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

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE JUNÇÕES SOLDADAS

por

ALEX VILAR MORAES RONCHI

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 2013

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

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE JUNÇÕES SOLDADAS

por

ALEX VILAR MORAES RONCHI

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

Profª. Drª. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Porto Alegre, 17 de junho de 2013.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente por tudo.

A minha família, em especial minha mãe, pelo apoio dado em toda essa jornada que resolvi topar que foi este curso de Engenharia Mecânica. Agradeço aos meus tios, avós, pai, e minha irmã e sobrinha, pelos apoios e ajudas que sempre me deram.

A todos os meus amigos, e a todos que de alguma forma sentem algum carinho e admiração por mim, pois também muito precisei dos seus apoios, tanto no estudo, quando na amizade, companhia, etc.

Ao pessoal da UFRGS, de um modo geral a todos os professores que me ensinaram não apenas a área técnica dessa magnífica profissão que é a engenharia, mas também porque cobraram muito para que nos tornemos cada vez mais fortes, em vários sentidos. Ao meu orientador deste TCC Jakson pela grande ajuda, dedicação, paciência e conhecimentos passados. Aos meus colegas pela camaradagem e vontade de vencer que nós sempre tivemos.

Ao pessoal da ECS-Krug, pela oportunidade de crescer que me dão a cada dia e pelo apoio em tudo o que sempre precisei, tanto em relação à faculdade quanto ao trabalho na fábrica.

Muito obrigado a todos! Não teria conseguido sem todos vocês!

“Tudo o que a mente humana pode conceber, ela pode conquistar.”

Napoleon Hill

RONCHI, A. V. M. **Análise numérico-experimental de junções soldadas**. 2013. 27p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise numérica de junções soldadas através da abordagem do Método da Tensão Estrutural (Hot Spot). São realizadas comparações de resultados de modelos simplificados formados com elementos de casca e modelos sólidos tridimensionais. Assim, foram estudados diferentes funções de extrapolação (linear ou quadrática), que estimaram a tensão na raiz da solda e diferentes tipos de modelamento dos filetes de solda, através da análise de erro dos resultados. Para verificações dos modelos numéricos foi realizado um teste experimental de um caso simulado e, assim, proposto alterações nas propriedades mecânicas do filete de solda para representar o comportamento mecânico observado. Para isto, foi modificada a rigidez dos elementos de solda através da definição de um parâmetro que age sobre o módulo de elasticidade dos elementos usados nos filetes de solda, permitindo assim, calibrar os resultados de deslocamento quando comparados com o resultado experimental. Com esta abordagem, foi possível chegar a um novo modelo sólido tridimensional representativo do comportamento experimental, que foi utilizado como referência para os demais casos simplificados.

PALAVRAS-CHAVE: Método da tensão estrutural, análise numérico-experimental, juntas soldadas, extrapolação

RONCHI, A. V. M. **Numerical and Experimental Analysis Of Welded Joints**. 2013. 27p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013

ABSTRACT

This paper presents a numerical analysis of welded joints by the Hot Spot method. Comparisons are made of results of simplified models formed with shell elements versus three-dimensional solid models. Thus, different extrapolations (linear and quadratic) have been studied, that it estimated the stress at the weld toe and different types of the modeling of fillet welds through error analysis results. For verification of numerical models, an experimental test was performed about the same simulated case, therefore, proposed changes in mechanical properties of the fillet weld to represent the mechanical behavior observed. For this, the rigidity of welding elements have been modified by defining a parameter that acts on the modulus of elasticity used in the fillet weld, allowing to calibrate the displacement results when compared with the experimental result. With this approach, it was possible to reach a new three-dimensional solid model that represents the experimental behavior, which was used as a reference for the other cases simplified.

KEYWORDS: Hot Spot, numerical and experimental analysis, welded joints, extrapolation

LISTA DE SIGLAS

MS – Modelo Sólido, de referência, com elementos sólidos, que considera um arredondamento na raiz da solda.

MSS – Modelo Sólido Simplificado, com elementos sólidos, onde não há arredondamento na raiz da solda.

CP – Modelo de Casca Perpendicular na solda.

CD – Modelo de Casca Dupla na solda.

CS – Modelo Híbrido (Placas de casca, solda com elementos sólidos)

R_S3 – Modelo de Casca com ligações por barras rígidas.

CP_pn – Modelo de Casca Perpendicular, com parâmetro $p > 1$ (Enrijecido)

CD_pn – Modelo de Casca Dupla, com parâmetro $p > 1$ (Enrijecido)

CS_pn – Modelo Híbrido, com parâmetro $p > 1$ (Enrijecido)

MSS_pe –Modelo Sólido Simplificado, de referência, com parâmetro $0 < p < 1$ (Calibrado frente ao teste experimental)

CP_pe – Modelo de Casca Perpendicular, com parâmetro $0 < p < 1$ (Calibrado frente ao teste experimental)

CD_pe – Modelo de Casca Dupla, com parâmetro $0 < p < 1$ (Calibrado frente ao teste experimental)

CS_pe – Modelo Híbrido, com parâmetro $0 < p < 1$ (Calibrado frente ao teste experimental)

ÍNDICE

Pág.

1. INTRODUÇÃO 1
2 OBJETIVOS 2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 2
4 MÉTODO DA TENSÃO ESTRUTURAL (HOT SPOT) 4
5 CASOS DE ESTUDO 5
5.1 Caso analisado 5
5.2 Modelagens propostas 5
5.2.1 Modelos sólidos (MSS e MS) 5
5.2.2 Modelos com elemento de casca 6
6 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL 8
7 RESULTADOS 9
7.1 Análises dos modelos de simulação propostos frente ao modelo MS 10
7.2 Análises dos modelos propostos frente ao dado experimental e proposição de novo modelo de referência 11
8. CONCLUSÕES 14
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 15
Apêndice I 16
Apêndice II 17
Apêndice III 18
Apêndice IV 19

1. INTRODUÇÃO

Quando se necessita unir peças ou partes metálicas, a técnica de soldagem é a que mais se destaca devido seu largo emprego e grande volume de atividades que envolvem. A união é realizada através da fusão dos mesmos no contato, pela fusão de ambos, adição de outro material fundido ou por contato destes materiais, na fase sólida ou semissólida.

A soldagem provoca na maioria das vezes uma maior distorção no material base e normalmente não é aplicada sobre cerâmicos. A grande área de atuação da mesma são os metais e suas ligas, devendo-se esse fato à sua grande versatilidade e economia, além das excelentes propriedades mecânicas que as uniões assim obtidas apresentam. (Machado, 2007). Porém, a utilização dessa técnica apresenta algumas dificuldades, pois projetos de estruturas e de componentes mecânicos com juntas soldadas não é trivial. A junta pode apresentar alterações das propriedades do material base nas proximidades do cordão de solda (Zona Afetada pelo Calor – ZAC), bem como tensões residuais (Machado, 2007). Em Sutton, 2009, foi estudado o comportamento mecânico local de uma junção soldada por fricção-agitação (SFA), em um corpo de prova retangular. Neste estudo, utilizou-se um método óptico para quantificar as deformações locais. O processo SFA resultou em uma junta com comportamento de material heterogêneo. Além disto, um estado complexo de tensões ocorre na junta soldada aplicando um carregamento, devido às irregularidades na geometria provenientes da deformação causada pela fusão, e também às imperfeições causadas no filete de solda devido a uma má soldagem por parte do soldador.

Como as junções soldadas são sujeitas a altos valores de tensão devido a descontinuidades geométricas, estas devem ser adequadamente analisadas. Simulações numéricas para tentar estimar o valor de tensão nestas regiões (raiz da solda), devem ser adequadamente modeladas, onde o método mais empregado é o Método de Elementos Finitos (MEF). Algumas simplificações geométricas, como a pobre discretização de pequenos raios de arredondamento no ponto de encontro das chapas com a raiz da solda, podem levar a problemas na simulação computacional. Estas descontinuidades nem sempre podem ser representadas corretamente devido ao alto número de elementos necessários para capturar adequadamente os gradientes de deformação que ali ocorrem. Quando se abre mão de discretizações muito refinadas da real geometria do cordão de solda (que apresenta irregularidades devido à deformação causada pelo calor e imperícia do soldador) os resultados de simulação numérica podem apresentar valores de tensão não condizentes com a realidade.

Para sanar este problema buscaram-se novas técnicas para análise de tensões nos pontos críticos da solda, como o método Hot Spot, que utilizam valores de tensão próximos da raiz da solda. Esta técnica consegue estimar os valores de tensão através da extrapolação dos resultados de tensão em pontos vizinhos, permitindo a análise da resistência do componente em determinada situação de operação (Niemi, 1992). Tal método também vem sendo utilizado como modelos simplificados que usam de elementos de casca e barras para reduzir o custo computacional da análise de problemas de engenharia, apresentando bons resultados (Dong, 2001; Radaj D, Sonsino C M e Fricke W, 1998; Grové, 2006).

Apesar de suas evidentes vantagens do ponto de vista computacional, a técnica necessita de mais estudos para definir uma função de extrapolação representativa do comportamento real da solda. A técnica Hot Spot é amplamente utilizada, porém, ainda é argumento de debate em diferentes trabalhos (Poutiainen e Niemi, 2000, Doerk, Fricke e Weissenborn, 2003, Niemi e Trankanen, 2000) demostrando que ainda é necessário se buscar uma única metodologia que possa representar com certa precisão os esforços internos observados na prática.

Além do problema da simplificação geométrica ou do modelamento de estruturas soldadas (escolha de elementos), estas podem apresentar mudanças de suas características mecânicas devido o processo de soldagem, que pode levar o material a se comportar como um material heterogêneo entorno a solda (Sutton, 2009). A existência de heterogeneidade nas propriedades mecânica da região soldada tem sido pouco estudada e pode afetar

significativamente o seu comportamento mecânico, assim os resultados numéricos precisam ser validados experimentalmente.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho será estudar uma técnica adequada para analisar juntas soldas utilizando o método Hot Spot e elementos de casca para reduzir o custo computacional da análise de uma estrutura complexa. Neste, serão verificado dois tipos de extrapolações para obtenção da tensão em pontos críticos da solda e diferentes modelos simplificativos com elementos de casca e sólidos. Para isto, serão utilizadas condições de contorno similares aos encontrados em literatura a fim de comparar seus resultados. Além disto, será realizado um ensaio experimental sobre um corpo de prova tipo T com o objetivo de fazer uma comparação com os resultados numéricos, e propor alterações que levem a resultados mais realísticos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema de representação de uniões soldadas em simulação numérica já foi estudado por diversos autores, desde os anos 80. A ideia de desconsiderar a concentração de tensões locais devido à raiz da solda utilizando os valores de tensão nas proximidades da raiz e extrapolando está relacionada com investigações experimentais realizadas na década de 1960 por Peterson, Manson e Haibach, conforme informa Radaj e Sonsino, 1998. Existem alguns métodos de análise de junções soldadas, e serão citados a seguir.

O Método da Tensão Nominal (MTN) utiliza a análise de fadiga de acordo com o valor de tensão nominal fornecido pelo padrão das curvas S-N (curvas de vida em fadiga), juntamente com as diferentes classes de detalhes das junções básicas que são encontrados em várias normas e diretrizes que são provenientes de uma base na avaliação estatística de testes de fadiga realizados na década de 1970 (Gurney e Maddox, 1973; Oliver 1979), onde as bandas de dispersão uniformes também foram definidas para as curvas S-N. Ao longo dos últimos anos, a consideração de vários fatores de influência nas análises de fadiga foi investigada, como o efeito de tensão significativa, e, em particular, o assim chamado Efeito da Espessura da Placa, que deve ser levado em conta no caso de chapas relativamente espessas, conforme Gurney,1979. A consideração do efeito oposto para soldas em chapas relativamente finas (2 a 6 mm) foi também investigada por Gurney,1997, que estabeleceu um parâmetro apropriado para o design de uso. No MTN normalmente são consideradas equações de interação. A propagação de trincas subsequente deve ser analisada separadamente, tendo os efeitos da estrutura circundante e carregamento em conta. Esta proposta é, principalmente, seguida por análises locais.

Grové, 2006, realizou testes com uma junta soldada em T, onde mediu a deformação e calculou o valor de tensão teórico, com a carga tracionando o corpo de prova, bem como simulou e analisou diversos casos de junções soldadas com algumas combinações de carregamentos. Deste estudo propôs diferentes métodos de simulação numérica para comparação, como simulações com elementos sólidos de 20 nós, em elementos de placa ou casca com a solda não sendo representada, ou sendo representada por também elementos de placa ou casca e com ligações rígidas. Este trabalho implicou no desenvolvimento de um procedimento de extração de tensão nominal para o design de fadiga e análise de estruturas em forma de placa, utilizando elementos de casca.

Na análise pelo Método da Tensão de Chanfro (MTC), ou Notch Stress, a resistência à fadiga de um componente estrutural depende fortemente dos seus efeitos de chanfros. “Efeito chanfro” significa tanto a concentração de tensão e redução da robustez devido aos entalhes. A resistência à fadiga do material em modelos planos é de importância secundária em comparação com a resistência à fadiga no componente entalhado, e depende forma e tamanho para um dado material. O procedimento de avaliação mais simples baseado no efeito de entalhe refere-se à resistência à fadiga de vida infinita ou um definido grande número de ciclos

(por exemplo, N> 10^6), sob uma amplitude constante de carregamento, isto é, para o limite de resistência. (Radaj e Sonsino, 1998)

Na questão de propagação de trincas em junções soldadas, há estudos com o Método dos Elementos de Contorno (MEC), como Xiang, Lie, Wang, Cen, 2003, onde um processo geral para simular a falha por fadiga decorrente da propagação de uma trinca 3D. São apresentados passos para gerar a malha de elementos de contorno inicial, assim emprega-se um algoritmo de remalhamento automático que mantém a topologia da rede original. Assim, o tempo computacional para cada passo do incremento da fissura é constante. Simulações por MEC estão longe de serem utilizadas na indústria, devido a complexidade das ferramentas matemáticas que a envolvem.

Referente ao Método da Tensão Estrutural ou Hot Spot, publicado em um trabalho de Dong, 2001, e no trabalho de Radaj e Sonsino, 1998, o mesmo consiste em retirar valores de tensão nas proximidades da solda e assim utilizar a extrapolação até o local da raiz da solda. O Método da Tensão Estrutural ou Hot Spot apresenta um valor de tensão fictício devido à extrapolação, porém, Radaj, 1990, demonstra que, em estruturas com elementos de placa ou casca, esse valor de tensão extrapolado corresponde à soma das tensões da membrana e flexão na raiz da solda, assim, pode ser determinada através da extrapolação ou linearização interior da tensão. Ele apresentou aplicações do aproximar a várias estruturas de placas soldadas, bem como fez Dong, 2001.

A utilização do método da Tensão Estrutural (Hot Spot) para determinar curvas de vida em fadiga (curva S-N), e qual a melhor posição para se retirar os valores que serão utilizados na extrapolação ainda está em debate. Doerk, Fricke e Weissenborn, 2003, recomendam locais para se efetuar a extrapolação em junções soldadas considerando o local da solda e o tamanho do elemento. Niemi e Transkanen, 2000 fazem propostas extrapolações quadráticas, em vez das lineares normalmente utilizadas na borda de chapas soldadas. Labesse e Recho, 1999, também discutem a seleção do local para se efetuar a extrapolação, em um exemplo de uma junta em T, e apresentam uma nova proposta para levar em conta os efeitos do modo de carregamento. Dong, 2001, utiliza a definição de tensão estrutural feita por Radaj, 1990 e avalia a tensão estrutural na localização da raiz de solda a partir dos resultados de elementos finitos, com simulações com elementos sólidos e de casca. A insensibilidade da malha é demonstrada por vários exemplos, no entanto, na sua maioria em juntas 2D. Esta análise foi de falha por entalhes no plano, com reforços na borda soldada, e mostrou que a espessura da placa não é um parâmetro relevante para a definição de os pontos de referência para a avaliação da tensão. Niemi e Tanskanen, 2000, bem como Fricke, 2002, propuseram procedimentos alternativos para a análise de tensões Hot Spot em tais casos, usando distâncias absolutas para os pontos de referência.

Em Echer, 2012, e Bauer, 2012, estudaram-se técnicas de simulação numérica para casos de junções soldadas em T em diferentes tipos de carregamento, para casos de Flexão, e Tração (Echer, 2012); e Cisalhamento e Torção (Bauer, 2012), através do método da Tensão Estrutural. Ambos concluíram que um modelo com elementos de casca representando as chapas, e elementos de barras rígidas representando a solda, foram os que mais se aproximaram do resultado da simulação da junta com elementos sólidos (utilizado como modelo de referência) usando o método Hot-Spot para estimar o valor da tensão para comparação. Porém, estes apresentaram divergências em relação à configuração dos elementos de barra. Estas propostas consistem de técnicas que fazem uso de um número reduzido de elementos finitos (com elementos de casca e barras) para representar o comportamento de uma junta soldada, viabilizando assim uma tratativa numérica. Porém, ambos utilizaram com referência para comparações de resultados os modelos numéricos com elementos sólidos, que não conseguem capturar todas as características geométricas e propriedades mecânicas reais de uma junta soldada. As simplificações estudadas nestes dois trabalhos foram consideradas mais flexíveis que as reais, motivando o estudo de configurações mais rígidas, que são as propostas investigadas neste trabalho.

4 – MÉTODO DA TENSÃO ESTRUTURAL (HOT SPOT)

Em problemas de estruturas com geometria complexa, a simulação numérica pelo método de elementos finitos, utilizando uma discretização com elementos sólidos capaz de capturar fenômenos localizados em torno da solda, resultará em um altíssimo custo computacional. Assim, necessita-se de metodologias alternativas para viabilizar a simulação. Uma opção é o uso de discretizações grosseiras na região da solda associada ao método da tensão estrutural. Outra possível escolha, ainda mais atrativa do ponto de vista do custo computacional, é o uso deste método com elementos de placa ou casca para simular as partes soldadas, e elementos de barras rígidas, placa ou casca para representar o filete de solda. Tal tratativa permite a simulação de estruturas soldadas muito complexas com um custo computacional razoável, o que pode não ser viável por outras metodologias. Outra possibilidade seria modelar apenas o filete de solda por elementos sólidos, e as chapas por elementos de placa. Estas alternativas serão estudadas neste trabalho.

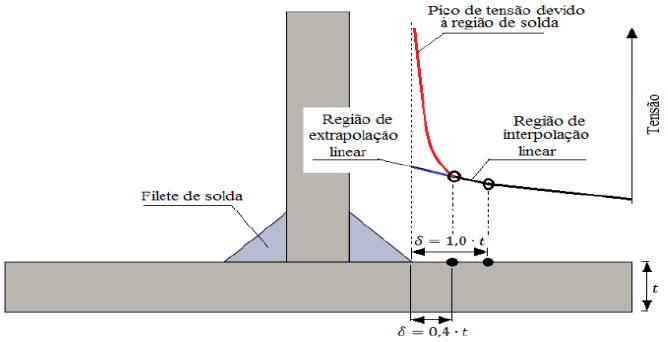

Figura 4.1 - Comportamento de concentração de tensão em uniões soldadas (Extraído de Bauer, 2012)

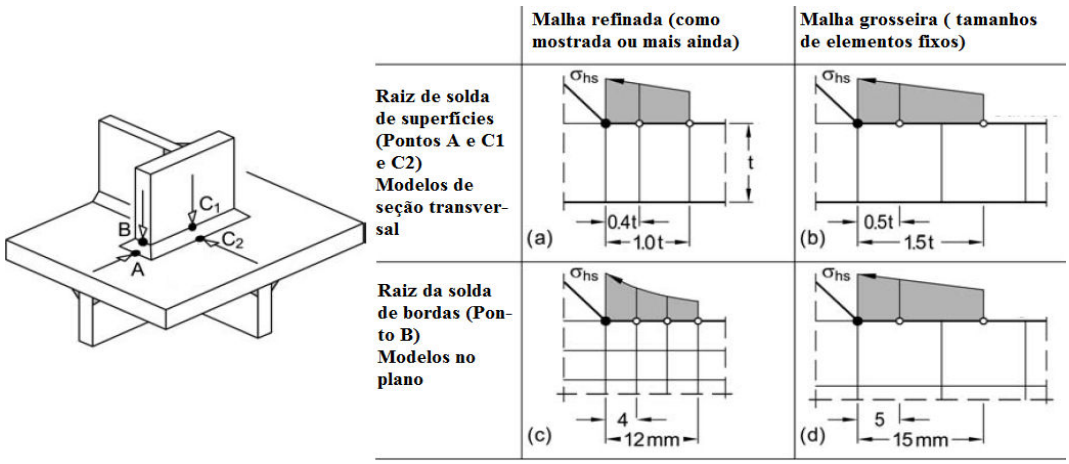

Figura 4.2 – Adaptado de Radaj, Sonsino e Fricke, 2006. Recomendações de Niemi e Tanskanen, 2000, para se efetuar a extrapolação de valores de tensão para diferentes locais e diferentes tamanhos de malhas. (σ_{hs} = tensão na raiz da solda, ou tensão Hot Spot)

O método da tensão estrutural, também conhecido como método da tensão geométrica ou Hot Spot, considera o efeito de elevação da tensão devido aos concentradores de tensão (descontinuidades geométricas) da região de solda. Nesse método desconsideram-se os “picos de tensão” devido à descontinuidades (cantos vivos) na discretização da raiz da solda. O valor neste local é estimando pela distribuição de tensão a certa distância do pé da solda, onde é realizada uma interpolação e/ou extrapolação. A figura 4.1 apresenta de forma ilustrativa a utilização desse método na determinação da tensão em uma solda do tipo filete. Diversos trabalhos, como o de Dong (2001), Fricke (2001) e Doerk et al. (2002), utilizam tensões avaliadas em posições na região entre 0,4 a 1,0 vezes a espessura da chapa analisada.

Porém, não existe um consenso em literatura de qual a melhor distância que deve ser tomada a partir do pé da solda para a coleta da tensão. Deve-se notar que este valor está diretamente correlacionado com a geometria da raiz da solda, que possui um raio de arredondamento.

5. CASOS DE ESTUDO

5.1 Caso analisado:

O tipo de caso estudado neste trabalho, é apresentado na figura 4.2.b. Assim, será utilizado como comparação os valores de tensão retirados dos pontos com 4mm, 8mm e 12mm de distância da raiz da solda, e será efetuada a extrapolação quadrática. Além disto, também serão utilizados os valores de extrapolação linear nos pontos usuais 0,4t e t (figura 4.1). A figura 5.1 mostra a junta soldada em T. O caso analisado é composto de chapas de aço SAE 1020 (Considerado E = 210GPa, ν = 0,3), com espessura de 3,8mm, e os dois filetes de solda foram feitos com eletrodo OK-46.00 (eletrodo para aços de baixo e médio teor de carbono). Para as simulações foi aplicada uma força na chapa 2 de 200,3 N no ponto central (distante a 8,5mm das extremidades laterais) e a uma distância de 52mm da chapa 1 (chapa engastada na parte inferior, até a uma distância de 25mm a contar da extremidade inferior). Estas são as mesmas dimensões, materiais e cargas utilizadas no corpo de prova ensaiado experimental, que será apresentado posteriormente.

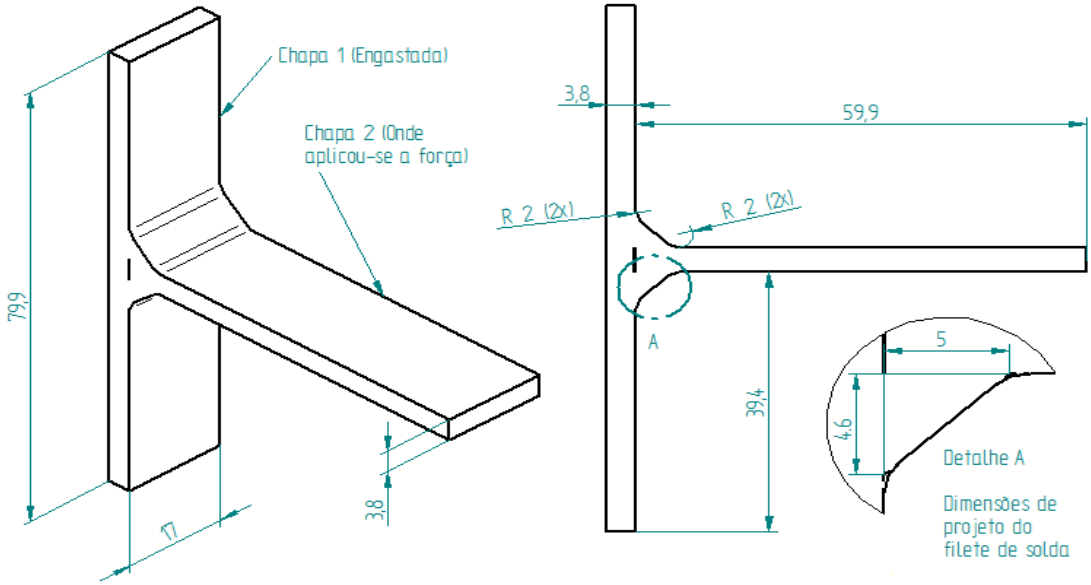

Figura 5.1 – Projeto do corpo de prova analisado neste trabalho

5.2 Modelagens propostas

5.2.1 Modelos sólidos (MS e MSS)

Junções soldadas reais possuem um arredondamento na raiz da solda, assim simulou-se um caso denominado aqui de Modelo Sólido (MS), que considere o arredondamento e seu efeito no valor de tensão. O arredondamento utilizado foi o medido da junta soldada realizada para o ensaio experimental. Esta simulação exige uma discretização muito refinada a fim de capturar corretamente as tensões desenvolvidas na região da raiz da solda. Devido ao altíssimo custo computacional, será mais bem refinada a raiz onde serão tomados os valores de tensão (ver figura 5.2.a). Estes valores serão utilizados para comparação com os outros modelos. Neste caso foram usadas as mesmas propriedades mecânicas em toda a peça (considerando uma distribuição homogênea de propriedades do material). Para uma maior

precisão nos valores de tensão, utilizou-se um alto refinamento em toda a região próxima a solda, até uma distância máxima de 12mm ao longo da chapa a contar da raiz da solda. Este intervalo é onde estarão os valores de tensão que serão usados para realizar uma comparação geral com os outros modelos simplificados que utilizam Hot Spot. Este modelo utilizou um algoritmo de refinamento do tamanho do elemento desde o valor de espessura da chapa até aproximadamente 1,3% deste valor (0,05 mm). Contudo, esse modelo, com um refinamento desta ordem em toda a parte da raiz da solda terá um custo computacional muito grande, assim, como uma das alternativas, se utilizou o elemento tetraédrico quadrático. No MS a tensão na raiz da solda é tomada diretamente pelo método dos elementos finitos.

Além do MS, realizou-se um Modelo Sólido Simplificado (MSS) considerando as mesmas propriedades mecânicas em toda a peça, mas neste modelo não é levado em conta o raio de arredondamento da raiz da solda e utiliza-se o método Hot Spot para estimar o valor de tensão na região crítica (ver figura 5.2.b). Este modelo será utilizado para efetuar uma comparação dos valores de tensão nos pontos de analise (ver os pontos de análise na seção 6) em relação ao modelo mais realístico e que será tomado como referência (modelo MS). Este tipo de modelamento foi utilizado como modelo de referencia em trabalhos encontrados em literatura e por isto é estudado aqui. Foram utilizados elementos hexaédricos quadráticos, tomando como base a malha utilizada em Echer, 2012, onde foi utilizado um modelo com tamanho de elemento de ¼ da espessura. Esta discretização permitiu capturar adequadamente os valores de tensão na região de interesse (pontos utilizados na extrapolação), bem como também foi registrado o valor de deslocamento de um ponto da junta a fim de comparara com os outros modelos simplificados propostos. No MSS foram estudados diferentes tamanhos de elementos partindo do valor de elemento hexaédrico quadrático de ¼ da espessura da chapa (tamanho do elemento aprox. 1mm). Realizaram-se então simulações com elementos menores, da ordem de 1/7 (tamanho aprox. 0,5mm) e 1/10 (tamanho 0,38mm) da espessura. Constatada a convergência de valores nos pontos de análise, definiu-se o tamanho de elemento de 1/10 para o MSS.

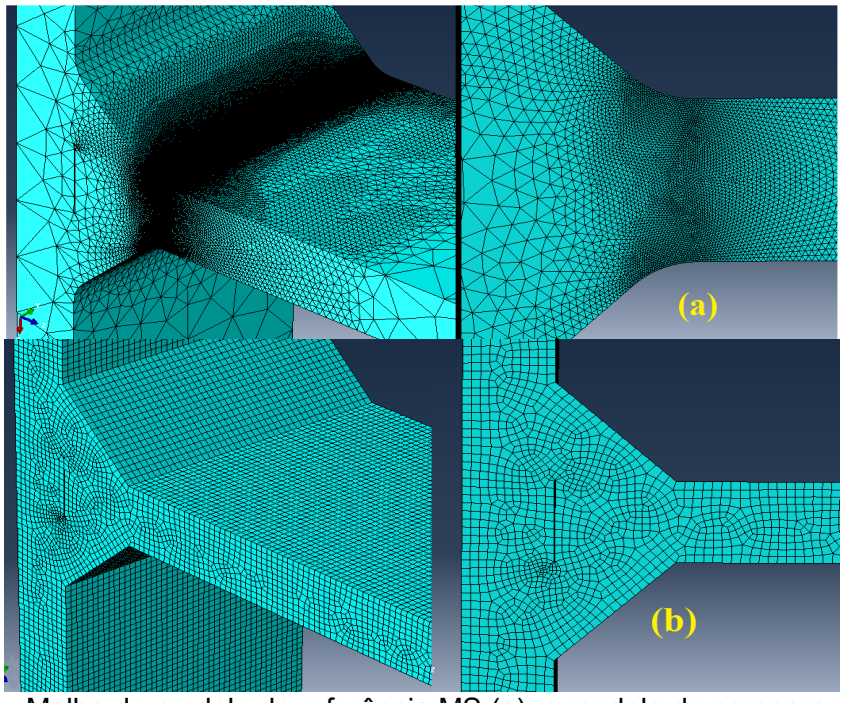

Figura 5.2 – Malha do modelo de referência MS (a), e modelo de comparação MSS (b)

5.2.2 Modelos com elemento de casca

No que se refere a modelos onde se utiliza elementos de casca, em todos os modelos será considerados elementos isoparamétricos lineares (Q4), pois como o objetivo é a análise

de modelos em grandes estruturas com muitos elementos, elementos como Q8 e Q9, mesmo com uma maior precisão, aumentam o custo computacional. Elementos Q4 também são mais rígidos, e podem também apresentar uma menor deformação em uma estrutura menos refinada. Para todos os modelos que envolvem casca utilizou-se a metodologia conforme a figura 5.3:

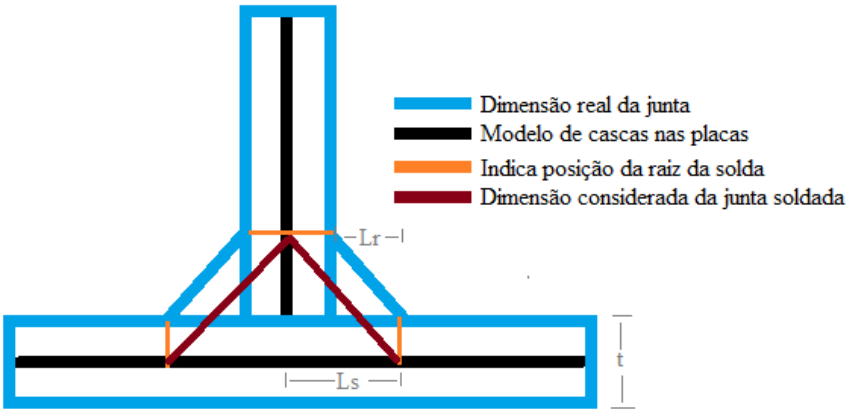

Figura 5.3 – Representação do filete de solda pelos elementos de casca

$$Ls = Lr + t/2 \quad (1)$$

Na equação acima, Ls é o lado do cordão de solda simulado, t é a espessura da chapa e Lr é o lado real, de projeto da solda. A equação (1) foi utilizada nos dois lados da solda.

Essa configuração das dimensões para representar o filete de solda foi usada para que a raiz da solda no modelo se encontre coincidente com a localização real. Em relação ao tamanho de elemento, todas as simulações com elementos de casca utilizaram o tamanho de 0,5mm (aprox. 1/7 da espessura da chapa), pois malhas mais refinadas já começariam a ter um custo computacional considerável, dentro das condições de simulação deste trabalho, e as proposições com elementos de casca devem eliminar custos computacionais mais elevados.

Vale notar que devido à característica de conectividade do elemento de casca, espera-se que este represente a junção soldada com uma rigidez menor do que seria obtido por elementos sólidos. Todos os modelos levaram, em um primeiro momento, em conta uma busca por maior rigidez na região da solda, pois, conforme Echer, 2012, para casos em T, simulações com elementos de casca não apresentam bons resultados para deslocamento em regiões longe do filete de solda.

- Modelo Híbrido (**CS**)

Neste modelo são consideradas chapas modeladas através de elementos de casca isoparamétricos lineares (Q4) e considerando a solda com elementos sólidos quadráticos, para representar uma rigidez mais realística da mesma. A solda foi considerada na dimensão nominal, sem arredondamentos para simplificação, e unida por uma função “Tie”, que ocorre uma ligação dos nós em contato.

- Modelo com Casca Perpendicular (**CP**)

Modelo com representação da solda com elementos de casca em configuração perpendicular às chapas. Neste modelo, ocorre baixo custo computacional, mas um tanto trabalhoso para realizar a modelagem, se não houver uma função que facilite. Porém, devido à configuração dos elementos de casca, espera-se uma melhor representação da rigidez da solda em um caso de flexão. A espessura das cascas é a mesma do espaçamento entre as mesmas, para representar igualmente a área ocupada pelo filete de solda.

- Modelo com Casca Dupla (**CD**)

Modelo com representação do filete por dupla camada de elementos de casca. Neste modelo buscou-se uma maior rigidez em relação aos modelos testados nos trabalhos de Echer, 2012, Bauer, 2012, Grové, 2006, no que diz respeito a modelos com o filete de solda sendo representado por elementos de casca. Ou seja, além de uma melhor representação da rigidez da solda em um caso de flexão, busca-se uma melhor representação de rigidez em diferentes casos de carregamento. Assim, aplicou-se mais uma fileira de cascas no ponto médio entre a "casca de fora" e as placas de metal base. Foi considerada, para as cascas que representam a solda, a espessura equivalente conforme as dimensões de projeto do filete de solda (Ver apêndice IV formula para cálculo, em função da área).

- Modelo com ligações por barras rígidas (**R_S3**)

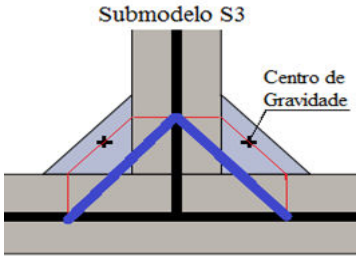

Figura 5.4 – Modelo de simulação proposto por Echer, 2012.

Neste modelo, apontado por Echer, 2012 (código R_S3 naquele trabalho) como o melhor modelo de simplificação de simulação nas análises por ele realizadas, será utilizado aqui para efeito de comparação, onde se trata de ligações rígidas dos nós das duas placas conforme figura. Este modelo, difícil de montar sem uma rotina para tal, tem baixo custo computacional, e também pode ser apresentado com alternativa. Este modelo foi realizado com elemento isoparamétrico quadrático (Q8). Grové, 2006, também utilizou um modelo parecido para efetuar simulações.

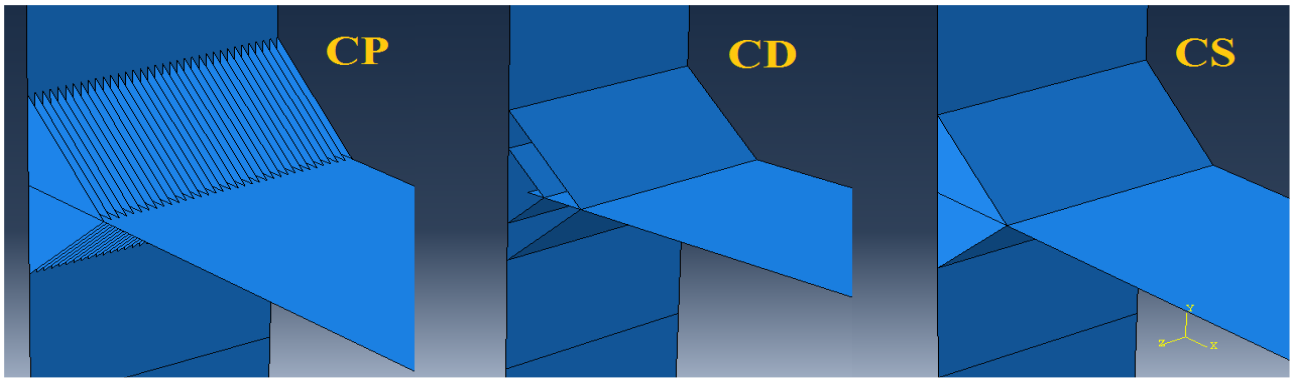

Figura 5.5 – Modelos simplificados propostos

6. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de se obter o real comportamento de uma junta soldada para fins de comparação com os resultados numéricos, foi preparado um corpo de prova e ensaiado em máquina de ensaio. O teste tratou-se de construir um componente soldado em T, com material aço SAE 1020 no metal base, com a solda OK-46.00, eletrodo de solda para aços baixo/médio carbono). No ensaio foi utilizada uma garra de alta rigidez para restringir o movimento, conforme indicado na figura 7.2, uma célula de carga de 100kgf para medir a força aplicada durante o ensaio e o extensômetro embutido da máquina de ensaio para medir o deslocamento

no ponto de aplicação da força. Para reduzir folgas e garantir a correta medição do deslocamento foi aplicada uma pré-carga na configuração de ensaio mostrada na figura 6.1.

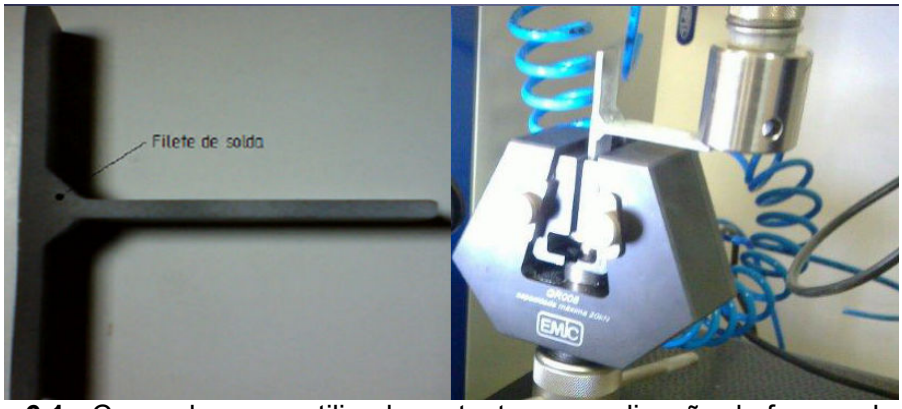

Figura 6.1 - Corpo de prova utilizado no teste com aplicação de força pela EMIC

O valor obtido do teste experimental para comparação com os outros modelos foi o valor de deslocamento (ver figura I.1 do no Apêndice I), no ponto de aplicação da força de 200,3 N, que corresponde à resposta do fim da região linear do comportamento. Este valor, que foi de 1,403 mm**,** indicando uma menor rigidez da estrutura ou dos filetes de solda, pois esse valor de força não poderia causar um deslocamento desta magnitude em nenhuma das simulações com elementos sólidos (mostradas na seção 7.1) considerando as mesmas propriedades das chapas de aço na solda. Como o comportamento da chapa é bem estabelecido pelo seu material, esta resposta indica que a junção soldada possui menor rigidez em relação aos casos modelados. A distribuição das propriedades na solda, bem como na raiz e na ZAC pode ser mais complexa, indicando variações nas propriedades do material. Isto estaria de acordo com trabalhos de literatura que indicam uma distribuição heterogênea de propriedades na região soldada. Valer ressaltar que este comportamento poderia também estar associado a imperfeições geométricas do filete de solda, que não é constante em sua profundidade. Porém, de qualquer forma ambos irão refletir na rigidez global do filete de solda.

Para tornar o modelo mais realístico em termos de resposta mecânica, será feita uma nova proposição de modelagem por elementos sólidos, com a diminuição de algum parâmetro para se compensar essa menor rigidez. Para este estudo decidiu-se por mudar a rigidez dos elementos utilizados na solda. Assim, definiu-se inicialmente que a propriedade a ser mudada seria o módulo de elasticidade do filete de solda, que seria igual à multiplicação do módulo de elasticidade das chapas por um parâmetro *p*. Assim, foram feitas simulações com o MSS, tendo como referência o valor de deslocamento no ponto de aplicação da força fornecido pelo teste experimental.

$$E_{solda} = pE_{chapas} \quad (2)$$

7. RESULTADOS

Inicialmente realizaram-se simulações numéricas com elemento sólidos (MS e MSS) e após com as simplificações propostas (CS, CP e CD). Foi considerado um Módulo de Elasticidade de 210 GPa, e um Coeficiente de Poisson de 0,3, para todas as simulações. Foi aplicada uma força de 200,3 N no ponto indicado na figura 7.1. Para a simulação considerou-se o valor da força aplicado no ponto central, e todos os nós na linha passante a este ponto foram ligados pela função MPC (restrição Multi-Ponto), através de links rígidos, com o ponto mestre sendo este ponto central de aplicação da força. Os pontos de análise (figura 7.1) são:

a) Deslocamento no ponto de aplicação da força;

b) Tensão principal nos pontos a uma distância de 0,4t e t a partir da raiz da solda (indicados na figura 7.1); Analisaram-se esses pontos na extremidade ou borda superior da placa carregada e na extremidade ou borda inferior;

c) Tensão principal nos pontos à uma distância de 4mm, 8mm e 12mm a partir da raiz da solda (indicados na figura 7.1); Analisaram-se estes pontos na extremidade ou borda superior da placa carregada e na extremidade ou borda inferior;

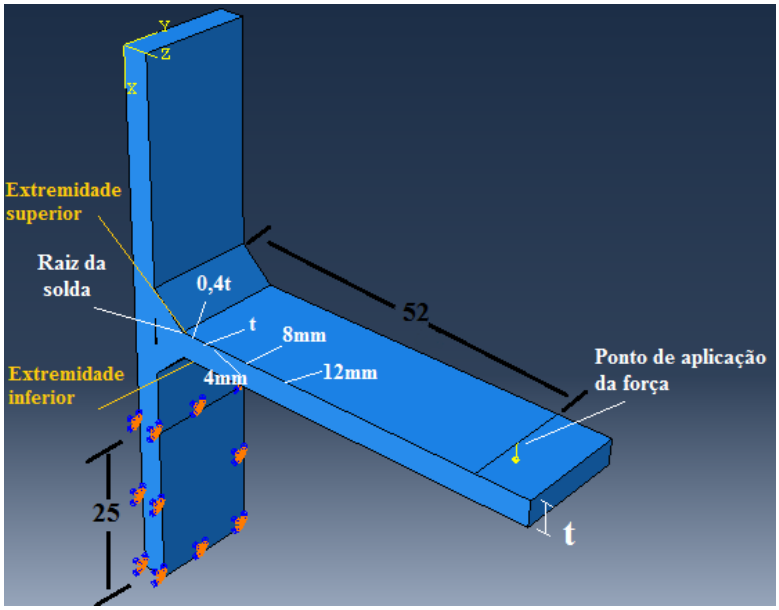

Figura 7.1 – Esboço do caso analisado, com a indicação dos pontos onde serão feitas as análises de deslocamento e tensão.

7.1 Análise dos modelos de simulação propostos frente ao modelo MS

Nestes casos são utilizadas propriedades iguais para todos os pontos da junta soldada. A tabela 7.1 mostra os valores de comparações em porcentagem de simulações nos pontos definidos na figura 7.1. No apêndice II encontra-se a tabela II.2, que mostra os valores de deslocamento e tensão obtidos.

Tabela 7.1 Comparação em % dos valores da tabela II.1 (Apêndice II)

	Malha de 0,5mm	Extremidade Superior		Extremidade Inferior	
Modelo	% de diferença do deslocamento em relação ao modelo MS	% de diferença de tensão principal em relação ao modelo MS - extrapolação linear	% de diferença de tensão principal em relação ao modelo MS - extrapolação quadrática	% de diferença de tensão principal em relação ao modelo MS - extrapolação linear	% de diferença de tensão principal em relação ao modelo MS - extrapolação quadrática
MSS	-0,27%	17,41%	25,38%	20,97%	33,73%
CP	10,68%	44,00%	35,17%	32,27%	35,73%
CD	7,33%	24,90%	28,77%	30,51%	36,33%
CS	10,73%	29,54%	31,33%	34,35%	38,18%
R_S3	-6,61%	20,38%	26,72%	23,74%	32,67%
	Malha de 0,25mm	Extremidade Superior		Extremidade Inferior	
Modelo	% de diferença do deslocamento em relação ao modelo MS	% de diferença de tensão principal em relação ao modelo MS - extrapolação linear	% de diferença de tensão principal em relação ao modelo MS - extrapolação quadrática	% de diferença de tensão principal em relação ao modelo MS - extrapolação linear	% de diferença de tensão principal em relação ao modelo MS - extrapolação quadrática
CP	10,92%	33,29%	35,10%	30,71%	34,41%
CD	7,36%	23,96%	28,36%	29,63%	35,94%
CS	10,87%	28,71%	30,98%	33,61%	37,87%

Ao analisar o deslocamento no ponto de aplicação da força, nota-se que ainda é necessário algum enrijecimento na solda dos modelos propostos, na comparação com a simulação sólida (MS). Para o modelo CD e CP, um aumento da rigidez do elemento, como a

espessura da casca usada no filete de solda ou do módulo de elasticidade poderia ser levar a um resultado mais realístico. Este enrijecimento pode ser obtido multiplicando uma propriedade do material, como o módulo de elasticidade, por um parâmetro *p* qualquer. O modelo CS é um modelo de um custo computacional mais elevado, assim, ao se utilizar elementos lineares de 8 nós da solda, além de deixa-la mais rígida, diminuirá este custo computacional. O único modelo que apresentou um aumento de tensão na região próxima à raiz da solda foi o modelo CP, com a tensão aumentando, conforme mostra a figura 4.2(c), referente às propostas de extrapolação de Niemi e Tanskanen, 2000. Vale notar que, apesar dos modelos MS e MSS serem muito parecidos em concepção, o resultado em tensão do MSS, que utiliza a técnica Hot-Spot, foi superior ao esperado, indicando que diferentes raios de arredondamento na raiz da solda podem levar a estimativas errôneas pelo MSS.

Tabela 7.2 – Comparação dos modelos simplificados modificados com o parâmetro p em relação ao Modelo MS

	Comparação numérica - MS		Extremidade superior		Extremidade Inferior	
p	Modelo	Deslocamento	Tensão extrap. linear	Tensão extrap. quadrática	Tensão extrap. linear	Tensão extrap. quadrática
-	MS	0,9227	175,995	175,995	163,175	163,175
-	MSS	-0,273%	17,407%	25,384%	20,968%	33,728%
7,6	CP_pn	0,014%	29,790%	32,912%	26,469%	33,008%
2,3	CD_pn	-0,019%	20,948%	26,590%	26,250%	34,036%
8,2	CS_pn	0,028%	24,161%	28,672%	28,930%	35,738%

Observou-se que o erro dos valores de tensão diminuiu para os três modelos com os parâmetros *p* aproximados que calibraram em relação ao deslocamento no ponto de aplicação da força.

7.2 Análises dos modelos propostos frente ao dado experimental e proposição de novo modelo de referência

Depois de realizado o teste experimental, citado na seção 6, é realizado então um novo estudo para determinar um novo modelo de referência MSS, com resultados mais realísticos, utilizando o resultado experimental para encontrar uma rigidez equivalente do filete de solda. O novo modelo de referência agora não considerará os arredondamentos, pois a solda terá propriedades diferentes, não sendo possível estimar essa variação. Assim, os valores de tensão de referência serão obtidos via Hot Spot, e serão apresentados na tabela 7.4.

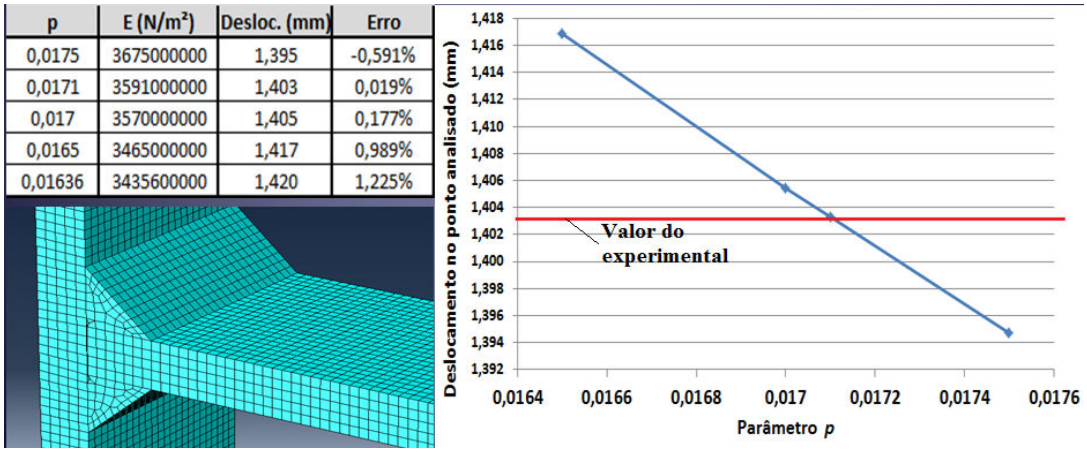

Figura 7.2 - Comparação dos valores no ponto de deslocamento analisado com a mudança no módulo de elasticidade efetuando a multiplicação por um parâmetro *p* proposto.

Vale ressaltar que uma estratégia de otimização poderia levar a resultados melhores na proposta de um novo modelo e que o modulo de elasticidade E indicado nas tabelas representa uma mudança de rigidez equivalente do filete de solda e não a propriedade real do material usado nesta.

A tabela III.1 no apêndice III mostra diversas combinações de simulações com modelo sólido 3D e valores de deslocamento no ponto analisado obtidos considerando variações de tamanho de elemento apenas na região dos filetes de solda e variação em todos os componentes da junta (filetes, chapa onde foi aplicada a força e chapa engastada), e, conclui-se que o valor de *p* na região da solda que calibra o valor de deslocamento na chapa está em função também da variação do tamanho do elemento e também do refinamento de malha de cada componente da junta.

Na figura 7.2, estão alguns valores do estudo de convergência e seleção de um novo modelo sólido simplificado (denominado MSS_pe) que será agora utilizado como referência para os valores de tensão no estudo de comparação geral frente a todos os modelos apresentados neste trabalho. O valor de *p* = 0,0171 foi obtido pelos estudos da tabela III.1

Os modelos simplificados possuem uma menor rigidez, que para este caso já podem aproximar apenas com a nova abordagem de considerar um módulo de elasticidade menor nas junções soldadas. As tabelas 7.3 comparam os valores para cada modelo e mostram um pequeno estudo de calibração do modelo com alteração do parâmetro p.

Tabelas 7.3 (a) – Análise do comportamento frente à mudança do $E_{solda.}$ (Modelo CP)

Modelo CP_pe							
Tamanho do elemento	**p**	**E da solda (Pa)**	**Deslocamento (mm)**				
Malha 0,5 mm	0,2	4,20E+10	1,213				
Malha 0,5 mm	0,1	2,10E+10	**1,416**				
Malha 0,5 mm	0,05	1,05E+10	1,805				
				Extremidade superior		**Extremidade Inferior**	
Tamanho do elemento	**p**	**E da solda (Pa)**	**Deslocamento (mm)**	**Extrapolação linear (MPa)**	**Extrapolação quadrática (MPa)**	**Extrapolação linear (MPa)**	**Extrapolação quadrática (MPa)**
Malha 0,5 mm	0,1	2,10E+10	1,416	235,914	240,998	225,900	232,178
Malha 0,25 mm	0,1	2,10E+10	1,420	234,675	235,259	224,647	226,455

Tabela 7.5 (b) Análise para o modelo CD

Modelo CD_pe							
Tamanho do elemento	**p**	**E da solda (Pa)**	**Deslocamento (mm)**				
Malha 0,5 mm	0,2	**4,20E+10**	1,303				
Malha 0,5 mm	0,15	**3,15E+10**	**1,424**				
Malha 0,5 mm	0,1	**2,10E+10**	1,662				
				Extremidade superior		**Extremidade Inferior**	
Tamanho do elemento	**p**	**E da solda (Pa)**	**Deslocamento (mm)**	**Extrapolação linear (MPa)**	**Extrapolação quadrática (MPa)**	**Extrapolação linear (MPa)**	**Extrapolação quadrática (MPa)**
Malha 0,5 mm	0,15	3,15E+10	1,424	226,138	229,460	222,996	227,386
Malha 0,25 mm	0,15	3,15E+10	1,425	224,564	228,979	221,482	226,983

Nos resultados verificaram-se os valores de deslocamento no ponto próximo a aplicação da força. Assim, selecionou-se um valor do E_{solda} que aproximou esse valor ao valor do teste, e assim analisaram-se novamente os valores de tensão extrapolados, e foi realizado um

refinamento de malha. Novamente, um processo de otimização poderia ser utilizado para encontrar o parâmetro que melhor reproduz o comportamento esperado.

Tabela 7.5 (c) Análise para o modelo CS

Modelo CS_pe							
Tamanho do elemento	p	E da solda (Pa)	Deslocamento (mm)				
Malha 0,5 mm	0,2	4,20E+10	1,216				
Malha 0,5 mm	0,1	2,10E+10	**1,422**				
Malha 0,5 mm	0,05	1,05E+10	1,818				
				Extremidade superior		Extremidade Inferior	
Tamanho do elemento	p	E da solda (Pa)	Deslocamento (mm)	Extrapolação linear (MPa)	Extrapolação quadrática (MPa)	Extrapolação linear (MPa)	Extrapolação quadrática (MPa)
Malha 0,5 mm	0,1	2,10E+10	1,422	231,185	231,897	226,832	228,841
Malha 0,25 mm	0,1	2,10E+10	1,426	229,905	231,556	225,687	228,559

Finalmente, efetuou-se uma comparação geral de todas as simulações apresentadas neste trabalho, considerando agora como parâmetro para o ponto de deslocamento o valor fornecido pelo teste experimental, e os valores de tensão extrapolados fornecidos pela simulação com elementos sólidos simplificada mostrada na figura 7.2, e a mesma foi denominada modelo MSS_pe). Todos os modelos utilizados na comparação, salvo os modelos MS, MSS e MSS_pe, que já tinham suas malhas definidas anteriormente, foram utilizados com as malhas com tamanho de elemento de 0,5mm.

Tabela 7.4 – Comparação geral de todos os modelos testados frente ao dado experimental e ao novo modelo sólido simplificado (MSS_pe)

	Comparação geral		Extremidade superior		Extremidade inferior	
p	Modelo	Deslocamento	Tensão extrap. linear	Tensão extrap. quadrática	Tensão extrap. linear	Tensão extrap. quadrática
-	Experimental	1,403 mm				
0,0171	MSS_pe	0,02%	230,42 MPa	234,394 MPa	229,364 MPa	234,182 MPa
-	MS	-34,23%	-23,62%	-24,91%	-28,86%	-30,32%
-	MSS	-34,41%	-10,32%	-5,86%	-13,94%	-6,82%
-	CP	-27,21%	9,99%	1,50%	-5,90%	-5,42%
-	CD	-29,41%	-4,60%	-3,32%	-7,15%	-5,01%
-	CS	-27,17%	-1,06%	-1,39%	-4,42%	-3,72%
-	R_S3	-38,58%	-8,05%	-4,85%	-11,97%	-7,55%
7,6	CP_pn	-34,22%	-0,87%	-0,20%	-10,03%	-7,32%
2,3	CD_pn	-34,25%	-7,62%	-4,95%	-10,18%	-6,61%
8,2	CS_pn	-34,21%	-5,17%	-3,39%	-8,28%	-5,42%
0,1	CP_pe	0,93%	2,38%	2,82%	-1,51%	-0,86%
0,15	CD_pe	1,50%	-1,86%	-2,11%	-2,78%	-2,90%
0,1	CS_pe	1,37%	0,33%	-1,07%	-1,10%	-2,28%

A tabela 7.4 mostra que considerar a estrutura soldada com as mesmas propriedades na solda e nas chapas neste caso levaria a erros em relação ao deslocamento na ordem de 30% aproximadamente, para todos os modelos simplificados com essa consideração. Referente à tensão, os erros são da ordem média de 5% a 10%, mostrando que os valores de tensão, por serem usados para fazer a extrapolação relativamente longe da raiz da solda (e da ZAC, neste caso), não houve grandes diferenças na comparação com o modelo com alterações no E_{solda}. Vale notar que no ensaio experimental o corpo de prova se deformou mais com a mesma força aplicada. O modelo MS forneceu o maior erro em relação ao resultado

experimental, devido a não concentração de tensões que o arredondamento permite, e a não consideração de propriedades diferentes entre a solda e as chapas. No ponto onde o mesmo foi tirado, em um modelo heterogêneo, existe um estado complexo de tensões, efeitos de borda e tensões residuais. O valor real esperado deve ser maior, e foi estimado através das extrapolações com o modelo MSS_pe.

8. CONCLUSÕES

Como é necessário que haja simplificações para a redução do custo computacional e tempo usado na modelagem de estruturas complexas, comuns na indústria, é necessária a utilização de artifícios matemáticos para uma calibração nos resultados, quando se dispõe da realização de testes experimentais para efeitos de comparação. Porém, deve-se ter cuidado na realização do teste, principalmente nas características do corpo de prova, que podem ser difíceis de reproduzir numericamente, devido às imperfeições da fabricação, representação física e/ou problemas e imprecisões nos equipamentos de medição. A abordagem da Hot Spot é uma abordagem interessante, e forneceu, neste trabalho, valores coerentes, depois de várias configurações no modelamento.

Referente às análises das duas diferentes extrapolações de estimativa de tensão na raiz da solda, no caso estudado, não houve diferenças significativas nas extrapolações lineares e quadráticas, podendo ambas ser utilizadas.

No estudo utilizando o modelo MS como referência, foi necessário enrijecer a região soldada (parâmetro $p > 1$) dos modelos CP_pn, CD_pn e CS_pn para obter um comportamento mecânico similar ao observado no modelo de referência.

A metodologia de modificar a rigidez da solda leva a interpretação que algum fenômeno físico esteja sendo perdido no modelamento com elementos sólidos ou de cascas e barras. Este pode ser geométrico ou constitutivo. Nesta abordagem foi necessário modificar a rigidez do elemento de casca para reproduzir os resultados observados experimentalmente. Este resultado levou a um aumento da flexibilidade no modelo de referência (criação do modelo MSS_pe, que estimou o valor de tensão experimental) e também se analisou as simplificações com elementos de casca para esta comparação (CP_pe, CD_pe e CS_pe), todos obtidos diminuindo o parâmetro p (agora, $0 < p < 1$).

A hipótese de considerar, para efeitos de simplificação, em uma junta soldada as mesmas propriedades das chapas pode ser uma hipótese equivocada, que pode levar aos erros observados. Esta observação está de acordo com trabalhos que sugerem que a solda pode estar mais ou menos rígida que o metal base, dependendo das condições de soldagem impostas e materiais usados em sua fabricação. Em relação aos modelos de simplificação propostos (CP_pn, CD_pn, CS_pn, CP_pe, CD_pe e CS_pe), que levam em conta um parâmetro p, estes mostraram baixos erros quando comparados com o modelo MSS_pe referente a tensão na raiz da solda. O modelo CS_pe apresentou um baixo erro nas comparações, e é o mais recomendado neste caso analisado. No entanto, deve-se considerar o custo computacional, e o modelo CD_pe é o modelo com menor custo e mais simples de se modelar, e também é recomendado.

Neste estudo uma única configuração de junta T com carregamento de flexão foi testada. Porém, tal procedimento com o uso do parâmetro p deve ser caracterizado para diferentes condições de carregamento e juntas antes de ser utilizado na prática, o que levaria a um trabalho muito laborioso, porém, necessário.

Assim, é sugerido para análises futuras, um estudo mais detalhado das propriedades da solda, com uma sugestão de variação gradual das propriedades do material ao longo da mesma para se efetuar a simulação, e é claro, comparações com testes experimentais. Estudo de simplificações com a mudança nas características geométricas do filete também são sugeridas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Doerk O, Fricke W and Weissenborn C, **'Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints'**, Int J Fatigue, 2003, 25, 359–369.

Dong P. "**A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analyses."** Int J Fatigue 2001;23(10):865–76.

Echer, L. **"Análise de Uniões Soldadas Através do Método da Tensão Estrutural via Elementos Finitos**". 2012. 27p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Fricke W. "**Recommended hot Spot analysis procedure for structural details of ships and FPSOs based on round-robin FE analyses."** Int J Offshore & Polar Engng 2002;12(1):40–8.

Grové, A. P. **"Development of a Finite Element Based Nominal Stress Extraction Procedure for Fatigue Analysis of Welded Structures"**, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria

Gurney TR, Maddox SJ. "**A re-analysis of fatigue data for welded joints in steel**". Welding Research Int 1973;3(4):1–54.

Gurney TR. "**Fatigue of thin-walled joints under complex loading**". Cambridge: Abington Publishers, 1997

Gurney TR. "**Fatigue of welded structures**". Cambridge: Cambridge University Press, 1979.

Labesse F, Recho N. "**Geometrical stress level at the weld toe and associated local effects**." Weld World 1999;43(1):23–32.

Machado, I. G.; **"Soldagem & Técnicas Conexas: Processos"**, Brasil, 1ª edição, 2007.

Niemi E, Tanskanen P. "**Hot Spot stress determination for welded edge gussets.**", Weld World 2000;44(5):31–7.

Olivier R, Ritter D. "**Catalogue of S–N curves of welded joints in structural steel",** vol. 1–5. Report no. 56. D. usseldorf: DVS-Verlag, 1979

Poutiainen I and Niemi E, "**The determination of hot spot stress in gusset structures using a coarse mesh**", IIW Doc XIII-1820-2000.

Radaj D. **"Design and analysis of fatigue-resistant welded structures.",** Cambridge: Abington Publishers, 1990

Radaj D, Sonsino CM. **"Fatigue assessment of welded joints by local approaches."** Cambridge: Abington Publishers, First edition 1998. Second edition 2006.

Sutton, M. A. "**Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts,Theory and Applications**" 1st 2009.

Zhihai Xiang, Seng Tjhen Lie, Bo Wang, Zhangzhi Cen, "**A simulation of fatigue crack propagation in a welded T-joint using 3D boundary element method**", Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, People's Republic of China School of Civil and Structural Engineering, Nanyang Technological University, Nanyang Avenue, Singapore, Singapore 639798

APÊNDICE I

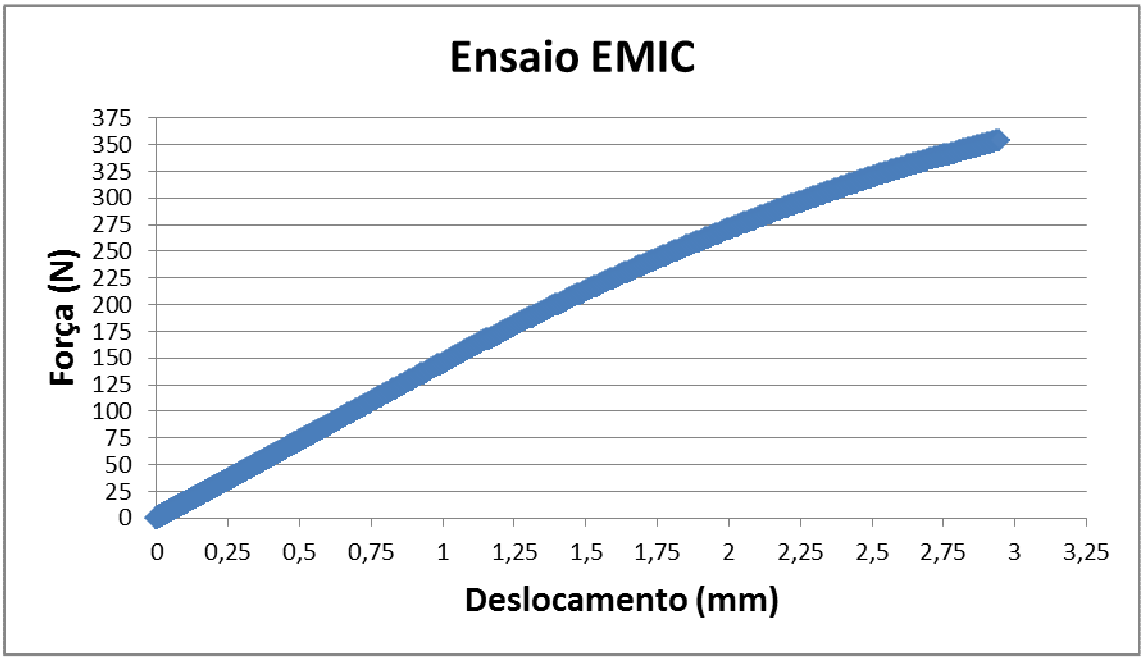

Figura I.1 – Gráfico do ensaio de força x deslocamento fornecido pela EMIC do corpo de prova T

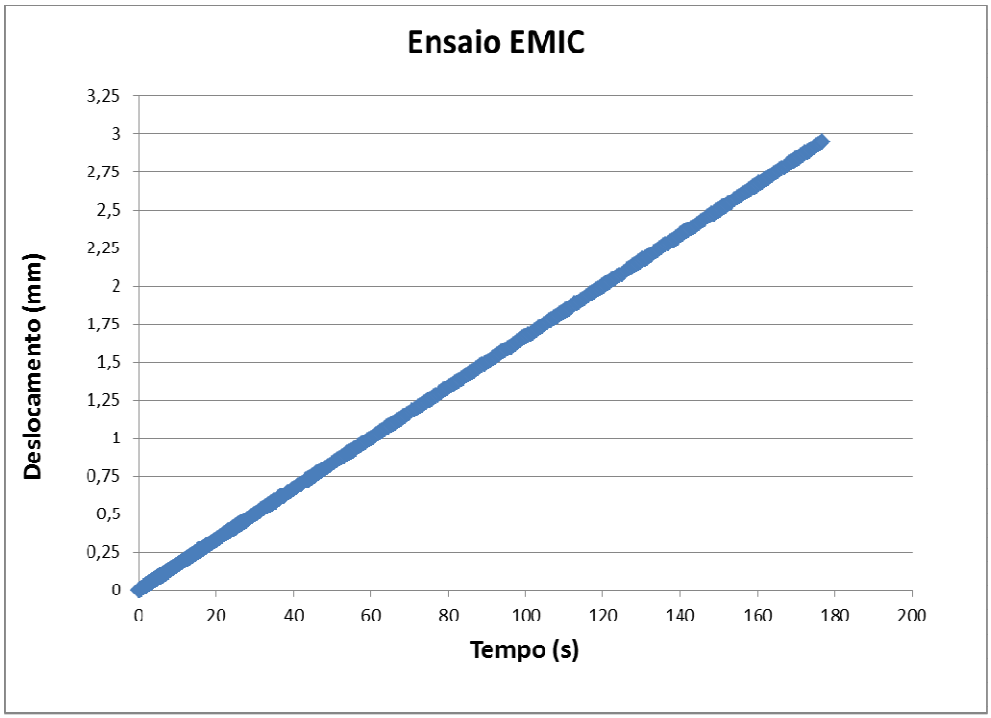

Figura I.2 – Gráfico do ensaio de deslocamento x tempo fornecido pela EMIC do corpo de prova T

APÊNDICE II

Tabela II.1 Valores obtidos das simulações dos demais modelos, com os deslocamentos no ponto de análise e extrapolações lineares e quadráticas frente ao modelo sólido MS

	Malha de 0,5mm	Extremidade Superior		Extremidade Inferior	
Modelo	Deslocamento no ponto próx. ao aplicação da força (mm)	Valor extrapolado Linear (MPa)	Valor extrapolado Quadratico (MPa)	Valor extrapolado Linear (MPa)	Valor extrapolado Quadratico (MPa)
MS *	0,9227	175,995		163,175	
MSS ***	0,9202	206,63	220,67	197,39	218,21
CP **	1,0213	253,44	237,9	215,83	221,48
CD **	0,9903	219,81	226,62	212,96	222,45
CS **	1,0217	227,98	231,14	219,23	225,48
R_S3 **	0,8617	211,87	223,02	201,92	216,49
	Malha 0,25mm	**Extremidade Superior**		**Extremidade Inferior**	
Modelo	Deslocamento no ponto próx. ao aplicação da força (mm)	Valor extrapolado Linear (MPa)	Valor extrapolado Quadratico (MPa)	Valor extrapolado Linear (MPa)	Valor extrapolado Quadratico (MPa)
CP **	1,0235	234,58	237,77	213,29	219,33
CD **	0,9907	218,17	225,91	211,53	221,82
CS **	1,0230	226,52	230,52	218,01	224,97

* Valores de tensão principal obtidos no local indicado na figura II.1 para o modelo MS, não houve extrapolações, pois o modelo não considera descontinuidade na raiz da solda, mas sim um arredondamento, similar ao corpo de prova utilizado no teste experimental;
** Valores de tensão principal extrapolados;
*** Modelo MSS realizado com tamanho de malha 1/10 da espessura da chapa;

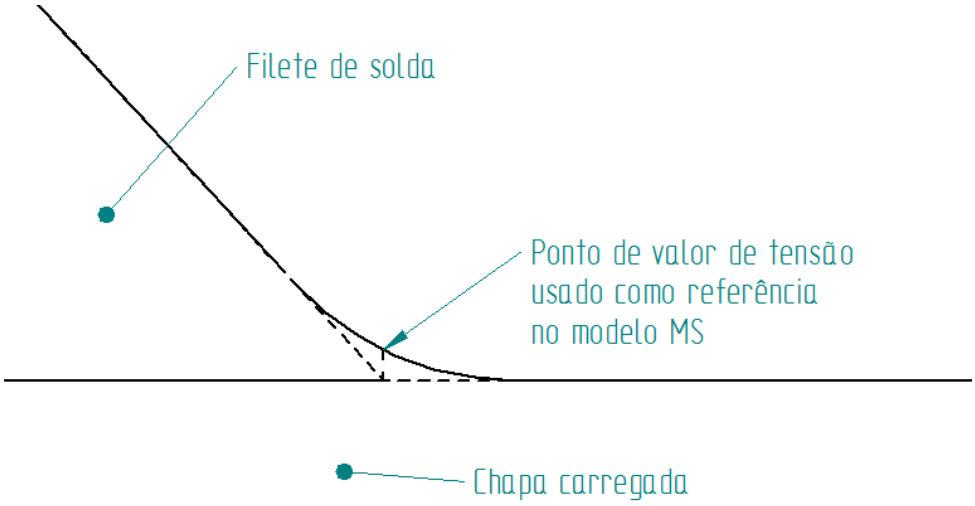

Figura II.1 – Representação do local onde se analisou o valor de tensão para o modelo MS (Extremidade superior e inferior)

APÊNDICE III

Tabela III.1 - Estudo de diversas combinações de simulações com fornecimento dos valores de *p* considerando variações de tamanho de elemento apenas na região dos filetes de solda (modelo sólido 3D) e também variando todos os componentes da junta (filetes, chapa onde foi aplicada a força e chapa engastada). O erro está em relação ao valor fornecido pelo teste experimental.

Tamanho do elemento da malha (mm)						
Placa Engastada	Placa com a força aplicada	Filetes de solda	p	E_{solda} (Pa)	Desloc. (mm)	Erro
1	1	1	0,1	2,10E+10	1,05296	-24,95%
1	1	1	0,05	1,05E+10	1,13732	-18,94%
1	1	1	0,025	5,25E+09	1,27239	-9,31%
1	1	1	0,02	4,20E+09	1,33491	-4,85%
1	1	1	0,017	3,57E+09	1,38891	-1,00%
1	1	1	0,0165	3,47E+09	1,39972	-0,23%
1	1	1	0,01636	3,44E+09	1,40286	-0,01%
1	1	1	0,01635	3,43E+09	1,40309	0,01%
1	1	1	0,014	2,94E+09	1,46488	4,41%
1	1	1	0,013	2,73E+09	1,49771	6,75%
1	1	1	0,01	2,10E+09	1,63435	16,49%
0,7	0,7	0,7	0,0175	3,68E+09	1,395	-0,59%
0,7	0,7	0,7	0,0171	3,59E+09	1,403	0,02%
0,7	0,7	0,7	0,017	3,57E+09	1,405	0,18%
0,7	0,7	0,7	0,0165	3,47E+09	1,417	0,99%
1	1	0,75	0,01	2,10E+09	1,233	-12,13%
1	1	0,75	0,005	1,05E+09	1,320	-5,95%
1	1	0,75	0,0035	7,35E+08	1,384	-1,34%
1	1	0,75	0,00325	6,83E+08	1,400	-0,19%
1	1	0,75	0,003	6,30E+08	1,419	1,13%
1	1	0,75	0,001	2,10E+08	1,881	34,04%
1	1	0,5	1	2,10E+11	0,898	-35,96%
1	1	0,5	0,1	2,10E+10	1,043	-25,64%
1	1	0,5	0,05	1,05E+10	1,114	-20,60%
1	1	0,5	0,02	4,20E+09	1,264	-9,89%
1	1	0,5	0,014	2,94E+09	1,359	-3,16%
1	1	0,5	0,0125	2,63E+09	1,379	-1,73%
1	1	0,5	0,012	2,52E+09	1,410	0,48%
1	1	0,5	0,01	2,10E+09	1,480	5,50%
0,75	0,75	0,5625	0,00325	6,83E+08	1,822	29,85%
0,75	0,75	0,5625	0,008	1,68E+09	1,405	0,14%
0,75	0,75	0,5625	0,009	1,89E+09	1,372	-2,23%
0,75	0,75	0,5625	0,01	2,10E+09	1,345	-4,16%
1,875	1,25	0,9375	0,013	2,73E+09	1,432	2,03%
1,5	1	0,75	0,013	2,73E+09	1,418	1,09%
1,125	0,75	0,5625	0,008	1,68E+09	1,632	16,34%
1,125	0,75	0,5625	0,01	2,10E+09	1,517	8,15%
1,125	0,75	0,5625	0,013	2,73E+09	1,410	0,48%
0,75	0,5	0,38	0,025	5,25E+09	1,230	-12,35%
0,75	0,5	0,38	0,013	2,73E+09	1,404	0,09%
0,75	0,5	0,38	0,012	2,52E+09	1,433	2,17%

APÊNDICE IV

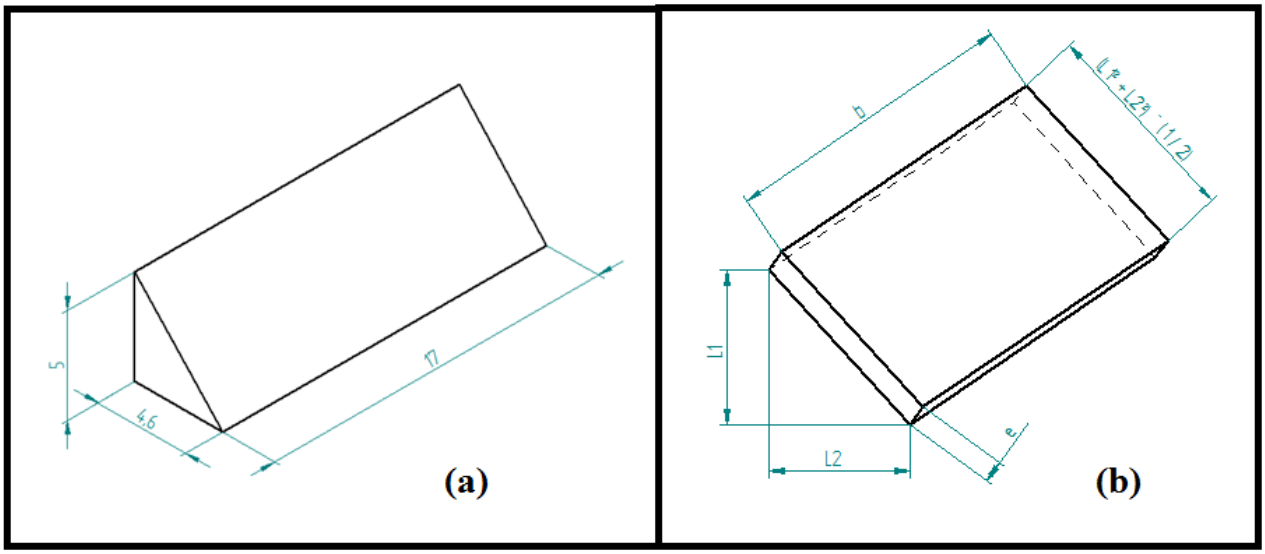

Figura IV.1 – Filete de solda com dimensões de projeto (a), e retângulo considerado no cálculo da espessura equivalente do filete de solda do modelo CD (b)

Na figura IV.1 (a) consta as dimensões de projeto dos filetes de solda, onde L1 é 5mm e L2 é 4,6mm e b = 17 mm. Para a modelagem de casca do modelo CD, conforme equação (1) na seção 5.2.2, que soma aos valores L1 e L2 a metade das espessuras das chapas, ou t/2, não haveria um valor de e (espessura da casca a ser fornecida ao software) que equivaleria o valor da área do filete de projeto (301,7 mm² com a área do filete pela modelagem de casca). Assim, assumiu-se que, para o calculo de uma espessura equivalente a esta área de projeto, iria se considerar uma casca conforme mostra a figura IV.1 (b), onde neste é possível haver alguma relação de áreas firmada por um valor de e. Abaixo as equações utilizadas:

$$A_{solda} = L1L2 + b(\sqrt{L1^2 + L2^2} + L1 + L2) \quad (3)$$

$$e = (A_{solda}/2 - b\sqrt{L1^2 + L2^2}) / (b + \sqrt{L1^2 + L2^2}) \quad (4)$$

A equação (3) trata-se de um calculo de área do filete, e a equação (4) é um calculo da área de um retângulo, considerando os lados indicados pela figura IV.1 (b). Para o modelo CD, o cálculo de (4) forneceu um valor de 1,4857mm, e foi usado na casca externa e interna da solda do modelo.