



Roberto de Abreu Alvim

**Dimensionamento de Juntas Soldadas
Utilizando Soluções de Modelos de Placas
Obtidas por Elementos Finitos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Carlos Alberto de Almeida

**Rio de Janeiro
Setembro de 2005**



Roberto de Abreu Alvim

**Dimensionamento de Juntas Soldadas
Utilizando Soluções de Modelos de Placas
Obtidas por Elementos Finitos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Carlos Alberto de Almeida

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

CEFET/RJ

Roberto Santos Martins

Easy-CAE

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Setembro de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Roberto de Abreu Alvim

Graduou-se em Engenharia Mecânica no CEFET-RJ (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca) em 2001.

Ficha Catalográfica

Alvim, Roberto de Abreu

Dimensionamento de juntas soldadas utilizando soluções de modelos de placas obtidas por elementos finitos / Roberto de Abreu Alvim ; orientador: Carlos Alberto de Almeida. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.

128 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Juntas soldadas. 3. Elementos finitos. 4. Simulação numérica. 5. Modelos de placas finas. I. Almeida, Carlos Alberto de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais, Ennes e Maria Helena, pelo carinho, amor e dedicação.
Aos meus irmãos, Cristina e Renato, meus melhores amigos, pelo apoio e
paciência nos momentos mais difíceis.
A Rachel, pelo amor e, principalmente, pela amizade.

Agradecimentos

Ao Professor Carlos Alberto de Almeida pela dedicação e paciência na orientação.

À Roberto Martins e à EasyCAE pela sugestão do tema e suporte ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

À 2H Projetos Ltda., por ter estimulado e facilitado a realização deste curso.

Aos colegas da Pós-Graduação e da 2H, pela amizade e apoio.

Resumo

Alvim, Roberto de Abreu. **Dimensionamento de Juntas Soldadas Utilizando Soluções de Modelos de Placas Obtidas por Elementos Finitos**. Rio de Janeiro, 2005. 128p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento teórico e a implementação de uma metodologia proposta para o dimensionamento de juntas soldadas, baseada em soluções de modelos de placas obtidas por elementos finitos. A técnica consiste em, a partir da avaliação do estado de tensões nas proximidades da junta resultante da simulação numérica sob carregamentos reais, obter-se a dimensão requerida da seção transversal (seção da “garganta”) ao longo do comprimento do cordão de solda. No dimensionamento do cordão, consideram-se simplificações das distribuições das componentes de tensões ao longo da espessura da casca, inerentes aos modelos de cascas finas. Com o objetivo de testar-se a aplicabilidade da metodologia proposta em soluções numéricas apresenta-se, inicialmente, o dimensionamento de cordões de solda sob carregamentos simples – cisalhamento transversal, membrana e flexão - em que os resultados são verificados com os obtidos de modelos analíticos. Além destes, são também apresentadas soluções para estruturas complexas formadas por chapas soldadas, como exemplos de aplicação prática da implementação desenvolvida.

Palavras-chave

Juntas Soldadas; Elementos Finitos; Simulação Numérica; Modelos de Placas Finas

Abstract

Alvim, Roberto de Abreu. **Welded Joint Design Using Finite Element Solutions for Plate Models**. Rio de Janeiro, 2005. 128p. Msc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents theoretical and implementation procedures related to a proposal for the design of welded joints, based on finite element solutions for plate models. The technique consists on obtaining the required dimensions at the “throat section” of the weld, required to resist prescribed loads, based on stress component evaluations nearby the weld, along its length. In the calculations some simplifications on the stress component distributions along the plate thickness are considered, typical of thin walled plates. Evaluations of the proposed methodology are performed considering the weld design of plates under standard prescribed – transverse shear, membrane and bending loads – where the numerical results are verified against analytic results. Solutions for the design of plate welds in complex structures are also presented and discussed

Keywords

Welded Joints; Finite Elements; Numerical Simulations; Thin Plate Models

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS DE PLACA.....	20
2.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	21
2.2. FORMULAÇÃO DOS ELEMENTOS DE PLACA.....	25
3 DIMENSIONAMENTO CLÁSSICO DE CORDÕES DE SOLDA.....	30
3.1. PROCESSOS DE SOLDAGEM E TIPOS DE CORDÃO DE SOLDA.....	31
3.2. EFEITOS DOS FENÔMENOS METALÚRGICOS E TÉRMICOS NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO	33
3.3. RESISTÊNCIA DE SOLDAS DE TOPO	35
3.4. RESISTÊNCIA DE SOLDAS DE FILETE.....	36
3.5. CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE CORDÕES DE FILETE.....	39
3.6. MÉTODO BASEADO NO ESFORÇO TOTAL DA JUNTA	41
3.6.1. <i>Juntas submetidas a esforços normais</i>	42
3.6.2. <i>Juntas submetidas a esforços cisalhantes</i>	43
3.6.3. <i>Juntas submetidas a momentos fletores</i>	44
4 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DA SOLDA A PARTIR DO ESTADO DE TENSÕES NAS CHAPAS ADJACENTES	47
4.1. DIMENSIONAMENTO ATRAVÉS DAS TENSÕES NA CHAPA DE TOPO.....	48
4.1.1. <i>Tensões Atuantes na Chapa de Topo</i>	49
4.1.2. <i>Superposição dos Estados de Tensões e Dimensionamento do Cordão de Solda</i>	53
4.2. DIMENSIONAMENTO CONSIDERANDO AS TENSÕES NA CHAPA DE ABA	57
4.2.1. <i>Estado de Tensões nas Faces Adjacentes à Junta</i>	58
4.2.2. <i>Superposição dos Estados de Tensões e Dimensionamento do Cordão de Solda</i>	63
5 IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA	66
5.1. SISTEMA COORDENADO DE REFERÊNCIA.....	67
5.2. LEITURA DAS TENSÕES NAS SEÇÕES ADJACENTES E CÁLCULO DA DIMENSÃO TEÓRICA DO CORDÃO DE SOLDA	71
5.3. DIMENSIONAMENTO A PARTIR DE REGRAS ESTABELECIDAS PELAS NORMAS.....	73
6 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	74
6.1. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA. AFASTAMENTO REQUERIDO DAS SEÇÕES DE AVALIAÇÃO DE TENSÕES	74
6.1.1. <i>Caso 1 - Chapa de Topo Submetida a Carregamento Axial (Px)</i>	75
6.1.2. <i>Caso 2 - Chapa de Topo Submetida a Carregamento de Cisalhamento Paralelo à Direção da Junta (Py)</i>	78
6.1.3. <i>Caso 3 - Chapa de Topo Submetida a Carregamento de Cisalhamento Transversal à Direção da Junta (Pz)</i>	82
6.1.4. <i>Caso 4 - Chapa de Aba Submetida a Carregamento Axial (Pzs e Pzi)</i>	85
6.1.5. <i>Caso 5 - Chapa de Aba Submetida a Carregamento de Cisalhamento Paralelo à Direção da Junta (Pys e Pyi)</i>	88
6.1.6. <i>Caso 6 - Chapa de Aba Submetida a Carregamento de Cisalhamento Transversal à Direção da Junta (Pxs e Pxi)</i>	90
6.2. ESTUDOS DE CASO: COMPORTAS HIDRÁULICAS	92
6.2.1. <i>Comporta Hidráulica do Tipo Ensecadeira (“Stop Log”)</i>	93

6.2.2. Comporta Hidráulica do Tipo Vagão (<i>Fixed Wheel Gate</i>).....	104
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	111
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
APÊNDICE A SELEÇÃO DE JUNTAS DA COMPORTA HIDRÁULICA “STOP LOG”	115
APÊNDICE B SELEÇÃO DE JUNTAS DA COMPORTA HIDRÁULICA “FIXED WHEEL GATE”.....	122

Lista de figuras

Figura 2.1 – Corpo tridimensional e elemento tridimensional de 8 nós	22
Figura 2.2 – Elemento de placa juntamente com tensões e esforços resultantes	26
Figura 2.3 – Deformação de uma placa de Mindlin	27
Figura 2.4 – Deslocamentos em uma placa	27
Figura 3.1 - Juntas de topo, de canto, em T, de contorno e de extremidade	32
Figura 3.2 – Formação de Trincas Nas Juntas Soldadas: (a) À Frio; (b) À Quente	34
Figura 3.3 – Representação da garganta do cordão em juntas T, com cordão de filete	36
Figura 3.4 – Seção transversal do cordão de solda	37
Figura 3.5 - Relação entre o volume de cordão em relação a razão $h1/h2$ para uma seção resistente constante	38
Figura 3.6 – Tensões nominais atuantes na seção da garganta do cordão solda	38
Figura 3.7 – Elipsóide de Van der Eb representando a tensão equivalente (a) no plano; (b) no espaço	39
Figura 3.8 - Junta T com a chapa de topo carregada axialmente	42
Figura 3.9 – Diagrama de Corpo Livre do Cordão de Solda	42
Figura 3.10 - Diagrama de Corpo Livre do Cordão de Solda	44
Figura 3.11 - Diagrama de corpo livre do cordão de solda	45
Figura 4.1 - Tensões na seção adjacente à junta na chapa de topo	48
Figura 4.2 - Tensões normais na seção adjacente à junta. (a) Parcela de Membrana; (b) Parcela de Flexão	49
Figura 4.3 - Diagrama de corpo livre da junta submetida à tensão normal $\sigma_{x0}(y)$	50
Figura 4.4 - Diagrama de corpo livre da junta submetida à tensão normal $\sigma_{x1}(y)$	50
Figura 4.5– Diagrama de corpo livre da junta submetida à tensão cisalhante τ_{zx}	51
Figura 4.6 – Diagrama de corpo livre da junta submetida à tensão cisalhante τ_{xy}	52
Figura 4.7 – Diagrama de Corpo Livre: (a) Cordão Superior e (b) Cordão Inferior	55
Figura 4.8 - Tensões na seção adjacente à junta na chapa de aba	57
Figura 4.9- Tensões normais nas seções adjacentes à junta	58
Figura 4.10- Diagrama de corpo livre da junta submetida às tensões normais $\sigma_{zs0}(y)$ e $\sigma_{zi0}(y)$	59
Figura 4.11 - Diagrama de corpo livre da junta submetida às tensões normais $\sigma_{zs1}(y)$ e $\sigma_{zi1}(y)$	60
Figura 4.12 - Diagrama de corpo livre da junta submetida às tensões cisalhantes $\tau_{zxs}(y)$ e $\tau_{zxi}(y)$	61
Figura 4.13 - Diagrama de corpo livre da junta submetida às tensões cisalhantes $\tau_{zys}(y)$ e $\tau_{zyi}(y)$	62
Figura 5.1 – Modelo de uma junta soldada: (a) Real; (b) Utilizando Elementos Sólidos; (c) Utilizando Elementos de Casca	67
Figura 5.2 – Estrutura Complexa Formada por Diversas Juntas	68
Figura 5.3 – Definição dos Eixos Coordenados a Partir dos Pontos (P, Q e Z_2)	68
Figura 5.4 – Pontos de referência da chapa 1 (Z_1) e da chapa 2 (Z_2)	69

Figura 5.5 – Esquema de Verificação do Ponto de Referência em Relação ao Elemento	70
Figura 5.6 – Determinação das seções de leitura de tensões nas seções adjacentes às juntas	70
Figura 5.7 – Valores de tensão extraídos nas seções adjacentes	71
Figura 5.8 – Exemplo de variação da espessura do cordão calculada ao longo da junta	72
Figura 6.1 – Modelo de uma junta soldada submetida a esforços axiais e transversais	75
Figura 6.2 – Restrições e Carregamentos na Chapa de Topo Considerada ($P_x = 200\text{kN/m}$)	76
Figura 6.3 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta (caso 1)	76
Figura 6.4 – Tensões de Membrana (σ_x0) ao Longo da Junta	77
Figura 6.5 – Espessura do Cordão de Solda vs Coeficiente de Afastamento (k_a2)	78
Figura 6.6 – Altura do Cordão ao Longo da Junta	79
Figura 6.7 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta (caso 2)	80
Figura 6.8 – Tensões normais (σ_x0) ao Longo das Seções Adjacentes	80
Figura 6.9 – Tensões Cisalhantes τ_{xy} ao longo das seções	81
Figura 6.10 – Espessura do Cordão de Solda vs Coeficiente de Afastamento	81
Figura 6.11 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta (caso 3)	83
Figura 6.12 – Tensões normais (σ_x1) ao Longo das Seções Adjacentes	84
Figura 6.13 – Espessura do Cordão de Solda vs Coeficiente de Afastamento	84
Figura 6.14 – (a) Modelo de uma Junta Soldada Submetida a Esforços Axiais e Transversais (b) e Carregamentos na Chapa de Aba	85
Figura 6.15 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta (caso 4)	86
Figura 6.16 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta	86
Figura 6.17 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta	87
Figura 6.18 – Relação entre espessuras do cordão de soldas e espessuras das chapas	88
Figura 6.19 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta (caso 5)	89
Figura 6.20 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta	89
Figura 6.21 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta (caso 6)	90
Figura 6.22 – Espessura do Cordão de Solda ao Longo da Junta	91
Figura 6.23 – Carregamentos Aplicados na Comporta Hidráulica do Tipo “Stop Log”	93
Figura 6.24 – Restrições Aplicadas na Comporta Hidráulica do Tipo “Stop Log”	94
Figura 6.25 – Numeração de Juntas da Comporta Hidráulica “Stop Log”	95
Figura 6.26 – Detalhe da Junta 05 da Comporta Hidráulica do Tipo “Stop Log”	96
Figura 6.27 – Tensões Obtidas nas Seções Adjacentes à Junta 05	97
Figura 6.28 – Altura do Cordão de Solda ao Longo da Junta 05	98
Figura 6.29 – Tensões Obtidas nas Seções Adjacentes à Junta	101
Figura 6.30 – Altura do Cordão de Solda ao Longo da Junta 05	102
Figura 6.31 – Localização das Juntas 31 e 32 na estrutura	102
Figura 6.32 – Tensões Obtidas nas Seções Adjacentes à Junta 31	103
Figura 6.33 – Altura do Cordão de Solda ao Longo da Junta 31	103
Figura 6.34 – Carregamentos Aplicados na Comporta Hidráulica do Tipo “Fixed Wheel Gate”	105

Figura 6.35 – Restrições Aplicadas na Comporta Hidráulica do Tipo “Fixed Wheel Gate”	105
Figura 6.36 – Comporta hidráulica do tipo vagão ou “fixed wheel gate”	106
Figura 6.37 – Localização da Junta 02	109
Figura 6.38 – Tensões Obtidas nas Seções Adjacentes à Junta 02	109
Figura 6.39 – Altura do Cordão de Solda ao Longo da Junta 02	110

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Grupos de Procedimentos e Processos de soldagem	31
Tabela 3.2 – Valores para o coeficiente de eficiência da junta	40
Tabela 5.1 – Valores máximos e mínimos recomendados pelas normas	73
Tabela 6.1 – Resumo dos valores obtidos para o dimensionamento dos cordões de solda – Estrutura “Stop Log”.	99
Tabela 6.2 – Percentual de Ocorrência da Altura do Cordão	100
Tabela 6.3 – Percentual de Incidência de cada Método na Definição da Espessura do cordão	101
Tabela 6.4 – Resumo dos valores obtidos para o dimensionamento dos cordões de solda – Estrutura “Fixed Wheel Gate”.	106
Tabela 6.5 – Percentual de Ocorrência da Altura do Cordão	108
Tabela 6.6 – Percentual de Incidência de cada Método na Definição da Espessura do cordão	108

Lista de abreviações e símbolos

AISC	American Institute of Steel Construction
AWS	American Welding Society
a1	Distância entre a junta e a seção transversal adjacente na chapa de aba
a2	Distância entre a junta e a seção transversal adjacente na chapa de topo
ag	Altura da garganta da solda
B	Matriz de transformação deformação-deslocamento
C	Matriz constitutiva do material
d1	Espessura da chapa de aba
d2	Espessura da chapa de topo
F^B	Vetor das forças de corpo
f^{Sf}	Vetor das forças de superfície
H	Matriz interpolação dos deslocamentos no interior do elemento
h	Altura do cordão de solda
h _s	Altura do cordão de solda na junção superior
h _i	Altura do cordão de solda na junção inferior
IIW	International Institute of Welding
ISO	International Organization for Standardization
K	Matriz de rigidez global
k _w	Fator de segurança ao cisalhamento
ka1	Coefficiente de afastamento da junta para a chapa de aba
ka2	Coefficiente de afastamento da junta para a chapa de topo
L	Comprimento do cordão de solda
P	Ponto de referência correspondente ao início da junta
P _x	Carregamento axial na chapa de topo
P _y	Carregamento transversal na chapa de topo no sentido longitudinal à junta
P _z	Carregamento transversal na chapa de topo no sentido normal à chapa de topo
P _{xs}	Carregamento axial na chapa de aba superior
P _{ys}	Carregamento transversal na chapa de aba superior no sentido longitudinal à junta
P _{zs}	Carregamento transversal na chapa de aba superior no sentido normal à chapa de aba
P _{xi}	Carregamento axial na chapa de aba inferior
P _{yi}	Carregamento transversal na chapa de aba inferior no sentido longitudinal à junta
P _{zi}	Carregamento transversal na chapa de aba inferior no sentido normal à chapa de aba
Q	Ponto de referência correspondente ao fim junta
R_C¹	Vetor das forças concentradas
R _L	Reação na face da garganta no sentido longitudinal ao cordão de solda
R _N	Reação na face da garganta no sentido normal ao cordão de solda
R _T	Reação na face da garganta no sentido transversal ao cordão de solda

S_c	Tensão admissível do metal de base
S_{rs}	Tensão de ruptura do cordão de solda
S_y	Tensão de escoamento
U	Vetor deslocamento de um ponto material do corpo
u	Deslocamento longitudinal de um ponto em uma placa na direção x
V	Volume do cordão de solda
v	Deslocamento longitudinal de um ponto em uma placa na direção y
w	Deslocamento transversal de um ponto em uma placa na direção z
\hat{x}_L	Direção x do eixo coordenado local
\hat{y}_L	Direção y do eixo coordenado local
\hat{z}_L	Direção z do eixo coordenado local
Z_1	Ponto de referência no plano correspondente à chapa de aba
Z_2	Ponto de referência no plano correspondente à chapa de topo
β	Coefficiente de redução ou de eficiência da junta
ϵ	Vetor deformação considerado em um ponto qualquer do corpo
ϵ_{xx}	Componente de deformação axial de um ponto em uma placa na direção x
ϵ_{yy}	Componente de deformação axial de um ponto em uma placa na direção y
ϵ_{zz}	Componente de deformação axial de um ponto em uma placa na direção z
γ_{xz}	Componente de deformação angular de um ponto em uma placa no plano xz
γ_{yz}	Componente de deformação angular de um ponto em uma placa no plano yz
φ	Ângulo entre os planos de face e de garganta do cordão de solda
θ_x	Rotações das normais à superfície mediana de uma placa no plano yz
θ_y	Rotações das normais à superfície mediana de uma placa no plano xy
σ_{eq}	Tensão equivalente na seção da garganta do cordão de solda
σ_n	Tensão normal atuando perpendicularmente à seção da garganta
σ_{x0}	Tensão de membrana na chapa de topo na direção x
σ_{x1}	Tensão de flexão na chapa de topo no plano paralelo à junta na direção x
σ_{zi0}	Tensão de membrana na chapa de aba no plano inferior paralelo à junta na direção x
σ_{zi1}	Tensão de flexão na chapa de aba no plano inferior paralelo à junta na direção x
σ_{zs0}	Tensão de membrana na chapa de aba no plano superior paralelo à junta na direção x
σ_{zs1}	Tensão de flexão na chapa de aba no plano superior paralelo à junta na direção x
τ	Vetor tensão considerado em um ponto qualquer do corpo
τ_l	Tensão cisalhante atuando longitudinalmente à seção da garganta
τ_t	Tensão cisalhante atuando transversalmente à seção da garganta
τ_{xy}	Tensão cisalhante transversal na chapa de topo no plano paralelo à junta na direção y
τ_{xz}	Tensão cisalhante transversal na chapa de topo no plano paralelo à junta na direção z
τ_{zxi}	Tensão cisalhante transversal na chapa de aba no plano inferior paralelo à junta na direção x

τ_{zyi}	Tensão cisalhante transversal na chapa de aba no plano inferior paralelo à junta na direção y
τ_{zxs}	Tensão cisalhante transversal na chapa de aba no plano superior paralelo à junta na direção x
τ_{zys}	Tensão cisalhante transversal na chapa de aba no plano superior paralelo à junta na direção y