

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 – VALIDAÇÃO DE CASOS DE CISLHAMENTO

por

Ian Matos Bauer

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, Dezembro 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 – VALIDAÇÃO DE CASOS DE CISALHAMENTO

por

Ian Matos Bauer

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.

Prof.

Prof.

Porto Alegre, 03 de Dezembro de 2012.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, João e Ivonete. Dedico algo mais do que este trabalho, dedico a eles o significado presente nele. A conquista de um projeto o qual eles investiram tanto tempo, amor e sacrifícios durante suas vidas para que eu pudesse chegar onde estou agora. Obrigado.

Agradeço com muito carinho a todos os amigos que fizeram parte desse longo e difícil caminho repleto de conquistas em que nos últimos anos batalhamos juntos durante noites, finais de semanas e sempre com muita dedicação. Fica a saudade do eterno amigo que tão cedo nos deixou, grande irmão ligo, parte da família que conhecemos durante a vida.

Por último, mas não menos importante, agradeço à Stephanny, minha companheira, amiga, meu amor e sempre incansável apoio. Teu carinho, suporte e compreensão tornaram meu trajeto mais suave.

*"Pensar é o trabalho mais difícil que existe.
Talvez por essa razão tão poucas pessoas o façam"*

Henry Ford

Bauer, I. **Análise De Uniões Soldadas Através Do Método Da Tensão Estrutural Via Elementos Finitos – Validação de Casos de Cisalhamento**. 2012. 23p_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 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 submetida a esforços cisalhantes e torcionais, em análises separadas. Os resultados obtidos do modelo sólido foram utilizados como referência para análises posteriores utilizando modelos de casca, em que o filete de solda foi representado com elementos rígidos, assim como também por elementos de casca. As melhores estratégias para modelagem do filete de solda são destacadas a partir desta comparação. Os resultados sugerem que, apesar dos elementos de viga rígidos e de casca serem capazes de gerar resultados satisfatórios de tensões estruturais no pé da solda, os elementos rígidos mostram um resultado mais aproximado com o modelo sólido. Avaliando o deslocamento - paralelamente - percebemos a superioridade dos modelos representados por elementos rígidos sobre os de casca. A partir destes resultados, sugere-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.

Bauer, I. **Welded Joints Analysis Using the Finite Elements Method through the Hot Spot Approach – Validation of Shear Stress Cases**. 2012. 23p._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 between modeling techniques for numerical simulation of welded joints using the finite element method through the structural stress approach. A “T” shaped welded joint was modeled with solid elements and submitted to torsion and shear stress in separate analyses. Results obtained from the solids model were used as reference for subsequent analyses using plate elements where the weld fillet was represented with rigid, as well as flexible elements. The best strategies to model weld fillets are highlighted from this comparison. The results suggest that even though plate and rigid beam elements are able to deliver satisfactory structural stress at the weld hot spot, rigid beam elements show results that are slightly closer to the solid model. At the same time, the efficiency of rigid beam elements over plate ones in the simulation of weld seems checked. From these results some basic steps are suggested for the modeling of welded joints by plate elements for direct measurement of stress on welds.

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

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. MODELOS NUMÉRICOS ANALISADOS	2
4.1 MODELO SÓLIDO.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4.2 MODELOS DE CASCA	4
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	5
5.1 RESULTADOS DO MODELO SÓLIDO.....	6
5.1.1 MODELO SÓLIDO TORCIONAL	7
5.1.2 MODELO SÓLIDO CISALHANTE	7
5.2 RESULTADOS DOS MODELOS DE CASCA.....	8
5.3 COMPARAÇÕES DE RESULTADOS.....	12
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXO I	14
APENDICE I	15

1. INTRODUÇÃO

Soldagem 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” [Obrien, 1991].

“Apesar de possuir aparência moderna, existem fortíssimos indícios de que a união de materiais já era praticada há cerca de quatro mil e oitocentos anos, nos vales dos rios Nilo e Tigre-Eufrates,... [Machado, 1996]”.

Sem dúvida é um dos processos mais utilizados na indústria, em especial na metal mecânica, e apesar da vasta gama de possibilidade de uso e do seu surgimento nos primórdios da civilização, ainda assim é um processo que detém segredos a serem desvendados. Seu uso intensivo deu-se juntamente com outras grandes inovações tecnológicas surgidas em momentos lastimáveis da história moderna: primeira e segunda grande guerra. Desde então, esta técnica vem sendo estudada mais profundamente.

A maior parte das dificuldades encontradas no estudo das técnicas de soldagem é intrínseca ao processo, em que a repetitividade do mesmo torna-se muito complicada devido aos mais diversos fatores, entre eles podemos citar: as drásticas mudanças na microestrutura do material soldado, a falta de homogeneidade dos materiais unidos e/ou adicionados, as inclusões e poros, e tantos outros. Ainda, podemos incluir a dificuldade em definir a geometria da solda de modo factível e ainda assim passível de ser feita uma análise estrutural.

As características mostradas acima são causas pelas quais o método de elementos finitos ainda não tem completa aplicabilidade para a análise de uniões soldadas, pois a representação de todas as variáveis e imperfeições, sendo possível, iria acarretar em enorme custo de processamento de dados.

Apesar das dificuldades, a necessidade de determinar as tensões atuantes nas uniões soldadas se faz presente para as mais diversas situações, entre elas a verificação da resistência da junta à vida em fadiga.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a possibilidade do uso de modelos numéricos, em que uniões soldadas são representadas de maneira simplificada, através de elementos rígidos de viga e elementos de casca em busca da obtenção de valores de tensão na região do pé da solda. Essa tentativa deve estar apoiada em simulações numéricas computacionalmente viáveis. Desta forma, podendo ser usada como alternativa para avaliação de juntas soldadas submetidas à vida em fadiga, no lugar das extensas tabelas de curvas S-N (Tensão estrutural versus Número de ciclos em fadiga) para os diferentes tipos de solda.

Este estudo complementa a análise realizada por Echer (2012) para juntas submetidas à flexão e tração. Aquele trabalho tira conclusões a respeito da melhor abordagem para simular cordões de solda para uso no método da tensão estrutural (MTE), conclusões estas não necessariamente extensíveis aos casos de cisalhamento e torção da junta, mais raros na prática de engenharia. Echer chegou a conclusões em seu trabalho que indicam a utilização de elementos rígidos na representação dos filetes de solda de uniões soldadas, para os casos de carregamento fletor e também para esforços normais. O objetivo almejado aqui é validar a metodologia iniciada por Echer para os carregamentos mencionados. A avaliação dos quatro casos básicos de carregamento permitirá uma avaliação genérica do MTE, e, conclusões pertinentes ao uso desta técnica para predição de vida em fadiga.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema relacionado à avaliação dos campos de tensões na região próxima ao pé da solda de uniões soldadas e sua relação com o comportamento da junta em fadiga, é amplamente discutido na literatura. Uma série de teses e metodologias tem sido criticadas, entretanto, em sua grande maioria, o foco destas pesquisas é colocado de forma a submeter a

junta a esforços normais ou de flexão. Echer, 2012, realizou sua pesquisa de conclusão da graduação baseada na elaboração de uma metodologia para avaliar uniões soldadas, através do uso de modelos de casca, em que os filetes de solda são representados por elementos rígidos ou até mesmo, por elementos de casca também.

Echer, no decorrer do seu trabalho, utilizou o método da tensão estrutural (hot spot). Este método é encontrado em diversos artigos da área. 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 (0,4 a 1,0 vezes a espessura da chapa analisada) do pé da solda, sendo então realizada uma interpolação e posteriormente uma extrapolação para estimar o comportamento da tensão na região de solda. A Figura 3.1 apresenta de forma ilustrativa a utilização desse método na determinação da tensão em uma solda do tipo filete.

Entretanto, pouco material é encontrado na literatura referente ao uso do método da tensão estrutural, em que as uniões soldadas estão submetidas a esforços de cisalhamento. Contudo, pode-se citar dois trabalhos dos poucos publicados que tratam desse tipo de carregamento. O primeiro sendo o de Fricke, 2001, o qual utiliza a técnica do “hot spot” para analisar típicas uniões soldadas em estruturas offshore. E o segundo o de Tovo e Lazzarin, 1999.

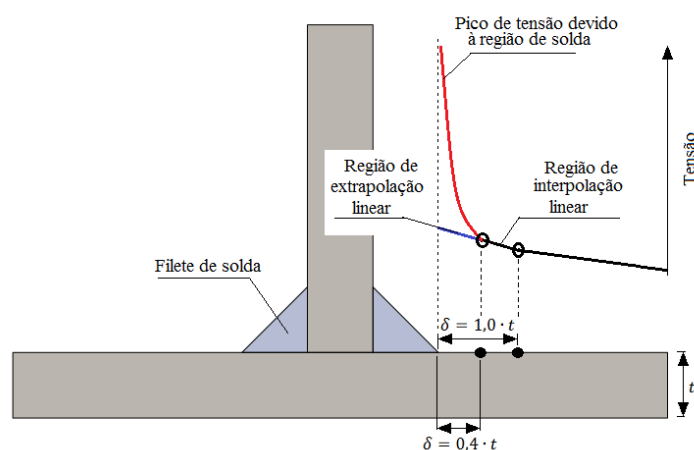


Figura 3.1 - *Comportamento de concentração de tensão em uniões soldadas.*

4. MODELOS NUMÉRICOS ANALISADOS

No total seis modelos diferentes foram analisados para cada caso de carregamento. Um modelo sólido foi utilizado como parâmetro de comparação e meta, para avaliar os resultados obtidos com os outros seis modelos de casca. O modelo sólido tem como característica um tempo de processamento muito maior que os modelos de casca, mas em contrapartida representa de uma maneira mais fiel o que seria a realidade. Para aplicação prática muitas vezes esse tempo de processamento do modelo sólido se torna demasiado, sendo assim conveniente o estudo de caso para simplificação de modelo de casca.

Vale reforçar que efeitos metalúrgicos envolvidos no processo de soldagem não são englobados pelas simulações realizadas.

Todos os modelos foram gerados considerando um aço estrutural, material isotrópico com módulo de elasticidade igual a 210 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 e densidade de 7850 kg/m³.

4.1 Modelos Sólidos

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 da chapa de base e o carregamento aplicado na face superior da outra chapa, como ilustra a figura 4.1. O modelo foi gerado com uma malha com tamanho de elemento igual a um quarto ($\frac{1}{4}$) da espessura da chapa (3,175 mm) para análise.

Para o carregamento cisalhante foram aplicadas forças de igual magnitude em todos os nós da face superior da placa vertical, somando uma força total de 1000 N que aponta para o sentido positivo do eixo y global, como ilustra a figura 4.1 (c). Considera-se a tensão estrutural (σ_s), neste caso, como sendo a tensão cisalhante (σ_{xy}), pela qual pode ser facilmente obtida, de forma direta, por uma análise via MEF.

Quanto à análise com carregamento torcional, ilustrado na figura 4.1 (d), foi gerada uma distribuição de esforços nos nós de modo a gerar uma torção uniforme na chapa vertical, suavizando os resultados de deslocamento. O somatório de todos os esforços torcionais também resultam em 1000 N.

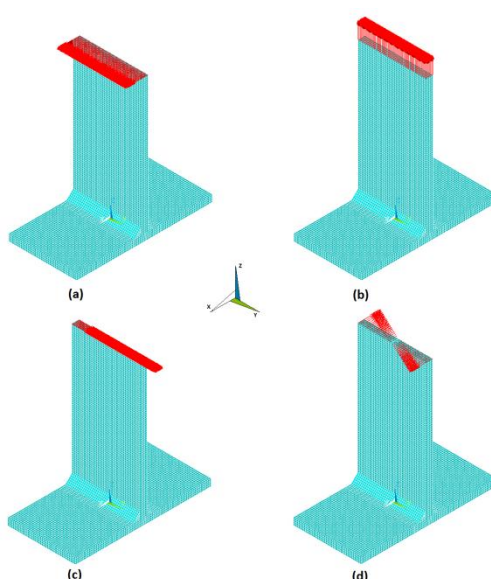


Figura 4.1 – Ilustrações dos tipos de carregamentos analisadas. Por Echer: (a) Fletor; (b) Normal; Pelo presente Trabalho: (c) Cisalhante; (d) Torcional.

Os resultados de tensão foram coletados em três regiões distintas da chapa de base, sendo elas:

- A primeira região corresponde à zona entre o engaste da chapa e o ponto $\delta = 1,0 \cdot t$, onde os resultados de tensão foram extraídos diretamente da análise.
- A segunda região compreende a zona entre $\delta = 1,0 \cdot t$ e $\delta = 0,4 \cdot t$, onde após a obtenção das tensões foi realizada uma interpolação linear, a qual gerou a reta de tendência das tensões para aquela região.
- A terceira região encontra-se entre o ponto $\delta = 0,4 \cdot t$ e o pé da solda, região na qual as tensões serão determinadas através da reta de tendência obtida na segunda região.

Podemos ver na Figura 4.2 as regiões citadas acima de um modo mais claro.

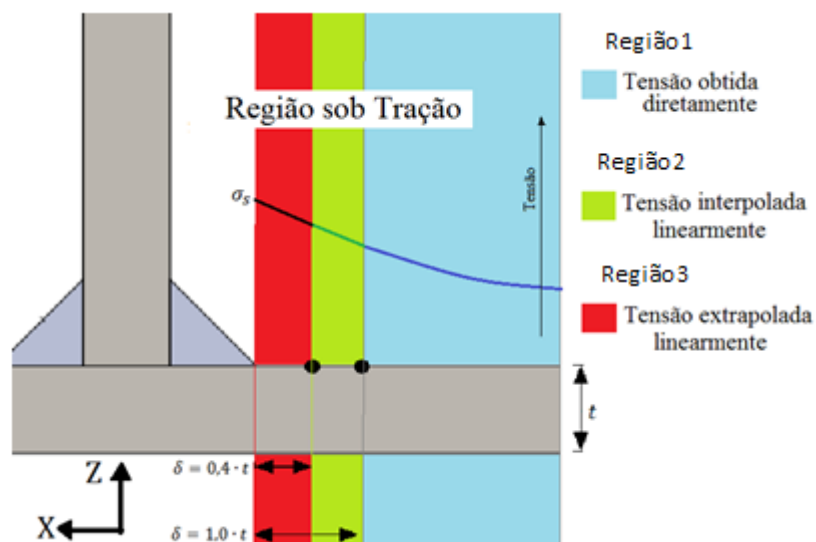


Figura 4.1 - Fases da análise de tensão no modelo sólido.

4.2 Modelos de Casca

Os modelos de casca são criados com chapas de modo a manter as dimensões do modelo sólido, assim como também são mantidas as condições de contorno. As chapas são dispostas sobre a linha neutra das peças do modelo sólido e sua malha foi modelada com elementos do tamanho de metade ($\frac{1}{2}$) da espessura da chapa.

É possível verificar na figura 4.3 a sobreposição do modelo de casca sobre o modelo sólido.

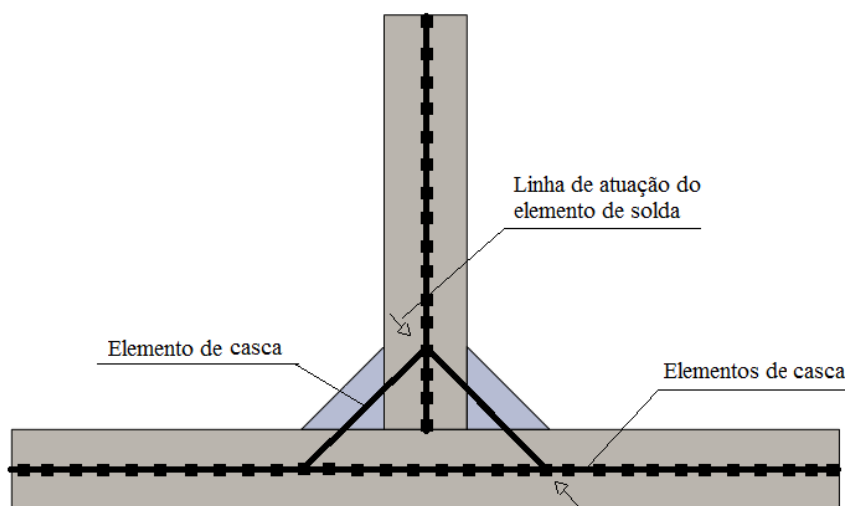


Figura 4.2 - Ilustração do modelo de casca.

Os filetes de solda foram representados através de dois grupos. O primeiro grupo representou o filete com elementos rígidos (identificados daqui para frente pela letra "R"), enquanto o segundo grupo representou o filete com o mesmo elemento de casca (identificados daqui para frente pela letra "P") utilizado no restante da modelagem. Tanto as representações com elementos rígidos, quanto as com elementos de casca, têm apenas um elemento ligando as duas chapas, conforme apresentado por Fayard *et al.* 2007 (para elementos Rígido), Fransson e Pettersson, 2000 (para elementos de Casca).

Cada um dos dois grupos citados acima, é dividido em três subcategorias, diferenciadas entre si pelo local onde foram posicionados os elementos representantes do filete. Conforme figura 4.4.

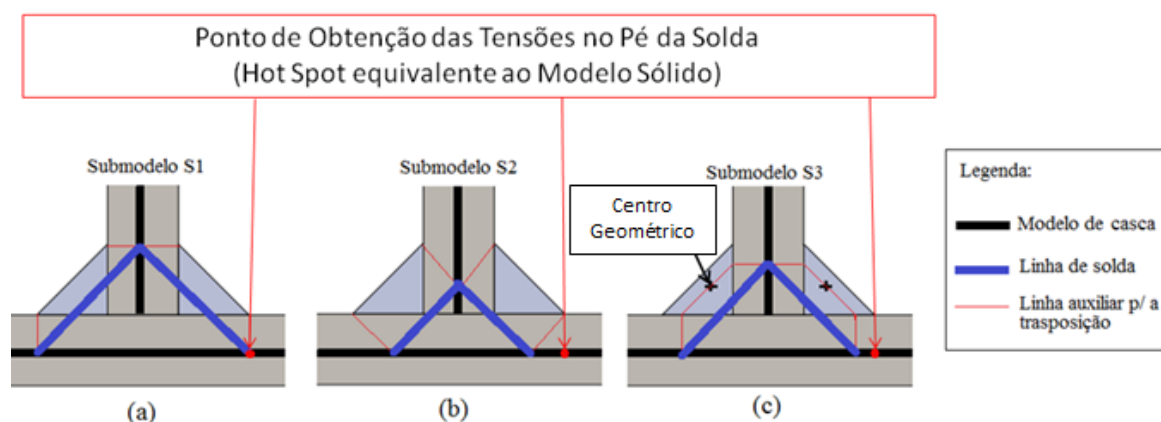


Figura 4.3 - Ilustração dos submodelos de acordo com a posição da linha de atuação do cordão de solda.

Nos modelos de casca, o ponto de obtenção das tensões no pé da solda não necessariamente encontra-se na posição de encontro entre os elementos representantes do filete, com os elementos representantes da chapa de base, mas sim na posição relativa ao pé da solda do modelo sólido, como pode ser observado na figura 4.4.

Nos modelos em que o filete foi representado por elementos de casca, foi tomado o cuidado de procurar não alterar a seção resistente do cordão de solda do modelo sólido, a fim de tentar manter a rigidez da junta.

A Tabela 4.1 contém as espessuras adotadas para os elementos de casca do filete de solda, na tentativa de tentar manter uma rigidez transversal da união.

Tabela 4.1 - Espessura equivalente do elemento de solda para os 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

5. 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 anexo I.

Na tentativa de manter um padrão entre este trabalho e a metodologia aplicada por Echer, os resultados de tensão obtidos da primeira série de análises foram extraídos da região central da chapa base, conforme figura 5.1 (a), tanto para o caso de carregamento cisalhante, quanto para o torcional, sendo a primeira tensão principal tida como variável procurada.

Após a coleta e tratamento dos dados, percebeu-se que os resultados obtidos na região central da chapa - com a primeira tensão principal - não foram satisfatórios em nenhum dos carregamentos.

Na tentativa de contornar as dificuldades encontradas foram criadas mais duas regiões de coleta de dados, como mostra a figura 5.1 (b)(c), ambas encontram-se a uma distância t ,

igual a uma espessura da chapa, das bordas. Mais detalhes sobre a coleta dos dados serão mostrados para os casos específicos de carregamento.

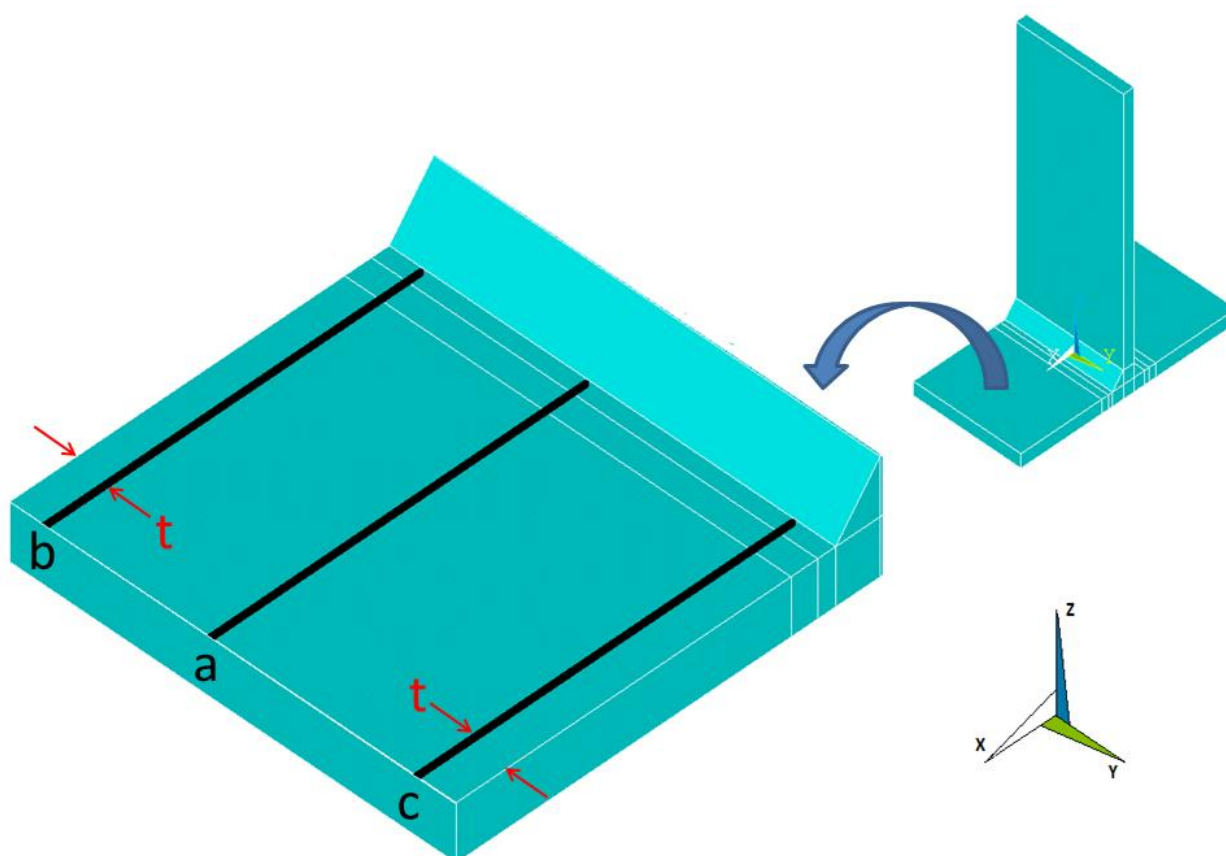


Figura 5.1 – Imagem das regiões de coleta de tensões (a), (b) e (c).

5.1 Resultados do Modelo Sólido

Para ambos os tipos de carregamento, houve a coleta de dados de deslocamento para serem utilizados como indicadores de confiabilidade dos modelos. Os dados de deslocamento foram obtidos da face superior da placa vertical, conforme ilustra a figura 5.2. Para deslocamento de cisalhamento (u_C) foi utilizada a direção y global e para o deslocamento de torção (u_T) foi utilizada a direção x global.

Foi feita apenas uma coleta de dados para deslocamentos, visto que as condições de contorno não foram alteradas no decorrer de todas as análises.

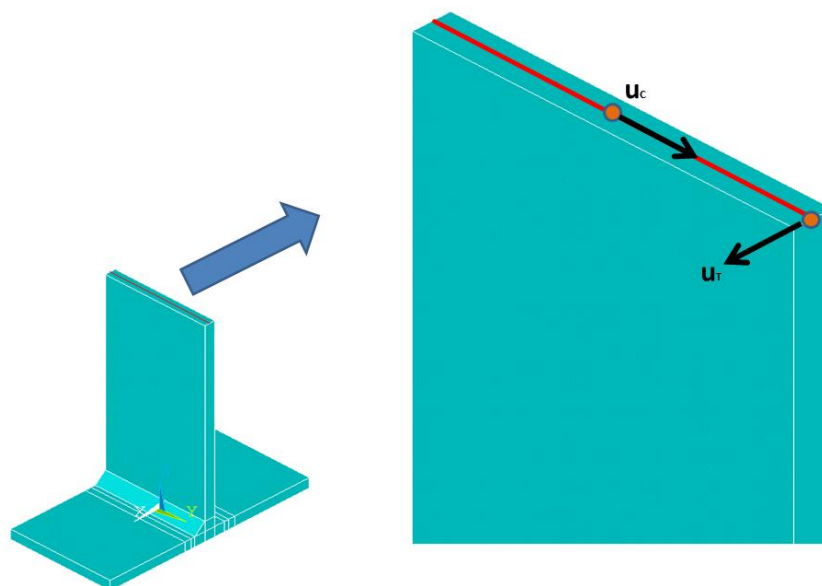


Figura 5.2 – Imagem da localização dos pontos onde foram verificados os deslocamentos.

5.1.1 Modelo Sólido Torcional

Para a análise torcional, os resultados não foram satisfatórios devido a um problema decorrente da simetria do carregamento em relação à própria região de coleta de dados (a). Fazendo com que a mesma estivesse exatamente na zona onde ocorre a transição de tensões compressivas para trativas, chegando a valores de tensões muito próximas de zero, o que dificultaria uma comparação com os resultados obtidos dos modelos de casca.

Em busca de melhores resultados foram assumidas para coleta de dados apenas as regiões (b) e (c). Devido à característica do carregamento, também foi assumido que se poderia utilizar a tensão σ_{xx} como sendo a de maior significância para esse caso.

Após as alterações de parâmetros de obtenção dos resultados, chegou-se às tensões no pé da solda (hot spot) de 3,16 Mpa na região (c) e de -3,16 Mpa na região (b). O resultado simétrico das tensões confirma a suposição feita anteriormente a respeito da região (a). Mais a frente, será feita uma comparação entre os resultados obtidos do modelo sólido com os de casca.

5.1.2 Modelo Sólido Cisalhante

No cisalhamento os resultados obtidos com a primeira tensão principal na região de coleta de dados (a) não foram satisfatórios quando comparados com os modelos de casca.

Assumindo uma tentativa de solução similar a do caso de torção, optou-se por utilizar como parâmetro de resultados, a tensão cisalhante σ_{xy} , em que teoricamente deveria ser constante ao longo da extensão da placa base na direção do eixo y global, ou seja, gerando resultados similares no pé da solda para qualquer uma das regiões de coleta de dados.

Coletados os novos resultados e analisados, confirmou-se que a tensão cisalhante nesse caso tem um comportamento quase uniforme com tensões de 5,60 Mpa, nas regiões (b) e (c), e 5,50 Mpa na região (a). O último será o valor utilizado para futura comparação com os modelos de casca.

A Figura 5.3 apresenta o campo de deslocamentos atuante sobre o modelo sólido.

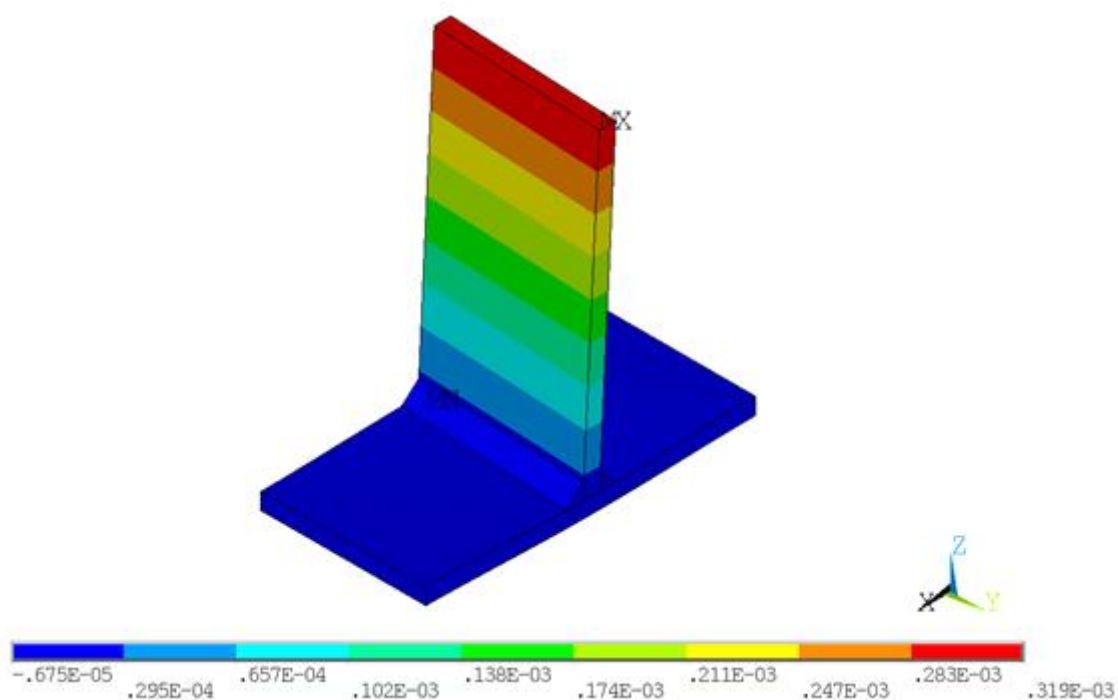


Figura 5.3 - Campo de deslocamentos na direção Y no modelo sólido em cisalhamento [m].

5.2 Resultados dos Modelos de Casca

Conforme informado anteriormente, foram gerados dois grupos de modelos de casca, em que o Grupo P, onde o filete de solda é representado por elementos de casca, e o Grupo R onde o filete é representado por elementos rígidos. Cada grupo é subdividido em: S1, S2 e S3. Na figura 5.4 abaixo, vemos cada um dos modelos plotados na configuração de elementos.

A metodologia empregada para obtenção dos resultados, nos respectivos modelos sólidos, foi mantida também para os modelos de casca. Inclusive as regiões de obtenção de tensões (a), (b) e (c).

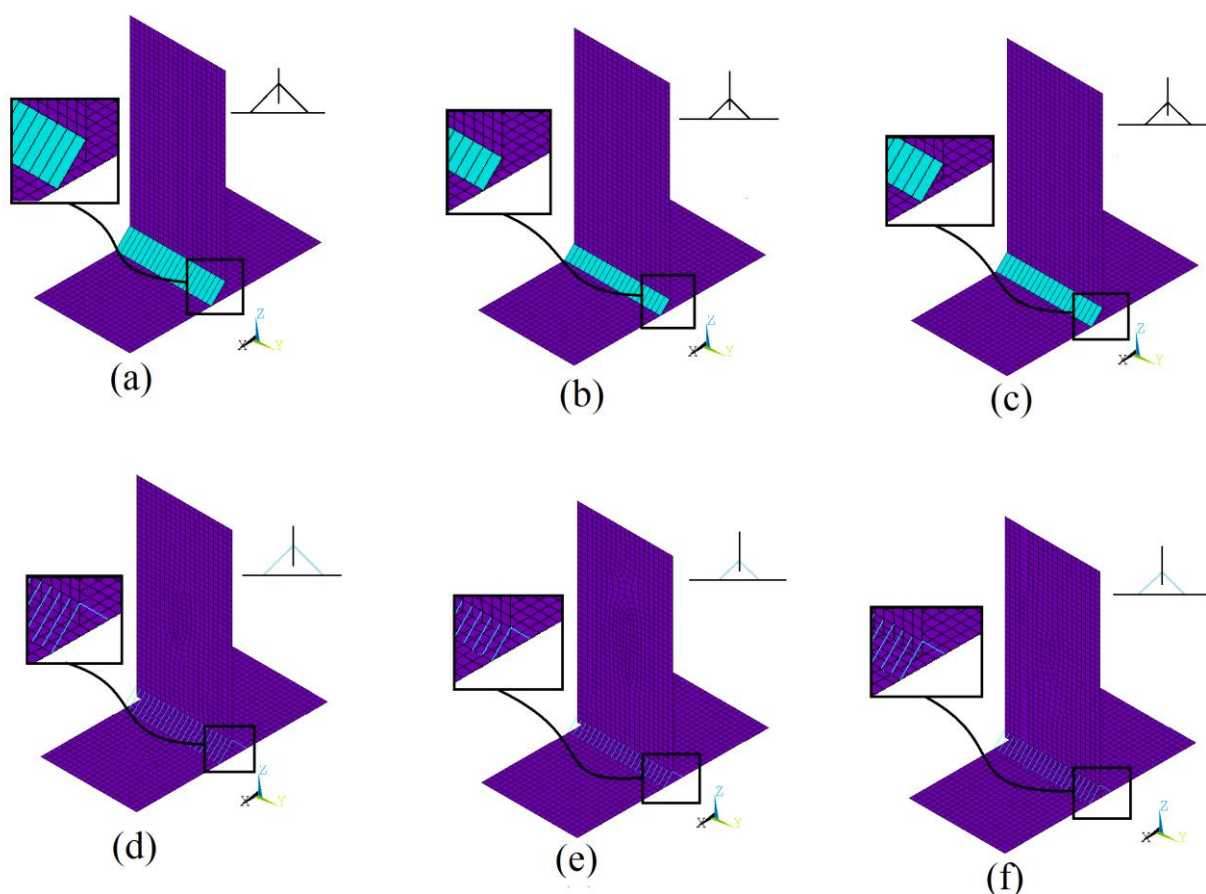


Figura 5.4 - Modelos de casca gerados, (a) P_S1; (b) P_S2; (c) P_S3; (d) R_S1; (e) R_S2; (f) R_S3.

5.2.1 Resultados Para Carregamento Cisalhante.

A tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos a partir das análises dos modelos submetidos ao carregamento cisalhante. Todos os resultados foram extraídos da região de coleta de dados (a), centro da chapa, onde o efeito de borda não está presente. Na coluna que se refere aos dados do modelo sólido, a célula que indica a tensão para a distância de 6,35 mm do pé da solda, encontra-se vazia, pois ela está presente na região de interpolação linear entre $\delta = 0,4 \cdot t$ e $\delta = 1,0 \cdot t$. Nessa faixa, foi adotado um espaçamento diferente para coleta de dados, com a finalidade de se ter mais pontos para geração da reta de tendência utilizada na região existente do pé da solda até $\delta = 0,4 \cdot t$.

Na figura 5.5 está o gráfico ilustrando os dados referente à tabela 5.1 – em que são visualizadas as curvas representativas de cada um dos modelos analisados. O modelo R_S2 apresentou a melhor aproximação do modelo sólido, com um resultado 0,09% acima da tensão obtida no sólido e um deslocamento 0,18% maior.

Tabela 5.1 – Comparativo entre os modelos de casca e o modelo sólido para cisalhamento.

Tensão σ_{xy} [Pa]							
Distância ao ponto de obtenção da tensão estrutural [mm]	Modelo Sólido	Modelo P_S1	Modelo P_S2	Modelo P_S3	Modelo R_S1	Modelo R_S2	Modelo R_S3
107,95	3,10E+06	3,24E+06	3,26E+06	3,25E+06	3,23E+06	3,27E+06	3,27E+06
101,6	4,14E+06	4,18E+06	4,20E+06	4,20E+06	4,25E+06	4,19E+06	4,18E+06
95,25	6,59E+06	6,69E+06	6,72E+06	6,71E+06	6,76E+06	6,66E+06	6,65E+06
88,9	8,89E+06	9,02E+06	9,06E+06	9,05E+06	9,01E+06	8,95E+06	8,92E+06
82,55	1,08E+07	1,10E+07	1,10E+07	1,10E+07	1,08E+07	1,08E+07	1,08E+07
76,2	1,23E+07	1,25E+07	1,26E+07	1,25E+07	1,21E+07	1,23E+07	1,23E+07
69,85	1,34E+07	1,36E+07	1,37E+07	1,37E+07	1,31E+07	1,34E+07	1,33E+07
63,5	1,42E+07	1,45E+07	1,46E+07	1,46E+07	1,38E+07	1,42E+07	1,41E+07
57,15	1,46E+07	1,50E+07	1,52E+07	1,51E+07	1,41E+07	1,47E+07	1,45E+07
50,8	1,48E+07	1,53E+07	1,55E+07	1,54E+07	1,42E+07	1,48E+07	1,47E+07
44,45	1,47E+07	1,53E+07	1,56E+07	1,55E+07	1,40E+07	1,47E+07	1,45E+07
38,1	1,43E+07	1,51E+07	1,54E+07	1,53E+07	1,34E+07	1,44E+07	1,41E+07
31,75	1,37E+07	1,46E+07	1,50E+07	1,49E+07	1,25E+07	1,37E+07	1,34E+07
25,4	1,27E+07	1,38E+07	1,43E+07	1,42E+07	1,13E+07	1,27E+07	1,23E+07
19,05	1,13E+07	1,27E+07	1,33E+07	1,31E+07	9,64E+06	1,13E+07	1,09E+07
12,7	9,63E+06	1,13E+07	1,20E+07	1,18E+07	7,68E+06	9,56E+06	9,01E+06
6,35		9,44E+06	1,03E+07	1,01E+07	4,93E+06	7,53E+06	6,91E+06
0	5,50E+06	7,58E+06	8,60E+06	8,40E+06	2,18E+06	5,50E+06	4,81E+06

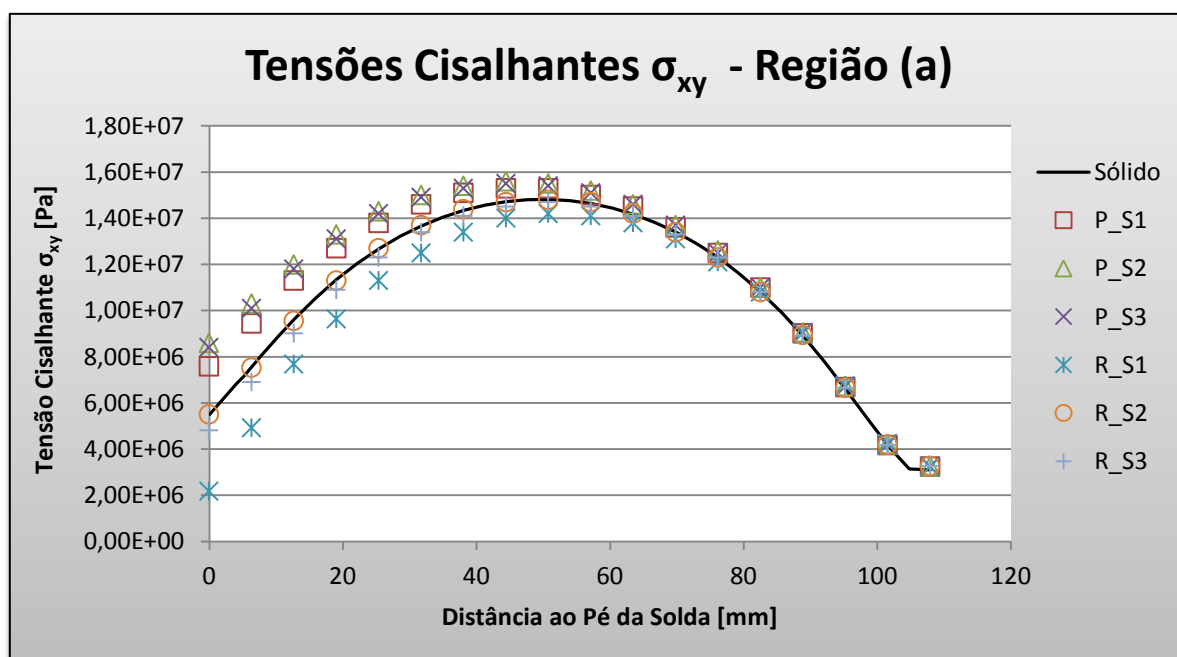


Figura 5.1 - Tensões para cisalhamento dos diversos modelos, do engaste até o hot spot.

5.2.2 Resultados Para Carregamento Torcional.

A tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos a partir das análises dos modelos submetidos ao carregamento torcional. Todos os resultados da tabela foram obtidos da região de coleta de dados (b), próximo à borda da chapa, pois pela simetria do carregamento, os resultados obtidos na região de coletas de dados (c) contêm valores absolutos muito próximos aos apresentados pela região (b).

Na figura 5.6 apresenta o gráfico dos dados referente à tabela 5.2, em que são visualizadas as curvas representativas de cada um dos modelos analisados. O modelo P_S2 apresentou, nesse caso, a melhor aproximação do modelo sólido com um resultado 14,12% - de desvio da tensão obtida no sólido e um deslocamento 8,23% maior.

Tabela 5.2 – Comparativo entre os modelos de casca e o modelo sólido para torção.

Tensão σ_{xx} [Pa]							
Distância ao ponto de obtenção da tensão estrutural [mm]	Modelo Sólido	Modelo P_S1	Modelo P_S2	Modelo P_S3	Modelo R_S1	Modelo R_S2	Modelo R_S3
107,95	1,70E+06	1,01E+06	1,17E+06	1,08E+06	1,66E+06	-4,54E+04	-4,33E+04
101,6	1,12E+06	7,73E+05	9,00E+05	8,29E+05	1,28E+06	-6,55E+04	-6,34E+04
95,25	8,56E+05	5,67E+05	6,66E+05	6,12E+05	9,49E+05	-8,39E+04	-8,18E+04
88,9	6,14E+05	3,86E+05	4,61E+05	4,20E+05	6,66E+05	-1,07E+05	-1,05E+05
82,55	3,98E+05	2,22E+05	2,77E+05	2,48E+05	4,12E+05	-1,34E+05	-1,32E+05
76,2	2,00E+05	7,26E+04	1,10E+05	9,10E+04	1,82E+05	-1,61E+05	-1,60E+05
69,85	1,30E+04	-6,83E+04	-4,71E+04	-5,69E+04	-3,73E+04	-1,90E+05	-1,88E+05
63,5	-1,69E+05	-2,05E+05	-1,99E+05	-2,00E+05	-2,52E+05	-2,18E+05	-2,16E+05
57,15	-3,52E+05	-3,43E+05	-3,52E+05	-3,44E+05	-4,71E+05	-2,46E+05	-2,44E+05
50,8	-5,44E+05	-4,85E+05	-5,10E+05	-4,93E+05	-7,03E+05	-2,74E+05	-2,72E+05
44,45	-7,49E+05	-6,38E+05	-6,78E+05	-6,51E+05	-9,53E+05	-3,02E+05	-3,01E+05
38,1	-9,75E+05	-8,06E+05	-8,63E+05	-8,25E+05	-1,22E+06	-3,30E+05	-3,29E+05
31,75	-1,23E+06	-9,96E+05	-1,07E+06	-1,02E+06	-1,54E+06	-3,59E+05	-3,58E+05
25,4	-1,52E+06	-1,21E+06	-1,31E+06	-1,25E+06	-1,91E+06	-3,88E+05	-3,88E+05
19,05	-1,86E+06	-1,47E+06	-1,59E+06	-1,51E+06	-2,36E+06	-4,19E+05	-4,19E+05
12,7	-2,25E+06	-1,78E+06	-1,92E+06	-1,82E+06	-2,92E+06	-4,50E+05	-4,50E+05
6,35		-2,15E+06	-2,32E+06	-2,20E+06	-3,58E+06	-4,76E+05	-4,72E+05
0	-3,17E+06	-2,52E+06	-2,72E+06	-2,58E+06	-4,24E+06	-5,02E+05	-4,94E+05

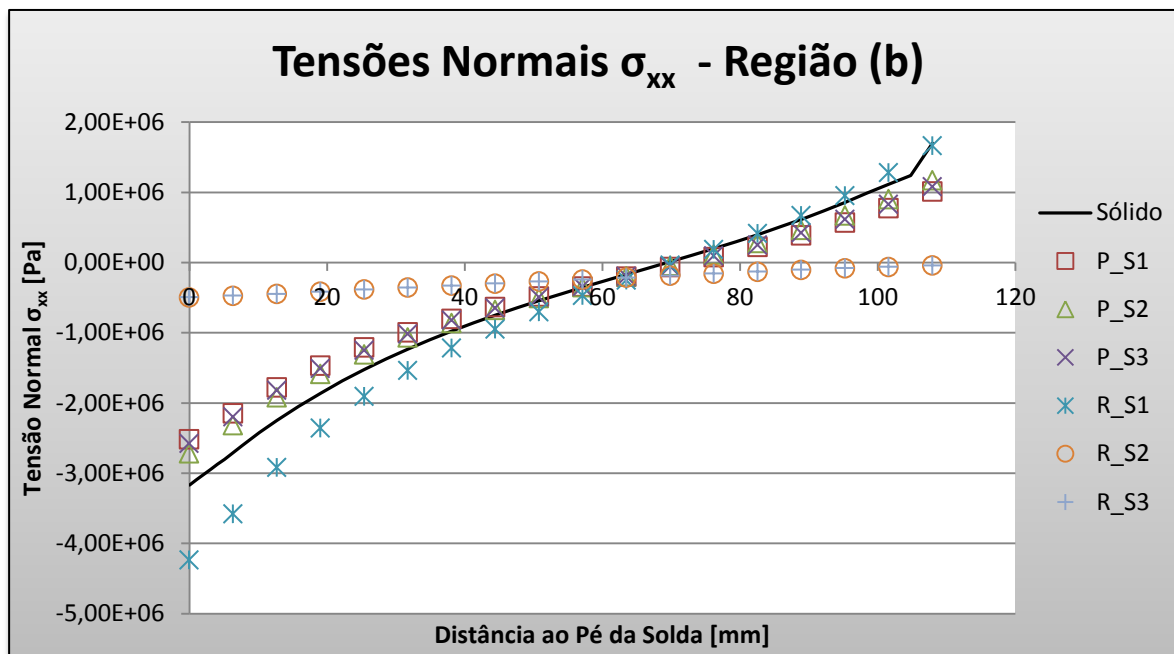


Figura 5.6 - Tensões para torção dos diversos modelos, do engaste até o hot spot.

5.3 Comparações de Resultados

A tabela 5.3 demonstra de forma mais sucinta os resultados comparativos das tensões geradas a partir da carga cisalhante, obtidas apenas na zona de concentração de tensões (hot spot) para a região de coleta de dados (a). É evidente a forma como a representação do filete de solda com elementos rígidos se destacou nessa configuração de carregamento, em que o modelo R_S2 mostrou-se superior aos outros, tanto em tensões quanto em deslocamentos.

Tabela 5.3 - Comparação entre modelos para carga cisalhante.

Modelo	Tensão Estrutural [Pa]	Diferença para o modelo sólido	Deslocamento u_T [m]	Diferença para o modelo sólido
Sólido	5,495E+06	-	3,19E-04	-
P_S1	7,580E+06	-37,94%	3,46E-04	-8,38%
P_S2	8,600E+06	-56,50%	3,57E-04	-11,92%
P_S3	8,400E+06	-52,86%	3,54E-04	-10,82%
R_S1	2,180E+06	60,33%	2,90E-04	9,22%
R_S2	5,500E+06	-0,09%	3,20E-04	-0,18%
R_S3	4,810E+06	12,47%	3,11E-04	2,42%

Na tabela 5.4 - os resultados comparativos das tensões geradas a partir da carga torcional, foram obtidos apenas na zona de concentração de tensões (hot spot), para a região de coleta de dados (b). Nesta configuração de carregamento, percebe-se um comportamento mais homogêneo dos modelos em que o filete é representado por elementos de casca, sendo o melhor resultado apresentado pelo modelo P_S2, quando visto apenas para as tensões, entretanto, novamente o deslocamento gerado por essa representação se afastou do esperado. Os modelos Rígidos devem ser verificados mais profundamente nesta situação, pois uma revisão mais simplista dos mesmos não apontou o motivo de tamanha divergência nos resultados.

Tabela 5.4 - Comparação entre modelos para carga torcional.

Modelo	Tensão Estrutural [Pa]	Diferença para o modelo sólido	Deslocamento u_c [m]	Diferença para o modelo sólido
Sólido	-3,167E+06	-	9,51E-05	-
P_S1	-2,520E+06	20,44%	1,04E-04	-9,24%
P_S2	-2,720E+06	14,12%	1,03E-04	-8,23%
P_S3	-2,580E+06	18,54%	1,02E-04	-7,28%
R_S1	-4,240E+06	-33,87%	9,50E-05	0,14%
R_S2	-5,020E+05	84,15%	9,48E-05	0,32%
R_S3	-4,940E+05	84,40%	9,40E-05	1,12%

Abaixo temos as duas tabelas obtidas para os modos de carregamento normal e fletor, para que seja possível uma avaliação mais geral dos resultados obtidos com cada modelo.

A Tabela 5.5 apresenta de forma comparativa os resultados para a tensão estrutural e o deslocamento máximo, para cada um dos modelos simulados no trabalho anterior para o caso de carga normal – ilustrado na figura 4.1 (b).

Tabela 5.5 – Comparação entre modelos para carga normal.

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%

A Tabela 5.6 apresenta de forma comparativa os resultados para a tensão estrutural e o deslocamento máximo, para cada um dos modelos simulados no trabalho anterior para o caso de carga fletor – ilustrado na figura 4.1 (a).

Tabela 5.6 – Comparação entre modelos para carga fletor.

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%

6. CONCLUSÕES

Portanto, o estudo apresentado fez análise dos esforços de cisalhamento devido a diferentes tipos de carregamento sobre juntas soldadas, com a utilização do MTE. Esses ensaios - para carregamento cisalhante - apresentam um comportamento esperado, quando seguida a metodologia indicada no trabalho anterior, a qual os modelos rígidos responderam melhor como é demonstrado no final do trabalho, através das tabelas de comparação entre todos os modos de carregamentos . É necessário um cuidado especial com o efeito de borda, em que mesmo nas zonas (b) e (c) de coleta de dados houve uma ligeira variação das tensões, possivelmente causadas pela proximidade com o fim da chapa. Sugere-se então o uso do submodelo R_S2 para essa situação.

No que refere-se às simulações que foram submetidas à torção, demonstraram comportamento divergente do encontrado nos outros três carregamentos e apresentaram melhor resultado nos elementos de casca quando verificadas apenas as tensões. Devido aos desalinhamentos dos resultados obtidos no último caso, fica aberta a possibilidade de um estudo futuro mais detalhado, a fim de confirmar a existência de cuidados adicionais para esse carregamento.

De modo geral, os modelos mostraram bons resultados. Contudo, o modelo R_S3 recomendado por Echer - com boas respostas em esforços normais e de flexão - não se destacou nas análises aqui estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS, “**ANSYS Multiphysics Documentation – Theory Reference**”, 2013.
- Dong, P.; “**A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Analysis of Welded Joints**”, International Journal of Fatigue, Elsevier, pp 865-876, 2001.
- Echer, L.; “**Análise de Uniões Soldadas Através do Método da Tensão Estrutural Via Elementos Finitos**”, Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS, 2012.
- 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.
- Lagoda, T.; “**Lifetime Estimation of Welded Joints**”, Springer, pp 1-5, 2008.
- Machado, I. G.; “**Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**”, Brasil, 1ª edição, 1996.
- Radaj, D., Sonsino, C.M., Fricke, W.; “**Fatigue assessment of welded joints by local approaches**”, Woodhead Publishing in Materials, 2006.
- Tovo, R., Lazzarin, P.; “**Relationships Between Local and Structural Stress in the Evaluation of the Weld Toe Stress Distribution**”, International Journal of Fatigue, Elsevier, pp 1063-1078, 1999.

ANEXO I

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 placas se deu através do emprego de dois elementos diferentes, os modelos tipo P utilizam somente elementos de placa, já os modelos tipo R empregam elementos de placa e rígidos. O elemento de placa 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 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.

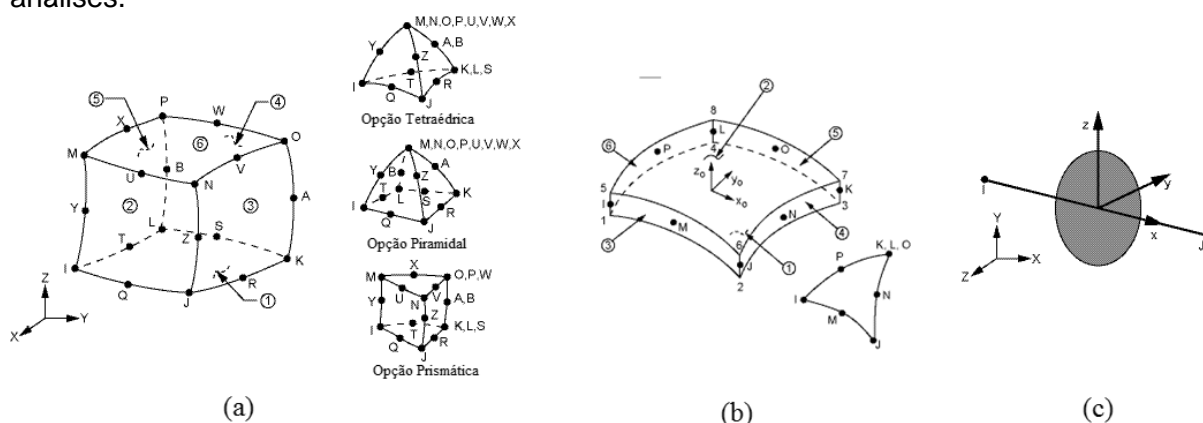


Figura I.1 – Elementos empregados, (a) SOLID 186; (b) SHELL 281; (c) MPC 184 – rigid beam.

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		

APÊNDICE I

A seguir são apresentados, na tabela I.1, os resultados obtidos com a análise para carregamento cisalhante, em que a primeira tensão principal foi tida como variável procurada. Na tabela I 2 temos uma comparação onde apenas os valores na região do hot spot é avaliada.

Tabela I.1 – Resultados para análise de cisalhamento.

Primeira Tensão Principal [Pa]							
Distância ao ponto de obtenção da tensão estrutural [mm]	Modelo Sólido	Modelo P_S1	Modelo P_S2	Modelo P_S3	Modelo R_S1	Modelo R_S2	Modelo R_S3
107,95	3,10E+06	2,648E+06	2,645E+06	2,647E+06	2,542E+06	2,590E+06	2,585E+06
101,6	4,14E+06	3,529E+06	3,534E+06	3,533E+06	3,375E+06	3,477E+06	3,469E+06
95,25	6,59E+06	5,980E+06	6,000E+06	5,995E+06	5,748E+06	5,916E+06	5,899E+06
88,9	8,89E+06	8,252E+06	8,289E+06	8,279E+06	7,925E+06	8,167E+06	8,137E+06
82,55	1,08E+07	1,014E+07	1,019E+07	1,018E+07	9,688E+06	1,002E+07	9,979E+06
76,2	1,23E+07	1,163E+07	1,170E+07	1,168E+07	1,108E+07	1,147E+07	1,142E+07
69,85	1,34E+07	1,276E+07	1,286E+07	1,283E+07	1,213E+07	1,256E+07	1,248E+07
63,5	1,42E+07	1,357E+07	1,370E+07	1,366E+07	1,285E+07	1,331E+07	1,321E+07
57,15	1,46E+07	1,410E+07	1,426E+07	1,422E+07	1,325E+07	1,377E+07	1,364E+07
50,8	1,48E+07	1,436E+07	1,456E+07	1,451E+07	1,332E+07	1,395E+07	1,379E+07
44,45	1,47E+07	1,437E+07	1,463E+07	1,456E+07	1,305E+07	1,385E+07	1,365E+07
38,1	1,43E+07	1,414E+07	1,445E+07	1,437E+07	1,246E+07	1,348E+07	1,324E+07
31,75	1,37E+07	1,365E+07	1,404E+07	1,393E+07	1,152E+07	1,282E+07	1,252E+07
25,4	1,27E+07	1,288E+07	1,336E+07	1,323E+07	1,024E+07	1,184E+07	1,147E+07
19,05	1,13E+07	1,181E+07	1,238E+07	1,223E+07	8,557E+06	1,052E+07	1,006E+07
12,7	9,63E+06	1,040E+07	1,109E+07	1,091E+07	6,658E+06	8,773E+06	8,222E+06
6,35		8,620E+06	9,428E+06	9,213E+06	3,983E+06	6,777E+06	6,158E+06
0	5,495E+06	6,396E+06	7,377E+06	7,131E+06	3,446E+06	4,079E+06	3,711E+06

Tabela I.1 – Comparação dos valores obtidos no pé da solda em cada um dos modelos.

Modelo	Tensão Estrutural [Pa]	Diferença para o modelo sólido	Deslocamento u_c [m]	Diferença para o modelo sólido
Sólido	5,495E+06	-	3,19E-04	-
P_S1	6,396E+06	16,40%	3,46E-04	8,38%
P_S2	7,377E+06	34,24%	3,57E-04	11,92%
P_S3	7,131E+06	29,77%	3,54E-04	10,82%
R_S1	3,446E+06	-37,29%	2,90E-04	-9,22%
R_S2	4,079E+06	-25,78%	3,20E-04	0,18%
R_S3	3,711E+06	-32,47%	3,11E-04	-2,42%