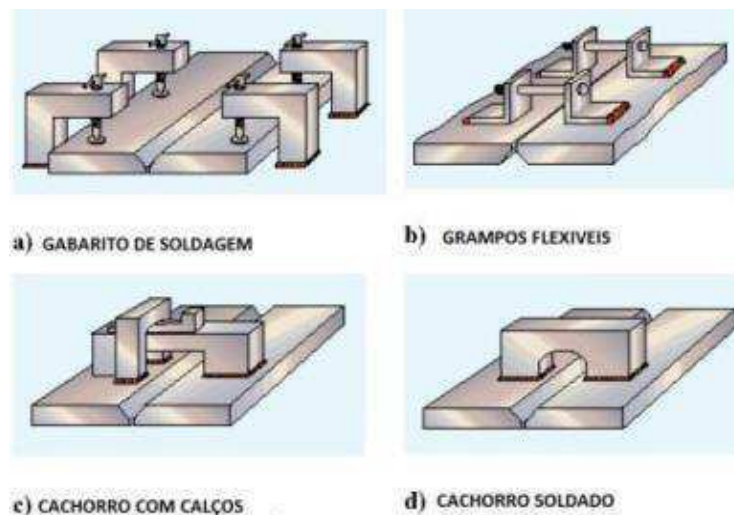


Figura 3.18 Tipo de restrições. (TWI,2014)

Ainda de acordo com Blodgett, sugere-se não realizar soldas de dimensões maiores que o especificado, para evitar desta forma depositar mais material de solda e por consequência ocasionar maiores distorções, como mostrado anteriormente na Figura 3.6.

O reforço também deve ser limitado. Embora uma pequena convexidade ajude em reduzir trincas, uma grande convexidade aumenta o nível de distorções. De fato observando a Figura 3.19, se no lugar de um reforço de 1/8" aplica-se um de 3/8", ocasionará um incremento de material depositado e, portanto distorções de 28% superiores.

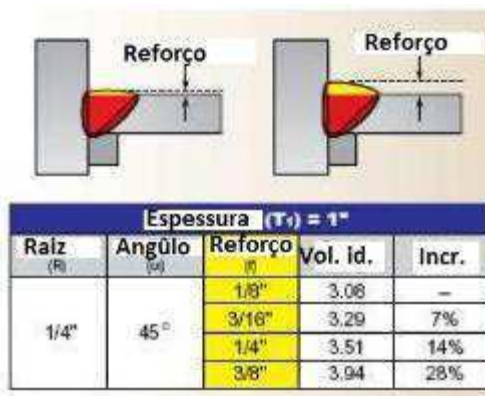


Figura 3.19 Incremento de volume de material em função do reforço. (Adaptado BLODGETT,2014).

Se não for especificado, é desejável reduzir a penetração da zona fundida. Uma excessiva goivagem também aumenta o nível de distorções. É fundamental que sejam respeitadas as tolerâncias em relação à abertura de raiz e ângulo de chanfro, que durante a fabricação são difíceis em respeitar. De fato, observando a Figura 3.20a, considerando uma abertura de raiz de 1/4" e aumentando-a para 1/2" tem-se 31% de incremento no volume. Da mesma forma, observando a Figura 3.20b, tendo um ângulo de 45°, aumentando de 10°, acarreta em 29% de volume maior.

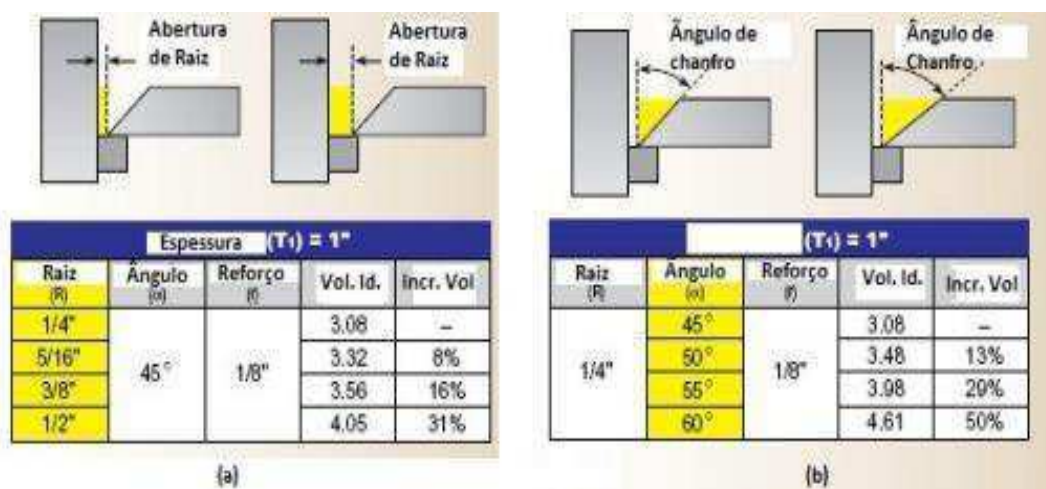


Figura 3.20 Aumento % de volume a) da abertura de raiz, b) do ângulo de chanfro. (Adaptado BLODGETT,2014)

Considerando os dois fatores juntos podemos perceber que pequenos aumentos de abertura de raiz e ângulo de chanfro podem ocasionar incrementos de volume de material de adição superior em até 50% o necessário.



Figura 3.21 Aumento % do volume de solda em função da abertura de raiz e do ângulo de chanfro variando simultaneamente. (Adaptado BLODGETT,2014).

Uma técnica abordada no meio acadêmico consistiu em resfriar a peça no lado oposto da soldagem. Adak e Mandal (2010) aplicaram um resfriamento no lado oposto ao cordão numa chapa, por meio de circulação de água em um canal de 35 mm de largura e distante 30 mm da linha de soldagem, conforme Figura 3.22, obtendo uma redução das distorções respeito ao caso de soldagem sem resfriamento (Figura 3.23)

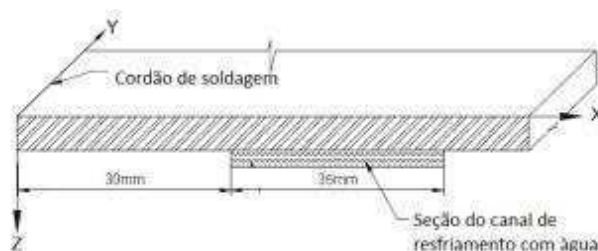


Figura 3.22 Método por resfriamento com água. (Adaptado ADAK,2010).

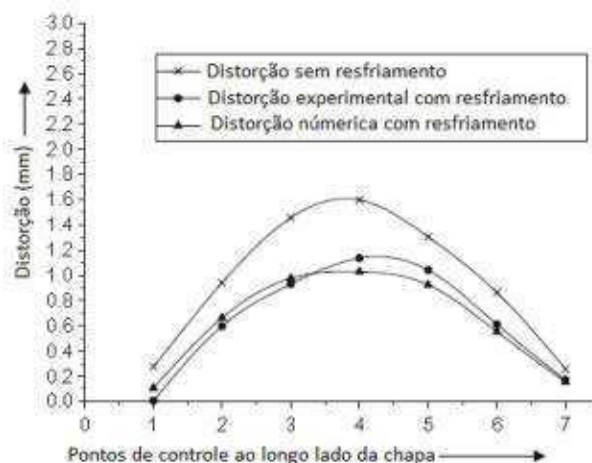


Figura 3.23 Comparação dos valores das distorções. (Adaptado ADAK,2010).

Da mesma forma Okano, Mochizuki, Toyoda e Ueyama (2012), aplicaram um resfriamento com uma tocha atrás da poça de fusão do cordão, numa distância X_c , onde a temperatura da chapa alcança $600\text{ }^\circ\text{C}$, conforme mostrado na Figura 3.24, obtendo uma redução da distorção angular. Neste caso, resultou também que a distorção angular é proporcional ao parâmetro Q/h^2 , onde Q é o aporte térmico e h é a espessura da chapa.

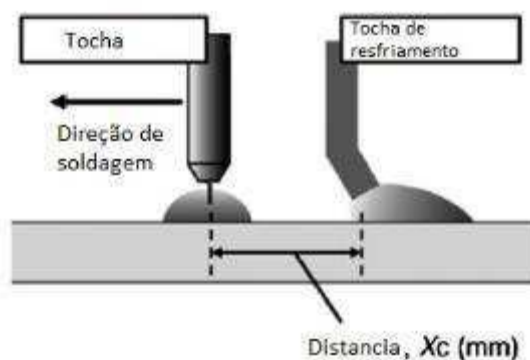


Figura 3.24 Resfriamento viajante atrás da poça de fusão. (Adaptado OKANO, 2012).

De forma oposta Okano, Mochizuki, Toyoda (2008), aplicaram um aquecimento na raiz de uma junta de topo e em “T”, no lado oposto da soldagem, conforme apresentado na Figura 3.25, obtendo uma redução da distorção angular.

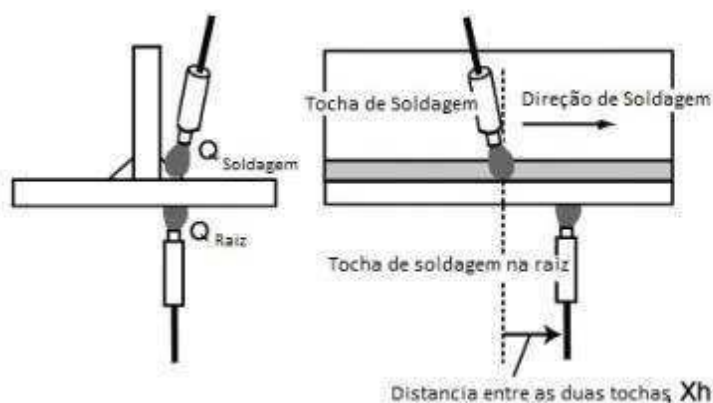


Figura 3.25 Pré-aquecimento na raiz. (Adaptado OKANO, 2008)

Michellaris e Sun (1997) experimentaram a aplicação de tensões de tração de origem térmica na solda de filete. Aplicou-se um resfriamento com água na parte central da peça e aqueceram-se as zonas laterais, cobertas com resistência térmica, conforme apresentado na Figura 3.26. Desta forma, a tensão de tração diminui a força de flambagem e por consequência as distorções. Os autores ressaltaram que por meio de análise numérica podem ser determinadas as condições ótimas do método de pré-tensionamento térmico.

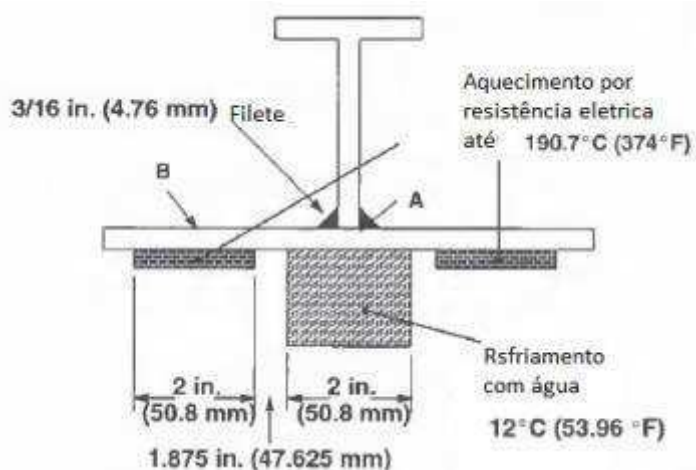


Figura 3.26 Método das tensões de tração de origem térmica. (Adaptado MICHELLARIS, 1997).

Park, An e Lee (2012) efetivaram uma análise numérico-experimental para avaliar o efeito da magnitude, da direção e do tempo de aplicação da força de pré-tensionamento sobre as distorções. Aplicou-se então um sistema de forças conforme Figura 3.27 e resultou que a força longitudinal influencia as distorções por

flambagem mas não as distorções angulares e longitudinais. A força transversal quando aplicada por um tempo maior que a soldagem proporciona uma diminuição significativa de distorção angular.

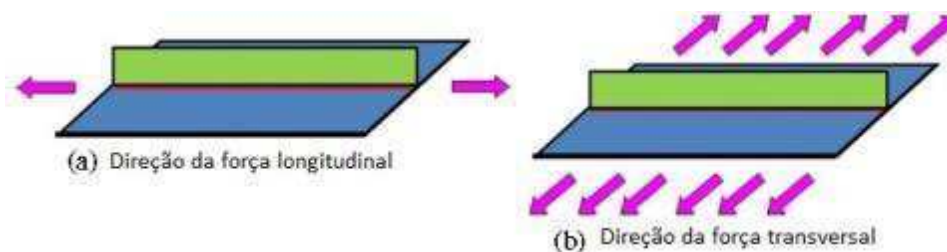


Figura 3.27 Pré-tensionamento mecânico (Adaptado PARK, 2012).

Em relação a sequência de soldagem, Deng, Murukawa e Shibahara (2010) conduziram uma análise numérico-experimental sobre painéis curvados para simular a construção de um bloco naval, para investigar as distorções. Construiu-se um modelo de painel conforme Figura 3.28, com a chapa curvada ao longo dos eixos X' e Y' , conforme Figura 3.29. Foram estudadas duas sequências de soldagem. Na primeira soldaram-se os perfis somente de um lado, na segunda, ambos os lados. Os autores concluíram que, a sequência de soldagem e o ângulo das direções principais de curvatura influenciam significativamente as distorções, e que o modelo numérico proposto pode ser usado para determinar a forma da chapa e a sequência de soldagem visando minimizar as distorções.

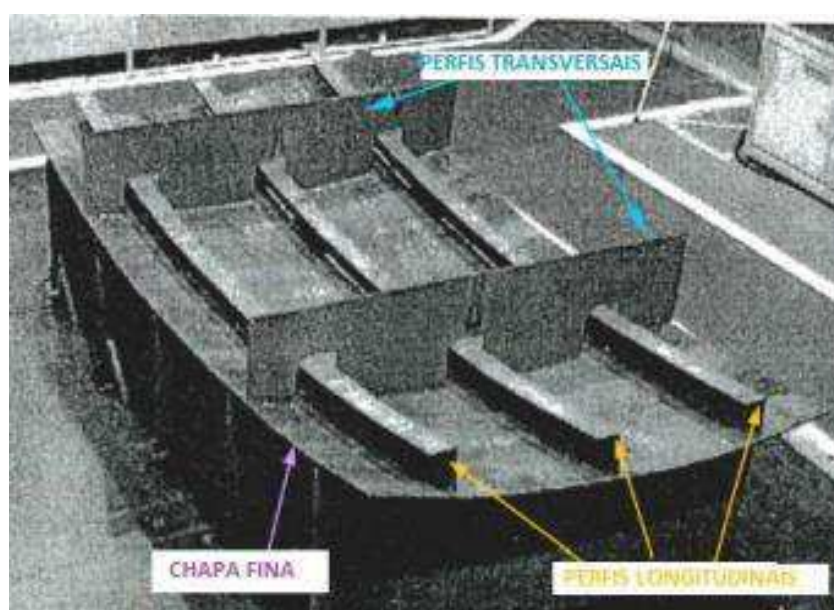


Figura 3.28 Modelo de painel naval curvado. (Adaptado DENG, 2010).

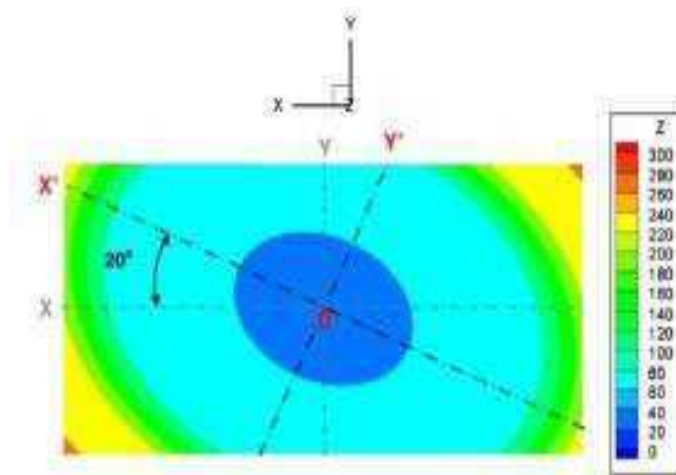


Figura 3.29 Eixos de curvatura do painel. (Adaptado DENG,2010)

Shin e Lee (2011) investigaram as distorções numa casa de comando de navio. Conduziu-se uma análise numérico-experimental sobre uma chapa de piso da casa (Figura 3.30). Foram considerados cinco estágios de manufatura, 1º solda de topo da chapa, 2º Pontos de soldas dos perfis sobre a chapa, 3º Solda de filete dos perfis sobre a chapa, 4º Solda dos perfis com a viga, 5º saída e levantamento do bloco, conforme apresentado na Figura 3.31. Detectou-se que as distorções maiores acontecem no quarto estágio, quando os perfis são soldados à viga conforme é mostrado na Figura 3.32a. Optou-se para mudar a sequência de soldagem, soldando primeiro a viga aos perfis (Figura 3.32b), obtendo desta forma uma redução de distorções.

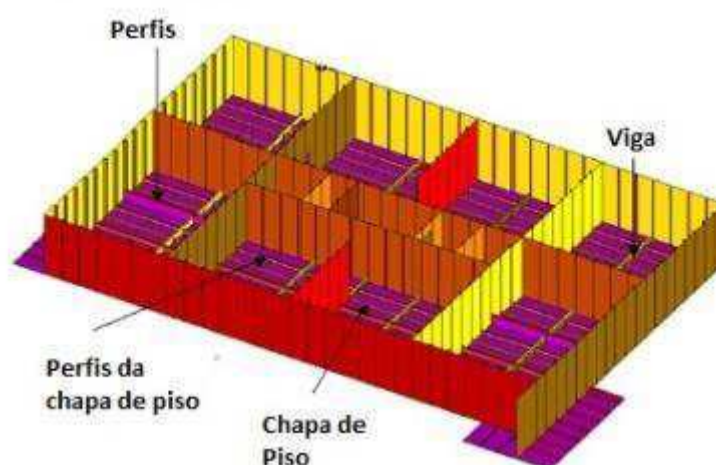


Figura 3.30 Bloco de navio (Adaptado SHIN,2011).



Figura 3.31 estágio da construção do bloco da casa naval (Adaptado SHIN,2011).

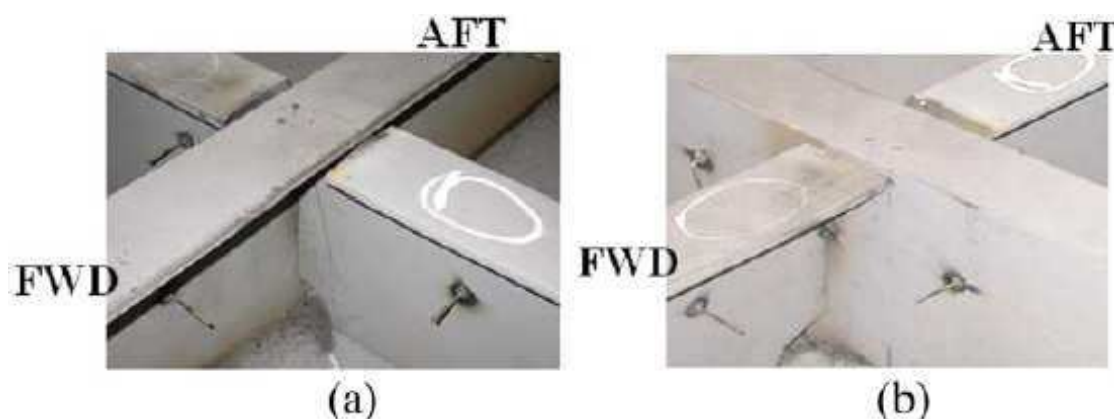


Figura 3.32 Sequência de Soldagem a) do perfis à viga, b) modificada soldando a viga aos perfis. (Adaptado SHIN,2011)

Com relação à solda de painéis navais, Tsai, Park e Cheng (1999), desenvolveram um método para individualizar a sequência de soldagem que minimiza a distorção. Considerando a rigidez de um perfil soldado sobre uma chapa fina como $JR=m/\theta$, onde m é o momento unitário aplicado e θ o ângulo relacionado ao momento m , como mostrado na Figura 3.33, foi observado que a distorção se minimiza quando se soldam em sequência os perfis que tem rigidez maior dentro do conjunto de perfis que ainda não são soldados. O método em questão foi nomeado “Joint Rigidity Method” (JRM), na Figura 3.34 apresenta-se uma sequência de soldagem que ameniza a distorção do painel.

Rigidez da junta = m/θ

m = momento unitario aplicado

θ = ângulo de rotação em função do momento unitario aplicado

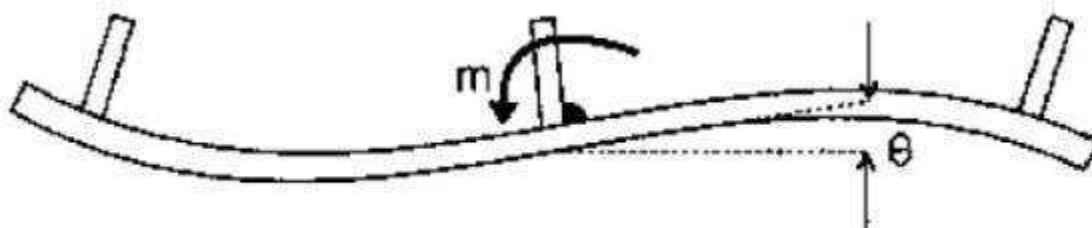


Figura 3.33 Definição da rigidez do perfil (Adaptado TSEI, 1999).

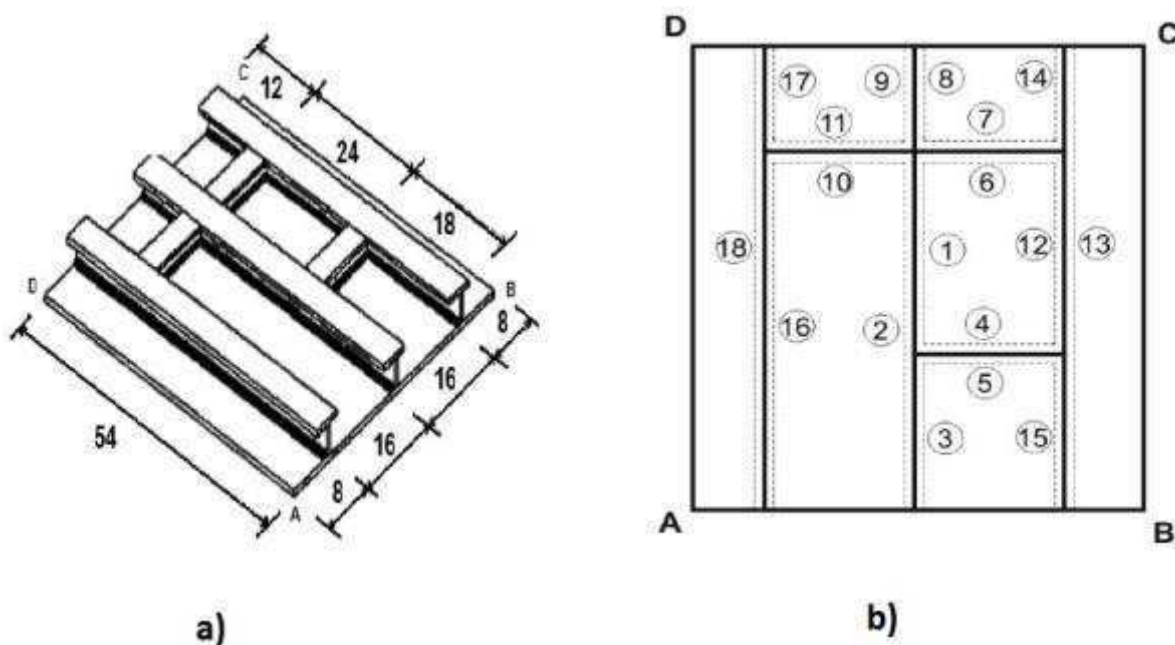


Figura 3.34 Modelo do painel com perfis, b) Sequência de soldagem obtida por meio da aplicação do JRM. (Adaptado de TSEI, 1999)

Em relação às tubulações, Deng (2013), investigou as distorções ocorridas durante uma solda multipasse, de uma junta “J”, apresentada na Figura 3.35, por meio de uma análise numérico-experimental. Consideraram-se as sequências de soldagem mostradas na Figura 3.36. Concluiu-se que o último passe, bem como a sequência de soldagem, têm a maior influência sobre as distorções, não somente em magnitude mas também no modo com que o componente se deforma.

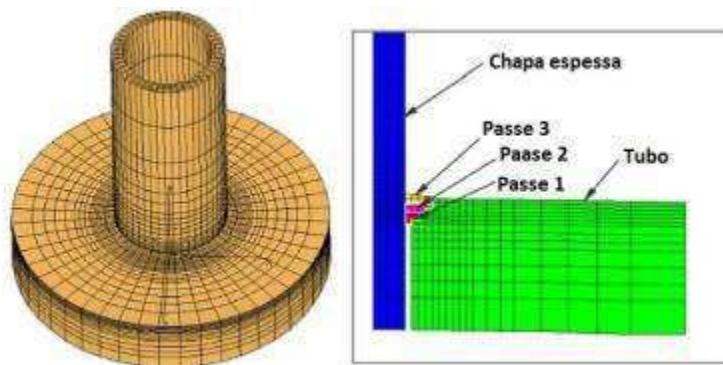


Figura 3.35 Componente de tubulação e passe de soldagem (Adaptado DENG, 2013).

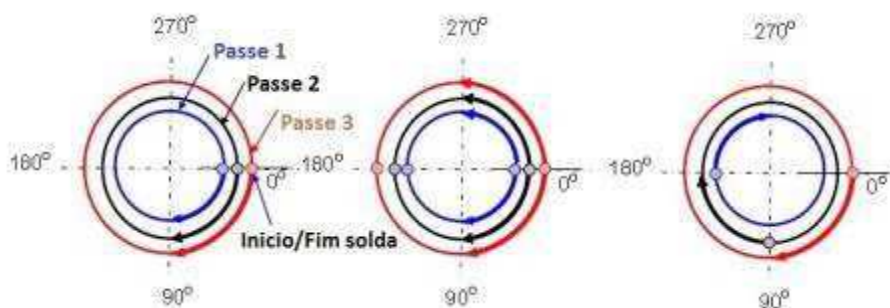


Figura 3.36 Sequências de soldagem (Adaptado DENG, 2013).

De acordo com Brace e Brook (2014), a escolha de equipamentos, eletrodo e técnica de soldagem apropriada podem minimizar as distorções. A seguir são apresentadas as dicas que os dois autores mencionados anteriormente sugerem para solda de chapa fina:

- Em relação ao processo de soldagem, o que possibilita o maior controle sobre o aporte térmico é o GMAW em curto circuito ou pulsado e o GTAW normal e pulsado.
- No que diz respeito aos arames para GMAW e gases de proteção, sugere-se usar arame com diâmetro o menor possível, porque possibilita um maior controle sobre a dimensão do cordão e facilita a recuperação de erros.
- Para a soldagem de aço baixo e médio carbono, é sugerido o uso do com arame AWS E70 com classificação S-2, S-3 ou S-6. Para a proteção gasosa usar uma mistura de argônio (75%) com CO₂, o argônio gera menos calor e respingos do que o CO₂ puro.

- Para a solda de alumínio é desejável o uso do arame ER4043 e ER5356. O ER4043 tem um ponto de fusão mais baixo e uma velocidade de alimentação menor, tendo desta forma, um desempenho melhor na solda de chapa fina até 0.03 polegadas. Para a proteção usar gás 100% argônio.
- Para a solda de aço inox 304, os arames ER308, ER308L e ER308SI são compatíveis. Para o aço 316L precisa-se do arame 316L. Usar uma mistura de Hélio (90%), Argônio (8%) e CO₂ (2%) como gás de proteção.
- Sugere-se evitar soldar chapa fina com arame tubular. Isto porque este processo gera um aporte térmico muito alto devido à transferência globular. Com relação à polaridade sugere-se o uso da modalidade direta quando se solda com arame sólido e reversa com arame tubular.
- Para a soldagem com GTAW, usar o menor diâmetro possível do eletrodo.
- Para aplicações em aço carbono e inox, manter a ponta do eletrodo aguda, lembrando-se de lixar na direção longitudinal do eletrodo.
- Para solda de chapa fina de alumínio usar eletrodo com cério ou tório (2%), manter a ponta aguda e deixando-a mais suave na extremidade, limpar e liberar a superfície de solda da camada de óxido, usando escova de aço inox, lixadeira, ou desoxidante químico. Se as peças foram estocas em lugares úmidos, restabelecer a temperatura ambiente e eliminar a umidade. Não aquecer com chama oxigênio-gás para não introduzir carbono na camada de óxido.
- Com relação à técnica manual, é sugerido manter a ponta do eletrodo no centro da poça de fusão, desta forma reduz-se a transferência de calor do arco para o metal de base. Também é desejável manter uma trajetória quanto mais reta e rápida possível.
- Durante a fase de escolha da máquina de solda, no caso do processo GMAW, certificar-se que tenha um bom controle de tensão capaz de propiciar um bom início e uma boa estabilidade do arco. Se for planejado comprar máquinas multiuso sugere-se considerar as dicas seguintes: na faixa de 115 V, precisam ter uma característica tensão-corrente e uma indutância necessárias para ter um bom controle sobre o curto circuito, algumas máquinas para processo com arame tubular não têm estas características. Na faixa de 200-250 V, convém que a mangueira da tocha se conecte diretamente no painel, para evitar perdas de tempo na troca de tocha quando se necessita de arames diferentes,

e que esteja incluído o sistema para processo de soldagem na modalidade pulsado, na faixa de 200-300 V, normalmente, seja a máquina multiuso ou industrial têm um bom desempenho na solda de chapa fina. Entretanto as máquinas multiuso tem um controle de respingo muito inferior das industriais. Considerando que somente 15% do custo da solda é proporcionados pelo equipamento, no caso em se gasta muito tempo em operações de limpeza post-soldagem, talvez seja melhor investir em equipamentos com melhor desempenho.

- Em relação à escolha de máquinas GTAW, os autores as classificam em dois tipos: com saída em, 1) corrente contínua para solda de materiais ferrosos e 2) corrente contínua/alternada para metais não ferrosos. Para a solda de chapa fina de aço carbono ou inox, sugere-se o uso de máquina com inversores que propiciam o controle do processo pulsado e alta frequência para a ignição do arco. Entretanto, para a solda de alumínio sugere-se o uso de máquina com saída de corrente a onda quadrada ajustável. Ajustando o equilíbrio entre a taxa do eletrodo negativo e para o eletrodo positivo (taxa EN), podem ser alcançadas dimensões do cordão mais estreita, reduzindo, desta forma, o aporte térmico. Para um desempenho maior pode-se usar máquinas com inversor e onda quadrada ajustável. Neste caso pode ser alcançada uma taxa EM de cerca 90%, contra o 68% da máquina normal, e uma frequência ajustável de saída (na faixa de 20 a 200 Hz). Desta forma o inversor possibilita obter um cone de arco o mais estreito possível e permite soldar em corrente alternada, podendo dirigir o arco com precisão, formar a poça de fusão rapidamente e colocar o metal de adição na posição desejada.

3.3. POST SOLDAGEM

Embora o maior cuidado tivesse sido aplicado nas fases de projeto e fabricação, sempre haverá alguma distorção indesejada. De acordo com Modenesi, após a soldagem a distorção pode ser corrigida com métodos térmicos quais: aquecimento localizado e aquecimento uniforme e conformação mecânica, ou mecânicos (frios), como: calandragem, prensagem, martelamento, etc.

De acordo com o TWI, o martelamento pode causar defeitos superficiais. Normalmente um componente curvado ou com distorção angular pode ser colocado

numa prensa, onde entre esta e o componente coloca-se uma peça que proporciona uma deformação maior, considerado que o componente pode apresentar um retorno elástico e não ficar endireitado como se deseja. Uma viga soldada a “T” está esquematizada na Figura 3.37, onde o abaulamento é corrigido por meio duma prensa.

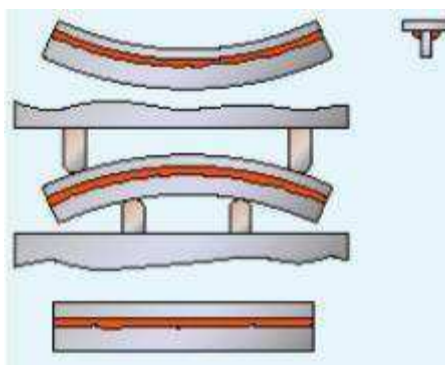


Figura 3.37 Correção de abaulamento de uma junta “T” com prensa. (TWI, 2014).

Em componentes longos, a distorção é eliminada com uma série de prensagens incrementais. Cada uma sendo aplicada em um breve comprimento. Em viga “T”, sugere-se aplicar a carga sobre a mesa e usar uma peça de sacrifício, para se ter um componente o mais nivelado possível, com superfície lisa.

Ressalta-se que durante as operações de prensagem, o componente pode ficar altamente sob tensão e pode ser ejetado com violência da prensa. São necessárias medidas de segurança: parafusar o componente em um objeto fixo, colocar uma barreira robusta para interceptar o componente caso seja ejetado, afastar o pessoal da área de perigo.

A ideia básica do método térmico é criar uma grande tensão localizada, suficiente para que, no resfriamento, o componente volte na forma desejada. Isto pode ser obtido por meio de aquecimento localizado, até uma temperatura em que acontecem deformações plásticas, propiciadas pela expansão da zona de material aquecida, caracterizada por uma baixa tensão de escoamento, contra uma região fria caracterizada por uma maior tensão de escoamento. Desta forma, quando a região aquecida resfriará para a temperatura ambiente, terá um volume menor que quando anteriormente ao aquecimento. As tensões internas que serão geradas transformarão o componente na configuração desejada (Figura 3.38).

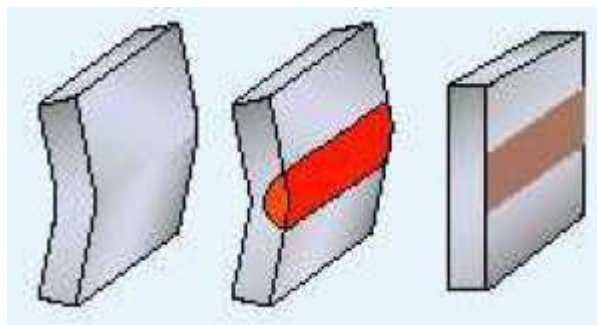


Figura 3.38 Correção por meio de aquecimento localizado. (TWI, 2014).

O nível de contração depende das dimensões, do número e da temperatura das zonas aquecidas. A área da zona afetada depende da espessura e dimensão da chapa. O número e posição da zona a ser aquecida determinam-se por meio da experiência. Para novos componentes é necessário realizar testes para estabelecer o nível de contração.

A técnica de aquecimento pode ser aplicada em ponto, linhas ou, em regiões em forma de cunha. O aquecimento em ponto é usado para eliminar o abaulamento de chapa de painéis enrijecidos (Figura 3.39a). O aquecimento é aplicado no lado convexo. Se o abaulamento é regular, o aquecimento pode partir do centro e ser direcionado para o lado externo. O aquecimento por linha é usado para corrigir a distorção angular de junta de topo ou em “T” (Figura 3.39b), ele é aplicado na linha oposta à de soldagem. Para corrigir distorções em componentes complexos precisa aquecer toda a área, além de empregar o aquecimento por linha. O método visa contrair uma parte do componente para impelir o material na forma desejada. Para aquecer as áreas, além do aquecimento por pontos, é usada a técnica por cunhas (Figura 3.39c), tentando obter uma distribuição uniforme ao longo da espessura. Para chapa de grossa espessura é necessário colocar duas tochas nas superfícies opostas para uniformizar a temperatura. Como regra pratica a cunha deve ter as seguintes dimensões: comprimento igual a $2/3$ da largura da chapa e base igual a $1/6$ do comprimento. O nível de alinhamento é 5 mm em 3 metros de comprimento de chapa. O aquecimento por cunha pode ser aplicado para a correção em dois planos de perfis laminado padrão (Figura 3.40a), em abaulamento do lado de chapa, como alternativa a conformação (Figura 3.40b), e estruturas planas distorcidas no plano (Figura 3.40c).

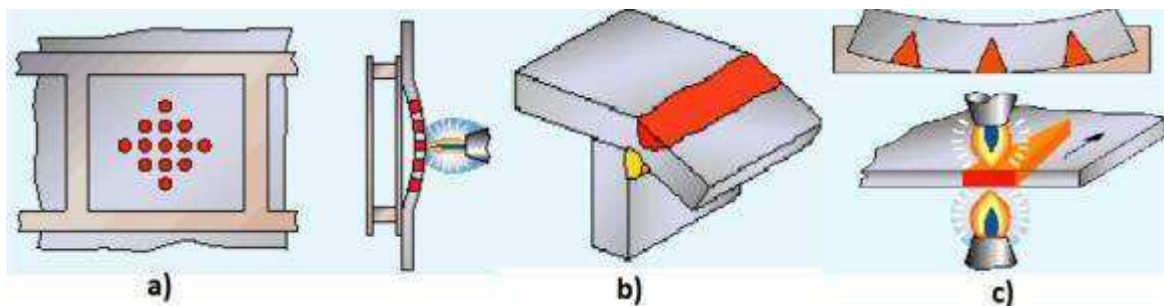


Figura 3.39 Técnica de aquecimento a) por pontos, b) por linha, c) por cunhas. (TWI,2014).

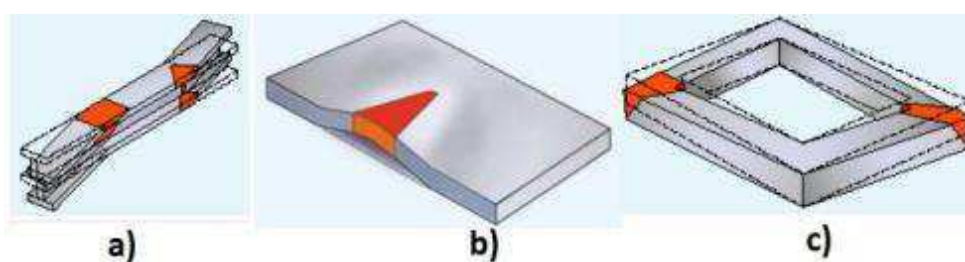


Figura 3.4040 Exemplo de aplicação, a) perfil laminados, b) chapa, c) estrutura plana. (TWI,2014)

É importante ressaltar que o aquecimento pode comprometer a integridade estrutural do componente, contraindo uma área maior que o necessário e/ou causar fragilização por revenido e/ou corrosão Inter-granular por precipitação de carbonetos ao longo dos contornos de grão da microestrutura do material. Desta forma a regra geral é aquecer a superfície numa faixa de 600-650 °C, ou seja, quando a cor da superfície aquecida se torna vermelho quente.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se uma abordagem numérica, estruturada em elementos finitos e fundamentada no Método do Volume de Contração, voltada à previsão de distorções em junta em “T” soldada de filete, analisando três diferentes sequências de soldagem. Para a validação do modelo numérico, será usada uma análise numérica e experimental de tensões residuais de uma junta em “T” com solda de filete, efetivada por Verde, Vieira J., Bandeira e Carreira Neto (2014). No trabalho mencionado, efetivou-se uma análise termomecânica, constituída por uma análise térmica transiente previa, em que o campo de temperatura, gerado pela aplicação da fonte de calor da soldagem, é calculado e sucessivamente usado como condição inicial para a subsequente análise mecânica, onde forneceu-se a distorção angular e as tensões residuais. Os resultados da análise térmica servirão para definir a zona fundida, que será aplicada no “Método do Volume de Contração”. Será feita uma comparação entre os valores experimentais e numéricos da distorção angular resultante pela aplicação dos dois métodos, com o fim de validar o modelo numérico do Método do Volume de Contração. Posteriormente este método será aplicado para analisar três sequências de soldagem, tendo como propósito individualizar, neste conjunto, a que minimiza a distorção angular.

4.1. ANALISE EXPERIMENTAL

A análise experimental foi voltada apenas à determinação das distorções angulares, entretanto os resultados numéricos da análise térmica foram comparados com os resultados experimentais de uma junta em “T” igualmente, submetida ao mesmo processo de soldagem, obtido da literatura (Verde S. et Al., 2014).

4.1.1. Corpos de Prova

Para efetivação da análise experimental, construíram-se três corpos de provas, com dimensões geométricas e características do filete mostrados na Figura 4.1

∴

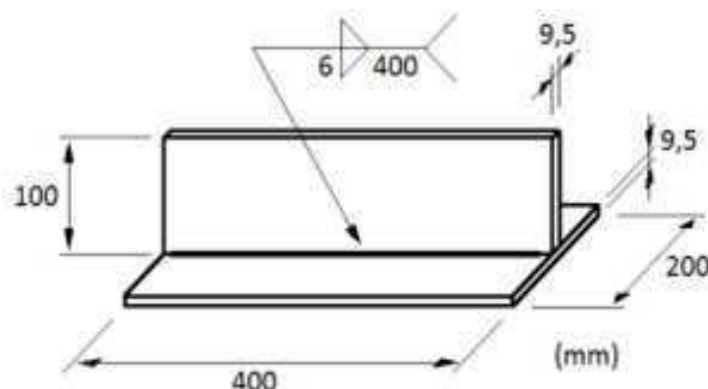


Figura 4.1 Corpo de prova para determinação experimental de deformações e deslocamentos residuais.

Empregaram-se chapas de aço ASTM A36, valor nominal da tensão de escoamento $f_y = 250$ MPa, e cuja resistência à ruptura tem valor nominal $f_u = 450$ MPa. O corte das chapas foi realizado com sistema oxiacetileno. As superfícies de corte foram submetidas posteriormente a esmerilhamento, conforme mostrado na Figura 4.2.



Figura 4.2 Chapas cortadas e esmerilhadas

Todas as chapas foram submetidas a tratamento térmico de alívio de tensões antes da soldagem, colocando as chapas em um forno, sob a temperatura de 500 °C, durante uma hora, até o desligamento do forno, evitando resfriamentos rápidos, para evitar a formação de zona com estrutura martensítica, prejudicial para a

soldagem. Antes da soldagem efetiva, as chapas foram ponteadas, controlando o esquadrejamento inicial de 90°, conforme mostrado na Figura 4.3.



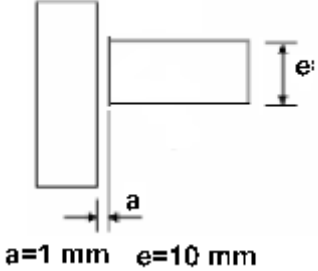
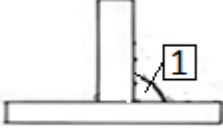
Figura 4.3 As chapas depois ter submetidas à tratamento de alívio de tensões foram ponteadas com processo MAG controlando o esquadrejamento inicial de 90°.

4.1.2. Soldagem

Utilizou-se o processo MIG/MAG (GMAW), conforme é mostrado na Figura 4.4.

A especificação de soldagem (EPS) é apresentada na Tabela 4-1. Não se tratando de solda de responsabilidade, isentou-se da confecção do relatório de qualificação de procedimento de soldagem (RQPS).

Tabela 4-1 Especificação de Soldagem

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM		EPS: 01	Revisão: 0
		Data: 30/07/12	Folha: 1 / 1
		Norma: ASME IX – Edição 2010	
Processo: GMAW Tipo: MANUAL		RQPS de Suporte: NA	
Detalhe da Junta  a=1 mm e=10 mm		Sequência de Passes 	
METAIS DE BASE (QW-403) Especificação do material: ASTM A 36 Tipo ou Grau: B P-Nº.: 1 com P-Nº. 1 Faixa de espessura: 2 A 10 MM Diâmetro do tubo: N.A		GÁS (QW-408) Gás de proteção: SG-AC-25 Vazão: 10 A 15 l/min Gás de Purga: NA Vazão: NA	
METAIS DE ADIÇÃO (QW-404) Especificação AWS: A 5.18 Classificação AWS: ER70 – S6 F-Nº.: 6 Marca comercial: Espessura do metal de solda: Ilimitado		CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409) Tipo de corrente: N.A Polaridade: CC+ Modo de transferência: Corto Circuito Eletrodo de Tungstênio: NA Diâmetro do Eletrodo: 0,8 mm	
POSIÇÃO (QW-405) Posição de soldagem: 1F,2F,3F Progressão:		TÉCNICA (QW-410) Passe retilíneo ou oscilado: Retilíneo Limpeza inicial: Esmerilhamento Limpeza entre passes: N.A Método de goivagem: N.A Passe simples ou múltiplo: Simplex Pré – aquecimento: AMBIENTE Temperatura Interpasse: N.A	
TRATAMENTO TÉRMICO (QW-407) Taxa de aquecimento: N.A Temperatura de patamar: N.A Tempo de patamar: N.A			

Taxa de resfriamento: N.A								
Passe / Camada	Processo	Consumíveis		Corrente		Tensão (V)	Velocidade de soldagem (m/min)	Velocidade do Arame (m/min)
		Classificação AWS	Ø (mm)	Tipo	(A)			
1	GMAW	ER70S-6	0.8	CC+	135 A 145	20 A 28	0,2	3.8
Certificamos que a EPS 01 qualificada conforme os requisitos do Código ASME IX – Edição 2010.								
				Elaboração: Salvatore Verde			Aprovação: Manoel Carrera Neto	



Figura 4.4 Soldagem com Processo MIG/MAG

4.2. ANÁLISE NUMÉRICA

4.2.1. Análise Termomecânica

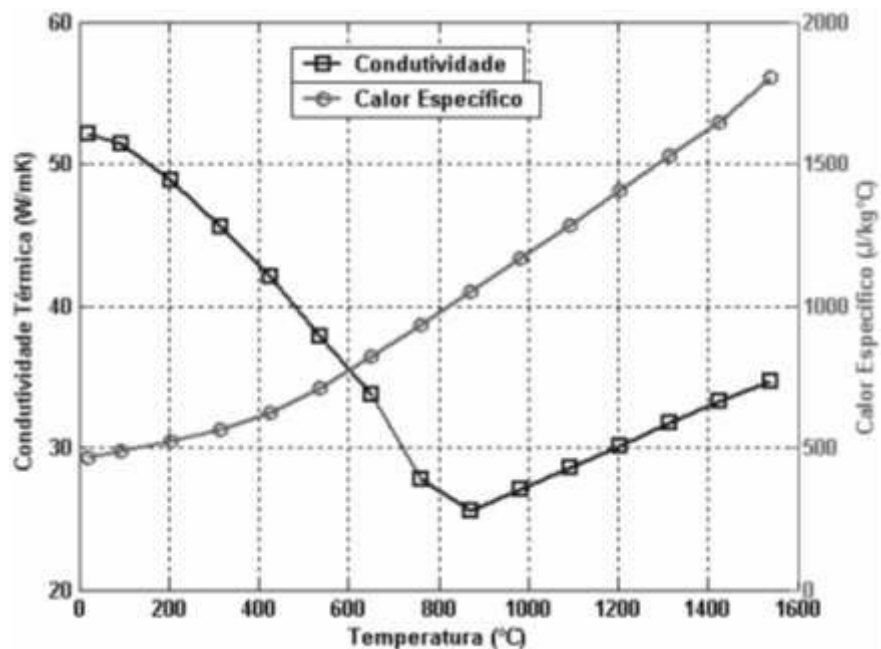
Foi desenvolvido um modelo numérico, utilizando o programa computacional ANSYS® - Versão 14, semelhante ao modelo físico que foi utilizado na análise experimental de determinação de deslocamentos residuais. Para o desenvolvimento do modelo numérico precisou-se de:

- Definição das propriedades do material;
- Geometria;
- Modelagem dos fenômenos convectivos e radiativos; Modelagem da fonte de calor.

- Condições de travamento

4.2.1.1. Definição do Material

As propriedades do aço ASTM 36 foram retiradas do trabalho de Hong et al., apud Bezerra (2006) conforme Figura 4.5:



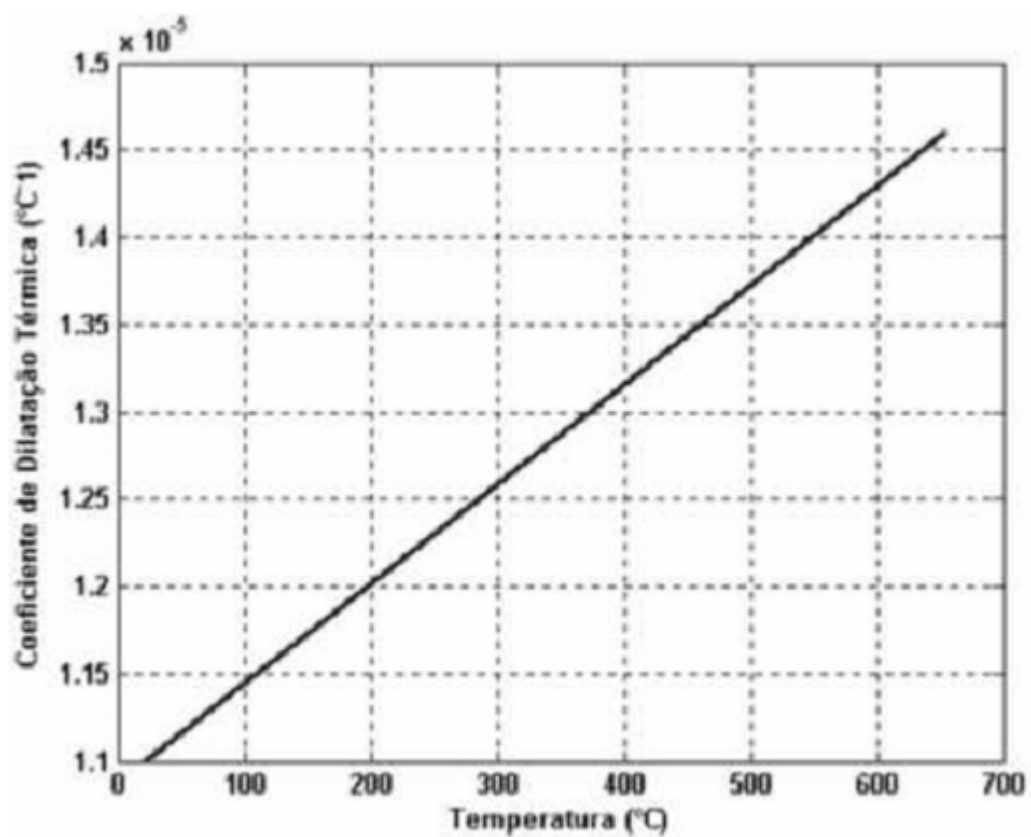
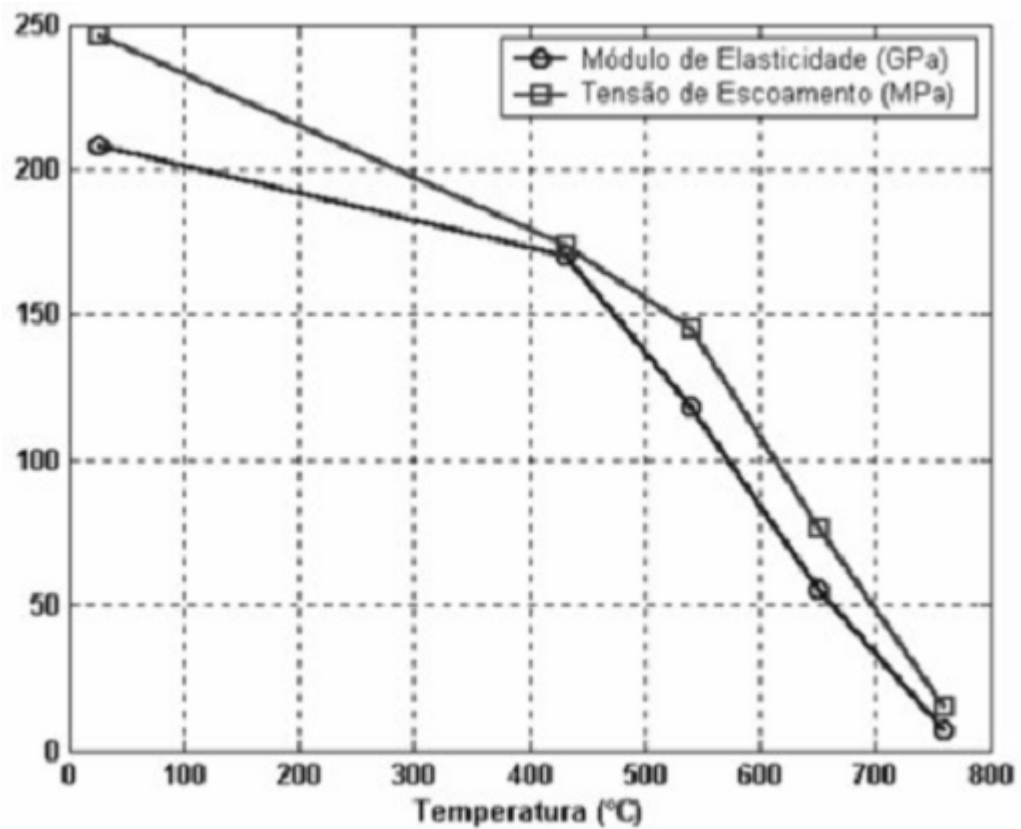


Figura 4.5 Propriedades do aço ASTM A36 (Hong et al., 1998, apud Bezerra, 2006).

Adotou-se um modelo constitutivo elástico – plástico considerando um Módulo tangente $H=E/200$. Na Figura 4.6, estão apresentadas as curvas para cada temperatura considerada:

T1= 20.000
 T2= 100.00
 T3= 200.00
 T4= 300.00
 T5= 400.00
 T6= 500.00
 T7= 600.00
 T8= 700.00

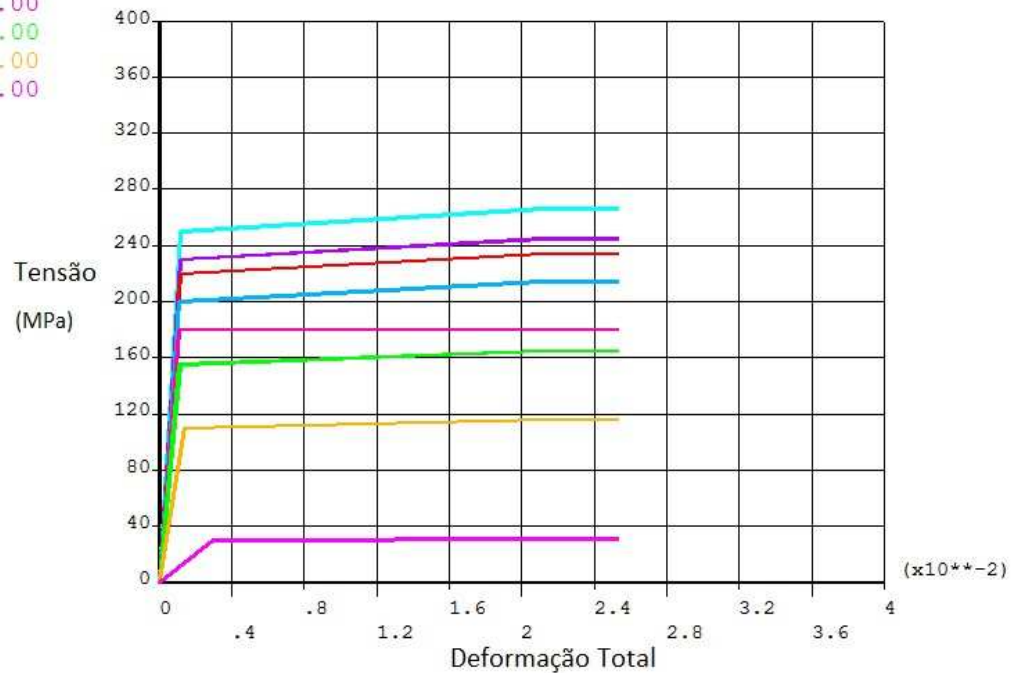


Figura 4.6 Tensão – Deformação Total

Como no ANSYS 14 é possível declarar a Entalpia por unidade de volume, esta foi calculada a partir da seguinte equação:

$$\Delta H = \int \rho(T)C(T)dT \quad (4.1)$$

Integrando esta função em trechos (usando os valores tabelados anteriormente), para cada trecho de temperatura $T_i - T_{i+1}$ pode ser escrita:

$$\Delta H_{i+1} = \int_i^{i+1} [m(T - T_i)][n(T - T_i) + \rho_i]dT \quad (4.2)$$

Os termos m e n representam os coeficientes angulares das retas $\rho(T)$ e $C(T)$:

$$m = \frac{C_{i+1} - C_i}{T_{i+1} - T_i} \quad n = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{T_{i+1} - T_i} \quad (4.3)$$

Substituindo as (4.3) na (4.2) e reordenando temos a seguinte equação final:

$$\Delta H_{i+1} = \left(\frac{C_{i+1}\rho_{i+1} + C_i\rho_i}{3} + \frac{C_{i+1}\rho_i + C_i\rho_{i+1}}{6} \right) (T_{i+1} - T_i) \quad (4.4)$$

Observando que a densidade do aço permanece constante em função da temperatura, a entalpia em cada trecho pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta H_{i+1} = \left(\frac{C_{i+1} + C_i}{3} + \frac{C_{i+1} + C_i}{6} \right) \rho (T_{i+1} - T_i) \quad (4.5)$$

Na Tabela 4-3 estão apresentados os valores da entalpia, calculados com a (4.5) em cada trecho de temperatura. A entalpia, em função da temperatura está apresentada no gráfico de Figura 4.7:

Tabela 4-2 Valores da Entalpia em função da temperatura

Temperatura (°C)	Calor Especifico (J/Kg)	Densidade (Kg/m ³)	ΔH_{i+1} Entalpia (J/m ³)
0	480,00	7850	1,02866E+09
20	485,00	7850	1,10442E+09
100	500,00	7850	1,41371E+09
200	510,00	7850	1,81013E+09
300	550,00	7850	2,22618E+09
400	600,00	7850	2,67756E+09
500	700,00	7850	3,18781E+09
600	750,00	7850	3,75693E+09
700	800,00	7850	4,36531E+09
800	1000,00	7850	5,07181E+09
1000	1200,00	7850	6,79881E+09
1500	1700,00	7850	1,24901E+10

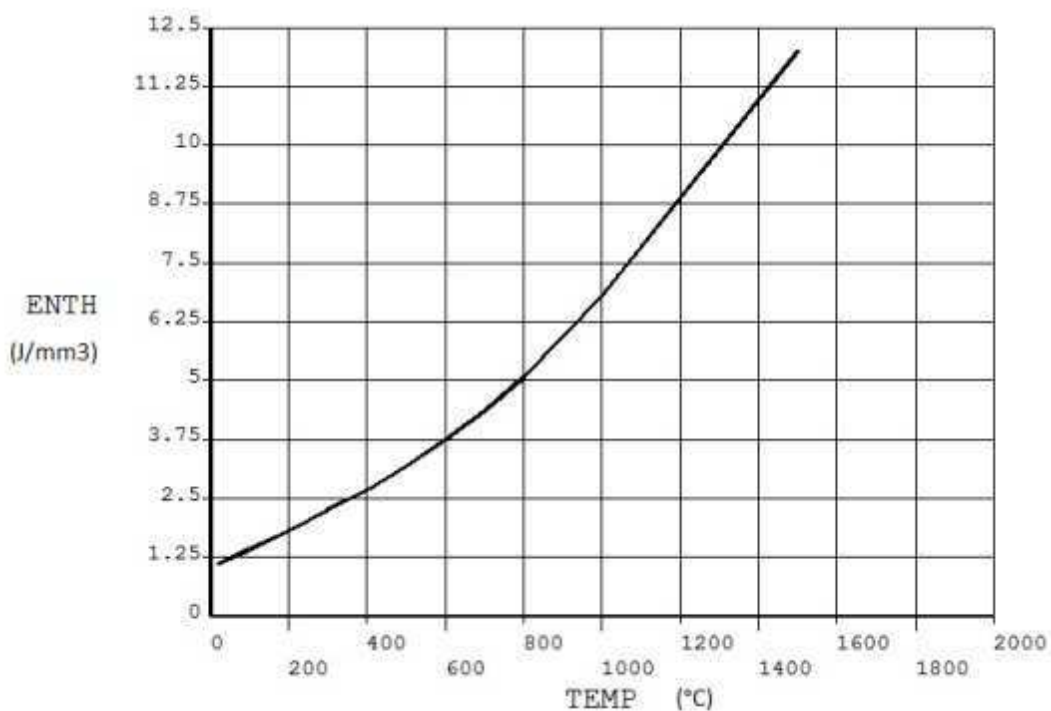


Figura 4.7 Entalpia em função da temperatura

Salienta-se que o efeito do calor latente de fusão não foi considerado na definição da função entalpia.

4.2.1.2. Geometria

Para a análise térmica escolheu-se o elemento SOLID70 (Figura 4.8) que é um elemento térmico 3D com oito nós tendo como grau de liberdade somente a temperatura. É idôneo para análise térmica 3D transitória ou estática. A convenção de calor e a radiação podem ser aplicadas como cargas superficiais sobre as faces e a fonte de calor como carga de volume nos nós. Ele não possibilita a técnica do "Birth and Death". Para análise estrutural usou-se o conjugado mecânico SOLID185 (Figura 4.9) que é um elemento 3D com oito nós e três graus de liberdade por nó, ou seja, translação ao longo de X,Y e Z e consente o uso da técnica mencionada, fundamental para a correta simulação do cordão de solda.

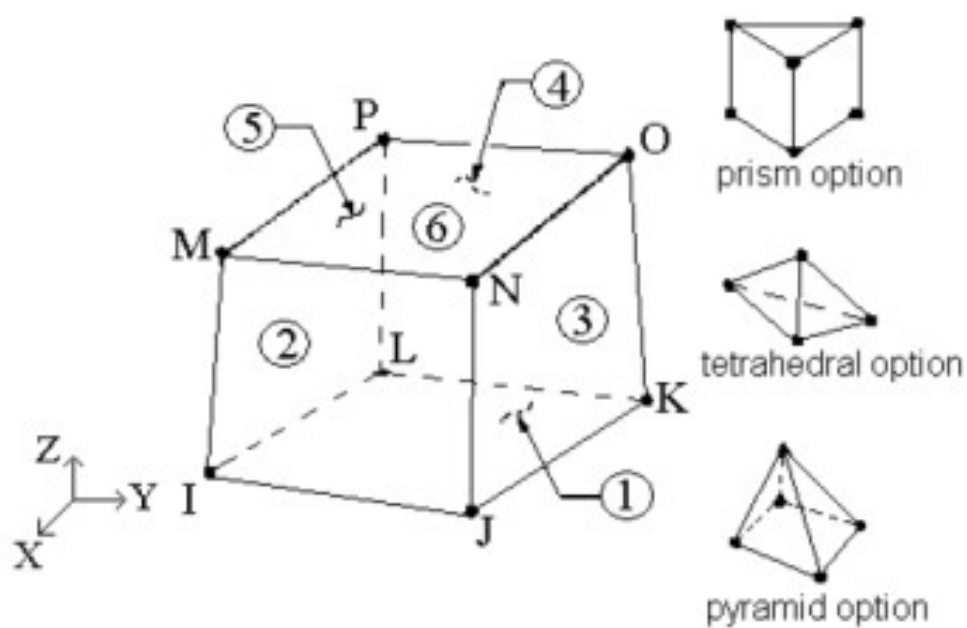


Figura 4.8 Elemento SOLID70

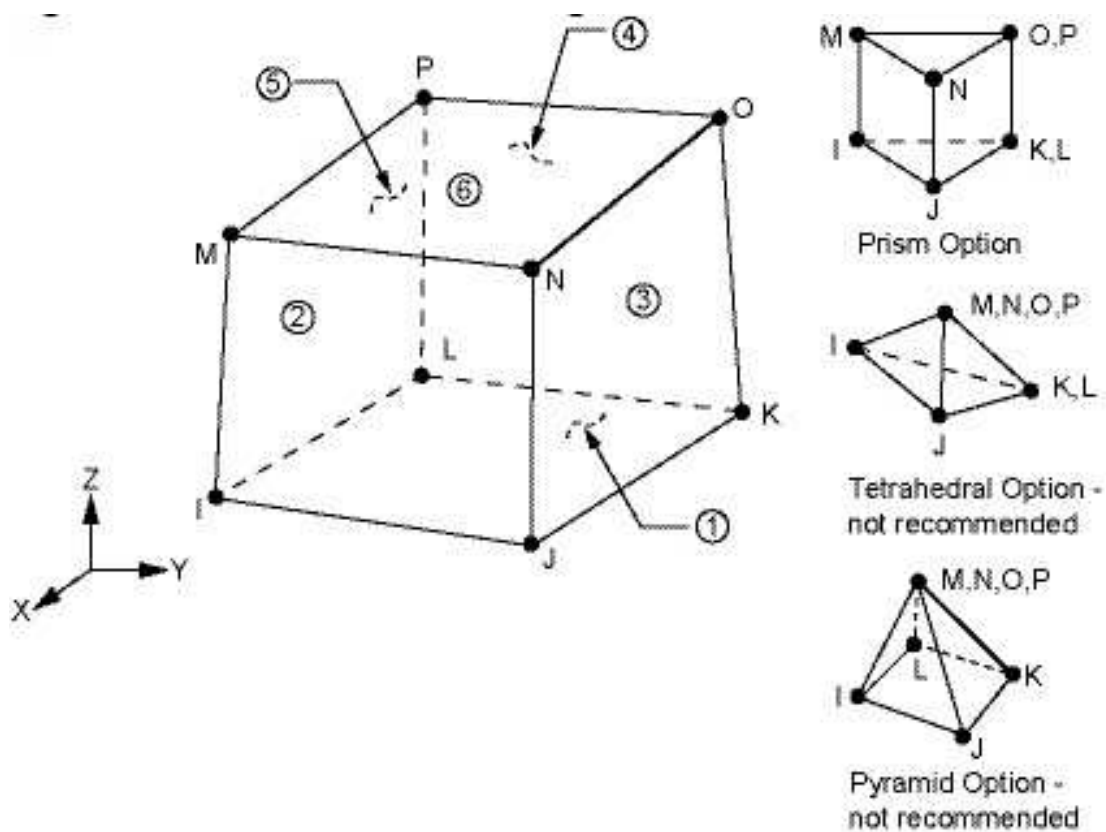


Figura 4.9 Elemento SOLID 185.

A malha do modelo, que contém 48642 nós e 40000 elementos, está apresentada na Figura 4.10

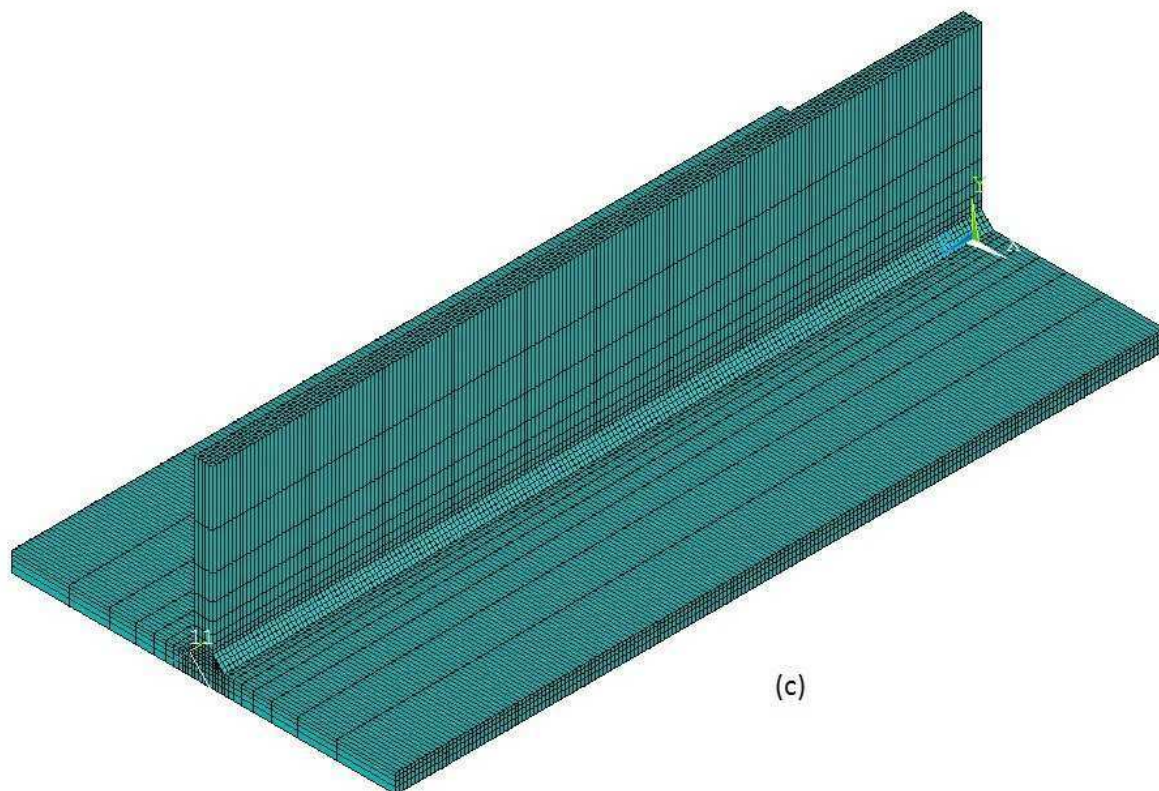


Figura 4.10 Modelo de elementos finitos

A malha foi refinada na zona de soldagem com elementos hexaédricos de dimensões $2,0 \times 2,0 \times 2,0$ mm, os quais se tornam gradualmente maiores até as dimensões $2,0 \times 30,0 \times 2,0$ mm nas duas arestas paralelas ao cordão de solda, isto porque nestas regiões o gradiente de temperatura é de pequena magnitude comparado com aquele que se tem na região do cordão. Ressalta-se que este tipo de malha foi já analisado por Bezerra (2006), que determinou as dimensões dos elementos capazes de fornecer resultados satisfatórios.

4.2.1.3. Modelagem dos fenômenos convectivos e radiativos

Os fenômenos convectivos e radiativos influenciam significativamente as tensões e deformações residuais, porque determinam as condições de esfriamento da peça. No ANSYS 14 os elementos que possibilitam a simulação dos fenômenos mencionados são os SURF152, que podem ser colocados sobre as faces dos

elementos 3D para análise térmica. O elemento é definido com quatro até nove nós e das propriedades do material. Este elemento precisa de um nó distante da peça de cerca 1 metro e serve para simular a temperatura do ar em condições ambientes.

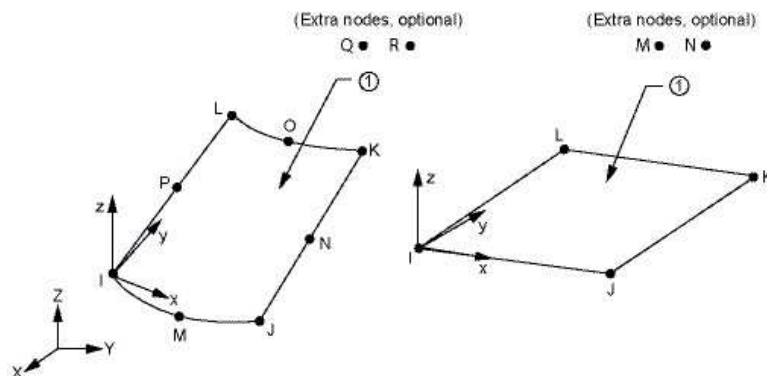


Figura 4.11 Elemento SURF152 com os nós adicionais

* **Nó Extra**

Nó Extra

*

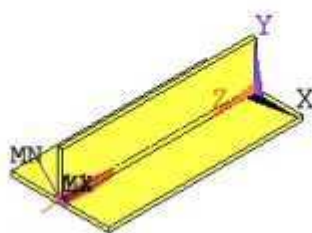


Figura 4.12 Extra nós para a simulação dos efeitos radiativos.

O fenômeno convectivo foi simulado sobre todas as faces da peça, excluindo a face inferior da chapa horizontal, no entanto o fenômeno radiativo foi simulado somente sobre a superfície do cordão e por este foi usada a técnica “Birth and Death” para agilizar o cálculo.

As perdas de calor por convecção foram modeladas segundo a lei de Newton usando o coeficiente de convecção $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

As perdas de calor por radiação foram modeladas com a lei de Stefan-Boltzmann usando o coeficiente de emissividade $\epsilon = 0,45$.

A transferência de calor devido ao fluxo de líquido na poça de fusão foi levado em conta artificialmente dobrando o coeficiente de condutividade térmica para valores de temperatura maiores do ponto de fusão.

4.2.1.4. Modelagem da fonte de Calor

O Processo de soldagem foi simulado soldando os filetes sequencialmente, conforme apresentado na Figura 4.13.

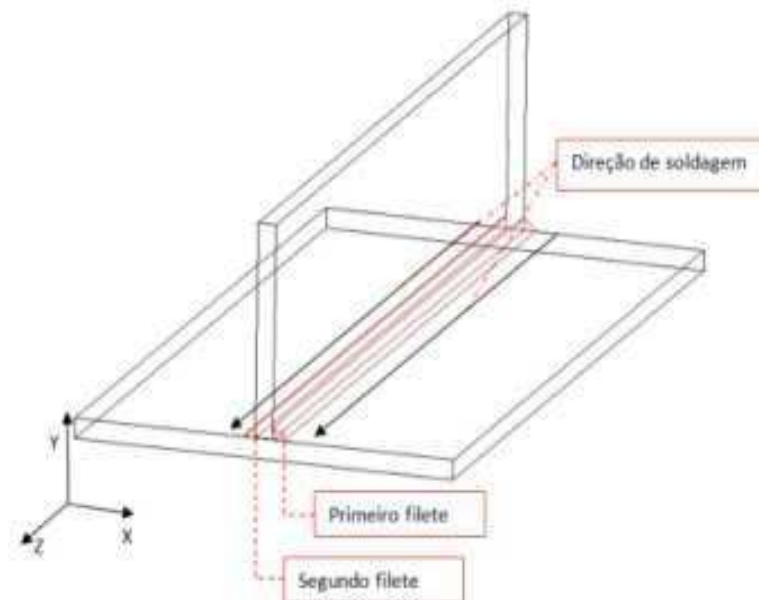


Figura 4.13 Deslocamento da fonte de calor

A fonte de calor foi modelada conforme o elipsoide duplo de Goldak, que se desloca ao longo do filete conforme apresentado na Figura 4.14.

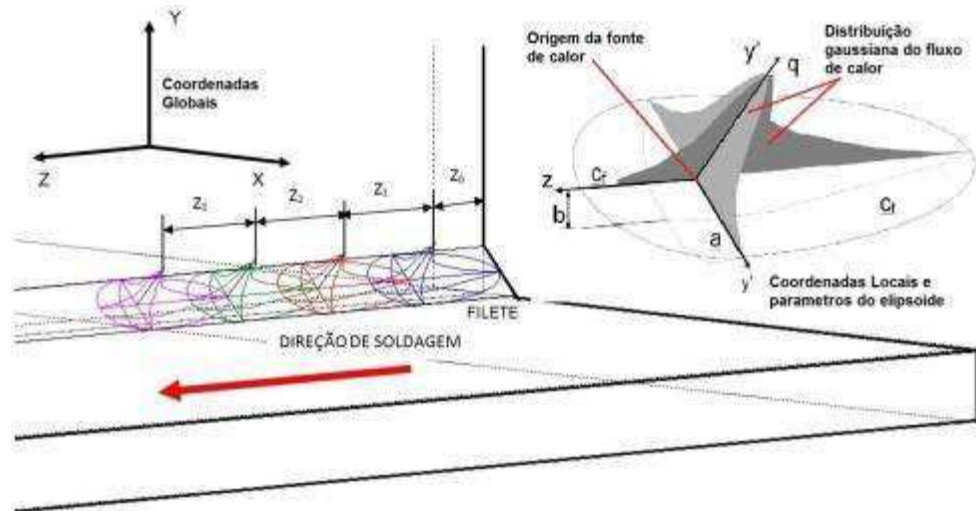


Figura 4.14 Modelagem da Fonte de Calor

Foi implementada uma rotina na linguagem proprietária do ANSYS, ANSYS Parametric Design Language (APDL), que para cada passo de tempo atribui aos nós incluídos no volume do elipsoide o relativo aporte térmico. Depois selecionados os nós na parte frontal do elipsoide ou vice-versa, parte um ciclo que calcula o valor do aporte térmico e o atribui a cada nó.

O número de nós que foi selecionado determina quantas vezes o ciclo deve ser repetido. Para cada nó é retirado o mínimo número em sequência e as coordenadas geométricas, estas informações são necessária para calcular o coeficiente f que possibilitará a determinação do aporte térmico a ser atribuído ao nó:

$$f = 1.8663k_j \frac{e^{-\frac{3x_l^2}{a^2}} e^{-\frac{3y_l^2}{b^2}} e^{-\frac{3z_l^2}{c_j^2}}}{abc_j} \quad (4-6)$$

Onde:

- k_j é o coeficiente da intensidade da fonte de calor da parte traseira ;
- x_l, y_l, z_l Posição atual do nó (mm);
- $a=4,5$ Largura da seção transversal da fonte de calor (mm);
- $b=4,5$ Altura da seção transversal da fonte de calor (mm);
- $c_1=3$ Comprimentos frontal da fonte de calor (mm).
- $c_2=8,5$ Comprimentos traseiro da fonte de calor (mm).

Os valores dos parâmetros do elipsoide de Goldak foram determinados com base nas dimensões das zonas fundidas medidas nos corpos de provas.

Uma vez calculado o parâmetro f , foi determinado o aporte térmico a ser atribuído ao nodo atual com a seguinte relação:

$$HI = Qf \quad (4-7)$$

$$Q = IU\eta \quad (4-8)$$

Onde:

η é a eficiência do arco

I a corrente do arco (A) (A)

U a diferencia de potencial do arco (V) (V)

4.2.1.5. Condições de travamento

A peça foi apoiada sobre um banco de aço sem nenhuma restrição, a não ser o atrito. Este tipo de travamento foi simulado aplicando ao longo dos nós do eixo longitudinal da face inferior da peça $Dx=Dy=Dz=0$. Além deste, foi aplicado um vínculo à translação ao longo do eixo Z nas duas extremidades laterais, conforme apresentado nas Figura 4.15.

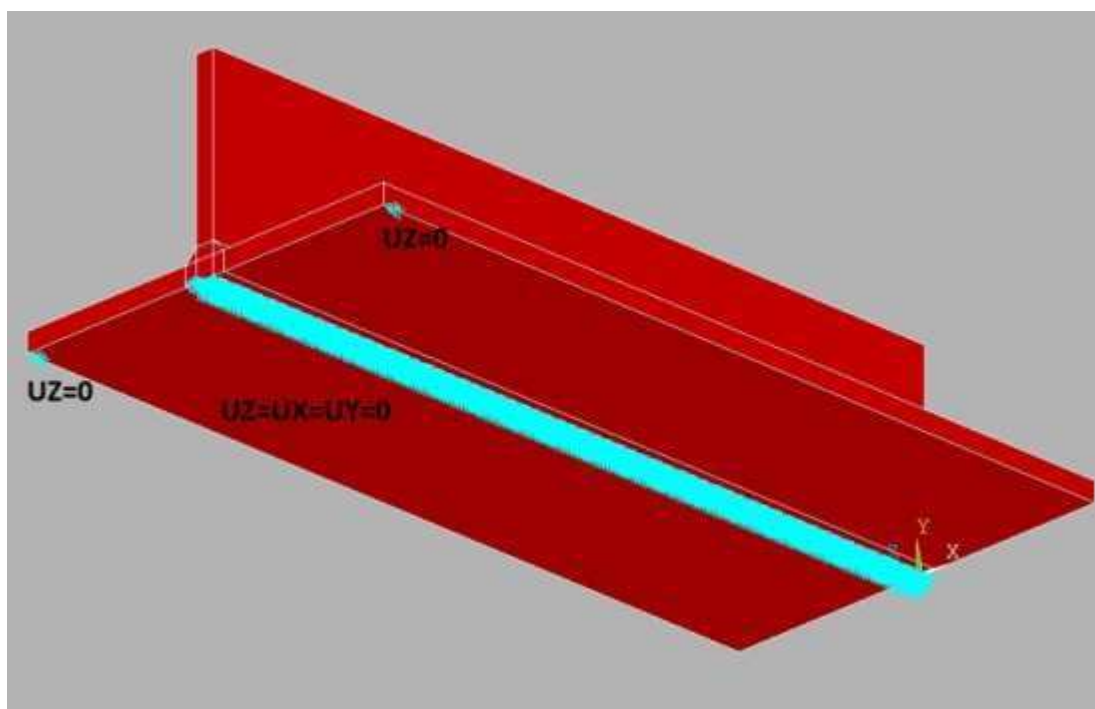


Figura 4.15 Condições de vínculo

4.2.1.6. Solução

A simulação inicia com a análise térmica, considerando quatro fases, ocorridas de forma semelhante no experimento. Na primeira fase simula-se a soldagem do

primeiro filete, aguarda-se o resfriamento até o começo da soldagem do segundo filete e análise conclui-se até atingir o resfriamento abaixo de 200°C. Os resultados da análise térmica são gravados num arquivo. A subsequente análise mecânica, retira os dados de temperatura, aplicando-os aos nós do modelo como condição inicial de carga para calcular os relativos deslocamentos. O fluxograma esquemático na Figura 4.16 apresenta sucintamente a funcionamento da rotina.

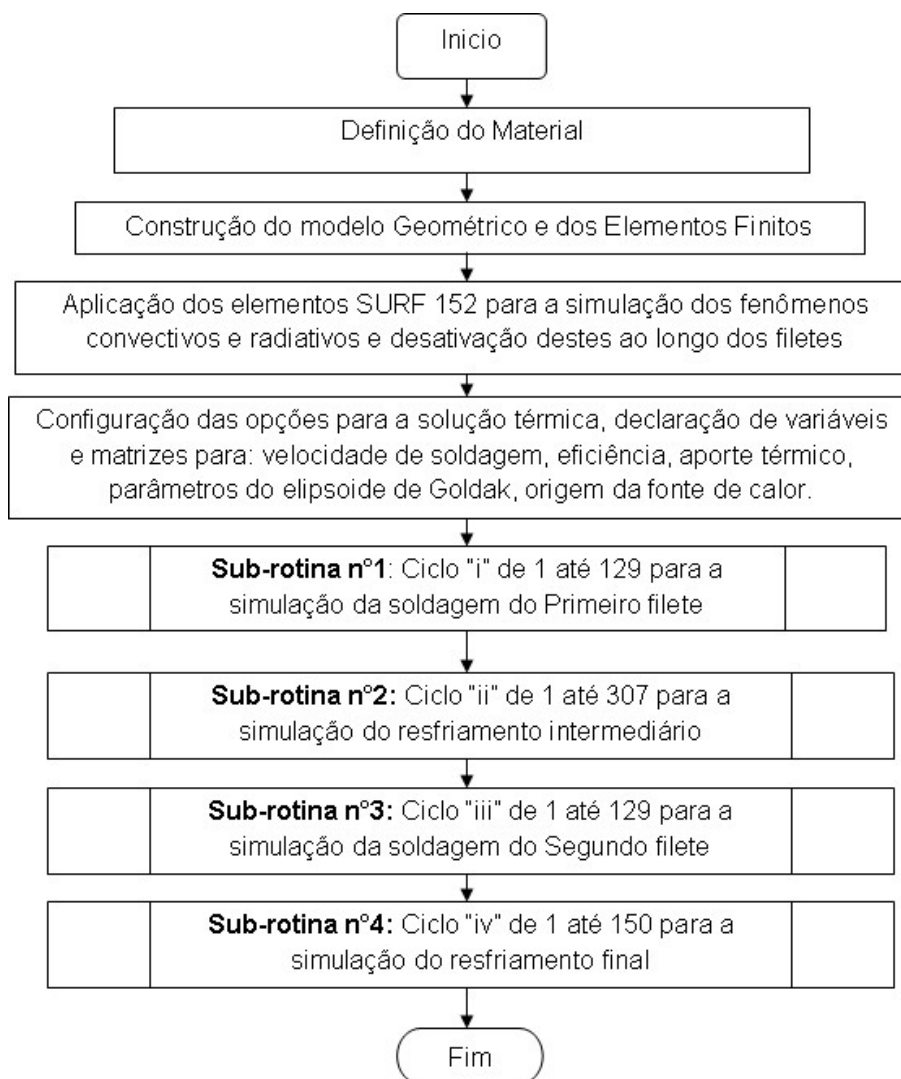


Figura 4.16 Fluxograma esquemático da rotina da análise termomecânica

4.2.2. Método do volume de contração

O modelo numérico apresentado anteriormente é analisado com o Método do Volume de Contração. Aplica-se uma contração $-\alpha\Delta T$, nos nós que pertencem ao volume fundido de cada filete. O volume é determinado observando a zona fundida

ocorrida durante o experimento. A diferença ΔT é igual à diferença entre a temperatura em que as propriedades mecânicas são nulas e a temperatura ambiente, no caso do primeiro filete ($\Delta T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), e entre a temperatura em que se encontra a peça depois a soldagem do primeiro filete e o resfriamento atingido no experimento, no caso do segundo filete ($\Delta T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$). Uma vez aplicada à contração, inicia-se uma análise elástico linear, com que se determinam os deslocamentos. Estes são comparados sucessivamente com os valores obtidos experimentalmente e por meio da análise termomecânica. Uma vez validado, o modelo é usado para determinar a sequência de soldagem, entre aquelas apresentadas na Figura 4.17, que causam as menores distorções. A análise da sequência A é a mesma feita para validar o modelo, entretanto as sequencias B e C são analisadas da seguinte forma: no caso da sequência B, todos os elementos dos filetes são desativados, sucessivamente procede-se à ativação dos filetes marcados com o número 1 (Figura 4.17B) e aplica-se a contração conforme visto para a sequência A. Efetiva-se a análise elástica linear e então os elementos dos filetes marcados com o número 2 são ativados e sobre eles aplicada a contração. Procede-se finalmente a análise elástica linear. No caso da sequência C, também todos os elementos dos filetes são desativados. Então procede-se na mesma forma como mostrado para a sequência B, com a diferença que o processo repete-se por quatro vezes, até completar a análise elástica linear dos elementos dos filetes marcados com o número 4. Ressalta-se que não foi simulado algum resfriamento entre o fim e o início de cada sequência e a mesa e a alma da peça, foram consideradas unidas, como um único corpo, anteriormente ao início da soldagem. Isto irá ter algumas consequências que serão justificadas posteriormente.

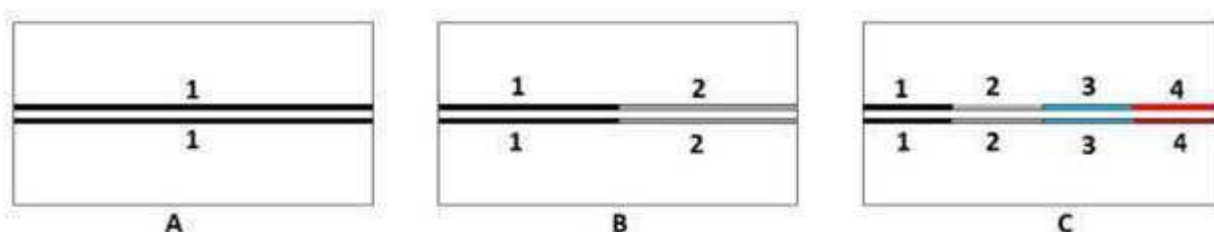


Figura 4.17 sequencias de soldagem analisadas.

5. RESULTADOS

A seguir, será feita uma discussão sobre os resultados obtidos, comparando os resultados numéricos e os experimentais, da temperatura, no que tange à análise térmica, e das distorções angulares para análise mecânica. Será apresentada, também, uma comparação dos valores numéricos das distorções obtidos com a análise termomecânica e o método do volume de contração e como variam as distorções em função da sequência de soldagem mediante a aplicação do método do volume de contração. Em conclusão será apresentado para cada método o uso de recursos computacionais e o nível de precisão dos resultados numéricos obtidos.

5.1. RESULTADOS DA ANÁLISE TÉRMICA

A comparação entre a zona fundida obtida numericamente e experimentalmente no primeiro filete (Figura 5.1) e no segundo filete (Figura 5.2) mostra uma boa coerência da distribuição de temperatura na seção. A zona onde foi aplicada a contração térmica, durante aplicação do Método do Volume de Contração esta apresentada na Figura 5.3, e pode ser observada uma boa semelhança com a zona fundida real e numérica. Vale a pena ressaltar que no método da contração de volume é fundamental a determinação de a zona onde aplicar a contração. Esta zona pode ser determinada experimentalmente ou numericamente com uma análise térmica.

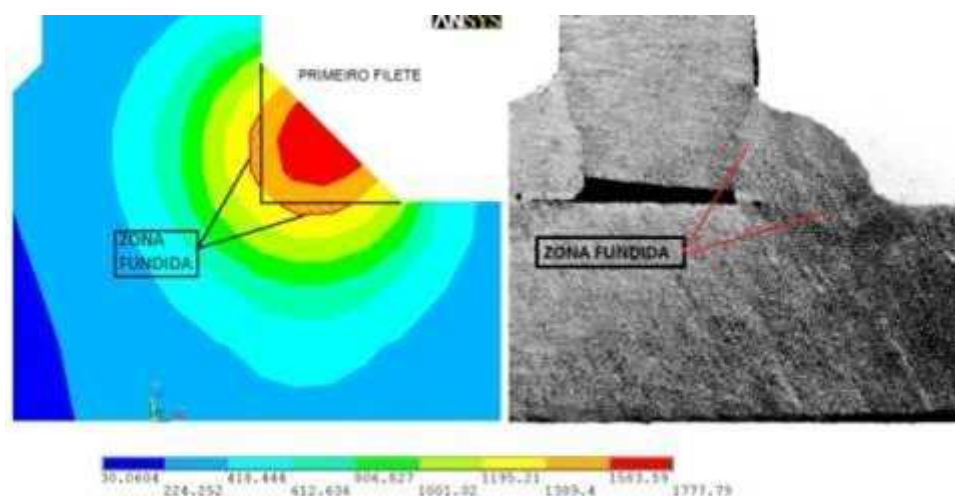


Figura 5.1 Comparação da zona fundida obtida numericamente e experimentalmente do primeiro filete.

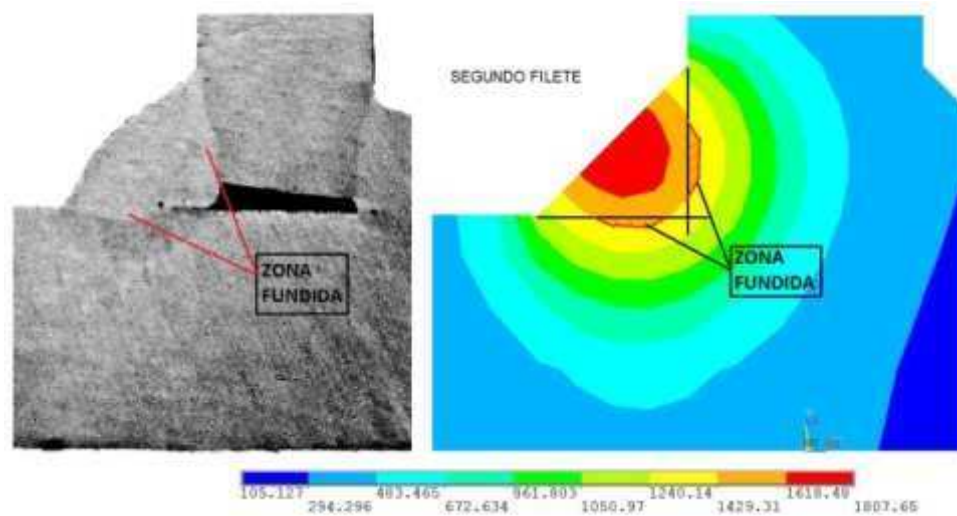


Figura 5.2 Comparação da zona fundida obtida numericamente e experimentalmente do segundo filete.

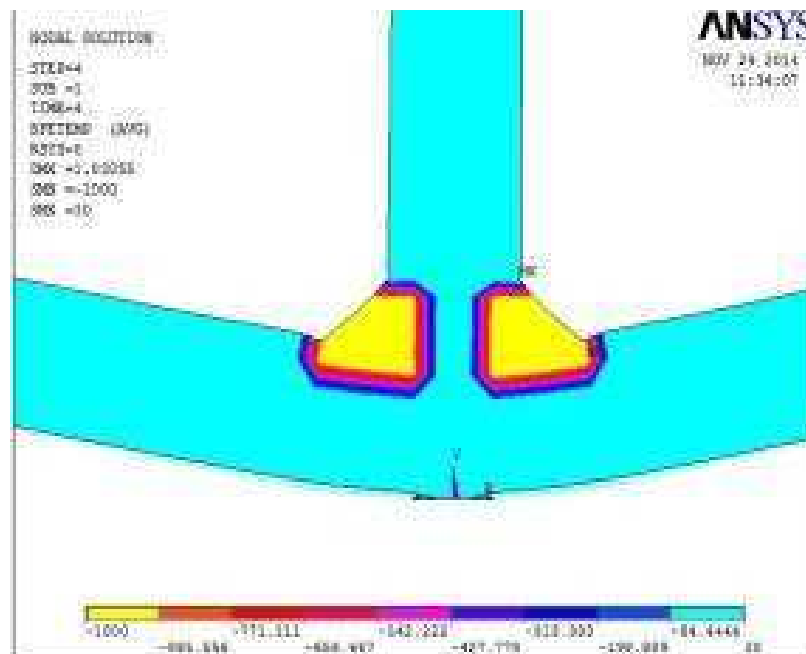


Figura 5.3 Zona de aplicação da contração térmica.

O campo de temperatura, na forma de isoterma, do processo de soldagem está apresentado na Figura 5.4. É possível observar que a peça, quando inicia a soldagem do filete de esquerda ($t=436s$) está em uma temperatura bem maior da temperatura ambiente, o que causa uma contração menor sendo ΔT menor.

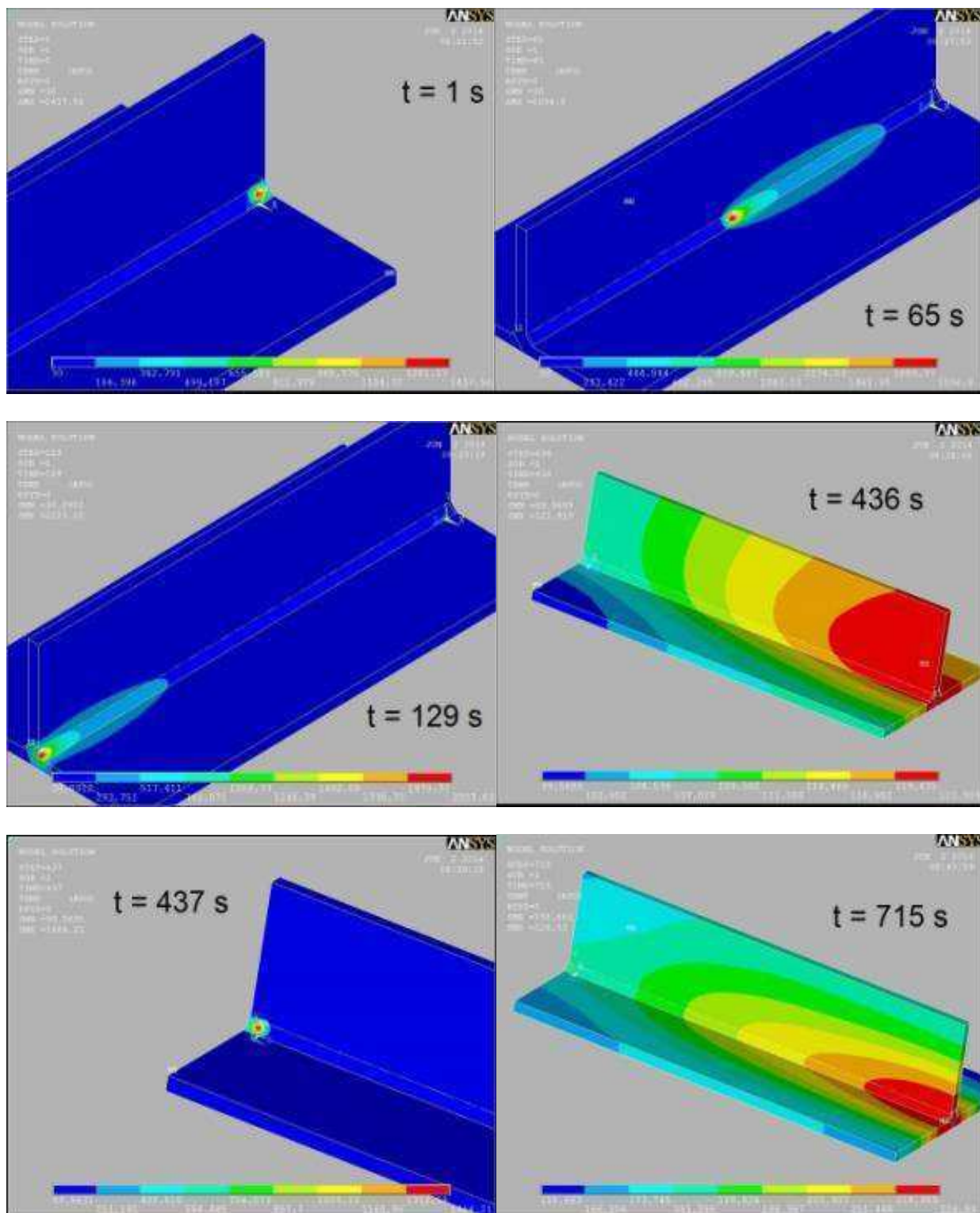


Figura 5.4 Campo de temperatura durante o processo de soldagem

5.2. RESULTADOS DA ANÁLISE MECÂNICA

5.2.1 Análise termomecânica

Em relação à validação dos resultados numéricos obtidos por meio da análise termomecânica, compararam-se os valores numéricos dos deslocamentos ortogonais à chapa horizontal, retirados da superfície superior, mostrados nas Figura 5.5e Figura 5.6, com os valores experimentais das distorções da peça, mostrada na Figura 5.7. Observou-se uma não simetria das distorções com respeito à chapa vertical, provavelmente devida à defasagem temporal em que ocorreu a solda dos dois filetes. Contudo obteve-se uma ótima concordância entre os valores.

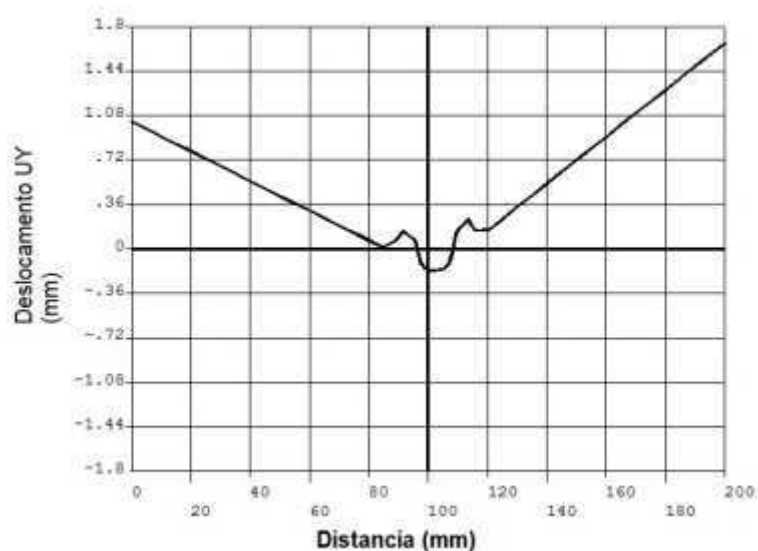


Figura 5.5 Valores numéricos dos deslocamentos ortogonais à chapa horizontal, na superfície superior.

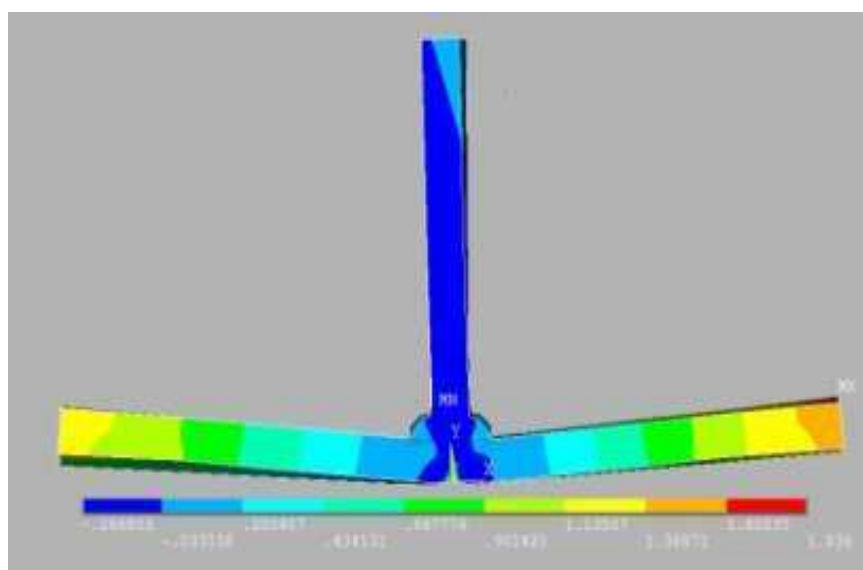


Figura 5.6 Isovalores de deslocamentos obtidos da análise numérica

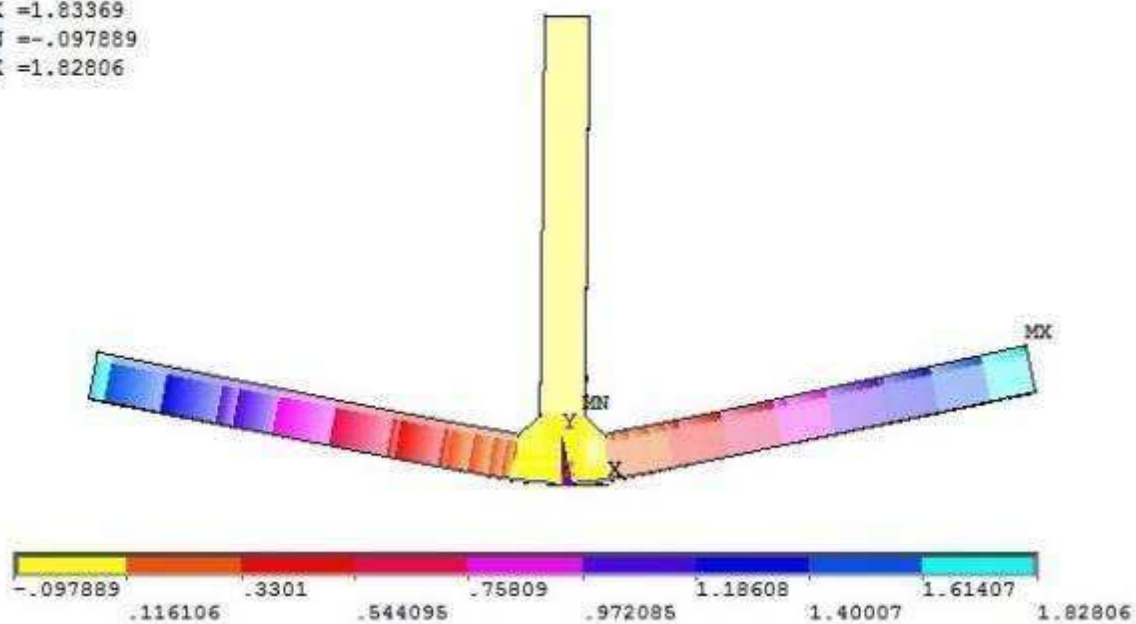


Figura 5.7 Deslocamentos reais na peça após a soldagem das extremidades.

5.2.2 Método de contração de volume

Considerando a sequência de soldagem A, aplicando simultaneamente a contração térmica nas zonas fundida dos dois filetes, conforme explicado no capítulo 4.2.2, obtêm-se resultados numéricos, que estão em boa concordância com os obtidos experimentalmente, como confirma a Figura 5.8. Isto permite nos validar o modelo e usá-lo para a análise das sequências de soldagem C e B. Analisando os resultados numéricos obtidos considerando as sequencias B (Figura 5.9) e C (Figura 5.10), observa-se uma diminuição do valor do deslocamento máximo a partir da sequência de soldagem A até a C, como mostrado na Tabela 5-1. Ressalta-se que, como explicado no capítulo 4.2.2, o fato de ter considerado a mesa e a alma como um corpo único, aumenta significativamente a rigidez da peça. Isto pode explicar a pequena diferença entre os deslocamentos máximos obtidos pelas três sequencias de soldagem de acordo com o método JRM mencionado anteriormente.

1
 NODAL SOLUTION
 STEP=2
 SUB =1
 TIME=2
 UY (AVG)
 RSYS=0
 DMX =1.83369
 SMN =-.097889
 SMX =1.82806



1
 POST1
 STEP=2
 SUB =1
 TIME=2
 PATH PLOT
 NOD1=22676
 NOD2=12835
 UY

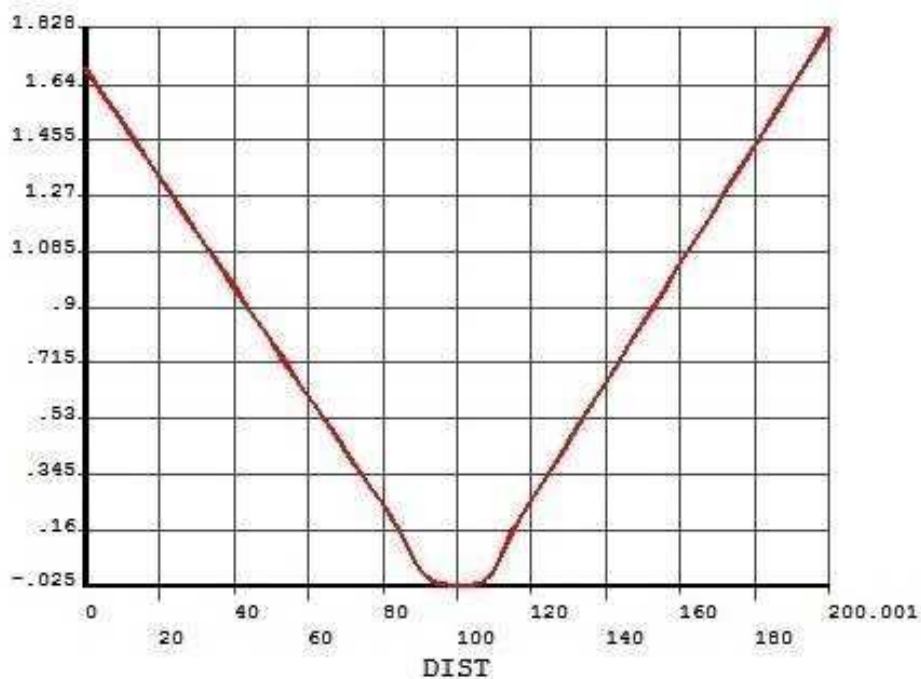


Figura 5.8 Distorção angular aplicando a sequência de soldagem A

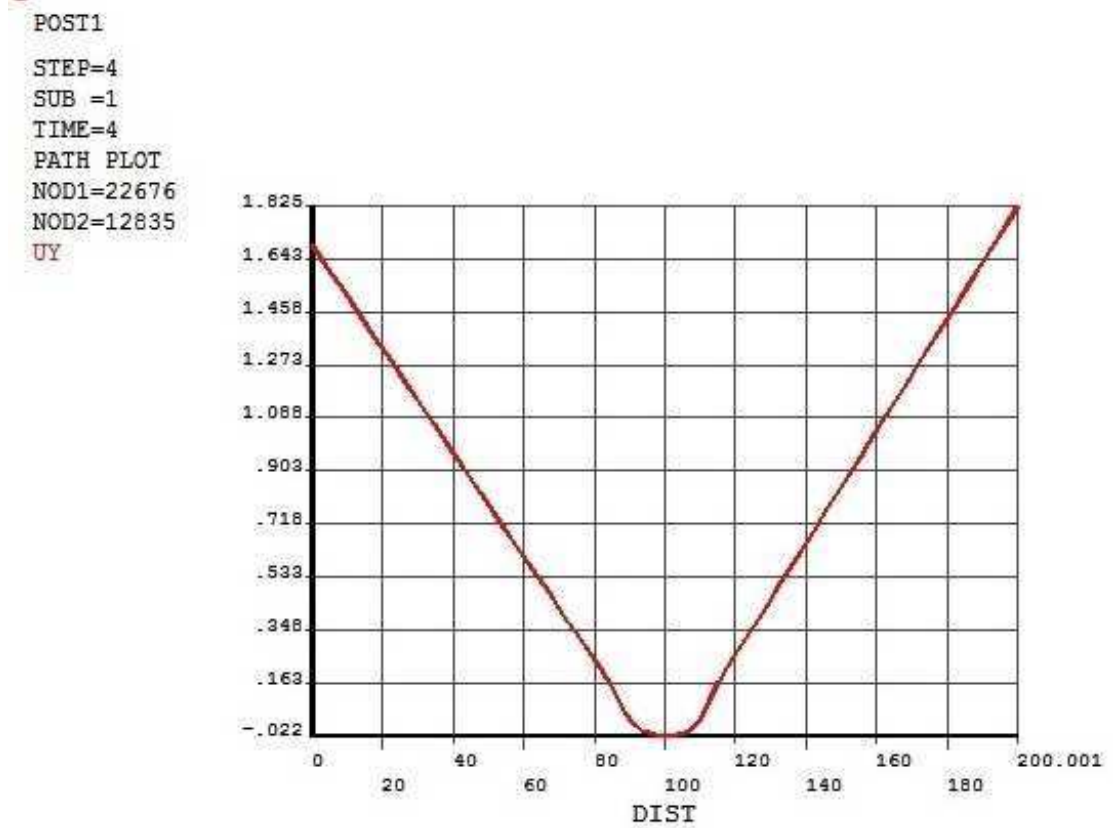
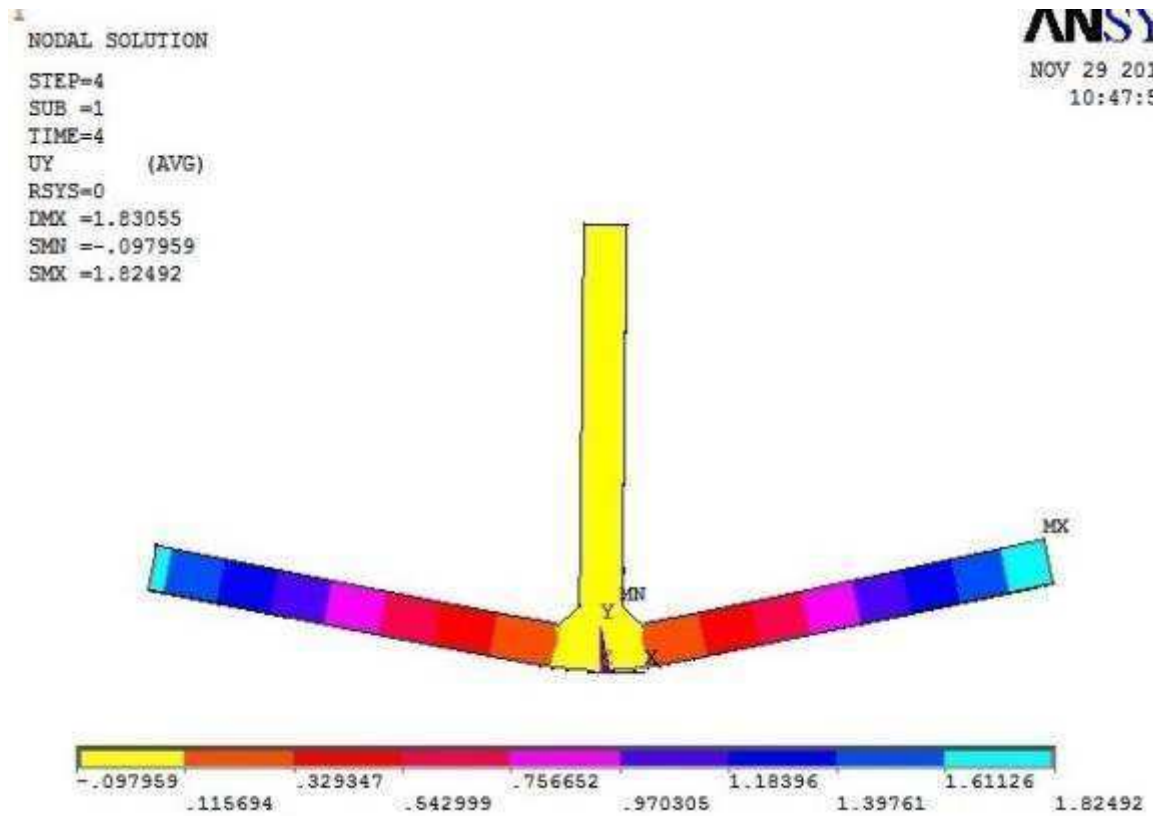
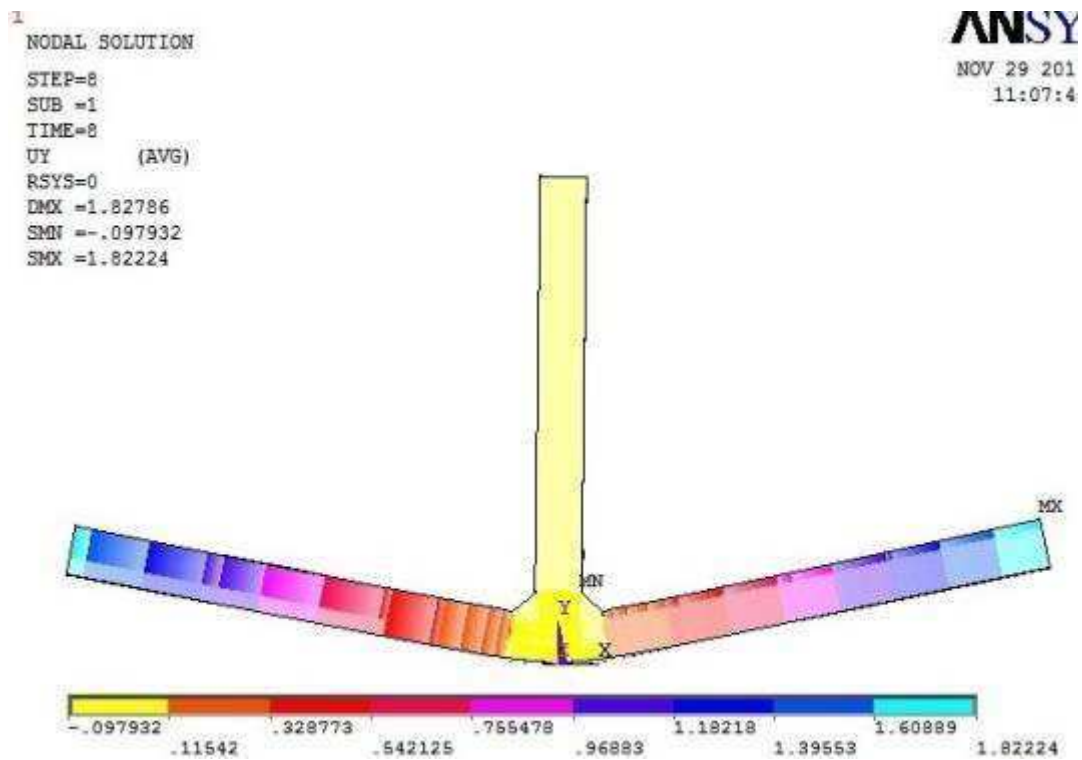


Figura 5.9 Distorção angular aplicando a sequência de soldagem B.



POST1
STEP=8
SUB =1
TIME=8
PATH PLOT
NOD1=22676
NOD2=12835
UY

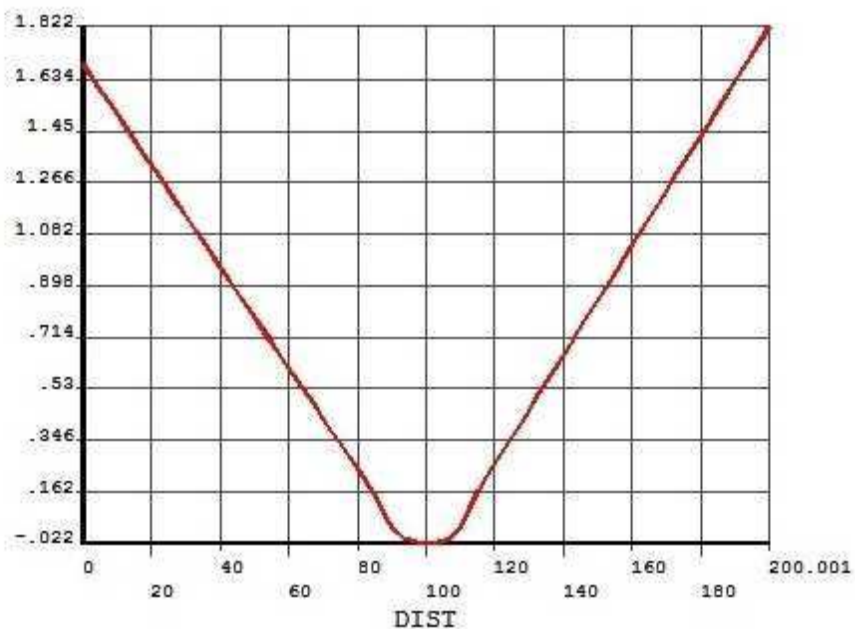


Figura 5.10 Distorção angular aplicando a sequência de soldagem C.

Tabela 5-1 Deslocamento máximo nas três sequencias de soldagem

Sequencia	Deslocamento (mm)
A	1.828
B	1.825
C	1.822

5.3. USO DE RECURSOS COMPUTACIONAIS

Para a efetivação da análise, empregou-se um notebook equipado com AMD “Quad-Core A6-3400 M”, RAM de 4 GB e HD de 750 GB.

A seguir mostrar-se a Tabela 5-2, onde é possível observar a diferença significativa de uso de recursos computacionais entre os três tipos de análises, ressaltando a grande rapidez com que pode ser realizada a análise abordada com o método do volume de contração. Ressalta-se que uma abordagem numérica deve ser planejada quando existe a viabilidade econômica do investimento necessário ao desenvolvimento da aplicação que justifique os maiores benefícios respeito aos custos. Por exemplo, uma abordagem numérica pode reduzir o número de ensaios destrutivos ou não, se o seu custo de desenvolvimento é menor que os custos dos ensaios.

Tabela 5-2 Uso de recursos.

Tipo de análise	Tempo de calculo (Min.)	Tamanho total dos arquivos (GB)
Mecânica não linear	6000	267
Térmica Transiente	210	113
Volume de Contração	11	0.143

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentaram-se os fundamentos físicos das distorções induzidas por soldagem, a formulação matemática e numérica do fenômeno termomecânico, os princípios da modelagem da soldagem, uma pesquisa bibliográfica sobre as práticas consolidadas, e em via de desenvolvimento, de minimização das distorções.

Em seguida analisou-se o campo de deslocamento induzidos por soldagem de uma junta a “T” de aço A36 soldada de filete com processo MIG/MAG manual. Apresentou-se uma análise experimental, confeccionando três corpos de prova, medindo a zona fundida nos filetes e as distorções angulares da chapa horizontal no final do processo. Paralelamente apresentou-se uma análise termomecânica não linear empregando o duplo elipsoide de Goldak na modelagem da fonte de calor. Sucessivamente o mesmo fenômeno foi abordado com o método do volume de contração, com que se determinaram numericamente as distorções angulares, que foram comparadas com os valores experimentais e numéricos obtidos nas análises anteriores.

Conclui-se que:

Os resultados numéricos das distorções foram quantitativamente coerentes com os valores experimentais;

Os valores numéricos obtidos por meio da aplicação do volume de contração resultaram em boa concordância com ambos os valores experimentais e numéricos obtidos com análise termomecânica.

Para uma correta aplicação do método do volume de contração é necessário determinar a amplitude da zona fundida, que pode ser feito de forma experimental ou numérica, aplicando uma análise térmica semelhante àquela apresentada neste trabalho.

Percebeu-se que o método de contração de volume pode servir para determinar rapidamente qual sequência de soldagem causa menores distorções.

Os fatores determinantes na aplicação do método da contração de volume, são a temperatura em que se encontra a peça no início da soldagem e a rigidez do componente, confirmando o princípio do Joint Rigidity Method, em que, as distorções

minimizam-se quando se solda o componente que proporciona uma rigidez maior à peça principal.

6.2 SUGESTÕES PARA ATIVIDADES DE PESQUISA FUTURAS

A análise numérica realizada bem como a rotina desenvolvida em APDL, pode ser usada como base para aperfeiçoar alguns assuntos de primaria importância para o meio acadêmico e o mercado. Desta forma sugerem-se os seguintes trabalhos:

Aprimoramento de dados experimentais adicionais no que diz respeito à temperaturas e distorções para acrescer a confiabilidade do modelo numérico apresentado;

Aperfeiçoamento da rotina da análise térmica apresentada, para vários de tipo de junta e fonte de calor.

Execução de análises experimentais e numéricas usando a rotina confeccionada, tendo em vista a investigação de diferentes opções de materiais, junta de filete com penetração, espessuras de chapa, com o intuito de criar uma base de dados de valor de amplitude da zona fundida, classificadas por tipo de junta, materiais etc., para ser sucessivamente usada para aplicação do método do “Volume de contração” para análise de estruturas complexas;

Análise experimentais de estruturas complexas de sacrifício para validar análise numéricas fundamentadas no método do “Volume de contração” e possibilitar a previsão de distorções residuais em estruturas de uso prático.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAK. M, MANDAL. N.R.. **Numerical and experimental study of mitigation of welding distortion**. Applied Mathematical Modelling 34 (2010) 146–158.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RECOMENDED PRACTICE 577**. Welding Process, Inspection and Metallurgy. March 2011.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERING. **ASME VIII**. Bolier and Pressure Vessel Code. Rule for Construction of Pressure Vessels. July 2010.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1.M2010**. Structural Welding Code- Steel. March 2011.

BACHORSKI, A. et Al. Finite-element prediction of distortion during gas metal arc welding using the shrinkage volume approach. **Journal of Materials Processing Technology**. Adelaide, SA 5005, Austrália. 92-93 , 405-409. 1999.

BEZERRA, A. **Simulação numérica da soldagem com aplicação à caracterização do comportamento dinâmico de estruturas soldadas**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia: s.n., 2006. Tese (Doutorado).

BEZERRA, Douglas De Araújo. **Estudo de Distorções em Soldagem com uso de Técnicas Numéricas e de Otimização**. Uberlândia, 2012, Tese, Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.

BLODGETT, O. Disponível em:

<<http://weldingdesign.com/archive/controllingdistortiondesign>>. Acessado em set. 2014.

BRACE, M., BROOK, J. Disponível em < <http://www.cuttingdiscs.com.au/cuttingdisc-news/tips-for-successfully-welding-sheet-metal/>>. Acessado em set. 2014.

DENG, D. Influence of deposition sequence on welding residual stress and deformation in an austenitic stainless steel J-groove welded joint. **Materials and Design**, 49 (2013) 1022–1033.

DENG, D., MURUKAWA, H., SHIBAHARA, M. Investigations on welding distortion in an asymmetrical curved block by means of numerical simulation technology and experimental method. **Computational Materials Science**, 48 (2010) 187–194.

ISLAM, M, et al. Simulation-based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures. **Finite Elements in Analysis and Design**, 84(2014)54–64.

JACKSON, Kathryn; DARLINGTON, Roger. Advanced Engineering Methods for Assessing Welding Distortion in Aero-Engine Assemblies. **Material Science and Engineering**, 26 (2011) 012018.

MICHELARIS, P., SUN, X. Finite element analysis of thermal tensioning techniques mitigating weld-buckling distortion. **Welding Journal, Welding Research Supplement** (1997).

MODENESI, P., MARQUES, P., SANTOS, D., **Introdução à Metalurgia de Soldagem**. Belo Horizonte, 2012.

MURUKAWA, H et al. Applications of inherent strain and interface element to simulation of welding deformation in thin plate structures. **Computational Materials Science**, 52, (2011) , 43-52.

OKANO, S. MOCHIZUKI, M. TOYODA, M. UHEYAMA, T. Effect of welding conditions on reduction in angular distortion by welding with trailing heat sink. **Science and Technology of Welding and Joining**. Vol. 17 No 4 (2012) 264.

OKANO, S. MOCHIZUKI, M. TOYODA. Effect of welding conditions on reduction of angular distortion In-Process control using back heating source. **Material Science Forum**. (2008) 580-582, 585-588.

PARK, J., NA, G., LEE, H. Effect of external load on angular distortion in fillet welding. **Materials and Design**, 42 (2012) 403–410.

SHIN, B.S., LEE, D.J., Control Technology for Excessive Welding Distortion of the Deck House during Manufacturing Process. **Met. Mater. Int.**, Vol. 17, No. 1 (2011), pp. 123~130.

TAKÁCS, G. **Temperature Controlled Welding Simulation**. Saarbrücken: VDM Verlag, 2010.

TSAI C.L., PARK S.C., CHENG T. Welding Distortion on Thin-Plate Panel Structure. Ohio State University (1999). Disponível em:

<http://www.aws.org/wj/supplement/WJ_1999_05_s156.pdf> . Acesso em set 2014

TWI Disponível em:

<<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/jobknowledge/dis>>. Acesso em set 2014.

TWI Disponível em:

<<http://www.twi-global.com/technologies/structuralintegrity/numerical-modelling/prediction-of-distortion/>>. Acesso em set 2014.

VERDE S., VIEIRA JR. A.B., BANDEIRA A.A., CARRERA NETO M. **Análise numérica e experimental de Tensões e Deformações residuais em junta “T” soldada de filete**. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2014. Dissertação de Mestrado.

8 ANEXO I – ROTINA APDL PARA ANALISE TÉRMICA

```

FINI
/CLEAR,ALL,ALL
/FILNAM,THERM_FINAL ! SPECIFY JOBNAME /PREP7 ! ENTER
PREPROCESSOR
!=====
=====
! MATERIAL
!=====
=====
ET,1,70 ! element type 1 is solid70
ET,7,SURF152 !element type 7 is surf152 for convection
KEYOPT,7,4,1 ! Does not have midside nodes
KEYOPT,7,8,4 ! Evaluate hf at fluid bulk temperature, TB
ET,8,SURF152,,,1,1 !element type 8 is surf152 for radiation
KEYOPT,8,5,1 ! One extra node
KEYOPT,8,9,1 ! Use radiation with the form factor real
constant
MP,DENS,1,7850e-9 !Mass Density
R,8,1,5.67e-14 !Define constant for Form Factor and Stefan-
Boltzman Constant
MP,EMIS,1,0.45 !Grey Body emissivity
TOFFST,273 !Offset temperature for Celsius degree

MPTEMP,1,20,100,200,300,400,500 !Create Temperature
Table
MPTEMP,7,600,700,800,1000,1500

MPDATA,KXX,1,1,52e-3,51e-3,49e-3,46e-3,42e-3,38e-3 !Thermal
Conductivity MPDATA,KXX,1,7,35e-3,30e-3,28e-3,56e-3,78e-3

MPDATA,ENTH,1,1,1.10442,1.41371,1.81013,2.26618,2.67756,3.18781
!Enthalpy MPDATA,ENTH,1,7,3.75693,4.36531,5.07181,6.79881,12.00

MPDATA,C,1,1,499.0,500.0,510.0,550.0,600.0,700.0
!Specific Heat
MPDATA,C,1,7,750,800.0,1000.0,1200.0,1600.0

!=====
=====
! GEOMETRY
!=====
=====
! create keypoints

K,1,10.75
K,2,100
K,3,100,9.75
K,4,10.75,9.5

```

K,5,4.75,9.5
 K,6,4.75,15.5
 K,7,4.75,100
 K,14,-10.75
 K,13,-100
 K,12,-100,9.75
 K,11,-10.75,9.5
 K,10,-4.75,9.5
 K,9,-4.75,15.5
 K,8,-4.75,100
 K,15,4.75,0
 K,16,-4.75,0

! Create
Lines

L,1,2 !1
 L,2,3 !2
 L,3,4 !3
 L,4,5 !4
 L,5,6 !5
 L,6,7 !6
 L,7,8 !7
 L,8,9 !8
 L,9,10 !9
 L,10,11 !10
 L,11,12 !11
 L,12,13 !12
 L,13,14 !13
 L,5,10 !14
 L,6,4 !15
 L,11,9 !16
 L,15,16 !17
 L,14,16 !18
 L,15,1 !19
 L,11,14 !20
 L,1,4 !21
 L,10,16 !22
 L,5,15 !23
 L,9,6 !24

!line division
 LESIZE,1,,,8,16
 LESIZE,2,,,4,1/2
 LESIZE,3,,,8,1/16 LESIZE,4,,,4
 LESIZE,5,,,4
 LESIZE,6,,,8,16
 LESIZE,7,,,5,-1
 LESIZE,8,,,8,1/16
 LESIZE,9,,,4
 LESIZE,10,,,4

LESIZE,11,,,8,16
 LESIZE,12,,,4,2
 LESIZE,13,,,8,1/16
 LESIZE,14,,,5,-1
 LESIZE,15,,,4
 LESIZE,16,,,4
 LESIZE,17,,,5,-1
 LESIZE,18,,,4
 LESIZE,19,,,4
 LESIZE,20,,,4,2
 LESIZE,21,,,4,1/2
 LESIZE,22,,,4,2
 LESIZE,23,,,4,2
 LESIZE,24,,,5,-1

!create areas

AL,6,7,8,24 !1
 AL,1,2,3,21 !2
 AL,20,11,12,13 !3
 AL,22,20,10,18 !4
 AL,17,23,14,22 !5
 AL,19,21,4,23 !6
 AL,14,5,24,9 !7
 AL,5,15,4 !8
 AL,9,16,10 !9

!sweep areas to create

VOFFST,1,400 ! VOLUME 1 volume
 VOFFST,2,400 ! VOLUME 2
 VOFFST,3,-400 ! VOLUME 3
 VOFFST,4,-400 ! VOLUME 4
 VOFFST,5,-400 ! VOLUME 5
 VOFFST,6,400 ! VOLUME 6
 VOFFST,7,-400 ! VOLUME 7
 VOFFST,8,-400 ! VOLUME 8
 VOFFST,9,-400 ! VOLUME 9

VGLUE,ALL

! Glues all volumes

! Line division

LESIZE,29,,,200
 LESIZE,30,,,200
 LESIZE,31,,,200
 LESIZE,32,,,200
 LESIZE,37,,,200
 LESIZE,38,,,200
 LESIZE,39,,,200
 LESIZE,40,,,200
 LESIZE,45,,,200
 LESIZE,46,,,200
 LESIZE,47,,,200
 LESIZE,48,,,200

```

LESIZE,53,,200
LESIZE,54,,200
LESIZE,61,,200
LESIZE,64,,200

```

```

LESIZE,44,,8,1/16
LESIZE,42,,8,16
LESIZE,43,,4,1/2
LESIZE,36,,4,2
LESIZE,100,,5,-1
LESIZE,101,,5,-1

```

```

TYPE,1

```

```

VMESH,ALL ! Meshes all volumes

```

```

!=====

```

```

=====

```

```

! CONVECTION AND RADIATION

```

```

!=====

```

```

=====

```

```

ASEL,S,AREA,,1,13 !selects area to create convection
ASEL,A,AREA,,15 element
ASEL,A,AREA,,17,18
ASEL,A,AREA,,20
ASEL,A,AREA,,23
ASEL,A,AREA,,25
ASEL,A,AREA,,30
ASEL,A,AREA,,35
ASEL,A,AREA,,40
ASEL,A,AREA,,45
ASEL,A,AREA,,47
ASEL,A,AREA,,49
ASEL,A,AREA,,52

```

```

TYPE,7

```

```

! Switches on element type 7

```

```

ESURF

```

```

! Creates SURF152 convective element

```

```

ESEL,S,TYPE,,7

```

```

! Selects all convective element

```

```

NSLE,S,ALL

```

```

! Selects nodes belonging to selected
elements

```

```

SF,ALL,CONV,10e-6,30

```

```

!Applies convective flux

```

```

!create radiation element

```

```

NSEL,S,LOC,X,4.75,10.75

```

```

! Selects nodes on the right fillet
surface

```

```

NSEL,R,LOC,Y,9.50,15.50

```

```

NSEL,R,LOC,Z,1,399

```

```

ESLN,S

```

```

! Selects elements belonging to nodes

```

```

TYPE,8

```

```

! Switches to element type 8

```

```

REAL,8

```

```

! Switch to constant set 8

```

```

ESURF

```

```

! Creates SURF152 radiation element

```

```

N,60000,707.1068,707.1068,200

```

```

!extra "space" node n.1 for radiation

```

```

ESURF,60000                                ! Defines radiation node

NSEL,S,LOC,X,-4.75,-10.75                  ! Selects nodes on the left fillet surface
NSEL,R,LOC,Y,9.50,15.50
NSEL,R,LOC,Z,1,399
ESLN,S                                      ! Selects elements belonging to nodes
TYPE,8                                      ! Switches to element type 8
REAL,8                                      ! Switch to constant set 8
ESURF                                       ! Creates SURF152 radiation element
N,60001,-                                  !extra "space" node n.2 for radiation
707.1068,707.1068,200
ESURF,60001                                ! Defines radiation node
ESEL,S,TYPE,,8                             !Selects all SURF152 elements
EKILL,ALL                                   !Deactivate all SURF152 elements
ALLSEL,ALL                                  ! Selects everything SAVE
FINISH                                      !exit preprocessor
!=====
=====
!           ENTERING           SOLUTION           OPTION
!=====
=====
tamb=30                                     ! Setting room temperature
/SOLU                                       ! Entering solution phase
ANTYPE,TRAN,NEW                             ! Starts a new transient analysis
NROPT,AUTO                                  ! sets Newton Raphson procedure to
                                           auto
                                           ! mode (program chooses FULL,
                                           MODI,...)
EQSLV,SPARSE                                ! Specifies the type of equation solver
                                           to
                                           ! sparse direct.
D,60000,TEMP,tamb                           !Define radiation Bulk temperature
D,60001,TEMP,tamb                           !Define radiation Bulk temperature
TUNIF,tamb                                  ! Assigns uniform room temperature to
                                           all
                                           ! nodes
TIMINT,ON,THER                              ! Turns on transient effect, applied to
                                           ! thermal node
TINTP,,,,1.0                                ! Define transient integration
                                           ! parameters. First order transient
                                           !(thermal tr.) parameter theta.
ESEL,S,TYPE,,1                              ! Selects all element type 1
NSLE,ALL                                     ! Selects nodes belonging to selected
                                           elements
IC,ALL,TEMP,tamb                            ! Defines initial temperature for all
                                           nodes

!-----
! Heat source variables and constants
!-----

```

```

*DIM,xnod,ARRAY,3      ! Defines array parameters for
                        ! the
                        ! position of node location in the
                        ! local
                        ! coordinate system
*DIM,elip,ARRAY,4      ! Defines array parameter for the
                        ! ellipse
                        ! dimensions
*DIM,coef,ARRAY,2      ! Defines array parameter for the
                        ! coefficient of power source

!-----
! Optional parameters of Goldak's model
!-----
VZ = 3.06              ! Velocity of heat source in Z direction (mm/s) effec = 0.85
                        ! Efficiency of heat source
Q=20*140*effect        ! Heat input

!-----
! In the custom local coordinate system
!-----
elip(1)= 4.5000        ! Dimension of source in the X direction
elip(2)= 4.5000        ! Dimension of source in the Y direction
elip(3)= 3.0000        ! Dimension of source in the Z direction
                        ! (in front of the source)
elip(4)= 8.500         ! Dimension of the source in the Z direction
                        ! (behind the source)
coef(1)= 0.5000        ! Heat source efficiency in fornt of the
                        ! source
coef(2)= 1.5000        ! Heat source efficiency behind the
                        ! source

!-----
! Initial position of heat source
!-----
XSS= 6.75              ! Initial position in global cartesian
                        ! coordinate system - X direction
YSS= 11.50             ! Initial position in global cartesian
                        ! coordinate system - y direction
ZSS= 6                  ! Initial position in global cartesian
                        ! coordinate system - Z direction

!-----
!Time
!-----
tini=0.00              ! Initial Time
tdel=1.00              ! Time increment

!-----
! Configure Solution option fot the actual time
!-----
KBC,1                  !Load is stepped up at the first substep
                        !of the actual load step (same values for
                        !for all substeps)

```

```

AUTOTS,OFF                !Turning off automatic time stepping
NSUB,1                    !Specifies number of substeps used for the
                           !actual time step
NEQI,100                  !Specifies maximum number of equilibrium
                           !iterations allowed to each substep 25
CNVTOL,TEMP,1.0,0.1,2    !Sets convergence valueS, temperature
                           !tolerance will be 0.1 - 10% and uses L2 norm
CNVTOL,HEAT,1.0,0.1,2    !Sets convergence valueS, heat flow
                           !tolerance will be 0.1 - 10% and uses L2 norm
OUTRES,ALL,ALL,          !None of the soluiton items will be written
                           !to the database during solution
OUTRES,NSOL,ALL          !All the nodal DOF solution will be written
                           !to the database (only those)

!=====
=====
!           LOOP OVER THE TIME FOR THE FIRST FILLET
!=====
===== cycl=129                !Overall First fillet cycles
*DO,i,1,cycl,1              !DO loop from 1 up to 129 an increment of 1
BFDELE,ALL,HGEN            !Deletes all nodal heat generation loads
!-----
! Heat source position at time t
!-----
tact=tini+i*tidel          ! calculating actual time
!-----
! Position of the heat source in the global coordinate system
!-----
DXC = XSS                  ! Position of HS in the GCS - X axis
DYC = YSS                  ! Position of HS in the GCS - Y axis
DZC = VZ*tact+ZSS          ! Position of HS in the GCS - Z axis
!-----
! Selection of nodes within the ellipsoid at time t
!-----
*DO,j,1,2
!-----
! Local ellipsoidal coordinate system of the heat source
!-----
LOCAL,11,2,DXC,DYC,DZC,45.,0.,0.,
elip(2)/elip(1),elip(2+j)/elip(1) !Defines local coordinate system by location and
orientation.
NSEL,S,LOC,X,0,elip(1)     !Selects all nodes within the ellipsoid

!-----
! local cartesian coordinate system of heat source
!-----
LOCAL,11,0,DXC,DYC,DZC,45.,    !Redefining coordinate to cartesian
NSEL,R,LOC,Z,0,(-(-1.**J)*elip(2+J) !cutting of one or the other half
!of the selection
*GET,nnum,NODE,,COUN        !Retrieves and stores number of node
!in the selected set in variable

```



```

                                !"nnum"
*IF, nnum, NE, 0, THEN          !Prevents "No *DO trips needed"
                                !message in case there no nodes
!-----
!Cycle to define heat generation loads on each node
!within the subselection
!-----
*DO, k, 1, nnum                !Starts a cycle from 1 to the
                                !number of nodes selected
*GET, nod, NODE, , NUM, MIN    !Retrieves and store actual
                                !minimal node number in the
                                !selected set, into variable "nod"
!-----
!Coordinate of node in the local coordinate system
!(NX, NY, NZ is a *get function)
!-----
xnod(1)=NX(nod)                !Storing X coordinate of node in
                                !local CS, in the xnod() array
xnod(2)=NY(nod)                !Storing Y coordinate of node in
                                !local CS, in the xnod() array
xnod(3)=NZ(nod)                !Storing Z coordinate of node in
                                !local CS, in the xnod() array
!-----
!Calculation of the coefficient from Goldak's model
!-----
f=1.866324119*coef(j)
f=f*EXP(-3.0*xnod(1)*xnod(1)/elip(1)/elip(1))/elip(1)
f=f*EXP(-3.0*xnod(2)*xnod(2)/elip(2)/elip(2))/elip(2)
f=f*EXP(-3.0*xnod(3)*xnod(3)/elip(2+j)/elip(2+j))/elip(2+j)
!-----
!Applying nodal heat generation
!-----
BF, nod, HGEN, Q*f            !Applies heat generation load to
                                !the actual node, heat input
                                !modified by Goldak's factor
NSEL, U, NODE, , nod         !Removes the actual (minimal
                                !number) of node from the
                                !selection, cycle starts overLE,
*ENDDO                       !Cycle end, all nodes in one half
                                !of the ellipsoid at time t have
                                !defined heat generation loads
*ENDIF                       !Ends if conditional meant to
                                !prevent "No *DO trips needed
                                !warning
ALLS                          !Reselecting nodes, allows to
                                !select other half of the ellips
*ENDDO                       !Cycles ends, nodes have defined
                                !heat generation in front of and
                                !behind the sourceCSYS, 0
TIME, tact                   !Setting the time at the end of load step

```

```

CSYS,0                                !Set global Cartesian coordinate
  ESEL,S,CENT,Z,DZC-elip(4),DZC+elip(3) !Selects elements within ellipse along Z
  ESEL,R,CENT,X,4.75,10.75             !Selects elements within ellipse along X
  ESEL,R,TYPE,,8                       !Selects SURF152 elements
  EALIVE,ALL                            !Active SURF152 elements
ALLS                                   ! Reselecting nodes allowing selection
                                       !in next time t

SOLV                                  ! Solving for the actual time t
BFDELE,ALL,HGEN                       !Deletes all nodal heat generation loads
*ENDDO                                  ! End of first fillet welding
SAVE

!=====
=====
!           COOLING INTERMEDIATE PHASE
!=====
===== cycl=307                        !Overall cooling cycles
*DO,ii,1,cycl,1                        !DO loop from 1 up to 307 an increment of 1
  NSEL,ALL                              ! Selects all nodes
  BF,nod,HGEN,0                          ! Applies zero heat input
  tact1=tact+ii*tdel                     ! Calculating Time
  TIME,tact1                             !Setting the time at the end of load step
  ALLS                                  ! Selects everything
  SOLV                                  ! Solving for the actual time t
  BFDELE,ALL,HGEN                       !Deletes all nodal heat generation loads
*ENDDO                                  ! End of cooling phase
SAVE

!=====
=====
!LOOP OVER THE TIME FOR THE SECOND FILLET
!=====
===== cycl=129                        !Overall second fillet cycles
*DO,iii,1,cycl,1                       !DO loop from 1 up to 129 an increment of 1
!-----
! Initial position of heat source
!-----
XSS= -6.75                             ! Initial position in global Cartesian
                                       ! coordinate system - X direction
YSS= 11.50                             ! Initial position in global Cartesian
                                       ! coordinate system - y direction
ZSS= 6                                  ! Initial position in global Cartesian
                                       ! coordinate system - Z direction !-----
!-----
BFDELE,ALL,HGEN                        !Deletes all nodal heat generation loads
!=====
=====
! Heat source position at time t
!=====
===== tact2=tact1+iii*tdel           ! Calculating actual time
!-----
! Position of the heat source in the global coordinate system

```

```

!-----
DXC = XSS           ! Position of HS in the GCS - X axis
DYC = YSS           ! Position of HS in the GCS - Y axis
DZC = VZ*(tact2-tact1)+ZSS  ! Position of HS in the GCS - X axis
!=====
=====
! Selection of nodes within the ellipsoid at time t
!=====
=====
*DO,j,1,2
!-----
! Local ellipsoidal coordinate system of the heat source
!-----
LOCAL,11,2,DXC,DYC,DZC,-45.,0.,0.,
  elip(2)/elip(1),elip(2+j)/elip(1)  ! Defines local coordinate system by location and
orientation.
  NSEL,S,LOC,X,0,elip(1)             !Selects all nodes within the ellipsoid
!-----
! Local Cartesian coordinate system of heat source
!-----
LOCAL,11,0,DXC,DYC,DZC,-45.,      !Redefining coordinate to Cartesian
NSEL,R,LOC,Z,0,(-(-1.)**J)*elip(2+J)  !cutting of one or the other half
                                         !of the selection
*GET,nnum,NODE,,COUN                !Retrieves and stores number of node
                                         !in the selected set in variable
                                         !"nnum"
*IF,nnum,NE,0,THEN                  !Prevents "No *DO trips needed"
                                         !message in case there no nodes
!=====
=====
! Cycle to define heat generation loads on each node
!within the sub selection
!=====
=====
*DO,k,1,nnum                        !Starts a cycle from 1 to the
                                         !number of nodes selected
*GET,nod,NODE,,NUM,MIN              !Retrieves and store actual
                                         !minimal node number in the
                                         !selected set, into variable "nod"
!-----
!Coordinate of node in the local coordinate system
!(NX,NY,NZ is a *get function)
!-----
xnod(1)=NX(nod)                     !Storing X coordinate of node in
                                         !local CS, in the xnod() array
xnod(2)=NY(nod)                     !Storing Y coordinate of node in
                                         !local CS, in the xnod() array
xnod(3)=NZ(nod)                     !Storing Z coordinate of node in
                                         !local CS, in the xnod() array
!-----

```

```

!Calculation of the coefficient from Goldak's model
!-----
f=1.866324119*coef(j)
f=f*EXP(-3.0*xnod(1)*xnod(1)/elip(1)/elip(1))/elip(1)
f=f*EXP(-3.0*xnod(2)*xnod(2)/elip(2)/elip(2))/elip(2)
f=f*EXP(-3.0*xnod(3)*xnod(3)/elip(2+j)/elip(2+j))/elip(2+j)
!-----
! Applying nodal heat generation
!-----
BF,nod,HGEN,Q*f           !Applies heat generation load to
                          !the actual node, heat input
                          !modified by Goldak's factor
NSEL,U,NODE,,nod         !Removes the actual (minimal
                          !number) of node from the
                          !selection, cycle starts over,
*ENDDO                   !Cycle end, all nodes in one half
                          !of the ellipsoid at time t have
                          !defined heat generation loads
*ENDIF                   !Ends if conditional meant to
                          !prevent "No *DO trips needed
                          !warning
NSEL,ALL                 !Reselecting nodes, allows to
                          !select other half of the ellipse
ESEL,ALL                 ! Selects all elements
*ENDDO                   ! Cycles ends, nodes have defined
                          !heat generation in front of and
                          !behind the source
TIME,tact2               !Setting the time at the end of load step
CSYS,0                   !Set global Cartesian coordinate
  ESEL,S,CENT,Z,DZC-elip(4),DZC+elip(3) !Selects elements within ellipse along
Z
  ESEL,R,CENT,X,-4.75,-10.75           !Selects elements within ellipse along
X
  ESEL,R,TYPE,,8                       !Selects SURF152 elements
  EALIVE,ALL                            !Active SURF152 elements
ALLS                                     ! Reselecting nodes allowing selection
                                          !in next time t
SOLV                                     ! Solving for the actual time t
BFDELE,ALL,HGEN                         !Deletes all nodal heat generation loads
*ENDDO                                   ! End of Second fillet welding SAVE
!=====
=====                               FINAL COOLING PHASE
!=====
===== cycl=150                       !Overall cooling cycles
*DO,iv,1,cycl,1                         !DO loop from 1 up to 150 an increment of 1
NSEL,ALL                                  ! Selects all nodes
BF,nod,HGEN,0                            ! Assign zero heat input
tact3=tact2+iv*tdel                      ! Calculating actual time
TIME,tact3                                !Setting the time at the end of load step
ALLS                                      ! Selects all

```


8. ANEXO II – ROTINA APDL PARA ANALISE ESTRUTURAL

```

FINI
/CLEAR,ALL,ALL
/FILNAM,STRUCT_FINAL ! SPECIFY JOBNAME
/PREP7          ! ENTER PREPROCESSOR
!=====
=====
!           MATERIAL
!=====
=====
ET,1,185                                !Element SOLID185

MPTEMP,1,20,100,200,300,400,500        !Create   Temperature
Table
MPTEMP,7,600,700

TB,MISO,1,8,2                            !Define Constitutive Model

MPDATA,EX,1,1,210e3,200e3,190e3,180e3,170e3,138e3 !Elasticity   Modul
MPDATA,EX,1,7,80e3,10e3

MPDATA,PRXY,1,1,0.3,0.3,0.3,0.3,0.3,0.3    !Poisson Modul
MPDATA,PRXY,1,7,0.3,0.3

MPDATA,ALPX,1,1,1.1e-5,1.150e-5,1.200e-5,1.251e-5,1.320e-5,1.355e-5
!Thermal expansion coefficient
MPDATA,ALPX,1,7,1.455e-5,1.480e-5

TBTEMP,20                                !Define Stress (Von Mises) - Total strain
curve
TBPT,,0.00119047,250
TBPT,,2.123E-2,266                        !T=20°C
TBTEMP,100
TBPT,,0.00115000,230
TBPT,,2.12E-2,245                          !T=100°C
TBTEMP,200
TBPT,,0.00115789,220
TBPT,,2.12E-2,234                          !T=200°C
TBTEMP,300
TBPT,,0.00111111,200
TBPT,,2.11E-2,214                          !T=300°C
TBTEMP,400
TBPT,,0.00105882,180
TBPT,,2.11E-2,180                          !T=400°C
TBTEMP,500
TBPT,,0.00112318,155

```

```

TBPT,,2.11E-2,165          !T=500°C
TBTEMP,600
TBPT,,0.00137500,110
TBPT,,2.14E-2,116        !T=600°C
TBTEMP,700
TBPT,,3E-3,30
TBPT,,2.303E-2,31        !T=700°C

```

```

!=====
=====
!
!                                GEOMETRY
!=====
=====
! create keypoints

K,1,10.75
K,2,100
K,3,100,9.75
K,4,10.75,9.5
K,5,4.75,9.5
K,6,4.75,15.5
K,7,4.75,100
K,14,-10.75
K,13,-100
K,12,-100,9.75
K,11,-10.75,9.5
K,10,-4.75,9.5
K,9,-4.75,15.5
K,8,-4.75,100
K,15,4.75,0
K,16,-4.75,0

!create lines

L,1,2          !1
L,2,3          !2
L,3,4          !3
L,4,5          !4
L,5,6          !5
L,6,7          !6
L,7,8          !7
L,8,9          !8
L,9,10         !9
L,10,11        !10
L,11,12        !11
L,12,13        !12
L,13,14        !13
L,5,10         !14
L,6,4          !15
L,11,9         !16
L,15,16        !17

```

```

L,14,16      !18
L,15,1       !19
L,11,14     !20
L,1,4       !21
L,10,16     !22
L,5,15      !23
L,9,6       !24

```

```

!line
division

```

```

LESIZE,1,,,8,16
LESIZE,2,,,4,1/2
LESIZE,3,,,8,1/16
LESIZE,4,,,4
LESIZE,5,,,4
LESIZE,6,,,8,16
LESIZE,7,,,5,-1
LESIZE,8,,,8,1/16
LESIZE,9,,,4
LESIZE,10,,,4
LESIZE,11,,,8,16
LESIZE,12,,,4,2
LESIZE,13,,,8,1/16
LESIZE,14,,,5,-1
LESIZE,15,,,4
LESIZE,16,,,4
LESIZE,17,,,5,-1
LESIZE,18,,,4
LESIZE,19,,,4
LESIZE,20,,,4,2
LESIZE,21,,,4,1/2
LESIZE,22,,,4,2
LESIZE,23,,,4,2
LESIZE,24,,,5,-1

```

```

!create areas

```

```

AL,6,7,8,24  !1
AL,1,2,3,21  !2
AL,20,11,12,13 !3
AL,22,20,10,18 !4
AL,17,23,14,22 !5
AL,19,21,4,23 !6
AL,14,5,24,9  !7
AL,5,15,4     !8
AL,9,16,10    !9

```



```

                                !sweep areas to create
VOFFST,1,400    ! VOLUME 1 volume
VOFFST,2,400    ! VOLUME 2
VOFFST,3,-400   ! VOLUME 3
VOFFST,4,-400   ! VOLUME 4
VOFFST,5,-400   ! VOLUME 5
VOFFST,6,400    ! VOLUME 6
VOFFST,7,-400   ! VOLUME 7
VOFFST,8,-400   ! VOLUME 8
VOFFST,9,-400   ! VOLUME 9

VGLUE,ALL                                ! Glues the volumes
                                           !line division

LESIZE,29,,,200
LESIZE,30,,,200
LESIZE,31,,,200
LESIZE,32,,,200
LESIZE,37,,,200
LESIZE,38,,,200
LESIZE,39,,,200
LESIZE,40,,,200
LESIZE,45,,,200
LESIZE,46,,,200
LESIZE,47,,,200
LESIZE,48,,,200
LESIZE,53,,,200
LESIZE,54,,,200
LESIZE,61,,,200
LESIZE,64,,,200

LESIZE,44,,,8,1/16
LESIZE,42,,,8,16
LESIZE,43,,,4,1/2
LESIZE,36,,,4,2
LESIZE,100,,,5,-1
LESIZE,101,,,5,-1

TYPE,1                                ! Switch to element solid185
VMESH,ALL                              ! Meshes all volumes

!=====
=====
!           BOUNDARY CONDITION
!=====
=====
NSEL,S,LOC,Y,0                          !axial line constraints all dof=0
NSEL,R,LOC,X,-1,1
D,ALL,ALL,

```

```

NSEL,S,LOC,Y,0                !point a constraints z=0
NSEL,R,LOC,X,-100
NSEL,R,LOC,Z,400
D,ALL,UZ,0

```

```

NSEL,S,LOC,Y,0                !point b constraints z=0
NSEL,R,LOC,X,100
NSEL,R,LOC,Z,400
D,ALL,UZ,0

```

```

!=====
=====

```

```

!           DESACTIVATION OF FILLET ELEMENTS
!=====
=====

```

```

VSEL,S,VOLU,,10,11           !Selects volumes of elements to be
deactivated
ESLV,S                       !Selects elements to be deactivated
EKILL,ALL                     !Deactivates selected elements
NSLE,S                        !Selects all inactive nodes
D,ALL,ALL                     !Constraints all inactive nodes
FINISH
SAVE

```

```

!=====
=====

```

```

!           START SOLUTION
!=====
=====

```

```

===== /SOLU
ANTYPE,0                     ! Static solution
SOLCONTROL,OFF
KBC,0                         !Load is stepped up at the first
                               sub step
                               !of the actual load step (same
                               values for
                               !for all sub steps)
NROPT,FULL                    ! sets Newton Raphson procedure
                               to auto
                               ! mode (program chooses FULL,
                               MODI,...)
EQSLV,SPARSE                  ! Specifies the type of equation
                               solver to
                               ! sparse direct.
AUTOTS,OFF                    !Turning off automatic time
                               stepping
NSUB,2                         !Specifies number of sub steps
                               used for the
                               !actual time step
NEQI,25                        !Specifies maximum number of
                               equilibrium

```

```

                                iterations allowed to each sub
                                step 25
CNVTOL,U,1.0,0.1,2           !Sets convergence values,
                                Displacements
                                !tolerance will be 0.1 - 10% and
                                uses L2 norm
CNVTOL,F,1.0,0.1,2           !Sets convergence values, Forces
                                !tolerance will be 0.1 - 10% and
                                uses L2 norm
OUTRES,ALL,ALL                !None of the solution items will be
                                written
                                !to the database during solution
OUTRES,NSOL,ALL               !All the nodal DOF solution will be
                                written
                                !to the database (only those)
CUTCONTROL,PLSLIMIT,0.5      !Plastic strain increment
NLGEOM,ON                     !Allow large deformation
ALLSEL,                        ! Selects everything
TREF,30                        !Defines reference temperature
=====
=====
!                               START WELDING PROCESS
=====
=====
!-----
! Optional parameters of Goldak's Ellipse
!-----
VZ = 3.06                      ! Velocity of heat source in Z direction (mm/s)
elipz= 3.0000                  ! Dimension of weld pool in the Z direction
                                ! (in front of the source)
!-----
! Initial Z position of heat source
!-----
ZSS=6                          ! Initial position in global cartesian
                                ! coordinate system - Z direction
!-----
!Time
!-----
tini=0.00 ! Initial Time
tdel=1.00                               !Time                increment
=====
=====
!                               LOOP OVER THE TIME FOR THE FIRST FILLET
=====
===== cycl=129                !Overall First fillet cycles
*DO,i,1,cycl,1                    !DO loop from 1 up to 129 an increment of 1
!-----
! Heat source position at time t
!-----
tact=tini+i*tdel                  ! calculating actual time

```

```

!-----
! Position of the heat source in the global coordinate system
!-----
DZC = VZ*tact+ZSS          ! Position of HS in the GCS - Z axis
DZ=DZC+elipz              ! Z max coordinate of elements to be activated
!-----
! Selection of elements in the fillet volume to be activated at time t
!-----
ALLS                      ! Selects everything
BFDELE,ALL,TEMP          !Delete nodal load of all nodes
TIME,tact                 ! Defines time at the end of load step
LDREAD,TEMP,tact,1,,,'THERM_FINAL','rth', !Reads the tactth thermal load
VSEL,S,VOLU,,10          !Selects volume of first fillet
ESLV,S,                   !Selects elements attached to the volume
                          !Selects elements simulating the weld pool

ESEL,R,CENT,Z,0,DZ
EALIVE,ALL                !Actives selected elements
NSLE,S                   !Selects nodes of active elements
DDELE,ALL,ALL            !Delete constraint of active nodes
ESEL,S,LIVE              !Selects all active elements
NSLE,S,1                 !Selects node attached to active elements
NSEL,INVE                !Selects nodes of inactive elements
BFDELE,ALL,TEMP          !Deletes nodal load of inactive nodes
ALLS                      !Selects everything
SOLVE                    ! Solve at actual time
*ENDDO                    ! End of the first fillet cycle
SAVE
!=====
=====
!                LOOP OVER THE TIME FOR THE INTERMEDIATE COOLING
PHASE
!=====
=====
cycl=307                  !Overall intermediate cooling phase
*DO,ii,1,cycl,           !DO loop from 1 up to 307 an increment of 1
!-----
tact1=tact+ii*tdef      !Calculating actual time
ALLS                      !Selects everything
BFDELE,ALL,TEMP          !Deletes nodal load of all nodes
TIME,tact1              ! Defines time at the end of load
step
LDREAD,TEMP,tact1,1,,,'THERM_FINAL','rth', !Read the tact1th thermal load
ALLS                      !Selects everything
SOLVE                    ! Solve at actual time
*ENDDO                    ! End of the intermediate cooling phase
SAVE
!=====
=====

```

```

! LOOP OVER THE TIME FOR THE SECOND FILLET
!=====
=====
NSUB,3                                !Specifies number of sub steps used
      tact1=436                        !actual time step
      cycl=129                         !Overall Second fillet cycles
*DO,iii,1,cycl,1                      !DO loop from 1 up to 129 an increment of 1
!-----
! Heat source position at time t
!-----
      tact2=tact1+iii*tdel             ! calculating actual time
!-----
! Position of the heat source in the global coordinate system
!-----
      DZC =VZ*(tact2-tact1)+ZSS        ! Position of HS in the GCS - Z axis
      DZ=DZC+elipz                    ! Z max coordinate of nodes to be activated
!-----
! Selection of elements in the fillet volume to be activated at time t
!-----
      ALLS                             ! Selects everything
      BFDELE,ALL,TEMP                 !Delete nodal load of all nodes
      TIME,tact2                       ! Defines time at the end of the load
step
      LDREAD,TEMP,tact2,1,,,'THERM_FINAL','rth', !Read the tact2th thermal load
      VSEL,S,VOLU,,11                 !Selects volume of first fillet
      ESLV,S,                          !Selects elements attached to the volume
                                       !Selects elements simulating the weld pool

      ESEL,R,CENT,Z,0,DZ
      EALIVE,ALL                       !Actives selected elements
      NSLE,S                           !Selects nodes of active elements
      DDELE,ALL,ALL                   !Delete constraint of active nodes
      ESEL,S,LIVE                     !Selects all active elements
      NSLE,S,1                        !Selects node attached to active elements
      NSEL,INVE                       !Selects nodes of inactive elements
      BFDELE,ALL,TEMP                 !Delete nodal load of inactive nodes
      ALLS                             !Selects everything
      SOLVE                            ! Solve at actual time
      *ENDDO                          ! End of the second fillet cycle
SAVE
!=====
=====
! LOOP OVER THE TIME FOR THE FINAL COOLING PHASE
!=====
===== cycl=150                       !Overall intermediate cooling
phase
*DO,iv,1,cycl,                        !DO loop from 1 up to 150 an
increment of 1
!-----
      tact3=tact2+iv*tdel             ! calculating actual time
      ALLS                             ! Selects everything

```

```
BFDELE,ALL,TEMP           !Delete nodal load of all nodes
TIME,tact                 ! Defines time at the end of the load step
LDREAD,TEMP,tact3,1,,,'THERM_FINAL','rth',  !Read the tact3th thermal load
ALLS                       !Selects everything
SOLVE                     ! Solve at actual time
*ENDDO                    ! end of final cooling phase
SAVE FINISH
```

9. ANEXO III – ROTINA APDL PARA ANALISE ELÁSTICA LINEAR

```

FINI
/CLEAR,ALL,ALL
/FILNAM,VOL_MET4 ! SPECIFY JOBNAME
/PREP7           ! ENTER PREPROCESSOR
!=====
=====
!             MATERIAL
!=====
=====
ET,1,185                                !Element SOLID185
MP,EX,1,210e3,                            !Elasticity Module
MP,PRXY,1,0.3                              ! Poisson Coefficient
MP,ALPX,1,1.3e-5                           ! Expansion Coefficient
!=====
=====
!                               GEOMETRY
!=====
=====
                                ! CREATE KEYPOINTS

K,1,10.75
K,2,100
K,3,100,9.75
K,4,10.75,9.5
K,5,4.75,9.5
K,6,4.75,15.5
K,7,4.75,100
K,14,-10.75
K,13,-100
K,12,-100,9.75
K,11,-10.75,9.5
K,10,-4.75,9.5
K,9,-4.75,15.5
K,8,-4.75,100
K,15,4.75,0
K,16,-4.75,0

!create lines
L,1,2           !1
L,2,3           !2
L,3,4           !3
L,4,5           !4
L,5,6           !5
L,6,7           !6
L,7,8           !7
L,8,9           !8
L,9,10          !9

```

L,10,11		!10
L,11,12		!11
L,12,13		!12
L,13,14		!13
L,5,10	!14	
L,6,4	!15	
L,11,9	!16	
L,15,16		!17
L,14,16		!18
L,15,1	!19	
L,11,14		!20
L,1,4	!21	
L,10,16		!22
L,5,15	!23	
L,9,6	!24	

!LINE DIVISION

LESIZE,1,,,8,16
 LESIZE,2,,,4,1/2
 LESIZE,3,,,8,1/16
 LESIZE,4,,,4
 LESIZE,5,,,4
 LESIZE,6,,,8,16
 LESIZE,7,,,5,-1
 LESIZE,8,,,8,1/16
 LESIZE,9,,,4
 LESIZE,10,,,4
 LESIZE,11,,,8,16
 LESIZE,12,,,4,2
 LESIZE,13,,,8,1/16
 LESIZE,14,,,5,-1
 LESIZE,15,,,4
 LESIZE,16,,,4
 LESIZE,17,,,5,-1
 LESIZE,18,,,4
 LESIZE,19,,,4
 LESIZE,20,,,4,2
 LESIZE,21,,,4,1/2
 LESIZE,22,,,4,2
 LESIZE,23,,,4,2
 LESIZE,24,,,5,-1

! CREATE AREAS

AL,6,7,8,24	!1
AL,1,2,3,21	!2
AL,20,11,12,13	!3
AL,22,20,10,18	!4
AL,17,23,14,22	!5


```

AL,19,21,4,23    !6
AL,14,5,24,9     !7
  AL,5,15,4      !8
AL,9,16,10      !9

```

! SWEEP AREAS TO CREATE VOLUME

```

VOFFST,1,400    ! VOLUME 1
VOFFST,2,400    ! VOLUME 2
  VOFFST,3,-400 ! VOLUME 3
VOFFST,4,-400  ! VOLUME 4
VOFFST,5,-400  ! VOLUME 5
VOFFST,6,400   ! VOLUME 6
VOFFST,7,-400  ! VOLUME 7
VOFFST,8,-400  ! VOLUME 8
VOFFST,9,-400  ! VOLUME 9

```

```

VGLUE,ALL      ! Glues all volumes

```

!LINE DIVISION

```

LESIZE,29,,,200
LESIZE,30,,,200
LESIZE,31,,,200
LESIZE,32,,,200
LESIZE,37,,,200
LESIZE,38,,,200
LESIZE,39,,,200
LESIZE,40,,,200
LESIZE,45,,,200
LESIZE,46,,,200
LESIZE,47,,,200
LESIZE,48,,,200
LESIZE,53,,,200
LESIZE,54,,,200
LESIZE,61,,,200
LESIZE,64,,,200

```

```

LESIZE,44,,,8,1/16

```

```

LESIZE,42,,,8,16
LESIZE,43,,,4,1/2
LESIZE,36,,,4,2
LESIZE,100,,,5,-1
LESIZE,101,,,5,-1

```

```

TYPE,1          ! Sets element type 1
VMESH,ALL      ! Mesh all selected volumes

```

```

!=====
=====
!          BOUNDARY CONDITION

```



```

DDELE,ALL,ALL                                !Constraints all inactive nodes

!-----
! Selection of nodes in the first quarter of first fillet volume to be loaded with thermal
load
!-----

NSEL,S,LOC,Z,0,100
NSEL,R,LOC,X,2,11
NSEL,R,LOC,Y,7,15
BF,ALL,TEMP,-1000                                !Thermal nodal load
ALLS                                             !Selects everything
SOLVE
SAVE

!=====
=====
!           ACTIVATION OF FIRST QUARTER OF SECOND FILLET
ELEMENTS
!=====
=====
VSEL,S,VOLU,,11                                !Selects volumes of elements to be deactivated
ESLV,S                                         !Selects elements to be deactivated
ESEL,R,CENT,Z,0,100                            !Selects elements along Z
EALIVE,ALL                                     !Deactivates selected elements
NSLE,S                                         !Selects all inactive nodes
DDELE,ALL,ALL                                  !Constraints all inactive nodes

!-----
! Selection of nodes in first quarter of second fillet volume to be loaded with thermal
load
!-----

NSEL,S,LOC,Z,0,100
NSEL,R,LOC,X,-2,-11
NSEL,R,LOC,Y,7,15                                !Selects nodes of second fillet
BF,ALL,TEMP,-900                                !Thermal nodal load
ALLS                                             !Selects everything
SOLVE
SAVE

!=====
=====
!           ACTIVATION OF SECOND QUARTER FIRST FILLET ELEMENTS
!=====
=====
VSEL,S,VOLU,,10                                !Selects volumes of elements to be deactivated

```

```

ESLV,S                                !Selects elements to be deactivated
ESEL,R,CENT,Z,101,200                !Selects elements along Z
EALIVE,ALL                            !Deactivates selected elements
NSLE,S                                !Selects all inactive nodes
DDELE,ALL,ALL                        !Constraints all inactive nodes

```

```

!-----
----- ! Selection of nodes in the second quarter of first fillet volume to be loaded
with thermal load
!-----

```

```

-----
NSEL,S,LOC,Z,101,200
NSEL,R,LOC,X,2,11
NSEL,R,LOC,Y,7,15
BF,ALL,TEMP,-1000                    !Thermal nodal load
ALLS                                  !Selects everything
SOLVE
SAVE

```

```

!=====
=====
!           ACTIVATION OF SECOND QUARTER OF SECOND FILLET
ELEMENTS
!=====

```

```

=====
VSEL,S,VOLU,,11                      !Selects volumes of elements to be deactivated
ESLV,S                                !Selects elements to be deactivated
ESEL,R,CENT,Z,101,200                !Selects elements along Z
EALIVE,ALL                            !Deactivates selected elements
NSLE,S                                !Selects all inactive nodes
DDELE,ALL,ALL                        !Constraints all inactive nodes

```

```

!-----
----- ! Selection of nodes in the second quarter of second fillet volume to be
loaded with thermal !load
!-----

```

```

-----
NSEL,S,LOC,Z,101,200
NSEL,R,LOC,X,-2,-11
NSEL,R,LOC,Y,7,15                    !Selects nodes of second fillet
BF,ALL,TEMP,-900                    !Thermal nodal load
ALLS                                  !Selects everything
SOLVE
SAVE

```

```

!=====
=====
!           ACTIVATION OF THIRD QUARTER OF FIRST FILLET ELEMENTS
!=====
=====

```

```

VSEL,S,VOLU,,10           !Selects volumes of elements to be deactivated
ESLV,S                   !Selects elements to be deactivated
ESEL,R,CENT,Z,201,300    !Selects elements along Z
EALIVE,ALL               !Deactivates selected elements
NSLE,S                   !Selects all inactive nodes
DDELE,ALL,ALL           !Constraints all inactive nodes

```

```

!-----
! Selection of nodes in the third quarter of first fillet volume to be loaded with thermal
load
!-----

```

```

NSEL,S,LOC,Z,201,300
NSEL,R,LOC,X,2,11
NSEL,R,LOC,Y,7,15
BF,ALL,TEMP,-1000        !Thermal nodal load
ALLS                     !Selects everything
SOLVE
SAVE

```

```

!=====
=====
!           ACTIVATION OF THIRD QUARTER OF SECOND FILLET
ELEMENTS
!-----

```

```

VSEL,S,VOLU,,11           !Selects volumes of elements to be deactivated
ESLV,S                   !Selects elements to be deactivated
ESEL,R,CENT,Z,201,300    !Selects elements within ellipse along Z
EALIVE,ALL               !Deactivates selected elements
NSLE,S                   !Selects all inactive nodes
DDELE,ALL,ALL           !Constraints all inactive nodes

```

```

!-----
! Selection of nodes in third quarter of second fillet volume to be loaded with thermal
load
!-----

```

```

NSEL,S,LOC,Z,201,300
NSEL,R,LOC,X,-2,-11
NSEL,R,LOC,Y,7,15        !Selects nodes of second fillet
BF,ALL,TEMP,-900        !Thermal nodal load
ALLS                     !Selects everything
SOLVE
SAVE

```

```

!=====
=====
!           ACTIVATION OF FOURTH QUARTER FIRST FILLET ELEMENTS
!-----

```

```

VSEL,S,VOLU,,10           !Selects volumes of elements to be deactivated

```

```

ESLV,S                !Selects elements to be deactivated
ESEL,R,CENT,Z,301,400    !Selects elements along Z
EALIVE,ALL           !Deactivates selected elements
NSLE,S              !Selects all inactive nodes
DDELE,ALL,ALL       !Constraints all inactive nodes

```

```

!-----
! Selection of nodes in the second quarter of first fillet volume to be loaded with
thermal load
!-----

```

```

NSEL,S,LOC,Z,301,400
NSEL,R,LOC,X,2,11
NSEL,R,LOC,Y,7,15
BF,ALL,TEMP,-1000    !Thermal nodal load
ALLS                 !Selects everything
SOLVE
SAVE

```

```

!=====
=====

```

```

!           ACTIVATION OF FOURTH QUARTER OF SECOND FILLET
ELEMENTS

```

```

!=====
=====

```

```

VSEL,S,VOLU,,11      !Selects volumes of elements to be deactivated
ESLV,S                !Selects elements to be deactivated
ESEL,R,CENT,Z,301,400    !Selects elements along Z
EALIVE,ALL           !Deactivates selected elements
NSLE,S              !Selects all inactive nodes
DDELE,ALL,ALL       !Constraints all inactive nodes

```

```

!-----
! Selection of nodes in the fourth quarter of the second fillet volume to be loaded with
thermal load
!-----

```

```

NSEL,S,LOC,Z,301,400
NSEL,R,LOC,X,-2,-11
NSEL,R,LOC,Y,7,15    !Selects nodes of second fillet
BF,ALL,TEMP,-900    !Thermal nodal load
ALLS                 !Selects everything
SOLVE
SAVE

```

```

FINISH

```