



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO – UFERSA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS – CMPF
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

RENNAN MOREIRA DE FIGUEIREDO

**ANÁLISE DE TENSÕES EM LIGAÇÕES SOLDADAS POR FILETE EM
CANTONEIRAS**

PAU DOS FERROS
2022

RENNAN MOREIRA DE FIGUEIREDO

**ANÁLISE DE TENSÕES EM LIGAÇÕES SOLDADAS POR FILETE EM
CANTONEIRAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Fernandes de
Araújo Silva.

PAU DOS FERROS

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

FR414 Figueiredo, Rennan.
a ANÁLISE DE TENSÕES EM LIGAÇÕES SOLDADAS POR
FILETE EM CANTONEIRAS / Rennan Figueiredo. - 2022.
32 f. : il.

Orientador: Matheus Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2022.

1. Solda. 2. Esforços. 3. Tensões Cisalhantes.
I. Silva, Matheus, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

RENNAN MOREIRA DE FIGUEIREDO

ANÁLISE DE TENSÕES EM LIGAÇÕES SOLDADAS POR FILETE EM CANTONEIRAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
MATHEUS FERNANDES DE ARAÚJO SILVA
Data: 20/06/2022 11:27:32-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Matheus Fernandes de Araújo Silva
Presidente



Documento assinado digitalmente
PAULO HENRIQUE ARAÚJO BEZERRA
Data: 20/06/2022 21:38:08-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra
Primeiro Membro



Documento assinado digitalmente
LEONARDO HENRIQUE BORGES DE OLIVEIRA
Data: 20/06/2022 10:49:33-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Leonardo Henrique Borges de Oliveira
Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar força e sabedoria para concluir mais essa jornada com saúde, vencendo os obstáculos que surgiram no percurso, pois sem ele nada disso seria possível.

Á meu orientador, professor Dr. Matheus Fernandes de Araújo Silva, pela orientação me dada, pela amizade construída, pelo incentivo e disponibilidade para me atender durante toda a produção desse trabalho, contribuindo de forma significativa para a conclusão.

Aos meus familiares, em especial a minha mãe, Maria do Socorro Virgíneo Moreira, que me incentivaram durante toda essa jornada, me dando todo o apoio necessário para que eu enfrentasse todas as dificuldades que surgissem.

Agradeço a minha madrinha de batismo, Martilândia Figueiredo, por me ajudar na conclusão dessa jornada.

Á meu pai Francisco Raniere, e a meu padrasto, Jandilson Vieira, que não mediram esforços para me ajudar durante esse processo.

Agradeço a minha irmã, Mirelle Virgíneo, e a minha namorada Bianca Rolim, por me incentivarem para a conclusão do curso.

Aos meus amigos, Romulo Antunes Assis de Oliveira, Abnadabe Ferreira Gonçalves, e Francisco Michel de Almeida, por me ajudarem de forma direta ou indireta nas etapas do curso.

Aos membros da banca, por participarem dessa defesa, e contribuírem para o trabalho e minha formação acadêmica.

Agradeço a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, por me proporcionar a conclusão do curso superior.

Muito obrigado!

*“Educação não transforma o mundo. Educação muda as
pessoas. Pessoas mudam o mundo.”*

(Paulo Freire)

RESUMO

No que se refere à execução de estruturas de aço, o método da soldagem é comumente utilizado para a união de materiais. Diante disso, uma boa execução de solda necessita principalmente de um profissional qualificado, além de todo um controle de qualidade para tal prática. Aspectos como, angulação da soldagem, uso do eletrodo ou da técnica de soldagem errada, descontinuidade no cordão de solda, comprimento e área do cordão de solda, podem afetar diretamente a qualidade da solda, fazendo com que os esforços que serão direcionados para essa união não se comportem da maneira correta. É muito comum encontrar processos de soldagem in loco, sem qualquer tipo de controle de qualidade. Logo, é necessário um estudo/projeto para dimensionar corretamente a solda, e que se tenha todo um controle adequado sobre o processo executivo de solda. Com isso, ressalta-se a importância de novas pesquisas e análises no setor da soldagem, principalmente quando se trata de execução incorreta desse tipo de ligação, a qual pode acarretar a falha da união dos materiais, comprometendo não somente a estrutura como também a segurança de todos que ali estão. O presente estudo é direcionado para ligações soldadas entre cantoneiras laminadas e perfis formados a frio, em que foi realizada uma análise paramétrica entre quatro casos de soldas de filete, em que apenas os comprimentos variavam, utilizando uma modelagem analítica do Fakury, Silva e Caldas (2016), e uma modelagem numérica por meio do SAP 2000, versão 23.

Palavras-Chave: Solda; Esforços; Tensões Cisalhantes etc.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	PROBLEMATIZAÇÃO.....	9
3	OBJETIVOS	10
3.1	GERAL	10
3.2	ESPECÍFICOS	10
4	JUSTIFICATIVA.....	11
5	REVISÃO TEÓRICA	12
5.1	APANhado HISTÓRICO	12
5.2	LIGAÇÕES SOLDADAS.....	13
5.3	POSIÇÕES DE SOLDAGEM	15
5.4	TIPOS DE JUNTAS.....	15
5.5	TIPOS DE SOLDAS.....	16
5.6	TENSÕES EM GRUPO DE SOLDA	18
6	METODOLOGIA.....	21
6.1	MODELO ANALÍTICO DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS.....	21
6.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS.....	24
7	RESULTADOS.....	25
7.1	EXTREMIDADE DO CORDÃO DE SOLDA.....	26
7.2	PONTO MÉDIO DO CORDÃO DE SOLDA	28
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
	REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

Segundo Fakury, Silva e Caldas (2016), os elementos estruturais de aço possuem diversas aplicações como em composições de treliças, pilares, vigas, etc. Tais elementos são submetidos a diferentes tensões normais de tração e compressão por apresentar bom desempenho sobre essas tensões, apesar de que, para compressão, ele apresente problemas de instabilidade.

No processo de execução de uma estrutura metálica é necessário que haja ligações entre os perfis para a distribuição de carga por toda a estrutura. Logo, as ligações por meio da soldagem é uma alternativa que garante a transmissão das tensões para que não ocorram deformações imprevistas.

A união por soldagem tem como ponto principal a simplificação das ligações. Contudo, é necessário que sua execução seja feita por profissionais qualificados, passando por todo um controle de qualidade. Diante disso, a maioria das ligações soldadas são executadas nas fabricas, visto que há uma série de agravantes para o processo executivo em campo, como por exemplo o posicionamento para a soldagem, localidade da obra, chuva, poeira, etc. Logo, as ligações mais usuais em campo são as parafusadas

Dessa forma, é necessário que o processo de ligação por soldagem passe por toda uma avaliação para que o mesmo seja dimensionado e executado de forma correta a fim de garantir que os esforços sejam bem distribuídos como foram considerados em projeto.

2 PROBLEMATIZAÇÃO

Sabe-se que, no Brasil, o uso das estruturas metálicas na construção civil está cada vez mais frequente. Com os avanços da tecnologia dentro desse campo, mostrou-se que o processo construtivo utilizando essas estruturas é bem amplo, diversificado e vantajoso.

Nesta conjuntura, as estruturas metálicas necessitam de um bom dimensionamento e execução, onde é necessário que haja ligações entre os perfis metálicos, e um dos meios mais tradicionais na região são as ligações soldadas. Contudo, com certa frequência, encontra-se a execuções in loco, podendo afetar diretamente seu processo de soldagem, visto que, para que se tenha todo um controle de qualidade das soldas elas precisam ser feitas em fábrica.

A solda tem como principal finalidade a união dos materiais. Além disso, são responsáveis por receber as forças que são aplicadas nos materiais que foram unidos. Logo, quando não se há uma soldagem correta, esses esforços gerados no cordão de solda podem não sustentar, e causar deformações imprevistas, ou até mesmo a falha da estrutura.

Assim, a busca por soluções para essa problemática é de grande relevância. Logo, é necessário ampliar a revisão bibliográfica para facilitar o acesso a informações sobre a análise dessas tensões nos cordões de solda, a fim de garantir que esse processo seja bem dimensionado e executado, assegurando assim a qualidade e segurança da estrutura metálica.

3 OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos que se pretende atingir com a realização da pesquisa aqui sugerida, de modo geral e também de modo específico:

3.1 GERAL

- ✓ Fazer análise das tensões nas ligações soldadas entre cantoneira e perfil U.

3.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Aplicar modelo analítico de cálculo dos esforços atuantes nas soldas.
- ✓ Simular numericamente os esforços em cada cordão de solda.
- ✓ Comparar os resultados obtidos pela modelagem analítica e numérica.

4 JUSTIFICATIVA

O presente estudo destaca a função das ligações soldadas no processo de união de materiais, onde são responsáveis por receber os esforços solicitantes aplicados na estrutura metálica. Diante disso, essas ligações apresentam um percentual significativo de variabilidade quando se leva em consideração sua execução, logo, são suscetíveis a um processo produtivo falho e de baixa qualidade quando não se tem o embasamento correto. Em decorrência disso, o processo de soldagem deve ser enfatizado, pois tem papel fundamental na distribuição das tensões, bem como na estabilidade da estrutura metálica.

Tendo conhecimento que as ligações soldadas garantem a união e a estabilidade de toda uma estrutura metálica, é notório que o seu dimensionamento e execução são fatores cruciais para assegurar a vida útil e a segurança da estrutura. Dessa forma, existe a necessidade de mais estudos sobre as ligações soldadas, principalmente no campo das tensões solicitantes nas soldas.

Diante disso, o foco desse trabalho é analisar as tensões que surgem a partir de uma força aplicada na cantoneira laminada, utilizando um modelo analítico proposto por Fakury et al. (2016), e um modelo numérico a partir do software SAP 2000, versão 23.

5 REVISÃO TEÓRICA

5.1 APANHADO HISTÓRICO

Conforme Salmon, Johnson e Malhas (2009), há indicativos de soldagem há milhares de anos atrás. Alguns historiados levantam hipóteses de que os egípcios podem ter sido os primeiros a usarem métodos de soldagem por pressão a datar de 5500 a.c para fabricação de peças de cobre, utilizando folhas de metais e as martelando.

Há indícios de que, a mais de 4000 anos atrás, artefatos tenham sido produzidos utilizando o processo de soldagem a brasão. Adiante, o processo de soldagem por forjamento também foi utilizado. Somente em 1801 surgiram os primeiros estudos relevantes no campo da soldagem, com a descoberta do fenômeno do arco elétrico, por Sir Humphey. Pouco tempo depois, foi descoberto também o gás Acetileno, por Edmund Davy, tal qual é muito utilizado na soldagem por ser mais concentrado em relação aos demais gases combustíveis.

Segundo Salmon et al. (2009), Zernes, em 1885, foi quem iniciou o processo de soldagem utilizando eletrodos de carbono, e mais tardar na Rússia, N.G Slavianoff, em 1888, começou a utilizar a soldagem com eletrodos não revestidos. Entre os anos de 1903 e 1918, o processo de soldagem tinha como principal utilidade o reparo de peças, tendo como impulsionador a Primeira Guerra Mundial, onde era comum a utilização desses métodos para a recuperação de navios danificados.

Ainda segundo Salmon et al. (2009), após 1ª Guerra Mundial (1918), alguns avanços nos métodos de soldagem surgiram, com a continuação da utilização de eletrodos e alguns gases para blindar o arco elétrico e a área da solda, culminando para o desenvolvimento de outros modelos como a soldagem a arco de metal a gás. Outro método que surgiu foi a soldagem a arco submerso, que consiste no uso do fluxo granular para também blindar o arco elétrico. Posteriormente, esse método foi patenteado.

As novas tecnologias apontam para uma automatização cada vez mais forte nos processos de soldagem, visto que o desenvolvimento de novos materiais exige melhorias nesse campo. Atualmente, existem mais de 50 tipos de processos de soldagem, com as mais variadas utilidades dentro do campo industrial, sendo esse o mais importante método de ligação entre materiais metálicos.

5.2 LIGAÇÕES SOLDADAS

A soldagem tem como principal finalidade a união de peças de um determinado material através de calor e eletricidade, como também pode ser utilizada para a recuperação de peças desgastadas ou revestimento das mesmas. Os processos de soldagem não seguem uma classificação usual, contudo, podem ser divididos levando-se em consideração o processo físico. São eles a soldagem por Fusão (aquece o metal até seu ponto de fusão), soldagem por Pressão (aquece e pressiona), e a técnica mais antiga, Brasagem (adiciona um metal diferente do metal base).

Segundo Fakury et al. (2016), em boa parte dos processos de soldagem, o metal fundido é isolado para que não se tenha interação com o meio externo, visto que pode ocorrer formação de impurezas as quais acabam deixando a solda quebradiça e menos resistente. Esse fenômeno é conhecido como arco elétrico, e é comumente utilizado nos processos de soldagem, bem como também a utilização do gás Acetileno para que seja feito o aquecimento do metal.

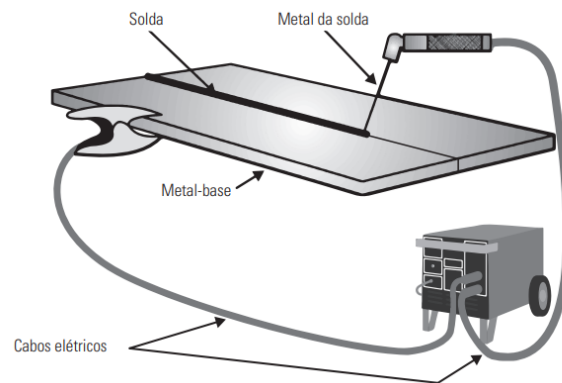
Esses processos são quatro:

- Arco Submerso (Submerged Arc Welding – SAW);
- Arco Elétrico com Fluxo no Núcleo (Flux-cored Arc Welding – FCAW);
- Arco Elétrico com Proteção Gasosa (Gás Metal Arc Welding – GMAW);
- Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW);

A soldagem por Arco Elétrico com Eletrodo Revestido é a mais empregada na construção civil quando se trata de ligações soldadas em estruturas metálicas. Isso ocorre pela sua facilidade de execução na fabricação e montagem de estruturas, tendo como ponto principal de uso sua praticidade em obra, além de poder ser utilizada em vários metais.

Segundo Fakury et al. (2016), a solda elétrica causa a fusão dos metais que desejam ser unidos juntamente com o eletrodo revestido, através da alta temperatura causada pelo arco elétrico e o posterior resfriamento. Os metais que querem ser unidos são denominados metal-base, e o metal do eletrodo revestido chama-se metal de solda, como ilustra a Figura 1.

Figura 1: Solda Elétrica.

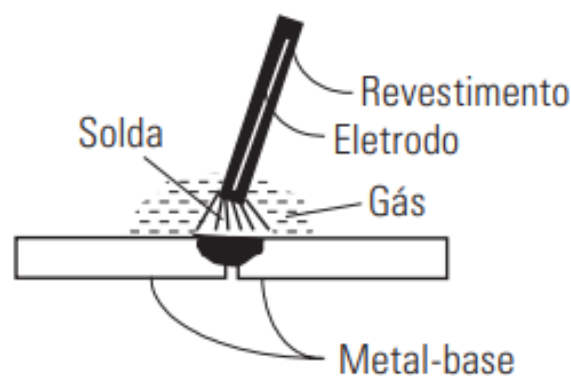


Fonte 1: Fakury et al. (2016, p. 267).

Ainda Fakury et al. (2016), é importante a atentar a detalhes como a resistência da solda e a do metal-base, pois ambas devem ser pelo menos equiparadas. Além disso, as composições químicas dos eletrodos também devem ser compatíveis com os dos aços que iram ser soldados, caso contrário poderia causar a formação de pares galvânicos os tornando propensos à corrosão. Além disso, independentemente do eletrodo escolhido para a soldagem, jamais se deve resfriar a solda após sua execução, pois pode causar a formação de uma estrutura cristalina dura e quebradiça, tornando a solda fraca e sem resistência, podendo vir a trincar.

De forma simples, o processo se inicia quando o eletrodo revestido toca a superfície do metal base para que ocorra o fenômeno do arco elétrico. Com o intenso calor criado através do arco, pequenas gotas de metal caem do eletrodo e se depositam no metal base dando inicio a fusão. Dessa forma, o metal é depositado e fundido à medida em que o eletrodo vai sendo consumido, como mostra a Figura 2.

Figura 2: Arco Elétrico com Eletrodo Revestido.



(a) Arco elétrico com eletrodo revestido

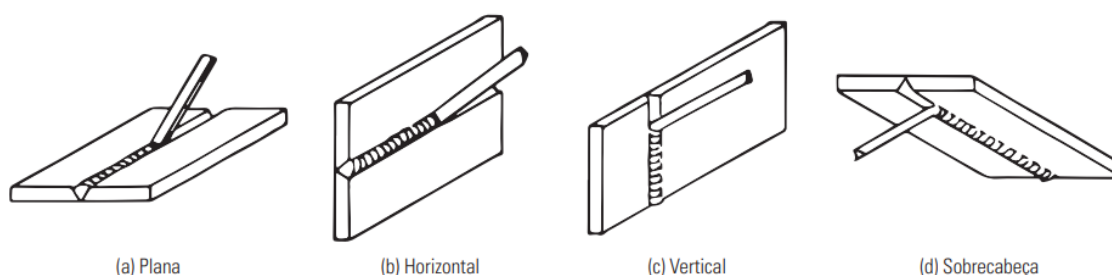
Fonte 2: Fakury et al. (2016, p.268).

Esse método de soldagem tem como principais vantagens à montagem em campo, facilidade para execução em ângulos difíceis, e precisam de equipamentos relativamente simples em comparação com alguns outros métodos. Em contrapartida, assim como todo e qualquer processo, é necessário que seja executado por um profissional qualificado, e que haja todo um controle específico.

5.3 POSIÇÕES DE SOLDAGEM

Para Fakury et al. (2016), são quatro as posições básicas de soldagem: plana, horizontal, vertical e sobrecabeça. Uma das dificuldades de se executar uma solda, principalmente quando se leva em consideração a sua qualidade, está em parte relacionado com a posição de soldagem. A posição que mais facilita a soldagem é a plana, pois o soldador tem um campo melhor para executar, e a mais problemática é a posição de sobrecabeça, pois é mais difícil ter o controle tanto do equipamento como do ângulo de soldagem. A Figura 3 apresenta as possíveis posições de soldagem:

Figura 3: Posições de Soldagem.

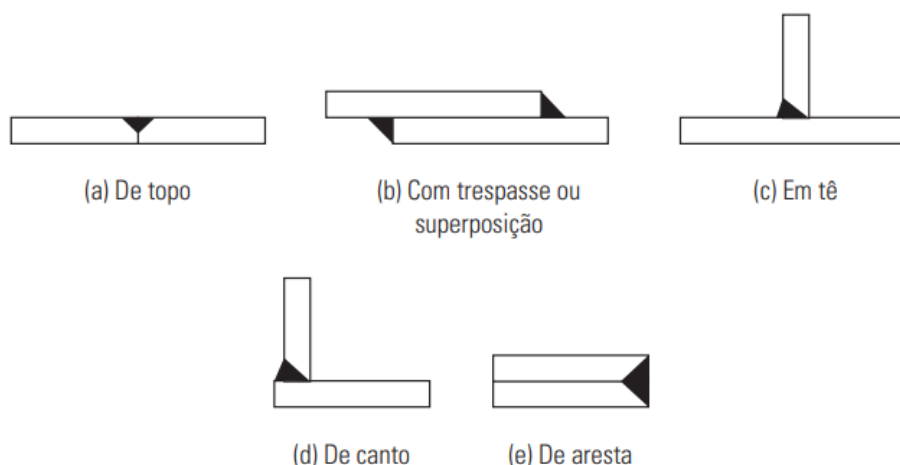


Fonte 3: Fakury et al. (2016, p. 267).

5.4 TIPOS DE JUNTAS

As juntas são classificadas dependendo da posição das peças que serão soldadas, podendo ser junta de topo, com trespasse ou superposição, em tê, junta de canto e de aresta. A seguir, a Figura 4 ilustrativa dos tipos de juntas.

Figura 4: Classificação das juntas.



Fonte 4: Fakury et al. (2016, p. 268).

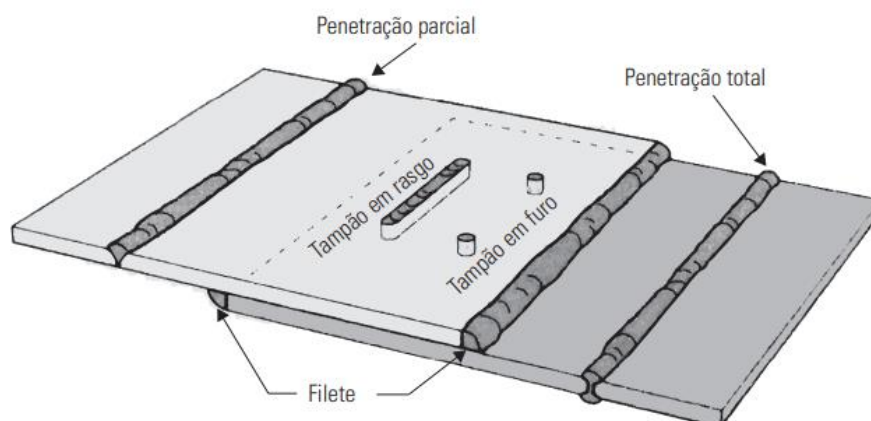
Segundo Klettenberg (2013), a junta de topo é usada principalmente para união de peças que estão niveladas e possuem mesma espessura, ou com espessuras bem próximas. Tem como vantagem eliminar a excentricidade das juntas de uma só sobreposição. E a junta mais comum, pois tem vantagens como facilidade de ajuste e união, já que não necessitam de uma rigorosa precisão e as extremidades não necessitam de um preparo especial. Esse tipo de junta é mais comum em soldas de filete, executadas em fábrica e em campo.

Ainda segundo Klettenberg (2013), a junta tê é muito utilizada para fabricar perfis em “T” e em “I”, e para a fixação de enrijecedores em geral. Assim como a solda de topo, a junta em tê é comumente utilizada em solda de filete e de penetração total. Já as juntas de canto são mais usadas em seções caixão, na fixação de enrijecedores. As juntas de borda são usuais para manter o alinhamento inicial, não sendo comum sua execução para fins estruturais.

5.5 TIPOS DE SOLDAS

Conforme Fakury et al. (2016), são três os tipos de solda em estruturas de aço: solda de penetração total ou parcial, solda de filete, e solda de tampão em furos ou rasgos, representadas na Figura 5. É comum que a solda de penetração seja executada nas juntas de topo e em tê, de canto e de aresta. Já as soldas de filete são usadas nas juntas de trespasse e em tê, e a solda de tampão são executadas nas juntas com trespasse.

Figura 5: Tipos de Solda.



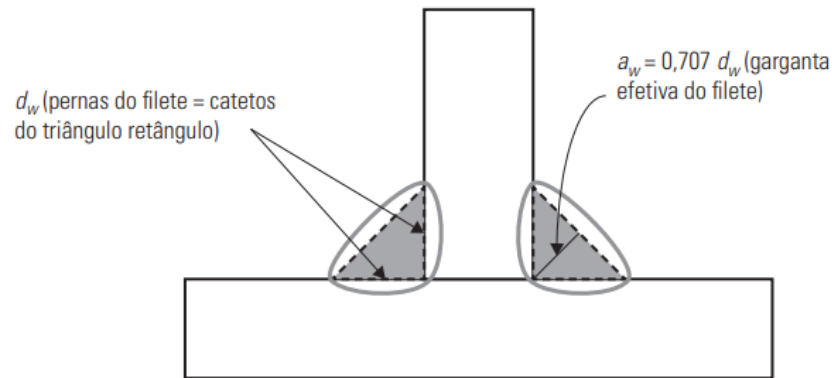
Fonte 5: Fakury et al. (2016, p. 269).

As soldas de penetração parcial ou total são muito utilizadas para conectar perfis estruturais que estão em mesmo plano. Para a execução desse tipo de solda, é feita uma abertura, comumente chamadas de chanfro, entre as partes da ligação. As soldas de penetração total são executadas de tal forma que alcance as duas faces das peças, dando assim uma continuidade completa. Já as de penetração parcial parte das peças tem continuidade através da solda.

As soldas de tampão são executadas com a deposição do metal de solda em um furo feito na metal base das partes sobrepostas. De fato, o furo deve ser preenchido completamente. A principal função desse tipo de solda é transmitir cisalhamento, além de impedir o empenamento das partes sobrepostas.

Já as soldas de filete, representadas na Figura 6, são as mais utilizadas por possuir vantagens como: facilidade de execução em fábrica e in loco, versatilidade, economia, e possuem características como seção transversal aparentemente triangular, podendo ligar superfícies de planos diferentes. Além disso, as extremidades das partes que recebem a solda de filete não precisam de algum tipo de preparo antes de sua execução. Os lados do filete que são rentes as faces da fusão das peças são chamadas de pernas do filete. Já a menor dimensão da seção transversal do filete é denominada garganta efetiva.

Figura 6: Dimensões da solda de filete.



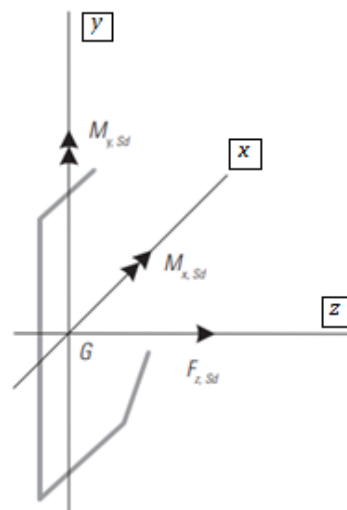
Fonte 6: Fakury et al. (2016, p. 272).

5.6 TENSÕES EM GRUPO DE SOLDA

É importante ressaltar que o dimensionamento correto das ligações soldadas pode evitar problemas, como reduzir custos e distorções. Sendo assim, desde a escolha do tipo de geometria adequada até o cálculo do dimensionamento e execução do cordão de solda, é necessária total atenção.

Conforme Fakury et al. (2016), um grupo de soldas em um plano x e y , quando submetido a uma força solicitante de cálculo normal ao plano, $F_{z, Sd}$, e momentos solicitantes de cálculo no plano, $M_{x, Sd}$ e $M_{y, Sd}$ conforme a Figura 7, está sujeito a tensões normais na direção z .

Figura 7: Esforços solicitantes gerando tensões de cisalhamento em um grupo de solda.



Fonte 7: Adaptado de Fakury et al. (2016, p. 275).

Os eixos x e y passam pelo centro geométrico do grupo de soldas, logo, a tensão normal em um ponto (x, y) é dada por:

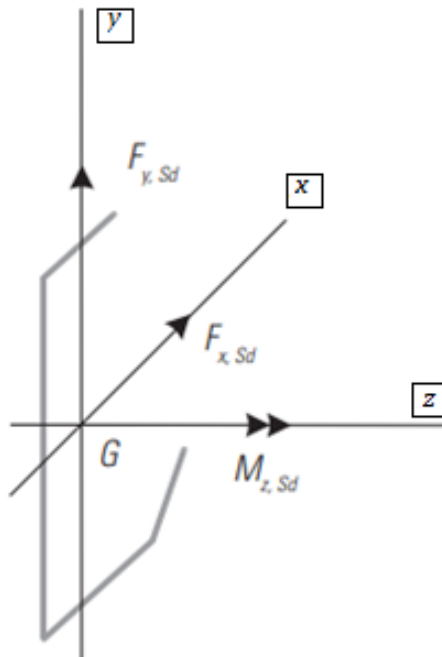
$$\sigma_{w,sd} = \frac{F_{z,sd}}{A_{ew}} + \frac{(M_{x,sd}I_y + M_{y,sd}I_{xy})y - (M_{y,sd}I_x + M_{x,sd}I_{xy})x}{(I_xI_y - I_{xy}^2)} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde $A_{ew} = \sum l_{wi}a_{wi}$ é área efetiva do metal de grupo de soldas, I_x , I_y , e I_{xy} são os momentos de inércia à flexão em relação aos eixos x e y , e o produto de inercia do grupo de soldas, respectivamente. Se os eixos x e y , além de centroidais, forem principais, o produto de inércia do grupo de soldas é nulo, logo, $I_{xy} = 0$. Temos assim a equação:

$$\sigma_{w,sd} = \frac{F_{z,sd}}{A_{ew}} + \left(\frac{M_{x,sd}y}{I_x} \right) - \left(\frac{M_{y,sd}x}{I_y} \right) \quad \text{Eq.2}$$

Se as soldas estiverem submetidas a forças no plano, $F_{x,sd}$ e $F_{y,sd}$, e com momento perpendicular ao plano, $M_{z,sd}$, surgem tensões de cisalhamento nas direções x e y , como mostra a Figura 8.

Figura 8: Esforços solicitantes gerando tensões de cisalhamento em um grupo de solda.



Fonte 8: Adaptado de Fakury et al. (2016, p. 276).

Essas tensões em um ponto (x e y) são dadas por:

$$\tau_{w,x,Sd} = \frac{F_{x,Sd}}{A_{ew}} + \frac{M_{z,Sd}Y}{I_z} \quad \text{Eq. 3}$$

e

$$\tau_{w,y,Sd} = \frac{F_{y,Sd}}{A_{ew}} + \frac{M_{z,Sd}X}{I_z} \quad \text{Eq. 4}$$

onde $I_z = I_x + I_y$ é o momento polar de inercia do grupo de soldas. A tensão de cisalhamento resultante das tensões $\tau_{w,x,Sd}$ e $\tau_{w,y,Sd}$ é dada por:

$$\tau_{w,Sd} = \sqrt{\tau_{w,x,Sd}^2 + \tau_{w,y,Sd}^2} \quad \text{Eq. 5}$$

5.7 SIMULAÇÃO NUMÉRICA (SAP 2000[®])

Simulação numérica é comumente utilizada pela engenharia para prever comportamentos de materiais considerando alguns fatores que a realidade impõe. Nos softwares é possível enxergar os materiais em pequenas partes, logo, elementos finitos.

O SAP 2000[®] foi o primeiro software desenvolvido para o método de elementos finitos. Muito conhecido por ser rápido no processamento de dados e apresentar resultados precisos em relação a elementos finitos. É de autoria de Dr. Edward Wilson, datado de 1961, e desde sua criação é então o software mais usual para análise estrutural.

São diversos os trabalhos e estudos que aplicaram a modelagem numérica para obter resultados mais acurados. Lucjan e Kozłowski (2008) fizeram um estudo sobre modelagem de conexões entre três chapas de aço, por meio de soldas de filete. O modelo numérico foi desenvolvido segundo uma análise plana de tensões (bidimensional), empregando elementos finitos de chapa de 9 nós, com espessura de 1 mm. Além disso, devido a simetria do modelo, apenas metade deste foi modelado. Os autores fizeram uma análise paramétrica na qual apenas a área da garganta variava em relação a espessura da chapa, visando encontrar as tensões dentro do cordão de solda.

Cho et al. (2021) realizaram um trabalho buscando analisar o mecanismo de resistência ao cisalhamento em bloco em conexões de chapas aço inoxidáveis sobrepostas. Foi feita uma análise em elementos finitos 3D utilizando elementos sólidos de 8 nós para as chapas e

elementos tetraédricos quadráticos. Os autores fizeram o uso da simetria do modelo experimental, com a finalidade de reduzir os custos computacionais. Além disso, aplicaram uma malha de 0.50 mm nos arredores da solda onde ocorre a fratura visando um alto nível de acurácia.

A partir do SAP 2000, é possível criar modelos estruturais de forma prática e rápida. Por possuir técnicas analíticas avançadas, o software permite análises de grandes deformações, flambagem, não linearidade, elementos de casca, dentre outros, podendo ainda ser apresentado em 2D e 3D. Logo, é uma solução boa para quem procura uma análise de projeto de estruturas.

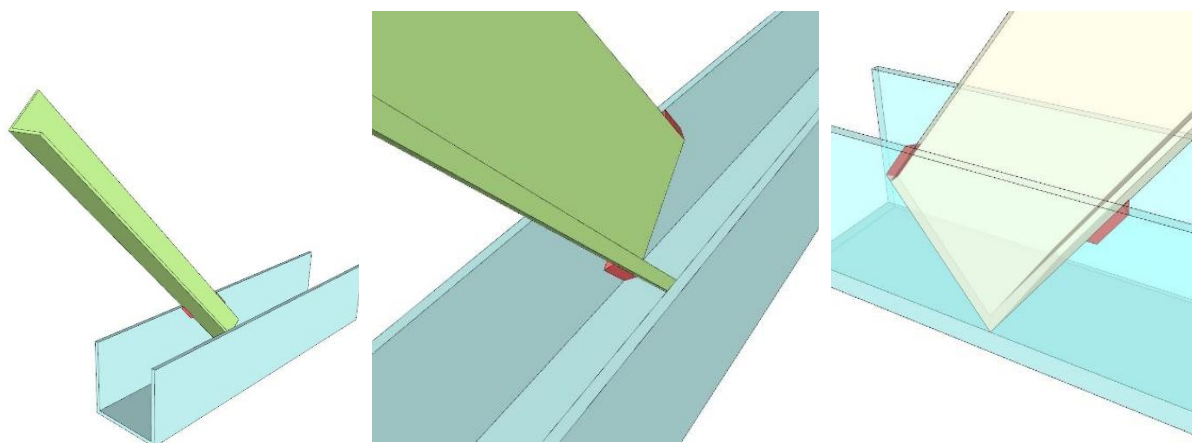
6 METODOLOGIA

Para a construção do presente trabalho, foi definido que seriam obtidos os dados a partir de um modelo analítico de cálculo de tensões solicitantes em um grupo de solda, assim como também por meio de uma simulação numérica de elementos finitos utilizando o software SAP 2000. Os dois métodos de cálculo serão aplicados para 4 modelos de solda, onde a diferença entre eles está apenas no seu comprimento.

6.1 MODELO ANALÍTICO DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS

O perfil da cantoneira adotada foi o L 50x3,2 (mm). Com relação a solda, foi escolhida a do tipo filete, como mostra a Figura 9, onde os modelos possuem comprimentos de 3, 6, 9 e 12 mm. A princípio, uma força de tração é aplicada no plano da solda x e z , representados na Figura 10.

Figura 9: Modelo de perfis e de soldas.



Fonte 9: Autoria própria.

A cantoneira possui dois cordões de solda paralelos, os quais estão submetidos a uma força cortante causada pela força de tração no perfil. Essa força aplicada não se encontra no centroide das duas soldas, logo, irá surgir uma excentricidade. Essa excentricidade pode ser calculada utilizando o centroide da solda ($X_{CG,W}$), e a distância entre a solda e o centroide da força de tração (X_{CG}), representados na Figura 10, a partir da equação abaixo:

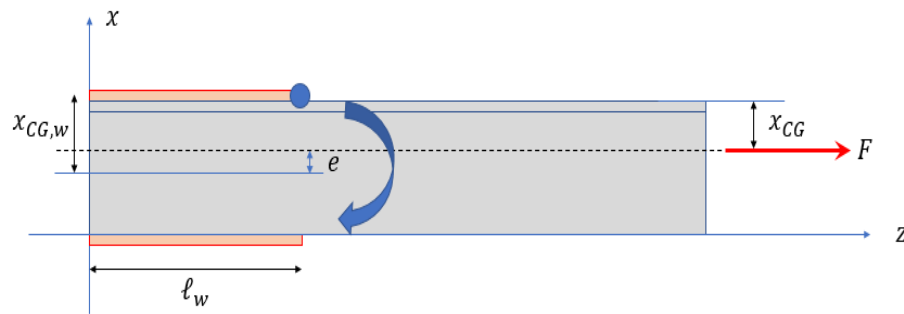
$$e = X_{CG,W} - X_{CG} \quad \text{Eq. 6}$$

A força de tração gera um momento torsor perpendicular ao plano da solda, que é dado por:

$$M_y = F \cdot e \quad \text{Eq. 7}$$

A Figura 10 ilustra o perfil cantoneira genérico, submetido a força de tração, demonstrando o surgimento da excentricidade entre o centroide da solda e a força aplicada, assim como também o momento torsor:

Figura 10: Perfil submetido a força de tração.



Fonte 10: Autoria própria.

Para o modelo analítico de cálculo, e considerando que a força de tração aplicada na cantoneira é transferida para o plano das soldas (xz), as tensões cisalhantes nos cordões de solda são dadas por (Facury, 2017):

$$\tau_{w,z} = \frac{F}{A_{ew}} + \frac{M_y \cdot x}{I_y} \quad \text{Eq. 8}$$

e

$$\tau_{w,x} = \frac{M_y \cdot z}{I_y} \quad \text{Eq. 9}$$

onde F é a força de tração aplicada no perfil, A_{ew} é a área do cordão de solda, M_y é o momento torsor perpendicular ao plano da solda, x e z são as distâncias da solda até seu centroide, e I_y é o momento polar de inercia que é dado pela equação abaixo (Salmon et al, 2009):

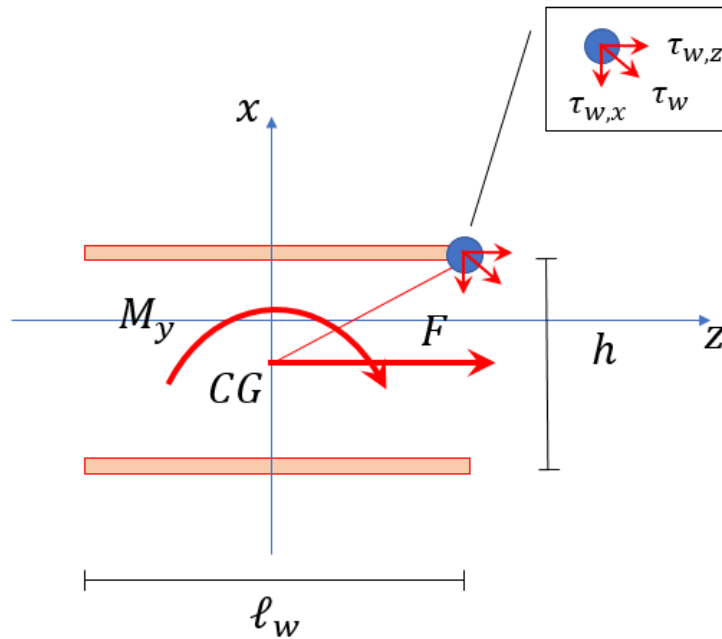
$$I_y = \frac{\ell_w \cdot (3h^2 + \ell_w^2)}{6} \cdot a_w \quad \text{Eq. 10}$$

onde ℓ_w é o comprimento da solda, h é a distância entre as duas soldas, e a_w é a garganta efetiva da solda. Além disso, a tensão cisalhante resultante das tensões $\tau_{w,z}$ e $\tau_{w,x}$ é dada por:

$$\tau_w = \sqrt{\tau_{w,x}^2 + \tau_{w,z}^2} \quad \text{Eq. 11}$$

Com a aplicação da força cortante (F), e do momento torsor no eixo y (M_y), surgem as tensões cisalhantes no eixo x ($\tau_{w,x}$) e no eixo z ($\tau_{w,z}$) para o ponto crítico na extremidade da solda, assim como também uma tensão resultante (τ_w) para as tensões cisalhantes, como é ilustrado na Figura 10:

Figura 11: Componentes da tensão cisalhante no ponto crítico da solda.

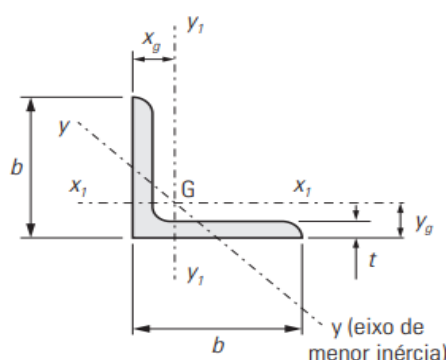


Fonte 11: Autoria própria.

6.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS.

Para a simulação numérica, utilizou-se o software SAP 2000[®], versão 23, da empresa CSI (Computers and Structures, Inc), pois é uma ferramenta que utiliza elementos finitos, onde apresenta um bom desempenho para realização de análises, modelagens, e dimensionamento de situações de engenharia de estruturas. Já em relação ao perfil que foi usado no programa, teve o Aço A36 como material escolhido, pois é um aço que apresenta uma boa soldabilidade, muito usual para perfis de cantoneira, e se comporta bem quando submetido a esforços de tração. Além disso, o perfil cantoneira facilita o encaixa com os banzos, assim permitindo uma melhor execução de solda. O perfil utilizado foi p L 50x3,2 (mm).

Figura 12: Perfil cantoneira simétrico.



Fonte 12: Fakury et al. (2016, p. 482).

Segundo Azevedo (2003), o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. Quando existe a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual proceder-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objetivo de se alcançar uma solução satisfatória, quer em termos económicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares.

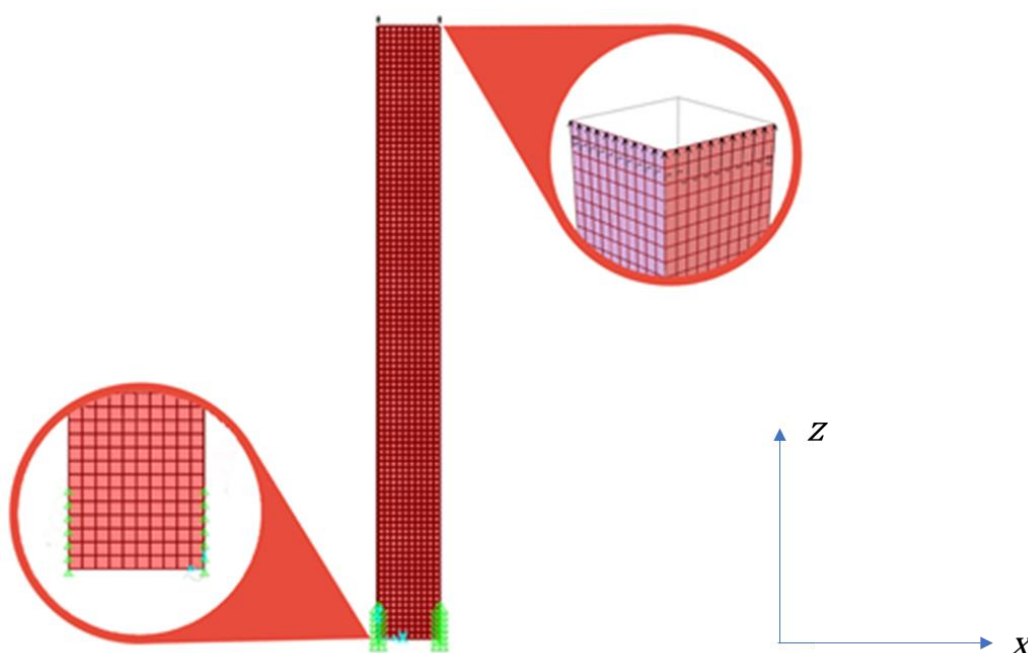
Já segundo Lourenço (2015), a malha representa a divisão dos elementos no objeto de estudo, por meio das equações, que garante o levantamento de vários pontos. Com isso, a precisão da qualidade da malha irá depender do modelamento, da geração da malha, e de outros recursos adotados na simulação.

A malha utilizada para o referente estudo no software, parte da divisão do perfil em subdivisões de 5 mm. No perfil, foram adicionados apoios na aba que será executada a solda

com o intuito de impedir a translação nas direções do eixo x e z . Esses apoios são referentes aos dois cordões de solda, os quais variam o comprimento entre os quatro modelos sujeitos a análise do programa.

Para a força que irá tracionar o perfil cantoneira, utilizou-se 20 kN. Como se trata de uma análise linear, logo, se dobrar a força, consequentemente as tensões também dobrarão, ou seja, as tensões irão se alterar na mesma proporção que a força que for aplicada. Como o perfil está subdividido em partes de 5 mm, cada nó receberá 1 kN, com exceção dos nós das extremidades, como mostra a Figura 12, em decorrência da sua área de influência ser a metade dos nós do meio, logo, recebe 0,5 kN.

Figura 13: Forças e apoios aplicados nos nós.



Fonte 13: Autoria própria.

7 RESULTADOS

Numa primeira fase, foram obtidos os resultados das tensões cisalhantes dos quatro casos de solda por meio de um modelo analítico e de um modelo numérico, tomando como ponto de referência as reações nas extremidades do cordão de solda (ponto crítico). Além disso, foram encontrados resultados de tensões cisalhantes para pontos no meio do cordão de solda para fins de comparação. Os métodos comparados nesse trabalho utilizam de formulações semelhantes, diferenciando-se apenas no ponto tomado como referência para obtenção das tensões.

7.1 EXTREMIDADE DO CORDÃO DE SOLDA

A Tabela 1 mostra alguns resultados obtidos utilizando o Modelo Analítico para os quatro tipos de casos de solda de filete, em relação a um ponto localizado na extremidade do cordão de solda.

Tabela 1: Tensões obtidas pelo modelo analítico no ponto crítico.

MODELO ANALÍTICO				
DADOS	MODELOS DE SOLDA (FILETE)			
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
ℓ_w (cm)	3,00	6,00	9,00	12,00
a_w (cm)	0,21	0,21	0,21	0,21
A_{ew} (cm ²)	1,27	2,55	3,82	5,09
d_w (cm)	0,30	0,30	0,30	0,30
h (cm)	5,00	5,00	5,00	5,00
F (kN)	20,00	20,00	20,00	20,00
e (cm)	0,90	0,90	0,90	0,90
M_y (kN·cm)	18,00	18,00	18,00	18,00
Dist. X (cm)	2,50	2,50	2,50	2,50
Dist. Z (cm)	1,50	3,00	4,50	6,00
I_y (cm ⁴)	8,91	23,54	49,63	92,90
$\tau_{w,z}$ (kN/cm ²)	20,77	9,77	6,15	4,41
$\tau_{w,x}$ (kN/cm ²)	3,03	2,29	1,63	1,16
τ_w (kN/cm ²)	20,99	10,03	6,36	4,56

Fonte 14: Autoria própria.

Os resultados da Tabela 1 mostram que, utilizando o modelo analítico para os quatro casos de solda, as tensões cisalhantes ($\tau_{w,x}$) e ($\tau_{w,z}$) diminuem, enquanto que o comprimento (ℓ_w) e a área (A_{ew}) do cordão de solda aumentam. Além disso, a tensão cisalhante no eixo x ($\tau_{w,x}$) é bem inferior se comparada com a tensão cisalhante no eixo z ($\tau_{w,z}$).

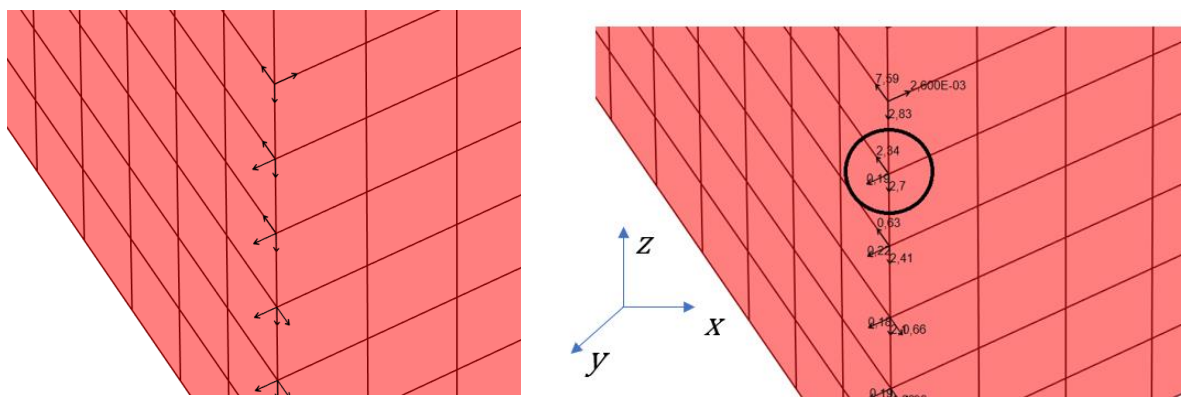
Tabela 2: Tensões obtidas pelo modelo numérico no ponto crítico.

MODELO NUMÉRICO				
DADOS	MODELOS DE SOLDADA (FILETE)			
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
ℓ_w (cm)	0,5	0,25	0,25	0,25
a_w (cm)	0,21	0,21	0,21	0,21
Reação em X (kN)	0,19	0,09	0,11	0,11
Reação em Z (Kn)	2,7	3,05	3,01	2,98
$\tau_{w,z}$ (kN/cm ²)	25,71	58,10	57,33	56,76
$\tau_{w,x}$ (kN/cm ²)	1,81	1,71	2,10	2,10
τ_w (kN/cm ²)	25,78	58,12	57,37	56,80

Fonte 15: Autoria própria.

A Tabela 2 representa os dados obtidos por meio da modelagem numérica dos quatro casos. Vale ressaltar que, no primeiro caso, observou-se uma concentração de tensões no ponto da extremidade (ponto crítico). Logo, por efeito de comparação, foi adotado o nó posterior ao mesmo, como mostra a Figura 14. Uma ressalva é que, no modelo numérico existe uma componente de uma reação no eixo y que não está sendo considerada nos modelos de cálculo.

Figura 14: Esforços pela vista 3D.



Fonte 16: Autoria própria.

Já os resultados das tensões resultantes (τ_w) para o modelo numérico, é possível notar que, para o caso 1, onde foi utilizado o nó posterior ao ponto da extremidade da solda como visto na Figura 14, a tensão resultante foi aproximadamente 50% menor em comparação as demais tensões resultantes. Assim como no modelo analítico, as tensões cisalhantes no eixo x não apresentam grande influência em relação a tensão resultante, pois indicam valores bem menores em comparação com as tensões no eixo z . A Tabela 3 indica todos os resultados das tensões para os quatro casos:

Tabela 3: Dados obtidos pela modelagem numérica para o ponto crítico.

MODELOS	TENSÕES						CRITÉRIO
	MODELO ANALÍTICO			MODELO NUMÉRICO			
	$\tau_{w,z}$	$\tau_{w,x}$	τ_w	$\tau_{w,z}$	$\tau_{w,x}$	τ_w	
CASO 1	20,77	3,03	20,99	25,71	1,81	25,78	0,81
CASO 2	9,77	2,29	10,03	58,10	1,71	58,12	0,17
CASO 3	6,15	1,63	6,36	57,33	2,10	57,37	0,11
CASO 4	4,41	1,16	4,56	56,76	2,10	56,80	0,08

Fonte 17: Autoria própria.

Para efeitos de comparação, foi feita uma relação entre as tensões resultantes dos dois modelos de cálculo. A Tabela 3 ainda mostra os resultados dessa relação, onde o modelo analítico está prevendo tensões resultantes menores em comparação as tensões resultantes do modelo numérico.

7.2 PONTO MÉDIO DO CORDÃO DE SOLDA

A Tabela 4 mostra alguns resultados obtidos utilizando o Modelo Analítico para os quatro tipos de casos de solda de filete, para um ponto médio no cordão de solda.

Tabela 4: Tensões no ponto médio da solda.

MODELO ANALÍTICO				
DADOS	MODELOS DE SOLDA (FILETE)			
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
ℓ_w (cm)	3,00	6,00	9,00	12,00
a_w (cm)	0,21	0,21	0,21	0,21
A_{ew} (cm ²)	1,27	2,55	3,82	5,09
d_w (cm)	0,30	0,30	0,30	0,30
h (cm)	5,00	5,00	5,00	5,00
F (kN)	20,00	20,00	20,00	20,00
e (cm)	0,90	0,90	0,90	0,90
M_y (kN·cm)	18,00	18,00	18,00	18,00
Dist. X (cm)	2,50	2,50	2,50	2,50
Dist. Z (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00
I_y (cm ⁴)	8,91	23,54	49,63	92,90
$\tau_{w,z}$ (kN/cm ²)	20,77	9,77	6,15	4,41
$\tau_{w,x}$ (kN/cm ²)	0,00	0,00	0,00	0,00
τ_w (kN/cm ²)	20,77	9,77	6,15	4,41

Fonte 18: Autoria própria.

Os resultados da Tabela 4 confirmam que o modelo analítico segue um padrão, demonstrando que as tensões cisalhantes ($\tau_{w,x}$) e ($\tau_{w,z}$) continuam a diminuir enquanto o comprimento (ℓ_w) e a área (A_{ew}) do cordão de solda aumentam. Isso se confirma mesmo que seja alterado o ponto dos esforços, os quais saíram das extremidades e foram para o meio do cordão de solda. Em razão disso, a distância em z é zero, já que a tensão é nula em relação ao eixo x .

A Tabela 5 informa os dados extraídos por meio da modelagem numérica aplicada no ponto médio nos quatro casos de solda.

Diferentemente da modelagem numérica anterior (no ponto crítico), os resultados mostraram um padrão, onde percebe-se que as tensões resultantes do modelo analítico e do modelo numérico apresentam valores bem próximos. Apesar do modelo analítico apresentar tensões cisalhantes no eixo x nulas, o modelo numérico não seguiu esse critério. A Tabela 6 indica os valores de todas as tensões dos modelos de solda:

Tabela 5: Dados do modelo numérico no ponto médio da solda.

MODELO NUMÉRICO				
DADOS	MODELOS DE SOLDA (FILETE)			
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
ℓ_w (cm)	0,5	0,5	0,5	0,5
a_w (cm)	0,21	0,21	0,21	0,21
Reação em X (kN)	0,18	0,12	0,07	0,04
Reação em Z (Kn)	2,1	0,94	0,57	0,39
$\tau_{w,z}$ (kN/cm ²)	20,00	8,95	5,43	3,71
$\tau_{w,x}$ (kN/cm ²)	1,71	1,14	0,67	0,38
τ_w (kN/cm ²)	20,07	9,03	5,47	3,73

Fonte 19: Autoria própria

Tabela 6: Dados obtidos pela modelagem numérica para o ponto médio.

MODELOS	TENSÕES						CRITÉRIO
	MODELO ANALÍTICO			MODELO NUMÉRICO			
	$\tau_{w,z}$	$\tau_{w,x}$	τ_w	$\tau_{w,z}$	$\tau_{w,x}$	τ_w	
CASO 1	20,77	0,00	20,77	20,00	1,71	20,07	1,03
CASO 2	9,77	0,00	9,77	8,95	1,14	9,03	1,08
CASO 3	6,15	0,00	6,15	5,43	0,67	5,47	1,12
CASO 4	4,41	0,00	4,41	3,71	0,38	3,73	1,18

Fonte 20: Autoria própria.

Comparando os resultados entre os dois modelos, há uma pequena diferença entre as tensões cisalhantes calculadas pelo modelo analítico e pelo modelo numérico, onde, segundo a Tabela 6, o caso 1 e o caso 2 apresentaram, respectivamente, uma diferença de 3% e 8% para as tensões resultantes. Em contrapartida, os casos 3 e 4 não atendem o critério de segurança, pois ultrapassam uma margem de 10%.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou-se que, a partir da comparação entre as tensões resultantes dos quatro casos, para os pontos extremos e pontos médios, alguns resultados apresentaram uma aproximação entre eles, com diferenças entre 3% e 8%, sendo considerados aceitáveis para o critério de segurança dos modelos. Em contrapartida, os demais resultados ultrapassaram essa estimativa de segurança, com diferenças acima de 12%, onde não foi possível observar um padrão de aproximação entre eles.

Tais fatos são atribuídos a simplificações que são significativas no modelo numérico utilizado, os quais influenciam diretamente nos resultados. O tipo de malha, as condições de contorno, e até mesmo a modelagem do cordão de solda, podem interferir nos resultados. Dessa forma, é necessário utilizar uma malha mais refinada onde as concentrações de tensões eram mais significativas, alterar o modelo de simulação da solda, as condições de contorno, e a força aplicada, para resolver os problemas.

REFERÊNCIAS

- FAKURY, Ricardo H.; SILVA, Ana Lydia Reis; CALDAS, Rodrigo Barreto. Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. 1ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.
- CORTEZ, Lucas Azevedo da Rocha. et al. Uso das estruturas de aço no brasil. Ciências exatas e tecnológicas, Alagoas, v. 4, n. 2, p. 217-228, Nov, 2017.
- SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E.; MALHAS, F. A. Steel Structures: design and behavior. 5 ed. Upper Saddle River, NJ, EUA: Pearson Prentice Hall, 2009.
- KLETTENBERG, Leonardo Gaiser. LIGAÇÕES SOLDADAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS. 2013. 141 f. Monografia (Especialização) - Curso de I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, CTA DEMEC, UFPR, Curitiba, 2013.
- KOT Engenharia. Análise por elementos finitos. Disponível em: <<https://kotengenharia.com.br/analise-por-elementos-finitos>>. Acesso em: 9 de Outubro de 2021.
- DAINATEX ENGENHARIA E CONSULTORIA. Historia do SAP 2000. Disponível em: <<https://www.dainatex.com.br/cursos/historia-do-sap-2000/>>. Acesso em: 9 de outubro de 2021.
- MULTIPLUS SOFTWARES TÉCNICOS. SAP 2000: Software para Análise Estrutural e Dinâmica, Linear e Não-Linear por Elementos Finitos. Disponível em: <<https://multiplus.com/software/sap2000/index.html>>. Acesso em: 9 de outubro de 2021.
- AZEVEDO, F. M. Álvaro, Método dos Elementos Finitos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Portugal (2003), 1º ed.
- Cho, Y.; Kim, D.-K.; Kim, J.; Kim, T. Finite Element Analysis on Block Shear Mechanism of Lean Duplex Stainless Steel Welded Connections. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3283. <https://doi.org/10.3390/app11073283>
- LUCJAN, Slecza; KOZLOWSKI, Aleksander. Finite element modelling of fillet weld connections. Design, Fabrication and economy of weld structures, Elsevier, 2008, p.427-34.

GIL, Felipe de Souza Lourenço. Análise da qualidade de malha de elementos finitos e validação de situação caso real de viga biapoiada. Orientador: Prof. Dr. Laercio Javarez Junior. 2015. 69 f. TCC (graduação) -Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16316/1/PG_DAMEC_2015_1_05.pdf. Acesso em: 24 maio de 2022.