

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE UNIÕES SOLDADAS ATRAVÉS DO MÉTODO DA TENSÃO ESTRUTURAL VIA
ELEMENTOS FINITOS

por

Leonel Echer

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2012



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DE UNIÕES SOLDADAS ATRAVÉS DO MÉTODO DA TENSÃO ESTRUTURAL VIA
ELEMENTOS FINITOS

por

Leonel Echer

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 25, junho de 2012.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais, Clarice e Honorino, por terem desistido dos sonhos que planejaram para mim, de modo a permitir que eu vivesse meus próprios sonhos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rogério J. Marckzak, “Rato”, pelo tempo dedicado e conhecimentos compartilhados.

E por fim agradeço a minha irmã, Denise, por ter apostado em mim quando nem mesmo eu o teria feito, seu blefe não foi em vão.

“Attitude is a little thing that makes a big difference.”

Winston Churchill

ECHER, L. **Análise de Uniões Soldadas Através do Método da Tensão Estrutural via Elementos Finitos**. 2012. 29p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise e comparação entre diferentes técnicas de modelagem para simulação numérica de uniões soldadas utilizando o método dos elementos finitos através do método da tensão estrutural. Uma união soldada do tipo “T” foi modelada com elementos sólidos e analisada utilizando diferentes abordagens para a representação do filete de solda, isto é, por elementos de casca e elementos de viga rígidos. Os resultados foram comparados com os obtidos em um modelo totalmente sólido 3D. As melhores estratégias para modelagem do filete de solda são destacadas a partir desta comparação. Os resultados sugerem que ambos, elementos de casca e de viga rígidos são capazes de fornecer semelhantes tensões estruturais no pé da solda, mas alguns deles podem alterar significativamente a rigidez do modelo numérico, tornando-o inútil para avaliação do deslocamento. A partir destes resultados, sugerem-se alguns passos básicos a serem tomados na modelagem de juntas soldadas por elementos de casca para a medição direta da tensão atuante em uma solda.

PALAVRAS-CHAVE: Uniões soldadas, análise numérica, tensão estrutural, elementos de casca.

ECHER, L. **Welded Joints Analysis Using the Finite Elements Method through the Hot Spot Approach**. 2012. 29p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

This paper presents an analysis and comparison of different modeling techniques for numerical simulation of welded joints by the finite element method using the hot spot approach. A “T” shaped welded joint was modeled by solid elements and analyzed using different approaches to simulate the weld fillet, namely shell elements and rigid beam elements. The results were compared with the ones obtained with a fully 3D solid model. The best strategies to model weld fillet are highlighted from this comparison. The results suggest that both, shell and rigid beam elements are able to deliver similar structural stresses at the weld hot spot, but some of them may change significantly the stiffness of the numerical model, rendering it useless for deformation evaluation. From these results, it is suggested basic steps to be taken in the modeling of welded joints by shell elements for direct measurement of the stress acting on the weld.

KEYWORDS: Welded joints, numerical analysis, hot spot, shell elements.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Um Breve Histórico e Definição.....	1
1.2	Uma Breve Descrição do Problema.....	1
2.	OBJETIVOS	2
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4.	DETERMINAÇÃO DA TENSÃO EM UNIÕES SOLDADAS	3
4.1	Metodologias Comumente Empregadas	3
4.2	O Método da Tensão Estrutural	4
5.	MODELOS NUMÉRICOS ANALISADOS	4
5.1	Modelo Sólido.....	4
5.2	Modelos de Casca	6
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
6.1	Resultados do Modelo de Sólido	8
6.2	Resultados dos Modelos de Casca.....	11
6.3	Comparações de Resultados.....	13
6.4	Teste com Novo Modo de Carregamento	13
7.	CONCLUSÕES	15
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
I	APÊNDICE	16
II	APÊNDICE	17
III	APÊNDICE	18
IV	APÊNDICE	19
V	APÊNDICE	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Em ambas as estruturas as tensões são equivalentes e respeitam as condições de equilíbrio do problema, (a) Distribuição de tensão no pé da solda; (b) Definição da tensão estrutural no pé da solda. [Adaptado de Dong, 2001].	3
Figura 4.1 - Comportamento de concentração de tensão em uniões soldadas.	4
Figura 5.1 - (a) Configuração geométrica do modelo; (b) Condições de contorno e de carregamento.	5
Figura 5.2 - Fases da análise de tensão no modelo sólido.	5
Figura 5.3 - Ilustração do modelo de casca.	6
Figura 5.4 - Ilustração dos submodelos de acordo com a posição da linha de atuação do cordão de solda.	7
Figura 5.5 - Representação dos pontos de obtenção da tensão estrutural em cada um dos submodelos de casca.	7
Figura 6.1 - Malhas geradas para o modelo sólido (a) Tamanho de elemento igual a 1 vez a espessura; (b) Tamanho de elemento igual a $\frac{3}{4}$ da espessura; (c) Tamanho de elemento igual a $\frac{1}{2}$ da espessura; (d) Tamanho de elemento igual a $\frac{1}{4}$ da espessura.	8
Figura 6.2 - Gráfico do comportamento da tensão em função do tamanho do elemento.	9
Figura 6.3 - Gráfico da tensão atuante no modelo sólido.	9
Figura 6.4 - Campo de deslocamentos no modelo sólido [m].	10
Figura 6.5 - Comportamento da 1ª tensão principal na lateral de análise, com detalhe para a região compreendida entre o ponto de engaste a o ponto onde $\delta = 0,4 \cdot t$ [Pa].	10
Figura 6.6 - Modelos de casca gerados, (a) P_S1; (b) P_S2; (c) P_S3; (d) R_S1; (e) R_S2; (f) R_S3.	11
Figura 6.7 - Comportamento da tensão na para cada um dos modelos de casca, na região próxima ao <i>hot spot</i> .	12
Figura 6.8 - Novo modo de carregamento, (a) Modelo sólido; (b) Modelo R_S3.	14
Figura 6.9 - Comportamento da 1ª tensão principal para o modelo sólido.	14
Figura 6.10 - Comportamento da 1ª tensão principal para o modelo R_S3.	14
Figura I.1 - Elementos empregados, (a) SOLID 186; (b) SHELL 281; (c) MPC 184 – rigid beam.	16
Figura II.1 - Fase de coleta direta da tensão no modelo sólido.	17
Figura II.2 - Fase de interpolação linear da tensão no modelo sólido.	17
Figura II.3 - Fase de extrapolação linear da tensão através da equação obtida na Figura II.2.	17
Figura III.1 - Tensão principal para os modelos P_S1 e R_S1.	18
Figura III.2 - Tensão principal para os modelos P_S2 e R_S2.	18
Figura III.3 - Tensão principal para os modelos P_S3 e R_S3.	18

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 - Espessura equivalente do elemento de solda de cada um dos submodelos de casca.....	7
Tabela 6.1 - Sensibilidade ao tamanho do elemento.....	8
Tabela 6.2 - Resultados para os modelos de casca.....	12
Tabela 6.3 - Comparação entre modelos.....	13
Tabela I.1 - Rotinas de configuração para os elementos empregados.....	16
Tabela IV.1 - Resultados para os modelos de casca sob o segundo modo de carregamento. .	19
Tabela IV.2 - Comparação entre modelos sob o segundo modo de carregamento.....	19
Tabela V.1 - Características gerais do computador empregado nas simulações.....	20
Tabela V.2 - Características	20

1. INTRODUÇÃO

1.1. Um Breve Histórico e Definição

Soldagem é comumente apresentada como um processo pelo qual se une materiais através do uso de solda, essa, por sua vez, é formalmente definida como sendo uma “coalescência localizada de metais ou não-metais, produzida pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de soldagem, com ou sem a adição de pressão, ou com a aplicação de pressão somente, com ou sem o uso de metal de adição” [O'Brien, 1991].

Os primeiros indícios da aplicação da soldagem remetem há cerca de quatro mil e oitocentos anos. Contudo, mesmo tendo sua origem na Idade do Bronze foi somente em meados da primeira guerra mundial, devido à alta demanda por navios, que o processo de fabricação através de soldagem sofreu ampla difusão. Na década de 40, a segunda grande guerra foi a responsável tanto pelo emprego deste processo na fabricação de veículos, como por alguns dos saltos tecnológicos que vieram a tornar esse processo similar ao que se utiliza nos dias atuais [Machado, 1996].

Atualmente, processos de soldagem estão presentes nos mais variados setores da indústria metal-mecânica, pertencendo ao nosso dia a dia. Seria raro viver um dia ao menos sem utilizar ou se deparar com algum bem ou utensílio que não utilize a soldagem em seu processo de fabricação. Milênios se passaram desde a origem da soldagem, a modernização desse processo remete a mais de meio século e, ainda que seja amplamente estudado, existem muitos aspectos da soldagem que não são plenamente compreendidos.

1.2 Uma Breve Descrição do Problema

A determinação da vida em fadiga de uniões soldadas constitui um grande desafio. Por seu grande emprego industrial, é de grande valia poder avaliar a tensão a qual determinada solda está sujeita e, então, estimar sua vida e confiabilidade. Contudo, essa tarefa não é fácil. Sendo a dificuldade em torno desse processo dividida em dois fatores distintos:

O primeiro destes fatores é a severidade do processo de soldagem, que envolve drásticas mudanças na microestrutura do material soldado. O material é exposto a um elevado aquecimento e subsequente resfriamento, juntamente com o processo de fusão e adição de metal de solda. Por mais bem realizada que seja uma soldagem, o filete de solda resultante intrinsecamente irá apresentar inúmeras imperfeições, como falta de homogeneidade de material, inclusões, poros dentre outros defeitos.

O segundo fator, e o mais importante, é a dificuldade de definir a geometria da solda. Por mais hábil que um soldador possa ser, ele jamais será capaz de gerar um filete de solda com geometria perfeitamente simétrica e bem definida. Essa geometria deve ser reproduzida de maneira suficientemente precisa para uma análise numérica, porém suficientemente simples para ser viável para análises industriais. Sendo um dos objetivos desse trabalho, propor uma maneira de se contornar esse problema.

O fator exposto acima é o principal motivo que não permitiu o total aproveitamento de ferramentas numéricas, tal como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e demais métodos numéricos para a determinação da tensão atuante em uniões soldadas [Taylor et al., 2001].

Teoricamente, uma união soldada pode ser analisada através do MEF. Porém, na prática, o resultado dessa análise irá requerer um modelo deveras detalhado (em termos de malha de elementos finitos) para poder reproduzir o campo de concentração de tensões na região de solda, o que torna tal análise quase que impraticável. Uma ferramenta amplamente empregada para tentar contornar esse problema é a geração de modelos numéricos enquadrados em algumas das diversas classes de solda normatizadas. Essas normatizações consistem em tabelas de curvas S-N (Tensão estrutural versus Número de ciclos em fadiga) de acordo com a classe da solda, que por sua vez depende do modo de carregamento e da geometria da união. A utilização de normas juntamente com análises numéricas de uniões soldadas é interessante, porém, muitas vezes torna-se difícil, ou até mesmo impossível,

enquadrar uma união soldada em um dos tipos que são apresentados pela norma [Dong, 2001].

2. OBJETIVOS

O presente trabalho visa apresentar um método confiável e computacionalmente viável de avaliar, de forma direta, o comportamento estrutural em uniões soldadas, as quais constituem concentradores de tensão. Através da utilização direta de análises computacionais pelo MEF, juntamente com o método da tensão estrutural, descartando assim a necessidade da utilização de extensas tabelas de curvas S-N para os mais diversos tipos de soldas.

Elaborar uma boa metodologia de modelagem e análise de uniões soldadas, que permita a aferição da tensão atuante sobre a solda de modo a possibilitar um cálculo de vida em fadiga de forma simples e rápida, teria uma grande aplicabilidade na indústria. E é justamente nesse âmbito que o presente trabalho atuou, testando quais as melhores maneiras de se modelar e posteriormente avaliar, através de ferramentas numéricas, o estado de tensões em uniões soldadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma análise sobre a utilização de técnicas para simulação numérica de uniões soldadas é apresentada no trabalho de Wentz, 2008, o qual foca a utilização do MEF, discutindo as simplificações e limitações da modelagem numérica do processo de soldagem. No trabalho citado, Wentz engloba em sua análise numérica vários efeitos metalúrgicos envolvidos durante o processo de soldagem.

Fricke, 2002, apresenta, de forma condensada, as principais metodologias empregadas atualmente na predição de vida em fadiga de juntas soldadas. Além de apresentar uma breve explanação do universo que é a análise de fadiga em uniões soldadas, também é feita uma revisão dos principais artigos, deste campo de conhecimento, publicados nas décadas de 80 e 90.

Em trabalho publicado em 2001, Fricke apresenta um estudo industrial, realizado a partir da cooperação entre nove especialistas nas áreas de análises por elementos finitos, modelagem de uniões soldadas e engenharia naval. Essa união de diversos profissionais resultou nas formulações de uma série de recomendações e cuidados necessários para se modelar numericamente soldas através do método da tensão estrutural (*Hot Spot*). Esses resultados incluem desde sugestões quanto à geração das geometrias em CAD até os refinamentos de malha necessários ao modelo numérico. Também é apresentada uma análise sobre os métodos de extrapolação da tensão nas soldas e comparação desses valores com dados de curvas de vida em fadiga (curvas S-N) para diversos tipos de soldas.

Dong, 2001, realiza análises com diversas técnicas, de simulação numérica, baseadas no método da tensão estrutural. A formulação utilizada parte da consideração de que “dada uma distribuição de tensão pela espessura de uma chapa, essa pode ser representada por uma distribuição de tensão simples composta por uma componente de membrana (σ_m) e uma componente de flexão (σ_b)”. Somando essa consideração à tática de se obter a tensão na região da solda através de uma linearização a partir de uma distância δ do pé da solda (*hot spot*), Dong apresenta as Equações 3.1, 3.2 e 3.3, as quais regem o comportamento da tensão ao longo da chapa analisada. A Figura 3.1 ilustra a consideração utilizada nessa formulação.

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b \quad (3.1)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_m(z) \cdot dz \quad (3.2)$$

$$\sigma_m \frac{t^2}{2} + \sigma_b \frac{t^2}{6} = \int_0^t \sigma_x(z) \cdot z \cdot dz + \delta \int_0^t \tau_{xz}(z) \cdot dz \quad (3.3)$$

onde t é a espessura da chapa, y é o eixo cartesiano de direção paralela a t , δ é a distância ao pé da solda onde a tensão é obtida e τ_{xy} é a tensão cortante.

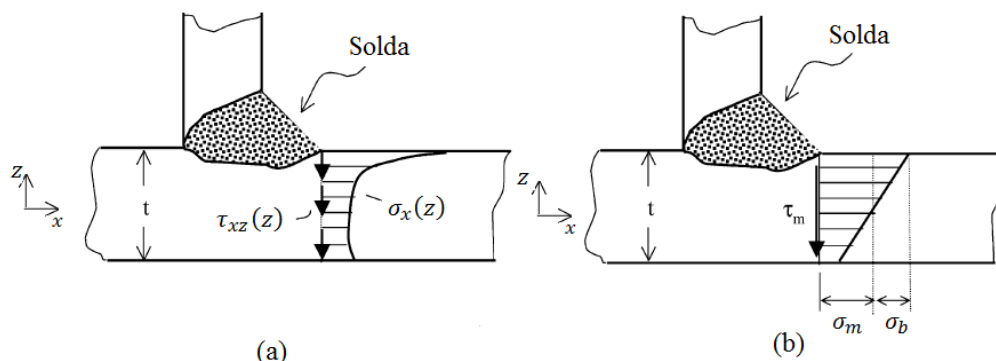


Figura 3.1 - Em ambas as estruturas as tensões são equivalentes e respeitam as condições de equilíbrio do problema, (a) Distribuição de tensão no pé da solda; (b) Definição da tensão estrutural no pé da solda. [Adaptado de Dong, 2001].

Após a apresentação dessa formulação, Dong, 2001, apresenta diversos resultados de análises com modelagem por elementos sólidos (3D) e por elementos de placa (*shell/plate*), todas as análises visam à insensibilidade quanto ao tamanho de elemento. As análises com elementos sólidos se dividem em simulações com e sem a presença de falha pressuposta (*crack propagation*), e utilizam a avaliação direta da tensão estrutural. Já as análises com elementos de placa utilizam somente os resultados de forças nodais obtidos pelo MEF, sendo as tensões nas regiões de solda calculadas após um tratamento matemático imposto às forças nodais obtidas.

No trabalho apresentado por Doerk et al., 2002, é feita uma análise comparativa entre as diferentes formas de análise através do método da tensão estrutural. São realizadas e comparadas quatro diferentes análises, nas quais a tensão na região de solda é obtida tanto pela linearização da tensão quanto pela extrapolação da tensão a diferentes distâncias δ do pé da solda. Os resultados são comparados quanto à insensibilidade aos parâmetros de malha que cada análise apresenta.

Em tese defendida em 2000, Fransson e Petterson apresentam uma abordagem de determinação de vida em fadiga através da utilização das forças nodais obtidas através de análises via MEF com o método da tensão estrutural. Nesse trabalho foi apresentada uma maneira, viável e insensível ao tamanho dos elementos, de se calcular a tensão estrutural em uniões soldadas de placas espessas. Isso se deu através de modificações do método Volvo (baseado na tensão estrutural) para cálculo em placas finas.

4. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO EM UNIÕES SOLDADAS

4.1 Metodologias Comumente Empregadas

Atualmente, existem inúmeras aproximações para a determinação da tensão atuante sobre uniões soldadas. Contudo, essas várias aproximações podem ser reduzidas a quatro métodos principais listados abaixo:

- Método da tensão nominal (*nominal stress*);
- Método da tensão estrutural (*hot spot*);
- Método da tensão de chanfro (*notch stress*);
- Método da propagação da trinca (*crack propagation*).

Em síntese, todas as demais aproximações são modificações e/ou combinações dos métodos citados. O presente trabalho se utiliza do método da tensão estrutural e, por isso, o mesmo será visto de maneira mais aprofundada.

4.2 O Método da Tensão Estrutural

O método da tensão estrutural, também conhecido como método da tensão geométrica, considera o efeito de elevação da tensão devido aos concentradores de tensão (descontinuidades geométricas) da região de solda. A premissa desse método é desconsiderar o efeito de “pico de tensão” devido ao pé da solda, essa desconsideração é feita ao se tomar o comportamento da tensão a certa distância δ do pé da solda, sendo então realizada uma interpolação e/ou extrapolação para estimar o comportamento da tensão na região de solda. A Figura 4.1 apresenta de forma ilustrativa a utilização desse método na determinação da tensão em uma solda do tipo filete. Não existe um consenso, entre autores, de qual a melhor distância δ que deve ser tomada a partir do pé da solda para a coleta da tensão. Contudo, diversos trabalhos, como o de Dong, 2001, Fricke, 2001 e Doerk et al., 2002, convergem para o uso de δ dentro da faixa de 0,4 a 1,0 vezes a espessura da chapa analisada. Devido a isso o presente trabalho também adota essa faixa de valores para δ .

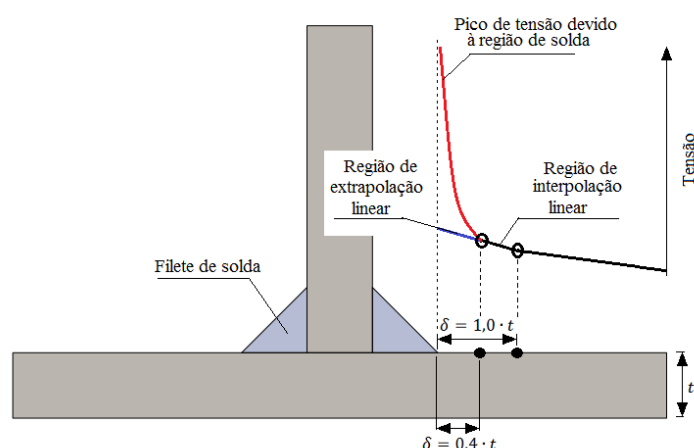


Figura 4.1 - Comportamento de concentração de tensão em uniões soldadas.

5. MODELOS NUMÉRICOS ANALISADOS

As análises realizadas consistem em simulações numéricas de um modelo sólido e de vários modelos de casca. O modelo sólido tem o propósito de servir como base para comparação com as análises dos modelos de casca e assim determinar qual a maneira de modelagem de soldas que melhor consegue reproduzir os resultados de um modelo sólido. A representação de diferentes possibilidades de modelagem utilizando elementos de casca foi adotada devido à superioridade, em termos de tempo computacional, que esses elementos possuem quando comparados com elementos sólidos.

Assim a premissa do presente trabalho foi buscar a equivalência de um modelo estrutural (sólido) com outro modelo (de casca) também estrutural. Deve-se salientar que, ao contrário do trabalho de Wentz, 2008, efeitos metalúrgicos envolvidos no processo de soldagem não são englobados pelas simulações realizadas, logo, todos os resultados desconsideram a tensão residual ou qualquer outro efeito envolvendo a zona termicamente afetada pela soldagem.

Uma apresentação comparativa do tempo computacional requerido por cada uma das análises realizadas é apresentada no Apêndice V.

5.1 Modelo Sólido

As análises realizadas para a simulação do modelo sólido utilizam a formulação apresentada por Dong, 2001. O modelo sólido foi construído de modo a simular a união entre duas chapas de 254 mm de comprimento por 127 mm de largura com uma espessura de 12,7 mm. As chapas são unidas em forma de “T” por dois filetes de solda com comprimentos de perna simétricos e iguais a 12,7 mm. As condições impostas foram de engaste nas duas

extremidades de uma das chapas e uma força distribuída de intensidade total de 1000 N, atuante na extremidade da outra chapa no sentido positivo do eixo x. A Figura 5.1 ilustra a geometria utilizada, bem como as condições de contorno e de carregamento impostas.

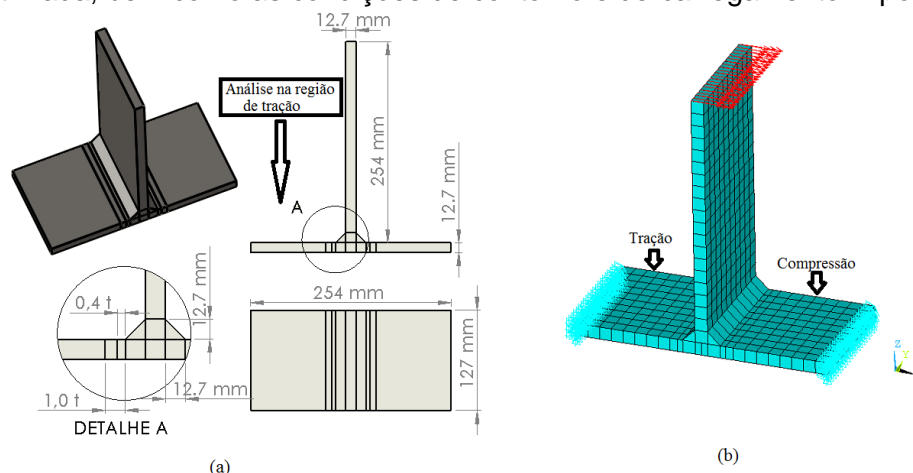


Figura 5.1 - (a) Configuração geométrica do modelo; (b) Condições de contorno e de carregamento.

Conforme a metodologia empregada, considera-se a tensão estrutural (σ_s) como sendo a soma das parcelas de tensão de membrana e de flexão. Como pode ser visto pela Figura 3.1 o valor máximo para a tensão estrutural ocorre na superfície superior da chapa horizontal, a 1ª tensão principal representa perfeitamente a soma das parcelas de tensão de membrana e flexão nessa superfície. Conseqüentemente, a tensão estrutural para projeto que se busca conhecer é a primeira tensão principal. Essa tensão pode ser facilmente obtida, de forma direta, por uma análise via MEF [Fayard et al.,2007].

A coleta e tratamento dos valores de tensão ocorrem em três fases distintas, a primeira fase ocorre para os nós localizados na região entre a extremidade de engaste e o ponto $\delta = 1,0 \cdot t$, a tensão nodal desta região é obtida diretamente da análise de elementos finitos. A segunda fase ocorre para a região compreendida entre $\delta = 1,0 \cdot t$ e $\delta = 0,4 \cdot t$, onde os valores de tensão nodal são obtidos através da análise por MEF e então são linearmente interpolados, resultando na equação que rege a tensão nesta região. A terceira e última fase, é a que fornece os valores da tensão nodal para a região compreendida entre o pé da solda (*hot spot*) e o ponto onde $\delta = 0,4 \cdot t$, o processo utilizado nesta fase é uma extrapolação linear dos pontos obtidos na fase dois. A fase três é a que fornece o valor da tensão estrutural (σ_s), a qual é a primeira tensão principal extrapolada para o ponto de descontinuidade (pé da solda), essa é a tensão que deve ser utilizada caso se queira realizar uma análise de vida em fadiga da união soldada. A Figura 5.2 exemplifica de maneira mais clara essas três fases.

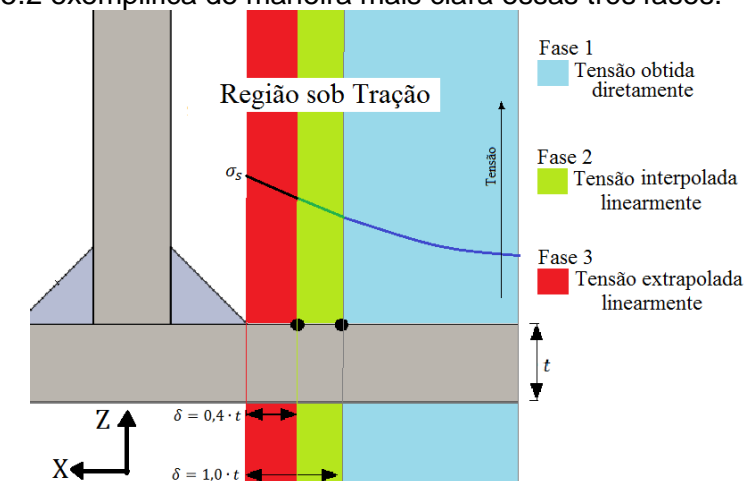


Figura 5.2 - Fases da análise de tensão no modelo sólido.

5.2 Modelos de Casca

Os modelos de casca seguem, porém não de maneira fiel, a metodologia apresentada no trabalho de Fayard et al., 2007. Os modelos são criados com a mesma geometria do modelo sólido, porém através da utilização de chapas. Tais chapas assumem as posições de linha neutra e mantêm as dimensões originais da geometria, sendo as condições de contorno e de carregamento as mesmas do modelo sólido. A Figura 5.3 ilustra a transição do modelo sólido para os modelos de casca. Nessa imagem, o modelo de casca é sobreposto ao sólido de modo a demonstrar a manutenção das dimensões originais da geometria.

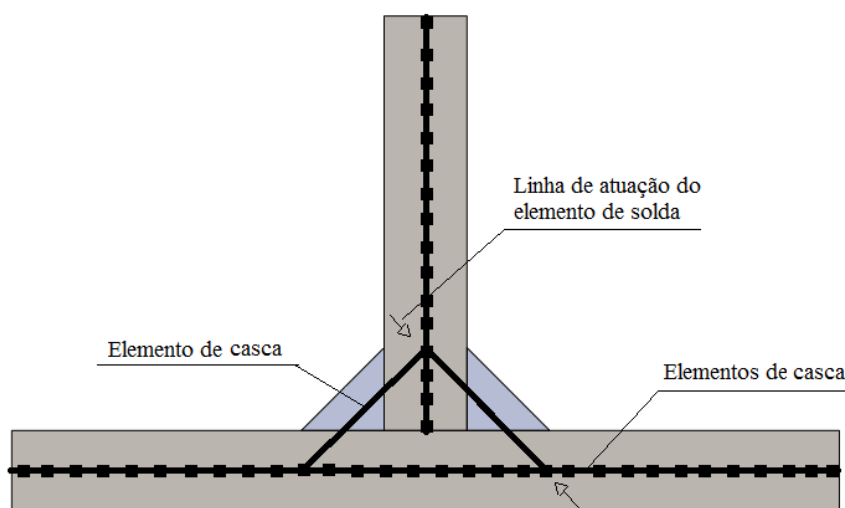


Figura 5.3 - Ilustração do modelo de casca.

A representação do filete de solda nesses modelos é realizada de várias maneiras diferentes, de modo a permitir a verificação de qual das sugestões de representação é capaz de reproduzir com mais fidelidade os resultados apresentados pelo modelo sólido. Os filetes de solda foram representados de duas maneiras diferentes, e cada uma dessas representações foi subdividida em submodelos, de acordo com a posição da linha de atuação do elemento de solda.

As duas maneiras distintas de representação dos filetes utilizadas são, respectivamente:

- A representação denominada tipo “P”, onde o elemento de solda é representado por um elemento de casca igual ao utilizado para modelar o restante da geometria, sendo um único elemento utilizado para representar toda sua linha de atuação, de acordo com as recomendações de modelagem apresentadas por Fransson e Pettersson, 2000;
- A representação denominada tipo “R”, onde a representação do elemento de solda é realizada por elementos rígidos fazendo a união entre chapas, de acordo com a metodologia proposta por Fayard et al. 2007.

Uma vez definidos os dois tipos distintos de representação para o elemento de solda, foram definidas as posições que seriam testadas para sua linha de atuação. Desse modo foram gerados três submodelos para cada um dos tipos de representação propostas. No primeiro submodelo, a linha de atuação do elemento de solda se encontra paralela à linha do cordão de solda no modelo sólido (cordão 3D), sendo essa linha somente transladada ao modelo de casca. No segundo submodelo, a linha de atuação é definida pelas dimensões das pernas da solda, as quais são mantidas iguais às do modelo sólido. Já o terceiro submodelo apresenta a linha de atuação do elemento de solda posicionada através da translação do centro de gravidade do cordão de solda. A Figura 5.4 ilustra o posicionamento da linha de atuação do elemento de solda de cada um dos submodelos.

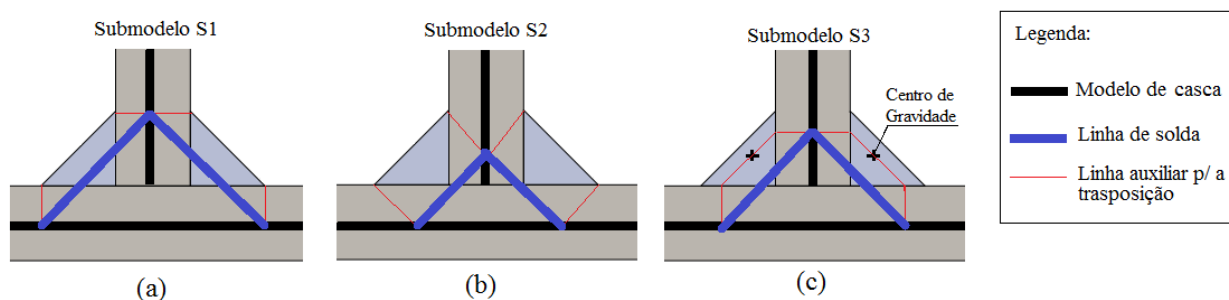


Figura 5.4 - Ilustração dos submodelos de acordo com a posição da linha de atuação do cordão de solda.

Os modelos em que o cordão de solda é construído a partir de elementos de casca (modelos tipo P), foram gerados de modo que a área de seção transversal do cordão de solda do modelo sólido fosse mantida no modelo de casca através de uma área retangular equivalente à área triangular original. Esse procedimento foi adotado de modo a procurar manter a rigidez do cordão de solda. A Tabela 5.1 apresenta as espessuras equivalentes das cascas que modelam os cordões de solda de modo a manter a rigidez transversal da união.

Tabela 5.1 - Espessura equivalente do elemento de solda de cada um dos submodelos de casca.

Modelo	Submodelo	Comprimento do elemento de solda [mm]	Área da seção do cordão de solda sólido [mm ²]	Espessura equivalente [mm]
P	S1	26,94	80,645	2,99
P	S2	17,96	80,645	4,49
P	S3	20,95	80,645	3,85

Nas simulações de modelos de casca, a metodologia empregada para a coleta da tensão consiste em obter diretamente da análise pelo MEF os valores da primeira tensão principal atuante na superfície de interesse. Sendo a tensão estrutural máxima medida, no modelo de casca, na posição em que se encontra o pé da solda (*hot spot*) no modelo sólido. Deve-se observar, então, que a tensão estrutural (σ_s) obtida através do modelo de casca não se encontra necessariamente na posição ocupada pela extremidade do elemento de solda do modelo de casca, mas sim onde se encontraria a extremidade do pé da solda do modelo sólido. A Figura 5.5 ilustra o local de obtenção de σ_s em cada um dos submodelos de casca.

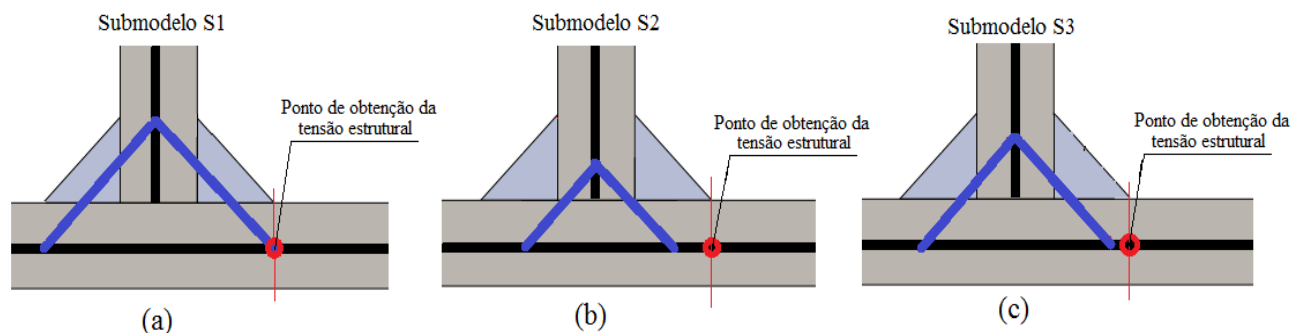


Figura 5.5 - Representação dos pontos de obtenção da tensão estrutural em cada um dos submodelos de casca.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as simulações foram executadas em um software comercial de elementos finitos, as especificações referentes aos tipos e configurações de elementos utilizados em cada um dos modelos são apresentadas no Apêndice I. Todos os modelos foram gerados considerando como material isotrópico um aço estrutural genérico com módulo de elasticidade igual a 210 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3. A tensão obtida em todas as simulações é a 1ª tensão principal como citado anteriormente, a mesma é coletada na superfície superior da chapa horizontal imposta à tração.

6.1 Resultados do Modelo de Sólido

O modelo sólido foi simulado com quatro tamanhos de malhas diferentes, de modo a verificar qual a sensibilidade do modelo ao tamanho de elemento. A Figura 6.1 apresenta as quatro malhas analisadas. A Tabela 6.1 apresenta o comportamento da tensão medida de acordo com cada malha, bem como a convergência quanto ao deslocamento máximo sofrido pela estrutura.

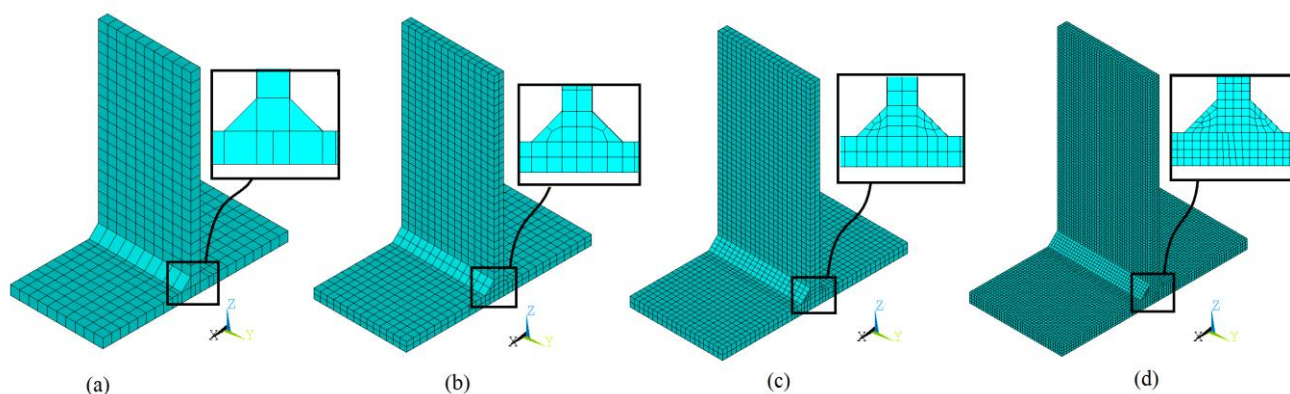


Figura 6.1 - Malhas geradas para o modelo sólido (a) Tamanho de elemento igual a 1 vez a espessura; (b) Tamanho de elemento igual a $\frac{3}{4}$ da espessura; (c) Tamanho de elemento igual a $\frac{1}{2}$ da espessura; (d) Tamanho de elemento igual a $\frac{1}{4}$ da espessura.

Tabela 6.1 - Sensibilidade ao tamanho do elemento.

Propriedades da malha		Análise quanto ao deslocamento		Análise quanto à tensão		
Tamanho do elemento [função de t]	Tamanho do elemento [mm]	Deslocamento máximo [m]	Diferença em relação à malha anterior	Primeira tensão principal em $\delta=1,0 \cdot t$ [Pa]	Primeira tensão principal em $\delta=0,4 \cdot t$ [Pa]	Diferença em relação à malha anterior para $\delta=0,4 \cdot t$ [Pa]
1	12,7	0,001203	-	2,5922E+07	3,0171E+07	-
0,75	9,525	0,001217	1,16%	2,5835E+07	2,9694E+07	1,58%
0,50	6,35	0,001223	0,49%	2,5720E+07	2,9909E+07	0,72%
0,25	3,175	0,001225	0,16%	2,5716E+07	3,0000E+07	0,30%

Pela Tabela 6.1 é possível perceber a tendência à estabilização da tensão medida, a Figura 6.2 evidência esse comportamento. Mesmo com uma leve flutuação, a diferença relativa para a tensão entre as diferentes malhas é baixa (de 1,58% a 0,3%) e a para o deslocamento máximo é ainda menor (de 1,16% a 0,16%). Desse modo, os pontos de obtenção situados a $\delta = 1,0 \cdot t$ e $\delta = 0,4 \cdot t$ se mostram insensíveis ao pico de tensão existente próximo ao ponto de *hot spot*, assim conseguindo desconsiderar a região influenciada pela descontinuidade geométrica que é o pé da solda. Isso fica visível na Figura 6.3, apresentada posteriormente, onde se percebe que a tensão na região entre deltas apresenta a mesma tendência de comportamento que na região que a precede.

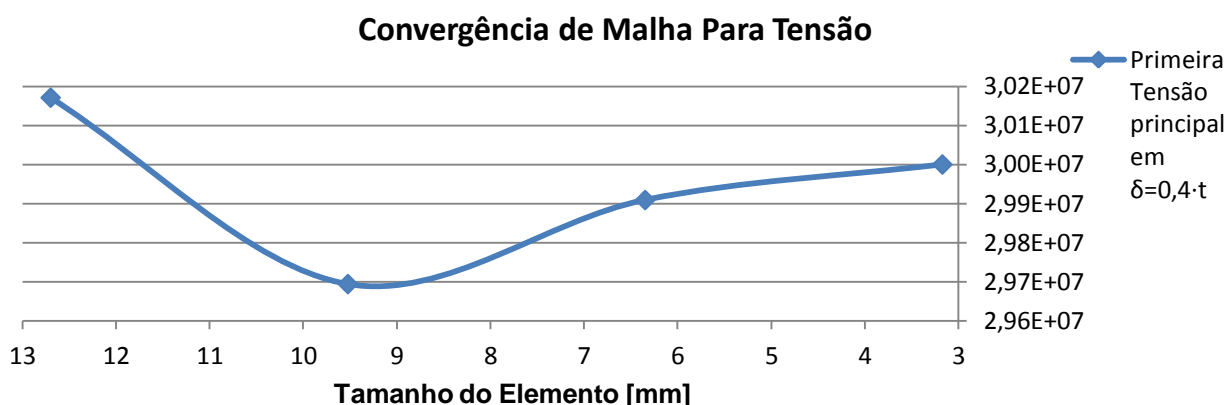


Figura 6.2 - Gráfico do comportamento da tensão em função do tamanho do elemento.

Após a análise de sensibilidade do modelo ao tamanho do elemento, foi selecionada a simulação com a malha com tamanho de elemento igual $\frac{1}{4}$ da espessura para análise da tensão. Após a coleta e tratamento de dados, foi gerada a Figura 6.3, a qual apresenta o gráfico da 1ª tensão principal pela distância até o pé da solda (*hot spot*). Através dessa imagem é possível verificar que após a extrapolação o valor da tensão estrutural (σ_s) obtido foi de aproximadamente 32,83 MPa. Esse será o valor utilizado para futura comparação com os modelos de casca. Resultados complementares para cada região de análise são apresentados no Apêndice II.

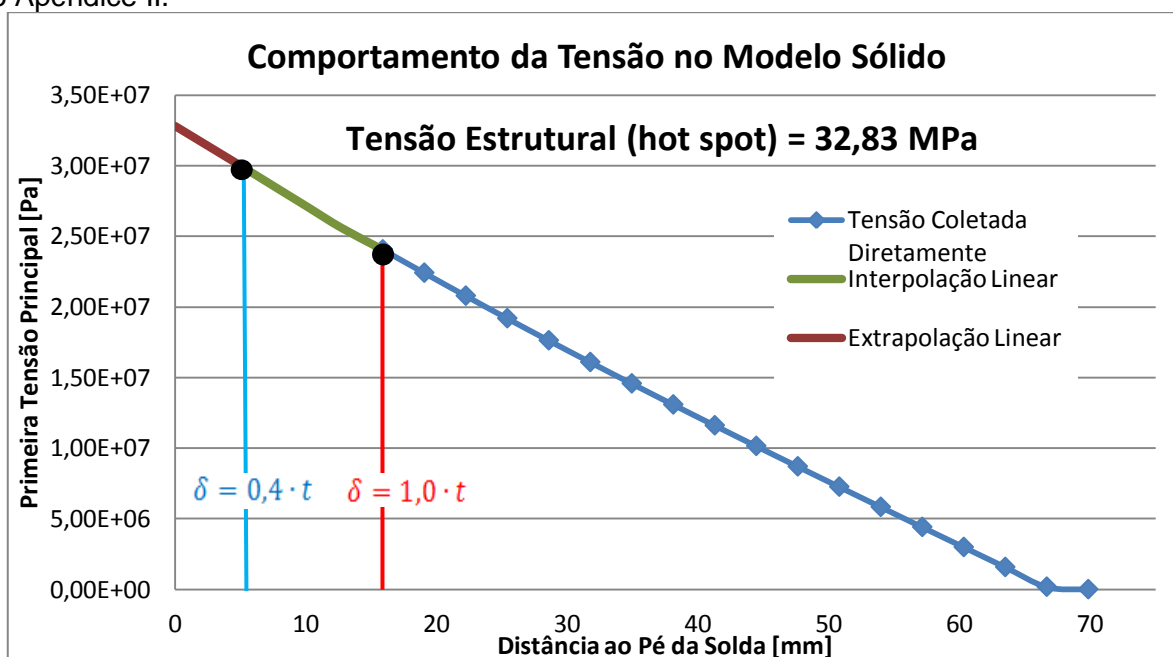


Figura 6.3 - Gráfico da tensão atuante no modelo sólido.

A Figura 6.4 apresenta o campo de deslocamentos atuante sobre o modelo sólido. A Figura 6.5 ilustra os resultados para a 1ª tensão principal, nessa imagem é apresentado, em detalhe, o campo de tensão atuante somente na lateral da chapa, sob tração, utilizada para análise. O detalhe presente na Figura 6.5 compreende a região que vai da metade da chapa até a região em que $\delta = 0,4 \cdot t$. Tendo em vista, que o presente trabalho buscou analisar as melhores maneiras de se modelar uniões soldadas para o emprego dessas técnicas de modelagem em simulações numéricas pela indústria, os resultados obtidos e utilizados foram trabalhados na forma de soluções nodais, as quais são amplamente utilizadas na indústria. Contudo, vale salientar que desse modo os resultados visualizados estão suavizados.

NODAL SOLUTION

STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 USUM (AVG)
 RSYS=0
 DMX =.001225
 SMX =.001225

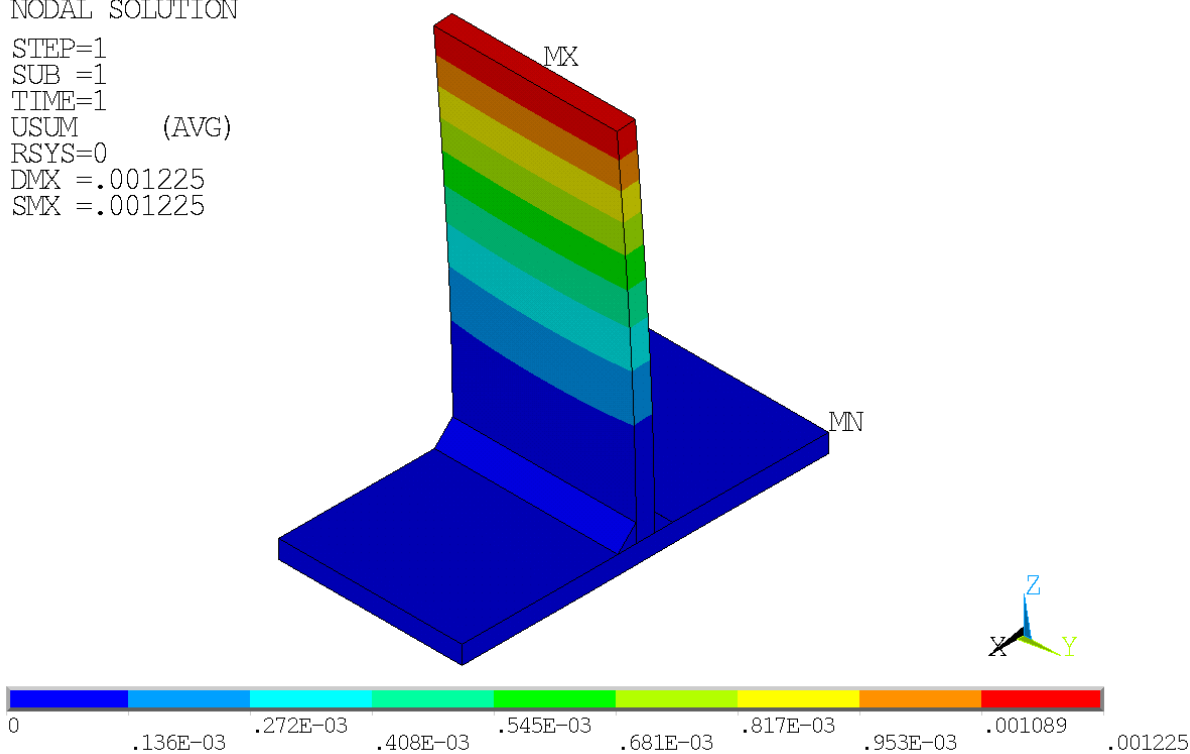


Figura 6.4 - Campo de deslocamentos no modelo sólido [m].

NODAL SOLUTION

STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 S1 (AVG)
 DMX =.165E-04
 SMN =-.617E+07
 SMX =.301E+08

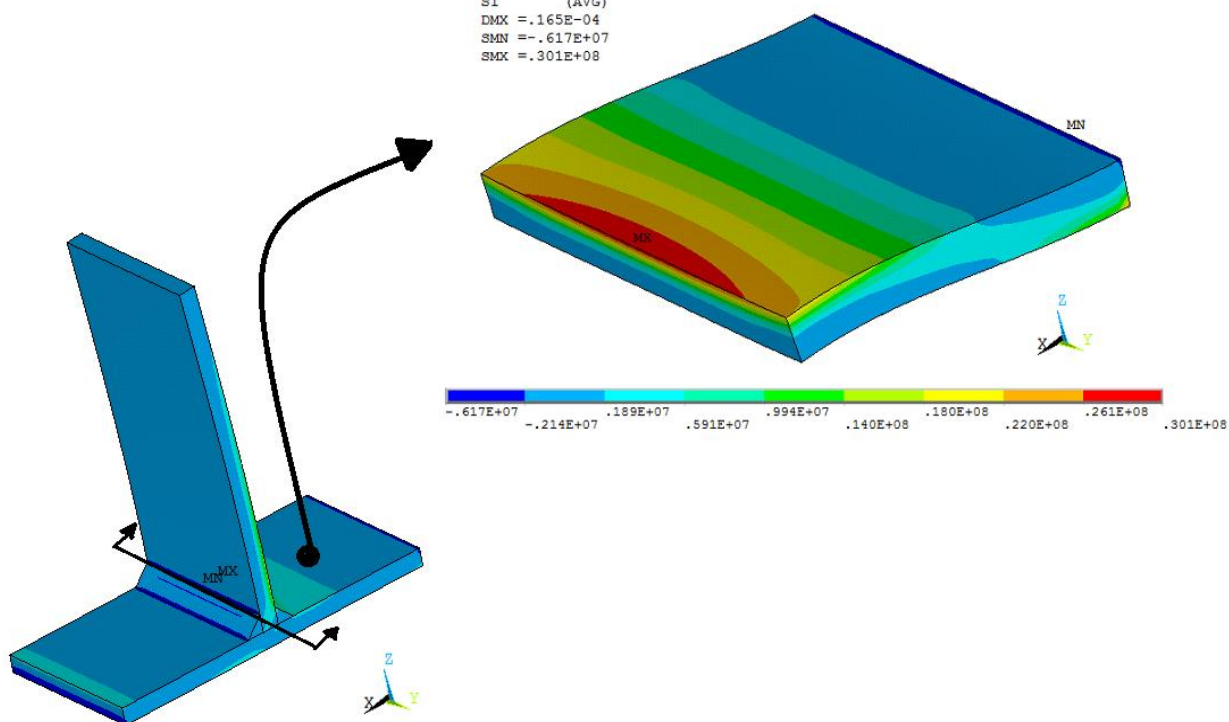


Figura 6.5 - Comportamento da 1ª tensão principal na lateral de análise, com detalhe para a região compreendida entre o ponto de engaste a o ponto onde $\delta = 0,4 \cdot t$ [Pa].

6.2 Resultados dos Modelos de Casca

Os modelos de casca analisados também foram simulados com diferentes tamanhos de malhas de elementos finitos, contudo somente são apresentados os resultados com malhas de tamanho de elemento igual da $\frac{1}{2}$ da espessura da chapa. As simulações com essa malha apresentaram resultados com distribuições de tensão suaves, sem acarretar em incrementos elevados do tempo computacional necessário para as simulações.

A partir das configurações de modelagem da solda, previamente sugeridas, foram gerados seis modelos diferentes, sendo três desses gerados com soldas modeladas por elementos de casca (modelo tipo P) e três com soldas modeladas por elementos rígidos (tipo R). Tanto os modelos tipo R quanto os tipo P englobam cada um dos submodelos S1, S2 e S3. A Figura 6.6 apresenta os seis modelos de casca gerados já com suas respectivas malhas de elementos finitos.

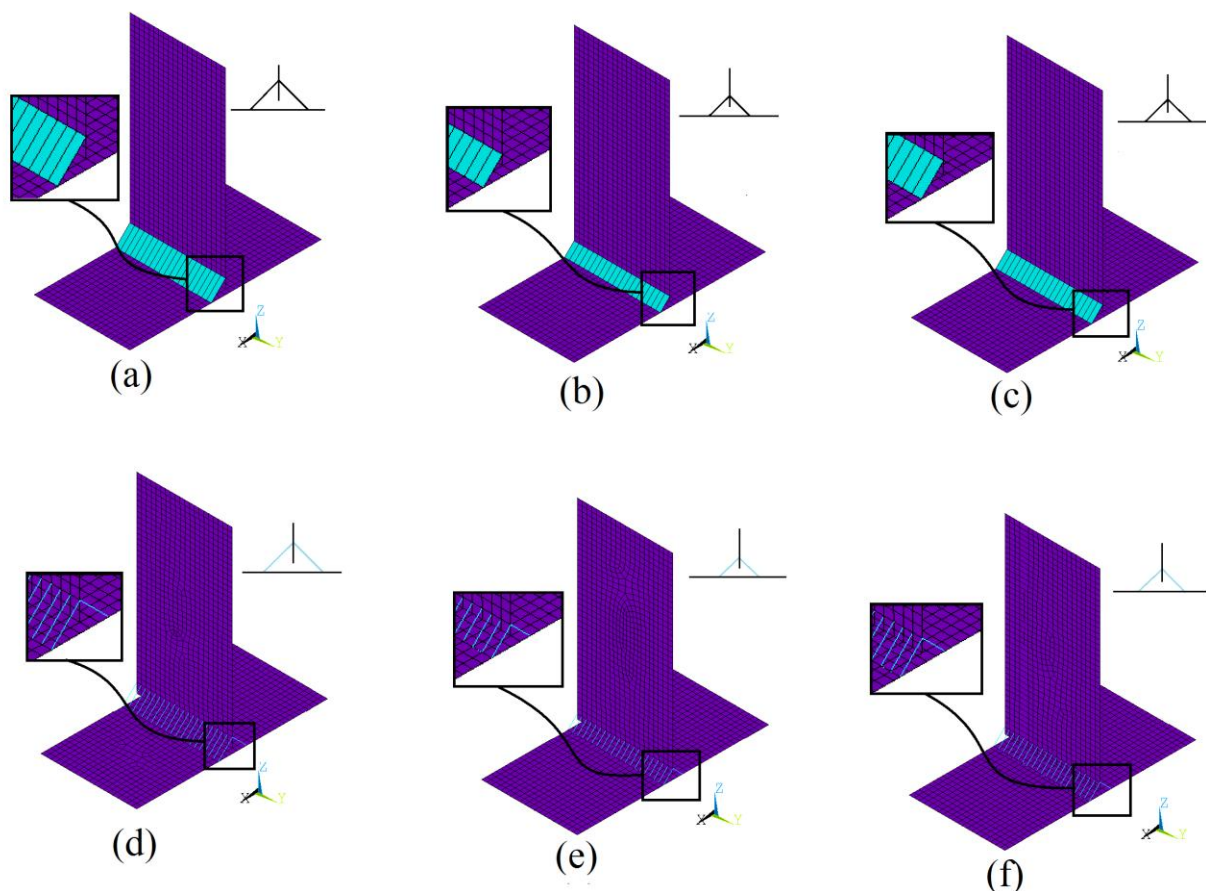


Figura 6.6 - Modelos de casca gerados, (a) P_S1; (b) P_S2; (c) P_S3; (d) R_S1; (e) R_S2; (f) R_S3.

A Figura 6.7 apresenta os resultados da 1ª tensão principal calculada para os seis modelos analisados, as curvas da tensão são plotadas somente na faixa final de medição (próxima ao ponto de *hot spot*). Os dados completos da 1ª tensão principal em função da distância até a região de *hot spot* são apresentados na Tabela 6.2, sendo a última linha desta tabela (distância ao *hot spot* igual a zero) igual à tensão estrutural (σ_s) fornecida pelo respectivo modelo correspondente. Gráficos do comportamento da 1ª tensão principal em função da distância até o ponto de obtenção de σ_s , para cada um dos modelos de casca simulados, são apresentados de forma individual no Apêndice III.

Tabela 6.2 - Resultados para os modelos de casca.

Distância ao ponto de obtenção da tensão estrutural [mm]	Primeira Tensão Principal [Pa]					
	Modelo P_S1	Modelo P_S2	Modelo P_S3	Modelo R_S1	Modelo R_S2	Modelo R_S3
107,95	1,934E+07	1,925E+07	1,929E+07	1,824E+07	1,854E+07	1,845E+07
101,6	1,652E+07	1,645E+07	1,649E+07	1,528E+07	1,579E+07	1,569E+07
95,25	1,369E+07	1,363E+07	1,366E+07	1,242E+07	1,301E+07	1,291E+07
88,9	1,084E+07	1,080E+07	1,083E+07	9,562E+06	1,021E+07	1,011E+07
82,55	7,999E+06	7,963E+06	7,987E+06	6,933E+06	7,401E+06	7,306E+06
76,2	5,168E+06	5,140E+06	5,160E+06	4,306E+06	4,601E+06	4,511E+06
69,85	2,352E+06	2,330E+06	2,347E+06	1,598E+06	1,809E+06	1,723E+06
63,5	1,198E+06	1,228E+06	1,209E+06	1,875E+06	1,624E+06	1,706E+06
57,15	4,053E+06	4,076E+06	4,060E+06	4,681E+06	4,412E+06	4,491E+06
50,8	6,921E+06	6,934E+06	6,922E+06	7,512E+06	7,205E+06	7,283E+06
44,45	9,814E+06	9,813E+06	9,806E+06	1,038E+07	1,001E+07	1,009E+07
38,1	1,275E+07	1,273E+07	1,273E+07	1,330E+07	1,285E+07	1,292E+07
31,75	1,574E+07	1,569E+07	1,570E+07	1,629E+07	1,572E+07	1,580E+07
25,4	1,883E+07	1,872E+07	1,875E+07	1,940E+07	1,864E+07	1,873E+07
19,05	2,203E+07	2,184E+07	2,189E+07	2,263E+07	2,164E+07	2,173E+07
12,7	2,538E+07	2,507E+07	2,515E+07	2,597E+07	2,471E+07	2,481E+07
6,35	2,891E+07	2,843E+07	2,856E+07	2,961E+07	2,788E+07	2,797E+07
0	3,265E+07	3,192E+07	3,212E+07	3,369E+07	3,113E+07	3,120E+07

Modelos de Placas

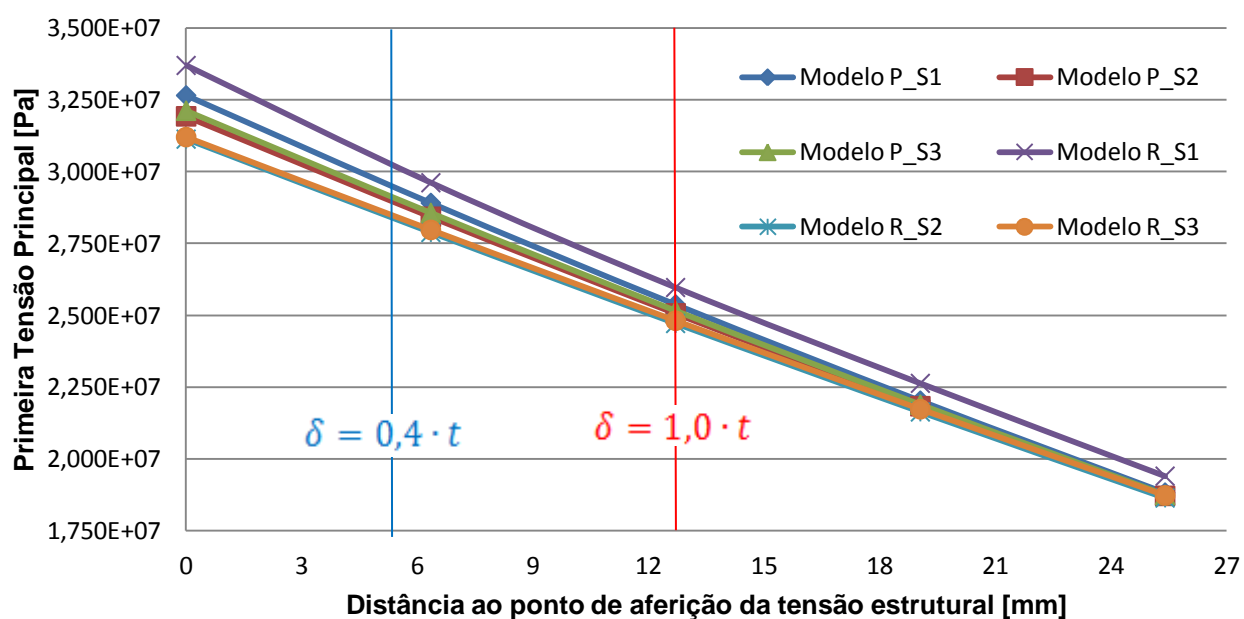


Figura 6.7 - Comportamento da tensão na para cada um dos modelos de casca, na região próxima ao hot spot.

6.3 Comparações de Resultados

A Tabela 6.3 apresenta de forma comparativa os resultados para a tensão estrutural e o deslocamento máximo, para cada um dos modelos simulados.

Tabela 6.3 - Comparação entre modelos.

Modelo	Tensão Estrutural [Pa]	Diferença para o modelo sólido	Deslocamento Máximo [m]	Diferença para o modelo sólido
Sólido	3,283E+07	-	0,001225	-
P_S1	3,265E+07	-0,56%	0,00432	252,65%
P_S2	3,192E+07	-2,77%	0,002057	67,92%
P_S3	3,212E+07	-2,18%	0,002543	107,59%
R_S1	3,369E+07	2,62%	0,001154	-5,80%
R_S2	3,113E+07	-5,19%	0,00127	3,67%
R_S3	3,120E+07	-4,97%	0,001236	0,90%

Quando os modelos são comparados puramente quanto à tensão estrutural obtida, se percebe uma leve superioridade dos modelos em que o cordão de solda é modelado através de elementos de casca (modelos tipo P). Contudo ao se realizar a comparação levando em conta o deslocamento máximo sofrido pela estrutura, se percebe a elevada superioridade dos modelos tipo R (cordão de solda modelado por elementos rígidos). O modelo R_S3 é o que apresenta um comportamento mais equilibrado quanto à reprodutividade dos resultados obtidos pelo modelo sólido. Desse modo, para essa simulação, essa é a metodologia de modelagem, de uniões soldadas por elementos de casca, recomendada.

O que ocorre é a subestimação da rigidez da solda, quando a mesma é modelada através de elementos de casca. A espessura desses elementos foi calculada de maneira a manter uma área que seria equivalente à área de seção transversal do cordão de solda do modelo sólido, porém essa equivalência da rigidez não se mostrou eficaz ao modelar uma estrutura soldada sob esse carregamento. A geração de modelos com diferentes espessuras de elemento poderia contornar esse problema e gerar resultados coerentes em termos de deslocamentos. Porém, alterações drásticas na espessura do elemento da solda, apesar de serem capazes de melhorar os resultados de deslocamentos, certamente iriam piorar os resultados quanto à tensão. Análises com outras espessuras seriam interessantes, contudo, não foram realizadas.

6.4 Teste com Novo Modo de Carregamento

Após a comparação entre modelos, pode-se considerar o modelo R_S3 como a melhor abordagem quanto à modelagem de uniões soldadas. Porém ainda se faz necessária uma análise em outro modo de carregamento, de modo a investigar se as técnicas de modelagem sugeridas por esse modelo independem do modo de carregamento. Tendo isso em vista, o modelo sólido e o modelo R_S3 foram simulados novamente, as novas simulações apresentam como única diferença das simulações anteriores, o modo de carregamento. A carga agora é aplicada no sentido positivo do eixo z, e não mais no eixo x, como no caso de carregamento anterior.

As técnicas de coleta e tratamento da 1ª tensão principal seguem as mesmas metodologias adotadas anteriormente. A Figura 6.8 apresenta as novas condições de contorno aplicadas nos dois modelos, a malha de elementos finitos de cada modelo também é visível nessa imagem.

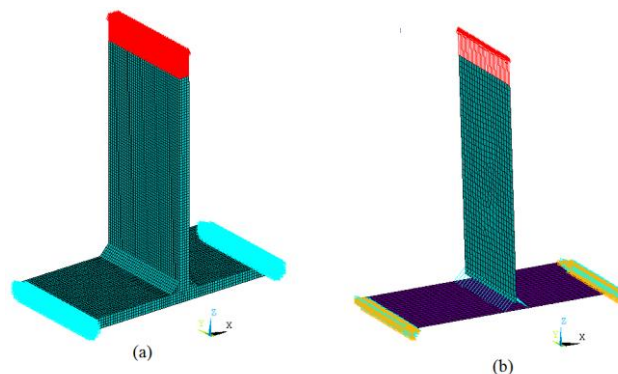


Figura 6.8 - Novo modo de carregamento, (a) Modelo sólido; (b) Modelo R_S3.

Os resultados para a 1ª tensão principal são apresentados nas Figuras 6.9 e 6.10.

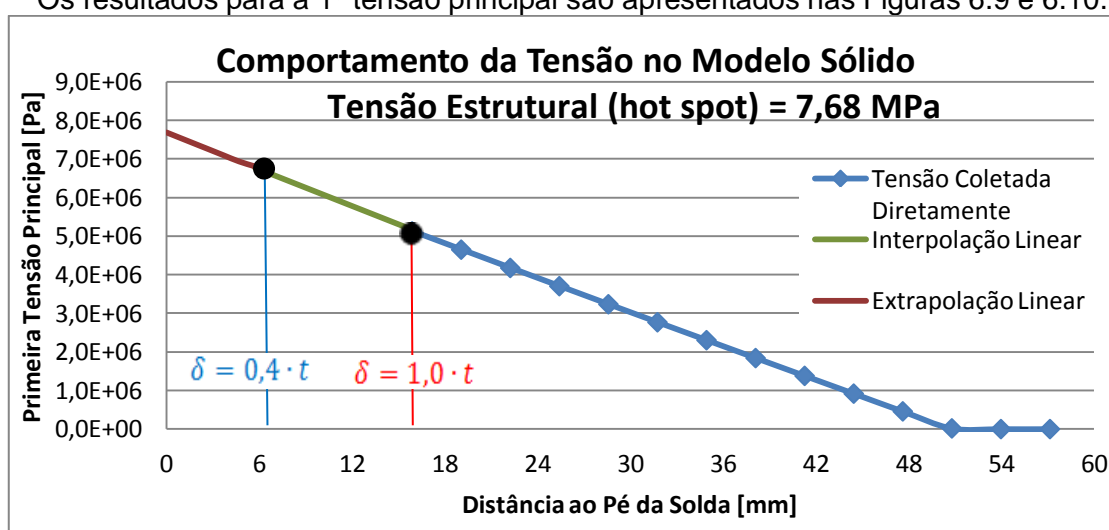


Figura 6.9 - Comportamento da 1ª tensão principal para o modelo sólido.

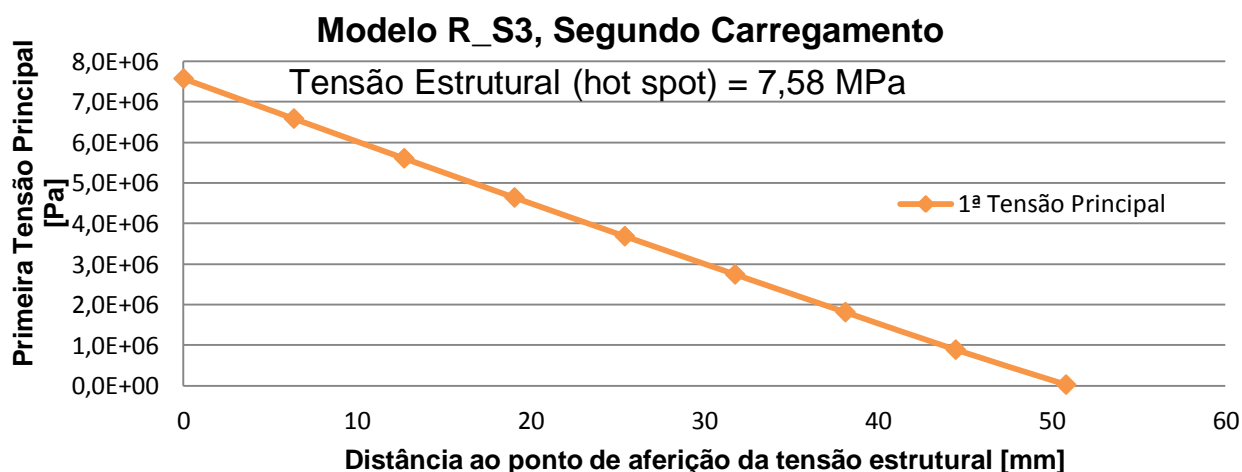


Figura 6.10 - Comportamento da 1ª tensão principal para o modelo R_S3.

Os resultados obtidos apresentam uma diferença de 1,36% quanto ao valor da tensão estrutural (σ_s). Para o valor do deslocamento máximo sofrido pela estrutura a diferença foi praticamente inexistente. Essa elevada concordância entre resultados evidencia a provável independência ao modo de carregamento, por parte do método de modelagem apresentado pelo modelo R_S3. Contudo, mais testes com diferentes modos de carregamento são

necessários para comprovar de fato essa insensibilidade ao modo de carregamento. Uma análise completa de resultados, para o segundo modo de carregamento imposto a todos os modelos construídos, é apresentada no Apêndice IV.

7. CONCLUSÕES

Em simulações numéricas para determinação da vida em fadiga, a modelagem da estrutura e do filete de solda por elementos de casca só é uma boa opção, se a estrutura a ser modelada for simples, sem múltiplas soldas, e se os resultados quanto ao deslocamento não forem de interesse. Em casos de estruturas complexas (casos mais comuns de se encontrar na indústria), o método sugerido é o de se modelar a estrutura por elementos de casca e os cordões de solda por elementos rígidos, com a linha de ação do elemento de solda sendo posicionada conforme o modelo R_S3.

De maneira geral, dos modelos apresentados, os com representação do cordão de solda através de elementos rígidos (tipo R) se mostraram superiores aos que utilizam puramente elementos de casca. As simulações realizadas demonstraram que os modelos tipo R conseguem reproduzir com boa fidelidade (diferença entre 2,62% e 5,19%) o estado de tensão obtido por um modelo sólido equivalente. Dos seis modelos testados, o que conseguiu reproduzir os melhores resultados foi o modelo R_S3, sendo essa a metodologia recomendada para análises por elementos finitos de uniões soldadas.

Uma análise da vida em fadiga de uma união soldada, modelada através das recomendações sugeridas pelo modelo R_S3, seria capaz de fornecer mais informações quanto à validade das técnicas sugeridas por esse modelo. Contudo, tal análise não foi realizada, sendo assim sugerida para trabalhos futuros. Uma análise experimental também é sugerida para análises futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS, “**ANSYS Multiphysics Documentation – Theory Reference**”, 2011.
- Dong, P.; “**A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Analysis of Welded Joints**”, International Journal of Fatigue, Elsevier, pp 865-876, 2001.
- Fayard, J. L., Bignonnet, A., Dang Van, K.; “**Fatigue Design of Welded Thin Sheet Structures**”, Fatigue Structural Integrity Society, Elsevier, pp 145-152, 2007.
- Fransson, P., Pettersson, G.; “**Fatigue Life Prediction Using Forces in Welded Plates of Moderate Thickness**”, Tese de Mestrado, Universidade de Karlskrona, Suécia, 2000.
- Fricke, W.; “**Recommended Hot Spot Analyses Procedure for Structural Details of FPSOs AND Ships Based on Round-Robin FE Analyses**”, 2003.
- Fricke, W.; “**Fatigue Analyses of Welded Joints: State of Development**”, Marine Structures, Elsevier, pp 185-200, 2002.
- Machado, I. G.; “**Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**”, Brasil, 1ª edição, 1996.
- O'Brien, R. L.; “**Welding Handbook AWS**”, Vol. 3, Miami, 8ª edição, 1991.
- Taylor, D., Barret, N., Lucano, G.; “**Some New Methods for Predicting Fatigue in Welded Joints**”, International Journal of Fatigue, Elsevier, pp 509-518, 2001.
- Wentz, A. V.; “**Simulações de Soldagem por Arco e Resistência Elétrica Utilizando o Método dos Elementos Finitos**”, Tese de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

I APÊNDICE

A geração do modelo sólido foi realizada com a utilização do elemento de denominação comercial SOLID186. Esse é um elemento de alta ordem 3-D de 20 nós (possui “*midside nodes*”). O elemento formado por 20 nós possui três graus de liberdade por nó: translações nodais nas direções x, y, e z. Esse elemento suporta plasticidade, hiperelasticidade, deformação, deformação na espessura, alta deflexão além de comportar alta tensão. A forma utilizada do SOLID186 na simulação foi a hexaédrica homogênea, a qual é de boa aplicação para modelagem de malhas irregulares (como as produzidas em vários softwares de CAD) [ANSYS, 2011]. A formulação de integração empregada foi a integração uniforme reduzida, essa escolha previne o travamento volumétrico da malha.

A geração dos modelos de casca se deu através do emprego de dois elementos diferentes, os modelos tipo P utilizam somente elementos de casca, já os modelos tipo R empregam elementos de casca e rígidos. O elemento de casca empregado nesses modelos foi o SHELL 281. Esse é um elemento de alta ordem de 8 nós (possui “*midside nodes*”), com seis graus de liberdade por nó: três em translações nodais e três em rotações nodais, todas em relação aos eixos x, y e z. O elemento representa bem chapas de espessura fina à moderada. [ANSYS, 2011]. O elemento foi empregado em sua forma quadrática com formulação comportando esforços de membrana e de flexão.

O elemento rígido utilizado nos submodelos tipo R foi o MPC 184 (*Multipoint Constraint Element*), o mesmo foi empregado com sua formulação de elemento de viga rígido. Esse elemento é utilizado para simulação de uniões rígidas (indeformáveis) ligando dois ou mais elementos deformáveis, o elemento rígido atuando transmitindo somente forças e momentos. O elemento foi configurado com o método da eliminação direta, nesse método as restrições cinemáticas são impostas internamente pelas equações geradas pelo MPC. Os graus de liberdade de um nó dependente das equações do MPC são eliminados em favor de um nó independente [ANSYS, 2011].

A Figura I.1 apresenta as configurações geométricas dos elementos empregados nas análises.

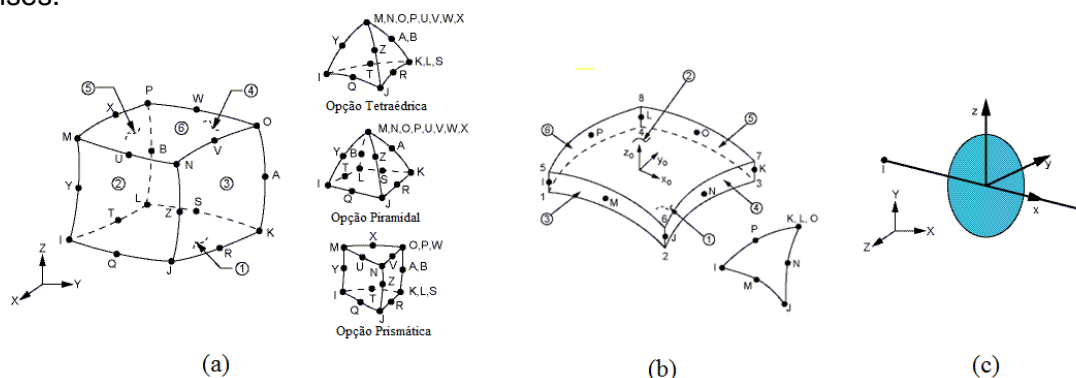


Figura I.1 - Elementos empregados, (a) SOLID 186; (b) SHELL 281; (c) MPC 184 – rigid beam.

A Tabela I.1 apresenta as linhas de comando necessárias para configurar cada um dos elementos empregados nas análises realizadas.

Tabela I.1 - Rotinas de configuração para os elementos empregados.

	!SOLID 186	!SHELL 281	!MPC 184
Linhas de Comando	alls	alls	alls
	/prep7	/prep7	/prep7
	et,1,solid186	et,1,shell281	et,1,mpc184
	keyopt,1,2,0	keyopt,1,1,0	keyopt,1,1,1
	keyopt,1,3,0	keyopt,1,2,0	keyopt,1,2,0
	keyopt,1,6,0	keyopt,1,4,0	
		keyopt,1,8,0	

II APÊNDICE

A seguir são apresentados os gráficos do comportamento da tensão para o modelo sólido em cada uma das suas diferentes regiões de coleta de tensão. As Figuras II.1, II.2 e II.3 apresentam o comportamento nas fases de: obtenção direta, interpolação linear e extrapolação linear, respectivamente.

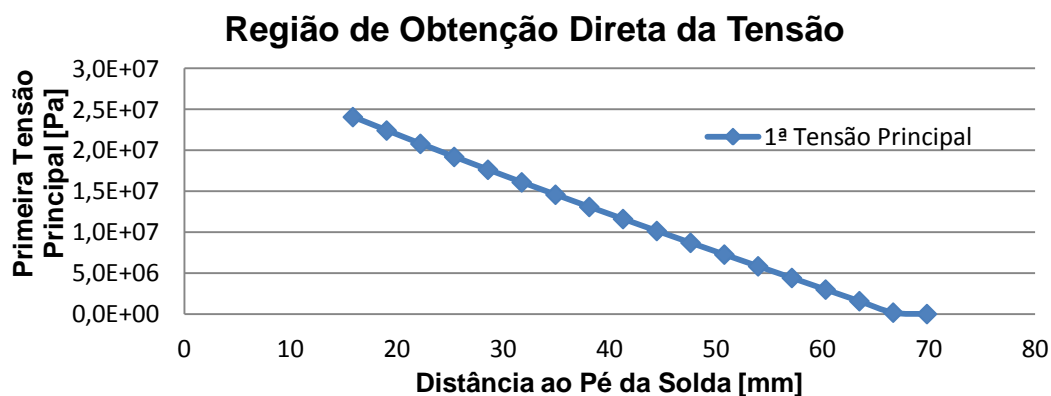


Figura II.1 - Fase de coleta direta da tensão no modelo sólido.

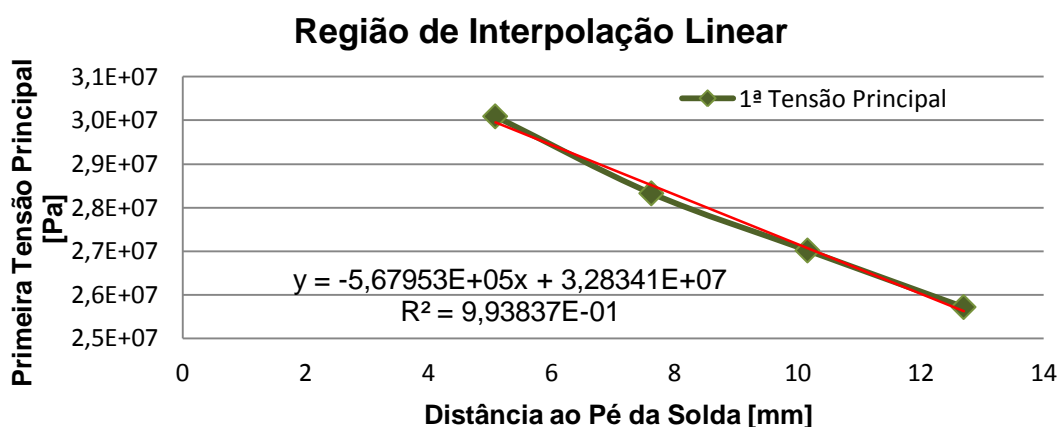


Figura II.2 - Fase de interpolação linear da tensão no modelo sólido.

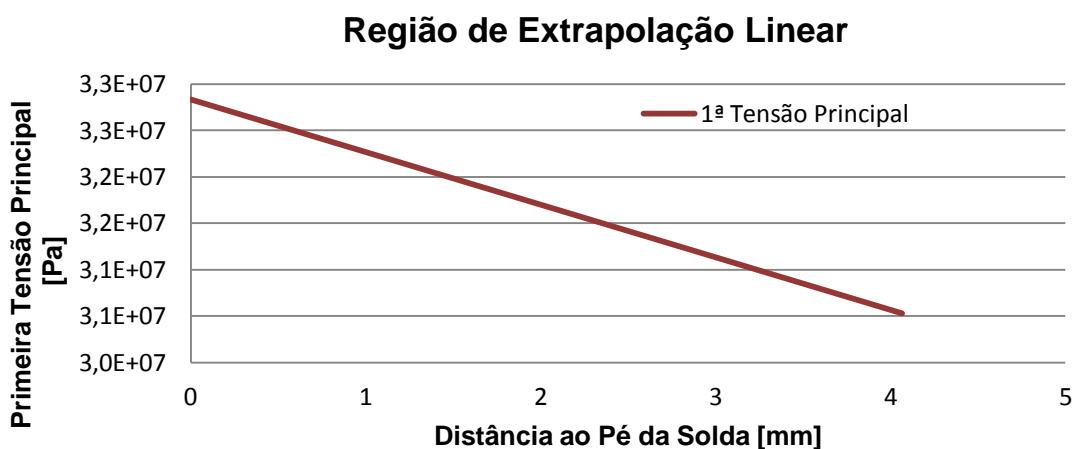


Figura II.3 - Fase de extrapolação linear da tensão através da equação obtida na Figura II.2.

III APÊNDICE

Gráficos do comportamento da 1ª tensão principal em função da distância até o ponto de obtenção de σ_s , para cada um dos modelos de casca simulados, são apresentados na Figura III.1, Figura III.2 e Figura III.3.

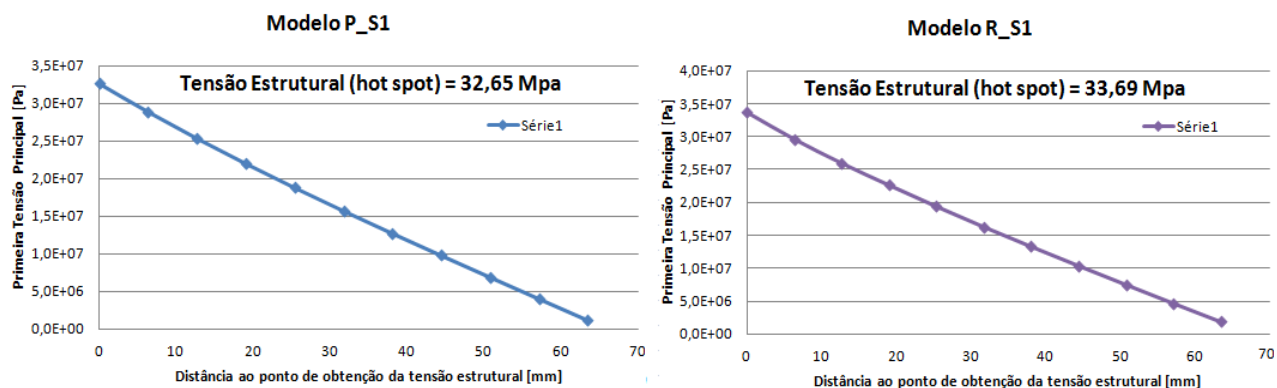


Figura III.1 - Tensão principal para os modelos P_S1 e R_S1.

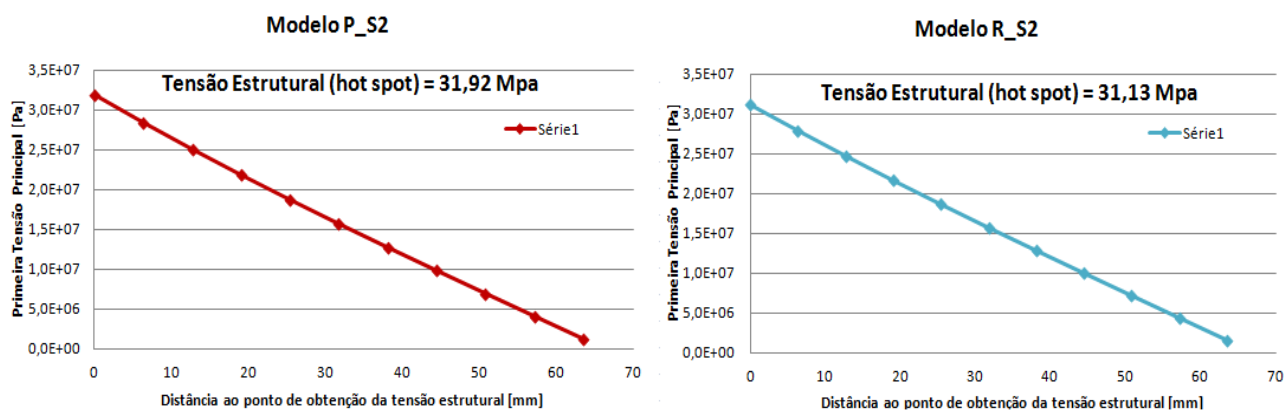


Figura III.2 - Tensão principal para os modelos P_S2 e R_S2.

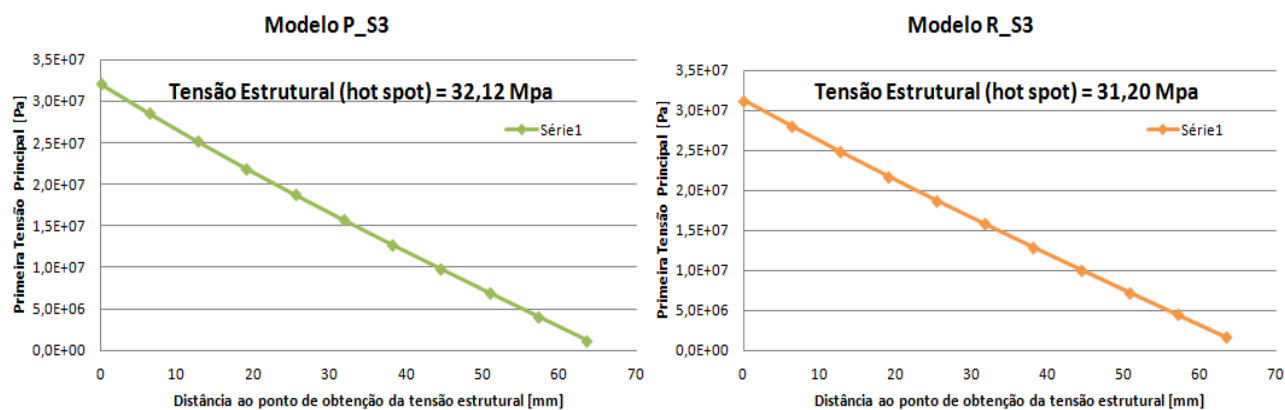


Figura III.3 - Tensão principal para os modelos P_S3 e R_S3.

IV APÊNDICE

A seguir são apresentados, de forma comparativa, os resultados complementares para os modelos simulados sob a imposição do segundo modo de carregamento. A Tabela IV.1 apresenta os valores da 1ª tensão principal em função da distância até o ponto de obtenção da tensão estrutural. A Tabela IV.2 apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos para cada um dos seis modelos de casca em relação aos obtidos para o modelo sólido.

Tabela IV.1 - Resultados para os modelos de casca sob o segundo modo de carregamento.

Distância ao ponto de aferição da tensão estrutural [mm]	SEGUNDO MODO DE CARREGAMENTO					
	Primeira Tensão Principal [Pa]					
	Modelo P_S1	Modelo P_S2	Modelo P_S3	Modelo R_S1	Modelo R_S2	Modelo R_S3
107,95	9,45E+06	9,53E+06	9,51E+06	8,30E+06	8,81E+06	8,68E+06
101,6	8,44E+06	8,52E+06	8,50E+06	7,26E+06	7,80E+06	7,68E+06
95,25	7,44E+06	7,51E+06	7,49E+06	6,26E+06	6,80E+06	6,68E+06
88,9	6,44E+06	6,51E+06	6,50E+06	5,26E+06	5,81E+06	5,69E+06
82,55	5,46E+06	5,53E+06	5,52E+06	4,35E+06	4,83E+06	4,71E+06
76,2	4,50E+06	4,57E+06	4,55E+06	3,45E+06	3,88E+06	3,76E+06
69,85	3,55E+06	3,62E+06	3,60E+06	2,53E+06	2,93E+06	2,81E+06
63,5	2,62E+06	2,69E+06	2,67E+06	1,61E+06	2,00E+06	1,88E+06
57,15	1,69E+06	1,76E+06	1,75E+06	6,83E+05	1,07E+06	9,52E+05
50,8	7,74E+05	8,42E+05	8,26E+05	2,52E+05	1,49E+05	29989
44,45	2,84E+05	1,90E+05	2,12E+05	1,18E+06	7,72E+05	8,92E+05
38,1	1,21E+06	1,11E+06	1,13E+06	2,10E+06	1,70E+06	1,82E+06
31,75	2,14E+06	2,03E+06	2,06E+06	3,04E+06	2,63E+06	2,75E+06
25,4	3,07E+06	2,96E+06	2,99E+06	3,99E+06	3,57E+06	3,69E+06
19,05	4,02E+06	3,90E+06	3,93E+06	4,94E+06	4,52E+06	4,65E+06
12,7	4,99E+06	4,86E+06	4,89E+06	5,90E+06	5,48E+06	5,61E+06
6,35	5,99E+06	5,84E+06	5,88E+06	6,91E+06	6,47E+06	6,59E+06
0	7,01E+06	6,85E+06	6,89E+06	7,95E+06	7,46E+06	7,58E+06

Tabela IV.2 - Comparação entre modelos sob o segundo modo de carregamento.

SEGUNDO MODO DE CARREGAMENTO				
Modelo	Tensão Estrutural [Pa]	Diferença para o modelo sólido	Deslocamento Máximo [m]	Diferença para o modelo sólido
Sólido	7,685E+06	-	1,460E-05	-
P_S1	7,015E+06	8,73%	1,709E-05	17,05%
P_S2	6,849E+06	10,88%	1,78E-05	21,78%
P_S3	6,894E+06	10,30%	1,758E-05	20,41%
R_S1	7,950E+06	-3,44%	1,256E-05	-13,97%
R_S2	7,458E+06	2,96%	1,464E-05	0,27%
R_S3	7,581E+06	1,36%	1,461E-05	0,07%

V APÊNDICE

A Tabela V.1 apresenta as configurações gerais do computador utilizado para a realização das simulações efetuadas.

Tabela V.1 - Características gerais do computador empregado nas simulações.

Processador	Dual Core Intel i5 52M, 2833 MHz (21 X 135)
Placa Mãe	Intel Ibex Peak-M HM55, Intel Arrandale
Arquitetura dos Processadores	64 bits
Memória Livre Disponível HD	230 GB
Memória do Sistema RAM	4021 MB
Placa de Vídeo	NVIDIA GeForce 335M (1024 MB)
Threads Dedicados ao Software de EF	3
Memória Dedicada ao Software de EF	3500 MB

A Tabela V.2 apresenta de forma comparativa o tempo necessário para a simulação de cada um dos modelos analisados, bem como o tamanho em disco ocupado pelos mesmos.

Tabela V.2 - Características

Modelo	Elementos Empregados	Tamanho do Modelo [Graus de Liberdade]	Tempo Total Decorrido [s]*	Tamanho Ocupado por Arquivos (Após Análise) [bytes]
Sólido	SOLID 186	390.228	500	706.510.672
P_S1	SHELL 281	30.012	6	34.038.539
P_S2	SHELL 281	30.012	8	34.048.438
P_S3	SHELL 281	30.756	7	34.833.617
R_S1	SHELL 281 e MPC 184	29.652	7	35.827.449
R_S2	SHELL 281 e MPC 184	29.928	6	36.092.761
R_S3	SHELL 281 e MPC 184	30.114	8	36.356.627

*Valores referentes ao tempo total necessário para que o software importe as geometrias, gere as malhas de elementos finitos, aplique as condições de contorno, resolva o problema de elementos finitos e gere os arquivos de resultados.

Pela Tabela V.2 é possível perceber que a diferença de tempo necessário para a solução do modelo sólido e para os modelos de casca é bastante elevada, sendo que o tempo de solução do modelo sólido é aproximadamente 63 vezes o tempo necessário para a solução do modelo de casca mais demorado. O espaço computacional requerido pelo modelo sólido também é muito superior quando comparado com os modelos de casca, sendo aproximadamente 19 vezes maior, que o maior dos modelos de casca.