



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS GURUPI
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARCO ANTONIO TONELLOTO

**ESTUDO COMPARATIVO DO DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES METÁLICAS
VIA MÉTODOS ANALÍTICOS E MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

**GURUPI
2022**

MARCO ANTONIO TONELLOTO

**ESTUDO COMPARATIVO DO DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES METÁLICAS
VIA MÉTODOS ANALÍTICOS E MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel do Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins *Campus* Gurupi.

Orientador: Prof. Esp. Paulo Roberto de
Oliveira Júnior

**GURUPI
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

T664e Tonello, Marco Antonio
Estudo comparativo do dimensionamento de ligações metálicas
via métodos analíticos e método dos elementos finitos / Marco
Antonio Tonello. – Gurupi, TO, 2022.
98 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Gurupi, Gurupi, TO, 2022.

Orientador: Esp. Paulo Roberto de Oliveira Júnior

1. Estruturas metálicas. 2. Solidworks. 3. Tensão. I. Oliveira
Júnior, Paulo Roberto de. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados
fornecidos pelo(a) autor(a).**



Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
Campus Gurupi

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARCO ANTONIO TONELLOTTO

Estudo comparativo do dimensionamento de ligações metálicas via métodos analíticos e método dos elementos finitos.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Gurupi.

Aprovado em: 08 / 06 / 2022

BANCA AVALIADORA

Orientador: Paulo Roberto de Oliveira Júnior
IFTO - *Campus* Gurupi

Me. Rodrigo Araújo Fortes
IFTO - *Campus* Gurupi

Clerson Dalvani Reis
IFTO - *Campus* Gurupi

Gurupi, 10 de junho de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto de Oliveira Junior, Servidor**, em 10/06/2022, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Araujo Fortes, Servidor**, em 10/06/2022, às 10:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Clerison Dalvani Reis, Servidor**, em 10/06/2022, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.iftto.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1659512** e o código CRC **7850AF64**.

Alameda Madrid, 545, — CEP 77410-470, Gurupi/TO — (63) 3311-5400
portal.iftto.edu.br — reitoria@iftto.edu.br

AGRADECIMENTOS

Gostaria, em primeiro lugar, de agradecer a Deus por me ter proporcionado a chance de concluir esta etapa da minha vida em que não apenas adquiri conhecimento, mas também nutri laços eternos de fraternidade e respeito. A Ele que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais críticos sem nunca se olvidar de mim.

Ao meu orientador, Paulo Roberto de Oliveira Júnior, peça fundamental na minha formação e que sempre serviu aos seus discentes com enorme dedicação e compreensão.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil do *campus* Gurupi que sempre nos desafiaram a vencer nossas inseguranças sem jamais desistir.

A todos os colaboradores do *campus* Gurupi, principalmente os responsáveis pela manutenção, limpeza, proteção e conservação da unidade, que nos propiciaram com muita simpatia as condições adequadas para o funcionamento da instituição.

Aos meus colegas que compartilharam comigo as alegrias e frustrações desse ciclo de vida. Acreditem que sempre terei a honra de tê-los tido como amigos.

A toda minha família, em especial a minha mãe, Candice, por seu exemplo de amor e determinação e ao meu irmão, João, que sempre me inspirou com sua incansável perseverança.

RESUMO

Nos projetos de estruturas de aço, é muito comum que as literaturas pertinentes apresentem uma série de idealizações para o seu dimensionamento sobretudo para o de suas conexões metálicas dada a complexidade que detêm. A partir desta premissa, este trabalho buscou comparar os resultados obtidos pelas formulações analíticas com aqueles alcançados utilizando o programa de elementos finitos Solidworks®. Para tanto, foram modelados dois tipos de ligação analisando-se os seus deslocamentos e tensões para o caso de vigas e os esforços originados nos conectores e soldas. Dessa forma, verificou-se que a deformação dos elementos de ligação e sua consequente rigidez, usualmente desconsideradas em cálculos manuais mais práticos, pode apresentar significativa influência nos valores obtidos por meio das duas metodologias de cálculo. Viu-se também que os softwares que se utilizam do método dos elementos finitos se constituem como uma relevante alternativa às verificações mais detalhadas de efeitos complexos na impossibilidade de ensaios reais.

Palavras-chave: Estruturas metálicas. Solidworks. Tensão.

ABSTRACT

In the steel structures projects, the pertinent literatures frequently present many design idealizations especially for metallic connections, given the complexity that they hold. Due this premise, this study aimed to compare the results obtained by the analytical formulations with those achieved using the finite element software Solidworks®. For this purpose, two types of connection were modeled, analyzing their displacements and stresses for the case of beams and the forces originated in the connectors and welds. Thus, it was realized that the deformation of the connecting elements and their consequent stiffness, usually neglected in more practical manual calculations, have a significant influence on the values obtained through the two calculation methodologies. Furthermore, it was seen that software that uses the finite element method is a relevant alternative to more detailed verification of complex effects when real tests are not possible.

Keywords: Metallic structures. Solidworks. Stress.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Curva tensão x deformação para materiais dúcteis	17
Figura 2- Tensões residuais	20
Figura 3- Comportamento de uma ligação	23
Figura 4- Comportamento genérico das ligações	23
Figura 5- Diagramas de momento-rotação	25
Figura 6- Disposição do parafuso	26
Figura 7- Esquema de ligação do Tipo contato	28
Figura 8- Ligação por atrito	28
Figura 9-Distribuição das forças entre conectores	31
Figura 10-Métodos de falha em ligações do tipo conector	33
Figura 11-Cisalhamento de bloco	33
Figura 12-Solda de filete	36
Figura 13-Elementos geométrico da solda de filete	37
Figura 14-Solda de entalhe	39
Figura 15-Solda de tampão	39
Figura 16-Localização dos símbolos na representação normativa	42
Figura 17-Distribuição de tensões nos cordões de solda	43
Figura 18-Distribuição real das tensões em soldas longas	43
Figura 19-Grupo de parafusos sujeitos às cargas excêntricas	47
Figura 20-Esquema da conexão	49
Figura 21-Mecanismo de ação	51
Figura 22-Efeito alavanca em parafusos	52
Figura 23-Mecanismos de ação do efeito alavanca	53
Figura 24-Distribuição de tensões na solda	56
Figura 25-Carregamento excêntrico	56
Figura 26-Exemplos de deformação	59
Figura 27-Esforço normal	60
Figura 28-Momento fletor	61
Figura 29-Tensão cisalhamento	62
Figura 30-Discretização do sólido em elementos finitos	65
Figura 31-Representação genérica de um elemento tetraédrico	67
Figura 32-Sólido sujeito a um estado de tensões multiaxiais	68

Figura 33-Mudança de volume e deformações em sólido sob tensões.....	69
Figura 34-Teoria de Von Mises	70
Figura 35- Esquema geral de configuração de análise	71
Figura 36-Condição idealizada da ligação	75
Figura 37-Representação das peças da conexão	76
Figura 38-Recurso de simetria	77
Figura 39-Disposição das soldas	78
Figura 40-Representação da discretização	79
Figura 41-Mecanismo de funcionamento da conexão.....	80
Figura 42-Disposição da peça.....	80
Figura 43-Representação da discretização	81
Figura 44-Distribuição das tensões na viga	82
Figura 45-Deslocamento da viga.....	83
Figura 46-Tensão de cisalhamento máxima.....	84
Figura 47-Força de tração nos conectores.....	85
Figura 48-Distribuição de tensões na chapa de extremidade	86
Figura 49-Cisalhamento nos conectores.....	87
Figura 50- Tamanho máximo das soldas	87
Figura 51-Esforços nos conectores.....	88
Figura 52-Deformação da chapa.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Características dos aços de baixa liga	17
Tabela 2-Propriedades do aço	18
Tabela 3-Tipos de esforços	19
Tabela 4-Comportamento esperado das juntas	24
Tabela 5-Principais vantagens e desvantagens de conexões parafusadas	27
Tabela 6-Parâmetros do parafuso.....	30
Tabela 7-Tipos de falhas nos conectores.....	32
Tabela 8-Principais vantagens e desvantagens de conexões soldadas	35
Tabela 9-Dimensões mínimas da solda	38
Tabela 10-Força resistente de cálculo das soldas	40
Tabela 11-Materiais componentes	73
Tabela 12-Propriedades mecânicas dos materiais.....	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Aço	16
2.1.1	Aços de baixa liga	16
2.1.2	Propriedades mecânicas.....	17
2.1.3	Esforços atuantes:	19
2.1.4	Tensões residuais	20
2.1.5	Crterios para o dimensionamento	20
2.2	Conexões metálicas.....	21
2.2.1	Rigidez	22
2.3	Tipos de ligação	25
2.3.1	Ligações aparafusadas	26
2.3.1.1	<i>Vantagens e desvantagens.....</i>	<i>26</i>
2.3.2	Mecanismos de transmissão de esforos	27
2.3.2.1	<i>Tipos de parafusos.....</i>	<i>29</i>
2.3.2.2	<i>Distribuição dos esforos</i>	<i>30</i>
2.3.2.3	<i>Modos de falha nos parafusos.....</i>	<i>31</i>
2.3.3	Ligações soldadas	33
2.3.3.1	<i>Processos de soldagem.....</i>	<i>34</i>
2.3.3.2	<i>Vantagens e desvantagens.....</i>	<i>34</i>
2.3.3.3	<i>Eletrodos.....</i>	<i>35</i>
2.3.3.4	<i>Tipos de solda.....</i>	<i>36</i>
2.3.3.5	<i>Resistência.....</i>	<i>39</i>
2.3.3.6	<i>Simbologia</i>	<i>41</i>
2.3.3.7	<i>Distribuição de tensões nas soldas.....</i>	<i>42</i>
2.4	Mecanismos de solicitação em conexões	44
2.4.1	Ligação parafusada axial por cisalhamento	44
2.4.1.1	<i>Pressão de contato pela ABNT NBR 8800 (2008)</i>	<i>45</i>
2.4.2	Ligação parafusada excêntrica por corte	46
2.4.3	Conexões aparafusadas sujeitas à cortante e momento fletor	48
2.4.3.1	<i>Método elástico tradicional.....</i>	<i>49</i>
2.4.3.2	<i>Método simplificado</i>	<i>50</i>
2.4.3.3	<i>Efeito alavanca.....</i>	<i>51</i>

2.4.4	Ligação soldada excêntrica por corte.....	55
2.5	Deslocamentos e tensões	58
2.5.1	Esforço Axial:	60
2.5.2	Esforço de flexão:	61
2.5.3	Esforço de cisalhamento:	62
2.6	Método dos Elementos Finitos (MEF)	63
2.6.1	Malha	66
2.6.2	Teorias de falhas estáticas	67
2.6.2.1	<i>Teoria da energia de distorção máxima ou Critério de Von-Mises.....</i>	<i>68</i>
2.6.3	Solidworks.....	70
2.6.4	Singularidades em malhas.....	71
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	73
3.1	Parâmetros gerais.....	73
3.2	Definição dos materiais	73
3.3	Ligações ensaiadas	74
3.3.1	Ligação de viga com chapa de topo.....	75
3.3.1.1	<i>Solda.....</i>	<i>77</i>
3.3.1.2	<i>Malha</i>	<i>78</i>
3.3.2	Ligação parafusada com conectores sujeitos a cisalhamento excêntrico	79
3.3.2.1	<i>Malha</i>	<i>81</i>
4	RESULTADOS	82
4.1	Ligação de viga com chapa de topo.....	82
4.1.1	Tensão	82
4.1.2	Deslocamento	83
4.1.3	Tensão de cisalhamento máxima.....	84
4.1.4	Esforço nos conectores.....	85
4.1.5	Soldas	87
4.2	Ligação parafusada com conectores sujeitos a cisalhamento excêntrico	88
4.2.1	Esforços nos conectores	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
	REFERÊNCIAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

Durante os últimos dois séculos o emprego do aço na construção civil como elemento estrutural ganhou importante relevância, pois as peças fabricadas a partir desse material podiam prover grandes vantagens em comparação aos sistemas tradicionais. A revolução industrial, o avanço da ciência e o desenvolvimento de tecnologias para produção e transporte do aço foram fatores-chave na consolidação do uso de estruturas metálicas ao redor do mundo e tornaram indiscutível o valor da criação de boas práticas e códigos técnicos que garantissem a devida segurança e durabilidade dessas peças.

Os primeiros registros históricos do uso do aço na construção em relevante escala datam do século XVIII, nomeadamente com a construção da ponte Coalbrookdale, na Inglaterra cujo o vão atingiu 30 metros de comprimento. Em 1931, o Empire State Building na cidade de Nova York fora concluído. Concebido estruturalmente em aço, a edificação de 234 metros de altura ostentou por mais de quarenta anos o título de edifício mais alto do mundo mostrando não apenas o espírito de determinação humana, mas também a evolução do emprego do seu sistema construtivo. Neste contexto histórico, Nakahara (2017), relata que a aplicação desse tipo de estrutura ainda é muito frequente frequente nos Estados Unidos e Europa ao passo que no Brasil ainda se verifica a escolha predominante do concreto visto que esta tecnologia é conhecida e dominada por mais tempo pela engenharia nacional.

A escolha do aço como sistema estrutural depende de alguns fatores como viabilidade econômica, disponibilidade, mão de obra e arquitetura. Este último, a propósito, possui significativa relevância uma vez que os projetos atuais requerem geometrias desafiadoras que possam ser executadas rapidamente, sem desperdício e com fidelidade quanto as suas características estruturais.

Apesar das várias benesses providas por esse modelo construtivo, existem certas adversidades quanto ao seu uso. Salinas (2006), por exemplo, diz que em um projeto de estruturas metálicas o dimensionamento e fabricação de suas conexões são uma das partes mais complexas e difíceis a se solucionar, pois elas devem ser capazes de transmitir cargas axiais, forças cortantes e momentos fletores de modo a garantir a estabilidade das partes unidas.

Ainda segundo o referido autor, como nas ligações o trabalho dos materiais é complexo devido ao fato de geralmente haver importantes concentrações de esforços,

sempre é complexo conhecer o grau de continuidade alcançado e, portanto, os resultados obtidos a partir de hipóteses de dimensionamento servem apenas para estimar a magnitude das forças atuantes.

Neste aspecto, pode-se dizer que as reações desenvolvidas em uma união metálica dependem diretamente da rigidez do modelo adotado que interfere essencialmente no desempenho global da estrutura. Esta rigidez, por consequência, pode governar a intensidade das ações de rotação e deformação das peças conectadas. Um dos maiores inconvenientes quanto aos deslocamentos expressivos é o aparecimento de forças adicionais que, segundo Carmo (1995), são chamados de efeitos de segunda ordem que quando combinados ao carregamento original podem inviabilizar o uso da estrutura por comprometer sua estabilidade levando até mesmo a uma ruína violenta e repentina.

Devido às grandes dificuldades quanto à determinação das conexões metálicas, o Instituto Brasileiro de Siderurgia (2004) ressalta que é muito comum, na prática, que o desenho desses elementos ocorra de forma relativamente simplificada por meio da redução do número de verificações, com base na experiência profissional de cada projetista e pela utilização de tabelas de ligações padronizadas disponíveis em muitos códigos técnicos.

Devido a todos esses fatores, não é incomum observar que os próprios regulamentos normativos trazem formulações que são apenas aplicáveis a uma limitada quantidade de elementos, geometrias e condições. Por isso, Melo (2013), reforça que a utilização de softwares pode auxiliar a obtenção de fórmulas mais plausíveis e fidedignas sobretudo para peças de formato complexo além de permitir uma visualização mais intuitiva dos resultados.

Atualmente uma das alternativas para a resolução e análise de efeitos complexos passa por programas computacionais sobretudo pelos que se utilizam do Método dos Elementos Finitos (MEF). Mohammed (2015), explica que o MEF só foi popularizado a partir dos anos 1960 com o advento dos primeiros computadores. Azevedo (2003), relata que anteriormente a criação dos processadores computacionais o método apresentava o inconveniente de requerer grandes sistemas de equações e, dessa forma, tornava-se pouco atrativo em comparação aos modelos matemáticos mais simplistas.

Assim, a partir dos aspectos mencionados, este estudo teve como objetivo avaliar a lealdade dos resultados obtidos para o dimensionamento de conexões usuais

em aço por meio de fórmulas e recomendações dispostas nas normas e bibliografias específicas com aqueles alcançados pelas análises computacionais por meio do método de elementos finitos. Para tanto, analisou-se dois modelos de ligações metálicas simulando-as no software e calculando-as analiticamente conforme a literatura elegida. Para o alcance do objetivo geral foram comparados os resultados obtidos entre as duas metodologias para os deslocamentos, tensões e esforços nos parafusos e soldaduras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Jorajuria e Servente (2015), afirmam que durante a exposição mundial de Chicago em 1933, foram apresentados os primeiros modelos de estruturas metálicas em aço conformado a frio para residências denominados como steel frame. Tal tecnologia aliado ao desenvolvimento de ferramentas para a produção em massa e que facilitassem sua montagem foram responsáveis pelo célere crescimento da tecnologia que também diminuiu a necessidade de mão-de-obra qualificada para sua execução. A partir daí, o emprego do aço deixou de ser uma exclusividade das grandes obras transformando-se em sinônimo de versatilidade e economia.

2.1 Aço

O aço, de acordo com Silva (2012), é definido como uma liga metálica de ferro com pequenas quantidades de carbono que lhe dá as características típicas ao seu uso na construção civil tais como ductibilidade e resistência. Em geral, os principais componentes do aço são o minério de ferro e o carvão mineral. Todavia, essas matérias-primas costumam conter impurezas sendo necessário o seu prévio tratamento a fim de aumentar a eficiência dos fornos e reduzir o consumo de energia.

Para o alcance do aço na forma geométrica requerida, recorre-se a uma série de operações metalúrgicas realizadas em siderúrgicas que o converte de forma líquida ou solidificada em elementos que posteriormente serão utilizados na construção.

Santos (1977), afirma que a utilização de estruturas metálicas no setor industrial é bem desenvolvida, pois se reconhece que o aço é capaz de produzir peças resistentes e flexíveis a modificações arquitetônicas de acordo com as específicas necessidades do empreendimento. Além disso, o autor reitera que a rapidez na execução, reciclabilidade dos componentes metálicos, economia e possibilidade de obter grandes vãos tornaram esse sistema construtivo bastante competitivo.

2.1.1 Aços de baixa liga

São aços melhorados mecanicamente pela adição de elementos como níquel, cromo, manganês, fósforo etc. Alguns desses componentes incrementam a resistência do aço por meio da mudança da microestrutura para grãos finos o que

permite ter aços com baixo teor de carbono da ordem de 0,2% permitindo soldagens sem qualquer expressivo inconveniente. A Tabela 1 descreve os modelos mais usuais de suas resistências.

Tabela 1-Características dos aços de baixa liga

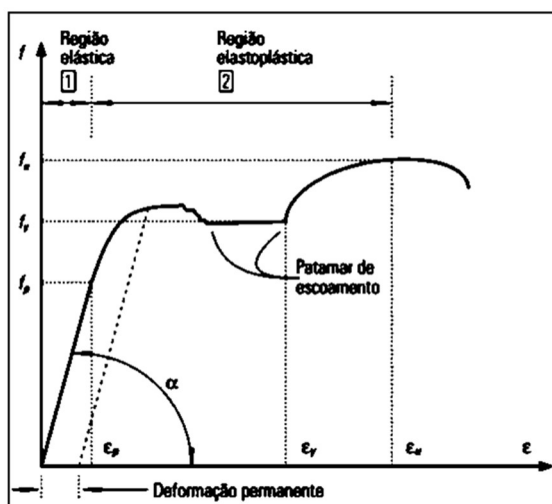
Especificação	Principais elementos de liga	Limite de escoamento (F_y) (Mpa)	Resistência à ruptura (F_u) (Mpa)
ASTM 572 Gr. 50	C<0,23% Mn<1,35%	345	450
ASTM A588	C<0,17% Mn<1,2% Cu<0,50%	345	485
ASTM A992	C<0,23% Mn<1,5%	345	450

Fonte: adaptado de Pfeil e Pfeil (2009).

2.1.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são as características que determinam o comportamento do material quando está submetido a esforços. Elas devem ser conhecidas uma vez que é necessário relacionar a deformação medida do material com sua respectiva tensão. Em geral, é comum que os materiais férreos possuam específicas curvas de Tensão X Deformação obtidas por meio de ensaios específicos de tração e compressão. A curva genérica para esses materiais está mostrada na Figura 1.

Figura 1-Curva tensão x deformação para materiais dúcteis



Fonte: Pinheiro (2005).

Porém, os aços estruturais são dotados de algumas outras propriedades mecânicas intrínsecas ao seu funcionamento. De acordo com Rincón (2013), são algumas dessas propriedades que fazem com que o sistema construtivo seja uma das melhores opções para obras sobretudo se a estrutura estiver dispostas em zonas sísmicas sensíveis ou mesmo a carregamentos cíclicos.

Neste aspecto, a Tabela 2 descreve algumas dessas características conforme demonstrado abaixo:

Tabela 2-Propriedades do aço

Propriedade	Descrição
Ductilidade	É a capacidade de deformação do material quando estiver sob a ação de cargas. Os materiais dúcteis podem deformar-se redistribuindo as tensões. Isto implica, por exemplo, que os esforços em conectores tipo parafusos se dê forma uniforme. Além disso, a ductibilidade conduz a mecanismos de ruptura acompanhados por grandes deformações.
Fragilidade	Os materiais frágeis, ao contrário dos dúcteis, se rompem de maneira brusca sem qualquer indício de aviso. Os aços podem se tornar frágeis pela ação de diversos agentes tais como baixas temperaturas, efeitos térmicos locais como soltas elétricas etc.
Resiliência e Tenacidade	Resiliência é a capacidade do material, durante o regime elástico de absorver energia. Dessa forma, o módulo de resiliência basicamente é a quantidade de energia que pode ser absorvida por unidade de volume do material. Já a Tenacidade é a energia total, plástica e elástica, que o material tem capacidade de absorver por unidade de volume até a sua ruptura.
Dureza	A dureza é a resistência do material ao risco ou abrasão.
Efeito de temperatura	Temperaturas altas diminuem as resistências de escoamento e ruptura, bem como o módulo de elasticidade. Acima 250°C, tendem a provocar fluências nos materiais
Fadiga	É o fenômeno que induz à fratura das peças em tensões inferiores às obtidas em ensaios estáticos. Geralmente as partes sujeitas a carregamentos cíclicos, isto é, repetidas em um grande número de vezes ficam suscetíveis a este evento.

Fonte: adaptado de Pfeil e Pfeil (2009).

2.1.3 Esforços atuantes:

Segundo Almeida (2009), uma estrutura é o conjunto apto a receber as solicitações externas absorvendo-as e transmitindo-as aos seus vínculos ou apoios onde serão equilibradas pelas forças reativas. Viero (2008), diz que a condição fundamental de equilíbrio e estabilidade está em garantir que as partes de uma edificação não se movam. No entanto, ressalta que alguns movimentos relativamente pequenos em comparação ao tamanho geral da estrutura podem ser admitidos sem comprometer as premissas de equilíbrio. Em geral, os esforços ou ações na engenharia estrutural classificam-se conforme abaixo:

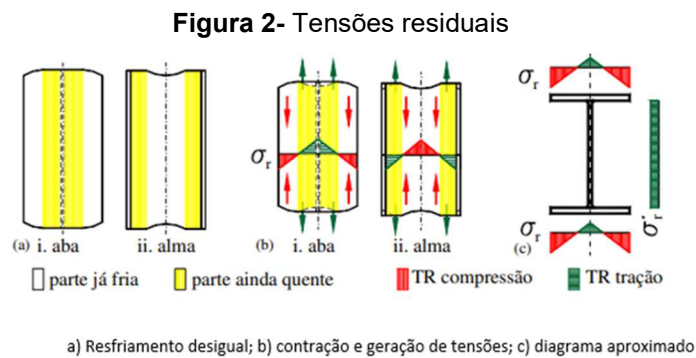
Tabela 3-Tipos de esforços

Esforço	Descrição
Força normal (N):	É a carga que age perpendicularmente à área da seção e se desenvolvem sempre que as cargas externas tendem a empurrar ou puxar os dois segmentos do corpo.
Força de cisalhamento (V):	Esta força encontra-se no plano da área e é desenvolvido quando as cargas externas conduzem ao deslizamento de um segmento de corpo sobre um outro. Este é o esforço comumente visualizado nas ligações do tipo conector tais como parafusos, pinos e rebites.
Momento fletor (M):	São os efeitos causados por uma carga externa que provoca a tendencia de um corpo fletir em torno de um eixo que se encontra no plano da área, isto é, tendem a fazer a seção girar sobre este plano comprimindo uma parte e tracionando a outra. Sua intensidade é proporcional à carga e ao braço de alavanca desenvolvido.
Torque (T)	Este efeito se dá quando as cargas externas tendem a torcer um segmento do corpo em relação a algum outro. Em outras palavras, são os momentos em relação ao eixo perpendicular da peça ao plano de sua seção situados de um mesmo lado que provoca o movimento de giro.

Fonte: adaptado de Hibbeler (2012) e Beer (1995)

2.1.4 Tensões residuais

Alvarenga (2010), diz que as tensões residuais são os esforços gerados pelo resfriamento desigual das distintas partes de um perfil, seja devido a laminação, soldagem, corte por maçarico entre outros. O autor explica que durante o resfriamento as partes mais externas ao ambiente perdem calor com maior rapidez e, como consequência se contraem; já as partes internas da peça resfriam-se mais lentamente. Neste aspecto, os pontos mais arrefecidos tentam a se comprimir enquanto os mais quentes se tracionam. Este esquema é mostrado na Figura 2.



Fonte: Alvarenga (2010).

Devido a importância desse fenômeno, a norma brasileira ABNT NBR 8800 (2008), propõem que a tensão residual de compressão nas mesas deve ser considerada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado, isto é, $\sigma_r = 0,3f_y$.

2.1.5 Critérios para o dimensionamento

Na etapa de dimensionamento, o projetista deve ser capaz de mensurar os esforços para a correta escolha dos materiais e geometrias de uma determinada peça a fim de garantir não só apenas sua durabilidade, custo acessível e exequibilidade, mas também sua segurança para as ações que ocorram durante a vida útil da estrutura.

Um dos principais métodos para o dimensionamento e um dos mais difundidos é o do estado limite último. Nele, as ações, resistências e solicitações são tratadas de forma semi-probabilística sendo a segurança introduzida de forma qualitativa. No entanto para sua aplicação, deve-se conhecer os possíveis modos de falha e a

resposta estrutural para os esforços aplicados. Devido a isto foram definidos os Estados Limites Últimos (ELU) e os Estado Limites de Serviço (ELS).

Segundo a Associação Brasileira de Fôrmas, Escoramentos e Acesso (ABRASFE) (2018), o ELU está associado à ocorrência de excessivas cargas com posterior colapso da estrutura devido a perda de equilíbrio da mesma uma vez que se relaciona estritamente com o esgotamento da capacidade portante da estrutura. De acordo com o documento, este estado pode se originar de fatores como ruína, deformações plásticas e elásticas, fissuração etc.

Já o estado limite de serviço ou utilização trata da durabilidade e aparência da estrutura, funcionalidade e conforto. O ELS pode ser originado a partir de deformações excessivas, danos locais, vibrações ou qualquer outro inconveniente que não contribuía necessariamente para o seu colapso estrutural.

2.2 Conexões metálicas

Uma Ligação, de acordo com o Eurocódigo 3 (2010), é o local onde dois ou mais elementos convergem. Para efeitos de dimensionamento, é o conjunto das componentes básicas necessárias para a representação do comportamento da ligação na transmissão dos esforços relevantes. Além disso, a norma europeia ainda define o conceito de junta como uma zona onde dois ou mais elementos estão interligados.

Rosario (2020), relata que uma das partes mais importantes no dimensionamento de elementos de aço é a escolha adequada dos diversos tipos de conexões para promover a estabilidade das estruturas. Porém, estas ligações dependem de muitos fatores como critérios e experiência do projetista, do fabricante e do montador. Segundo ele, o custo das conexões representa uma porcentagem considerável no orçamento da estrutura como um todo e, por isso, aconselha que sejam tomadas algumas precauções como o eficiente detalhamento das peças a fim de fomentar a viabilidade econômica sem pôr em risco os níveis de segurança especificados nas normas vigentes.

Partindo-se da análise geral da estrutura, segundo Salinas (2006), é possível estimar os esforços aproximados produzidos em um elemento de união e nos próprios elementos estruturais. Todavia, nas conexões metálicas os esforços aplicados aos materiais são complexos e trabalhosos, pois usualmente existe uma concentração de

tensões importante sendo difícil estimar o grau de continuidade alcançado por elas. Devido a isso, não é possível a existência de uma demasiada confiança nas estimativas que, em geral, são baseadas em hipóteses de dimensionamento servindo estas apenas para promover uma ordem de grandeza da magnitude das forças.

O Instituto Técnico de la Estructura en Acero (ITEA) (2014), diz que a fabricação das uniões se dá, na maioria das vezes, pelo corte, furação e soldagem das barras, perfis, chapas e enrijecedores que representa grande parte do trabalho efetuado nas fábricas. O instituto também prevê três básicas condições para o uso de conexões estruturais. São elas:

- i) Quando há mudança de direção, por exemplo, nas uniões de viga- pilar, viga-viga ou em treliças;
- ii) Quando se deseja que o tamanho das peças sejam manejáveis para efeitos de transporte e/ou montagem;
- iii) Quando se conectam peças metálicas a elementos de materiais distintos tal como as bases dos pilares aos núcleos de concreto.

2.2.1 Rigidez

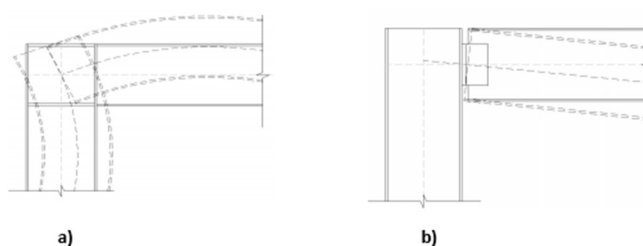
Primordialmente, de acordo com Alvarenga (2010), as ligações entre vigas e colunas eram feitas com o uso de rebites sem que houvesse maiores preocupações a não ser com sua resistência e boa execução. Porém, mais tarde, alguns pesquisadores não só se dispuseram a medir e avaliar o comportamento dessas peças como também determinaram padrões afim de auxiliar no dimensionamento sendo os primeiros registros datados do início do século XX. Estes estudos mostraram que o comportamento das ligações não pode ser considerado apenas como linear.

Segundo Vilela (2016), a maneira mais comum para a representação do comportamento de uma peça de ligação é por meio da relação estabelecida entre a rotação e o momento fletor que atua sobre ela. Dessa forma, é possível estimar com melhor precisão as reações desenvolvidas pelos esforços aplicados quando da análise global da estrutura.

Para Marcon e Praiva (2012), a rigidez afeta diretamente as respostas de uma estrutura às ações solicitantes uma vez que, em maior ou menor escala, este fator tem capacidade de impedir a rotação local das peças conectadas. Tem-se então que

as ligações deverão estar concebidas e dimensionadas de forma apropriada sob pena do comportamento, nomeadamente caracterizado pelas rotações e deslocamentos, destoarem daqueles desejados. Para tanto, no caso de locais onde sejam previstas ligações mais rígidas, deve-se prever mecanismos e detalhes que impeçam esses indesejáveis movimentos.

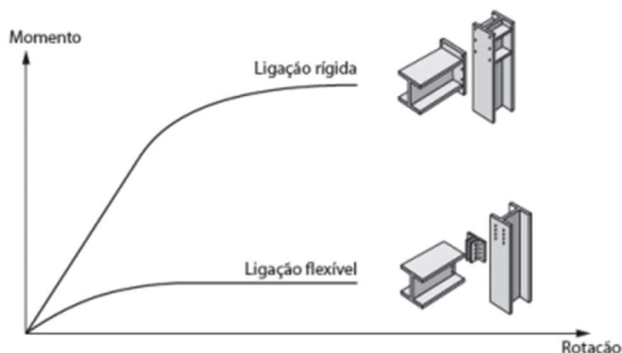
Figura 3- Comportamento de uma ligação a) Rígida e b) Flexível



Fonte: Adaptado de Marcon e Paiva (2012).

Nos conceitos de Silva (2012), uma conexão é modelada como flexível quando se tem uma articulação e como rígida quando há um engastamento. No caso desta, ao se aplicar um momento fletor, a ligação impede a rotação, isto é, o ângulo de giro entre as partes ligadas é zero. Nas ligações flexíveis o contrário é observado, ou seja, este mesmo ângulo seria infinito e, portanto, a rotação é livre. Ressalta-se que na prática essas condições são inconcebíveis e, para os casos mencionados, recorre-se às análises experimentais que ajudam a definir o grau de rigidez das ligações. A Figura 4 generaliza o comportamento de tais juntas.

Figura 4- Comportamento genérico das ligações



Fonte: Silva (2012).

Para a melhor compreensão dos fundamentos analisados até aqui, utiliza-se as definições produzidas por Silva (2016) que, no contexto dos pórticos, descreve o funcionamento das juntas para uma estrutura sujeita a uma carga uniformemente

distribuída. Cabe ressaltar que os pórticos, em geral, exprimem o comportamento idealizado da ligação viga-coluna. A Tabela 4 reúne as informações descritas quanto a este funcionamento.

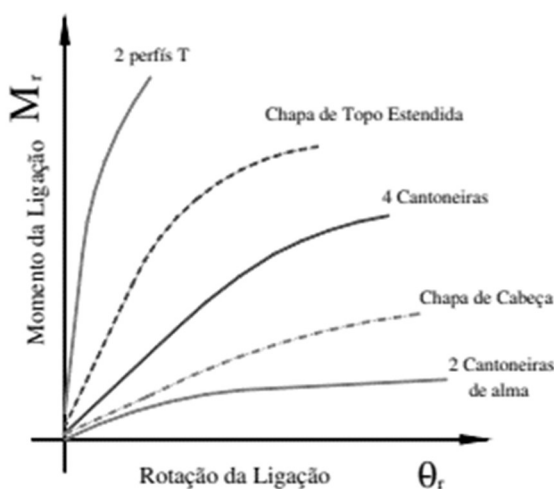
Tabela 4-Comportamento esperado das juntas

Tipo de conexão	Comportamento esperado
Pórtico com ligações flexíveis	Não transfere momento às colunas; Apresenta os maiores momentos e deslocamentos comparados aos outros tipos de ligação.
Pórtico com ligações semirrígidas	Transfere momentos parciais às colunas; Apresenta menores momentos e deslocamentos em relação as juntas flexíveis.
Pórtico com ligações rígidas	Transfere mais momentos às colunas; Apresenta os menores momentos e deformações do que os outros tipos de conexão.

Fonte: Adaptado de Silva (2012).

O comportamento mais difícil de se prever é o das conexões semirrígidas, pois possuem características intermediárias entre àquelas previstas nas ligações rígidas e nas flexíveis. Todavia Valenciani (1997), afirma que a maioria das conexões se enquadram justamente nos critérios de semirrígidez. Segundo ele, nos dias atuais, a utilização desse tipo de junta só se tornou viável com o desenvolvimento tecnológico de computadores e softwares uma vez que antes disso havia grande complexidade para se obter uma avaliação aceitável da relação entre a rotação e momento aplicados à peça.

Alvarenga (2010), também destaca que existem várias formas de se determinar a rigidez de uma ligação com por exemplo pelos modelos matemáticos que adotam expressões básicas, os analíticos e os conjugados que unem os dois anteriores. Neste último, a curva pode ser ajustada pelos dados das expressões analíticas ou pelo emprego de modelos de simulação computacional. Na Figura 5 é apresentada a classificação para alguns tipos de ligações.

Figura 5- Diagramas de momento-rotação

Fonte: Alvarenga (2010).

Mesmo que este trabalho não avalie diretamente os conceitos acerca da rigidez das ligações metálicas, os conceitos apresentados até esta altura são elementares para a compreensão de como o tipo de junta e, evidentemente, suas características podem afetar o comportamento das estruturas atentando para as possíveis imprevisibilidades que se possam produzir.

2.3 Tipos de ligação

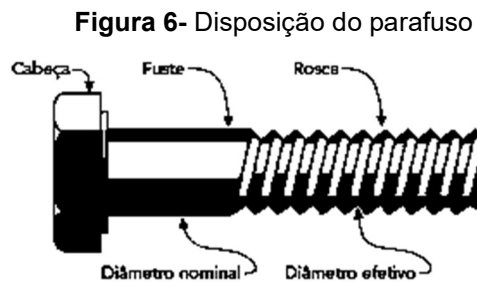
Sales, Malite e Gonçalves (1994), dizem que existem basicamente dois tipos de conexões metálicas bem difundidos: os parafusos e as soldas elétricas. Ainda ressaltam que até os anos 50 era comum o emprego de rebites nas juntas, porém o bom comportamento estrutural que estas propiciavam não compensava os altos custos (comparados aos parafusos e às soldas) sendo abandonados desde então.

Valenciani (1997), afirma que as ligações em estruturas metálicas são constituídas de dois tipos de componentes: os elementos de ligação e os dispositivos de ligação. Os primeiros constituem-se de elementos que facilitam e permitem a transmissão dos esforços tais como placas de base, cantoneiras, chapas de nó, entre outros. Já o segundo tipo é definido como peças que propiciam a ligação como barras rosqueadas, parafusos, rebites e as próprias soldas.

Para o cálculo dos elementos supramencionados, Vasconcellos (2011) diz haver modelos teóricos clássicos que são amplamente difundidos na prática fornecendo resultados admitidos como razoáveis.

2.3.1 Ligações aparafusadas

Silva (2012), afirma que os parafusos são constituídos de cabeça, fuste e rosca. A identificação deste conector dá-se pelo diâmetro nominal (fuste), porém a resistência à tração do parafuso é em função do diâmetro da rosca ou diâmetro efetivo. Esta área equivale aproximadamente 75% da área nominal. A Figura 6 auxilia na compreensão dessas nomenclaturas.



Fonte: Silva (2012).

2.3.1.1 Vantagens e desvantagens

Sabe-se que ao escolher um modelo de ligação metálica, este não deve apenas atender aos critérios de segurança e resistência, mas também a uma série de outros fatores relevantes a sua produção e instalação. Tais questões, em um contexto global, podem interferir na escolha dos conectores como solução a uma junta. Dessa forma, o projetista deve atentar-se às vantagens que as ligações parafusadas podem fornecer quando comparados às demais opções bem como os desafios que poderão ser apresentados. Sandoval e Hernández (2017), compilam na Tabela 5 as principais vantagens e desvantagens de uma conexão aparafusada.

Tabela 5-Principais vantagens e desvantagens de conexões parafusadas

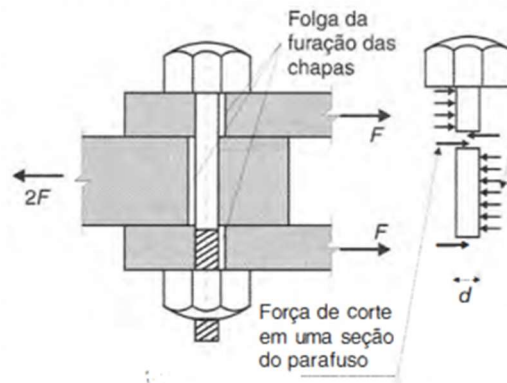
Vantagens	Desvantagens
Tempo de execução menor;	Não são ligações herméticas;
Mão-de-obra menos especializada;	Podem se enfraquecer quando submetidas a carregamentos dinâmicos, vibrações e mudanças de temperatura;
Não muda nem interfere no tratamento térmico das peças unidas;	Geralmente apresentam corrosão na porca ou na cabeça do conector.
Facilidade de unir materiais diferentes com distintos tipos de fabricação;	
A execução dessas conexões pode se realizar em condições atmosféricas adversas.	

Fonte: Adaptado de Sandoval e Hernández (2017).

2.3.2 Mecanismos de transmissão de esforços

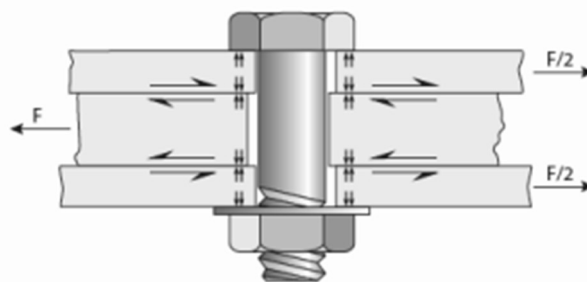
Em tese, os parafusos podem estar sujeitos a esforços simultâneos que dependem do funcionamento da ligação, isto é, se serão do tipo apoio (ou contato) ou do tipo atrito.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), as ligações de contato são efetuadas com parafusos comuns. Neste caso, quando da sua instalação, até existe uma força de aperto que provoca atrito entre as chapas, todavia esta força é muito variável desprezando-se então sua contribuição e os parafusos acabam sendo calculados de forma análoga aos rebites, ou seja, através das tensões de corte. Dessa forma, considera-se que a transmissão ocorre por apoio das chapas no fuste do parafuso e por esforço de corte na sua seção transversal. Para efeito de cálculo, supõe-se que estas tensões sejam consideradas uniformes. A Figura 7 auxilia na compreensão desses conceitos.

Figura 7- Esquema de ligação do Tipo contato

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

Já o Instituto Brasileiro de Siderurgia (2004), diz que as ligações de atrito são executadas com parafusos protendidos de alta resistência. Dessa maneira, as superfícies de contato ficam firmemente pressionadas umas às outras por meio dos cones de pressão. Os esforços de cisalhamento provenientes dessas ligações são transmitidos pelo atrito devido à pressão entre as partes ligadas, porém a transmissão por contato não pode ser negligenciada para as situações de E.L.U. A Figura 8 ilustra o comportamento desse modelo. É importante salientar que as superfícies em contato devem ser livres impurezas, ferrugem, carepas de laminação e não podem ser pintadas. A aplicação de agentes anticorrosivos deve atender aos critérios normativos adotados em projeto.

Figura 8- Ligação por atrito

Fonte: Silva (2012).

Em complemento, tem-se que as ligações por contato são geralmente indicadas para peças sujeitas a carregamentos estáticos no qual um provável deslocamento não afete os parafusos tampouco o comportamento da estrutura. Nos

casos em que existam carregamentos dinâmicos e onde os deslizamentos afetem o comportamento estrutural previsto, recomenda-se a utilização de ligação por atrito.

2.3.2.1 *Tipos de parafusos*

Bragança (2005), distingue os parafusos em três categorias:

- Comuns: são fabricados em aço carbono e designados como A307. Aplica-se em pequenas treliças, passadiços, terças, plataformas simples e outras estruturas leves. Possuem baixo custo sob pena de serem menos resistentes;
- Alta resistência-Por atrito: podem ser classificados como A325-F ou A490-F (a letra “F” indica o termo inglês “*friction*” que significa “atrito”). Para este tipo de ligação é indispensável haver proteção no parafuso uma vez que a chapas conectadas devem exercer grande força de atrito entre si para impedir o deslocamento relativo;
- Alta resistência-Por contato: subdividem-se em outras duas categorias:
 - A325-N e A490-N (o “N” refere-se a palavra “normal”). Neste caso a rosca dos conectores se encontra no plano de corte. Devido ao fato de que a área nesta região é menor que a área do corpo, a sua resistência será diminuída.
 - A325-X e A490-X (o “X” provém da palavra “eXcluded”). Diferentemente do caso anterior, a rosca do parafuso se encontra fora do plano de cisalhamento.

Dessa maneira, propõe-se a Tabela 6 que auxilia nos parâmetros de dimensionamento dos tipos de parafusos mencionados indicando algumas importantes singularidades a se levar em conta durante essa etapa.

Tabela 6-Parâmetros do parafuso

Tipo de parafuso	Φ_v	A_e	f_{ub} (Mpa)
A307	0,60	0,7 A_p	415
A325-N	0,65	0,7 A_p	12,7 $\leq d \leq 25,4$ - 825 25,4 $< d \leq 38,1$ - 725
A325-X	0,65	A_p	
A490-N	0,65	0,7 A_p	12,7 $\leq d \leq 25,4$ - 1035 25,4 $< d \leq 38,1$ - 1035
A490-X	0,65	A_p	

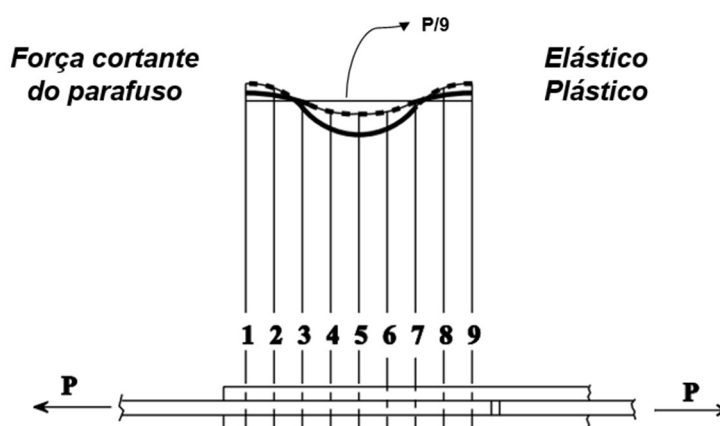
Fonte: Adaptado de Bragança (2005).

2.3.2.2 *Distribuição dos esforços*

Sales, Malite e Gonçalves (1994), dizem que em uma ligação composta de diversos parafusos é intuitivo admitir que a força em cada conector ocorra forma igualitária, distribuída e uniforme. Porém ressalta que essa distribuição é estatisticamente indeterminada, pois depende, por exemplo, da folga entre o parafuso e o furo.

Em adição, ITEA (2014), relata que a distribuição da carga entre os parafusos também depende do comprimento do conector, das áreas da seção transversal referentes às placas unidas, da capacidade de deformação por pressão de apoio dos parafusos e às distancias que mantêm entre si. Durante o regime elástico, como mostra a Figura 9, as cargas transferidas aos parafusos exteriores são maiores do que as recebidas aos que se situam próximos do centro da união.

Figura 9-Distribuição das forças entre conectores



Fonte: Adaptado de ITEA (2014)

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), quando as deformações atingem o regime plástico os esforços adicionais, que ficam concentrados nos parafusos mais externos, acabam sendo transmitidos para aqueles mais intermediários resultando, pois, em uma distribuição mais próxima daquela idealizada. No entanto alertam que se a ligação for longa, poderá ocorrer a ruptura dos parafusos mais próximos das bordas antes que seja alcançada essa uniformidade de tensões.

Na seção 6.3.8 da ABNT NBR 8800 (2008), é indicado que no caso de ligações por contato usadas em emendas de barras tracionadas, que possuam comprimento maior do que 1270mm na direção da força, os esforços de cisalhamento e a força de pressão de contato nos furos devem ser multiplicadas pelo fator de 1,25 a fim de compensar a distribuição desigual das tensões nos conectores.

2.3.2.3 *Modos de falha nos parafusos.*

Tratando-se de ligações do tipo conector, Valenciani (1997), reitera que a falha pode se dar no parafuso ou no metal base. Evidentemente que os modos de falha dependem, em geral, do diâmetro e comprimento do parafuso, da largura e espessura do metal base, da distância entre as linhas de furo e também das distâncias que mantêm em relação à borda.

Moyano (2019), propõem cinco tipos de falha conforme apresentado no Tabela 7 bem como na Figura 10.

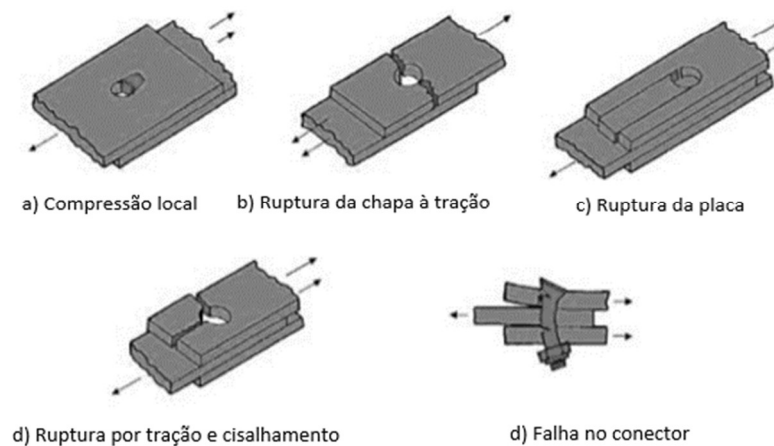
Tabela 7-Tipos de falhas nos conectores

Falha	Descrição
Compressão local:	A concentração de esforços próximas ao furo é tanto maior quanto menor for a área de furação. A causa principal desse tipo de ruptura é a tensão de compressão para uma alta relação entre a espessura da placa e o diâmetro do parafuso
Ruptura da chapa à tração:	Acontece de maneira catastrófica apresentando uma queda abrupta de tensão. A ruptura se dá devido às tensões tangencial e de compressão no parafuso sujeito a uma carga uniaxial.
Ruptura da placa à força cortante	Produz-se uma falha de rasgamento na chapa nos planos de cisalhamento da peça na direção da carga. Sua causa é a tensão gerada entre o fuste do parafuso e a placa cuja distância à borda livre é pequena;
Ruptura por tração e cisalhamento	Esta falha se produz quando a espessura e a distância à borda livre em relação ao diâmetro do conector são baixas.
Falha no conector	Este tipo de falha está associado a uma baixa rigidez do conector, uma vez que é provocada por uma combinação de esforços.

Fonte: adaptado de Moyano (2019).

Contudo, além dos tipos de falhas mencionados, não se pode descartar as falhas ocasionadas pela repetição de ciclo de carregamento e descarregamento, denominadas por fadiga, que esgotam as peças ao longo do tempo. Rodas e Pineda (2018), afirmam que a fadiga é o dano mais comum em peças de engenharia podendo representar cerca de 80% dos casos de falhas estruturais mesmo quando os elementos forem dimensionados para suportar intensidades de cargas acima daquelas previstas.

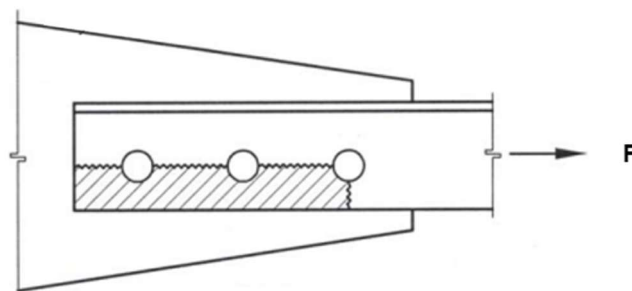
Figura 10-Metodos de falha em ligações do tipo conector



Fonte: Adaptado de Moyano (2019).

Salinas (2006), em complemento, diz que para certas configurações de conexões, um segmento ou “bloco” do material pode estar sujeito ao efeito de rasgamento. Nestes casos há a necessidade da verificação adicional do estado de cisalhamento de bloco ao longo da seção longitudinal da peça. A Figura 11 tenta ilustrar este efeito.

Figura 11-Cisalhamento de bloco



Fonte: Adaptado de Salinas (2006).

2.3.3 Ligações soldadas

McComarc e Csernak (2013), afirmam que a solda é um processo em que se unem partes metálicas mediante o aquecimento de suas superfícies a um estado plástico ou fluido que permite a estas fluírem e se unirem. A origem das conexões soldadas é incerta, mas há indícios de que o processo de soldagem tenha se iniciado

ainda na Grécia Antiga uma vez que a arte de se trabalhar metais era muito comum à época.

Além disso, os autores ressaltam que a adoção das soldas foi um processo muito lento durante décadas, pois os engenheiros acreditavam que haveria muitas desvantagens em seu emprego tais como pouca resistência à fadiga e dificuldades de se garantir uma boa qualidade de fabricação. Todavia, nos dias atuais, a maioria deles já aceita que as soldas resistem bem à fadiga. As normas técnicas, processos de solda melhorados e o avanço da capacitação dos operadores junto ao fato de que boa parte dos aços fabricados possuem propriedades químicas específicas que facilitam a soldabilidade, puderam garantir através dos anos maior segurança para o seu uso.

2.3.3.1 Processos de soldagem

Pfeil e Pfeil (2009), afirmam que umas das soldas mais empregadas na construção civil e a de energia elétrica. Com a alta temperatura emitida por um arco voltaico dá-se a fusão parcial do metal base. Após o resfriamento, o metal base e o eletrodo tornam-se um único elemento.

Entre os diversos métodos para a realização das soldaduras, Sales, Malite e Gonçalves (1994), garantem que a soldagem com eletrodo revestido é o processo mais usado devido à simplicidade de equipamentos, da resistência e do baixo custo. Nele o metal base é unido por meio de eletrodos revestidos que se consomem durante o processo. Assim, o material fundido do eletrodo transfere-se a uma poça de fusão do metal base onde se deposita. A proteção dos eletrodos e as impurezas do metal formam uma escória que flutua à superfície não só cobrindo e protegendo o depósito da contaminação atmosférica, mas também regulando a taxa de resfriamento.

2.3.3.2 Vantagens e desvantagens

Tal e qual às ligações parafusadas, as conexões soldadas possuem inúmeras características e singularidades que lhes proporcionam comodidades ou complexidades quando da sua aplicação. Cabe ao responsável eleger a melhor escolha a fim de viabilizar os custos da estrutura mantendo sua qualidade. Sandoval e Hernández (2017) detalham as principais vantagens e desvantagens no emprego de ligações soldadas conforme posto na Tabela 8.

Tabela 8-Principais vantagens e desvantagens de conexões soldadas

Vantagens	Desvantagens
Reduzem o peso da estrutura consideravelmente quando comparada às ligações parafusadas;	As conexões soldadas exigem um rigoroso controle de qualidade sobretudo às realizadas in loco;
Há maior rigidez estrutural uma vez que os elementos se conectam diretamente uns aos outros;	O resfriamento das peças soldadas produz esforços residuais que modificam o comportamento estrutural das peças.
O processo de fusão faz com que as estruturas sejam contínuas e, assim, proporcionam maior flexibilidade no dimensionamento;	Devido as peças serem unidas por fusão, em caso de haver o desmonte da estrutura, este se dará de forma mais complexa e lenta do que seria com conexões parafusadas.
Em caso de as soldas realizarem-se em fábricas especializadas garante-se maior controle de qualidade.	

Fonte: Adaptado de Sandoval e Hernández (2017).

2.3.3.3 Eletrodos

Um eletrodo segundo Rosário (2020), é uma vareta ou arame que se consome ou não durante o processo de soldagem movendo-se ao longo da junta de forma manual ou mecânica ou mesmo que permanece fixo enquanto as peças soldadas se movem. Os eletrodos são usualmente revestidos de materiais orgânicos e inorgânicos ou pela combinação deles que são convenientemente selecionados e aprovados pelos fabricantes que mantêm seu processo de fabricação e dosagens em sigilo. O arco elétrico se caracteriza por uma alta e constante temperatura situando-se em torno de 6000°C.

Pfeil e Pfeil (2009), relatam que os principais tipos de eletrodos empregados na indústria são o E60 (415 Mpa) e o E70 (485Mpa). Os autores ainda esclarecem que os eletrodos revestidos são designados dessa forma segundo os critérios da ASTM por nomenclaturas como E70XY, onde:

- E: Eletrodo;
- 70: resistência à ruptura (f_w) da solda em ksi;
- X: número referente à posição de soldagem (1-qualquer posição; 2-somente na horizontal);

- Y: número que indica o tipo da corrente e revestimento do eletrodo.

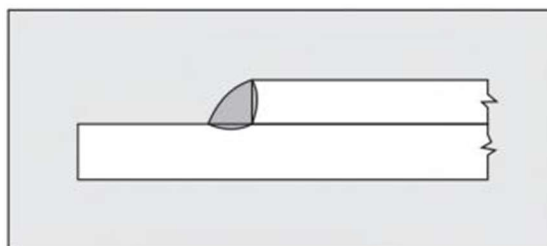
2.3.3.4 Tipos de solda

Uma solda, quando bem executada, deve apresentar boa qualidade para resistir com folga aos esforços que lhe são aplicados. A maioria dos processos é feito manualmente por meio de operadores qualificados, sempre evitando-se as soldas de campo, pois pode haver maior dificuldade em garantir a qualidade final do produto. Em função disso, é natural pensar que o processo de soldagem se dê de formas distintas cada qual destinada às especificações de projeto e execução. Em geral, existem três tipos distintos de soldaduras: as de filete, as de entalhe e as de tampão. ITEA (2014), relata que aproximadamente 80% das soldas dão-se por meio de filetes, 15% são de entalhes e 5% são de tampões e por pontos. A descrição desses tipos de solda está clarificada nas seções a seguir:

a) Solda de filete:

É uma solda de seção transversal aproximadamente triangular que se aplica no perfil das superfícies da chapa. Esta solda é mais viável economicamente que as demais já que se exclui a necessidade de chanfro ou qualquer outra interferência geométrica. Além disso podem ser feitas em chapas sobrepostas, ortogonais e não ortogonais. Em termos de cálculo, considera-se a solda em filetes como um triângulo retângulo. Seu processo é tanto mais eficiente quanto menor for o número de passagens de solda aplicadas. Em casos onde se necessitem de várias passagens alguns cuidados devem ser tomados. A Figura 12 exemplifica este tipo de conexão.

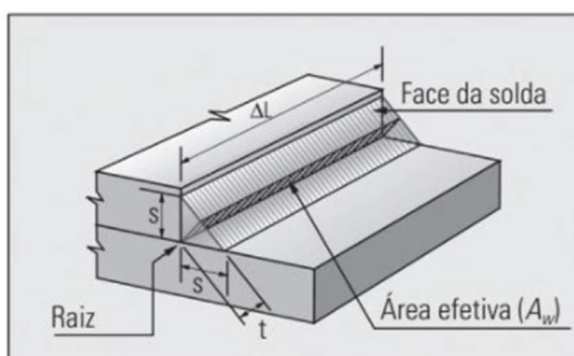
Figura 12-Solda de filete



Fonte: Bragança (2005).

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), os filetes são designados pelos comprimentos de seus lados geralmente iguais exceto em casos muito específicos. O menor lado da seção de uma solda de filete denomina-se perna e é representado pela letra “b”. Diz-se que a espessura “t” chamada de garganta é aquela responsável por absorver efetivamente os esforços de cisalhamento que ocorrem no interior da solda. Além disso, a região que intersecciona as faces de fusão recebe o nome de raiz sendo representado pela letra “o”. Dessa forma, a área efetiva de uma solda de filete dar-se-á pelo produto da dimensão da garganta vezes o comprimento total do cordão. Estes conceitos melhores podem ser observados na Figura 13.

Figura 13-Elementos geométrico da solda de filete



Fonte: Fonte: Bragança (2005).

O Eurocódigo 3 (2010), limita o uso de soldas de filete para peças em que o ângulo das superfícies de fusão fique compreendido entre 60° e 120°. Para ângulos menores a norma europeia recomenda que seja considerado uma soldagem de topo com penetração parcial; para maiores deve-se fazer ensaios que comprovem sua eficiência.

A norma ABNT NBR 8800 (2008), estabelece dimensões mínimas para as soldas de filete tendo como premissa a parte soldada menos espessa conforme indicado pela Tabela 9.

Tabela 9-Dimensões mínimas da solda

Menor espessura do metal base na junta (mm)	Tamanho mínimo da perna da solda de filete d^a (mm)
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19	8

^a executadas somente com um passe

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008).

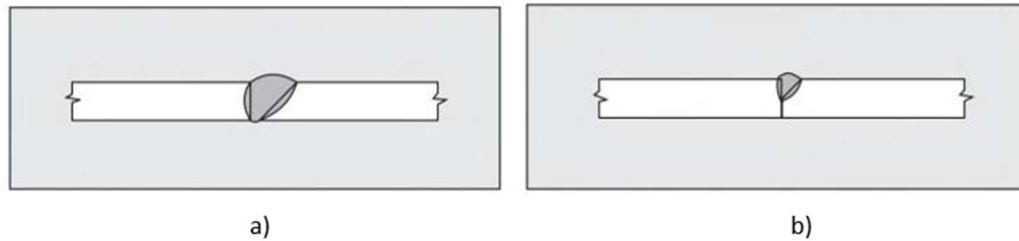
Em complemento, a norma brasileira indica também os valores máximos admissíveis. Segundo o documento, para materiais com espessura inferior a 6,35mm a perna da solda não poderá ultrapassar este mesmo valor. Em caso de a espessura superar 6,35mm, o tamanho máximo será admitido como a espessura do próprio material subtraída de 1,5mm.

Outro aspecto importante é o comprimento dos cordões de solda que, em nenhuma hipótese, poderá ser 4 vezes inferior o tamanho da perna ou 40 mm. Ressalta-se que cordões muito extensos ($L > 100b$) devem ter seu comprimento de cálculo multiplicado por um fator $\beta = 1,2 - 0,002 L/d$ a fim de amenizar os efeitos devido a não uniformidade das tensões da solda;

b) Solda de entalhe

Esta soldagem é feita por meio de chanfro entre as peças ligadas preenchendo-o com metal de adição. Uma solda de entalhe pode ser do tipo penetração total, isto é, quando há uma penetração completa e fusão da solda com o metal base ao longo de toda a espessura da união, ou simplesmente por penetração parcial em que a penetração da soldagem é inferior a espessura do material conforme demonstrado na Figura 14.

Figura 14-Solda de entalhe a) penetração total; b) penetração total

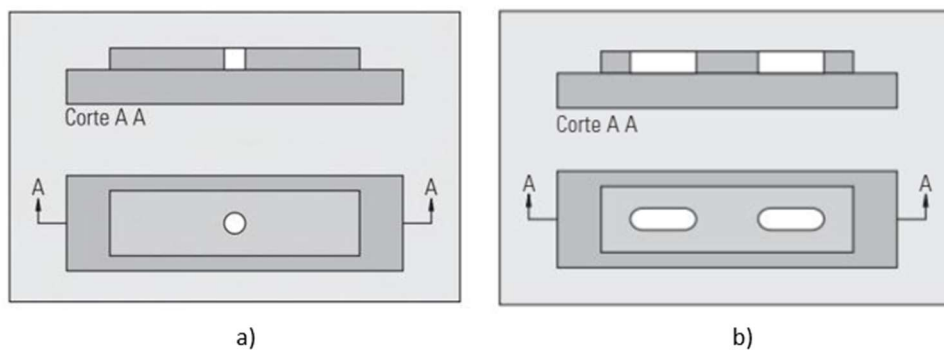


Fonte: Adaptado de Bragança (2005).

c) Solda de tampão

As soldas tampão transmitem forças paralelas às superfícies de contato por superposição ou para evitar a separação de peças sobrepostas. Em geral, nessas soldas, furos e rasgos produzidos no material base recebem o material de soldagem. Uma de suas funções também é prevenir a flambagem. A Figura 15 indica sua representação.

Figura 15-Solda de tampão a) Furo e b) Rasgo



Fonte: Bragança (2005).

2.3.3.5 Resistência

É muito intuitivo observar que cada tipo de solda tem características diferentes e cada uma pode adaptar-se melhor a algum tipo de aplicação específica. Consequentemente a essas considerações, os modelos de dimensionamento para as soldas de filete, entalhe e tampão também possuem variações entre si, pois levam em conta a premissa dos seus próprios mecanismos de atuação e comportamento estrutural que desempenham. A norma brasileira determina a resistência por meio das formulações dispostas na Tabela 10.

Tabela 10-Força resistente de cálculo das soldas (continua)

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Força resistente de cálculo $F_{w,Rd}$
Penetração total	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	Metal-base: $A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^1$
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	Metal-base: $0,60A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^1$
Penetração parcial	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	O menor dos dois valores: a) Metal-base: $A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^1$ b) Metal da solda: $0,60A_{wf}f_w/\gamma_{w1}^2$
	Cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5.4 Metal da solda: $0,60 A_{wf}f_w/\gamma_{w2}^3$
Filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Cisalhamento na seção efetiva (a solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas)	Metal-base deve atender a 6.5.4 Metal da solda: $0,60 A_{wf}f_w/\gamma_{w2}^3$

Tabela 10- Força resistente de cálculo das soldas (continuação)

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Força resistente de cálculo $F_{w,Rd}$
Tampão em furos ou rasgos	Cisalhamento paralelo às superfícies em contato, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.54 Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_w^{23}$

¹O valor de γ_{a1} é igual a 1,10 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,00 para combinações excepcionais;

²O valor de γ_{w1} é igual a 1,25 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,05 para combinações excepcionais;

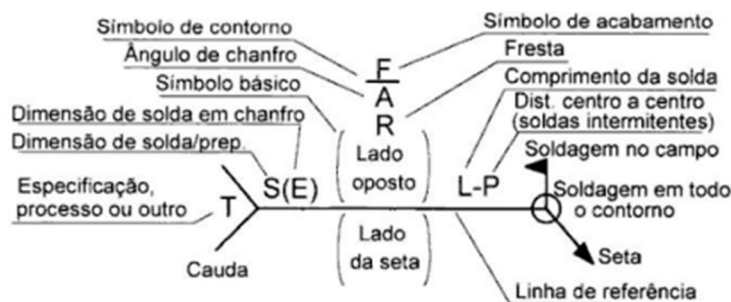
³O valor de γ_{w2} é igual a 1,35 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,15 para combinações excepcionais;

⁴A seção 6.5 dispõe dos estados limite de elementos de ligação tracionados.

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008).

2.3.3.6 Simbologia

Marques, Modenesi e Bracarense (2009) definem a simbologia de soldas como um conjunto de símbolos, sinais e números dispostos de forma específica fornecendo informações indispensáveis para a operação de soldagem como geometria das juntas, dimensões, ângulo de chanfro, abertura da raiz, entre outras. As simbologias são utilizadas como forma de economizar espaços nos desenhos fornecendo-lhes dados tão específicos quanto se poderiam obter em longas descrições escritas. Segundo Pfeil e Pfeil (2009), as simbologias presentes na norma brasileira são baseadas nas normas americanas da American Welding Society (AWS). Em geral, a simbologia de solda é composta de alguns elementos básicos como linha horizontal de referência, seta e símbolos complementares além das indicações dimensões. A Figura 16 ilustra alguns desses elementos.

Figura 16-Localização dos símbolos na representação normativa

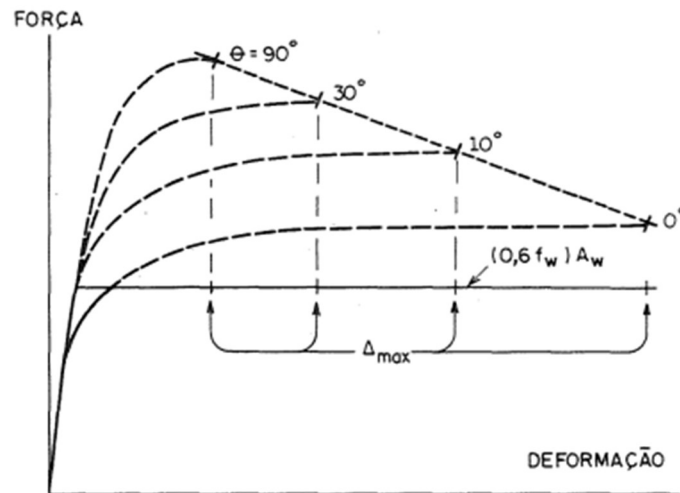
Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009).

Deve-se atentar que as duas principais referências de uma simbologia de soldagem são a linha horizontal e a seta e, a partir delas, é que o projetista se baseará para a correta representação, por exemplo, de qual lado deverá receber a aplicação de solda e com qual tipo se realizará o serviço. Ressalta-se ainda que em casos mais específicos, deve-se fazer uso de simbologias suplementares para garantir a total compreensão do executor e evitar falhas futuras. Descrever todas as simbologias de solda e suas minuciosidades não seria uma tarefa difícil, porém extensa que destoaria dos propósitos deste trabalho. Dessa forma este tópico apenas descreveu os aspectos mais básicos para auxiliar na compreensão das figuras que serão posteriormente apresentadas.

2.3.3.7 Distribuição de tensões nas soldas

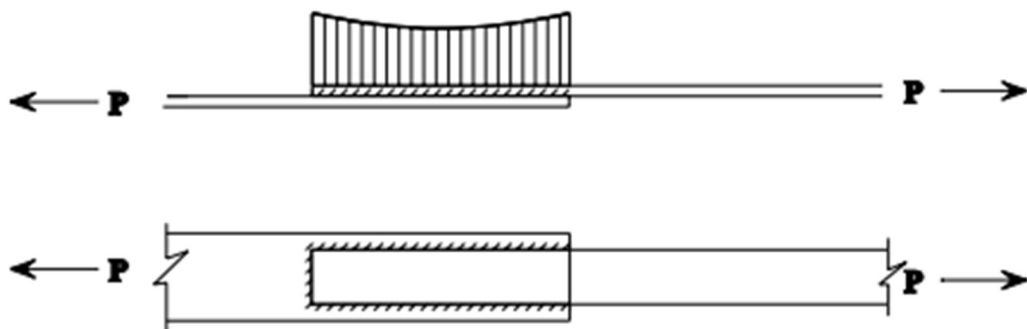
Para sales, Malite e Gonçalves (1994), as tensões nos cordões de solda dão-se de maneira complexa e não uniforme. Os autores relatam que a posição das soldas em relação à força aplicada é elementar para definir seu comportamento, isto é, se os cordões forem paralelos aos esforços ($\theta=0^\circ$) é muito provável que estes apresentem menor resistência e maior ductibilidade, ao passo que as soldas perpendiculares às cargas tenderão ao contrário. A Figura 17 descreve a deformação dos cordões de solda levando-se em conta o ângulo que fazem com a força aplicada.

É comum, todavia, na prática, adotar uma distribuição uniforme de tensões nas soldaduras como hipótese de cálculo desconsiderando seu posicionamento como fator relevante à obtenção de sua capacidade resistente. Esta hipótese pode ser tomada como aceitável, uma vez que próximo do estado de ruptura essas premissas se tornam verossímeis.

Figura 17-Distribuição de tensões nos cordões de solda

Fonte: Sales, Malite e Gonçalves (1994).

ITEA (2014), comenta que a distribuição dessas tensões assim como nas ligações aparafusadas ou rebitadas, é maior nos extremos das soldas. Porém, o instituto também reitera que no E.L.U as deformações no estado plástico contribuem para a melhor distribuição dos esforços ao longo dos cordões. Essa diferença de distribuição de tensões está relacionada com a rigidez da ligação, isto é, ligações mais longas amplificam a desuniformidade de tensões. Além disso, a deformação nos cordões será tanto menor quanto maior for a espessura da solda. A Figura 18 exemplifica o funcionamento da soldadura quanto suas tensões.

Figura 18-Distribuição real das tensões em soldas longas

Fonte: ITEA (2014).

2.4 Mecanismos de solicitação em conexões

2.4.1 Ligação parafusada axial por cisalhamento

Neste caso os esforços são transmitidos unicamente por meio da força cortante. O contato entre as paredes do furo da placa com as do conector é o responsável pela distribuição das tensões que, conforme visto, tende a solicitar os parafusos mais externos. As ligações são então dimensionadas levando-se em conta dois aspectos elementares: as falhas na chapa, em outras palavras, pela pressão de contato no furo e pelo seu rasgamento, e a ruptura do conector. A solicitação nesses elementos é proporcional a intensidade do carregamento e inversamente proporcional ao número de planos cisalhamento presentes na junta. Considerando as hipóteses de distribuição uniforme dos esforços conforme fora debatido nos tópicos anteriores, a força destinada a cada conector é dada pela equação (1).

$$F_p = \frac{P}{n} \quad (1)$$

Onde:

F_p =força cortante por parafuso;

P = força aplicada;

n = número de parafusos.

A resistência a cortante de cada conector dependerá basicamente da área de sua seção transversal e do material em que fora fabricado. A ABNT NBR 8800, sendo mais conservadora que as literaturas tradicionais, estipula as formulações para a obtenção da capacidade resistente dos conectores conforme disposto na equação (2) e (3). Ressalta-se que o valor de f_{ub} pode ser extraído da Tabela 6 e γ_{a2} pode ser tomado convenientemente como 1,35

- a) Para parafusos de alta resistência ou barras rosqueadas, quando o plano de cisalhamento passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (2)$$

- b) Para parafusos de alta resistência ou barras rosqueadas, quando o plano de cisalhamento não passa pela rosca:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (3)$$

Onde:

A_b = área da seção transversal do conector;

f_{ub} = tensão de ruptura do material;

γ_{a2} = coeficiente de ponderação

A força cortante em um conector é tanto menor quanto maior for o número de planos cisalhantes que passam pelo eixo de seu corpo. Dessa forma, não se pode desprezar que a área de sua seção transversal, quando do cálculo da resistência, deverá ser multiplicada por essa quantidade de planos. Este procedimento é equivalente ao de dividir a força aplicada a cada conector por esse mesmo número de seções.

Valenciani (1997), diz que as tensões de contato e rasgamento próximos à borda pode ser determinada de maneira simplificada definindo o ângulo θ das linhas de falha como zero e admitindo planos de ruptura paralelos à força. Porém é necessário ressaltar que a distribuição da pressão de contato ao redor do furo dá-se de modo bastante complexo admitindo-se então uma distribuição uniforme.

2.4.1.1 *Pressão de contato pela ABNT NBR 8800 (2008)*

As literaturas nacionais costumam usar como critério para a obtenção das tensões de rasgamento e contato as disposições da ABNT NBR 8800. A norma distingue as equações para cada tipo de furo conforme vê-se abaixo:

- a) no caso de furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força:
- Quando a deformação no furo para as forças de serviço não for uma limitação de projeto:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,5 l_f t f_{ub}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{3,0 d_b t f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (4)$$

- Quando a deformação no furo para as forças de serviço for uma limitação de projeto:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 l_f t f_{ub}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,4 d_b t f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (5)$$

- b) No caso de furos muito alongados na direção perpendicular à da força:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,0 l_f t f_{ub}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,0 d_b t f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (6)$$

Onde:

l_f = é a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre;

d_b = é o diâmetro do parafuso;

t = é a espessura da parte ligada;

f_{ub} = é a resistência à ruptura do aço da parede do furo.

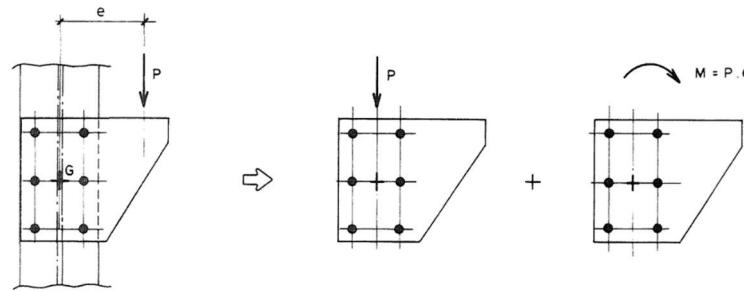
Pfeil e Pefeil (2009), dizem que a limitação da equação está relacionada a uma ovalização do furo a 6mm, mas ressaltam que caso as tensões de apoio sejam superiores a $2,4f_{ub}$ não necessariamente haverá colapso da ligação. Outro aspecto pertinente é que os valores obtidos com a equação (4) só podem ser tomados para fins de cálculo se a ovalização do furo for aceitável por exemplo nos casos em que as cargas permanentes sejam prevalentes e que as contraflechas possam ser executadas.

2.4.2 Ligação parafusada excêntrica por corte

O mecanismo de uma ligação excêntrica por corte partilha dos mesmos fundamentos de uma ligação parafusada axial por cisalhamento. A principal diferença é que a carga aplicada não passa pelo centro de gravidade do conjunto dos conectores. Isto é equivalente a dizer que, além do esforço cisalhante puro, também

existirá um momento fletor aplicado à peça que deve ser convertido em esforço cortante para que então as componentes das forças possam ser somadas vetorialmente a fim de se obter o esforço total. A Figura 19 exemplifica este tipo de conexão.

Figura 19-Grupo de parafusos sujeitos às cargas excêntricas: método vetorial



Fonte: Sales, Malite e Gonçalves (1994)

Em geral, nesses tipos de ligações é comum é prático usar o Método vetorial. Nesses casos, Bragança (2005), sugere uma simplificação do modelo admitindo que a chapa se constitui de um elemento indeformável e que os parafusos se comportem em regime elástico para que assim a deformação no conector seja proporcional ao centro de gravidade do conjunto sendo a força aplicada ortogonal ao raio do vetor.

A tensão de cisalhamento é admitida como igualmente distribuída e é dada pela equação (7). A força cortante está disposta na equação (8).

$$\tau'_1 = \tau'_2 = \tau'_3 = \tau'_n \quad (7)$$

$$F'_1 + F'_2 + F'_3 + \dots + F'_n = P \quad (8)$$

Onde:

τ' =tensão de cisalhamento primário;

F' = força cortante primária

Para momento fletor, a força de cisalhamento secundário nos conectores é dada pela equação (9) admitindo-se que as tensões no conector são inversamente proporcionais ao braço de alavanca desenvolvido conforme a equação (10). Para Pfeil e Pfeil (2009), essas formulações são análogas à flexão simples uma vez que as hipóteses adotadas são as mesmas.

$$F_1'' \cdot r_1 + F_2'' \cdot r_2 + F_3'' \cdot r_3 + \dots + F_n'' \cdot r_n = P \cdot e = M \quad (9)$$

$$\frac{\tau_1''}{r_1} = \frac{\tau_2''}{r_2} = \frac{\tau_3''}{r_3} = \frac{\tau_n''}{r_n} \quad (10)$$

Onde:

τ'' =tensão de cisalhamento secundário;

F'' = força de corte secundário.

Por fim a resultante final de esforços aplicados em um conector é dada pela soma vetorial apresentada equação (11). O método vetorial é um modelo rápido e simples, porém costuma apresentar resultados mais conservadores. Existem outros métodos mais acurados, mas que não serão aqui abordados em função deste estar, teoricamente, a favor da segurança.

$$F_n = \sqrt{F_{n_x}''^2 + \left(F_n' + F_{n_y}''\right)^2} \quad (11)$$

Onde:

F_{n_x}'' = componente x da força de cisalhamento secundário;

F_n' = força de cisalhamento primário;

F_{n_y}'' = componente y da força de cisalhamento secundário.

2.4.3 Conexões aparafusadas sujeitas à cortante e momento fletor

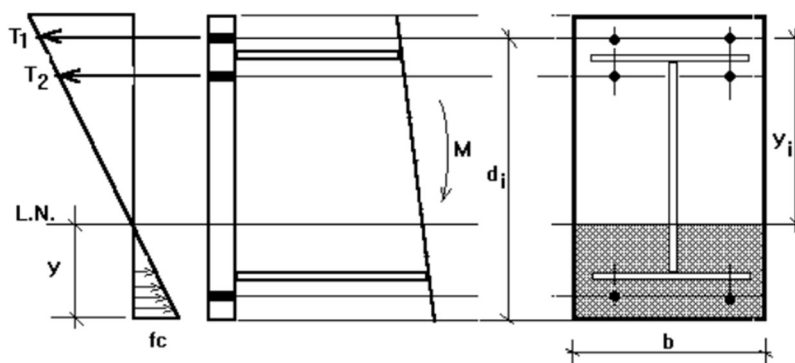
Usualmente essas ligações são compostas de chapas, cantoneiras ou similares as quais possuem uma série de furos para a alocação dos conectores que as interligarão a outras peças. Neste caso, a força excêntrica não age no plano de cisalhamento e gera, por isso, além da força cortante, um momento fletor. A diferença desse modelo para o de ligação excêntrica por corte é que, em vez do momento provocar forças de cisalhamento sobressalentes nos conectores, este esforço resultará em tração/compressão dos mesmos.

Valenciani (1997), dispõem de ao menos dois métodos para o cálculo das tensões normais nos parafusos. O primeiro é o Elástico tradicional adotado também pela literatura de Sales, Malite e Gonçalves (1994) e o segundo chamado de Método simplificado que se encontra disposto também no manual do Instituto Brasileiro de Siderurgia. A tensão de corte em cada conector, independentemente do método, é tomada como uniforme e respeita os conceitos já mencionados que validam a equação (1). A seguir apresenta-se o detalhamento dos dois métodos de cálculo citados acima.

2.4.3.1 Método elástico tradicional

Considerando-se uma análise elástica em conexões do tipo contato, admite-se que a distribuição de esforços se dá de maneira linear variando de acordo com a distância em relação ao eixo da linha neutra (L.N.) conforme mostra a Figura 20. Supõe-se, por não haver pressão de contato, que parte da chapa se comprime ao passo que outra se “descola” gerando os esforços de tração nos parafusos que estejam nesta área.

Figura 20-Esquema da conexão



Fonte: Valenciani (1997).

Dessa forma os parafusos localizados na região comprimida são dimensionados apenas para resistir aos esforços cisalhantes enquanto os seus pares da região tracionada ficam sujeitos as forças de corte e tração.

Levando-se em conta os conceitos da flexão simples, a posição da linha neutra pode ser determinada simplesmente igualando o momento estático da porção tracionada com o momento estático da região comprimida resultando na equação (12).

$$M_s^{sup} = M_s^{inf} \rightarrow \frac{by^2}{2} = \sum A_i(d_i - y) \quad (12)$$

Onde:

b= largura da chapa;

A_i= área dos parafusos tracionados situados a uma distância d_i;

y= linha neutra.

Dessa maneira, pode-se obter o esforço de tração nos respectivos parafusos devido a aplicação de momento fletor pela equação (13).

$$F_i = \frac{M}{I} (d_i - y) A_p \quad (13)$$

Onde:

M= momento fletor;

I= momento de inercia formado pela região comprimida e pelos parafusos tracionados;

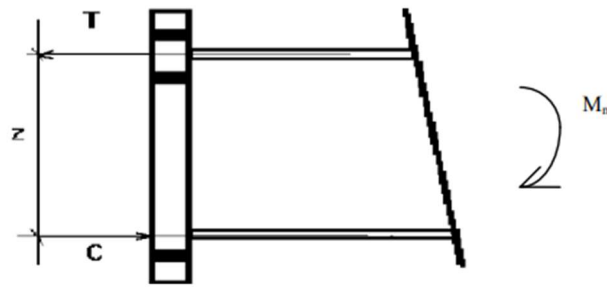
F_v= esforço cisalhante.

Após a resolução da equação de 2º grau para determinar a altura da linha neutra da seção, recorre-se ao cálculo do momento de inércia da seção apresentado na equação

$$I = \frac{by^3}{3} + \sum A_i y_i^2 \quad (14)$$

2.4.3.2 Método simplificado

Também é possível obter os esforços de tração nos parafusos por meio de uma formulação mais simplista. Neste caso, o modelo teórico admite que os esforços resultantes de compressão e tração têm como linha de ação os centros geométricos das mesas do perfil conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21-Mecanismo de ação

Fonte: Valenciani (1997).

A Força de tração gerada pela aplicação do momento é dada pela equação

$$T_r = \frac{M_n}{z} \quad (15)$$

Onde:

Tr= tração gerada pelo momento;

Z= distância entre os centros das mesas do perfil;

Mn= momento fletor nominal.

A partir daí, supõe-se que todos os parafusos da região tracionada fiquem sujeitos a forças de mesma intensidade conforme demonstrado pela equação (16).

$$T_n = \frac{T_r}{n} \quad (16)$$

Onde:

Tn= força de tração em cada conector;

Tr= tração gerada pelo momento;

n= número de conectores na região tracionada.

2.4.3.3 Efeito alavanca

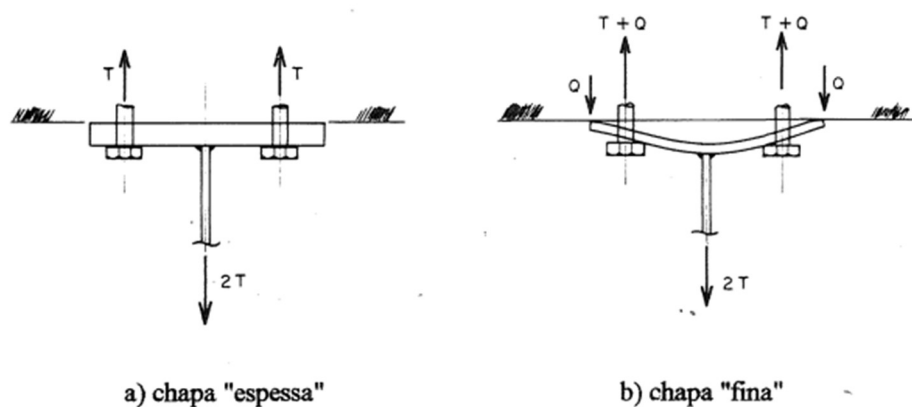
Silvério (2015), diz que nas ligações com parafusos tracionados, a restrição provocada às deformações laterais da placa provoca o surgimento de esforços adicionais nessas regiões. Este efeito é chamado de efeito de alavanca e faz com que, além dos carregamentos externos, os esforços complementares oriundos do fenômeno sejam também contabilizados para impedir que os parafusos falhem em

caso de se negligenciar este fator uma vez que suas tensões podem ser consideravelmente incrementadas por ele.

O efeito alavanca se dá uma vez que existe uma excentricidade entre a força aplicada e a linha de ação do parafuso. Quanto mais rígidas forem as peças em questão, sobretudo a chapa, mais desprezível será este efeito. Sales, Malite e Gonçalves (1994), comentam que a avaliação do efeito alavanca é complexa, tendo surgido nos últimos anos alguns modelos teóricos para sua determinação.

O Steel Design Guide 4 (2003), citando os trabalhos de Fleischman et al. (1990), relata que o acréscimo de tração nos parafusos devido aos efeitos de alavanca pode chegar à ordem de trinta por cento. A Figura 22 ilustra o mecanismo de funcionamento das forças de alavanca nos conectores. Ressalta-se que a norma brasileira para estruturas de aço a ABNT NBR 8800 (2008), não propõe uma metodologia específica para a avaliação desses efeitos, mas reitera que esses esforços podem ser considerados atendidos se, em uma análise plástica das espessuras das chapas, a força resistente à tração no parafuso for reduzida em 33% ou se em uma análise elástica dessas espessuras a resistência do conector seja diminuída em 25%.

Figura 22-Efeito alavanca em parafusos

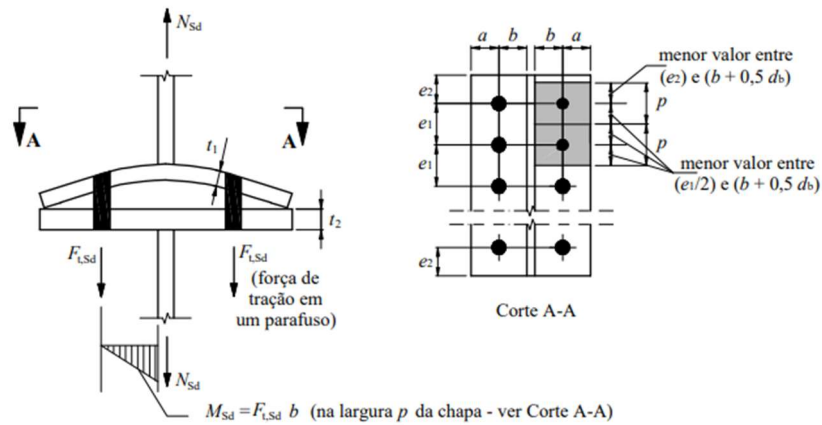


Fonte: Fonte: Sales, Malite e Gonçalves (1994).

Para o cálculo das forças provenientes do efeito de alavanca, utiliza-se as formulações expostas por Valenciani (1997) que dizem respeito às metodologias adotadas pela AISC que, segundo o referido autor, fornece resultados mais alinhados com aqueles obtido pelas análises experimentais. A Figura 23 dá ideia de alguns conceitos utilizados nas equações posteriores. Convém ressaltar que através dos

anos muitos outros procedimentos para a avaliação do efeito de alavanca foram desenvolvidos cada qual mais adequado a determinados tipos de condição.

Figura 23-Mecanismos de ação do efeito alavanca



Fonte: ABNT NBR 8800 (2008).

Os itens abaixo detêm as equações necessárias do modelo referido para o cálculo do efeito de alavanca e apresentam-se em ordem. Ressalta-se que as terminologias dispostas estão apresentadas na Figura 23 devendo-se consultá-la para a compreensão efetiva das formulações dispostas a seguir.

a) Distâncias de referência:

$$a' = a + d/2 \quad (17)$$

$$b' = b - d/2 \quad (18)$$

Onde:

d= diâmetro do furo.

b) Determinação de p1 e p2:

$$P_1 = \text{menor} \left\{ \begin{matrix} e_1/2 \\ b + d/2 \end{matrix} \right\} \quad (19)$$

$$P_2 = \text{menor} \left\{ \begin{array}{l} e_2/2 \\ b + d/2 \end{array} \right\} \quad (20)$$

c) Largura de contribuição:

$$P = \frac{2P_1 - \text{entre dois furos}}{P_1 + P_2 - \text{entre parafuso e borda}} \quad (21)$$

Onde:

F_p =força cortante por parafuso;

P = força aplicada;

n = número de parafusos.

d) Parâmetro geométrico:

$$\delta = \frac{P - d}{P} \quad (22)$$

e) Momento resistente de cálculo da chapa (plastificação):

$$M_1 = \frac{0,9(1,5 * p * t^2 * f_y)}{6} \quad (23)$$

Onde:

p = largura de contribuição;

t = espessura da chapa;

f_y = tensão de escoamento do aço.

f) Parâmetro α :

$$\alpha = \frac{Tb' - M_1}{\delta M_1} \quad (24)$$

Onde:

T = tração no parafuso

g) Classificação de α :

Se $\alpha > 1$ $\rightarrow M_2 > \delta M_1$, ou seja, a condição de resistência não é verificada;

Se $\alpha < 0$ $\rightarrow$ Não há efeito de alavanca, isto é, a hipótese adotada não se verificou;

Se $0 < \alpha < 1$ $\rightarrow$ a hipótese se verifica e a força Q deve ser calculada.

h) Efeito alavanca (Q):

$$Q = \frac{Tb' - M_1}{a'} \quad (25)$$

Onde:

T = tração no parafuso.

i) Esforço total no parafuso:

$$T_{total} = T + Q \quad (26)$$

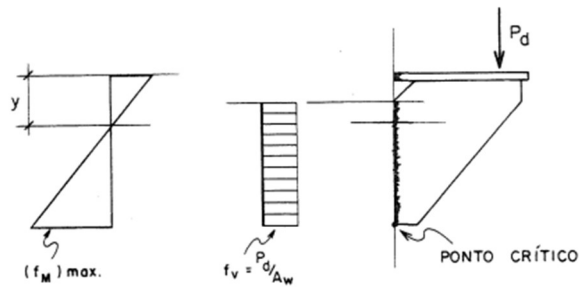
Onde:

T = tração no parafuso;

Q = esforço de alavanca.

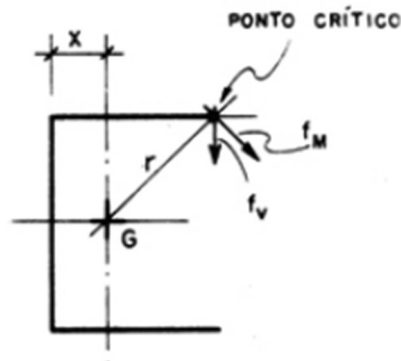
2.4.4 Ligação soldada excêntrica por corte

Os conceitos destinados ao cálculo de uma conexão soldada com carregamento excêntrico, não destoam daqueles abordados para os conectores na mesma condição. Admite-se que as solicitações atuantes nos cordões de solda sejam convertidas em esforço cortante na seção efetiva da solda ou na face de fusão. Para tanto deve-se assumir duas hipóteses básicas de cálculo: as tensões são linearmente distribuídas devido ao momento fletor e, na nervura vertical, as tensões cisalhantes dão-se de maneira uniforme de acordo com a Figura 24.

Figura 24-Distribuição de tensões na solda

Fonte: Fonte: Sales, Malite e Gonçalves (1994).

Tal e qual as ligações com conectores, o método utilizado para o cômputo das tensões é o vetorial que, apesar de induzir resultados mais conservadores, apresenta vantagem quanto a sua simplicidade sendo adotado por muitos autores. Nestas condições, o esforço aplicado é dividido em duas componentes: uma de cisalhamento e outro de momento fletor os quais, posteriormente, são somados vetorialmente. A Figura 25 ilustra mais detalhadamente estas definições.

Figura 25-Carregamento excêntrico

Fonte: Vasconcellos (2011).

Como comentado em capítulos passados, a área de uma solda é dividida para efeitos de cálculo em duas denominações: área efetiva (ou do metal base) e área de fusão (vide a Figura 13). Considera-se, nas hipóteses deste documento, que em um cordão, as dimensões das pernas das soldaduras tenham tamanhos idênticos. Dessa maneira, forma-se um ângulo de 45° entre a perna e a face da solda. Assim, as equações (27) e (28) apresentam as formulas para o cálculo da área efetiva e da área de fusão respectivamente.

$$A_{MB} = s * \Delta L \quad (27)$$

$$A_W = t * \Delta L = s * \text{sen}45^\circ * \Delta L \approx 0,7s * \Delta L \quad (28)$$

Onde:

A_{MB} = área efetiva;

A_W = área de fusão;

t = tamanho da garganta;

s = tamanho da perna;

ΔL = comprimento do cordão.

Para o cálculo da força centrada, que como disposto anteriormente, terá uma distribuição de tensões uniforme, apresenta-se a equação abaixo:

$$F_v = \frac{P}{A_s} \quad (29)$$

Onde:

P = Força aplicada;

A_s = área da solda (efetiva ou de fusão).

O cálculo da componente responsável pelo momento fletor é diretamente dependente da distância que centro de gravidade (CG) mantém do ponto mais solicitado. Ressalta-se que o CG varia de acordo com a geometria do conjunto de solda e, evidentemente, com seu momento polar de inércia. Em função disso, a tensão cisalhante provocada por esse esforço é dada por:

$$F_M = \frac{M}{I_P} r \quad (30)$$

Onde:

M = momento fletor aplicado;

I_P = momento polar de inércia;

r = distância do ponto considerado até o CG do conjunto.

Após os procedimentos mencionados, a tensão F_M deve ser decomposta nas parcelas respectivas ao eixo x e y para que seja feita a soma vetorial de tensões. Para tanto obtém-se as equações conforme abaixo:

$$F_{Mx} = \frac{F_M}{r} y \quad (31)$$

$$F_{My} = \frac{F_M}{r} x \quad (32)$$

Onde:

x= distancia no eixo x do ponto requisitado até o CG;

y= distancia no eixo y do ponto requisitado até o CG.

Finalmente, a soma vetorial da tensão resultante em um determinado ponto é dada pela equação (33). É intuitivo pensar que as tensões obtidas através desta equação devem ser menores que aquelas referentes às resistências das soldas cujo estão especificadas na Tabela 10.

$$F_s = \sqrt{F_v^2 + F_M^2} = \sqrt{F_{Mx}^2 + (F_{My} + F_v)^2} \quad (33)$$

2.5 Deslocamentos e tensões

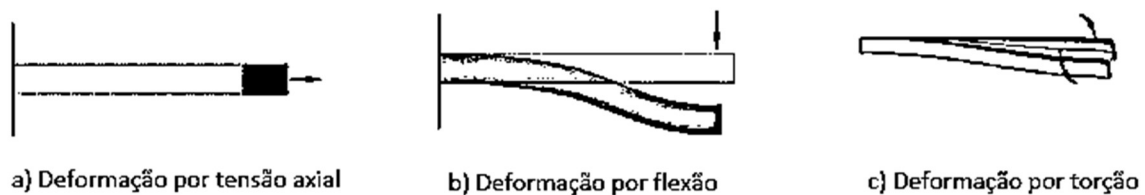
Quando uma peça está sujeita a um determinado tipo de carregamento é intrínseco dizer que coexistam tensões e, evidentemente, deslocamentos. Os tipos de esforços suportados por um dado ponto bem como seu respectivo deslocamento, é dependente de sua localização na estrutura e da forma com que a carga é aplicada. Em geral, os principais tipos de ações em que os elementos podem estar submetidos são:

- Tração;
- Compressão;
- Cisalhamento;
- Flexão;
- Torção.

A tensão, segundo Mascia (2006), pode-se originar do conceito de pressão, isto é, corresponde a uma força normal aplicada a uma unidade de área. O equilíbrio de ações no interior de um sólido é dado pela Lei de Newton, uma vez que supõe-se que se esteja em um estado de ações balanceadas.

Além disso, quando um material está sujeito a esforços, as dimensões de seu corpo tendem a alterar-se. Este efeito denominado deformação costuma ser revertido quando as cargas aplicadas ao sólido são aliviadas e este, pois, retorna a sua geometria inicial. Esta condição é verdadeira caso os elementos trabalhem em regime elástico. Todavia, se o material atingir o regime plástico, ter-se-ão deformações permanentes e irreversíveis. A Figura 26 mostra os estados de deformação de uma peça para diferentes tipos de esforços que lhe incidem.

Figura 26-Exemplos de deformação



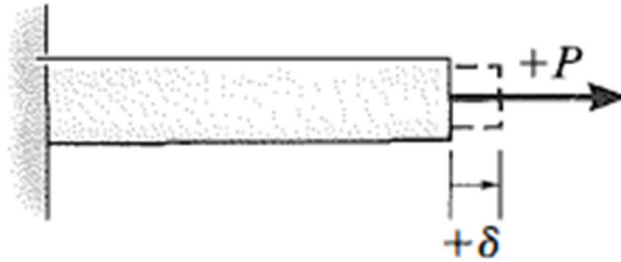
Fonte: Silva (2012).

Para quantificar as deformações e tensões máximas que um objeto está sujeito, deve-se, como visto, conhecer as suas propriedades geométricas, materiais e o tipo de carregamento que está sujeito, condições de apoio, dentre outros. Com base nessas características é possível definir equações de esforços e tensões aplicadas no eixo de uma barra ao longo de uma coordenada específica.

De forma bastante detalhada Hibbeler (2010), propõe algumas equações úteis para a avaliação desses resultados conforme mostrados a seguir. Ressalta-se que a demonstração dessas equações não será apresentada, devendo-se recorrer à literatura mencionada para complemento de informação.

2.5.1 Esforço Axial:

Figura 27-Esforço normal



Fonte: Hibbeler (2010).

Tensão:

$$\sigma_x = \frac{N(x)}{A} \quad (34)$$

Deformação:

$$\delta_x = \frac{F(x)L}{EA} \quad (35)$$

Onde:

F= força axial;

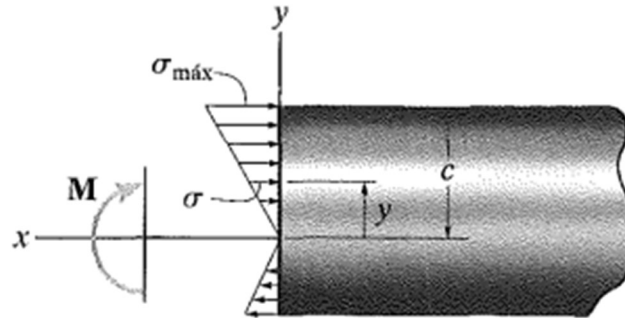
A= área da seção transversal;

L= comprimento longitudinal da peça;

E= módulo de elasticidade.

2.5.2 Esforço de flexão:

Figura 28-Momento fletor



Fonte: Hibbeler (2010).

Tensão:

$$\sigma_{(x,y)} = \frac{M(x)}{I} y \rightarrow \sigma_{(x,y)máx} = \frac{M(x)}{I} y_{máx} \quad (36)$$

Deformação:

$$\delta_x = \frac{\iint M(x) dx}{EI} \quad (37)$$

Onde:

M= momento fletor;

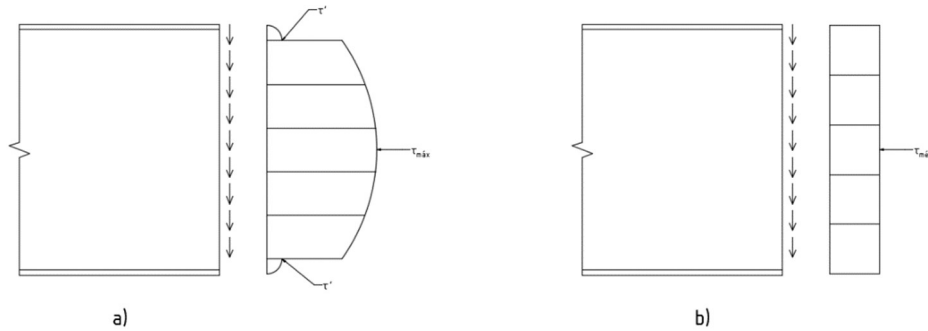
I= inércia da seção;

y= distância do ponto requerido até linha neutra da peça;

E= módulo de elasticidade.

2.5.3 Esforço de cisalhamento:

Figura 29-Tensão cisalhamento: a) distribuição parabólica b) distribuição média



Fonte: Autor (2022).

Tensão:

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (38)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento em um ponto;

V = força de cisalhamento;

$Q = y'A$;

t = largura da área da seção transversal medida no ponto requerido

É usual na prática, porém, como apresentam diversas literaturas, considerar uma tensão de cisalhamento média conforme a Figura 29 b) dada pela equação abaixo:

$$\tau_{méd} = \frac{V}{A} \quad (39)$$

Onde:

τ = tensão média de cisalhamento em um ponto;

A = área da seção.

Deformação:

Convém lembrar que os esforços de cisalhamento, diferentemente dos anteriores, não alteram o volume das peças ao deformarem-se por essa ação. O que ocorre na verdade é uma mudança de ângulo causado pelo deslizamento das partes. Dessa forma, segundo Mascia (2006), a deformação se resume a uma variação angular, isto é, uma distorção válida para pequenos deslocamentos cujo ângulo é dado pela equação (40).

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \rightarrow \frac{\tau}{\frac{E}{2(1+\nu)}} \quad (40)$$

Onde:

G= módulo de elasticidade transversal;

ν = coeficiente de Poisson.

2.6 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Nos últimos anos o método dos elementos finitos evolui as análises de engenharia ao converter-se em uma ferramenta elementar para a avaliação de problemas complexas. Em linhas gerais, esse recurso consiste de um método numérico que se utiliza de uma variedade de técnicas matemáticas para resolver as matrizes de rigidez obtidas pela criação de uma rede de elementos que substituem as formas arbitrárias do sólido.

Sales, Malite e Bragança (2005), atribuem o uso da tecnologia à necessidade de se lograr resultados mais realistas do que aqueles obtidos por meio das análises convencionais, mas ressaltam, no entanto, que qualquer resolução obtida com este método carece de comprovações experimentais para garantir sua validade e eficácia em cenários reais.

Para Castany (2014), até há poucos anos a efetividade das análises que eram feitas de modo tradicional estavam limitadas pelo número de variáveis, condições de contorno e pela quantidade de elementos que podiam ser incluídos, uma vez que não se dispunha das ferramentas de cálculo necessárias. Todavia, com a chegada dos computadores, foi possível abrir caminho para a criação de softwares que levassem

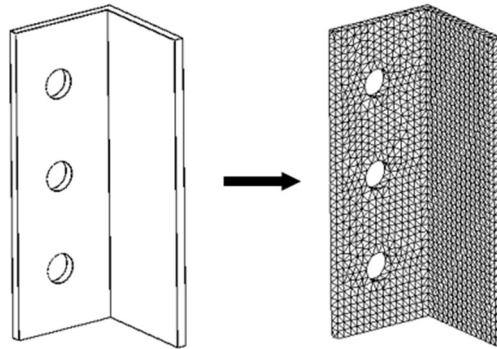
em consideração as inúmeras variáveis que pudessem se apresentar em uma verificação laboriosa.

Tratando-se das análises realizadas no contexto das engenharias civil e mecânica, o MEF tem como essência a representação do estado de tensões, deformações e deslocamentos de um sólido aleatório quando submetido à determinadas tensões. Neste contexto, Azevedo (2003) diz existir dois tipos básicos de análises realizáveis com o método:

- Análises dinâmica ou estática: Quando se aplicam esforços dinâmicos em que seja fundamental a consideração das forças de inércia associadas às acelerações dos seus componentes, diz-se que a análise é dinâmica. No entanto, mesmo que uma estrutura esteja normalmente sujeita a esse tipo ação, na maioria dos casos essas forças são aplicadas de modo lento e, portanto, despreza-se os efeitos relativos à inércia. Ao se negligenciar tais efeitos, a análise passa então a ser estática;
- Análises linear ou não linear: considera-se que durante uma análise os deslocamentos provocados pelas ações externas em um dado corpo sejam tão pequenos quando comparados ao tamanho total da peça que se admite não haver influência da modificação geométrica do mesmo quanto à distribuição das tensões. Caso esta hipótese não se cumpra, tem-se que a análise não é linear.

De acordo com Yan (2011), ao se atribuir as propriedades geométricas e mecânicas de um sólido bem como suas condições de fronteira tem-se a composição de um modelo matemático apto a ser analisado estruturalmente. Para tanto, os modelos desenvolvidos costumam ser simplificados pelos softwares por meio da discretização de elementos finitos mediante a criação de malhas correspondentes aos nós de cada elemento. Dessa forma, cada nó detém uma função matemática que descreve o seu deslocamento, permitindo, assim, que movimentações desses pontos estejam atreladas a uma função polinomial. A Figura 30 exemplifica a discretização de um elemento.

Figura 30-Discretização do sólido em elementos finitos



Fonte: Autor (2021).

Azevedo (2003), também esclarece que na formulação do método dos elementos finitos, necessita-se de uma equação integral que substitua o integral sobre um domínio complexo por um somatório de integrais estendidos a sub domínios de geometria simples. Esta equação é ilustrada conforme abaixo em que cada sub domínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples e o somatório da equação (41) dá origem a operação nomeada de assemblagem.

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (41)$$

Em que:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (42)$$

Silva (2016), diz que cada elemento finito tem relações construtivas que definem o seu comportamento por meio de sistemas de equações. A união desses sistemas servirá para a elaboração de um modelo matemático que, depois de resolvido, entrega os resultados calculados. Como comentado anteriormente, a criação da malha é o arranjo desses elementos em que os nós internos são solidários aos seus pares adjacentes de modo a interagirem entre si o que torna essa relação essencial para o traçado de uma análise eficiente.

Em geral, os softwares de método de elementos finitos exigem que os usuários configurem algumas definições. A principal delas, diz respeito a geometria do sólido que pode ser elaborada em programas externos e, depois, importados para análise. A partir daí prossegue-se a escolha das propriedades dos materiais utilizados, das cargas atuantes, da definição de contato entre faces, das condições de apoio e, enfim, procede-se a criação da malha cujo processo será o prelúdio da análise final. Ressalta-se que em alguns programas, por exemplo, em caso de ligações com soldas ou parafusos é também necessário configurá-los quanto a sua resistência, pré-tensão, etc. Após estas etapas, os resultados podem ser apresentados para a avaliação do operador.

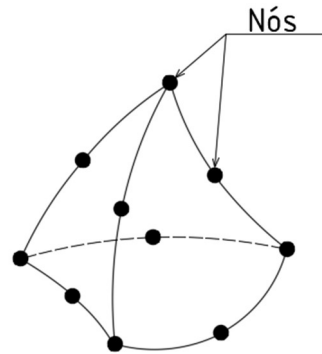
2.6.1 Malha

De acordo com Silva (2013), a geração da malha consiste em dividir o sólido em elementos finitos. Este processo pode ser efetuado de forma automatizada pelo próprio software, porém o usuário não pode negligenciar a necessidade de um controle manual que incida sobre a dimensão e a qualidade da malha. O processo de automatização resulta na vantagem de modelar zonas específicas de tamanho variável para recursos pequenos que decorram da modelagem geométrica.

Ainda segundo o referido autor, a densidade da malha é responsável por prover o grau de precisão dos resultados calculados. Ou seja, é dizer que quanto menores forem os elementos gerados maior será a precisão dos valores fornecidos na análise. A desvantagem em se trabalhar com elementos de dimensões muito reduzidas é o fato de isso ocasionar um aumento exponencial nos tempos de geração de malha e solução.

Yan (2011), reitera que os elementos utilizados para discretizar os componentes e, evidentemente para gerar as malhas, possuem formato tetraédrico, uma vez que é um dos mais indicados para a modelagem de geometrias complexas. Enquanto os tetraedros de primeira ordem possuem quatro nós que podem apenas se deslocar no plano os de segunda possuem dez contemplando as movimentações no espaço. A Figura 31 traz uma representação genérica desses elementos.

Figura 31-Representação genérica de um elemento tetraédrico



Fonte: Autor (2021).

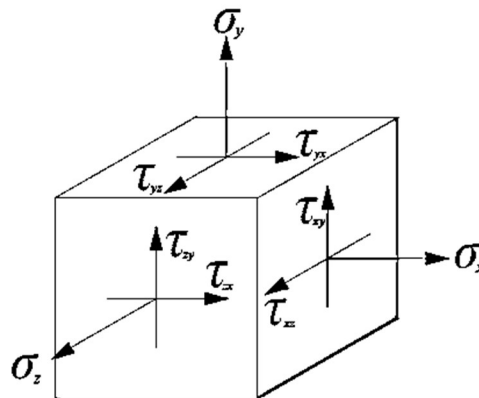
Chama-se a atenção para o fato de que quando os programas MEF calculam os tetraedros, é requerido que os façam de modo que suas arestas sejam iguais. Todavia, muitas vezes devido à complexa geometria, esta condição não é respeitada e a proporção padrão desses elementos que é igual a um não é cumprida gerando, por consequência, arestas de tamanhos demasiados diferentes. Esta desproporcionalidade entre tetraedros tem como consequência a perda de precisão dos resultados fornecidos e, por isso, o projetista deve avaliar com certa atenção a malha formada avaliando se tal é relativamente aceitável para o problema proposto.

2.6.2 Teorias de falhas estáticas

Quando um material está sujeito a um estado de tensões uniaxiais, como nos de ensaio à tração, determinar o seu ponto de falha é uma tarefa muito intuitiva, uma vez que se produz quando $\sigma = \sigma_e$, se o material for dúctil ou $\sigma = \sigma_u$, se o material for frágil. Em função deste trabalho focalizar os materiais dúcteis, nomeadamente o aço, as questões referentes aos materiais frágeis serão aqui suprimidas.

Porém quando uma peça está submetida a um múltiplo estado de tensões conforme mostrado na Figura 32, a determinação de sua falha não é tão imediata. Em tese, o ideal seria a realização ensaios para tensões multiaxiais semelhante ao ensaio de tração para a forma uniaxial, porém esta pratica não é viável na prática devido à grande combinação possíveis de estados tensionais.

Figura 32-Sólido sujeito a um estado de tensões multiaxiais



Montenegro (2011).

Por isso é habitual que apenas sejam conhecidos os valores de σ_e e σ_u do material obtidos por meio do ensaio à tração. Conhecendo-se esses valores, o projetista tem condições de determinar, em qualquer ponto do material, se haverá ou não a ruptura utilizando-se, para isso, das teorias de falhas desenvolvidas ao longo dos anos.

As teorias de falha são baseadas na obtenção das tensões principais $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ do estado multiaxial original ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) do ponto em estudo. Após essas tensões principais são “convertidas” a um estado de tensão uniaxial equivalente σ_{eq} , comparando-o com σ_e para materiais for dúcteis ou σ_u , para materiais frágeis determinado a ocorrência da falha.

Em geral, mesmo que existam uma considerável quantidade de teorias de falha, é comum o uso de quatro delas: duas para materiais dúcteis como o aço e o alumínio e duas para os materiais frágeis como ferro fundido e vidro. Abaixo se descreve o principal dos métodos utilizados em *softwares* MEF para materiais dúcteis.

2.6.2.1 Teoria da energia de distorção máxima ou Critério de Von-Mises

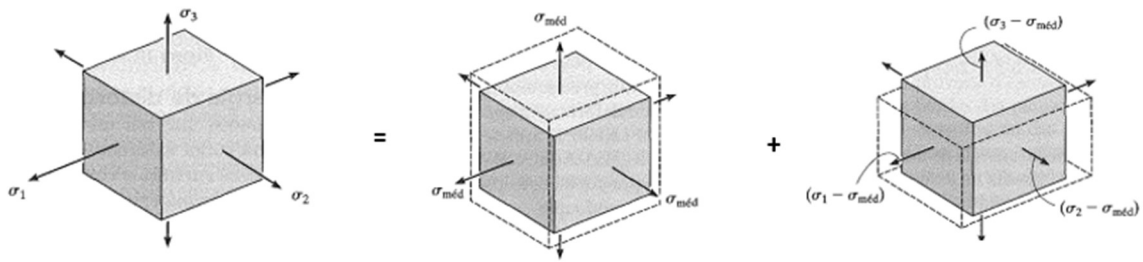
Nas definições de Hibbeler (2010), um corpo tende a armazenar energia internamente em todo seu volume quando deformado por uma carga exterior. Dessa forma, o sólido fica sujeito a uma densidade de energia de deformação propiciada pelas três tensões principais σ_1, σ_2 , e σ_3 . Caso o material se comporte segundo a lei de Hooke a densidade de energia pode ser descrita conforme a equação abaixo.

$$\mu = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3\sigma_2)] \quad (43)$$

Essa densidade de energia de deformação pode ser tomada como a soma de uma energia suficiente para provocar a mudança de volume em um elemento sem modificar-lhe sua forma e uma outra capaz de distorcê-lo.

A mudança no volume é causada pela aplicação da tensão principal média, $\sigma_{\text{méd}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, uma vez que tal tensão provoca deformações igualitárias no material. Neste caso a energia de distorção é provocada pela porção remanescente dessa tensão dada por $(\sigma_1 - \sigma_{\text{méd}})$, $(\sigma_2 - \sigma_{\text{méd}})$ e $(\sigma_3 - \sigma_{\text{méd}})$. Estes conceitos podem ser ilustrados na Figura 33.

Figura 33-Mudança de volume e deformações em sólido sob tensões



Fonte: Hibbeler (2010).

Baseando-se na premissa de que os materiais não escoam quando estão submetidos a uma tensão uniforme, como $\sigma_{\text{méd}}$, M. Huber propôs que um material dúctil apenas escoam quando a energia de distorção por unidade de volume do elemento iguala ou supera a energia de distorção do mesmo material quando submetido a um escoamento de tração simples. Dessa maneira, substituindo as tensões $(\sigma_1 - \sigma_{\text{méd}})$, $(\sigma_2 - \sigma_{\text{méd}})$, $(\sigma_3 - \sigma_{\text{méd}})$ por $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, respectivamente e, sabendo que $\sigma_{\text{méd}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, tem-se:

$$\mu_d = \frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2] \quad (44)$$

Tomando-se o caso de uma tensão plana onde $\sigma_3=0$, a equação (44) pode ser reduzida a:

$$\mu_d = \frac{1 + \nu}{3E} (\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2) \quad (45)$$

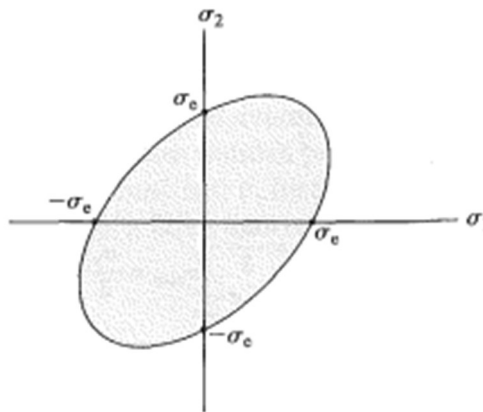
Para um ensaio de tração uniaxial em que, $\sigma_1 = \sigma_e$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ temos que:

$$(\mu_d)_e = \frac{1 + \nu}{3E} \sigma_e^2 \quad (46)$$

Para um estado de tensões no plano ou biaxiais e, levando-se em conta que a teoria de distorção máxima sugere que $\mu_d = (\mu_d)_e$ tem-se a equação (47) podendo-se representá-la no plano cartesiano conforme a Figura 34.

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_e^2 \quad (47)$$

Figura 34-Teoria de Von Mises



Fonte: Hibbeler (2010).

2.6.3 Solidworks

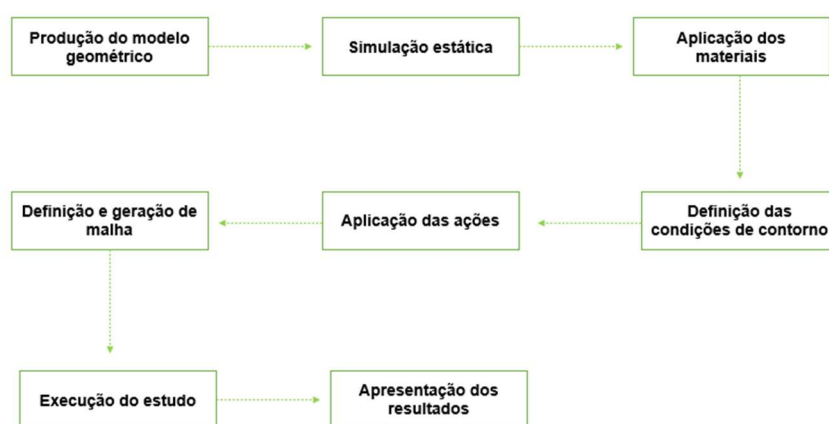
Para López e Rodríguez (2015), o SolidWorks é um programa de desenho assistido por computador (ou em inglês Computer Aided Design (CAD)) desenvolvido pela Dassault Systèmes sendo sua primeira versão lançada em 1995. Este programa permite a modelagem de peças aplicando-lhes detalhes e informações de forma automatizada. Segundo a própria fabricante, o *software* emprega um procedimento 3D, isto é, ao se desenhar um elemento desde o croqui inicial até o resultado final, se

está criando um modelo tridimensional e, a partir dele, pode-se extrair os desenhos em duas dimensões.

Porém, além das funcionalidades referentes à representação de desenhos, é possível realizar simulações das peças criadas por meio da ferramenta SOLIDWORKS Simulation que está totalmente integrado ao *software* CAD. Esta função conta com um ambiente avançado destinado à execução de testes estruturais por meio de simulações avançadas sendo possível até mesmo a testagem de produtos quanto aos seus parâmetros de durabilidade, comportamento térmico, resposta a efeitos dinâmicos etc.

Essas funções visam auxiliar os projetistas quanto a reduzir os riscos e custos por meio de protótipos virtuais que agilizam os processos produtivos, pois podem prever o comportamento de peças quando sujeitas aos efeitos de uma carga aplicada. A Figura 35 demonstra os principais passos exigidos pelo programa durante a execução de uma análise estática cujo foi o objetivo deste trabalho.

Figura 35- Esquema geral de configuração de análise



Fonte: Autor (2021).

2.6.4 Singularidades em malhas

Um dos maiores problemas durante a análise de elementos finitos diz respeito às complicações provocadas pelo efeito de singularidades nas malhas.

De maneira muito clara, Gonçalves (2017), relata que uma singularidade pode ser detectada quando as tensões calculadas para um determinado ponto não convergem para um valor específico. Em situações normais, conforme já mencionado, ao se refinar as malhas de uma dada geometria, os resultados tornam-se cada vez

mais acurados variando cada vez menos entre si conforme o número de iterações aumenta. Porém, em situações onde há singularidades, à medida em que a malha é refinada, as tensões produzidas em uma região continuam a aumentar indiscriminadamente, uma vez que, teoricamente, as tensões são infinitas em uma singularidade.

As situações típicas para a ocorrência dessas manifestações são especialmente aquelas em que se aplicam cargas pontuais, onde existam cantos reentrantes agudos na geometria da peça, bordas de furos ou restrições de deslocamentos pontuais. Ainda segundo o autor mencionado, pode-se dizer que este fenômeno é comum no MEF, todavia, é possível, com o conhecimento adequado, determinar suas localizações e definir se possuem relevância no modelo estudado.

Contudo, mesmo que as tensões nestas singularidades tendam ao infinito, não se pode dizer que os resultados do modelo como um todo sejam inválidos especialmente porque os valores calculados referentes aos deslocamentos conservam-se dentro do esperado, mesmo nas regiões afetadas por esse efeito. O operador, no entanto, deve-se atentar que a tensão na singularidade afeta os resultados das demais tensões localizadas em sua vizinhança, mas, conforme se distancia dessas regiões, os valores começam a apresentar escalas mais realistas. Esta premissa vai de encontro ao princípio de Saint-Venant que diz que a partir de certa distância da perturbação (neste caso a singularidade), os resultados não serão afetados por ela. Este princípio permite que o projetista ignore esses efeitos quando a área de estudo não for importante/crítica na avaliação do modelo.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Parâmetros gerais

Neste documento foram abordados dois modelos de ligações metálicas e seus dimensionamentos analíticos estiveram baseados nas formulações propostas no livro *Ligações em Estruturas de Aço* elaborado por Sales, Gonçalves e Malite (1994) e na apostila homônima desenvolvida pelo Instituto Brasileiro de Siderurgia e pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço. Em complemento, informações presentes nas normas em questão, nomeadamente a NBR 8800 e o Eurcódigo 3, foram utilizados de forma a respeitar alguns critérios intrínsecos à segurança das estruturas.

Cabe ressaltar que cada peça possui uma metodologia de análise para o MEF, ou seja, características que foram inseridas no programa SolidWorks® como tamanhos de malha, condições de apoio etc., e outra para o dimensionamento tradicional conforme as equações dispostas nos itens anteriores.

3.2 Definição dos materiais

O primeiro componente a ser definido foram os materiais utilizados nos estudos, isto é, os resultados apresentados tanto pelas formulações analíticas quanto pelo Método de Elementos Finitos dependeram das características dos materiais escolhidos pois suas propriedades são intrínsecas aos cálculos. Pôde-se, então, definir tipos distintos deles para cada peça conforme sua função na estrutura. Tais peças são distinguidas conforme a Tabela 11.

Tabela 11-Materiais componentes

Tipo de peça	Descrição	Material
i	Vigas e chapas	Aço ASTM A-36
ii	Parafusos	Aço ASTM A-325
iii	Eletrodos	E70

Fonte: Autor (2021)

Definidos os materiais, pode-se citar nominalmente suas propriedades essenciais para o dimensionamento. Ressalta-se que as características mais importantes neste estudo dizem respeito às propriedades mecânicas que possuem, ou seja, aquelas referentes ao comportamento térmico ou elétrico foram suprimidas

em virtude de não nutrirem relação direta com o propósito deste documento. A Tabela 12 indica as principais características mecânicas dos materiais citados.

Tabela 12-Propriedades mecânicas dos materiais

Material	ASTM A-36	ASTM A-325	E70
Propriedade			
Módulo de elasticidade	200 GPa	200 GPa	-
Tensão de escoamento	~250 MPa	~635 Mpa	~400 MPa
Tensão de Ruptura	~400 Mpa	~825 Mpa	~480 MPa
Coeficiente de Poisson	0,3	0,3	-
Densidade	7,85 g/cm ³	7,85 g/cm ³	-
Modulo de elasticidade transversal	77 GPa	77 GPa	-

Fonte: adaptado de ABNT NBR 8800 (2008) e Pfeil e Pfeil (2009).

3.3 Ligações ensaiadas

Conforme comentado, este trabalho abordou dois tipos diferentes de conexões em estruturas de aço, cada qual submetida a distintas formas de carregamentos e sujeitas a dimensionamentos próprios mesmo partilhando conceitos similares entre si.

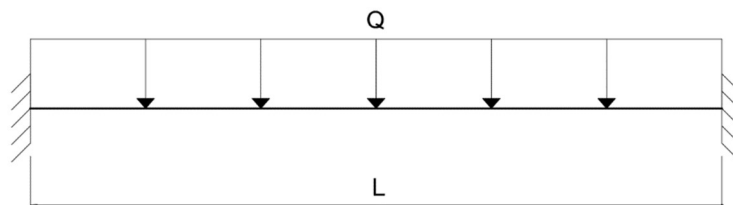
Em uma ligação em estruturas metálicas é essencial se levar em consideração os efeitos nos conectores, chapas, vigas, pilares ou qualquer outro elemento relevante a sua composição. Neste caso, porém, todas as conexões apresentadas furtaram-se da influência das colunas uma vez que estas representam um grande custo computacional quando do cálculo via elementos finitos e o tempo tomado para a análise tornaria este trabalho demasiado extenso bem como se distanciaria dos modelos apresentados nas literaturas tradicionais que também desconsideram inicialmente sua relevância. Todavia, esta premissa não invalidou os resultados obtidos para as tensões e deslocamentos na viga, tampouco os esforços obtidos nos conectores e soldas.

Em complemento, todas as ligações consideradas foram do tipo contato, em outras palavras, não foi levado em consideração nenhum fator de atrito e, por consequência, nenhum tipo de pré-tensão nos parafusos.

3.3.1 Ligação de viga com chapa de topo

Esta ligação foi composta de uma viga de perfil I com as duas extremidades soldadas a uma chapa de topo. Por sua vez, as chapas foram conectadas aos apoios por meio de parafusos. Considerou-se, para o caso, que a ligação tenha sido suficientemente rígida a ponto de ter capacidade para absorver a totalidade de momento fletor comportando-se analiticamente como uma viga bi-engastada. A Figura 36 indica a idealização de tal conexão bem como a sua prévia condição de carregamento.

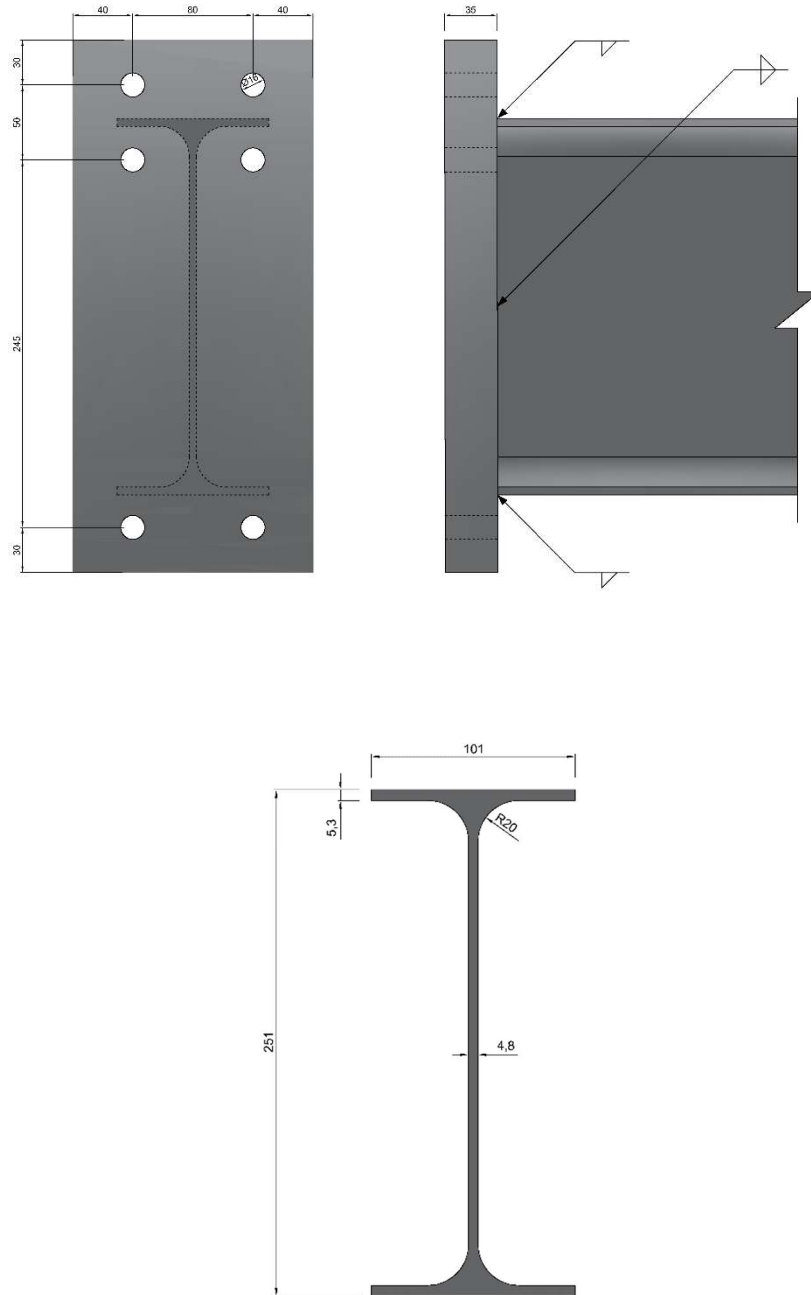
Figura 36-Condição idealizada da ligação



Fonte: Autor (2021).

A partir dessas configurações pôde-se definir a geometria das peças conectadas, ou seja, perfil da viga, dimensões e espessura da chapa, diâmetro dos parafusos e intensidade de carga. A Tabela 12 indica as propriedades mecânicas dos elementos e a Figura 37 representa sua geometria. O comprimento do vão da viga (L) adotado foi de 8000 mm com uma carga uniformemente distribuída (Q) de 5,625 KN/m. Estes valores foram definidos visando-se evitar que o material componente da viga escoe e, portanto, trabalhe em regime plástico.

Figura 37-Representação das peças da conexão (dimensões em milímetros)



Fonte: Autor (2021).

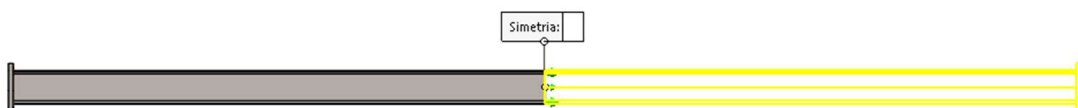
Conforme indicado na Figura 37, adotou-se uma viga W 250 x 17,9 com inércia em no eixo X de 2622,51 cm⁴. A chapa de topo constitui-se de uma placa metálica retangular com dimensões de 355mm x160mm x 35mm perfurada com seis furos de 16mm de diâmetro.

A modelagem geométrica das peças fora feita pelo programa Autodesk Autocad® e depois exportado para o SolidWorks® para a inserção de volumetria e acabamento. Para a realização da simulação foram consideradas algumas hipóteses a fim de simplificar e acelerar o processo de cálculo conforme segue abaixo:

- Não foram consideradas folgas nos furos;
- Os parafusos foram criados de forma virtual pelo próprio programa;
- As chapas de extremidade foram consideradas acopladas por meio dos conectores a uma parede virtual que reproduz a função da coluna;
- As cargas foram consideradas uniformemente distribuídas ao longo da alma da viga.
- O peso próprio dos elementos foi desconsiderado;
- A mesa superior do perfil fora travada a fim de impedir movimentos laterais e, conseqüentemente, flambagem lateral com torção (FLT);
- Não há flambagem local da alma (FLA), pois a viga é compacta quanto a alma;
- A viga é compacta quanto à mesa e por isso não há flambagem lateral da mesa (FLM).

Além disso, devido a geometria, a ligação fora modelada até sua metade para então aplicar-lhe o recurso de apoio simétrico que “espelha” o restante do sólido evitando um processamento muito longo e desnecessário. A operação pode ser visualizada na Figura 38.

Figura 38-Recurso de simetria



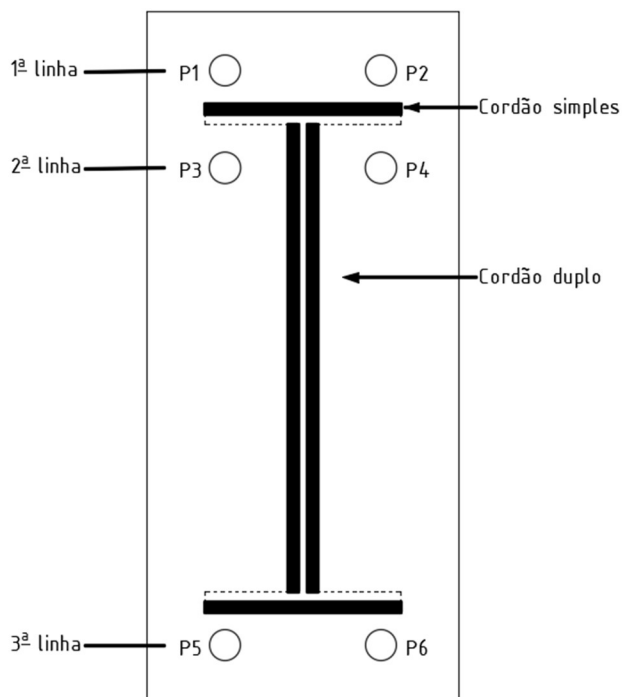
Fonte: Autor (2022).

3.3.1.1 Solda

As soldas foram consideradas admitindo os esforços oriundos do momento fletor e da força cortante. Considerou-se que as mesas inferior e superior estavam

conectadas a chapa de extremidade por cordões de solda simples enquanto a alma o fez por cordões duplos. A Figura 39 demonstra estas condições

Figura 39-Disposição das soldas



Fonte: Autor (2022).

O software SolidWorks® permite a inserção de soldas virtuais contanto que as peças em questão sejam modeladas como cascas. Para geometrias simples, essa conversão dá-se de maneira simples diferentemente do que para aquelas mais complexas. Neste caso, optou-se, pela realização de um novo estudo, modelando-se as peças mencionadas anteriormente como cascas ao invés de sólidos apenas a fim de verificar as soldas.

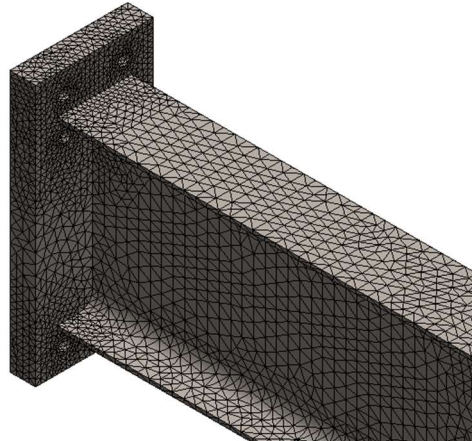
Todas as soldas consideradas foram do tipo filete aplicadas utilizando-se o eletrodo o E70 e o método de dimensionamento elegeru, segundo as opções do programa, pelo padrão americano que é o mais similar aos utilizados nas literaturas consultadas. Por simplificação, as cascas referentes às chapas de topo foram completamente engastadas.

3.3.1.2 *Malha*

A discretização dos elementos foi realizada utilizando-se a opção “malha com base em curvatura” definindo-se o tamanho máximo do elemento em 15 mm e o

mínimo em 5 mm. Esta opção permite o refinamento automático da malha do sólido em regiões onde a geometria seja mais complexa com base nos valores definidos pelo usuário. Ao todo foram criados 105293 elementos e 189063 nós. A Figura 40 mostra a configuração final da etapa.

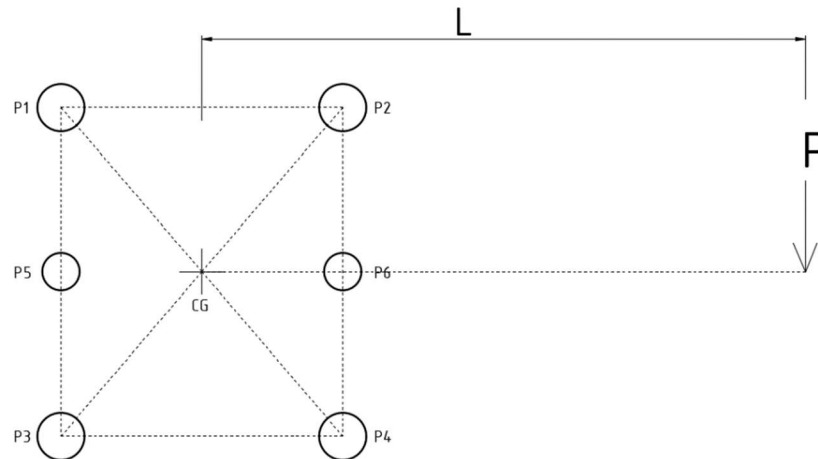
Figura 40-Representação da discretização



Fonte: Autor (2022).

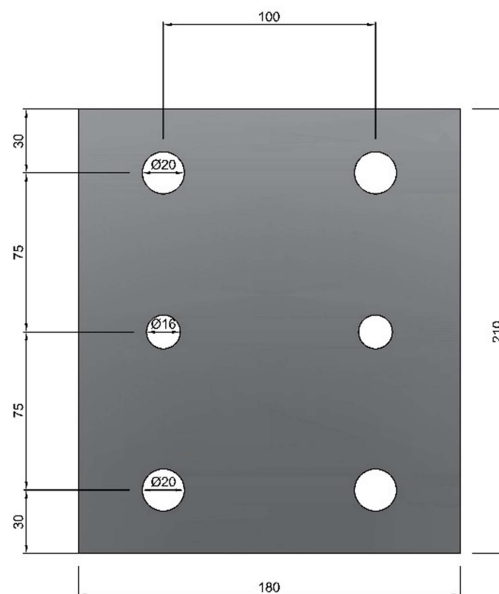
3.3.2 Ligação parafusada com conectores sujeitos a cisalhamento excêntrico

Esta ligação foi constituída de uma chapa de 20mm de espessura perfurada por seis conectores aplicando-se uma carga excêntrica que produz simultaneamente esforços de cisalhamento e momento fletor. Os parafusos localizados nas linhas superiores e inferiores possuem diâmetro igual a 20 mm enquanto aqueles dispostos na linha intermediária foram arbitrados com diâmetro igual a 16 mm. As equações referentes ao dimensionamento analítico deste tipo de conexão foram dispostas no capítulo 2.4.2 e serão utilizadas como base de cálculo. A Figura 41 ilustra o conceito da união.

Figura 41-Mecanismo de funcionamento da conexão

Fonte: Autor (2021).

Para o caso em questão, o dimensionamento resumiu-se à chapa conectora, ou seja, sem presença de viga, mas apenas uma carga externa e excêntrica que desempenha papel similar a este elemento quanto à geração de momento e esforço cisalhante. A carga (P) considerada foi de 10 KN enquanto a distância de aplicação (L) foi convencionada em 1000 mm. Devido as pequenas dimensões da peça o seu peso próprio foi desconsiderado. O modelo utilizado pode ser observado na Figura 42.

Figura 42-Disposição da peça (dimensões em milímetros)

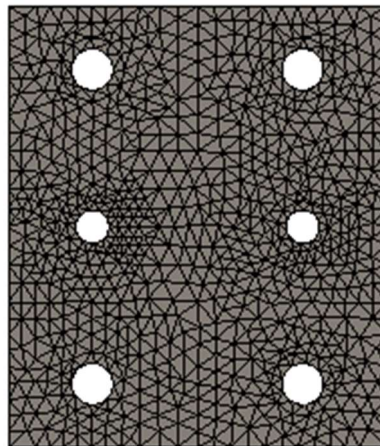
Fonte: Autor (2021).

Para a simulação deste modelo, as ações foram inseridas via carga remota, isto é, dispensando-se a necessidade da adição de um elemento sólido para propiciar a transmissão dos esforços referidos. A chapa foi conectada com os parafusos a uma parede virtual.

3.3.2.1 *Malha*

A discretização dos elementos foi realizada utilizando-se a opção “malha com base em curvatura” definindo-se o tamanho máximo do elemento em 10 mm e o mínimo em 5 mm. Ao todo foram criados 16631 e 26298 nós. A Figura 43 mostra a disposição final da peça.

Figura 43-Representação da discretização



Fonte: Autor (2022).

4 RESULTADOS

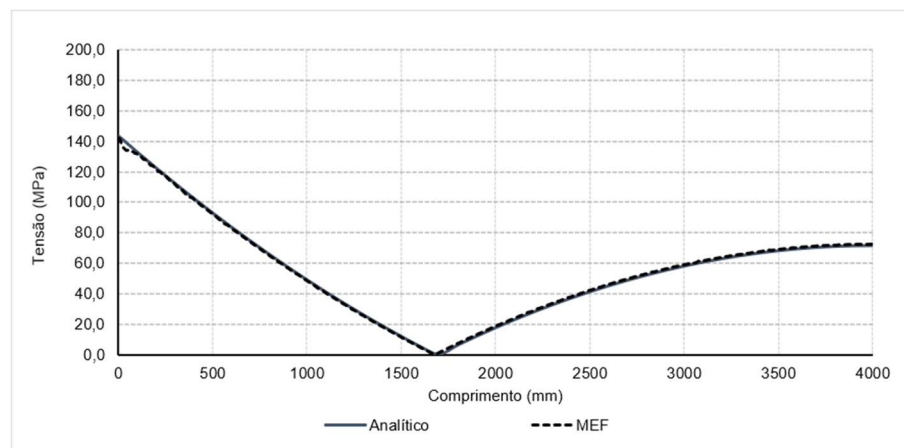
4.1 Ligação de viga com chapa de topo

4.1.1 Tensão

Com base nas premissas definidas nos procedimentos metodológicos e levando-se em conta as formulações dispostas na seção 2.5.2, a Figura 44 mostra a distribuição das tensões ao longo da viga provocada pela aplicação de momento fletor. Cabe ressaltar que os valores obtidos pelo Solidworks foram colhidos no ponto médio da face externa da mesa comprimida onde os esforços provocados pelo cisalhamento podem ser considerados desprezíveis.

Além disso, todos os valores mostrados estão em módulo já que a metodologia utilizada pelo programa o fez desta maneira em virtude de validar o critério de Von-Mises. Ressalta-se ainda que o gráfico, devido a aplicação dos recursos de simetria, apenas apresenta os resultados até a metade do vão da viga sendo os valores restantes apenas uma reflexão daqueles já mostrados.

Figura 44-Distribuição das tensões na viga



Fonte: Autor (2022).

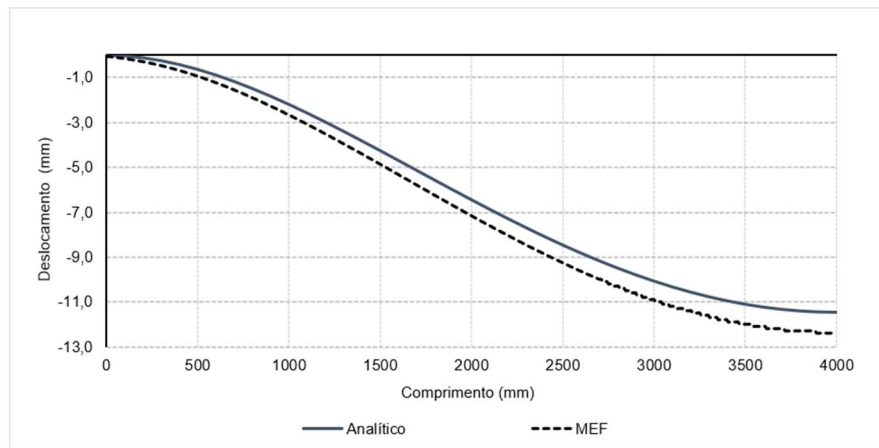
Verificou-se que as maiores tensões se concentraram perto do apoio em virtude dos maiores momentos fletores localizarem-se perto deste mostrando coerência com o modelo analítico proposto de engaste perfeito. Os cálculos analíticos indicaram tensão máxima de 143,34 MPa enquanto o programa resultou no valor de 142 MPa,

isto é, uma variação de -0,93% em relação ao método tradicional. Notou-se também que ambos os métodos acabaram por produzir valores bastante alinhados entre si.

4.1.2 Deslocamento

Os valores obtidos para o deslocamento da viga também se basearam nos conceitos dispostos na seção 2.5.2 e a coleta dos dados pelo programa seguiu as mesmas condições dispostas no item anterior incluindo as questões referentes à simetria gráfica. A Figura 45 ilustra os resultados obtidos para os dois métodos.

Figura 45-Deslocamento da viga



Fonte: Autor (2022).

Naturalmente os maiores valores foram verificados exatamente no meio do vão da peça, ou seja, na marca de 4000 mm. A simulação analítica identificou deslocamento máximo de 11,44 mm ao passo que a obtida pelo Método dos elementos Finitos alcançou 12,4 mm, ou seja, uma variação de 8,39%. Esta diferença pode ser justificada por dois fatores específicos:

a) Rigidez do modelo

A viga, em termos de deslocamento, não possui uma completa rigidez como o modelo de engaste perfeito assumido como premissa analítica e, portanto, apresenta deslocamentos adicionais gerados pela rotação e deformação da chapa de extremidade.

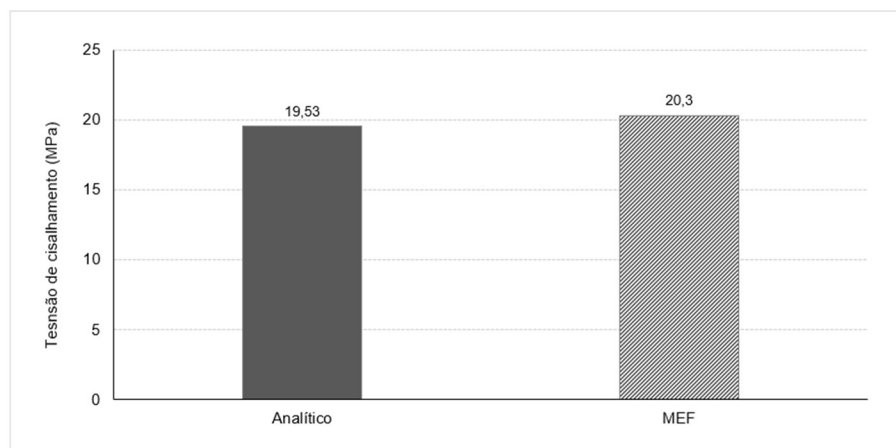
b) Teorias de viga

Para este trabalho, assim como nas literaturas consultadas, todas as deformações de viga foram obtidas por meio da chamada Teoria Clássica de vigas ou Teoria de vigas de Bernoulli conforme apresentada no item 2.5. No entanto, os trabalhos realizados por Silva (2019) e Campos (2015), mostraram que a Teoria Bernoulli pode nem sempre representar um comportamento próximo da realidade, pois o método desconsidera as distorções provocadas pelos esforços cortantes ao contrário das análises do programa e da Teoria de Vigas de Timoshenko que levam esse efeito em consideração e, por isso, sempre resulta em deslocamentos mais expressivos do que a formulação clássica.

4.1.3 Tensão de cisalhamento máxima

Os valores para a tensão de cisalhamento na viga foram tomados com base no diagrama de força cortante produzido pelo carregamento e na equação (39) que adota uma análise simplificada da distribuição dessas tensões na face das peças. A Figura 46 simplifica os resultados obtidos.

Figura 46-Tensão de cisalhamento máxima



Fonte: Autor (2022).

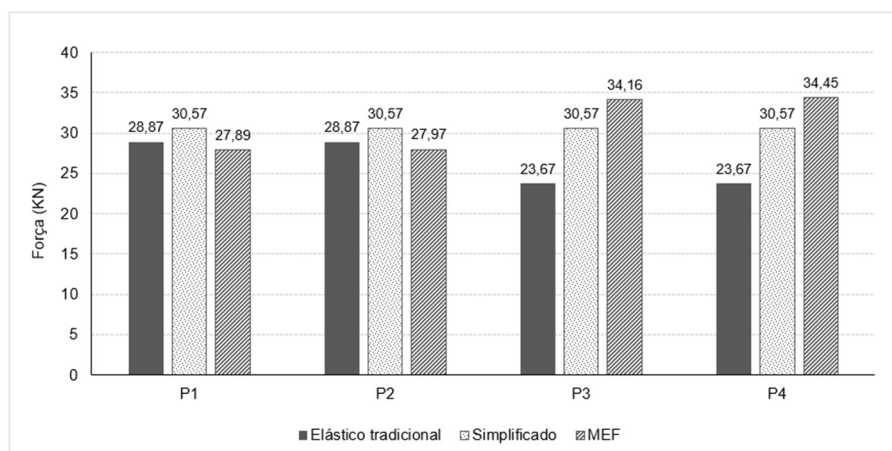
Considerou-se que, nas hipóteses analíticas, apenas a alma do perfil resiste ao cisalhamento que se distribui de forma uniforme ao longo de seu comprimento. Na verdade, as mesas da viga também resistem uma pequena parcela desse esforço, mas na prática é comum desconsiderar sua contribuição no modelo.

Na análise computacional, assim como nos cálculos manuais, a maior tensão provocada pelos esforços cisalhantes concentrou-se perto do apoio exatamente sobre a linha neutra do perfil verificando-se que o resultado obtido por meio do programa foi cerca de 3,94% maior do que a metodologia analítica.

4.1.4 Esforço nos conectores

Para a avaliação das forças de tração presentes nos conectores da chapa de extremidade, utilizou-se as duas metodologias propostas na seção 2.4.3. Ressalta-se que não foi manifestada a presença de efeito de alavanca tampouco ruptura dos furos por rasgamento ou plastificação conforme as indicações dispostas nos itens 2.4.1 e 2.4.3.3 respectivamente. Não obstante, foi verificada ainda a resistência dos conectores submetidos às forças simultâneas de corte e tração. A Figura 47 exibe os resultados obtidos para o esforço nos quatro parafusos considerados dentro da área tracionada da chapa.

Figura 47-Força de tração nos conectores



Fonte: Autor (2022).

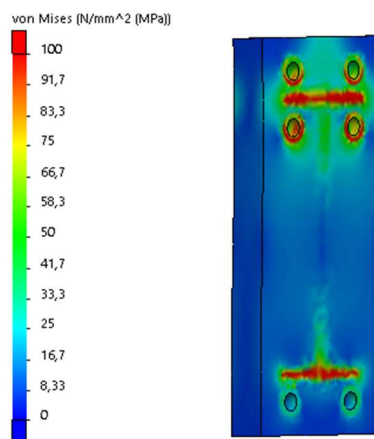
Vê-se que independentemente do método analítico utilizado, os resultados obtidos computacionalmente mostraram que os parafusos P3 e P4 posicionados na segunda linha de cordo com a Figura 39, absorvem a maior parte dos esforços o que contraria as suposições adotadas pelo método Elástico tradicional que afirma que os parafusos mais solicitados são aqueles que se tracionam nas regiões mais afastadas da linha neutra da chapa devido a uma distribuição linear de forças conforme mostrado na Figura 20.

Esta inconsistência também fora verificada nos experimentos de Oman e Nagode (2017). Segundo os autores, uma distribuição linear de esforços nos conectores só seria possível se as chapas em que se conectam fossem absolutamente rígidas, o que na prática é inviável concluindo-se que os métodos analíticos disponíveis são apenas uma aproximação da ordem de grandeza dos esforços.

Salienta-se também que o método Elástico tradicional não leva em conta a posição do perfil em relação a chapa conectada e, por conseguinte, as distâncias que suas partes mantêm dos furos o que pode induzir a distribuições ainda mais desuniformes dos esforços em um ponto específico.

O método simplificado, por sua vez, considera que os esforços de tração e compressão são apenas transmitidos pelas mesas do perfil por meio de um binário de forças conforme a Figura 21. No entanto, de acordo com a figura Figura 48, observa-se que a alma da viga também é capaz de transmitir parte das tensões à chapa ainda que em menor intensidade.

Figura 48-Distribuição de tensões na chapa de extremidade



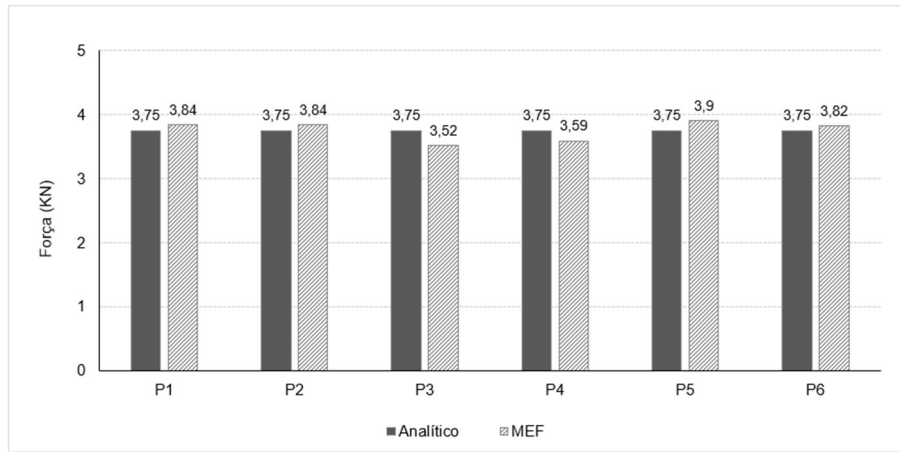
Fonte: Autor (2022).

Cabe registrar que o par de parafusos situados na linha mais inferior (P5 e P6) foi assumido resistindo apenas à força cortante, pois localiza-se abaixo da linha neutra da chapa e, pois, no quinhão comprimido.

Quanto aos esforços de cisalhamento nos conectores, a Figura 49 mostra uma variação pouco expressiva em todos os 6 parafusos levando-se em conta as hipóteses de distribuição igualitária dispostas na equação (1). A pequena diferença entre os

resultados computacionais dos pares pode ser atribuída a margem de erro intrínseca à interpolação dos pontos intermediários aos nós da malha.

Figura 49-Cisalhamento nos conectores

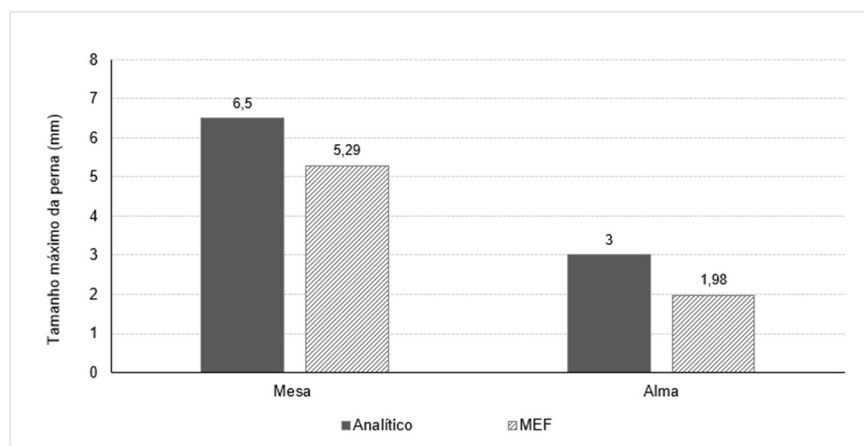


Fonte: Autor (2022).

4.1.5 Soldas

Devido a simultaneamente dos esforços de corte e momento que solicitam a ligação, foi assumido para os cálculos manuais que os filetes de solda localizados no ponto mais crítico da alma da viga são capazes de suportar a totalidade das tensões de cisalhamento e parte das forças geradas pela flexão enquanto a soldaduras dispostas nas mesas apenas resistem aos efeitos produzidos pelo momento fletor em sua máxima intensidade. A Figura 50 mostra os resultados obtidos para o modelo analítico e computacional.

Figura 50- Tamanho máximo das soldas



Fonte: Autor (2022).

Para obtenção da inércia dos cordões de solda definiu-se, com base Tabela 9, que os filetes da alma teriam perna de 3mm. Dessa forma pôde-se estimar o tamanho das pernas localizadas nas mesas da viga. O dimensionamento manual das soldaduras seguiu as disposições elencadas por Budynas e Nisbett (2011). Cabe ressaltar que o método analítico considerado para a análise foi o vetorial considerado, segundo Sales, Malite e Gonçalves (1994), conservador.

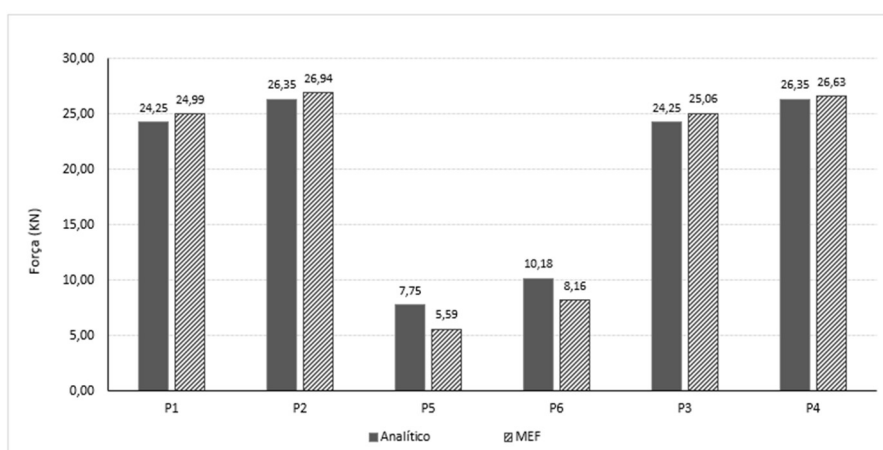
Os resultados obtidos pelo cálculo analítico apresentaram resultados consideravelmente mais robustos uma vez que a filosofia de cálculo é distinta e as hipóteses adotadas para a determinação das soldas são mais simplificadas. O software, por sua vez, calculou o tamanho da perna dos cordões em todos os nós da malha nas linhas em que as peças foram interseccionadas definindo suas dimensões automaticamente por meio das tensões avaliadas no modelo ponto a ponto.

4.2 Ligação parafusada com conectores sujeitos a cisalhamento excêntrico

4.2.1 Esforços nos conectores

De acordo com as equações apresentadas no capítulo 2.4.2, a distribuição dos esforços nos parafusos pode ser verificada na Figura 51. Ressalta-se que não houve a ruptura dos furos tampouco falha da chapa por cisalhamento.

Figura 51-Esforços nos conectores



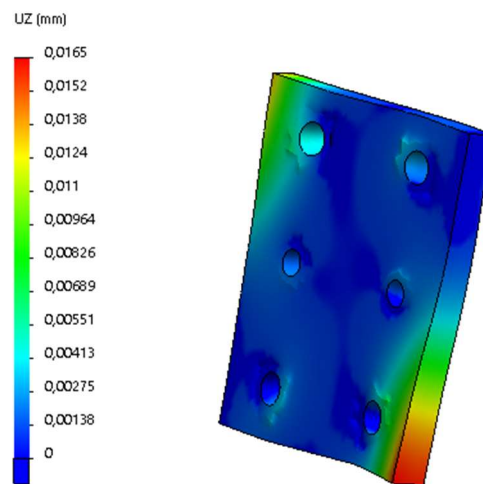
Fonte: Autor (2022).

Verificou-se que, em geral, os dois métodos apresentaram resultados razoavelmente similares entre si. A maior variação positiva fora observada no

parafuso P3 com uma diferença de pouco mais de 3,3%. Para os conectores P5 e P6, conforme a Figura 41, o método analítico gerou valores mais conservadores como esperado ao se utilizar o método vetorial.

Ademais, foi verificado que os parafusos P1 e P4 apresentaram forças de tração superiores a 6KN o que não se verificou nos cálculos analíticos. Estes esforços sobressalentes surgiram em virtude da deformação provocada pela flexão da chapa conforme mostrado pela Figura 52 onde as áreas mais avermelhadas indicam os maiores deslocamentos laterais.

Figura 52-Deformação da chapa



Fonte: Autor (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A intenção deste trabalho focou em comparar os resultados obtidos para determinadas etapas do dimensionamento de conexões metálicas por meio de métodos analíticos e métodos computacionais analisando a correspondência entre os valores obtidos pelos dois mecanismos.

Entende-se que os métodos analíticos são dotados de simplificações e idealizações e suas formulações tendem a fornecer resultados geralmente mais intuitivos, porém estimados. Em contra partida, o método dos elementos finitos, atualmente, constitui-se como uma boa alternativa para verificações mais densas e permitem análises acessíveis e versáteis, uma vez que são realizadas em cenários virtuais e as configurações de peças, cargas, materiais dentre outras podem ser definidas facilmente pelo operador.

Quanto aos resultados, aqueles verificados para o primeiro exemplo, ou seja, da viga com chapa de topo, apresentaram valores de tensão bastante condizentes entre as duas metodologias. As deformações, mesmo com a utilização da teoria clássica, também originaram pouca variação entre si uma vez que para Silva (2019) a distorção provocada pelo cisalhamento é tanto menor quanto maiores forem os vãos da peça e menos restritos forem seus apoios.

Uma das maiores incompatibilidades deu-se para as soldas em virtude das diferentes filosofias de cálculo utilizada entre os métodos. Cabe ressaltar que as soldaduras dimensionadas neste documento tanto pelo MEF quanto pelos cálculos analíticos não levaram em consideração as inúmeras imperfeições que se possam produzir no cenário real durante a sua fabricação como as trincas tampouco os efeitos de distorção causados pelo resfriamento dos cordões e a fragilização do metal quando este é aquecido pelo processo. Por isso, na falta de análises ainda mais detalhadas as recomendações e os coeficientes de segurança dispostos em inúmeras normas ao redor do mundo não podem ser negligenciados. Além disso, os valores obtidos para a tração dos conectores da chapa de fixação também divergiram uma vez que as hipóteses de cálculo analítico não levaram em consideração os efeitos de sua rigidez.

O segundo exemplo, no qual os parafusos foram submetidos ao cisalhamento excêntrico, os valores obtidos com o cálculo analítico para aqueles localizados próximos ao centro de gravidade do conjunto foram percentualmente maiores que os calculados pelo MEF. Para os parafusos mais externos essa diferença foi

razoavelmente pequena. Em adição, salienta-se que as deformações laterais na chapa provocadas pela aplicação da carga induziram esforços de tração em alguns conectores o que apenas pôde ser visualizado nas simulações do software.

É importante relatar que as análises computacionais trabalhadas neste documento foram elegidas como lineares e estáticas, isto é, supôs-se que os materiais selecionados trabalham em regime elástico para carregamentos não dinâmicos. Isto implica que, se houver concentrações de tensões em alguma parte das peças que provoque seu escoamento, o programa irá representá-las, mas estes pontos não sofrerão deformações plásticas e, portanto, as tensões não serão atenuadas e redistribuídas como se espera na realidade.

Por fim, mesmo que os programas que se utilizem da tecnologia de métodos de elementos finitos apresentem um grande auxílio na verificação de alguns dados, os métodos analíticos e suas alterações são embasados por diversas literaturas e códigos técnicos. Não obstante, independentemente do tipo de análise, em casos mais complexos a avaliação laboratorial é indispensável para garantir a segurança e assertividade dos novos estudos dada a quantidade de variáveis desconhecidas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Maria Cascão Ferreira de. **Estruturas Isostáticas**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 168 p.

ALVARENGA, Arthur Ribeiro de. **As ligações semirrígidas na análise avançada com zona plástica de portais planos de aço**. 2010. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Ouro Preto, 2010. Disponível em:<
https://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2016/teses/arquivos/tese163.pdf>. Acesso em: jul. de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO (ABRASFE). **Teoria de dimensionamento das seções: verificações de Acordo com os Estados Limites**. São Paulo, 2018. Disponível em:<https://abrasfe.org.br/wp-content/uploads/2018/03/estados_limites.pdf>. Acesso em: ago. de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos Elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2003. Disponível em:<
https://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/pdf/Apontamentos/Livro_MEF_AA.pdf>. Acesso em: jul. de 2021.

BEER, Ferdinand P; JOHNSTON JR., E. Russell. **Resistência dos materiais**. 3 ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995. 638 p.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 9 ed: New York: McGraw-Hill, 2011. 1109 p.

CAMPOS, João Victor de. **Formulação do método dos elementos finitos para a análise elástica linear de vigas de Timoshenko**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015. Disponível em:<
https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6342/4/CM_COECI_2015_2_19.pdf.
 Acesso em: fev. de 2022.

CARMO, Regina M. S. **Efeitos de segunda ordem em edifícios usuais em concreto armado**. 1995. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995. Disponível em:<
https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-24042018-120327/publico/Dissert_Carmo_ReginaMS.pdf>. Acesso em: out. de 2021.

CASTANY, Miquel Portabella. **Procedimiento para cálculo de estructuras por el método de elementos finitos con error prefijado utilizando refinamiento de malla adaptativo**. Tese de especialização-Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports. Barcelona, 2014. Disponível
 em:<<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24512/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: ago. de 2021.

EUROCÓDIGO 3. **Projecto de estruturas de aço**. NP 1993-1-8 (Versão portuguesa). Comité Europeu de Normalização. Bruxelas, 2010.

GONÇALVES, Gonçalo Martins. **Análise dos problemas de não-linearidade e singularidade em otimização topológica de estruturas e materiais com critérios de tensão**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa, 2017. Disponível
 em:<https://run.unl.pt/bitstream/10362/21588/1/Goncalves_2017.pdf>. Acesso em: out. de 2021.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 659 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. **Ligações em estruturas metálicas**. 3 ed. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2004. 88 p.

INSTITUTO TÉCNICO DE LA ESTRUCTURA EN ACERO (ITEA). **Diseño de uniones**. ITEA. Espanha, 2014. Disponível em:<
http://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia_documentacion/itea/previsualizacion/prev_ind_tomo_13.pdf >. Acesso em: set. de 2021.

JORAJURIA, Mauricio; SERVENTE, Florencia. **Steel Framing y sus principales usos en Uruguay**. Universidad de la República. Montevideo, 2015. Disponível em:<http://www.fadu.edu.uy/tesinas/files/2015/12/TESINA_Steel-Framing.pdf>. Acesso em: jul. de 2021.

MARCON, Emmyl; PRAIVA, Zacarias M. Chamberlain. **Cálculo de ligações em estrutura metálica**. Congresso Latinoamericano de Construção Metálica. [s.l.], 2012. Disponível em:<<https://www.abcem.org.br/construmetal/2012/arquivos/Cont-tecnicas/17-Construmetal2012-calculo-de-ligacoes-em-estrutura-metalica.pdf>>. Acesso em: set. de 2021.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARESE, Alexandre Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 363 p.

MASCIA, Nilson Tadeu. **Teoria das tensões**. Universidade Estadual De Campinas Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2006. Disponível em:<<http://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/Tensoes.pdf19042017>>. Acesso em: out. de 2021.

MCCORMAC, Jack C.; CSERNAK, Stephen F. **Diseño de Estructuras de Acero**. 5 ed. Cidade do México: Alfaomega Grupo Editor, 2013. 736 p.

MONTENEGRO, Daniel Alexander Ponce. **Programa computacional didáctico para el aprendizaje del diseño estático y dinámico en ingeniería mecánica**. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito, 2011. Disponível em:< <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4315/1/CD-3929.pdf> >. Acesso em: out. de 2021.

MOHAMMED, Rafiqul Islam. **Finite element analysis of fillet welded joint**. University of Southern Queensland - Faculty of Health Engineering and Science.

Queensland, 2015. Disponível

em:<https://eprints.usq.edu.au/29295/1/Mohammed_R_Snook.pdf>. Acesso em: jul. de 2021.

MOYANO, Rafael Guillermo Estrada. **Estudio de los modos de fallo en uniones atornilladas de materiales compuestos biodegradables**. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, 2019. Disponível em:<https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/30331/TFG_Rafael_Estrada_Moyano.pdf?sequence=1>. Acesso em: out. de 2021.

NAKAHARA, Flávia S. **Análise da viabilidade estrutural e econômica entre estruturas de concreto armado e estruturas metálicas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

OMAN, Simon; NAGODE, Marko. **Bolted Connection of an End-Plate Cantilever Beam: The Distribution of Operating Force**. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, [S.l.], v. 63, n.11, p. 617-627, 2018. ISSN 0039-2480. Disponível em: <<https://www.sv-jme.eu/article/bolted-connection-of-an-end-plate-cantilever-beam-the-distribution-of-operating-force/>>. Acesso em: dez. de 2021.

PINHEIRO, Antonio C. da Fonseca Bragança. **Estruturas metálicas: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 310 p.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: dimensionamento prático**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 382 p.

RINCÓN B, Juan S. **Diseño de conexiones típicas de edificios de acero**. Universidad De Los Andes - Departamento De Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá, 2013. Disponível em:<<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/20078/u671968.pdf?sequence=1>>. Acesso em: jul. de 2021.

ROSARIO, Carlos Chazaro. **Diseño de conexiones**. Gerdau Corsa. México, 2019. Disponível em:<

https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/DISENO%20DE%20CONEXIONES_2019-min-min.pdf >. Acesso em: ago. de 2021

SALINAS, Oscar G. **Diseño de conexiones con AISC-LRFD-1999**. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Cidade do México, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/20078/u671968.pdf?sequence=1>>. Acesso em: jul. de 2021.

SALES, José Jairo; MALITE, Maximiliano; GONÇALVES, Roberto M. **Ligações em estruturas de aço**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1994. Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/bitstream/handle/RIEESC/6211/Sales,JoseJairo_LigacoesEstruturasAco.pdf?sequence=1>. Acesso em: set. de 2021.

SANDOVAL, Miguel Ángel; HERNÁNDEZ, Mario Takeshi Endo. **Conexiones en Marcos para Estructuras de Acero**. Universidad Nacional Autónoma De México, Facultad de Ingeniería. Cidade do México, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/conexiones-en-marcos-para-estructuras-de-acero-141071?c=4ybN6B&d=true&q=*&i=5&v=1&t=search_0&as=0>. Acesso em: out. de 2021.

SANTOS, Arthur Ferreira dos. **Estruturas Metálicas: projeto e detalhes para fabricação**. 3 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1977. 505 p.

SILVA, Felipe Leite. **Avaliação do comportamento estrutural de ligações de viga-coluna parafusadas com cantoneiras duplas na alma**. Dissertação (Pós-graduação) - Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2016. Disponível em: <<http://tede.upf.br/jspui/bitstream/tede/1421/2/2016FelipeLeiteSilva.pdf>>. Acesso em: ago. de 2021.

DA SILVA, Thiago Cunha. **Estudo analítico das teorias de viga de Bernoulli e Timoshenko para condições de contorno variadas**. Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, v. 6, n. 1, p. 57-70, jul. 2019. ISSN 2358-6508. Disponível em: <<https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/2997>>. Acesso em: fev. de 2022.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Dimensionamento de estruturas de aço**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em:<
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/110863/mod_resource/content/0/apostila2012.pdf >. Acesso em: ago. de 2021.

SILVÉRIO, Thaís G. Lima. **Trabalho final análise e dimensionamento de ligações metálicas e base de pilar**. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola De Engenharia. Belo Horizonte, 2015. Disponível em:<
https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOA-BDALHM/1/trabalho_final_liberado.pdf >. Acesso em: out. de 2021.

STEEL DESIGN GUIDE 4. **Extended End-Plate Moment Connections: Seismic and Wind Applications**. American Institute of Steel Construction. [s.l], 2003. Disponível em:<
<http://www.abarsazeha.com/images/ScinteficResources/DesignGuide/DG04.pdf> >. Acesso em: out. de 2021.

VALENCIANI, Vitor Cesar. **Ligações em estruturas de aço**. 1997. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1997.

VASCONCELLOS, Alexandre Luiz. **Ligações em estruturas metálicas volume 2**. Instituto Aço Brasil. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em:<
<http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2016/07/ligacoes-cbca-1.pdf> >. Acesso em: out. de 2021.

VIERO; Edison Humberto. **Isostática: passo a passo**. 3 ed. Caxias do Sul: EDUCS, 2011. 224 p.

VILELA, Paula Moura Leite. **Modelagem de ligações parafusadas pelo método dos elementos finitos**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2016. Disponível em:<
<http://pos.dees.ufmg.br/defesas/790M.PDF>>. Acesso em: out. de 2021.

YAN, Lawrence Tack Wen. **Análise estrutural utilizando o método de elementos finitos de componentes do veículo Baja SAE submetidos a esforços de fadiga.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2011. Disponível em:<http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Trabalhos%20finais/TCC_035_2011.pdf>. Acesso em: out. de 2021.