

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO COMPARATIVO DE METODOLOGIAS DE MODELAGEM DE FILETE DE  
SOLDA UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS

por

Victor Pizzolato Livotto

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, agosto de 2023

Pizzolato Livotto, Victor

Estudo comparativo das metodologias de modelagem de filetes de solda utilizando elementos finitos / Victor Pizzolato Livotto. -- 2023.

25 f.

Orientadora: Felipe Tempel Stumpf.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. União soldada. 2. Método de Elementos Finitos. 3. elementos de casca. 4. tensões hot spot. I. Tempel Stumpf, Felipe, orient. II. Título.

Victor Pizzolato Livotto

ESTUDO COMPARATIVO DE METODOLOGIAS DE MODELAGEM DE FILETE DE  
SOLDA UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS

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  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Darci Barnech Campani  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Felipe Tempel Stumpf

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf (Presidente)

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Rogério José Marczak

Porto Alegre, agosto de 2023

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais, Tânia Mara e Paolo Roberto, por sempre me apoiarem e me auxiliar com os meus estudos, mesmo após decidir não seguir na mesma área de conhecimento que eles trilharam.

Ao meu orientador Prof. Felipe Tempel Stumpf, agradeço o tempo dedicado e conhecimento compartilhado.

Por fim, agradeço ao Prof. Ivan Guerra Machado por ter me auxiliado no desenvolvimento deste artigo.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

**Estudo comparativo de metodologias de modelagem de filetes de solda utilizando elementos finitos.**

**Pizzolato Livotto, Victor**

e-mail: victorplivotto@gmail.com

**Resumo.** *A avaliação precisa das tensões nas soldas é fundamental para projetos de uniões soldadas, porém essa é uma tarefa complexa mesmo com o auxílio de métodos computacionais, sendo necessário o desenvolvimento de metodologias específicas para cumprir essa finalidade. Este estudo avaliou a eficiência de três técnicas distintas de modelagem utilizando elementos de casca na representação das tensões em uma união soldada do tipo T, foram comparadas com resultados derivados da análise por método de elementos finitos (MEF) com elementos tridimensionais. Foram contemplados cenários de carregamento de tração, flexão e combinado. As técnicas estudadas centralizam-se na abordagem de representação do cordão de solda: elementos de casca oblíquos (EC), ligações rígidas (LR) e incremento de espessura (IE). O método IE destacou-se pela simplicidade de aplicação. Os modelos LR, seguindo diretrizes originais, apresentaram resultados comparáveis com o referencial. A abordagem EC demonstrou ser a que mais se aproximou da referência (modelagem por elementos sólidos) em todos os cenários de carregamento.*

**Palavras-chave:** *União soldada; Método de Elementos Finitos; elementos de casca; tensões hot spot.*

## **Comparative study of weld fillet modeling methodologies using finite elements.**

**Abstract.** *The accurate assessment of stresses in welds is crucial for the design of welded joints. However, this is a complex task even with the aid of computational methods, necessitating the development of specific methodologies for this purpose. This study evaluated the efficiency of three distinct modeling techniques using shell elements in predicting stresses in a T-type welded joint. They were compared with results derived from finite element method (FEM) analysis using solid elements. Scenarios of tensile, bending, and combined loading were considered. The techniques studied focus on the representation approach of the weld bead: oblique shell elements (SE), rigid links (RL), and increase thickness (IT). The IT method stood out for its simplicity of application. The IT method stood out for its simplicity of application. The RL models, following original guidelines, presented results comparable to the reference. The SE approach proved to be the closest to the reference (solid element modeling) in all load scenarios.*

**Keywords:** *Welded joint; Finite Element Method; Shell elements; Hot spot stresses.*

## NOMENCLATURA

### Símbolos

---

$\sigma$	Tensão	[MPa]
$t$	Espessura	[mm]
$\bar{t}$	Espessura do elemento de casca	[mm]
$\bar{d}$	Distancia da perna de solda do elemento de casca	[mm]
$g$	Garganta do cordão de solda	[mm]
$d$	Comprimento	[mm]
$h$	Altura	[mm]
$l$	Lagura	[mm]
$a$	Perna de solda	[mm]
$\rho$	Densidade do material	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	
$G$	Modulo de Young	[GPa]
$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$Er_{\%}$	Erro relativo percentual	[%]

### Abreviaturas e acrômimos

---

MEF	Método dos elementos finitos
EC	Elemento em casca obliquo
LR	Ligação rígida
IE	Incremento de espessura
CG	Centro de gravidade
AWS	American welding society
ASME	American society of mechanical engineers
ASTM	American society for testing and materials
IIW	International institute of welding
$VE$	Valor esperado
$VO$	Valor obtido

**SUMÁRIO**

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO	2
2.1.	Método da Tensão Estrutural <i>Hot Spot</i> através da Extrapolação Linear	2
2.2.	Técnicas de modelagem do cordão de solda	3
3.	METODOLOGIA	5
3.1.	Descrição geral do modelo simulado	5
3.2.	Modelagem por Elemento Sólido	6
3.3.	Modelagem por elementos de casca	7
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
4.1.	Resultado complementar: Tempo de processamento	12
5.	CONCLUSÃO	13
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
	APÊNDICE A	17
	APÊNDICE B	18

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem é uma técnica consolidada na indústria para unir componentes estruturais, garantindo resistência e integridade às estruturas. As juntas soldadas de filete, especialmente os tipos sobreposta, cruciforme e "T", são essenciais para a transmissão de cargas entre os componentes. No entanto, estas estão sujeitas a campo de tensões e deformações complexas devido às condições de carregamento e à geometria da junta. Devido a isso, o estudo das tensões e deformações nos cordões de solda tem sido tópico recorrente visando qualificar os projetos de junta soldadas em projetos estruturais.

Historicamente, a determinação da vida em fadiga é vital no projeto de uniões soldadas. Isso porque ela permite estimar a durabilidade e confiabilidade da junta. Uma parte crítica dessa determinação envolve a avaliação precisa das tensões nas soldas. Contudo, essa avaliação é complexa devido a fatores como as transformações microestruturais oriundas do processo de soldagem (Echer, 2012) e a variabilidade na geometria da solda, que, “a real geometria de uma solda é muito difícil de se prever na maioria dos ambientes de fabricação” (ADAMS e ASKENAZI, 1998, v. 1, p. 394, tradução do autor).

A aplicação do método dos elementos finitos (MEF) na análise de tensões em cordões de solda tornou-se particularmente desafiadora. Machado (2011) ressalta que:

Em diversas instâncias durante as simulações dos filetes de solda se percebe a formação de picos de tensão extremamente elevados, suficientes para provocar fratura na raiz ou pé, mas sob carregamento muito menor do qual a junta normalmente foi dimensionada para operar (MACHADO, 2011).

Somente na década de 1990, graças ao método introduzido por Radaj (1990) onde é avaliada a tensão atuante nas regiões de solda utilizando procedimentos de extrapolação (ou linearização através da espessura), em conjunto com a avaliação de tensão estrutural  $\sigma_{hs}$ , foi possível aplicar métodos de análises estruturais em juntas soldadas com confiabilidade, permitindo análises confiáveis das tensões nos cordões de solda. “Esse avanço impulsionou o desenvolvimento de diferentes metodologias para a representação geométrica dos filetes de solda” (ECHER e MARCZAK, 2018, tradução livre).

Diversas metodologias têm sido propostas para a modelagem de filetes de solda. Niemi et al. (1995) sugeriu uma modelagem usando elementos de casca oblíquos. Em outra abordagem, Fayard e colaboradores (1997), centraram-se no uso de ligações rígidas para representar de maneira adequada da rigidez do cordão de solda. Eriksson e Lignell (2003), por outro lado, propuseram o aumento da espessura na região do cordão.

Embora as técnicas de modelagem para filetes de solda tenham evoluído ao longo de duas décadas, pesquisas contínuas buscam aprimorar as metodologias existentes. Exemplos recentes incluem as análises de Echer (2015) que buscou aplicar as metodologias de modelagem para modelos dinâmicos. Silveira, Mezzomo e Goedel (2017) propuseram a utilização de metodologias mais recentes para a determinação da vida à fadiga de uma junta soldada do tipo T, com grande variação de resposta entre as metodologias.

Neste contexto, o objetivo central deste trabalho foi realizar uma análise comparativa das tensões em juntas soldadas de filete do tipo T por meio de simulações empregando o método dos elementos finitos. Sendo avaliados os métodos de modelagem para filetes de solda de incremento de espessura, ligações rígidas e elementos de casca oblíquos. A junta soldada simulada foi submetida a três condições de carregamento distintas, para avaliar o desempenho dos métodos de modelagem em diferentes cenários, a fim de identificar a técnica mais adequada.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1. Método da Tensão Estrutural *hot spot* através da Extrapolação Linear

A estratégia de extrapolação empregada na análise de tensões estruturais visa mitigar picos de tensão, resultantes das não linearidades da malha, em simulações de filetes de solda. Radaj (1990) propôs um parâmetro de engenharia, definido como  $\sigma_{hs}$  (MPa), que caracteriza o estado de tensão ao qual os componentes soldados estão expostos, conforme destacado por Radaj, Sonsino e Fricke (2009). Este parâmetro é determinado pela Equação 1:

$$\sigma_{hs} = \sigma_m + \sigma_b \quad (1)$$

onde  $\sigma_m$  corresponde a tensão de membrana (MPa) e  $\sigma_b$  a tensão de flexão (MPa), ambos avaliados na superfície da chapa. O parâmetro  $\sigma_{hs}$ , geralmente, é derivado por meio de processos de linearização, conforme ilustrado na Figura 1.

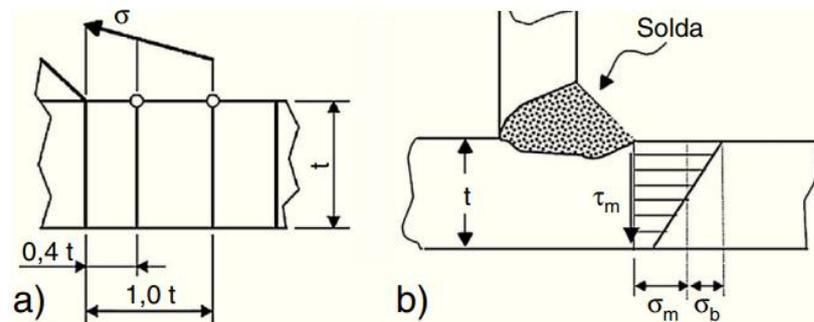


Figura 1 – (a) Representação da extrapolação linear para a tensão *hot spot*. (b) Componentes de membrana ( $\sigma_m$ ) e flexão ( $\sigma_b$ ) da tensão estrutural ( $\sigma_{hs}$ ) no pé da solda [Silveira, Mezzomo e Goedel, 2017].

Na parte esquerda da Figura 1, observa-se a linearização superficial das tensões, realizada a uma distância de  $0,4t$  e  $1,0t$ , sendo  $t$  a espessura da chapa do membro sofrendo carregamento. Essas distâncias foram definidas de acordo com o trabalho realizado por Doerk, Fricke e Weissenborn (2003), onde diferentes delta e regras de extrapolação foram propostos para diferentes níveis de refinamento da malha e classificações de *hot spot*. Na parte direita da Figura 1, distinguem-se os componentes citados na equação 1.

O *hot spot* da solda é determinado por sua posição geométrica. De acordo com Fricke (2001), existem três categorias principais de *hot spot*, os quais aparecem em diferentes pontos do cordão de solda, de acordo com a Figura 2.

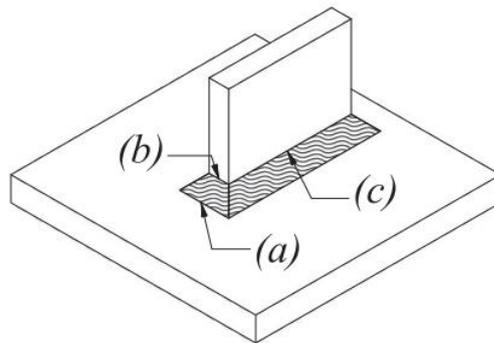


Figura 2 – Tipos de *hot spot* e suas posições em uma junta soldada cruciforme [Echer e Marczak, 2018].

Os tipos (a) e (c) referem-se a situações em que o *hot spot* se manifesta na intersecção da raiz da solda com a superfície da chapa. Por outro lado, o tipo (b) denota um cenário onde o *hot spot* se situa nas extremidades da chapa.

Nessa perspectiva, Fricke (2001) estabeleceu que, para um *hot spot* do tipo (c), deve-se empregar a Equação 2 para conduzir a extrapolação linear mais apropriada.

$$\sigma_{hs} = 1,67\sigma_{0,4t} - 0,67\sigma_{1,0t} \quad (2)$$

Onde  $\sigma_{0,4t}$  e  $\sigma_{1,0t}$  corresponde, respectivamente, às tensões avaliadas a uma distância de  $0,4t$  e  $1,0t$  do pé da solda. Importa ressaltar que esta equação é aplicável apenas em cenários onde o carregamento é perpendicular ao eixo da solda, e a iniciação da trinca é prevista na raiz da solda.

## 2.2. Técnicas de modelagem do cordão de solda

Segundo Echer e Marczak (2018) “a inclusão de filetes de solda em modelos de MEF sem uma metodologia adequada inevitavelmente resulta em alterações na rigidez global, bem como variações significativas na inércia da estrutura” (tradução do autor). Desta forma, a escolha precisa da técnica de modelagem para o filete de solda torna-se imperativa. Atualmente, três estratégias predominam: elementos de casca oblíquo (EC), ligações rígidas (LR) e incremento da espessura (IE). Dentro desse contexto, Echer (2012) destacou, para os modelos do tipo LR e EC, a possibilidade de variar a representação do cordão de solda ajustando dimensões das pernas de solda ( $\bar{d}$ ) nas simulações.

A representação do tipo EC consiste em emular o cordão de solda através de elementos em casca oblíquo, como proposto por Niemi (1995), sendo uma das primeiras abordagens empregadas com sucesso. Nessa metodologia, tanto as chapas quanto as soldas são representadas por elementos de casca quadráticos, o que permite uma representação correta tanto de geometria como da rigidez do cordão de solda. Na Figura 3 é possível verificar a modelagem utilizando elementos de casca de oito nós.

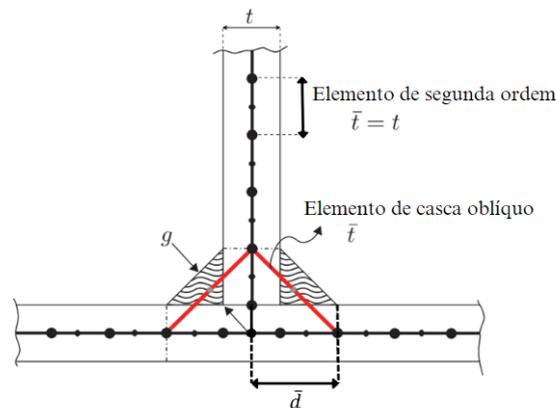


Figura 3 – Cordão de solda modelado via elementos em casca oblíquo [Adaptada de Echer e Marczak, 2018].

Conforme ilustrado na Figura 3, a espessura do elemento em casca que representa o cordão de solda é dada por  $\bar{t}$ . O valor de  $\bar{t}$  deve variar de acordo com a dimensão de  $\bar{d}$ . A parte restante da estrutura é modelada utilizando elementos de casca com espessura igual à espessura da chapa, representada por  $t$ .

Fayard, Bignonnet e Dang Van (1997) propuseram uma metodologia que utiliza elementos de ligações rígidas conectando as placas para representar a rigidez da solda, sendo está a representação do tipo LR. Nessa técnica elementos ligação paralelos entre si são posicionados de forma que cada elemento conecta um nó da malha do elemento superior com

um nó da malha do elemento inferior. A tensão  $\sigma_{hs}$  é avaliada diretamente no centro de gravidade (CG) de um elemento de casca específico E2. O elemento E2 é posicionado de forma a definir a localização do CG em uma região correspondente à raiz da solda na estrutura real. A Figura 4 ilustra essa abordagem de modelagem.

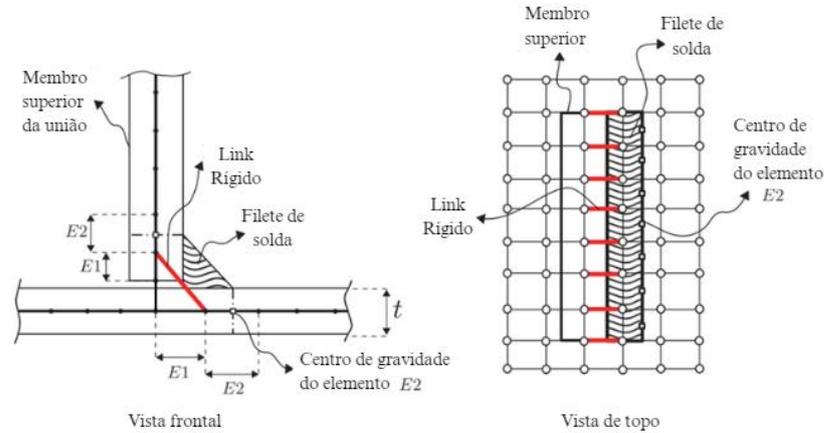


Figura 4 – Perspectivas frontal e lateral da modelagem de filete via elementos de ligação rígidos [Echer e Marczak, 2018].

Para essa metodologia, toda a estrutura é modelada utilizando elementos de casca de quatro nós com a mesma espessura  $t$ , equivalente à espessura da chapa. Como visto na Figura 4 os elementos E1 e E2 possuem tamanhos específicos que permitem a avaliação direta da tensão no CG de E2. Para que a tensão  $\sigma_{hs}$  seja avaliada em E2, essa abordagem não requer procedimentos de extrapolação e pode ser aplicada a outros componentes soldados sem grandes adaptações. Entretanto essa metodologia apresenta a desvantagem de utilizar elementos mais simples que os demais, o que pode prejudicar a exatidão dos resultados.

Eriksson e Lignell (2003) propuseram uma técnica de modelagem na qual a rigidez da solda é simulada por elementos de casca ao longo das bordas soldadas, os quais possuem uma espessura aumentada. Essa abordagem requer a conexão física das chapas, diferentemente das técnicas anteriores. A Figura 5 ilustra essa metodologia aplicada a uma junta do tipo T.

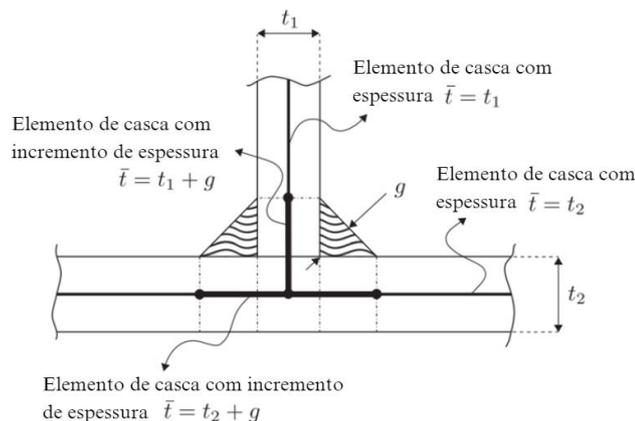


Figura 5 – Visualização do filete modelado através de incremento de espessura na região do cordão de solda [Echer e Marczak, 2018].

Como é possível observar pela Figura 5, os elementos do cordão de solda têm sua espessura incrementada com o aumento da espessura da garganta do cordão de solda  $g$ . Esse tipo de modelagem é simples e objetiva, não sendo possível variar seus parâmetros.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Descrição geral do modelo simulado

Segundo Echer e Marczak, (2018) “estruturas modeladas utilizando MEF de elementos sólidos em estruturas grandes e complexas, podem tanto ser inviáveis, quanto podem se prolongar por um longo período” (tradução do autor). Em decorrência disso, com frequência se adota uma abordagem direcionada em segmentos menores, onde se prevê a ocorrência da maior tensão no cordão de solda. Esta estratégia detalhada é crucial, pois, nas palavras de ADAMS e ASKENAZI (1998, v. 1, p. 410), “se é possível desenvolver uma parte com alto grau de confiança, a avaliação do conjunto em sua totalidade, será mais positiva”. Assim, neste trabalho, objetivou-se a modelagem pormenorizada de uma junta soldada tipo T.

A proposta foi simular a junta de duas chapas, com comprimento de 254 mm, largura de 127 mm e espessura de 6,35 mm ( $d \times l \times t$ ). A união das chapas ocorreu por uma solda do tipo T simétrica e de penetração completa. Baseando-se nas diretrizes da AWS para soldas, a garganta de solda mediu 4,49 mm, e a perna de solda com espessura equivalente à das chapas, 6,35 mm ( $g \times a$ ). O resultado foi em um conjunto com dimensão total de  $254 \times 260,35 \times 127$  mm ( $d \times h + t \times l$ ). A Figura 6 ilustra essa configuração geométrica.

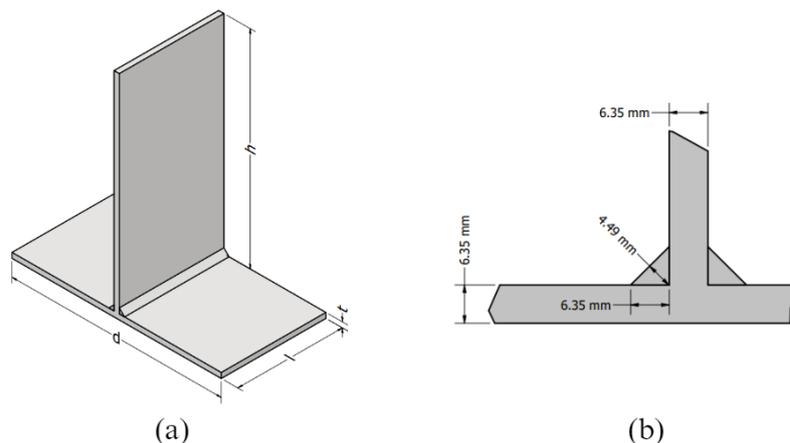


Figura 6 – (a) Esquema geométrico do conjunto. (b) Detalhamento do cordão de solda do conjunto.

Optou-se pelo aço ASTM A36 para a modelagem e o cordão de solda foi modelado utilizando as propriedades do material do mesmo aço. A Tabela 1 apresenta as características mecânicas deste material.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A36, conforme a biblioteca de materiais da Autodesk.

ASTM A36			
Densidade	$\rho$	7850	kg/m <sup>3</sup>
Tensão de escoamento	$\sigma_{esc}$	210	MPa
Tensão de ruptura	$\sigma_{rup}$	400	MPa
Coeficiente de Poisson	$\nu$	0,3	
Modulo de Young	$G$	140	GPa

O componente foi submetido a três tipos distintos de carregamento: tração, flexão e combinado. Os carregamentos e as fixações são apresentados na Figura 7.

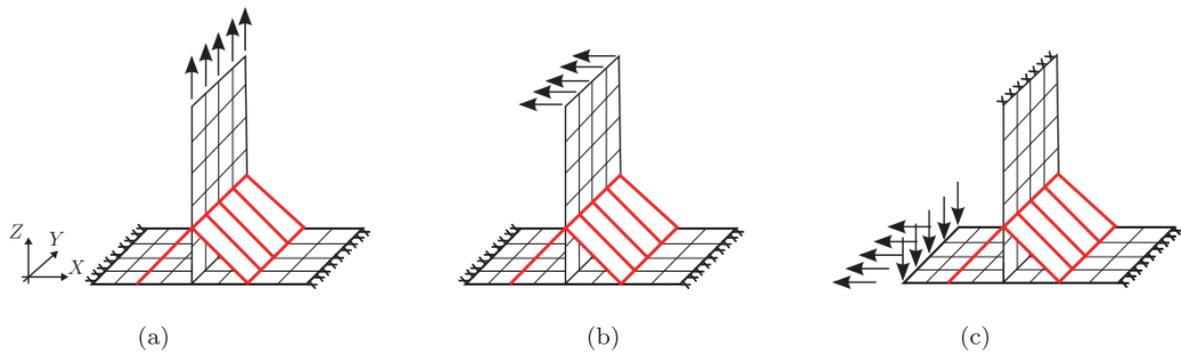


Figura 7 – Cenários de carregamento para a estrutura com junta T. (a) Carregamento de tração pura. (b) Carregamento de flexão. (c) Carregamento combinado (flexão e tração) [Echer e Marczak, 2018].

Para o cenário de carregamento com tração pura, a chapa horizontal foi fixada em ambas as extremidades. Estas extremidades foram fixadas, tendo todos seus graus de liberdade restrito. Uma força uniformemente distribuída de 5 kN foi aplicada na parte superior da chapa vertical. No cenário de flexão, as fixações da chapa inferior foram mantidas, mas a força de tração foi substituída por uma força de flexão de 1 kN uniformemente distribuída na parte superior da chapa vertical. No último cenário, o componente foi fixado na parte superior da chapa vertical e na borda direita da chapa horizontal, sendo aplicado a mesma limitação a todos os graus de liberdades aplicados anteriormente. Neste caso, duas forças distribuídas uniformemente e de mesma magnitude (1 kN) foram aplicadas na borda livre da chapa horizontal à esquerda. Uma força tem sentido vertical para baixo e a outra tem sentido horizontal (sentido negativo do eixo Z) para a esquerda (sentido negativo do eixo X).

### 3.2. Modelagem por Elemento Sólido

Visando servir como padrão de referência para as futuras modelagens por elementos de casca, o modelo sólido foi estabelecido. Objetivou-se garantir uma comparação fiel entre o comportamento de modelo utilizando EF (elementos finitos) sólido e um modelado com elementos de casca. No entanto, Machado (2011) adverte que, devido à rigidez dos elementos, modelos sólidos podem gerar picos de tensão exorbitantes na região do cordão de solda. Para remediar isso, um refinamento da malha foi imprescindível, ainda que isso signifique maior tempo de processamento.

Utilizando o *software* Autodesk Inventor 2024 para a construção do modelo e Autodesk Nastran para análises via MEF, foi concebido um modelo sólido que replica fielmente as dimensões propostas anteriormente. A malha empregada foi composta por elementos hexagonais de 1 mm, sendo que nas áreas de maior interesse, como o cordão de solda e a superfície onde foi avaliada a tensão, esta malha era mais densa, com elementos de 0,5 mm, conforme evidenciado na Figura 8.

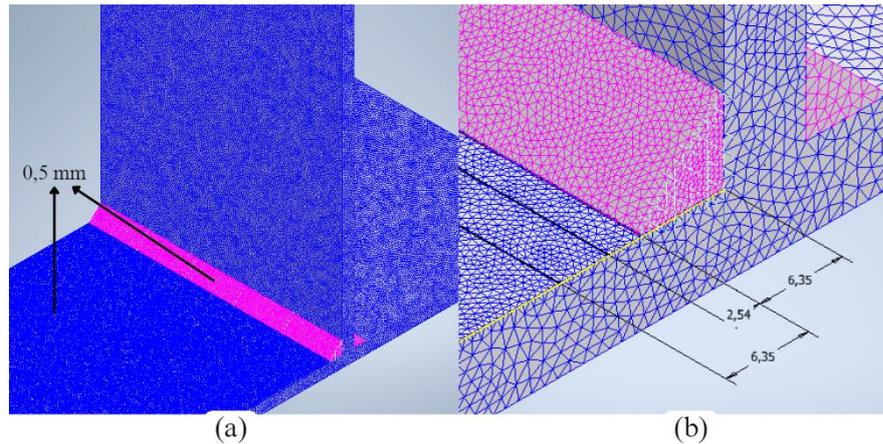


Figura 8 – Malha do modelo sólido da estrutura com junta T. (a) Visão panorâmica da malha na estrutura. (b) Detalhamento da malha na região do cordão de solda, destacando os pontos de avaliação das tensões.

A imagem detalhada (Figura 8, item b) ilustra claramente os elementos hexagonais adotados e os pontos de referência para avaliação das tensões de membrana ( $\sigma_m$ ) e flexão ( $\sigma_b$ ) da tensão estrutural ( $\sigma_s$ ).

A determinação dos pontos de tensão levou em consideração a distância em relação ao pé do cordão de solda. Foram definidas as distâncias de  $0.4t$  (2,54 mm) e  $1.0t$  (6,35 mm), como proposto por Doerk, Fricke e Weissenborn (2003). Os Pontos de extrapolação foram localizados sob a superfície da chapa entre as linhas que definem as distâncias de  $0.4t$  e  $1.0t$  representadas no item (b) da Figura 8.

A seleção do componente de tensão baseou-se na orientação das tensões principais em relação ao eixo da solda, conforme estabelecido por Niemi et al. (2006). Para o caso em que a direção da tensão principal formar um ângulo menor que  $60^\circ$  em relação ao eixo perpendicular ao pé da solda, como os casos dos carregamentos estudados, se utiliza a maior tensão nesses pontos de extrapolação.

Ao simular o modelo sob efeito do carregamento de flexão, tem-se as tensões atuantes na superfície nos pontos a distâncias de  $0,4t$ , e  $1,0t$  do pé da solda ( $\sigma_{0,4t}$  e  $\sigma_{1,0t}$ ), com valores de 140,528 MPa e 127,569 MPa, respectivamente. Substituindo esses valores na Equação 2, obteve-se o valor da tensão estrutural ( $\sigma_{hs}$ ) junto ao pé da solda para modelos sólido com carregamento sob tração pura. O resultado foi o  $\sigma_{hs-tração}$ , que pode ser visto no equacionamento abaixo. Esse valor foi referência para as tensões superficiais obtidas através dos modelos de casca.

$$\sigma_{hs-tração} = 1,67 \times (140,528) - 0,67 \times (127,569) = 149,21 \text{ MPa}$$

O mesmo procedimento foi replicado para os cenários de carregamento de flexão e carregamento combinado, avaliando as tensões nos mesmos pontos ( $0,4t$  e  $1,0t$ ). Realizando novamente o cálculo de  $\sigma_{hs}$  através da Equação 2, como demonstrado.

### 3.3. Modelagem por elementos de casca

As uniões soldadas, quando modeladas através de elementos de casca, podem adotar três técnicas primárias, como já mencionado: Elementos em casca oblíquo (EC), ligações rígidas (LR) e incremento de espessura (IE).

Modelos com elementos de casca espelham a geometria dos modelos sólidos, mas com uma abordagem simplificada e mais eficiente em termos computacionais. Estes modelos, contudo, preservam as dimensões originais do componente, incluindo sua espessura. As

condições de contorno (carregamento e restrições de movimento) foram mantidas idênticas ao do modelo sólido. As análises via MEF foram novamente conduzidas no *software* Autodesk Nastran. Utilizando elementos de casca com oito nós de funções de forma bi-quadráticas foram realizadas análises lineares estáticas, com elementos da malha de dimensão  $0,4t$ , para os modelos EC e IE. Para o modelo LR, utilizou-se elementos de casca de quatro nós, com a densidade da malha seguindo a dimensão do elemento E2.

A representação adequada da junta, principalmente em soldas com penetração total e simetria, demandou estratégias cuidadosas para simular corretamente a rigidez da junta. A Figura 9 ilustra essas estratégias.

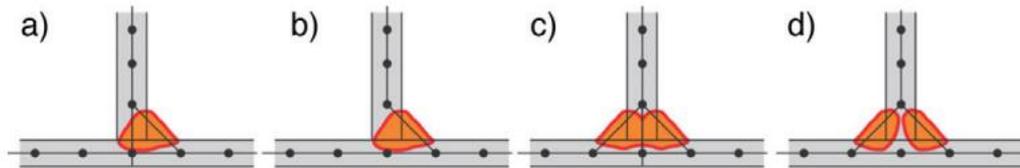


Figura 9 – Representação numérica da penetração de solda. (a) Penetração total com solda assimétrica. (b) Penetração parcial com solda assimétrica. (c) Penetração total com solda simétrica. (d) Penetração parcial com solda simétrica [Silveira, Mezzomo e Goedel, 2017].

Para a representação de uma junta em T com penetração total e com solda simétrica foi necessário representar ambos os cordões de solda, de maneira simétrica, com ilustrado na Figura 9. É importante ressaltar que deve existir intersecção entre os elementos das malhas de ambas as chapas. Esse cuidado é fundamental para as modelagens EC e LR.

Echer (2012) propôs três posições distintas para o elemento que representa o cordão de solda, impactando diretamente na distância  $\bar{d}$  do elemento  $e$ , no caso da modelagem EC, na espessura  $\bar{t}$  do elemento. As diferentes propostas são ilustradas na Figura 10.

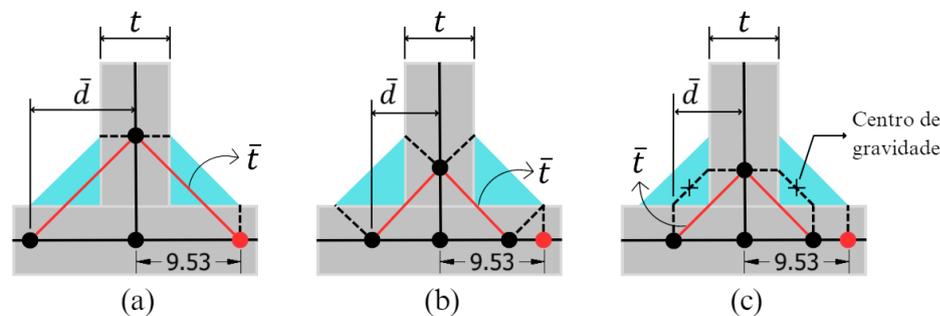


Figura 10 – Alternativas para posição dos elementos representativos do cordão de solda para elementos de casca oblíquo e ligações rígidas. (a) Alternativa com  $\bar{d}$  simulando perna de solda real (EC1 e LR1). (b) Alternativa com  $\bar{d}$  igual a perna de solda real (EC2 e LR2). (c) Alternativa com  $\bar{d}$  posicionado no centro de gravidade da perna de solda real (EC3 e LR3) [Adaptado de Echer, 2012].

Alterando a posição do elemento representativo do cordão de solda não se observou alteração do ponto de referência para obtenção da tensão estrutural, que permanece onde o pé da solda do elemento sólido estaria. Esse ponto é representado pelo ponto em vermelho na Figura 10. A geometria das imagens (b) e (c) da Figura 10 apresenta dimensões de acordo com o recomendado por Fayard, Bignonnet e Dang Van (1997) para os elementos E1 e E2 na representação por LR.

Como mencionado previamente, por se alterar a posição do cordão de solda a espessura  $\bar{t}$  do elemento utilizado na representação do cordão de solda do método EC, também deve ser ajustada. Esse ajuste foi realizado mantendo-se a área da secção transversal do cordão de solda original, como ilustrado na Figura 11.

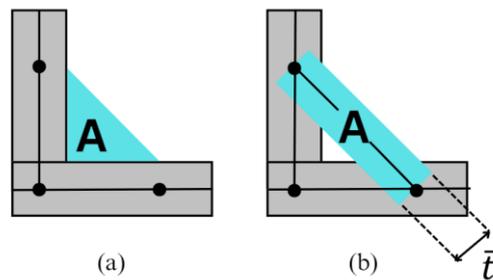


Figura 11 – Critério para definição de espessura do elemento representativo da solda para elemento de casca. (a) Cordão de solda real. (b) Representação do cordão de solda por elemento de casca oblíquo.

Os elementos utilizados no EC, com seu perfil transversal retangular, tiveram sua espessura ( $\bar{t}$ ) determinada para manter a área transversal do cordão original de 20,16 mm. Isso ocorreu ao dividir a área da secção transversal do cordão original pelo comprimento da garganta de filete.

As dimensões aplicadas nas diferentes metodologias estão resumidas na Tabela 2, com destaque para a perna de solda e a espessura dos elementos empregados para representação do cordão de solda.

Tabela 2 – Detalhes das pernas de solda e espessuras de elementos em cada técnica.

	EC1 (mm)	EC2 (mm)	EC3 (mm)	LR1 (mm)	LR2 (mm)	LR3 (mm)	IE (mm)
$\bar{d}$	9,525	6,35	5,295	9,525	6,35	5,295	9,525
$\bar{t}$	1,497	2,245	2,692	-	-	-	12,7

A modelagem das técnicas EC, LR e IE seguiu rigorosamente as diretrizes estabelecidas e as dimensões apresentadas na Tabela 2, assegurando representações consistentes e fiéis da estrutura, como demonstrado na Figura 12.

Na representação por EC foi aplicada para as três disposições da perna de solda, modificando, conseqüentemente, a espessura do elemento de casca empregado (Tabela 2). A malha entre os elementos de casca oblíquo, que representa o cordão de solda, e os elementos de casca empregados na representação das chapas foi contínua (Figura 12 (a)).

A representação por LR, ilustrado na Figura 12 (b), emprega elementos de ligação para representação do cordão de solda, como recomendado por Fayard, Bignonnet e Dang Van (1997). Esses elementos foram conectados aos vértices dos elementos da malha empregada na representação das chapas. Sendo que o espaçamento entre cada elemento rígido foi igual à dimensão do elemento de casca ao qual ele se conecta.

A representação por IE seguiu as definições propostas por seus autores, Eriksson e Lignell (2003), gerando uma região de sobre espessura ilustrada na Figura 12 (c).

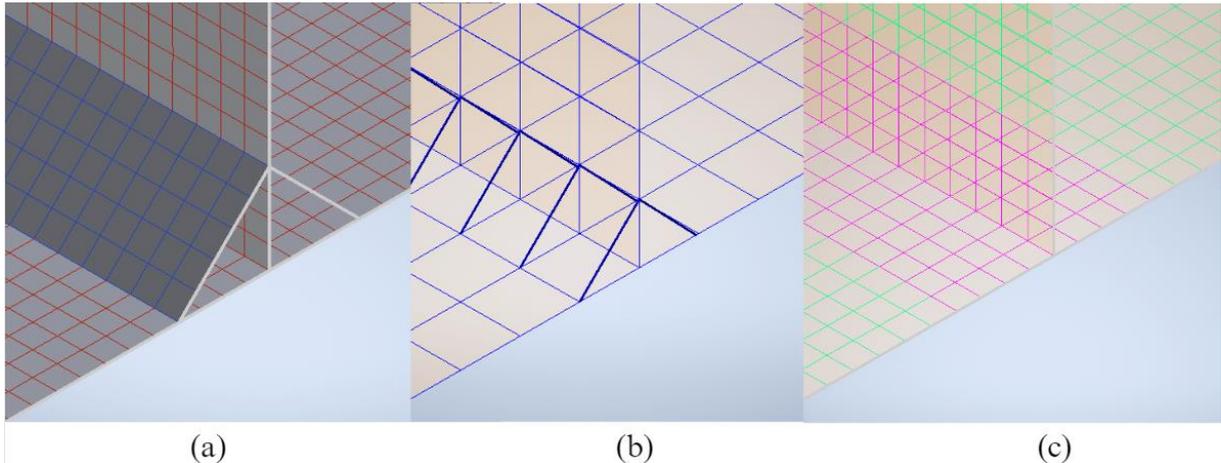


Figura 12 – Representação do cordão de solda para modelos de casca. (a) Elementos de casca oblíquos (EC). (b) Ligações rígidas (LR). (c) Incremento de espessura (IE).

Para EC e IE, as tensões foram analisadas de forma análoga ao procedimento adotado no modelo sólido, onde as tensões superficiais foram analisadas nos pontos de distâncias,  $0,4t$ , e  $1,0t$  do pé da solda. Para o LR, a tensão foi diretamente avaliada no centroide do elemento E2, conforme prescrito por Fayard, Bignonnet e Dang Van (1997). Esta abordagem eliminou a necessidade de procedimentos de extrapolação adicionais, simplificando e acelerando a análise.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação precisa da rigidez de uma estrutura está intrinsecamente ligada à tensão estrutural. Naturalmente, quando as simulações simplificadas (com elementos de casca) se aproximam dos resultados das simulações com elementos sólidos, temos uma indicação clara da fidelidade da simulação por elemento de casca. Para analisar o desvio percentual ( $Er\%$ ), utilizou-se a Equação 3:

$$Er\% = \left| \frac{VO - VE}{VE} \right| \times 100 \quad (3)$$

aqui,  $VE$  representa o valor esperado, ou mais provável, que no contexto da análise corresponde ao valor de  $\sigma_{hs}$  da simulação com elementos sólidos.  $VO$  é o valor obtido, nesse caso indica o valor obtido de  $\sigma_{hs}$  através da simulação por elemento de casca.

Os dados coletados nas diversas simulações estão apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5, correspondendo aos diferentes cenários de carregamento abordados.

Tabela 3 – Primeiro cenário de carregamento: tensão estrutural para carregamento de tração.

	Método de modelagem							
	Sólido	EC1	EC2	EC3	LR1	LR2	LR3	IE
$\sigma_{0,4t}$ (MPa)	140,528	142,002	144,963	144,841	-	-	-	148,479
$\sigma_{1,0t}$ (MPa)	127,568	138,3	139,83	135,981	-	-	-	138,051
$\sigma_{hs}$ (MPa)	149,21	144,48	148,40	150,78	140,42	142,14	148,60	155,47
$Er\%$	-	3,27	0,55	1,04	6,26	4,98	0,41	4,02

Analisando a Tabela 3, observa-se que o método de elementos de casca oblíquos (EC) aprimorou significativamente a precisão à medida que a distância  $\bar{d}$  diminui. A proposta LR1, mesmo com uma malha refinada, não atingiu os mesmos níveis de precisão dos outros modelos LR. A simulação IE, por sua vez, obteve resultado que pode ser considerado satisfatório, quando

comparado com a tensão do elemento sólido. No entanto, não foi a que apresentou a maior precisão, dentre as alternativas avaliadas.

Tabela 4 – Segundo cenário de carregamento: tensão estrutural para carregamento de flexão.

	Método de modelagem							
	Sólido	EC1	EC2	EC3	LR1	LR2	LR3	IE
$\sigma_{0,4t}$ (MPa)	122,594	120,898	120,175	120,703	-	-	-	124,734
$\sigma_{1,0t}$ (MPa)	115,116	113,257	113,44	111,633	-	-	-	117,178
$\sigma_{hs}$ (MPa)	127,60	126,02	124,69	126,78	128,36	127,34	132,33	129,80
$Er_{\%}$	-	1,26	2,34	0,65	0,59	0,20	3,57	1,69

Na Tabela 4, que aborda o cenário de carregamento por flexão, os padrões observados no carregamento por tração foram mantidos. Contudo, a divergência do EC2 em comparação com outros modelos EC merece destaque pois os dados obtidos foram piores que para os demais modelos EC. No entanto, essa representação manteve uma precisão adequada (em torno de 10%). A modelagem por IE apresentou resposta ainda mais exata que a do EC e LR. Para o cenário de tração, o LR1 apresentou melhor desempenho, enquanto LR3 apresentou um pior desempenho, porém, ainda com um resultado expressivo.

Tabela 5 – Terceiro cenário de carregamento: tensão estrutural para carregamento combinado.

	Método de modelagem							
	Sólido	EC1	EC2	EC3	LR1	LR2	LR3	IE
$\sigma_{0,4t}$ (MPa)	126,92	126,805	126,304	126,181	-	-	-	131,195
$\sigma_{1,0t}$ (MPa)	116,861	121,504	121,666	119,718	-	-	-	125,625
$\sigma_{hs}$ (MPa)	133,66	130,36	129,41	130,51	128,97	130,20	134,30	134,93
$Er_{\%}$	-	2,53	3,28	2,41	3,64	2,66	0,48	0,94

Os valores da Tabela 5, mostraram que a modelagem por EC continuou apresentando desempenho adequado para o cenário de carregamento combinado, sendo a metodologia mais consistente entre as três. O método de representação por LR apresentou um padrão de comportamento parecido entre o caso de carregamento combinado e carregamento de tração. O que invalida novamente a proposta LR1, que não apresentou resultados precisos como as demais propostas de LR, mesmo com a malha mais refinada. No carregamento combinado o IE mostrou um excelente desempenho.

Considerando todas as simulações, o método EC destacou-se por obter resultados mais próximos aos da modelagem empregando elementos sólidos em todos os cenários de carregamento. Esse método também se mostrou receptivo para a possibilidade de alteração das dimensões empregadas para representar a geometria do cordão de solda ( $\bar{t}$  e  $\bar{d}$ ), já que estas foram alteradas durante o experimento, e mesmo assim mantiveram respostas próximas para os valores de tensão. Esse fator corrobora para que a IIW (*international institute of welding*) recomende esse método para o dimensionamento de juntas soldadas sob fadiga EF (Hobbacher et al. 2009).

O método IE, apesar de sua simplicidade na modelagem também forneceu resultados próximos ao referencial de comparação, a modelagem empregando modelos sólidos. Sua facilidade de modelagem se deve ao fato de não ser necessário abordagens muito complexas para definir a geometria do elemento que representa o cordão de solda (tanto as dimensões de  $\bar{t}$  e  $\bar{d}$ ). Isso torna a implementação desse método de modelagem simples, porém sem possibilidade de variação das dimensões, o que em determinados casos pode levar a erros consideráveis para a análise das tensões.

O método LR mostrou-se desafiador em termos de modelagem, especialmente quando a divisão entre a largura do cordão de solda e o elemento E1 não dava um número inteiro, esse número seria a quantidade de elementos de ligação empregados no cordão de solda. No caso do modelo LR1 isso aconteceu, sendo necessário empregar diversos elementos menores para cumprir com a função de E1, alterando as recomendações de Fayard, Bignonnet e Dang Van (1997) para a aplicação da metodologia. Mesmo realizando essa modificação o modelo LR1 apresentou resultados similares aos modelos LR2 e LR3, que seguiram as recomendações dos autores da metodologia. Os modelos LR2 e LR3 replicaram de maneira satisfatória as tensões do modelo sólido, de maneira mais eficiente em termos computacionais. A eficiência computacional observada nessas duas modelagens se deve aos seus elementos de baixa ordem e grau de refinamento da malha inferior, quando comparado com as malhas aplicadas nos modelos de EC e de IE.

#### 4.1. Resultado complementar: Considerações sobre as modelagens

Sobre o tópico de modelagem uma das metodologias se destacou devido a sua notória facilidade, a metodologia de modelagem por incremento de espessura. A facilidade de modelagem dessa metodologia se deve ao fato de não empregar nenhum elemento geométrico para representar o cordão de solda, já que a representação da rigidez da solda se dá pelo incremento da espessura na região do cordão. Por esse motivo, considero que essa metodologia seria ideal para análises preliminares e quando se quisesse modelar uma grande quantidade de soldas, contanto que, a geometria do cordão de solda não seja um fator relevante para a análise proposta.

A modelagem do tipo EC é um pouco mais complexa que a de IE, justamente por ser necessário modelar o cordão de solda, conseqüentemente, sendo necessário definir parâmetros geométricos (perna de solda  $\bar{d}$  e espessura do cordão de solda  $\bar{t}$ ) do elemento representativo empregado. Entretanto o grau de complexidade adicional oriundo da representação do cordão de solda faz com que essa metodologia seja mais propícia para modelagem de cordões de solda em estruturas complexas.

Análogo ao EC a modelagem por elementos de ligação rígidos também representa geometricamente o cordão de solda. Entretanto o grau de complexidade da modelagem dessa metodologia é superior à de EC, visto que é necessário definir a dimensão do elemento de malha de modo que o centro do elemento E2 coincida com a posição onde o pé do cordão de solda real estaria. Além disso, a aplicação de elementos de ligação durante a modelagem se mostrou um processo maçante que demanda tempo consideravelmente maior do que a modelagem por EC, pelo menos no *software* empregado para esta análise. Quanto mais se refinava o elemento E1 mais elementos de ligação eram necessários, logo mais tempo era gasto definindo-os durante a modelagem.

#### 4.2. Resultado complementar: Tempo de processamento

A decisão de usar elementos de casca para representar filetes de solda é impulsionada, em grande parte, pelo potencial de economia no tempo de processamento computacional. Para entender o grau desta economia, é crucial analisar o tempo necessário de cada técnica de modelagem. A Tabela 6 apresenta uma síntese destes tempos.

Tabela 6 – Tempos de processamento (em segundo) para cada método de modelagem, em todos os cenários de carregamento.

	Método de modelagem							
	Sólido	EC1	EC2	EC3	LR1	LR2	LR3	IE
Tração	237,3	24,39	20,79	18,52	13,24	5,73	6,92	14,02

Flexão	236,19	21,68	19,5	23	13,22	6,31	7,46	13,36
Combinado	229,19	23,27	23,42	21,27	12,58	6,79	7,09	13,57
Média	234,23	23,11	21,24	20,93	13,01	6,28	7,16	13,65

Ressalta-se que o tempo de processamento pode variar por inúmeros fatores: condição da CPU, memória RAM disponível, especificações técnicas do computador e outros. No entanto, essa análise buscou fornecer uma visão global sobre a demanda temporal de cada metodologia. Para garantir a homogeneidade, todos os testes foram executados em sequência sob condições consistentes de sistema. Ainda assim, a Tabela 6 deve ser vista como uma referência e não um absoluto.

A modelagem usando elementos sólidos demandou tempo substancialmente maior do que qualquer método com elementos de casca. Isso está alinhado com a literatura que aponta economias significativas ao optar por elementos de casca. Nos modelos EC, vemos uma redução aproximada de 90% no tempo quando comparado ao método com elementos sólidos. Os métodos LR apresentaram uma economia ainda maior, chegando a quase 97% (excluindo LR1, devido às modificações necessárias, como mencionado anteriormente). Esta economia foi em grande parte, atribuída ao uso de elementos de ordem inferior e à densidade da malha. O método IE, por sua vez, ficou entre os dois, apresentando uma economia de cerca de 94%.

Esses dados sugerem que, em termos de eficiência computacional, o método LR tem a vantagem, seguido pelo IE e, por fim, pelo EC. Entretanto, é fundamental mencionar que o método LR pode ter variações significativas em seu tempo de processamento, especialmente se adaptações forem necessárias, como visto no modelo LR1, que exigiu alterações da proposta original de Fayard, Bignonnet e Dang Van (1997) para se adequar à geometria proposta por Echer (2012).

## 5. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi avaliada a eficácia de três técnicas distintas de modelagem que empregam elementos de casca na reprodução das tensões em uma união soldada do tipo T. Esta avaliação foi realizada comparando-se com o resultado derivado da Análise por método de elementos finitos (MEF) usando uma malha de elementos tridimensionais altamente refinada e de alta ordem. Os cenários de carregamento escolhidos para esta análise foram: tração, flexão e combinado, visando abranger um amplo espectro de situações.

As variações entre os modelos numéricos estudados centraram-se na abordagem de representação do cordão de solda de uma união soldada do tipo T com penetração total utilizando: elementos de casca oblíquos (EC), ligações rígidas (LR) e incremento de espessura (IE). As técnicas EC e LR foram mais detalhadas com diferentes configurações geométricas.

O modelo que aplica o incremento de espessura foi a metodologia mais simples de se modelar e conseguiu simular de maneira condizente as tensões na região de extrapolação, quando comparado ao modelo sólido. Entretanto, por não representar o cordão, a distribuição de tensões na região do cordão de solda propriamente dito não são representativas do um cenário real. Como pode ser visto na Figura B7 do Apêndice B, na região onde a espessura é aumentada as tensões são menos intensas, já quando sai dessa região se tem um aumento substancial das tensões. Esse tipo de comportamento vai de encontro com a linhas de “fluxo de tensões” em um cordão de solda apresentados por Machado (2011).

Os modelos que adotaram a abordagem de ligações rígidas (LR) também trouxeram bons resultados em relação ao referencial do modelo sólido. Estes modelos, dada a sua natureza de baixa ordem e malha simples, requereram menos esforço computacional, por parte do equipamento empregado. Todavia, esse resultado pode variar, de maneira significativa ou não, dependendo do equipamento empregado para realizar as simulações. Além disso, o método LR

elimina a necessidade de uma metodologia de linearização, mantendo resultados na faixa para de 0,41% a 3,57% de exatidão em relação ao modelo sólido, para a modelagem LR3. Mas sua implementação exige um entendimento aprofundado e um acompanhamento fiel às propostas dos seus criadores.

Já a abordagem de elementos de casca oblíquos (EC) apresentou resultados para avaliação das tensões superciliais no cordão de solda com uma faixa de erro de 0,65% e 2,41% (para o modelo EC3) em todos os cenários de carregamento, quando comparado ao referencial do modelo empregando elementos sólidos. Além disso, foi possível perceber que os valores de tensão observados se modificavam conforme se alterava as dimensões da perna de solda e da espessura do cordão de solda do elemento de casca empregado para representar o cordão de solda de uma junta do tipo T. Por consequência esse método de representação do cordão de solda pode apresentar resultados com uma margem de erro mais próxima ou distante do referencial dependendo das dimensões empregadas no elemento representativo do cordão de solda.

Vale ressaltar que as técnicas empregadas foram limitadas a um tipo de união soldada. A união soldada do tipo T com penetração total e cordão de solda em ambos os lados da união das chapas. Dessa forma, os resultados exibidos não se aplicam a demais tipos de conexões soldadas. Além disso, o referencial teórico empregado também possui erro nas tensões calculadas quando em comparação a as tensões presentes em união soldada real idêntica a proposta. Essa diferença se propaga a análise desenvolvida neste trabalho. Por esse motivo, a realização de ensaios laboratoriais que mimetizem as condições aqui analisadas traria um reforço significativo às conclusões apresentadas neste trabalho. Para aprimorar ainda mais este estudo, também seria possível realizar uma análise da vida útil em fadiga, considerando os métodos de representação do cordão de solda.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADANS, V. e ASKENAZI, A. **Building better products with finite element-analysis**. 1<sup>nd</sup> ed. OnWord Press, outubro, 1998.
- AWS D1.1. **Structural Welding Code – Steel**. American Welding Society. Miami, FLA, USA, 2008.
- AZEVEDO, A. F.M. **Métodos dos elementos finitos**. 1. Ed. Portugal: Ed. Abril, 2003.
- ECHER, L. e MARCZAK, R. J. **Parametric representation of weld fillets using shell finite elements—a proposal based on minimum stiffness and inertia errors**. *Engineering Optimization*, v. 50, n. 2, p. 183–204, 2018.
- ECHER, L. **Uma metodologia para obtenção de parâmetros ótimos para simulação numérica de filetes de solda**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.
- ECHER, L. **Análise de Uniões Soldadas Através do Método da Tensão Estrutural via Elementos Finitos**. Trabalho Final de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.
- ERIKSSON, Å. e A. M. LIGNELL. **Weld Evaluation Using FEM: A Guide to Fatigue-Loaded Structures**. Stockholm: Industrilitteratur, 2003.
- FAYARD, J. L. e BIGNONNET, A. e VAN, K. Dang. **Fatigue design of welded thin sheet structures**. European Structural Integrity Society. [S.l: s.n.], 1997. v. 22.
- FRICKE, W. **Recommended hot spot analysis procedure for structural details of FPSOs and ships based on round-robin FE analyses**. [S.l: s.n.], 2001.
- HOBACHER, A. **Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components**. New York: Welding Research Council, 2009.
- MACHADO, I. G. **Dimensionamento de juntas soldadas de filete: uma revisão crítica**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. (Boletim Técnico).
- MCKINGHT, M. **Predicting and Validating Welds with FEA in Nastran In-CAD**. 2017. Disponível em: “<https://www.youtube.com/watch?v=6Hlr-6UuUFw&list=LL&index=2>”.
- NIEMI, E. **Stress determination for fatigue analysis of welded components**. Cambridge, UK: Abington Publishing, 1995.
- NIEMI, E. FRICKE, W. e MADDOX, S.J. **Fatigue Analysis of Welded Components, Designers Guide to the Structural Hot - Spot Stress Approach**. Woodhead Publishing, 2006.
- RADAJ, D. **Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 1990.

SILVEIRA J.A, MEZZOMO G.P, GOEDEL F. (2017) **Avaliação dos métodos da tensão estrutural e curva mestre para determinação da vida em fadiga de junta soldada**. Rev Int Metod Numer para Calc y Disen en Ing 33:. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2016.09.002>

## APÊNDICE A

A tabela A1 apresenta as configurações gerais do computador utilizado na realização das simulações numéricas.

Tabela A1 – Características gerais do computador utilizado nas simulações.

Processador	Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz
Processador	64 bits
Memória RAM	16 GB
Memória SSD (total – disponível)	232 GB - 36,7 GB
Memória HD (total – disponível)	916 GB – 379 GB
Placa de vídeo	NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti

O *software* de elementos finitos estava instalado na memória SSD do dispositivo. Os tempos de processamento apresentados no capítulo 4 devem se alterar ao se utilizar um computador com as configurações diferentes das apresentadas.

## APÊNDICE B

Nas Figura B1 até B7 são apresentados os pontos de avaliação das tensões empregados durante os experimentos deste artigo. Na figura as colunas (a), (b), e (c) referenciam a condição de carregamento.

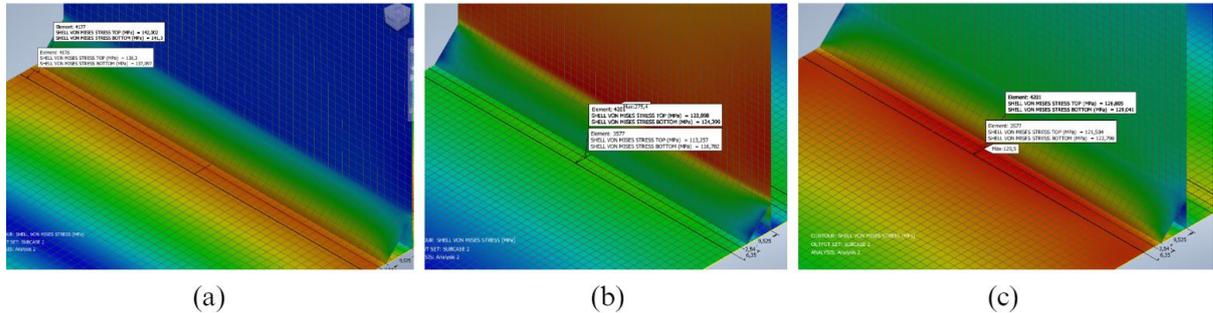


Figura B1 – Resultado da malha EC1 e pontos de avaliação das tensões para os carregamentos. (a) Tração. (b) Flexão. (c) Combinado.

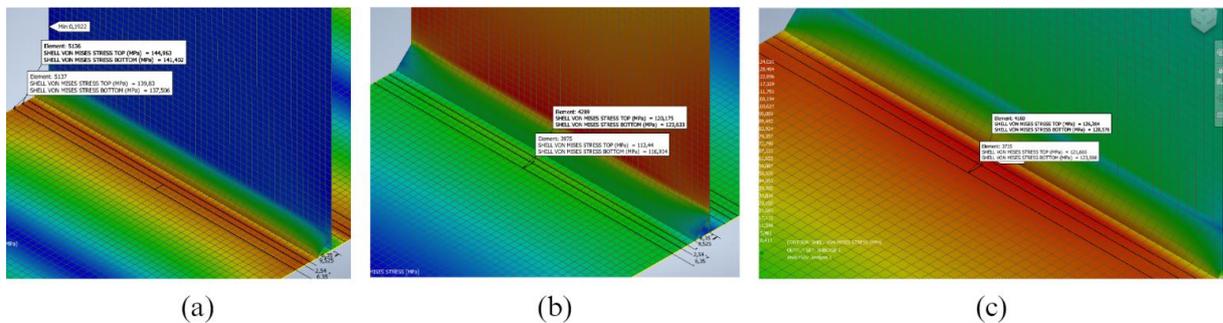


Figura B2 – Resultado da malha EC2 e pontos de avaliação das tensões para os carregamentos. (a) Tração. (b) Flexão. (c) Combinado.

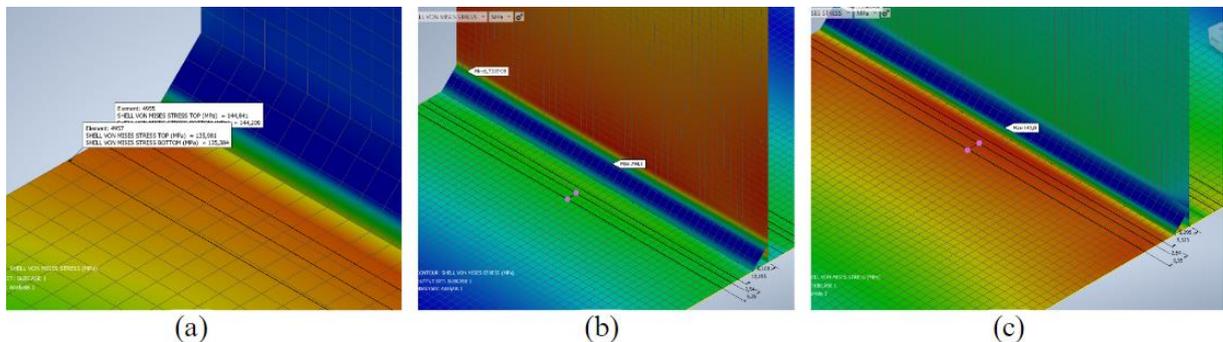


Figura B3 – Resultado da malha EC3 e pontos de avaliação das tensões para os carregamentos. (a) Tração. (b) Flexão. (c) Combinado.

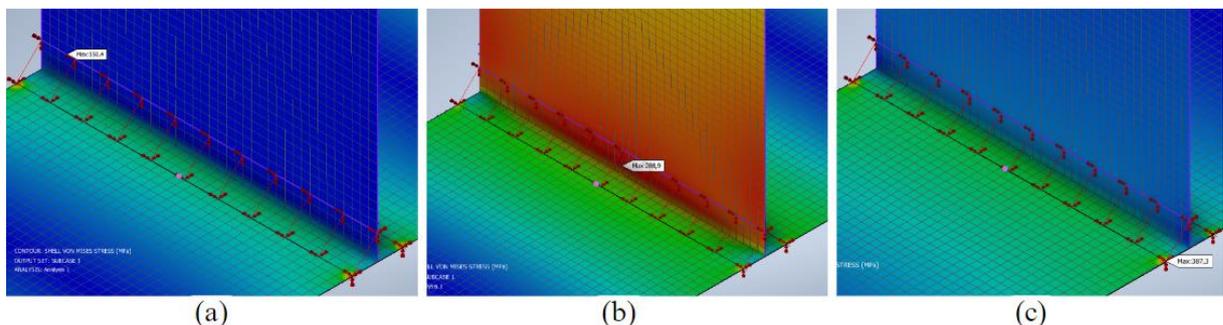


Figura B4 – Resultado da malha LR1 e pontos de avaliação das tensões para os carregamentos. (a) Tração. (b) Flexão. (c) Combinado.

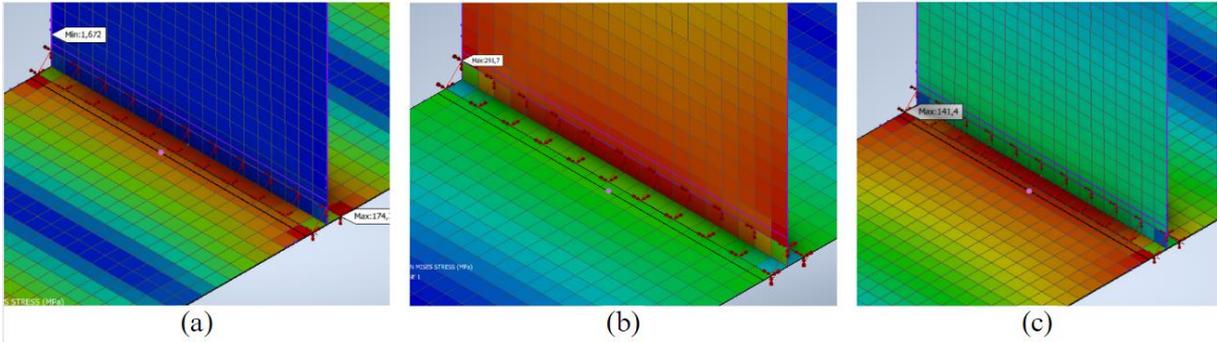


Figura B5 – Resultado da malha LR2 e pontos de avaliação das tensões para os carregamentos. (a) Tração. (b) Flexão. (c) Combinado.

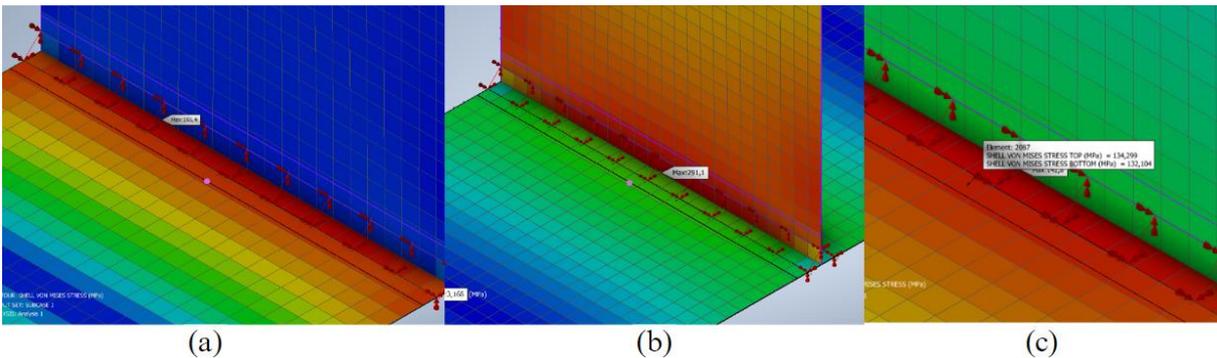


Figura B6 – Resultado da malha LR3 e pontos de avaliação das tensões para os carregamentos. (a) Tração. (b) Flexão. (c) Combinado.

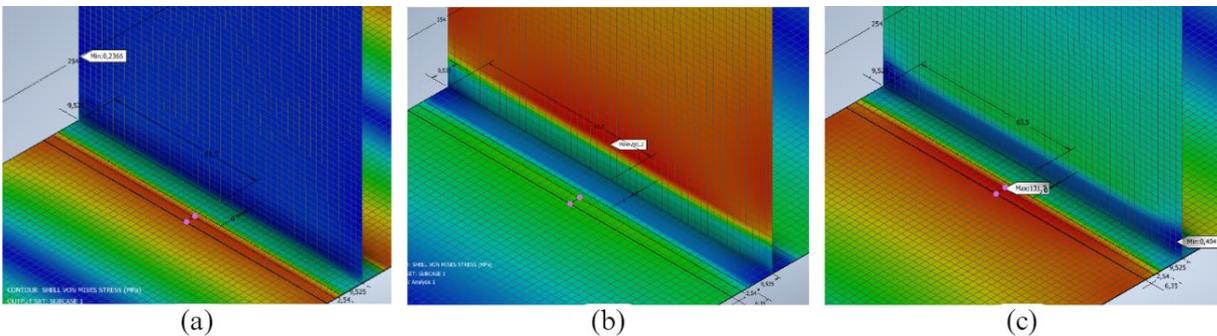


Figura B7 – Resultado da malha IE e pontos de avaliação das tensões para os carregamentos. (a) Tração. (b) Flexão. (c) Combinado.

Os pontos de avaliação das tensões podem ser identificados ou pelas caixas de dados em branco (como na Figura B1), ou pelos pontos demarcados em lilás (como na Figura B7). Os pontos de avaliação das tensões alteraram entre a borda da chapa modelada e o centro dela.