

ESTRUTURAS METÁLICAS: Automatizando o dimensionamento para esforços axiais

Izadora dos Anjos Nascimento Coe

Mathias Cardoso H Gomes

Allan Silva Ferreira

Hugo Felipe da Silva Pedro

João Pedro Rosa Ferreira

Luan de Carvalho Ramos

Carlos Vitor de Alencar Carvalho



UNIVERSIDADE DE
vassouras

Estruturas Metálicas: Automatizando o dimensionamento para esforços axiais

Izadora dos Anjos Nascimento Coe
Mathias Cardoso H Gomes
Allan Silva Ferreira
Hugo Felipe da Silva Pedro
João Pedro Rosa Ferreira
Luan de Carvalho Ramos
Carlos Vitor de Alencar Carvalho

Editora da Universidade de Vassouras
Vassouras/RJ
2021

© 2021 Universidade de Vassouras
1º Edição 2021

Presidente da Fundação Educacional Severino Sombra (FUSVE)
Marco Antonio Vaz Capute

Reitor da Universidade de Vassouras
Marco Antonio Soares de Souza

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade de Vassouras
Carlos Eduardo Cardoso

Coordenador do curso de Engenharia Civil
Enilson Salino Braga

Editora-Chefe das Revistas Online da Universidade de Vassouras
Lígia Marcondes Rodrigues dos Santos

Diagramação e Layout
Mariana Moss de Souza Macedo

Es884 Estruturas metálicas : automatizando o dimensionamento para esforços axiais. / Organizado por : Isadora dos Anjos Nascimento Coe...[et al.] . - Vassouras, RJ : Editora da Universidade de Vassouras, 2021. E-book (69 p.) ; il.

Disponível em: <http://editora.universidadevassouras.edu.br/index.php/PT/issue/view/220>
ISBN: 978-65-87918-21-1

1. Estruturas metálicas. 2. Cálculo estrutural. 3. Engenharia. 4. Tecnologia. I. Coe, Isadora dos Anjos Nascimento. II. Universidade de Vassouras. III. Título.

CDD 624

Sistema Gerador de Ficha Catalográfica On-line - Universidade de Vassouras

Todos os direitos reservados. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e que não seja para venda ou qualquer fim comercial.

O texto é de responsabilidade de seus autores. As informações nele contidas, bem como as opiniões emitidas, não representam pontos de vista da Universidade de Vassouras.

Sumário

Apresentação	6
Introdução	7
Fundamentação Teórica	10
Materiais e Métodos	16
Conhecendo a Ferramenta Computacional – Bizagi Modeler	20
SMath Studio	22
Desenvolvimento do roteiro	23
Fluxogramas	23
Desenvolvimento	23
Conceitos fundamentais - Barras de aço comprimidas	24
Conceitos fundamentais – Barras de aço tracionadas	32
Conceitos fundamentais – Chapas de aço tracionadas	38
Fluxogramas de cálculo	41
Roteiro de Cálculo	41
Roteiro de Cálculo – Perfil I submetido à compressão axial	44
Roteiro de Cálculo – Cantoneiras de abas iguais submetidas ao esforço de tração	48
Roteiro de Cálculo – Chapas soldadas submetidas ao esforço de tração	51
Conclusão	55
Referências Bibliográficas	56
Sobre os autores	61
Apêndice	62
Índice Remissivo	69

Agradecimentos

Primeiramente agradecemos a Deus que nos guiou até aqui. Sem Ele nosso sonho não se tornaria realidade. Também gostaríamos de agradecer aos nossos familiares que nos apoiaram e foram compreensivos por todas as vezes que estivemos distantes dos laços familiares devido aos estudos. Ao nosso orientador, por ter confiado no nosso potencial para que nosso e-book fosse desenvolvido. À Universidade de Vassouras por ter nos instruído da melhor maneira possível e sem dúvidas, agradecer ao corpo docente do curso de Engenharia Civil por todo ensinamento.

Apresentação

A evolução da área tecnológica vem ocasionando um desempenho formidável no que se refere a divulgação de informações em diversas áreas, principalmente na área educacional. Este e-book tem como objetivo tornar mais dinâmico e simples o estudo de estruturas metálicas, apresentando os conceitos fundamentais propostos e demonstrando como eles podem ser empregados em associação ao software *Smath Studio* que possibilita a automatização dos cálculos aplicados. Serão demonstrados três casos específicos, que são indispensáveis para o estudo inicial do tema. Através do desenvolvimento de roteiros automáticos, respaldados por materiais didáticos de Instituições de Ensino Superior, obteve-se soluções coerentes. Haja vista que o itinerário de verificações contém uma gama considerável de detalhes e, na busca por eliminar possíveis chances de erro, todo processo foi elaborado deixando ao usuário do roteiro apenas a função de informar os dados iniciais do perfil a ser analisado. Nos capítulos destinados à metodologia científica e desenvolvimento será explicitada a base conceitual por trás de todos os exemplos utilizados no *SMath Studio* (o processo de cálculo “geral”), para que o leitor tenha embasamento suficiente para dar continuidade ao chegar na resolução das questões. Além da esfera educacional, foco deste trabalho, é interessante destacar que existe a possibilidade de aperfeiçoamento do mesmo. De modo a ser também utilizado profissionalmente, os ganhos de tempo e precisão matemática viabilizam que futuramente outros autores utilizem o mesmo método e desenvolvam roteiros ainda mais completos para exemplos como os apresentados aqui e, também roteiros que contemplem as demais verificações, como por exemplo, momento fletor e cisalhamento, ressaltando também que tais incrementos, ao mesmo passo que aprimoram a aplicação profissional, complementam a educacional.

Introdução

Segundo Coelho (2016), o momento atual é de uma nova revolução industrial, a quarta revolução, que também é chamada de Indústria 4.0. Tal revolução é impulsionada pelo desenvolvimento e utilização de tecnologias, cada vez mais úteis e ágeis. As mudanças ocorrerão não só na indústria, mas também na forma de escolher produtos e serviços, além de influenciar na forma de relacionamento de modo geral.

Pacheco (2017), traz um resumo sobre o que é a Indústria 4.0:

“Em linhas gerais, as tecnologias utilizadas na Indústria 4.0 contribuem de forma significativa para redução de custos, encurtamento de prazos, aumento da produtividade, crescimento da capacidade de processamento de informação e transformação de dados, alocação de recursos mais eficiente e maior integração entre os mundos real e virtual.” (Pacheco, 2017)

Com o passar do tempo, a tecnologia passou a ser grande aliada de todos. Aplicativos para smartphones e programas de computador estão presentes na rotina de bilhões de pessoas, ao redor do mundo.

A Engenharia não fica atrás do contexto atual, a era digital facilita e flexibiliza muito o trabalho dos profissionais, bem como do processo de aprendizagem dos estudantes.

Atualmente, podem ser criadas ferramentas computacionais para automatizar processos; reduzindo tempo para executar tarefas, que antes eram realizadas manualmente. Além disso, a automatização minimiza as chances de erro humano.

De acordo com Freitas (2015), a Indústria da Construção Civil, no Brasil, funciona de forma arcaica, onde os métodos de produção e gestão são ultrapassados. A produtividade e padronização dos serviços são baixos, enquanto que os índices de desperdício são altos.

O trabalho de Rodrigues, Dias e Mendes (2018), que apresenta a otimização do

dimensionamento de viga com seção "T" de concreto armado, traz a importância da criação de ferramentas digitais para a Engenharia, principalmente na área estrutural:

"Atualmente, com os avanços tecnológicos inseridos na sociedade pode-se executar tarefas rapidamente, tarefas que antes demandavam muito tempo, como o dimensionamento destes elementos estruturais. Com esses avanços, o mercado de trabalho se tornou mais exigente, buscando sempre novas soluções para aumentar a velocidade de trabalho. A elaboração de aplicativos de automação, tecnologias da comunicação e informação na área de Engenharia Civil é cada dia mais frequente." (RODRIGUES, DIAS E MENDES, 2018)

Este trabalho visa contribuir com a modernização da Engenharia e do ensino da mesma, criando roteiro automatizado, para o dimensionamento de perfis metálicos; fazendo uso do *software SMath Studio*.

Conforme Guanabara (2010), as estruturas metálicas são muito utilizadas em países desenvolvidos, tendo em vista as vantagens deste modo de construção, que implica uma mínima interferência ao entorno e proporcionam obras limpas e rápidas. Outras vantagens importantes são a confiabilidade na resistência do material, por ser produzido em ambiente industrial e a utilização de peças menores na obtenção de grandes vãos.

De acordo com Pinto (2018), para dimensionar os perfis metálicos, segue-se lógica de verificação quanto aos esforços solicitantes. Sendo assim, deve-se identificar a resistência do perfil escolhido e comparar com o esforço solicitante conhecido. A resistência do perfil deve ser maior que a solicitação, garantindo a estabilidade da estrutura.

Ainda conforme Pinto (2018), podem ser verificados quanto à tração, compressão, flexão, cortante, flexotração e flexocompressão. Os perfis metálicos podem ser classificados conforme sua produção, sendo assim podem ser:

- Formados a frio – produzidos por conformação a frio;
- Soldados – formados por soldagem de chapas; e
- Laminados – obtidos por laminação a quente.

Este trabalho apresentará o roteiro, automatizado, desenvolvido para a verificação de compressão para perfis metálicos do tipo “I”; além da verificação de tração para cantoneiras de abas iguais e chapas. Os perfis aqui estudados são do tipo laminado.

O *SMath Studio* foi o software escolhido para fazer o desenvolvimento dos roteiros aqui apresentados, por suas características que favorecem às ideias aqui propostas para o desenvolvimento do trabalho.

O *SMath Studio* apresenta interface, simples, amigável e intuitiva, possibilitando a utilização por pessoas que não conhecem linguagens de programação, que seria uma outra forma para automatizar os cálculos por meio de aplicativos.

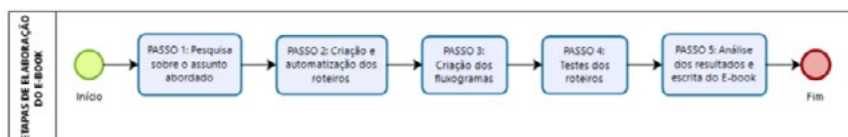
A interface do *software* se assemelha a softwares de edição de texto, amplamente conhecidos, facilitando mais uma vez a usabilidade aos usuários. Além de cálculos é possível acrescentar textos, que podem ser notas orientando ao usuário como utilizar o roteiro. Essas vantagens acrescentam valor para o propósito educativo.

Outra vantagem, que favorece o intuito de contribuir com o ensino, é a maneira como as fórmulas são expostas, sendo deixadas à mostra; diferente de planilhas que mostram apenas resultados. As equações expostas seguindo sequência para dimensionamento, fortalecem ao usuário como devem ser feitos os cálculos.

Após o desenvolvimento dos roteiros, foram criados fluxogramas, com as etapas de cálculo, utilizando a ferramenta *Bizagi*.

Em resumo, o trabalho se desenvolveu como representado na figura 1:

Figura 1 – Etapas de elaboração do E-book



Fonte: Os Autores (2021)

Fundamentação Teórica

Com propósito de elaborar um trabalho com uma fundamentação teórica que possibilite avaliar e selecionar as produções científicas correlacionadas ao assunto deste e-book, fez-se necessário desenvolver uma Revisão Sistemática da Literatura, também chamada de RSL. Nessa etapa pretende-se: filtrar produções acadêmicas que utilizem a evolução tecnológica a favor de aplicações educacionais, que abordem a respeito de engenharia estrutural e, mais especificamente, estruturas metálicas. Sendo desejável também produções que apontem para otimização de tarefas profissionais da área de engenharia a partir do uso da tecnologia. Utilizando o Google Acadêmico como meio de busca, através de palavras-chave relacionadas a engenharia estrutural, educação e modelagem computacional, chegou-se em 5 trabalhos criteriosamente selecionados a fim de reforçar a relevância de contribuições como esta. Os referidos trabalhos constam no Quadro 1, a seguir:

Quadro 1 - Revisão sistemática da literatura

Autor	Título	Ano
Alan Rodrigo Simsen	Programa computacional para verificação de perfil I laminado ou soldado conforme NBR 8800: 2008	2014
Giles Bortolon Leitão	Análise numérica de segunda ordem de pórticos planos de estruturas de aço	2014
Gabriela Karina Morais de Mello	Software educacional para dimensionamento de ligações em madeira por pinos metálicos	2017
Jesse Wille Gondim Pinto	Desenvolvimento de aplicativo Android para verificação de perfis de aço	2018
Felipe Castelli Sasso Fernando Busato Ramires Zacarias Martin Chamberlain Pravia	Aplicativo Android para o dimensionamento de perfis de aço formados a frio de acordo com a ABNT NBR 14762: 2010	2019

Fonte: Os Autores (2021)

Em Simsen (2014), foi estudado o tema “PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA VERIFICAÇÃO DE PERFIL I LAMINADO OU SOLDADO CONFORME NBR 8800: 2008”. O trabalho aponta a crescente demanda por projetos estruturais mais arrojados e destaca o curto prazo para que sejam elaborados, com isso mostra a importância do uso de softwares que facilitem e agilizem as rotinas de trabalho dos

profissionais projetistas. Portanto o estudo segue com a proposta de desenvolver um programa de computador, com a linguagem de programação Visual Basic, capaz de verificar perfis I, laminados e soldados, submetidos a esforços como flexão, tração, compressão, cisalhamento e combinações desses esforços. Visando otimizar o trabalho dos profissionais da área de estruturas metálicas e auxiliar os estudantes em seu aprendizado. Os resultados se mostraram satisfatórios e foi obtido um software de precisão segura, que proporcionou significativo ganho de tempo nas verificações e oferece o recurso de geração de relatório, demonstrando os procedimentos aplicados pelo programa.

Em Leitão (2014), estudou-se o tema "Análise numérica de segunda ordem de pórticos planos de estruturas de aço". O trabalho abordou determinadas temáticas a fim de dar suporte à sua própria proposta, das quais aponta-se: A carga de Euler é a base da teoria de barra elástica comprimida, quando se considera uma barra reta, rotulada nas extremidades, prismática, cuja carga é corretamente centralizada, suficientemente esbelta para flambar a uma tensão abaixo da baliza de proporcionalidade do material (GALAMBOS, 1988).

Iu et al. (2008) descrevem que apesar da fórmula de Euler para a carga crítica elástica de um pilar esbelto ser a fórmula mais antiga de engenharia, continua sendo usada até os dias de hoje. Ainda segundo o autor, Engesser e Shanley (1947) fizeram modificações dessa fórmula para o comportamento inelástico e, Timosehenko e Gere (1961) realizaram um estudo analítico de flambagem à flexão de um pilar adotando diferenciadas condições de apoio. Utilizando a solução teórica de flambagem de um pilar, pode-se avaliar o efeito de instabilidade sobre um pilar ideal com diferentes condições de apoio, por meio do comprimento imaginário do elemento, conhecido como comprimento efetivo, ou coeficiente da flambagem k .

A resistência da barra comprimida tem como característica a máxima força axial suportada sem deformações laterais excessivas. Assim, mesmo quando existe uma deformação inicial e/ou "uma excentricidade inicial da carga, a carga máxima de resistência da barra, P_{max} , se aproxima da carga de Euler assintoticamente enquanto o material permanecer elástico. (GALAMBOS, 1988, p. 123).

Segundo Galambos (1988) foi Shanley (1947) quem possibilitou uma melhor compreensão do comportamento pós-flambagem de barras comprimidas inelásticas, elucidando que uma barra comprimida inelástica perfeita irá começar

um deslocamento lateral quando $P = P_t$ e $P_t < P_{max} < P_r$.

Pereira (2002) descreve que a formulação clássica para problemas de otimização de dimensões procura tornar mínimo o peso de uma estrutura, adotando a hipótese do comportamento geométrico e linear físico, buscando uma simplificação das etapas de análise estrutural, assim como da avaliação da sensibilidade, proporcionando o aumento da eficiência, auxiliando para a popularização da otimização. Para o autor, geralmente a formulação clássica produz projetos seguros e econômicos, no entanto, algumas vezes o modelo linear não possibilita a correta avaliação da capacidade de carga da estrutura.

Neste sentido, a não linearidade geométrica se está se tornando cada vez mais relevante, originando “vários fenômenos que não são encontrados em sistemas lineares, como a existência de múltiplas configurações de equilíbrio (estáveis e instáveis) e de pontos críticos (limite e bifurcação) ao longo do caminho não linear” (PEREIRA, 2002, p. 22).

Galambos (1988) defende que, de maneira geral, deve-se determinar os esforços das barras comprimidas levando-se em consideração as imperfeições geométricas e de materiais, e não a linearidade de material e os efeitos de tensão residual. As estruturas de aço e placas possuem tensões residuais resultantes, especialmente, do processo de resfriamento desigual após a laminação. Nas soldagens em edificações os elementos apresentam tensões residuais de tração nas proximidades das soldas em decorrência do resfriamento do metal de solda.

Galambos (1988, p. 129) destaca que o principal modo de falha de pórticos de aço estrutural é a instabilidade. Geometricamente os pórticos são imperfeitos, isto significa que os níveis dos andares não se encontram corretamente em prumo. Tal imperfeição, está dentro de limites de tolerância especificados, resultando num deslocamento espacial desde o começo do carregamento. “É conveniente tratar o movimento de qualquer ponto de um pórtico como sendo composto de duas partes: os deslocamentos nodais do pórtico (deslocamentos globais), e os deslocamentos dos elementos (deslocamentos locais).

Nardi et al. (2011) ponderam que é fundamental a realização da análise de instabilidade global, que deve ser considerada como parte integrante da fase de cálculo do projeto, tendo por objetivo a garantia de segurança das estruturas. Os autores pontuam que a análise de estabilidade e cálculo das estruturas pode ser realizada de três maneiras: método do comprimento efetivo; análise de primeira

ordem; método da análise direta.

A ABNT NBR8800:2008 delibera que a análise estrutural tem como objetivo determinar os efeitos das ações na estrutura, tendo como disposição a realização de verificações de estados-limites últimos e de serviço, realizada dentro de um modelo realista, que possibilita a representação da resposta da estrutura e dos materiais estruturais, levando-se em consideração as deformações provocadas por todos os esforços solicitantes considerados relevantes.

Segundo Ficanha et al. (2012), Ormonde e Souza (2012), o estudo da não linearidade por meio de análises estruturais foi estimulado pelo desenvolvimento computacional, pois com o avanço tecnológico dos computadores e softwares de projeto, as análises avançadas estão ganhando cada vez mais novos espaços nos escritórios de engenharia.

No entanto, conforme destacam Osmonde e Souza (2012) esse avanço também pode também conter riscos e erros. Muitas estruturas têm sofrido colapso devido ao uso inadequado dessas novas ferramentas tecnológicas. Para os autores é imprescindível que os usuários conheçam profundamente a ferramenta que estão utilizando para não incorrer em erros irreparáveis.

Os programas podem resultar em erros, especialmente quando não são bem compreendidos. Por isso, é importante que os métodos e processos sejam simplificados e que estejam alinhados com os fundamentos teóricos adequados das análises que serão utilizadas, para que os engenheiros tenham a possibilidade de perceber os erros nos casos em que estes ocorrem (OSMONDE; SOUZA, 2012).

No trabalho de Mello (2017), tratou-se acerca da proposta “*Software educacional para dimensionamento de ligações em madeira por pinos metálicos*”. Foi apresentado o desenvolvimento de um software para dimensionamento de elementos de madeira ou entre elementos de madeiras e chapas de aço utilizando pinos metálicos, com base na EUROCODE 5 (2004) e na norma ABNT NBR (1997) que foi revisada devido a fragilidades em seu modelo de dimensionamento de ligações.

Tendo em vista que há poucas ferramentas com base nessa metodologia da norma, houve a necessidade do desenvolvimento de um software para realizar o dimensionamento de uma forma mais rápida e precisa já que os cálculos manuais eram demorados.

Além do desenvolvimento do software, o trabalho apresentado visa também

apresentar o novo modelo de cálculo revisado da norma ABNT NBR 7190 (1997), compreender os fenômenos que tratam a resistência de ligações em madeira através de pinos metálicos, validar os resultados encontrados no software através de comparações com exemplos teóricos e elaborar um guia de uso contendo suas propriedades e mostrando suas limitações.

No desenvolvimento do *software* foi utilizado o pacote JDK 8 e o *software* NetBeans IDE 8.2, além de uma linguagem

de programação do Java, que por sua vez, possui uma linguagem orientada por objetos, ou seja, todos os elementos são inseridos como objetos.

O trabalho de Pinto (2018), apresenta o desenvolvimento de um aplicativo para smartphones com sistema operacional Android, com objetivo de implementar sequências de dimensionamento para os esforços de tração, compressão, flexão, cortante, flexotração e flexocompressão.

Além do desenvolvimento do aplicativo, o trabalho visa ainda compreender os cálculos necessários para a determinação dos esforços resistentes combatentes às solicitações mais comuns em perfis laminados de aço.

O trabalho traz informações sobre os tipos de perfis de aço e as propriedades do aço, além de conceituação sobre os esforços que devem ser resistidos e os critérios para o dimensionamento.

O aplicativo foi criado utilizando o software, para computadores, Android Studio.

Concluiu-se que o aplicativo desenvolvido se mostrou competente para a verificação de perfis laminados de aço. Tendo apresentado resultados satisfatórios se comparados aos resultados da ferramenta computacional mCalc3D e de acordo com as soluções propostas pela literatura.

Em Sasso, Ramires e Pravia (2019), foi abordada a apresentação e criação de um aplicativo (PFF-NBR14762) desenvolvido para verificação de dimensionamento de perfis de aço formados a frio conforme a norma ABNT NBR 14762:2010. O Software utilizado para desenvolvimento para o aplicativo foi o ambiente integrado Android Studio em linguagem de programação Java, para verificar os resultados encontrados foi realizada uma análise comparativa com os resultados encontrados no *Software* comercial mCalc3D, em relação aos resultados quanto

a resistência à compressão, a resistência ao cisalhamento e a resistência à flexão dos perfis U, para isso foram escolhidos perfis padronizados das tabelas do Anexo A da norma em questão. O trabalho ainda destaca a importância do uso de softwares que automatizem as rotinas de cálculos dos profissionais da área, aumentando a produtividade e o tempo disponível para buscar e testar soluções, este aplicativo foi publicado no Google Play, com seu download gratuito que permite acessibilidade para todos interessados.

Materiais e Métodos

Perfis de aço

O aço é um material bastante utilizado nas construções civis por ser um material leve, flexível e de boa durabilidade, possui também outras boas vantagens, tais como: agilidade no andamento da obra, evitar desperdício de material já que as peças já vêm prontas, precisando apenas fazer a montagem, e se comparado com peças de concreto por exemplo, pode se utilizar peças menos robustas vencendo o mesmo vão, e desvantagens como: precisar de uma mão de obra especializada, alto custo entre outras.

A composição do aço influencia diretamente na necessidade da sua aplicação. Existem diversos tipos de aço sendo diferenciados pelo seu formato, tamanho, uniformidade dos grãos e sua composição química.

O aço é formado por liga de ferro misturado com carbono, onde seu teor de carbono é inferior a 2,11%, porém no mercado geralmente não passa de 1% para evitar sua alta dureza.

Aço de alto carbono: entre 0,50% a 2,11%;

Aço de médio carbono: entre 0,20% a 0,49%;

Aço de baixo carbono: entre 0,05% a 0,20%;

Aço extra baixo: entre 0,015 e 0,05%;

Aço ultrabaixo: abaixo de 0,015%.

Outros elementos também são misturados no aço: manganês (Mn), silício (Si), fósforo (P) e o enxofre (S).

As principais características para o uso do aço na construção civil são pela alta tensão de escoamento, alta tenacidade, boa soldabilidade, homogeneidade micro estrutural, susceptibilidade de corte por chama sem endurecimento e boa trabalhabilidade.

Na construção civil os aços utilizados são aqueles com boas propriedades de resistências, ductibilidade entre outras coisas que os fazem com que eles sejam empregados em elementos que suportem cargas, tendo como um fator preocupante a corrosão do material.

Perfis laminados

Os perfis laminados a quente são produzidos a partir da laminação de blocos de aço em um sistema de laminação contínua, tendo limitações na fabricação devido às próprias cadeiras de laminação que impõem uma bitola de altura máxima e mínima.

Figura 2 - Formato de perfis de aço laminados.

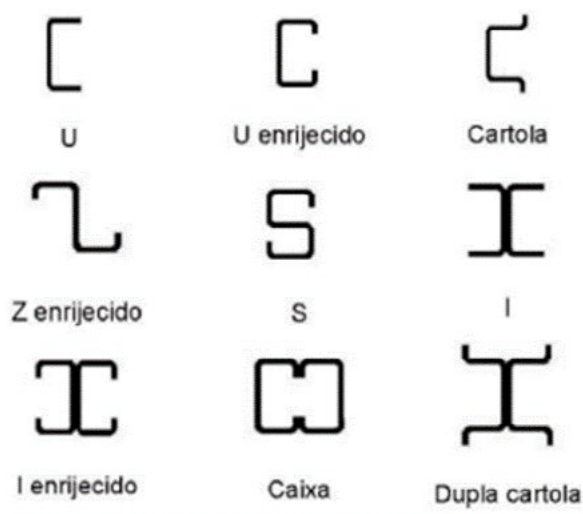


Fonte: Arquitetura + Aço, por Felipe Schmitzhaus (2015).

Perfis formados a frio

Não são formados através do calor, como a maioria dos aços, ele é produzido com roletes e prensas que dão o tamanho e formato, resultando em um material leve e um pouco elástico. Diferente do aço laminado a quente, o aço formado a frio tem facilidade para ser dobrado, mudando o seu formato.

Figura 3 – Perfis formados a frio.

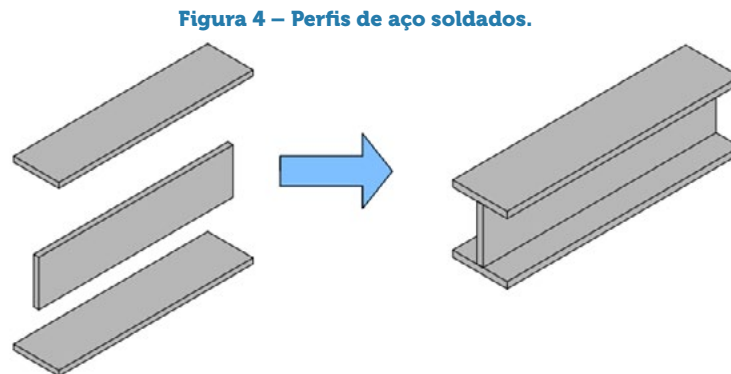


Fonte: FULL ESTRUTURAS (2016).

Perfis de aço soldados

São fabricados por meio de chapas de aço, moldadas com formatos diferentes. Para conseguir tais formatos, eles passam por um procedimento chamado soldagem, duas das diversas técnicas de soldagem é a elétrica ou eletrofusão.

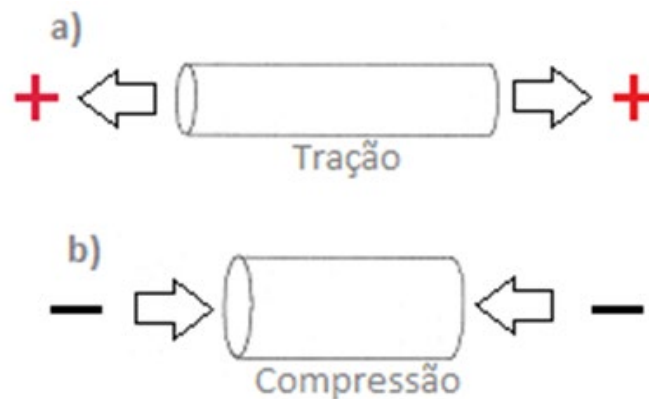
Os perfis soldados possuem designações como VS, CS e CVS. O VS é utilizado em vigas, o CS é utilizado em colunas e o CVS em locais onde a ação de viga e coluna.



Fonte: Os Autores (2021).

A tração e a compressão são um dos tipos de esforços simples que ocorrem em um corpo, opostas uma das outras, ocorrem de acordo com o sentido da sollicitação em suas seções, sejam elas transversais ou longitudinais. Quando a sollicitação estiver se encaminhando para fora do corpo, isso resultará no alongamento dela, dando o nome de esforço de tração, e quando a sollicitação estiver indo em sentido ao centro da peça, causando um encurtamento ou esmagamento dela, se chamará esforço de compressão.

Figura 5 – Forças axiais atuantes.



Fonte: Silva et al. (2017)

O aço apresenta algumas características mecânicas importantes realizadas com base em diversos tipos de ensaios, são eles: resistências à tração, elasticidade, ductilidade, resiliência, dureza e tenacidade

Resistência à tração: De acordo com que uma carga é aplicada no aço, vai ocorrendo um estreitamento progressivo no meio do corpo de prova do material, e conforme essa carga vai aumentando, vai diminuindo a seção do mesmo até que ele rompa.

Elasticidade: Capacidade que o material tem de se deformar sem que haja deformações plásticas, e de retornar ao seu estado original quando a carga é cessada.

Ductilidade: Capacidade que o aço possui se deformando até chegar na ruptura, quanto maior a deformação, maior é a sua ductilidade. Quando o material se rompe sem se alongar, o material é caracterizado como frágil.

Resiliência: Está associado a capacidade elástica do material, quando um material está submetido a esforço e estiver no regime plástico, o corpo absorve a energia que está sendo solicitada a ele, e se recupera quando a força aplicada nele é cessada.

Dureza: Último estado do material antes de ocorrer a ruptura, é nesse período que o material é testado, o quanto ele suporta caso sofra um impacto.

Tenacidade: Capacidade de absorção de energia, porém, diferente da resiliência que o absorve apenas no regime plástico do material, a tenacidade absorve também até o momento da ruptura.

Diferente do concreto, que possui baixa resistência a tração, o aço possui uma alta resistência a tração, fazendo com que ele absorva os esforços solicitantes.

Outro fator importante em relação ao aço é saber sua tensão de escoamento, pois é com base nela que se obtém seus valores de resistências a tração e compressão, podendo assim fazer seu dimensionamento de forma adequada sem que haja problemas, e uma das poucas preocupações que se deve ter é em relação a corrosão e a perda de resistência quando o aço for exposto a ambientes de alta temperatura.

Conhecendo a Ferramenta Computacional – Bizagi Modeler

O software *Bizagi Modeler* foi desenvolvido através dos estudos de *Business Process Model and Notation* (BPMN) (em português Notação de Modelagem de Processos de Negócio), que tem como principal objetivo facilitar a compreensão de processos pelas pessoas. Devido a isso, a modelagem de processos se destacou mundialmente, tanto no mercado quanto na academia (CAMPOS, 2014).

Segundo Oliveira e Neto (2009), por meio dos processos operacionais, é possível compreender a instituição como um todo, identificar sua estrutura, idealizar e implementar melhorias, se forem necessárias. Dessa forma, os principais objetivos da modelagem de processos podem ser compreendidos sequencialmente como mostrado abaixo, na Figura 6.

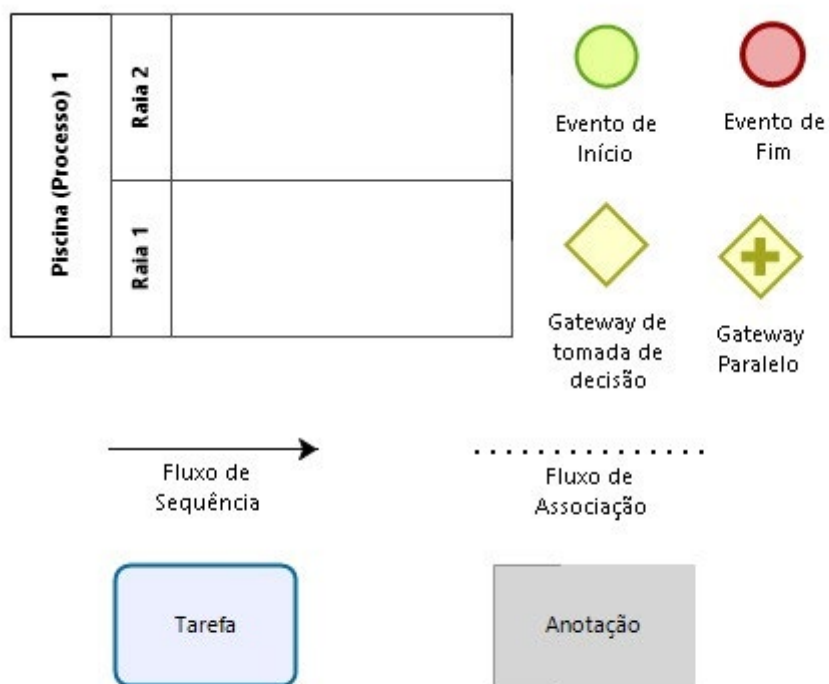
Figura 6 – Objetivos da modelagem de processos.



Fonte: Adaptado de Oliveira e Neto (2009, p.41)

Em sua padronização, a modelagem BPMN tem como ferramenta uma seleção de elementos sistematizados por um Diagrama de Processos de Negócio (DPN). A estrutura desse diagrama, é composta por piscinas (que representam uma empresa, por exemplo) e por raias (que representam os setores dessa empresa) e eventos, tarefas e gateways, que identificam as atividades e tomadas de decisões dentro de um processo. A Figura 2 representa os elementos mais utilizados durante o curso prático e o cotidiano de modelagem de processos.

Figura 7 – Os elementos básicos do DPN.



Powered by
bizagi
Modeler

Fonte: Os Autores (2021)

SMath Studio

O *SMath Studio* é um software matemático, gratuito, disponível para computadores, mas também possui versões para dispositivos móveis, como sistema operacional Android ou IOS. A interface do programa remete a um editor de texto convencional, o que traz familiaridade para o uso da maioria dos usuários.

O *SMath Studio* pode ser comparado a um caderno virtual; com uma folha em branco, o usuário pode adicionar equações, que são calculadas automaticamente, após aplicação de valores às variáveis.

O menu, presente na lateral direita do programa, fornece facilidade de uso, disponibilizando operadores, funções e símbolos matemáticos, que podem ser inseridos com um clique.

Outra funcionalidade, facilitadora, é possibilidade de inserção de texto. Assim, o usuário pode criar notas explicativas sobre as etapas de um roteiro, auxiliando na aprendizagem de quem possa vir a fazer uso futuramente.

O *SMath Studio*, possui funcionalidade de tomada de decisão como a função if (se), trazendo a facilidade de fazer verificações e escolher valores, de acordo com os parâmetros já estabelecidos.

As variáveis podem ser adicionadas antes das equações, onde recebem valores. Assim após os cálculos serem realizados, é possível alterar valores, buscando resultados diferentes, sem a necessidade de refazer as formulações. Um roteiro de cálculo, uma vez desenvolvido, pode ser utilizado inúmeras vezes, apenas alterando valores. Por exemplo, dimensões podem ser alteradas, resultando em novos valores de resistência, no caso de verificações estruturais.

Outra funcionalidade importante da ferramenta, é a verificação de condições, como comparações entre valores. A resposta da verificação é emitida de modo binário, onde "1" representa verdadeiro e "0" falso.

Uma característica interessante do *SMath Studio*, é a forma de exposição dos cálculos; como foi mencionado, o programa traz a aparência de um caderno, onde as equações ficam a mostra, possibilitando a quem vai utilizar o roteiro, mesmo que esteja automatizado, entenda o processo de cálculo.

Desenvolvimento do roteiro

Partindo de pesquisas em materiais didáticos de instituições de ensino, encontrou-se as etapas de dimensionamento de perfis metálicos. A automatização do roteiro ficou por conta do programa *SMath Studio*, tornando o processo de cálculo mais rápido e eliminando chances de erro humano ao fazer o dimensionamento.

Este trabalho visou o desenvolvimento de roteiro automatizado para a verificação de compressão de perfis metálicos do tipo "I"; além da verificação de tração para chapas e cantoneiras de abas iguais.

No desenvolvimento do roteiro, com o *software Smath Studio* foram inseridas todas as equações necessárias. Além das equações foram adicionadas as variáveis (dados de entrada).

Com o objetivo de testar e demonstrar o funcionamento da automatização, foi feito o dimensionamento de alguns perfis.

Fluxogramas

O dimensionamento dos perfis, mesmo sendo relativamente simples, é formado por muitas etapas, o que pode gerar algum tipo de confusão durante o processo de aprendizagem.

Mesmo o roteiro automatizado deixando as equações de dimensionamento expostas e em sequência, foram criados fluxogramas, utilizando a ferramenta *Bizagi*.

O intuito dos fluxogramas é complementar o processo de aprendizagem, sendo um material que pode ser consultado enquanto se utiliza o roteiro.

Desenvolvimento

Atenção: as referências normativas que serão apontadas são todas obtidas a partir da **NBR 8800: 2008**.

Conceitos fundamentais - Barras de aço comprimidas

Os elementos que compõem as seções transversais recorrentes (com exceção das seções tubulares circulares) perante efeito de flambagem local, são definidos conforme tabela 1:

Tabela 1 – Esbeltez local.

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	<ul style="list-style-type: none"> Mesas ou almas de seções tubulares retangulares Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas 		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções I, H ou U Mesas ou almas de seção-caixão Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	<ul style="list-style-type: none"> Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento 		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U laminadas Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas 		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U soldadas^a 		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$
	6	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções T 		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

^a O coeficiente k_c é dado em F.2.

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

Nota: AA (Apoio-Apoio, ou seja, duas bordas longitudinais vinculadas).

AL (Apoio-Livre, ou seja, apenas uma borda longitudinal vinculada).

Caso AA (Apoio - Apoio)

Nas barras submetidas ao esforço de compressão axial deve-se avaliar todos os elementos da seção transversal quanto à relação λ , de modo que aqueles que não ultrapassem o valor de λ_{lim} têm o Coeficiente de Redução (Q_a) igual a 1,00. Ou seja, se $\lambda \leq \lambda_{lim}$, $Q_a = 1,00$. Seguem as equações aplicadas para que sejam realizadas essas verificações:

Equação 1- Esbeltez Local.

$$\lambda = \frac{b}{t}$$

Onde:

- b é a largura
- t é a espessura

Equação 2 – Esbeltez Local Limite.

$$\lambda = \lambda_{lim} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y} \frac{b}{t}}$$

Onde:

- E é o módulo de Elasticidade do aço; e
- f_y é a resistência de escoamento do aço.

Nas barras submetidas ao esforço de compressão axial deve-se avaliar todos os elementos da seção transversal quanto à relação λ , de modo que aqueles que ultrapassem o valor de λ_{lim} (peças esbeltas) têm o Coeficiente de Redução (Q_a) dado por:

Equação 3 – Coeficiente de Redução (Q_a).

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}$$

Onde:

- A_g é a área bruta da seção transversal; e
- A_{ef} a área efetiva da seção transversal, dada por:

Equação 4 – Área Efetiva da Seção Transversal (A_{ef}).

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef}) \cdot t$$

Onde:

- b é a largura de um elemento comprimido AA (Conforme tabela 1)
- t é a espessura de um elemento comprimido AA (Conforme tabela 1)
- b_{ef} é a largura efetiva de um elemento comprimido AA, definido por:

Equação 5 - Largura Efetiva.

$$b_{ef} = 1,92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \cdot \left[1 - \frac{c_a}{\left(\frac{b}{t}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b$$

Onde:

- t é a espessura;
- E é o módulo de Elasticidade do aço;
- c_a vale 0,38 para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e 0,34 para os demais casos;
- b é a largura; e
- σ é a tensão atuante no elemento.

Cabe destacar que a tensão (σ) pode ser calculada pela seguinte equação, desde que x seja obtido conforme o item 5.3.3, adotando-se Q = 1,00:

Equação 6 - Tensão atuante

$$\sigma = x \cdot f_y$$

Onde:

- x é o fator de redução associado à resistência à compressão; e
- f_y é a resistência de escoamento do aço.

OBS 1.: O cálculo da variável x será apresentado mais adiante.

OBS 2.: A norma permite adotar:

Equação 7 - Tensão atuante adotada.

$$\sigma = f_y$$

Caso AL (Apoio - Livre)

Nas barras submetidas ao esforço de compressão axial deve-se avaliar todos os elementos da seção transversal quanto à relação λ , de modo que aqueles que não ultrapassem o valor de λ_p têm o Coeficiente de Redução (Q_s) igual a 1,00. Ou seja, se $\lambda \leq \lambda_p$, $Q_s = 1,00$. Seguem as equações aplicadas para que sejam realizadas essas verificações:

Equação 8 - Esbeltez local.

$$\lambda = \frac{b}{t}$$

Onde:

- b é a largura; e
- t a espessura.

Equação 9 – Esbeltez Local Limite Inferior.

$$\lambda_p = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Onde:

- E é o módulo de Elasticidade do aço; e
- f_y é a resistência de escoamento do aço.

Nas barras submetidas ao esforço de compressão axial deve-se avaliar todos os elementos da seção transversal quanto à relação λ , de modo que aqueles que ultrapassem o valor de λ_p (peças esbeltas) torna-se necessário realizar a verificação dos limites de esbeltez da peça. Ou seja, se $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, conforme equações abaixo:

Equação 10 – Esbeltez Local Limite Superior.

$$\lambda_r = 1,03 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Caso a verificação $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ seja verdadeira, o Coeficiente de Redução (Q_s) é dado por:

Equação 11 – Coeficiente de Redução (Q_s).

$$Q_s = \frac{0,69 \cdot E}{f_y \cdot \lambda^2}$$

Caso a verificação $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ seja falsa, o Coeficiente de Redução (Q_s) é dado por:

Equação 12 – Coeficiente de Redução (Q_s).

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

Por conseguinte, é necessário determinar o Coeficiente de Redução Total (Q), definido por:

Equação 13 – Coeficiente de Redução Total.

$$Q = Q_s \cdot Q_a$$

Onde:

- Q_a e Q_s são Coeficientes de Redução que consideram os efeitos de instabilidade da peça (flambagem local dos elementos AA e AL).

Vale ressaltar que:

caso a seção possua apenas elementos AL:

$$Q = Q_s$$

caso a seção possua apenas elementos AA:

$$Q = Q_a$$

Força Axial de Flambagem Elástica e Coeficiente de Flambagem

Para calcular a Força Axial de Flambagem Elástica (N_e) de uma barra com seção transversal, simétrica em relação a um ponto ou duplamente simétrica, sabe-se que:

Os coeficientes de flambagem são definidos conforme tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes de Flambagem.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio						

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

Forças Axiais de Flambagem Elástica

Equação 14 – Flambagem por flexão em relação ao eixo x.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_y)^2}$$

Onde:

- K_x é o coeficiente de flambagem (fornecido na tabela 2);
- L_x é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x; e
- I_x é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x.

Equação 15 – Flambagem por flexão em relação ao eixo y.

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2}$$

Onde:

- K_y é o coeficiente de flambagem (fornecido na tabela 2);
- L_y é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y; e
- I_y é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y.

Equação 16 – Flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z.

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot I_t \right]$$

Onde:

- r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento
- K_z é o coeficiente de flambagem por torção (fornecido no item E.2.2 da NBR 8800: 2008);
- L_z é o comprimento de flambagem por torção em relação ao eixo z;
- C_w é a constante de empenamento da seção transversal;
- G é o módulo de elasticidade transversal do aço;
- I_t é o momento de inércia à torção uniforme.

O raio de giração polar da seção (r_0) é igual:

Equação 17 – Raio de giração polar da seção.

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)}$$

Quanto ao valor final para N_e : A fim de evitar a flambagem em qualquer dos eixos, escolhe-se, dentre N_{ex} , N_{ey} e N_{ez} , o de menor valor.

Dessa maneira pode-se definir que o índice de esbelteza reduzido (λ_0) é dado por:

Equação 18 – Índice de esbeltez reduzido.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}}$$

Onde:

- Q é o coeficiente de redução total;
- A_g é a área bruta da seção transversal;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço; e
- N_e é a força axial de flambagem elástica.

Após definir o índice de esbeltez reduzido do perfil, é necessário verificar se $\lambda_0 \leq 1,5$. Isso é necessário para obtenção do redutor que considera os efeitos de instabilidade localizada na seção transversal (x), que é verificado a seguir:

Caso a verificação $\lambda_0 \leq 1,5$ seja verdadeira, aplica-se a equação:

Equação 19 – Redutor que considera os efeitos de instabilidade localizada na seção transversal, pela Equação A.

$$x = 0,658 \lambda_0^2$$

Caso a verificação $\lambda_0 \leq 1,5$ seja falsa, aplica-se a equação:

Equação 20 – Redutor que considera os efeitos de instabilidade localizada na seção transversal, pela Equação B.

$$x = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

De posse desses resultados, calcula-se a força axial resistente de cálculo, N_{cRd} , dada por:

Equação 21 – Força Axial Resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$.

$$N_{c,Rd} = \frac{Q \cdot x \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

- Q = redutor que considera os efeitos de instabilidade da peça como um todo.
- x = redutor que considera os efeitos de instabilidade localizada na seção transversal;
- A_g = área bruta da seção transversal;
- f_y = a resistência ao escoamento do aço.
- γ_{a1} = 1,10 em situações normais (tabela 3 da NBR 8800: 2008).

Conceitos fundamentais – Barras de aço tracionadas

Adotando ligação parafusada com apenas uma linha de parafusos e na direção da força axial

Nas cantoneiras de abas iguais submetidas ao esforço de tração deve-se avaliar quanto à relação λ , de modo que não ultrapassem o valor de $\lambda < 300$, exceto no caso de barras pré-tensionadas (geralmente utilizadas na fabricação de peças de contraventamento).

Seguem as equações aplicadas para que sejam realizadas essas verificações:

Equação 22 - Esbeltez Local.

$$\lambda = \frac{l}{r_y}$$

Onde:

- l é o comprimento da cantoneira; e
- r_y é o raio de giração em relação ao eixo de menor momento de inércia (fornecido pelo fabricante ou calculado através da equação 31).

a) Caso seja uma transmissão uniforme ao elemento (todos os componentes da seção participam da ligação) será considerada uma ligação uniforme, desse modo, o coeficiente de redução $C_t = 1,00$.

b) Enquanto o esforço de tração for irradiado aos elementos apenas por soldas transversais:

Equação 23 - Coeficiente de redução da área líquida.

$$C_t = \frac{A_c}{A_g}$$

Onde:

- A_c é a área da seção transversal dos elementos conectados; e
- A_g área bruta da seção transversal da barra.

c) Se a ligação for feita por parafusos, por soldas longitudinais ou por uma combinação de soldas longitudinais e transversais para apenas alguns dos elementos da seção transversal, será considerada uma ligação parcial.

Sendo assim, calcula-se o valor do coeficiente de redução da área líquida C_t :

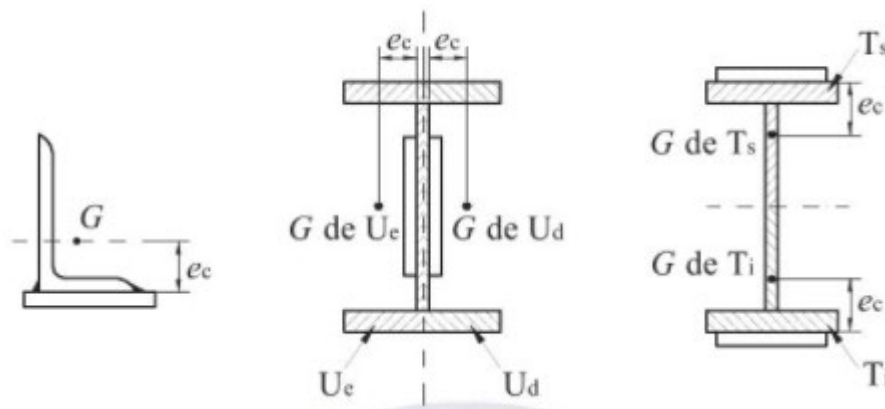
Equação 24 - Coeficiente de redução da área líquida.

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l_c}$$

Onde:

- e_c representa a excentricidade da ligação. Corresponde a medida entre o plano de cisalhamento e o centro de gravidade da seção. Pode-se definir três situações principais conforme figura 8:

Figura 8 – Excentricidade da ligação.

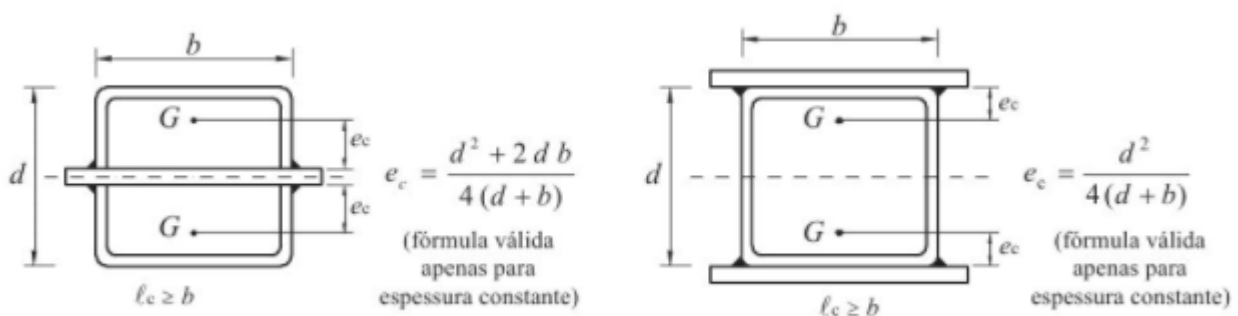


Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

l_c - é o comprimento efetivo da ligação (nos vínculos soldados, l_c vale o comprimento das soldas paralelos à força axial; nos vínculos parafusados l_c vale a distância entre o parafuso que dá início a linha de furação e àquele que a encerra, sendo essa linha a que contém a maior quantidade de parafusos, paralela à força axial).

Conforme a letra (c), nos elementos com seção transversal tubular retangular, com esforço de tração transferido através de ligação por chapa, cujo centro geométrico coincide com o da seção do tubo, ou com chapas em faces externas opostas da seção, contanto que l_c , seja no mínimo igual à medida da seção na direção que for paralela à(s) chapa(s), conforme Figura 9:

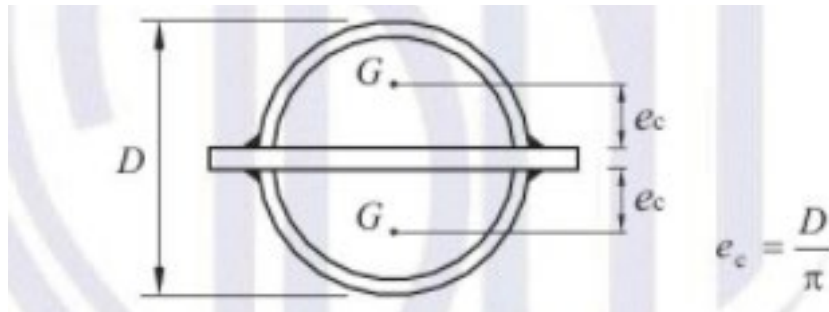
Figura 9 – e_c em seção tubular retangular.



Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

Nos elementos com seção transversal tubular circular, com o esforço de tração transferido através de uma chapa de ligação cujo centro geométrico coincide com o da seção do tubo, conforme Figura 10:

Figura 10 – E_c em seção tubular circular.



Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

- Caso o comprimento da ligação (l_c) for maior ou igual $1,3 \cdot$ diâmetro externo da barra

$$l_c \geq 1,30 \cdot \phi_{ext}$$

- C_t pode ser obtido conforme descrito na letra (c), caso (l_c) seja superior ao diâmetro da barra e inferior a $1,30 \cdot$ diâmetro da barra.

$$\phi \leq l_c < 1,30 \cdot \phi$$

Em trechos com furos ou aberturas (seja para parafusos ou outra função) a área líquida, A_n , tem sua definição no item 5.2.4 da NBR 8800: 2008, como a largura subtraída do valor dos furos. Ao calcular a largura líquida deve-se considerar:

Nos vínculos parafusados, a medida dos furos deve

ser estimada em 2,0 mm a mais que o diâmetro real. Isso pois acontecem falhas mecânicas no decorrer do movimento de furação. Por exemplo: digamos que seja utilizado o denominado furo-padrão. O diâmetro hipotético do furo poderá ser obtido com a fórmula a seguir:

Equação 25 – Diâmetro hipotético do furo.

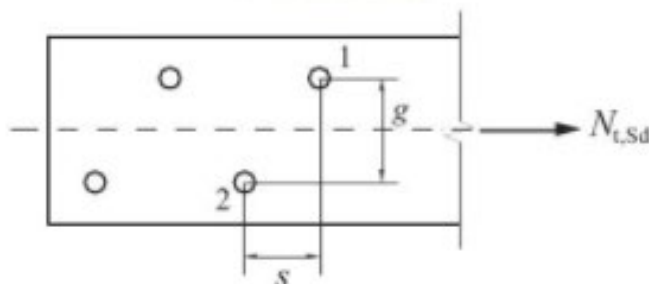
$$d_f = d_b + 1,5$$

Onde:

- d_f é o diâmetro hipotético do furo; e
- d_b é o diâmetro do parafuso utilizado na ligação

a) Na hipótese de uma sequência de furos subdivididos de modo transversal ao eixo da barra, na diagonal ou em zig zag, a largura líquida de tal trecho deverá ser obtida com base na largura bruta e o somatório das larguras de todos os furos em cadeia, adicionando-se para cada linha que conecte dois furos o valor de $s/2$ (4g), conforme Figura 11:

Figura 11 – Serie de furos subdivididos transversalmente.



Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

Onde:

- s e g os espaçamentos longitudinal e transversal entre estes dois furos.

b) A largura líquida crítica será definida para a sequência de furos que gere a menor largura líquida dentre as formas de ruptura;

c) Em cantoneiras, o gabarito g da furação em abas opostas pode ser calculado somando os gabaritos desde a aresta da cantoneira, descontando-se a espessura;

d) Para delimitar a área líquida da seção que contenha soldas de tampão ou soldas de filete nos furos, desconsidera-se a região do material de solda.

A área líquida efetiva será definida por:

Equação 26 – Área líquida efetiva.

$$A_e = C_t \cdot A_n$$

Onde:

- C_t é o coeficiente de redução da área líquida; e

- A_n é a área líquida da barra.

Necessitam ser analisadas duas situações, conforme os itens das letras a e b.

a) escoamento da seção bruta (ESB):

Equação 27 – Resistência ao escoamento da seção bruta

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

b) Ruptura da seção líquida efetiva (RSE) - (ver tabela 3 da NBR 8800: 2008)

Equação 28 – Resistência à ruptura da seção líquida

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

Onde:

- $\gamma_{a1} = 1,10$;
- $\gamma_{a2} = 1,35$;
- A_g é a área bruta da seção transversal;
- A_e é a área líquida efetiva da seção transversal;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço; e
- f_u é a resistência à ruptura do aço;

Conforme a NBR 8800: 2008 a verificação que demonstra o atendimento aos critérios de segurança segue abaixo:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$$

Onde:

- $N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo; e
- $N_{t,Rd}$ é a força axial de tração, resistente de cálculo.

Conceitos fundamentais – Chapas de aço tracionadas

Nas chapas soldadas submetidas ao esforço de tração deve-se avaliar quanto à relação λ , de modo que não ultrapassem o valor de $\lambda < 300$. Seguem as equações aplicadas para que sejam realizadas essas verificações:

Equação 29 – Área da seção transversal da chapa.

$$A_{seção} = l_{chapa} \cdot t_{chapa}$$

Onde:

- l_{chapa} é a largura da chapa; e
- t_{chapa} é a espessura da chapa

Também é necessário que o momento de inércia da seja calculado para posteriormente ser calculado o raio de giração.

Equação 30 – Momento de inércia.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Equação 31 – Raio de giração.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A_s}}$$

Com a área da seção transversal, o momento de inércia e o raio de giração já calculados, torna-se necessário verificar se o índice de esbeltez da chapa não ultrapassa o valor de 300. Segue a equação aplicada e a verificação necessária:

Equação 32 – Índice de Esbeltez.

$$\lambda = \frac{c_c}{r}$$

Onde:

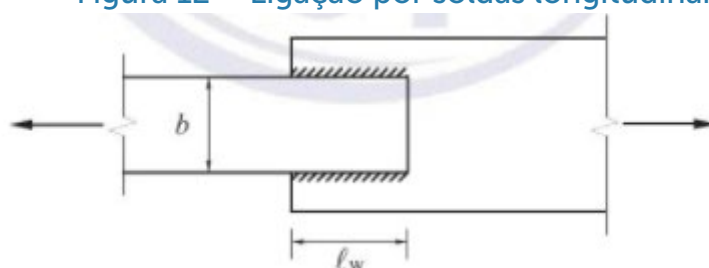
- c_c é o comprimento da chapa; e
- r é o raio de giração.

Caso seja uma transmissão uniforme ao elemento (todas as bordas da seção sejam soldadas) será considerada uma ligação uniforme, desse modo, o coeficiente de redução $C_t = 1,00$.

Caso apenas duas bordas da seção sejam soldadas, será considerada uma ligação parcial, desse modo, o C_t é verificado conforme abaixo:

Tratando-se de chapas planas, com esforço de tração transferido apenas por soldas longitudinais ao longo de suas bordas, segue-se de acordo com a Figura 12:

Figura 12 – Ligação por soldas longitudinais.



Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

$$\begin{aligned} c_t &= 1,00 \text{ quando } l_w \geq 2 \cdot b \\ c_t &= 0,87 \text{ quando } 1,5 \cdot b \leq l_w < 2 \cdot b \\ c_t &= 0,75 \text{ quando } b \leq l_w < 1,5 \cdot b \end{aligned}$$

onde:

- l_w é o comprimento dos cordões de solda; b é a largura da chapa (distância entre as soldas das duas bordas).

De forma a dar continuidade aos cálculos, deve-se determinar a área bruta que é definida por:

Equação 33 – Área bruta da chapa.

$$A_g = l_{chapa} \cdot t_{chapa}$$

Onde:

- l_{chapa} é a largura da chapa; e
- t_{chapa} é a espessura da chapa

A área efetiva é definida por:

Equação 34 – Área líquida efetiva.

$$A_e = C_t \cdot A_g$$

Onde:

- C_t é o coeficiente de redução da área líquida
- A_g é a área líquida da chapa.

Necessitam ser analisadas duas situações, conforme os itens das letras a e b.

a) Escoamento da seção bruta (ESB):

Equação 35 – Resistência ao escoamento da seção bruta.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

b) Ruptura da seção líquida efetiva (RSE) - (ver tabela 3 da NBR 8800: 2008):

Equação 36 – Resistência à ruptura da seção líquida efetiva.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

Onde:

- $\gamma_{a1} = 1,10$;
- $\gamma_{a2} = 1,35$;
- A_g é a área bruta da seção transversal;
- A_e é a área líquida efetiva da seção transversal;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço; e
- f_u é a resistência à ruptura do aço;

Conforme a NBR 8800:2008 a verificação que demonstra o atendimento aos critérios de segurança segue abaixo:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$$

Onde:

- $N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo; e
- $N_{t,Rd}$ é a força axial de tração, resistente de cálculo.

Fluxogramas de cálculo

Nesta etapa serão apresentados os fluxogramas desenvolvidos através do software *Bizagi Modeler 3.4.1.068*, pelos próprios autores, com a finalidade de permitir ao leitor verificar cada passo aplicado, de maneira sequencial, tornando a concepção e entendimento do roteiro mais claros, possibilitando também a realização de cálculos manuais de maneira mais otimizada.

Os Fluxogramas seguidos podem ser vistos no Apêndice.

Nota: Todas as imagens do Apêndice são autorais.

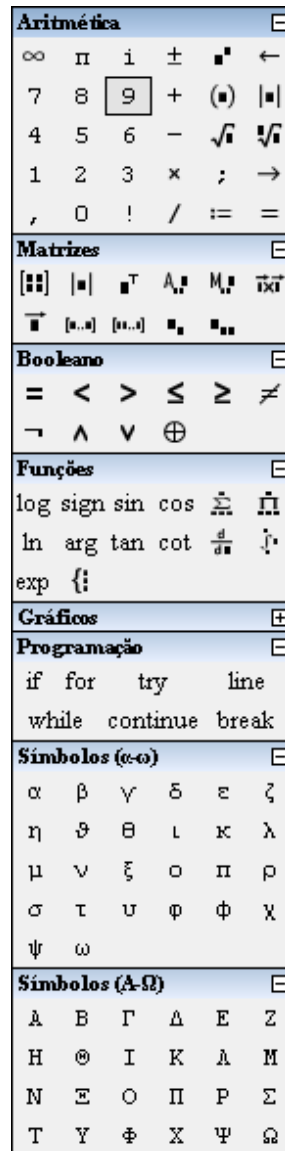
Roteiro de Cálculo

Nesta etapa serão apresentados os roteiros de cálculo desenvolvidos através do software *SMath Studio 0.99*, pelos próprios autores, com objetivo tornar automático todo o processo de verificações das geometrias aqui propostas, sendo necessário que o usuário dos roteiros insira apenas os dados de entrada.

Vale ressaltar que os nomes das variáveis utilizados no roteiro são, em alguns casos, diferentes dos usuais, mas se tratando de uma modelagem no *SMath Studio*, essa prática é comum, haja vista que o mesmo dificulta a inserção de variáveis de mesmo nome e valores diferentes.

A seguir, serão apresentadas algumas das funcionalidades que o software *SMath Studio 0.99* oferece.

Figura 13 – Painel lateral do SMath Studio 0.99.



Fonte: Os Autores (2021)

Principais funções aplicadas no roteiro

\wedge - e

\vee - ou

$<$ - menor

$>$ - maior

\leq - menor ou igual

\geq - maior ou igual

if - se

M1 - matriz

min – retorna o menor valor de uma matriz

\equiv - "igual a"

$:=$ - "atribuição de valores"

\equiv - "avale numericamente" (resultados)

" " – possibilita atribuir um texto como valor de uma variável

OBS.: Vale ressaltar que além das ferramentas citadas acima, o software possui uma extensa gama de funcionalidades, das quais pode-se ver algumas na figura 13.

Legenda de cores:

 Cor amarela – inserção de dados (mantendo as unidades conforme especificado);

 Cor verde – resultados das verificações;

 Cor azul – demarcação de resultados.

Simulações

Os valores de cálculo das ações são obtidos através da multiplicação dos valores característicos por coeficientes de ponderação. A NBR 8800: 2008 estabelece a aplicação desses coeficientes e apresenta valores para diferentes situações enfrentadas em projeto.

Visto que, nos roteiros que serão apresentados, quando foi preciso aplicar o esforço solicitante de cálculo (neste trabalho, a verificação da cantoneira de abas iguais) fez-se necessário inserir o valor pronto, isto é, o valor característico já multiplicado pelos coeficientes de ponderação aplicáveis, cabe então apresentar uma forma de obtenção desse valor, expressa abaixo:

$$F_{sd} = 1,35 \cdot F_{perm} + 1,5 \cdot F_{var}$$

Onde:

F_{sd} = Esforço solicitante de cálculo;

F_{perm} = Ações permanentes (sempre atuam na estrutura, como peso próprio e alvenaria); e

F_{var} = Ações variáveis (podem sofrer alterações, como a carga devida à utilização da estrutura por pessoas).

Os valores fixos (1,35 e 1,5) são dois dos coeficientes de ponderação previstos na norma. Ambos referem-se a combinações normais.

Nota: Todas as imagens presentes no tópico “Simulações” são de autoria própria.

Roteiro de Cálculo – Perfil I submetido à compressão axial

Calcule a força resistente $N_{c,Rd}$ para um perfil I laminado 304,8 x 60,6, biarticulado com 300 cm medidos entre apoios.
Adote: $c_w = 117400 \text{ cm}^6$ e $i_t = 73,5 \text{ cm}^4$.

Dados:

Aço A-36 (MR250)

$G = 7.700 \text{ kN/cm}^2$ / $E = 20.000 \text{ kN/cm}^2$ / $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$ / $f_u = 40 \text{ kN/cm}^2$

Compressão - Capacidade resistente

Esbeltez (Preencha conforme o comprimento "Lx" e "Ly", os valores de "kx" e "ky" e "rx" e "ry" da tabela do fabricante)

$r_x := 12,10 \text{ cm}$ $r_y := 2,7 \text{ cm}$ $k_x := 1$ $k_y := 1$ $l_x := 300 \text{ cm}$ $l_y := 300 \text{ cm}$

$$\lambda_x := \frac{k_x \cdot l_x}{r_x} = 24,79$$

$$\lambda_y := \frac{k_y \cdot l_y}{r_y} = 111,11$$

if $(\lambda_x < 200) \wedge (\lambda_y < 200)$

V := "Insira os dados da questão e dê continuidade no roteiro"

else

V := "Escolha outro perfil para verificação"

V := "Insira os dados da questão e dê continuidade no roteiro"

Procedimento: Foi realizado o cálculo do índice de esbeltez e a resposta foi comparada posteriormente, ao utilizar a ferramenta if, com a esbeltez limite fixada em 200. Foram analisados os eixos x e y e a resposta marcada com a cor verde remete como o usuário do roteiro deve prosseguir. a.

Dados:

$d := 304,8 \text{ mm}$

$b_f := 133,4 \text{ mm}$

$t_f := 16,7 \text{ mm}$

$t_w := 11,70 \text{ mm}$

$k := 36,5 \text{ mm}$

$g := 76 \text{ mm}$

$b_{AA} := (d - 2 \cdot k) = 231,8 \text{ mm}$

$b_{AL} := \frac{b_f}{2} = 66,7 \text{ mm}$

$A_g := 77,3 \text{ cm}^2$

$i_x := 11330 \text{ cm}^4$

$w_x := 743 \text{ cm}^3$

$w_y := 84,5 \text{ cm}^3$

$z_x := 870 \text{ cm}^3$

$z_y := 145 \text{ cm}^3$

$i_y := 563 \text{ cm}^4$

$i_t := 73,5 \text{ cm}^4$

$E := 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$f_y := 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$G := 7700 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$c_w := 117400 \text{ cm}^6$

$K_z := 1$

$\gamma_{a1} := 1,1$

$L_z := 300 \text{ cm}$

Procedimento: Inserção de dados conforme o perfil escolhido e tipo de aço a serem analisados.

Caso AA:

$$\lambda_{AA} := \frac{(d - 2 \cdot k)}{tw} = 19,81$$

$$\lambda_{lim, AA} := 1,49 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_Y}\right)} = 42,14$$

$$\lambda_{AA} \leq \lambda_{lim, AA} = 1 \quad \begin{array}{l} 1 = \text{verdadeiro} \\ 0 = \text{falso} \end{array}$$

Procedimento: Foi realizado o cálculo do índice de esbeltez local e a resposta foi comparada posteriormente, ao utilizar a verificação através do operador “menor ou igual”.

Caso a verificação seja VERDADEIRA, calcule os passos a seguir:

$$Qa.1 = 1$$

Caso a verificação seja FALSA, calcule os passos a seguir:

$$\sigma := fy$$

$$ca := 0,34$$

$$bef := 1,92 \cdot tw \cdot \left(\sqrt{\frac{E}{\sigma} \cdot \left(1 - \frac{ca}{\lambda_{AA}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right)} \right)$$

$$bef = 455,79 \text{ mm}$$

$$bef \leq b_{AA} = 0 \quad \begin{array}{l} 1 = \text{verdadeiro} \\ 0 = \text{falso} \end{array}$$

$$\text{if } \lambda_{AA} \leq \lambda_{lim, AA}$$

$$Qa := 1$$

else

$$\text{if } bef \leq b_{AA}$$

$$Qa := \frac{Ag - (b_{AA} - bef) \cdot tw}{Ag}$$

else

$$Qa := \frac{Ag - (b_{AA} - b_{AA}) \cdot tw}{Ag}$$

$$Qa = 1$$

Procedimento: Foi realizada a verificação do valor do coeficiente de redução “Qa”, viabilizando o cálculo para qualquer possibilidade relacionada a esbeltez do caso AA, evidenciando assim, o completo procedimento de cálculo proposto ao passo que calcula conforme a situação inserida.

Caso AL:

$$\lambda_{AL} := \frac{\left(\frac{bf}{2}\right)}{tf} = 3,99$$

$$\lambda_{AL,p} := 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{fy}} = 15,84$$

$$\lambda_{AL} \leq \lambda_{AL,p} = 1 \quad \begin{array}{l} 1 = \text{verdadeiro} \\ 0 = \text{falso} \end{array}$$

Procedimento: Foi realizado o cálculo do índice de esbeltez local e a resposta foi comparada posteriormente, ao utilizar a verificação através do operador “menor ou igual”.

Caso a verificação seja VERDADEIRA, calcule os passos a seguir:

$$Qs.1 = 1$$

Caso a verificação seja FALSA, calcule os passos a seguir:

$$\lambda_{AL,r} := 1,03 \cdot \sqrt{\frac{E}{fy}}$$

$$\lambda_{AL,r} = 29,13$$

$$\begin{array}{l} \text{if } \lambda_{AL} \leq \lambda_{AL,p} \\ \quad Qs := 1 \\ \text{else} \\ \quad \text{if } \left(\lambda_{AL,p} < \lambda_{AL} \right) \wedge \left(\lambda_{AL} \leq \lambda_{AL,r} \right) \\ \quad \quad Qs := \frac{(0,69 \cdot E)}{\left(fy \cdot \lambda_{AL}^2 \right)} \\ \quad \text{else} \\ \quad \quad Qs := 1,415 - 0,74 \cdot \lambda_{AL} \cdot \sqrt{\frac{fy}{E}} \end{array}$$

$$Q := Qa \cdot Qs = 1$$

Procedimento: Foi realizada a verificação do valor do coeficiente de redução “Qs” e também do coeficiente de redução total “Q”, viabilizando o cálculo para qualquer possibilidade relacionada a esbeltez do caso AL, evidenciando assim, o completo procedimento de cálculo proposto ao passo que calcula conforme a situação inserida.

$$Ne_x := \frac{\left(\pi^2 \cdot E \cdot ix \right)}{\left(k_x \cdot l_x \right)^2} = 24849,47 \text{ kN}$$

$$Ne_y := \frac{\left(\pi^2 \cdot E \cdot iy \right)}{\left(k_y \cdot l_y \right)^2} = 1234,8 \text{ kN}$$

$$Ne_z := \left(\frac{1}{r_x^2 + r_y^2} \right) \cdot \left(\frac{\left(\pi^2 \cdot E \cdot cw \right)}{\left(Kz \cdot Lz \right)^2} \right) + G \cdot it = 5357,43 \text{ kN}$$

$$M_1 := \left[Ne_x \quad Ne_y \quad Ne_z \right]$$

$$Ne := \min \left(M_1 \right)$$

Ne = 1234,8 kN

Procedimento: Foi realizado o cálculo da força axial de flambagem elástica “Ne” em relação aos eixos x, y e z e posteriormente foi escolhido o menor valor como Ne.

$$\lambda_0 := \sqrt{\frac{Q \cdot Ag \cdot fy}{Ne}} = 1,25$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 = 1 \quad \begin{array}{l} 1 = \text{verdadeiro} \\ 0 = \text{falso} \end{array}$$

if $\lambda_0 \leq 1,5$

$$\chi := 0,658^{\lambda_0^2}$$

else

$$\chi := \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

$\chi = 0,52$

Calculando a força resistente Nc,Rd:

$$N_{c,Rd} := \frac{Q \cdot \chi \cdot Ag \cdot fy}{\gamma_{d1}} = 912,52 \text{ kN}$$

Procedimento: Foi realizado o cálculo do índice de esbeltez reduzido e a resposta foi comparada posteriormente, ao utilizar a verificação através do operador “menor ou igual”. Em seguida ao utilizar a ferramenta if, com a esbeltez reduzida fixada em 1,5.

Roteiro de Cálculo – Cantoneiras de abas iguais submetidas ao esforço de tração

Verificar se o perfil da cantoneira de abas iguais 152 x 152 x 15,9 mm resiste a um esforço axial de tração de projeto igual a 900 kN. Considere: $A_g = 45,87 \text{ cm}^2$ e ligação parafusada com apenas uma linha de furação composta de 3 parafusos com 16 mm de diâmetro cada.

Dados:

Aço A-36 (MR250)

$G = 7.700 \text{ kN/cm}^2$ / $E = 20.000 \text{ kN/cm}^2$ / $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$ / $f_u = 40 \text{ kN/cm}^2$

Cantoneiras de aço com abas iguais tracionadas

Esbeltez (Preencha conforme o comprimento "L" necessário e os valores de "rx" e "ry" da tabela do fabricante)

$L := 250 \text{ cm}$ $r_x := 4,67 \text{ cm}$ $r_y := 4,67 \text{ cm}$

$\lambda := \frac{L}{r_y} = 53,53$

if $\lambda < 300$

V := "Insira os dados da questão e dê continuidade no roteiro"

else

V := "Escolha outra coantoneira para verificação"

V = "Insira os dados da questão e dê continuidade no roteiro"

Dados:

$f_y := 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$f_u := 40 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$N_{std} := 900 \text{ kN}$

$y_{a1} := 1,1$

$y_{a2} := 1,35$

$aba_{cantoneira} := 15,2 \text{ cm}$

$espessura := 1,59 \text{ cm}$

$A_g := 45,87 \text{ cm}^2$ (Fornecido pelo fabricante)

$v_g := 4,39 \text{ cm}$

(Fornecido pelo fabricante)

$d_{parafuso} := 1,6 \text{ cm}$

$d_f := d_{parafuso} + 0,15 \text{ cm} = 1,75 \text{ cm}$

$d_{euro} := d_f + 0,2 \text{ cm} = 1,95 \text{ cm}$

Abaixo, se a ligação for feita por parafusos em apenas parte dos elementos da seção transversal, preencha os dados ec e $n_{parafusos}$ e digite na variável "Ligação", entre aspas, Ligação parcial. Caso seja uma transmissão uniforme ao elemento (todos os componentes da seção participam da ligação), digite na variável "Ligação", entre aspas, Ligação uniforme, desse modo Ct passa a valer 1.

Adotando ligação parafusada com apenas uma linha de parafusos e na direção da força axial, defina abaixo o número de parafusos:

$n_{parafusos} := 3$

$l_c := (n_{parafusos} - 1) \cdot 3 \cdot d_{parafuso} = 9,6 \text{ cm}$

$e_c := y_g$

Ligação := "Ligação parcial"

Procedimento: Foi realizado o cálculo do índice de esbeltez e a resposta foi comparada posteriormente, ao utilizar a ferramenta if, com a esbeltez limite fixada em 300. A resposta marcada com a cor verde remete como o usuário do roteiro deve prosseguir.

Dados:

$$f_y := 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_u := 40 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$N_{sd} := 900 \text{ kN}$$

$$Y_{a1} := 1,1$$

$$Y_{a2} := 1,35$$

$$aba_{cantoneira} := 15,2 \text{ cm}$$

$$espessura := 1,59 \text{ cm}$$

$$A_g := 45,87 \text{ cm}^2 \quad (\text{Fornecido pelo fabricante})$$

$$y_g := 4,39 \text{ cm}$$

(Fornecido pelo fabricante)

$$d_{parafuso} := 1,6 \text{ cm}$$

$$d_f := d_{parafuso} + 0,15 \text{ cm} = 1,75 \text{ cm}$$

$$d_{furo} := d_f + 0,2 \text{ cm} = 1,95 \text{ cm}$$

Abaixo, se a ligação for feita por parafusos em apenas parte dos elementos da seção transversal, preencha os dados e_c e $n_{parafusos}$ e digite na variável "Ligação", entre aspas, Ligação parcial. Caso seja uma transmissão uniforme ao elemento (todos os componentes da seção participam da ligação), digite na variável "Ligação", entre aspas, Ligação uniforme, desse modo C_t passa a valor 1.

Adotando ligação parafusada com apenas uma linha de parafusos e na direção da força axial, defina abaixo o número de parafusos:

$$n_{parafusos} := 3$$

$$l_c := (n_{parafusos} - 1) \cdot 3 \cdot d_{parafuso} = 9,6 \text{ cm}$$

$$e_c := y_g$$

$$\text{Ligação} := \text{"Ligação parcial"}$$

Procedimento: Inserção de dados conforme o perfil escolhido e tipo de aço a serem analisados além de orientar ao usuário do roteiro a forma de dar continuidade nos passos seguintes.

Coefficiente de redução:

```
if Ligação = "Ligação uniforme"
```

$$C_t := 1$$

```
else
```

$$C_t := 1 - \frac{e_c}{l_c}$$

$$C_t = 0,54$$

```
if (C_t < 0,6) V (C_t > 0,9) = 0,75
```

$$C_t := 1 + \frac{e_c}{\left(\frac{e_c}{(0,75 - 1)}\right)}$$

```
else
```

```
if Ligação = "Ligação uniforme"
```

$$C_t := 1$$

```
else
```

$$C_t := 1 - \frac{e_c}{l_c}$$

$$C_t = 0,75$$

$$l_c := - \frac{e_c}{(C_t - 1)} = 17,56 \text{ cm} \quad (\text{Valor definitivo})$$

Procedimento: Através dos dados inseridos no início das verificações, foi realizado o cálculo do coeficiente de redução “ C_t ” com auxílio da ferramenta if, e também foi verificado o valor final de “ l_c ”.

Nota: A fim de atender aos limites normativos quanto ao valor de “ C_t ” (0,6 a 0,9) foi fixado o valor de 0,75 (média obtida entre os valores normativos) para atender aos casos em que o valor original de “ C_t ” não esteja em conformidade com tais limites. Sabendo que o valor original em desacordo com a norma aponta para uma ligação ineficiente, foi então fornecido o novo valor de comprimento da ligação “ l_c ” para que o usuário do roteiro possa adequar suas especificações para a ligação.

Área teórica:

$$A_g := aba_{cantoneira} \cdot espessura + (aba_{cantoneira} - d_{parafuso}) \cdot espessura = 45,79 \text{ cm}^2$$

Procedimento: Através dos dados inseridos no início das verificações, foi realizado o cálculo da área teórica “ A_g ”.

Escoamento da seção bruta (ESB):

$$N_{t,Rd} := \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 1042,5 \text{ kN}$$

Área líquida da seção:

$$A_n := A_g - d_{furo} \cdot espessura = 42,77 \text{ cm}^2$$

Procedimento: Através dos resultados obtidos nos passos anteriores, foi realizado o cálculo da resistência no escoamento da seção bruta e também da área líquida da seção “ A_n ”.

Área líquida efetiva:

$$A_e := C_t \cdot A_n = 32,08 \text{ cm}^2$$

Ruptura da seção líquida efetiva:

$$N_{t,Rd} := \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 950,43 \text{ kN}$$

Procedimento: Através dos resultados obtidos nos passos anteriores, foi realizado o cálculo da área líquida efetiva "Ae" e da resistência a ruptura da seção líquida efetiva.

Comparação dos resultados:

$$\text{Tração}_{solicitante} := N_{sd} = 900 \text{ kN}$$

$$\text{Capacidade}_{resistente} := N_{t,Rd} = 950,43 \text{ kN}$$

$$\text{Capacidade}_{resistente} \geq \text{Tração}_{solicitante} = 1 \quad 1 = \text{OK} \quad 0 = \text{Não OK}$$

Procedimento: Através dos resultados obtidos nos passos anteriores, pode-se notar que através da verificação acima, realçada com a cor verde, a cantoneira resiste ao esforço solitante, visto que a mesma apresenta resistência superior à tração informada.

Roteiro de Cálculo – Chapas soldadas submetidas ao esforço de tração

Determine a resistência máxima da chapa de aço com seção 8,0 x 1,0 cm quanto ao esforço axial de tração. Considere chapa de ligação soldada uniforme. Adote: comprimento da chapa igual a 40 cm e lw igual a 8 cm.

Dados:

Aço A-36 (MR250)

$$G = 7.700 \text{ kN/cm}^2 \quad / \quad E = 20.000 \text{ kN/cm}^2 \quad / \quad f_y = 25 \text{ kN/cm}^2 \quad / \quad f_u = 40 \text{ kN/cm}^2$$

Chapas de aço soldadas submetidas à tração - Capacidade resistente

Esbeltez (Preencha conforme o comprimento "Comp,chapa" necessário e as dimensões da seção transversal da chapa)

$$largura_{chapa} := 8,0 \text{ cm}$$

$$comp_{chapa} := 40 \text{ cm}$$

$$t_{chapa} := 1,0 \text{ cm}$$

$$A_{seção} := largura_{chapa} \cdot t_{chapa} = 8 \text{ cm}^2$$

$$I_x := \frac{largura_{chapa} \cdot (t_{chapa})^3}{12} = 0,67 \text{ cm}^4$$

$$I_y := \frac{t_{chapa} \cdot (largura_{chapa})^3}{12} = 42,67 \text{ cm}^4$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_{seção}}} = 0,29 \text{ cm}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{seção}}} = 2,31 \text{ cm}$$

$$\lambda_x := \frac{comp_{chapa}}{r_x} = 138,56$$

$$\lambda_y := \frac{comp_{chapa}}{r_y} = 17,32$$

if $(\lambda_x < 300) \wedge (\lambda_y < 300)$

V := "Insira os dados da questão e dê continuidade no roteiro"

else

V := "Escolha outra chapa para verificação"

V := "Insira os dados da questão e dê continuidade no roteiro"

Procedimento: Foi realizado o cálculo da área da seção transversal da chapa e também foi determinado o momento de inércia para os eixos x e y. Através do momento de inércia e da área da seção transversal, foi possível calcular o raio de giração dos eixos x e y conforme indicado. De posse desses valores, foi determinado o índice de esbeltez e a resposta foi comparada posteriormente, ao utilizar a ferramenta if, com a esbeltez limite fixada em 300. Foram analisados os eixos x e y e a resposta marcada com a cor verde remete como o usuário do roteiro deve prosseguir.

Dados:

$$f_y := 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_u := 40 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\gamma_{a1} := 1,1$$

$$\gamma_{a2} := 1,35$$

Abaixo, se a ligação for feita por soldas em apenas duas bordas da seção transversal, preencha os dados "l_w" e "b" e digite na variável "Ligação", entre aspas, Ligação parcial. Caso seja uma transmissão uniforme ao elemento (todas as bordas da seção ligadas por soldas), digite na variável "Ligação", entre aspas, Ligação uniforme, desse modo C_t passa a valer 1,00.

$$l_w := 8 \text{ cm}$$

$$b := 8 \text{ cm}$$

$$\text{Ligação} := \text{"Ligação uniforme"}$$

```

if (lw ≥ 2 · b) ∨ (Ligação = "Ligação uniforme") = 1
  Ct := 1,00
else
  if (2 · b > lw) ∧ (lw ≥ 1,5 · b)
    Ct := 0,87
  else
    if (1,5 · b > lw) ∧ (lw ≥ b)
      Ct := 0,75
    else
      Ct := 1,00

```

$$C_t = 1$$

Procedimento: Inserção de dados conforme o perfil da chapa escolhida e tipo de aço a serem analisados, além de orientar ao usuário do roteiro a forma de dar continuidade nos passos seguintes. Somado a isso, foi determinado o coeficiente de redução "C_t" de acordo com as informações relacionadas à ligação, inseridas pelo próprio usuário do roteiro.

Área teórica:

$$A_g := \text{largura}_{\text{chapa}} \cdot t_{\text{chapa}} = 8 \text{ cm}^2$$

Área efetiva:

$$A_e := C_t \cdot A_g = 8 \text{ cm}^2$$

Procedimento: Através dos dados inseridos no início das verificações, foi realizado o cálculo da área teórica "A_g" e também da área efetiva "A_e".

Escoamento da Seção Bruta (ESB):

$$N_{t,RdESB} := \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 181,82 \text{ kN}$$

Ruptura da Seção líquida Efetiva (RSE):

$$N_{t,RdRSE} := \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = 237,04 \text{ kN}$$

$$M_1 := \left[N_{t,RdESB} \quad N_{t,RdRSE} \right]$$

$$N_{t,Rd} := \min(M_1)$$

$$N_{t,Rd} = 181,82 \text{ kN}$$

Procedimento: Foi realizado o cálculo da resistência na ruptura da seção líquida efetiva e posteriormente foi escolhido o menor valor entre o já citado e o valor da resistência no escoamento da seção bruta. Esse procedimento foi adotado a fim de trabalhar com o menor valor de resistência obtido pela chapa em questão, garantindo assim que a mesma não será submetida a esforços que podem levá-la à ruptura.

Conclusão

Conforme a introdução, este trabalho propôs apresentar a automatização de um roteiro de cálculo para verificações de perfis metálicos submetidos a esforços axiais, com dados de entrada modificáveis e, dessa maneira, otimizar o tempo de dimensionamento de perfis I (quanto à compressão) e cantoneiras de abas iguais e chapas (quanto à tração), levando-se em conta perfis laminados, além de propiciar o aprendizado na área de estruturas metálicas. Dispondo dos objetivos propostos alcançados, o roteiro se mostrou de utilização simples e didática, permitindo ao usuário verificar cada passo e equação aplicados, tornando a concepção e entendimento do roteiro mais pragmáticos. A fim de confirmar a eficiência das verificações, os resultados obtidos foram validados junto à materiais didáticos de instituição de ensino superior renomada. Nota-se que a automatização de roteiros aqui proposta pode servir de inspiração para aperfeiçoamentos que viabilizem o uso profissional e é possível também, no viés educacional, tornar o roteiro mais completo, promovendo possibilidade para verificações de outras geometrias, perfis soldados e ainda quanto a outros tipos de esforços solicitantes. Vale destacar que a metodologia do presente trabalho é completamente adaptável a outros tipos de verificações e rotinas de dimensionamento da área de engenharia.

Referências Bibliográficas

PINTO, JESSE WILLE GONDIM. **Desenvolvimento de aplicativo android para verificação de perfis de aço**. 2018. Disponível em https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/5037/1/JesseWGP_MONO.pdf. Acesso em 08/05/2021.

FREITAS, JEAN THARLEY DE. **Automação na construção civil**. 2015. Disponível em <https://bityli.com/5zElK>. Acesso em 08/05/2021.

RODRIGUES, GISELE CARVALHO; DIAS, RENAN CESAR DE OLIVEIRA; MENDES, CLEITON JOÃO. **Automatização do dimensionamento de vigas "T" em concreto armado submetidas à flexão simples**. Revista Eletrônica Organizações e Sociedade, v. 7, n. 7, p. 5-22, 2018. Disponível em <http://revista.facfama.edu.br/index.php/ROS/article/view/348/292>. Acesso em 08/05/2021.

COELHO, PEDRO MIGUEL NOGUEIRA. **Rumo à indústria 4.0**. 2016. Disponível em <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36992/1/Tese%20Pedro%20Coelho%20Rumo%20%c3%a0%20Industria%204.0.pdf>. Acesso em 08/05/2021.

PACHECO, ANA CLARA CORTEZ. **A indústria 4.0 e seu impacto na estratégia das organizações: estudo de caso em uma empresa de treinamentos em informática**. 2017. Disponível em <https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/4868/1/Projeto%20Final%20-%20Ana%20Clara%20Pacheco.pdf>. Acesso em 08/05/2021.

GUANABARA, MATHEUS KERKHOFF. **Dimensionamento de estruturas metálicas: rotina computacional para seleção de perfis metálicos**. 2010. Disponível em <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/28583>. Acesso em 08/05/2021.

OLIVEIRA, S., ALMEIDA NETO, M. **Análise e Modelagem de Processos**. In: Valle, R., Oliveira, S. B. **Análise e Modelagem de Processos de Negócio: Foco na Notação BPMN**. São Paulo: Atlas, 2009. p. 37-51.

CAMPOS, André L. N. **Modelagem de processos com BPMN – 2ª ed.** Rio de Janeiro: Brasport, 2014.

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.

FICANHA, R.; FABEANE, R.; PRAVIA, Z. M. C. **Análise de segunda ordem: comparação das análises bidimensionais e tridimensionais em modelos estruturais de aço.** Construmetal 2012, Associação Brasileira da Construção Metálica, São Paulo, 2012.

GALAMBOS, Theodore V. **Guide to stability design criteria for metal structures.** New York: John Wiley & Sons, 1988, 785p.

IU, C. K.; CHEN, W.; CHAN, S.; TIANWEI, M. A. **Direct second-order elastic analysis for steel frame design.** Journal of Civil Engineering, KSCE, v. 12, n. 6, p. 379-389, 2008.

NARDI, F. A.; FICANHA, R.; PRAVIA, Z. M. C. **Análise de segunda ordem: aplicações, dificuldades e recomendações.** Revista Construção Metálica, Associação Brasileira da Construção Metálica, São Paulo, 101. ed., p.28-33, 2011.

ORMONDE, P. C.; SOUZA, A. S. C. **Software Educacional Livre para análise não-linear e dimensionamento de pórtico plano em estruturas metálicas.** Artigo. Construmetal 2012. São Paulo: Associação Brasileira da Construção Metálica, 2012.

PEREIRA, Anderson. **Projeto ótimo de pórticos planos com restrição à flambagem.** Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.

SIMSEN, Alan Rodrigo. **Programa computacional para verificação de perfil I laminado ou soldado conforme NBR 8800:2008.** 2014. 109 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10737/638>. Acesso em: 18 maio 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: Abnt, 2008. 237 p.

DIMENSIONAMENTO À TRAÇÃO SIMPLES. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: [\[http://www.estruturas.ufpr.br/wp-content/uploads/2015/02/Capitulo3.pdf\]](http://www.estruturas.ufpr.br/wp-content/uploads/2015/02/Capitulo3.pdf). Acesso em: 18 maio 2021.

DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO SIMPLES. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: [\[http://www.estruturas.ufpr.br/wp-content/uploads/2015/02/Capitulo4.pdf\]](http://www.estruturas.ufpr.br/wp-content/uploads/2015/02/Capitulo4.pdf). Acesso em: 18 maio 2021.

LEÃO, Cel Marcelo; ARAGÃO, Maj Moniz de. **Estruturas Metálicas: dimensionamento segundo a nbr - 8800: 2008: peças tracionadas.** Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2013. 13 slides, color. Disponível em: http://www.ime.eb.br/~moniz/metallca/estruturas_metallcas_2013_4.pdf. Acesso em: 19 maio 2021.

MASCIA, Nilson Tadeu. **Flambagem de Barras.** Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Estruturas. Campinas, 2001 (REVISÃO 2017). Disponível em: [\[http://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/flambagemdebarras.pdf\]](http://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/flambagemdebarras.pdf). Acesso em: 19 maio 2021.

ESTRUTURAS. UFPR: Material de apoio. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: [\[http://www.estruturas.ufpr.br/disciplinas/graduacao/estruturas-metallcas/estruturas-metallcas-material/\]](http://www.estruturas.ufpr.br/disciplinas/graduacao/estruturas-metallcas/estruturas-metallcas-material/). Acesso em: 19 maio 2021.

SASSO, Felipe Castelli; RAMIRES, Fernando Busato; PRAVIA, Zacarias Martin Chamberlain. **APLICATIVO ANDROID PARA O DIMENSIONAMENTO DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO DE ACORDO COM A ABNT NBR 14762:2010.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MANAGEMENT, TECHNOLOGY AND INNOVATION, 5., 2019, Erechim. Proceedings [...] . Erechim: Uri, 2019. p. 1-8. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/338030955>. Acesso em: 20 maio 2021.

SKYLIGHT ESTRUTURAS METÁLICAS (Osasco). **CANTONEIRAS** Abas iguais (2 1/2" a 8"). Disponível em: <http://www.skylightestruturas.com.br/cant2.asp>. Acesso em: 20 maio 2021.

SKYLIGHT ESTRUTURAS METÁLICAS (Osasco). **Tabela de Perfis I Laminados Padrão Americano Dimensões e Propriedades Geométricas**. Disponível em: <http://www.skylightestruturas.com.br/iamericano.asp>. Acesso em: 20 maio 2021.

PEDRO, Hugo Felipe da Silva; FERREIRA, João Pedro Rosa; RAMOS, Luan de Carvalho; CARVALHO, Marcelle Brandão de; CARVALHO, Carlos Vitor de Alencar. **Cálculo Automatizado para Empuxos de Terra: Uma Proposta Educacional**. Vassouras: Editora da Universidade de Vassouras, 2020. Disponível em: <http://editora.universidadedevassouras.edu.br/index.php/PT/issue/view/189>. Acesso em: 24 maio 2021.

ARQUITETURA + AÇO. **Você sabe o que é um perfil CS, VS e CVS?** 2015. Disponível em: <http://felipeschmitzhaus.blogspot.com/2015/04/voce-sabe-o-que-e-um-perfil-cs-vs-e-cvs.html>. Acesso em: 26 maio 2021.

PORTAL METÁLICA. **Aço formado a frio**. Disponível em: <https://metalica.com.br/aco-formado-a-frio-2/>. Acesso em: 26 maio 2021.

SOUZA, Izadora. **Vantagens e Desvantagens do aço na construção civil**. Disponível em: <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=19&Cod=1938>. Acesso em: 26 maio 2021.

IMIANOWSKY, Guilherme Wanka; WALENDOWSKY, Marcus Alberto. **OS PRINCIPAIS AÇOS CARBONO UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2017. Disponível em: <http://www.crea-sc.org.br/portal/index.php?cmd=artigos-detalhe&id=4191#.YK6da6hKiUk>. Acesso em: 26 maio 2021.

ARQUITETURA + AÇO. **Perfis Estruturais de Aço: O que é um Perfil Laminado?** 2015. Disponível em: <http://felipeschmitzhaus.blogspot.com/2015/04/perfis-estruturais-de-aco-o-que-e-um.html>. Acesso em: 26 maio 2021.

FERREIRA, Vanessa Valéria; ABRANTES, Jedson Henryque Corrêa; LIMA NETO, Aarão Ferreira. **Construções modulares**. Brasília: Nt Editora, 2017. 168 p. Disponível em: <https://avant.grupont.com.br/dirVirtualLMS/arquivos/texto/96563a0dc88cf4403a01d472db145a6d.pdf>. Acesso em: 26 maio 2021.

SILVA, Ayrton de Freitas et al. **VALIDAÇÃO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DE MATERIAIS DISSIMILARES DE AÇO ESTRUTURAL NAVAL PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS VIA SolidWorks Simulation®**. 2017. 159 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Santa Cecília, Santos, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317869743_VALIDACAO_DO_COMPORTAMENTO_PLASTICO_DE_MATERIAIS_DISSIMILARES_DE_ACO_ESTRUTURAL_NAVAL_PELO_METODO_DE_ELEMENTOS_FINITOS_VIA_SolidWorks_SimulationR. Acesso em: 01 jun. 2021.

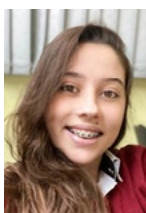
FULL ESTRUTURAS (Salvador). Grupo Full. **Tipos de Perfis Formados a Frio**. 2016. Disponível em: <http://fullestruturas.com.br/o-sistema-construtivo-light-steel-framing/tipos-de-perfis-formados-a-frio/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

INOXPLASMA COMERCIO DE METAIS LTDA (São Paulo). **PERFIS SOLDADOS**. Disponível em: <https://www.inoxplasma.com.br/perfis-soldados>. Acesso em: 01 jun. 2021.

GUSTAVO, Luiz. **Tipos de esforços**. 2016. Disponível em: <https://www.meiacolher.com/2016/02/resistencia-dos-materiais-tracao-flexao.html>. Acesso em: 31 maio 2021.

MOURA, Tiago Rodrigues Coelho de. **Comparativo de estruturas de concreto armado e de aço: estudo de caso**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 04, Ed. 04, Vol. 04, pp. 24-42. Abril de 2019. ISSN: 2448-0959. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/estruturas-de-concreto-armado-e-de-aco#_ftn1. Acesso em: 01 jun. 2021.

Sobre os autores



IZADORA DOS ANJOS NASCIMENTO COE

Aluna de graduação em Engenharia Civil na Universidade de Vassouras.

E-mail: izadora.coe@outlook.com



MATHIAS CARDOSO H GOMES

Aluno de graduação em Engenharia Civil na Universidade de Vassouras.

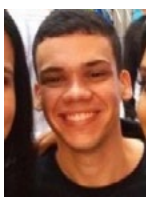
E-mail: math23gomes@gmail.com



ALLAN SILVA FERREIRA

Graduação em Engenharia Civil na Universidade de Vassouras.

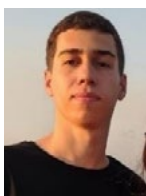
E-mail: allansf.eng@gmail.com



HUGO FELIPE DA SILVA PEDRO

Graduação em Engenharia Civil na Universidade de Vassouras

E-mail: hugofelipe009@gmail.com



JOÃO PEDRO ROSA FERREIRA

Graduação em Engenharia Civil na Universidade de Vassouras

E-mail: joaopedrocivil1998@gmail.com



LUAN DE CARVALHO RAMOS

Graduação em Engenharia Civil na Universidade de Vassouras

E-mail: luan.ramos0297@gmail.com



CARLOS VITOR DE ALENCAR CARVALHO

Pós-doutorado em Educação Matemática.

Doutorado e Mestrado em Engenharia Civil.

Aperfeiçoamento/Extensão Universitária em

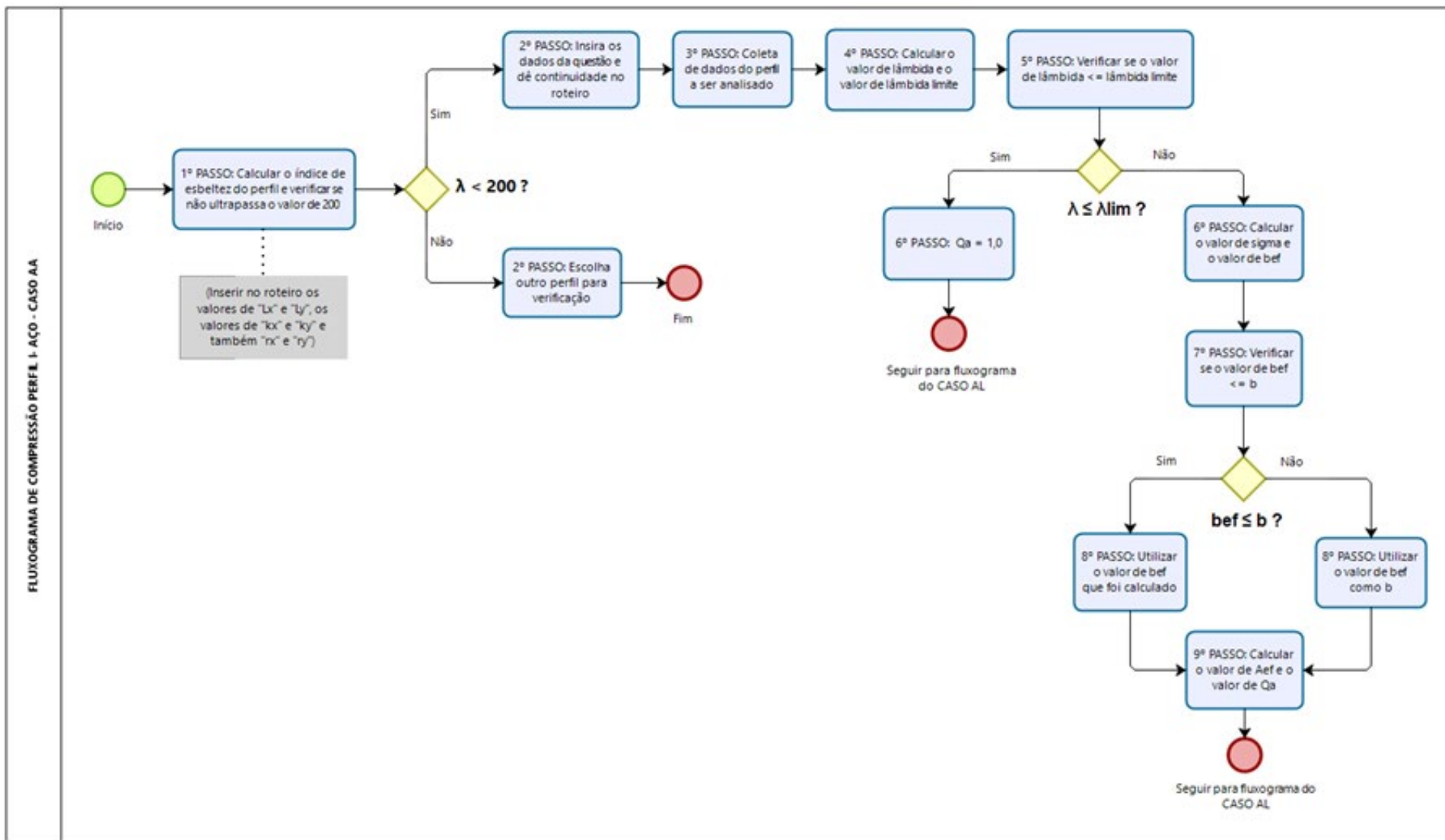
Competitive Project Management na State University of New York at New Paltz

Graduação em Engenharia Civil.

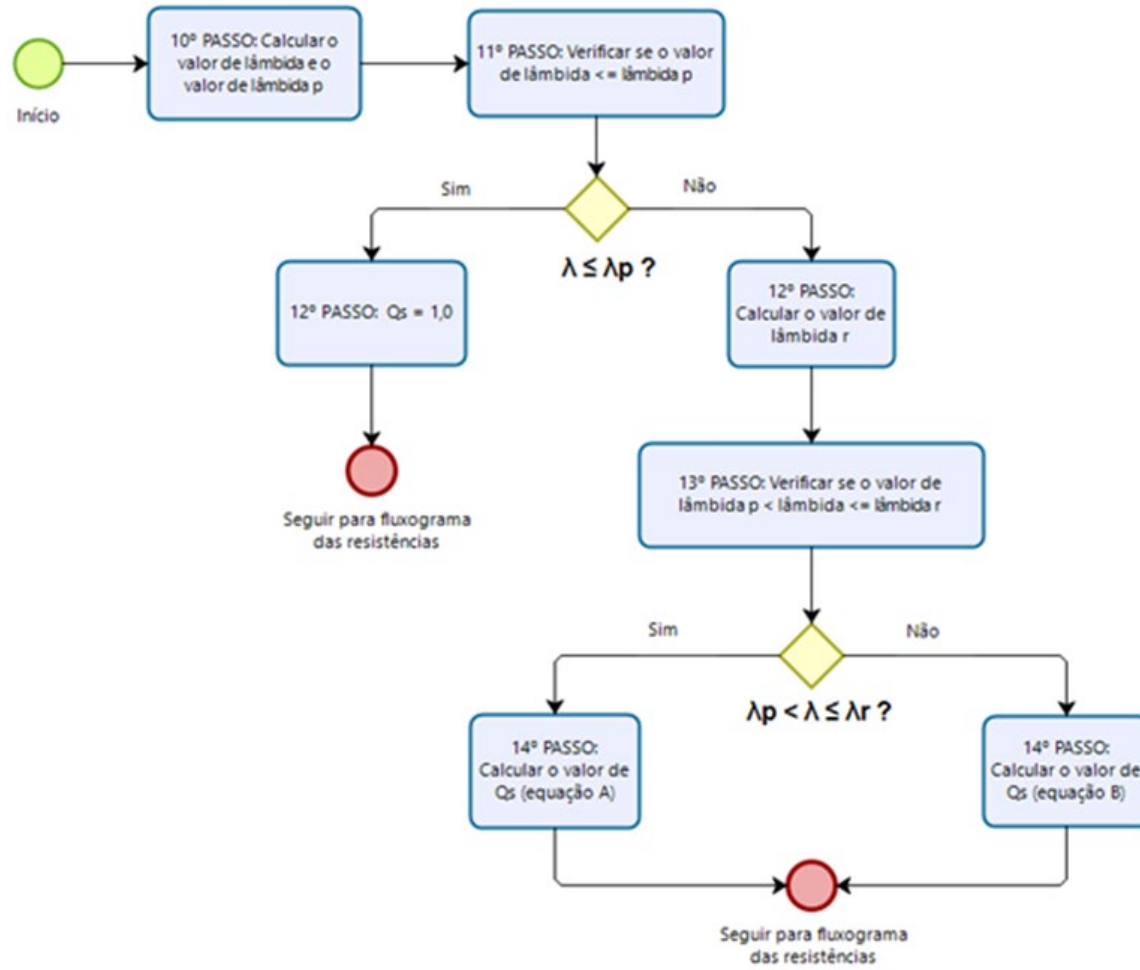
Professor Titular da Universidade de Vassouras.

E-mail: cvitorc@gmail.com carlos.vitor@universidadedevassouras.edu.br

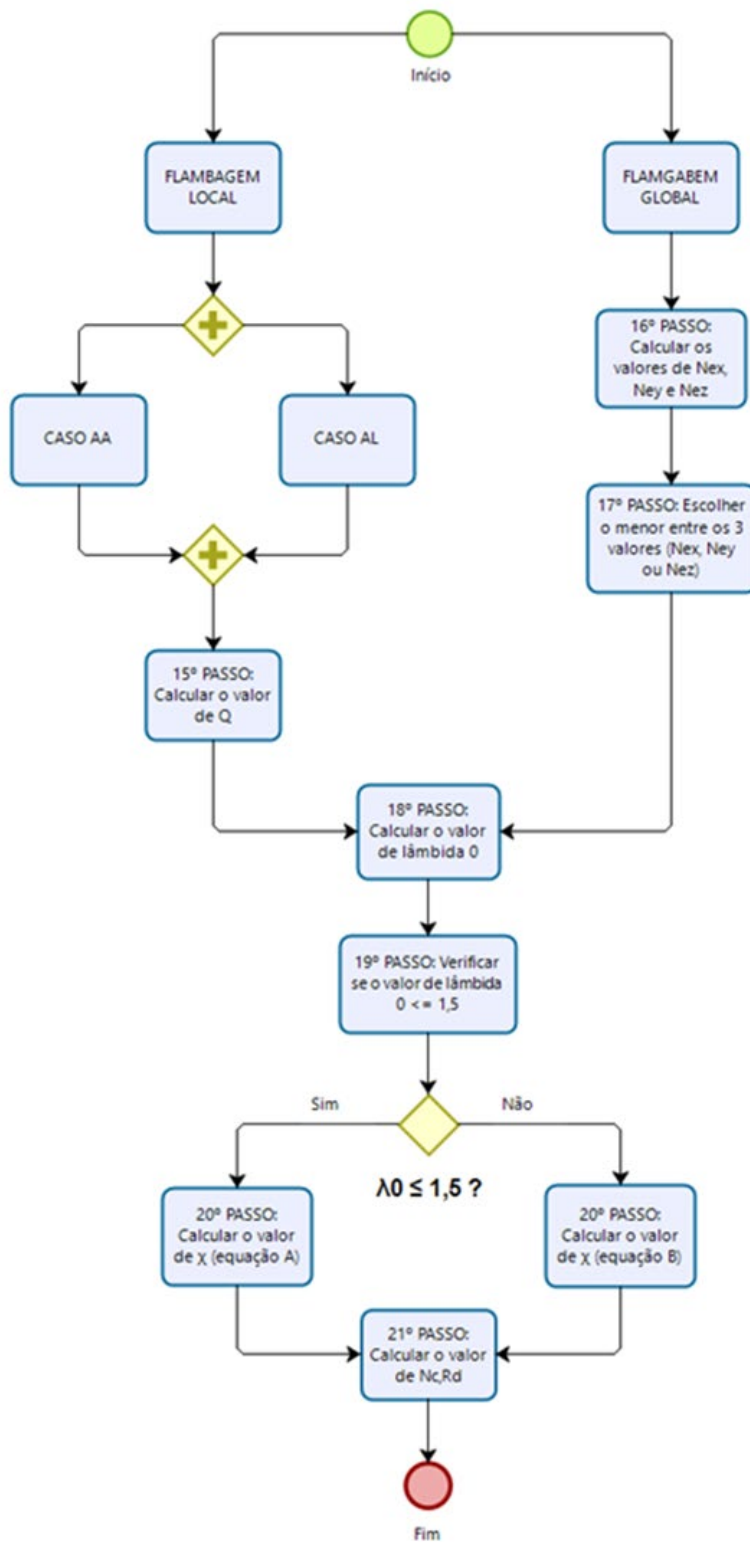
Apêndice



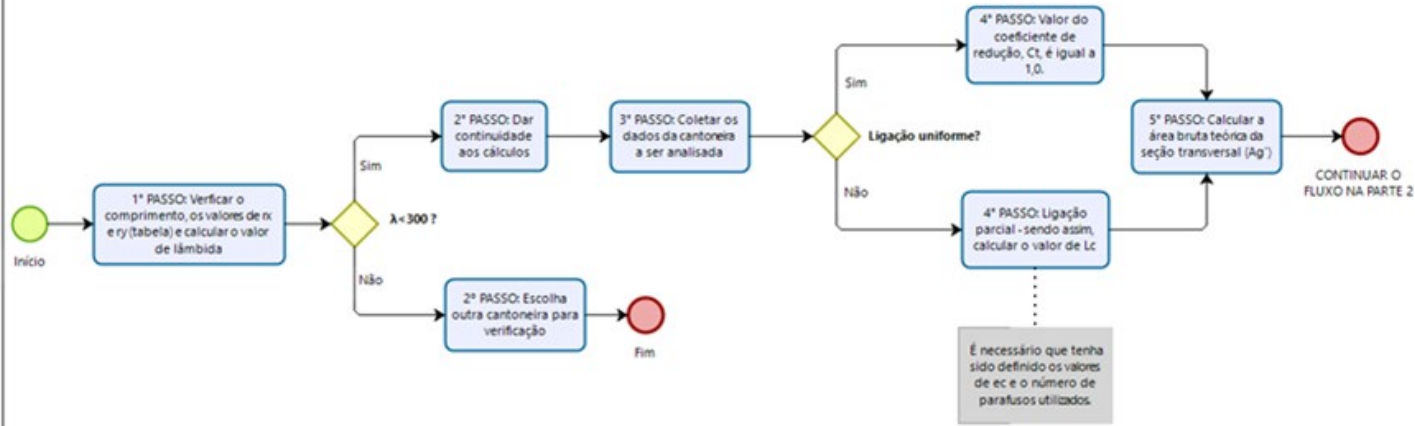
FLUXOGRAMA DE COMPRESSÃO PERFIL I - AÇO - CASO AL



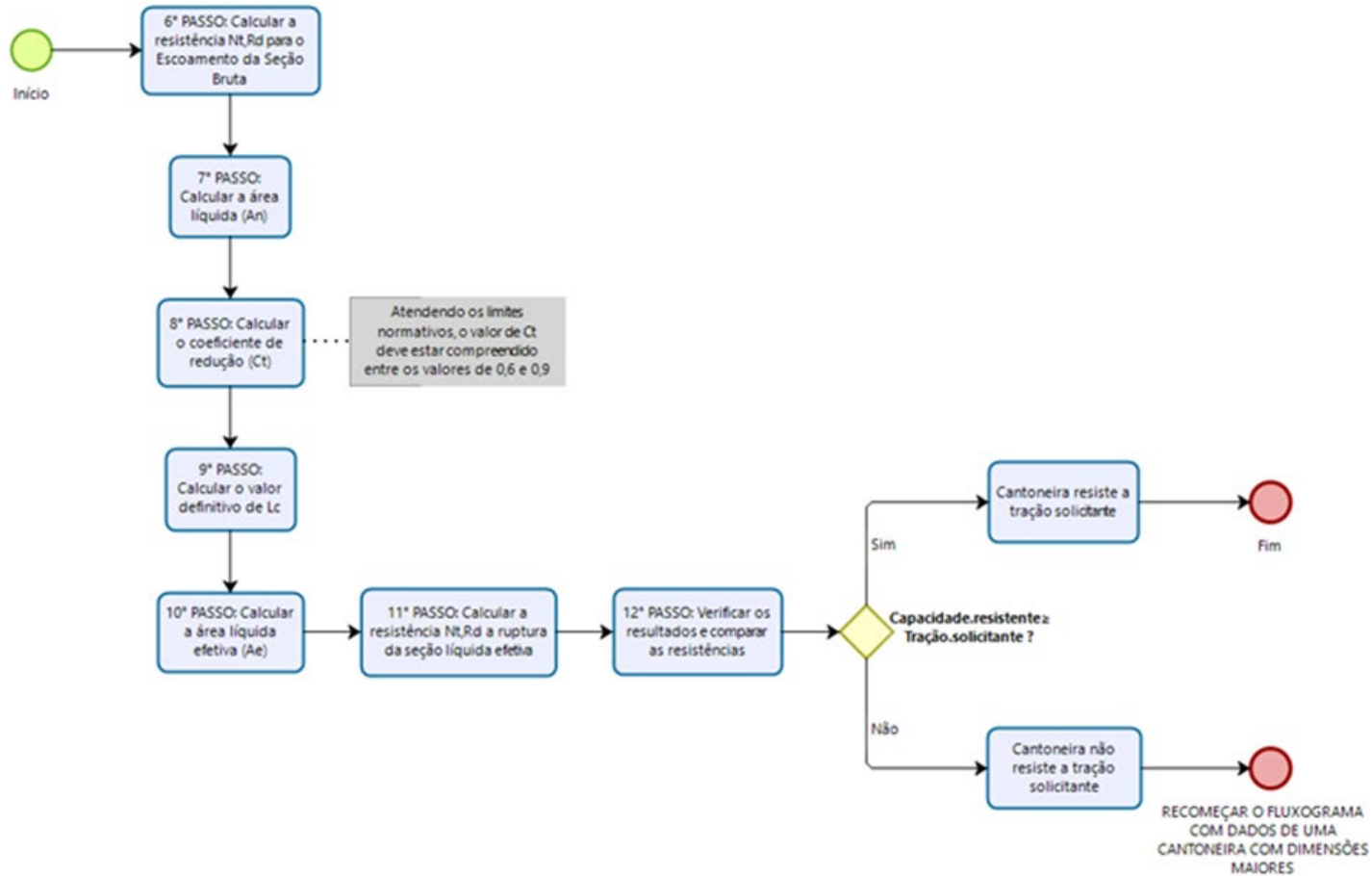
FLUXOGRAMA DE COMPRESSÃO PERFIL I - AÇO - VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA



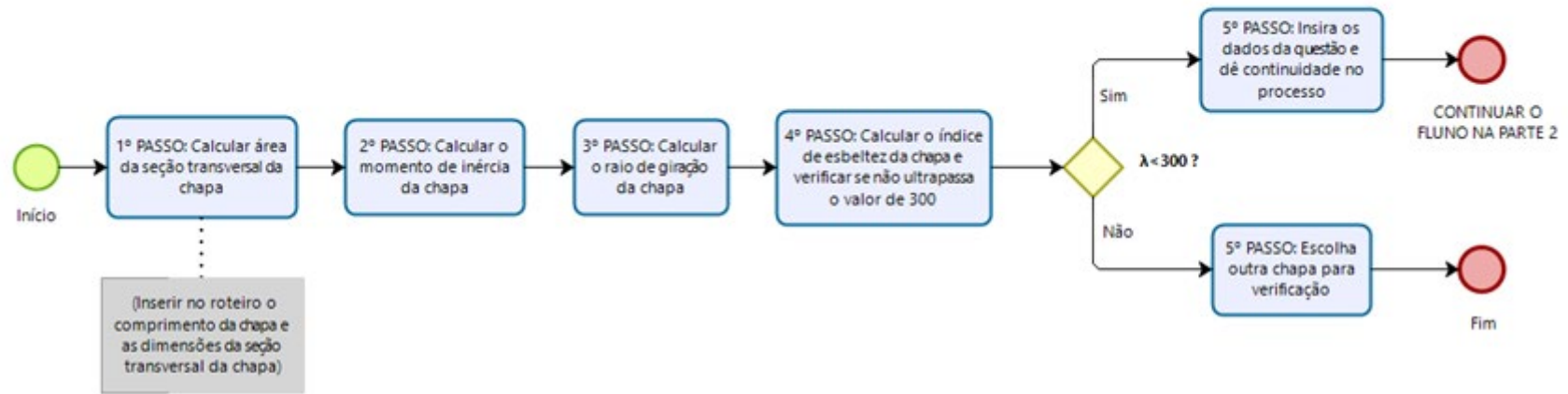
CANTONEIRAS DE AÇO COM ABAS KUJAS TRACKNADAS - PARTE 1



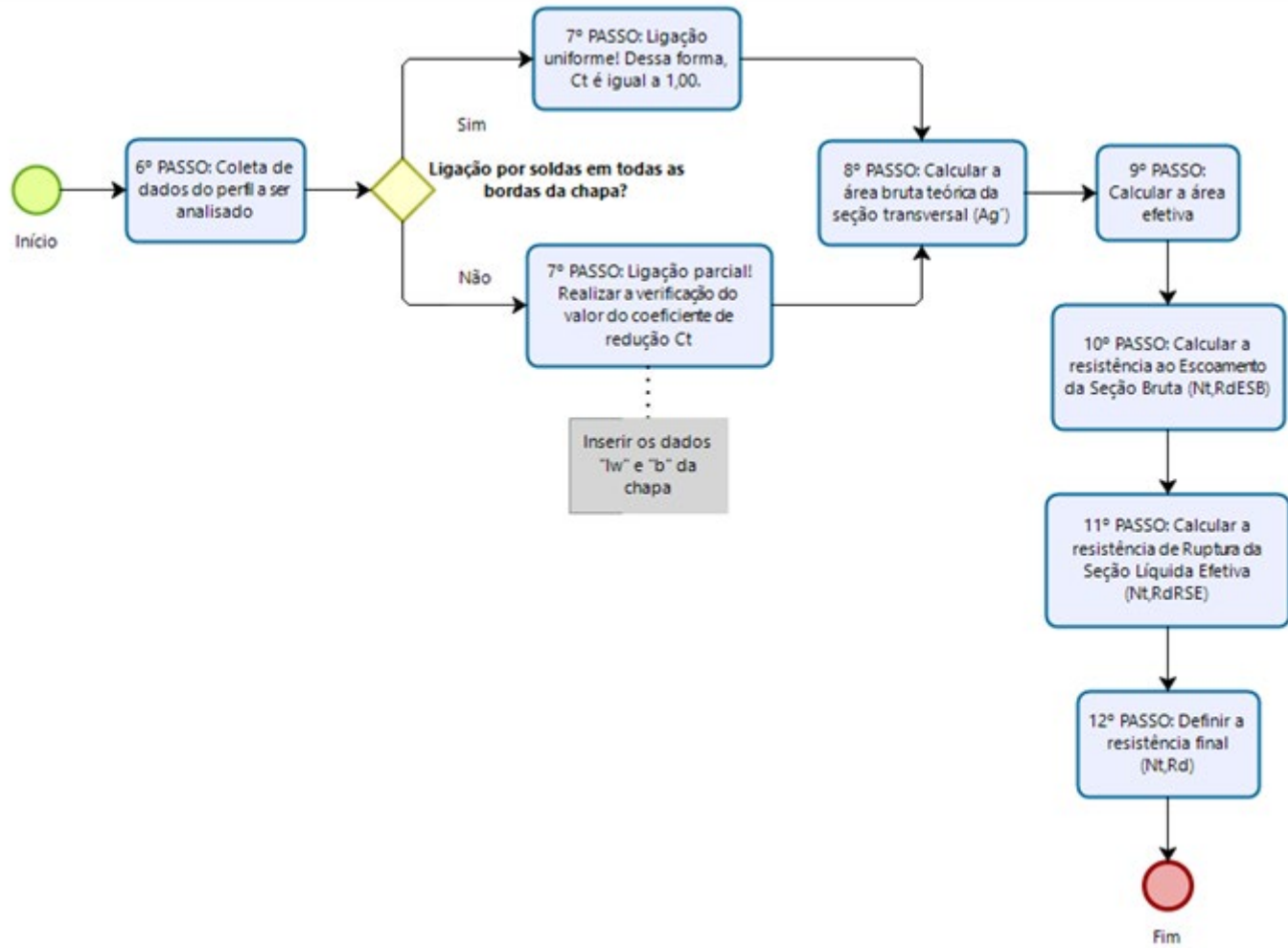
CANTONEIRAS DE AÇO COM ABAS IGUAIS TRACIONADAS - PARTE 2



CHAPAS DE AÇO SOLDADAS SUMETIDAS AO ESFORÇO DE TRAÇÃO - PARTE 1



CHAPAS DE AÇO SOLDADAS SUMETIDAS AO ESFORÇO DE TRAÇÃO - PARTE 2



Índice Remissivo

A

Aço • 18, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 58, 60, 61, 63, 71, 73, 75, 76, 83, 88, 89, 95, 106, 114, 121, 126, 129, 131, 136, 140

Axial • 57, 58, 62, 64, 73, 74, 76, 80, 88, 96, 111

C

Cantoneira • 77, 86, 103, 118

Compressão • 13, 14, 40, 43, 52, 57, 58, 61, 62, 64, 68, 124

Concreto • 11, 34, 43, 127, 129, 131, 140

Ch

Chapa • 14, 80, 81, 82, 89, 90, 91, 93, 94, 119, 121, 123

E

Esbeltez • 64, 72, 73, 90, 105, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 120

F

Frio • 14, 18, 38, 136, 139

L

Laminado • 14, 18, 38, 131, 137

Ligação • 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 91, 116, 122

N

NBR • 18, 55, 71, 75, 83, 87, 88, 95, 96, 103, 129, 131, 134

P

Parafuso • 80, 84

Perfil • 6, 13, 18, 73, 106, 114, 121, 131, 136

Ponderação • 103, 104

T

Tração • 13, 14, 40, 41, 43, 52, 76, 78, 80, 82, 88, 89, 92, 96, 105, 113, 118, 119, 124