

O ESTUDO DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE NIÓBIO NO AÇO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

Erivaldo Mamede – eri.civil@outlook.com

Fernanda Lopes Mendes – fernandalm@outlook.com.br

Gabriel Lukiantchuki de Melo Oliveira – gabriel_glmo@hotmail.com

Jan Vatauvuk (Orientador) – janvatauvuk@uol.com.br

RESUMO

Este artigo tem como objetivo estudar a possibilidade de otimização de estruturas metálicas a partir da adição de materiais nobres, especificamente o nióbio, às ligas de aço carbono comuns. Foi utilizado o *software* de modelagem *Structural Analysis Program2000* (SAP2000) para analisar as características estruturais de dois galpões, sendo um deles gerado com as propriedades do aço ASTM A36 e outro com o aço ASTM A572 Gr 50, para assim, ser possível comparar ambas as soluções através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Visando maior economia, sustentabilidade, soldabilidade e desempenho térmico, o método utilizando o aço microligado ao nióbio como matéria prima da estrutura metálica se fez mais eficiente para execução da mesma.

Palavras-chave: Aço. Nióbio. Estrutura Metálica.

THE STUDY OF THE EFFECTS OF NIOBIUM ADDITION IN STEEL FOR CIVIL CONSTRUCTION

ABSTRACT

This article aims to study the possibility of optimizing metallic structures from the addition of noble materials, specifically the niobium, to common carbon steel alloys. The Structural Analysis Program2000 (SAP2000) modeling software was used to analyze the structural characteristics of two sheds, being one of them built with the properties of ASTM A36 steel and the other with ASTM A572 Gr 50 steel, in order to compare both the solutions using Finite Element Method (FEM). Aiming economy, sustainability, weldability and thermal performance, the method using microalloyed steel with niobium as raw material for the metallic structure became more efficient for its execution.

Keywords: Steel. Niobium. Lean Structures.

1 INTRODUÇÃO

O contínuo crescimento das cidades centrais, combinado com o alto consumo de recursos naturais, pressiona o setor da engenharia civil a construir edifícios cujas características de produção tangenciem obrigatoriamente diversos aspectos da construção: sustentabilidade, para produzir mais valendo-se cada vez menos de recursos naturais; eficiência, para alcançar metas mais longínquas em menores períodos; e viabilidade, para conseguir atingir maiores resultados minimizando os gastos e riscos financeiros envolvidos no processo; além de ambicionar metas subjetivas como por exemplo a adequação do empreendimento ao contexto local urbano e propostas socioeconômicas. Dentro desse contexto sobre a construção civil, para criar produtos cada vez melhores, o papel do engenheiro estrutural faz-se cada vez mais importante, sendo este o profissional responsável por conciliar as aspirações do cliente, exigências dos órgãos regulamentadores e o design idealizado pelos profissionais de arquitetura.

Em geral, toda a composição estrutural deve ser robusta o suficiente para resistir à todas as cargas atuantes, considerando inclusive, a pior situação, sendo quando cargas cíclicas se somam às cargas estáticas, pela ação de forças da natureza como ventos e chuvas. A durabilidade das estruturas também deve ser considerada, para servirem à sociedade por longos períodos. Segundo Hahn (1994), em todo país, a qualidade de vida, segurança econômica e militar dependem cada vez mais da capacidade de sintetizar e processar materiais, tanto os já consagrados quanto os novos, e de integrá-los em tecnologias de manufatura economicamente eficientes e ecologicamente seguras. O estudo das ciências dos materiais, aplicado à engenharia estrutural, busca cada vez mais contribuir para melhor eficiência das estruturas projetadas. Mesmo que o nióbio tenha sido descoberto há mais de duzentos anos, foi somente nos últimos cinquenta anos que ele vem sendo usado como uma importante solução tecnológica a partir do estudo e desenvolvimento dos aços microligados, como explicam Melfi et. al (2016).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O ELEMENTO QUÍMICO: NIÓBIO

O processo de adicionar elementos de liga nos aços-carbono é realizado com o intuito de aumentar a resistência do material, diminuir o seu peso, melhorar as propriedades elétricas e magnéticas, entre outros. Um dos elementos de liga que é utilizado é o elemento Nióbio, encontrado pela primeira vez no Brasil em 1953, pelo geólogo Djalma Guimarães, na cidade de Araxá.

“O nióbio possui uma forte afinidade geoquímica com o tântalo, sendo frequentemente encontrados juntos na natureza. Foram descritos mais de 90 minerais de Nb e Ta, dos quais destacam-se: columbita-tantalita, pirocloro, bariopirocloro e loparita. Columbita-tantalita e pirocloro são as

principais fontes de nióbio no Brasil e no mundo.”. (ALMEIDA; BARROS; MONTEIRO, 2019, p.13).



Figura 1. Liga ferronióbio (ALMEIDA; BARROS; MONTEIRO, 2019)

O Brasil possui 98% do mercado mundial de Nióbio, sendo cerca de aproximadamente 24,6 milhões de toneladas no total, distribuídas em quatro estados: Goiás, Minas Gerais, Amazonas e Rondônia, segundo a Agência Nacional de Mineração (Figura 2). Grande parte do material é exportado para mais de 50 países, em maior potencial para atender empresas siderúrgicas.

Tabela 1. Dados de produção do Nióbio em 2019 (ANM, 2020)

Nióbio/UF	Produção Bruta			Produção Beneficiada		
	Quantidade	Contido	Teor	Quantidade	Contido	Teor
	(t)	(t)	(%)	(t)	(t)	(%)
Goiás (Pirocloro)	9.338.800	53.220	0,57	25.440	13.800	54,24
Minas Gerais (Pirocloro)	7.398.340	192.669	0,60	203.445	109.760	53,95
Amazonas (Columbita Tantalita)	5.948.821	12.493	0,21	10.005	3.502	35

Tabela 2. Dados de produção comercializada do Nióbio em 2019 (ANM, 2020)

Nióbio/UF	Produção Comercializada			
	Bruta		Beneficiada	
	Quantidade (t)	Valor (R\$)	Quantidade (t)	Valor (R\$)
Goiás (Pirocloro)	-	-	25.440	388.162.667
Minas Gerais (Pirocloro)	-	-	202.057	343.520.631
Amazonas (Columbita Tantalita)	-	-	11.837	79.295.958

A comercialização deste material só não é maior pois o mesmo pode ser substituído por outros elementos químicos, como vanádio (V) ou titânio (Ti) e, em certos casos, por tungstênio (W), tântalo

(Ta) ou molibdênio (Mo). Além de que o país não exporta produtos manufaturados, que são de maior valor agregado, exportando apenas a liga.

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem uma origem difícil de se determinar, pois seus conceitos base vem sendo desenvolvidos e estudados por mais de 150 anos. Somente a partir da década de sessenta que os termos “elementos finitos” foram oficializados por Ray Clough (ALMEIDA, 2014). Este método, que foi desenvolvido a partir de bases da física clássica, é utilizado para realizar a análise de problemas em engenharia estrutural, o termo “elementos finitos” foi empregado devido ao método tratar de pequenas partições da forma da estrutura em figuras geométricas elementares, dessa forma, um corpo sólido hipotético é dividido em um número finito de elementos conectados por nós, de maneira artificial, com isso, pode-se analisar o estudo dos deslocamentos com relação às tensões competentes (AZEVEDO, 2003).

O aparecimento de programas de computadores que utilizam esse método, torna facultativo a necessidade de humanos realizarem cálculos por equações diferenciais manualmente. Os programas para esse propósito geral surgiram entre os anos de 1960 e 1970, desde então, as análises computacionais têm passado por melhorias, e cada vez mais se mostram confiáveis e atraentes o suficiente para ser largamente empregadas nos projetos atuais (COOK, 2001).

Cook (2001), explica que o Método dos Elementos Finitos consiste em utilizar diferentes métodos numéricos de resolução de problemas para obter a solução aproximada, através da subdivisão da geometria de problema em elementos menores (chamados de elementos finitos), onde a interpolação da solução aproximada, resulta na solução exata.

Foi encontrado na literatura um estudo que corrobora a utilização do Método dos Elementos Finitos com a finalidade de obter estruturas mais leves. A pesquisa tem como finalidade apresentar como a método dos elementos finitos alinhado com uma ferramenta computacional pode gerar uma análise avançada dos comportamentos estáticos e dinâmicos de uma estrutura metálicas reticuladas. A autora afirma que o desconhecimento desses comportamentos gera uma acumulação de danos estruturais e como metodologia adotada ela considerou duas fontes de não-linearidades: a geométrica e a física, com isso pode-se considerar as deslocabilidades da estrutura causadas pelas características mecânicas dos materiais utilizado nas construções civil. Com o desenvolvimento da indústria civil o interesse por edificações mais eficientes, com características como: maior custo-benefício, estruturas mais leves, esbeltas e a questão da sustentabilidade ganhando cada vez mais espaço na área da construção civil, com esse cenário o comportamento não linear das estruturas passa a ser mais importante obter uma análise mais detalhada, com isso os engenheiros, quando capacitados, ao utilizar o método dos elementos finitos conseguem obter soluções mais eficientes para questões com:

possíveis problemas estruturais, otimização das estruturas, sem super dimensiona-las sem afetar fatores de segurança e qualidade. (SILVA, 2009).

Em outro estudo presente na literatura, também foi encontrado um trabalho mostrando como o Método Dos Elementos Finitos combinado com o Método dos Elementos de Contorno, podem contribuir para realizar uma análise da interação solo-estrutura. O autor buscou mesclar metodologias de análises, tanto como computacionais como também soluções teóricas, para obter uma análise macro da estrutura, levando em conta não só as possíveis deformações que a estrutura sofreria devida a seu peso próprio e seus respectivos carregamentos, mas também como a fundação recebe tais esforços e conseqüentemente como é a interação entre os elementos de fundação com o solo. O trabalho apresenta uma metodologia onde se evidencia o emprego do método dos elementos de contorno para realizar a modelagem do solo tridimensional juntamente com as soluções fundamentais de Kevin e o autor contribui acrescentando em suas análises uma técnica alternativa na consideração do maciço não-homogêneo, onde esse conjunto resulta em um sistema de equações reduzido e com uma maior precisão na obtenção dos resultados, pois o modelo resultante é como um solo único. Em seguida é apresentado a simulação de todos os elementos da estrutura empregando o método dos elementos finitos, com a obtenção desses dados e modelos o autor nos apresenta um acoplamento desses métodos, com a transformação das cargas de superfície do método dos elementos de contorno em carregamentos nodais reativos no método dos elementos finitos (RIBEIRO, 2009).

2.3 AÇO MICROLIGADO AO NIÓBIO

Alguns estudos utilizaram metodologia similar ao que será apresentado neste trabalho, porém, com o foco voltado para a análise comparativa de resistência mecânica e econômica entre o aço convencional ASTM A36 e o aço ASTM A572 Gr 50. Através da construção de um edifício industrial realizado pela CODEME Engenharia, empresa brasileira especializada em estruturas de aço, foi possível notar redução de diversos fatores, tais como: redução de massa, redução na emissão de CO₂, redução do gasto energético e redução de custo. A figura 2 ilustra a composição química do aço especial de alta resistência utilizado pela CODEME neste caso em questão, para o aço A572 Gr. 50, vê-se que houve uma adição de nióbio em uma ordem de grandeza de 0,005 até 0,05 do percentual total da massa de aço.

Item	CSA G40.21 – 350W[10]	A572 Grade 50[11]	ASTM A992[8]
Chemical Composition wt.%			
Carbon (C)	0.23 max	0.23 max	0.23 max
Chromium (Cr)	Not specified	Not specified	0.35 max
Copper (Cu)	Not specified	Not specified	0.60 max
Manganese (Mn)	0.5 – 1.50	1.35 max	0.5 – 1.60
Molybdenum (Mo)	Not specified	Not specified	0.15 max
Nickel (Ni)	Not specified	Not specified	0.45 max
Phosphorus (P)	0.04 max	0.04 max	0.035 max
Silicon (Si)	0.40 max	0.15 – 0.40	0.40 max
Sulfur (S)	0.05 max	0.05 max	0.045 max
Vanadium (V)	0.10 max	0.01 – 0.15	0.15 max
Vanadium (V) + Niobium (Nb)	0.10 max	0.02 – 0.15	0.15 max
Niobium (Nb)	0.10 max	0.005 – 0.05	0.05 max
Carbon Equivalent			0.45 max
Mechanical Properties			
Yield Point	345 MPa min	345 MPa min	345 – 450 MPa
Tensile Strength	450 – 650 MPa	450 MPa min	450 MPa min
Yield-to-Tensile Ratio	Not specified	Not specified	0.85 max
Elongation in 200 mm	19% min	18% min	18% min
Elongation in 50 mm		21% min	21% min

Figura 2. Composição química de um aço A572 Gr. 50 (LEONARDO SILVESTRE, 2012)

Há um estudo relacionando o uso de aço microligado ao nióbio com a finalidade de se obter edificações mais eficientes. Segundo os autores, os benefícios do nióbio em aços microligados se encaixam no cenário atual exigido pelo mercado, onde cada vez mais se busca edificações com uma maior eficiência econômica, construir mais rápido e com menor consumo de energia e de matérias-primas. Com os resultados obtidos, evidenciou que a estrutura metálica produzida com aço microligado ao nióbio obtém uma característica de baixa temperatura de transição dúctil-frágil, permitindo a aplicação dessa estrutura em diversos ambientes. Também apresentou uma excelente soldabilidade, e que em comparação com uma estrutura convencional, sua produção obteve reduções de 10% do peso e 5% do custo. Com essas conclusões os autores estimam uma redução de consumo e emissões de gases de efeito estufa, transporte e montagem do aço em 9%. (AMARAL et al., 2016).

Na literatura, foi encontrado uma proposta de elaboração de um atlas de soldagem para aço microligado ao nióbio, os autores afirmam que esse aço de alta resistência tem mostrado ser uma boa opção para fabricação de perfis estruturais, embora no quesito soldagem, este aço não apresente uma norma que descreva uma metodologia para se trabalhar a solda neste material. No processo convencional de elaboração de uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) é feito uma tabela, relacionando aços com rota de processamento antigos, esse processo se assemelha a um processo empírico de tentativa e erro, pois é baseado nas melhores práticas experimentais, se orientando em normas e realizando soldagens em placas de teste, para que na sequência, realize-se teste sobre essas amostras. Como resultado, só há duas possibilidades: aprovado ou não, desta forma não há garantias de que as propriedades da junta sejam as mais robustas e estáveis em termos de características metalúrgicas e menos ainda em termos econômicos. Para contornar tal situação a

equipe do Laprosolda (Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia) apresentou uma proposta de solução, onde através de simulações físicas obtêm-se resultados mais robustos para a elaboração de EPS. Com esse estudo e simulações físicas, como Gleeble e dilatometria, juntamente com ensaios mecânicos de amostras, os autores almejavam elaborar um atlas com uma definição das faixas de parâmetros para soldagem desse material, informando características gerais das soldas, como por exemplo, energia de soldagem recomendada e sobre a necessidade, ou não, do uso de pré-aquecimento. Como resultado, a aplicação do atlas mostrou a possibilidade de correlacionar microestruturas simuladas (Atlas) com microestruturas reais (soldas), e obter taxas de resfriamento e suas propriedades mecânicas, também se não haveria necessidade do uso de pré-aquecimento para evitar microestruturas frágeis e susceptíveis a trincas de hidrogênio para este tipo de aço, resultando em uma redução de custo com processo de pré-aquecimento desnecessário (AMARAL; CARBONI; SCOTTI, 2017).

3 METODOLOGIA

3.1 MODELAGEM NO SISTEMA SAP2000

Para a análise referida, foram modeladas duas estruturas metálicas hipotéticas, no *software SAP 2000 21*, que se vale do Método dos Elementos Finitos para realizar suas análises e apresentar resultados; as estruturas em questão possuem dimensões totais de 12m x 50m, totalizando 600 metros quadrados, em um único pavimento de 7 metros de altura (do térreo até o banzo inferior da treliça) e 9,5 metros totais (do térreo até o ponto mais alto da cobertura); os pilares, no formato “tubular quadrado”, distam 5 metros entre si ao longo do eixo X; as vigas, no formato “Perfil I” também distam 5 metros, conforme ilustrado nas figuras 3 a 5. As estruturas são compostas por pilares, vigas e cobertura, as vigas compõem treliças e todos os elementos citados são metálicos, que vão apenas diferir na composição do material entre os modelos. O primeiro modelo, fora concebido utilizando-se o aço normatizado ASTM A36, ao passo que no segundo modelo, que é geometricamente similar, fora utilizado o aço especial de alta resistência microligado à nióbio, referido como aço A572Gr50.

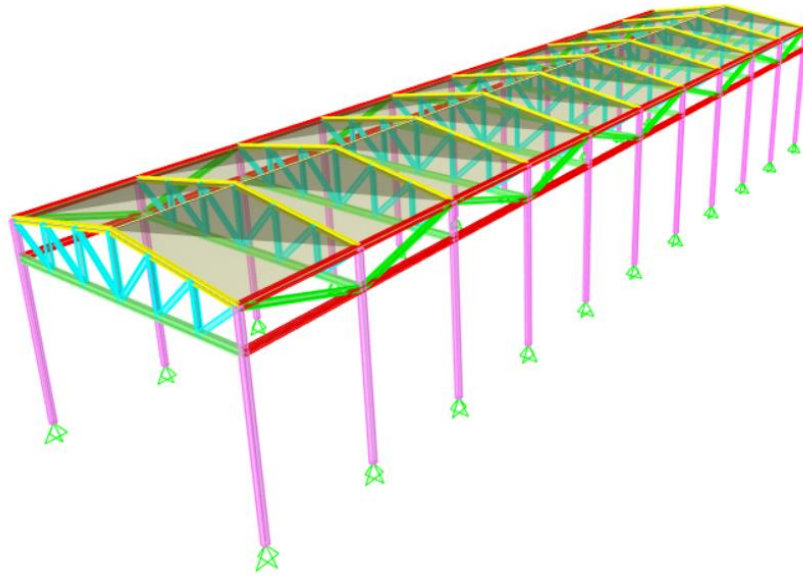


Figura 3. Perspectiva tridimensional da estrutura metálica (Autor, 2021)

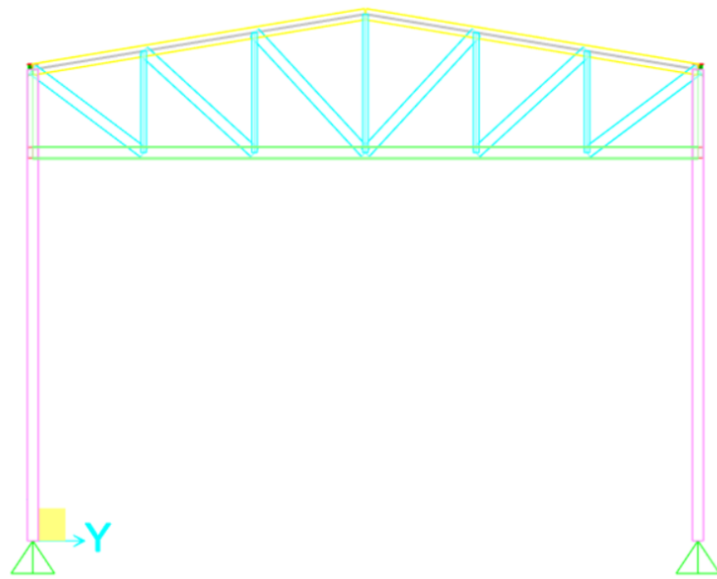


Figura 4. Perspectiva ortogonal frontal da estrutura metálica (Autor, 2021)

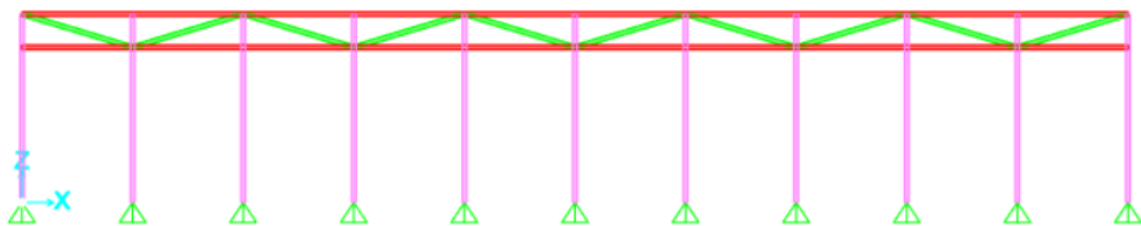


Figura 5. Perspectiva ortogonal lateral da estrutura metálica (Autor, 2021)

3.2 PARÂMETROS PARA ANÁLISE ESTRURAL

Para realizar a análise estrutural referida, foram utilizados os seguintes materiais metálicos na modelagem, e suas especificações constam nas figuras 6 e 7, mostrando os dados de entrada utilizados no *software*, referente às características físicas destes materiais.

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for ASTM A36 steel. The dialog is organized into several sections:

- General Data:** Material Name and Display Color (ASTM A36), Material Type (Steel), Material Grade (Grade 36), and Material Notes (Modify/Show Notes...).
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume (76,9729) and Mass per Unit Volume (7,849). Units are set to KN, m, C.
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E (1,999E+08), Poisson, U (0,3), Coefficient Of Thermal Expansion, A (1,170E-05), and Shear Modulus, G (76903069).
- Other Properties For Steel Materials:** Minimum Yield Stress, Fy (248211,28), Minimum Tensile Stress, Fu (399896), Expected Yield Stress, Fye (372316,9), and Expected Tensile Stress, Fue (439885,6).

At the bottom, there is a checkbox for 'Switch To Advanced Property Display' and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 6. Características físicas do aço ASTM A36 (Autor, 2021)

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for A572Gr50 steel. The dialog is organized into several sections:

- General Data:** Material Name and Display Color (A572Gr50 Nb), Material Type (Steel), Material Grade (Grade 50), and Material Notes (Modify/Show Notes...).
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume (76,9729) and Mass per Unit Volume (7,849). Units are set to KN, m, C.
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E (1,999E+08), Poisson, U (0,3), Coefficient Of Thermal Expansion, A (1,170E-05), and Shear Modulus, G (76903069).
- Other Properties For Steel Materials:** Minimum Yield Stress, Fy (344737,9), Minimum Tensile Stress, Fu (448159,3), Expected Yield Stress, Fye (379211,7), and Expected Tensile Stress, Fue (492975,2).

At the bottom, there is a checkbox for 'Switch To Advanced Property Display' and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 7. Características físicas do aço A572Gr50 (Autor, 2021)

Para o *software* realizar o dimensionamento estrutural correto, sobre o perfil metálico mais adequado a ser empregado, visando maior economia e segurança, para as vigas metálicas em “perfil I” fora inserida uma extensa série que compreendia os perfis de tamanhos normatizados W 4x13 até o tamanho W 8x67; analogamente, para os pilares de perfil “tubular quadrado”, fora inserida uma série contendo os tamanhos HSS 7x2x1/2 até o tamanho HSS 8x8x5/16. As figuras 8 e 9 ilustram exemplos de seções inseridas na lista pré-definida para posterior dimensionamento da estrutura em questão.

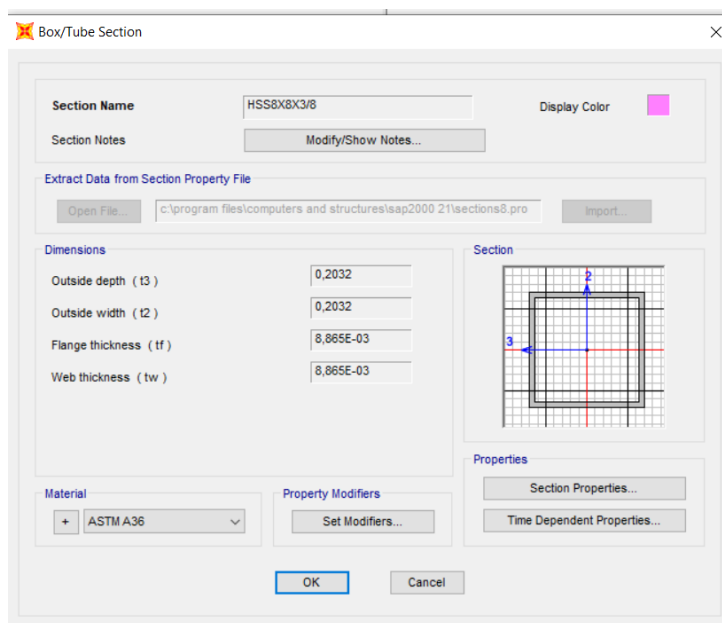


Figura 8. Exemplo de características geométricas de perfil tubular quadrado HSS 8x8x3/8 (Autor, 2021)

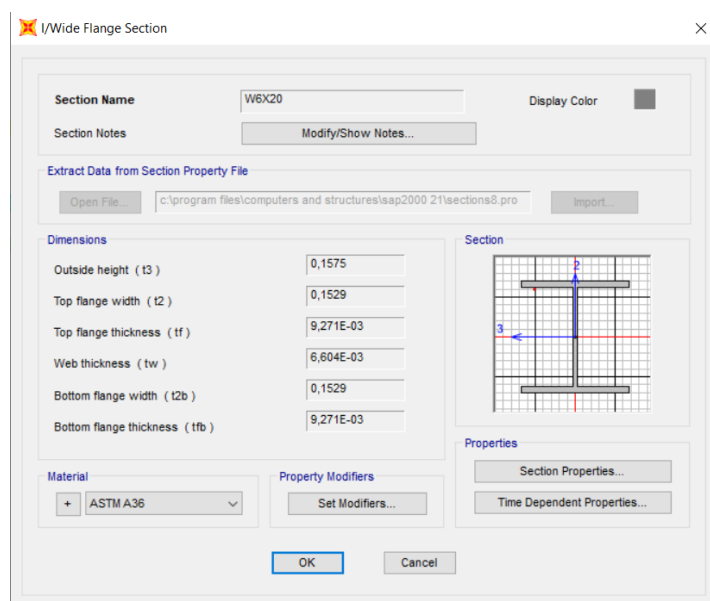


Figura 9. Exemplo de características geométricas de “perfil I” W 6x20 (Autor, 2021)

Com relação às cargas aplicadas na estrutura, fora considerada uma pressão lateral do vento, além do peso próprio dos elementos estruturais ilustrados. Conforme pode-se ver nas figuras 3 a 5, todas as bases dos pilares foram restringidas e definidas como apoios fixos.

3.3 ANÁLISE ECONÔMICA

A partir dos dois modelos desenvolvidos, foram extraídos os quantitativos de materiais necessários para a execução do projeto para as diferentes soluções estruturais. O objetivo principal foi realizar pesquisas de custo e de produtividade para o projeto hipotético proposto, comparando ambas as estruturas e seus perfis metálicos estudados.

Para a devida precificação, foi utilizado dados do SIURB (Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras), com o intuito de buscar o rendimento dos trabalhadores envolvidos e os preços unitários mais próximos do mercado de trabalho atual. Os dados encontrados da produtividade são de 2021.

Tabela 3. Rendimento estimado de mão de obra para estruturas metálicas

Descrição	Un.	Rendimento
Montador de estruturas metálicas	h	5,5 ₍₁₎
Ajudante de montador de estruturas metálicas	h	7,2 ₍₁₎
Soldador	kg	0,04

(1) rendimento estimado para cada m de perfil (em hora) (SIURB, 2021)

Para a estimativa de preço por quilo do aço microligado ao nióbio, foi utilizado como referência o Editorial do Comitê Internacional da CBMM, realizado em Singapura no ano de 2012, que estima que ele tem um valor superior de 6% comparado à um aço comum, conforme Figura 10.

Steel Type	Total Weight (%)	Steel Unit Price (%)	Total Cost (%)
ASTM A36 – Regular carbon steel	100	100	100
ASTM A572 Grade 50 – High strength steel	78	106	83
Saving by adopting high strength steel			17

Figura 10. Comparação de custos de um aço ASTM A36 para um aço ASTM A572 Gr. 50 microligado (LEONARDO SILVESTRE, 2012)

3.4 ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE

Para a análise dos aspectos sustentáveis, utilizou-se, assim como para a análise econômica, os quantitativos dos materiais necessários para a execução da estrutura metálica para as diferentes soluções do *software*. O objetivo principal foi comparar a emissão de gases de efeito estufa durante

o processo de fabricação dos perfis metálicos para construir a estrutura hipotética em questão, com foco principal na emissão de carbono.

Analisando as propriedades mecânicas e composições químicas de cada material, conforme elaborado na Tabela 4 e 5, nota-se que o aço microligado ao nióbio (ASTM A572 Gr. 50) possui um limite de escoamento maior que um aço comum e mantém um baixo valor de carbono equivalente, o que proporciona um maior refino do grão e uma soldabilidade mais rápida do material. Reduzindo assim, periodicamente, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) ao longo da produção e execução da estrutura metálica.

Tabela 4. Propriedades mecânicas de aço ASTM A572 Grau 50 e aço ASTM A36

	Limite de Fluência Mínimo (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
ASTM A572 Gr 50	345	450 (mínimo)
ASTM A36	250	400-550

Tabela 5. Composição química máxima de aço ASTM A572 Grau 50 e aço ASTM A36

	C(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Si(%)	Nb(%)
ASTM A572 Gr 50	0,23	1,35	0,03	0,03	0,40	0,05
ASTM A36	0,29	1,03	0,04	0,05	0,28	-

Segundo o *World Steel Association*, as usinas integradas consomem cerca de 65% de sua energia para produzir ferro-gusa, que é o principal formador do aço. Os dados foram baseados utilizando o coque como agente redutor para a transformação de minério de ferro em ferro-gusa.

A partir dessas informações, para estimar a emissão de carbono, foi analisado o consumo através do peso de cada estrutura e transporte do material.

Para o cálculo e análise do consumo de energia, também fora utilizado como referência os valores apresentados pela CODEME no Comitê internacional da CBMM, onde é descrito que é necessário um consumo de aproximadamente 22,52 GJ por tonelada de aço produzido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MODELAGEM NO SISTEMA BIM

Após o processamento e análise dos dois modelos anteriormente citados, obtemos as seções mínimas que atendem as necessidades estruturais nos quesitos economia e segurança, os resultados das seções dos perfis indicados pelo *software* para os diferentes casos da composição da estrutura em aço ASTM A36 e aço A572Gr50 podem ser observados nas figuras 11 e 12, respectivamente.

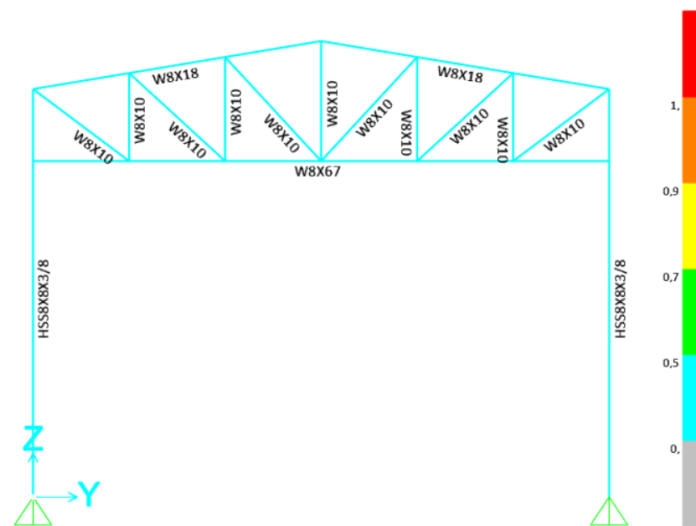


Figura 11. Perfis indicados para realizar a estrutura hipotética em aço ASTM A36 (Autor 2021)

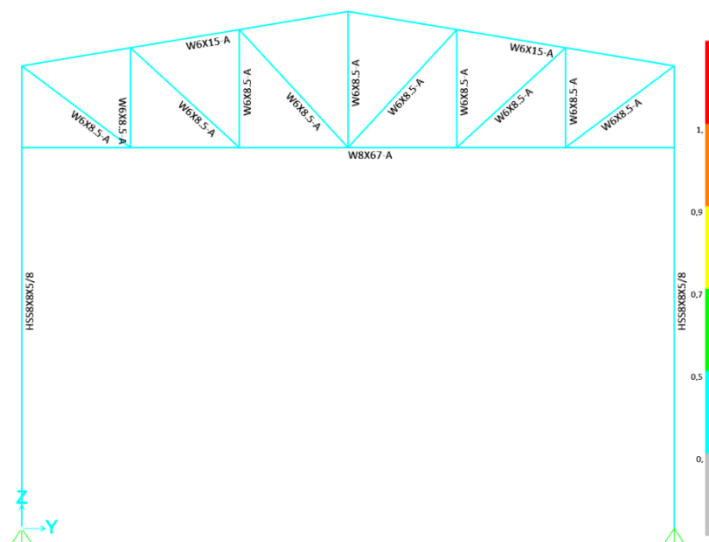


Figura 12. Perfis indicados para realizar a estrutura hipotética em aço A572Gr50 (Autor 2021)

Nota-se que na estrutura concebida com aço A36, os perfis indicados para as barras diagonais das treliças metálicas são os perfis W8x10, para os banzos superiores são os perfis W8x18, para os banzos inferiores são os perfis W8x67 e para os pilares de sustentação são os perfis HSS8x8x3/8; quando realizado o reprocessamento da mesma geometria da estrutura, apenas alterando o material de composição do aço, notamos que os perfis indicados para executar as barras diagonais reduziram para o tamanho W6x8.5, os banzos inferiores reduziram para o tamanho W8x67, os banzos superiores reduziram para o tamanho W6x15 e os pilares de sustentação reduziram para o tamanho HSS8x8x5/8.

Importante ressaltar que estes resultados se repetem ao longo de toda a estrutura em questão, sendo desnecessário apresentar repetidamente, tesoura por tesoura, os perfis indicados para cada caso.

Com as seções necessárias definidas para cada caso, também fora extraído do *software SAP 2000 21* as reações em cada base de pilar, dados expressos através das figuras 13 e 14.

TABLE: Joint Reactions					
Joint	OutputCa	CaseType	F1	F2	F3
Text	Text	Text	KN	KN	KN
1	ELS-DEF	Combination	0,018	-2,216	22,444
3	ELS-DEF	Combination	0,015	-2,337	22,033
17	ELS-DEF	Combination	0,002197	-2,191	35,224
19	ELS-DEF	Combination	0,0007609	-2,351	26,92
33	ELS-DEF	Combination	0,001122	-2,19	34,664
35	ELS-DEF	Combination	0,001029	-2,352	26,849
49	ELS-DEF	Combination	0,000157	-2,192	35,818
51	ELS-DEF	Combination	0,0005944	-2,353	26,963
65	ELS-DEF	Combination	0,00008884	-2,192	34,5
67	ELS-DEF	Combination	0,000357	-2,353	26,829
81	ELS-DEF	Combination	-0,0001509	-2,193	35,827
83	ELS-DEF	Combination	0,0001479	-2,353	26,937
97	ELS-DEF	Combination	-0,0003823	-2,192	34,499
99	ELS-DEF	Combination	-0,00006389	-2,353	26,829
113	ELS-DEF	Combination	-0,0004578	-2,193	35,818
115	ELS-DEF	Combination	-0,000297	-2,353	26,964
129	ELS-DEF	Combination	-0,001413	-2,191	34,661
131	ELS-DEF	Combination	-0,0007317	-2,353	26,847
145	ELS-DEF	Combination	-0,002501	-2,192	35,23
147	ELS-DEF	Combination	-0,0004631	-2,352	26,932
161	ELS-DEF	Combination	-0,018	-2,214	22,442
163	ELS-DEF	Combination	-0,015	-2,335	22,023

Figura 13. Tabela de reações verticais – caso aço ASTM A36 (Autor 2021)

TABLE: Joint Reactions					
Joint	OutputCas	CaseType	F1	F2	F3
1	ELS-DEF	Combination	0,019	-2,263	16,286
3	ELS-DEF	Combination	0,017	-2,283	15,756
17	ELS-DEF	Combination	-0,002645	-2,259	26,917
19	ELS-DEF	Combination	-0,003165	-2,286	18,73
33	ELS-DEF	Combination	0,0004058	-2,259	26,866
35	ELS-DEF	Combination	0,001052	-2,287	18,627
49	ELS-DEF	Combination	-0,0003055	-2,259	26,881
51	ELS-DEF	Combination	-0,00006265	-2,287	18,666
65	ELS-DEF	Combination	-0,00003594	-2,259	26,863
67	ELS-DEF	Combination	0,0001274	-2,287	18,643
81	ELS-DEF	Combination	1,513E-11	-2,259	26,864
83	ELS-DEF	Combination	-9,212E-12	-2,287	18,645
97	ELS-DEF	Combination	0,00003594	-2,259	26,863
99	ELS-DEF	Combination	-0,0001274	-2,287	18,643
113	ELS-DEF	Combination	0,0003055	-2,259	26,881
115	ELS-DEF	Combination	0,00006265	-2,287	18,666
129	ELS-DEF	Combination	-0,0004058	-2,259	26,866
131	ELS-DEF	Combination	-0,001052	-2,287	18,627
145	ELS-DEF	Combination	0,002645	-2,259	26,917
147	ELS-DEF	Combination	0,003165	-2,286	18,73
161	ELS-DEF	Combination	-0,019	-2,263	16,286
163	ELS-DEF	Combination	-0,017	-2,283	15,756

Figura 14. Tabela de reações verticais em cada pilar – caso aço A572Gr50 (Autor 2021)

Das tabelas de reações em cada pilar, através da soma das reações, pode-se inferir que o peso total da estrutura no primeiro caso é de aproximadamente 647,25 KN, enquanto no segundo caso, a estrutura apresenta um peso total de 473,98 KN. Do primeiro para o segundo caso, houve uma redução de 173,27 KN no peso total da estrutura, equivalente a aproximadamente 27% sobre o peso anterior da estrutura.

4.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Com os pesos totais das estruturas, ao realizar as devidas conversões, pode-se chegar quantidades totais, em quilogramas, de aço a ser utilizado para construir a estrutura em questão. Sendo assim, estima-se um total de 66,01 toneladas para a construção da estrutura em aço ASTM A36, e um total de 48,33 toneladas para a construção da estrutura em aço A572Gr50 de alta resistência microligado à nióbio, sendo a diferença entre as grandezas equivalentes à 17,68 toneladas de aço.

Sabendo-se que os preços por quilo do aço ASTM A36 e do aço A572Gr50 microligado ao nióbio são, respectivamente, R\$ 4,85 e R\$ 5,14 (CARVALHO, 2020), calcula-se estimadamente que os preços para construção das duas estruturas hipotéticas seriam de R\$320.148,5 (para a construção em aço ASTM A36) e R\$248.416,2 (para a construção em aço microligado à nióbio). Resultando em uma redução de aproximadamente 22% no custo total do material.

Para os cálculos da mão de obra, fora utilizado os rendimentos apresentados na Tabela 3 e os preços unitários da Tabela 4, levando em consideração que um colaborador tem sua jornada de trabalho estimada em 8 horas por dia ou 44 horas semanais.

Tabela 6. Preço unitário estimado de mão de obra para estruturas metálicas

Descrição	Un.	Preço Unitário (R\$)⁽¹⁾
Montador de estruturas metálicas	h	19,73
Ajudante de montador de estruturas metálicas	h	17,08
Soldador	h	33,32

(1) precificação estimada por hora, SIURB (2021)

Uma equipe de três montadores, três ajudantes de montador de estruturas metálicas e um soldador levaria, em média, 14 semanas para a conclusão dos serviços na estrutura com o aço ASTM A36, o que resultaria em um gasto de aproximadamente R\$400.000,00 (quatrocentos mil reais). Enquanto a mesma equipe levaria 10 semanas para a conclusão dos serviços em uma estrutura com o aço microligado ao nióbio, e teria um custo de aproximadamente R\$370.000,00 (trezentos e cinquenta mil reais), devido ao ganho de rendimento no momento da solda. Portanto, além de reduzirmos o orçamento com material, há também uma economia na mão de obra de execução dos serviços.

4.3 ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE

Analogamente à análise econômica, com a massa total a ser utilizada na construção de cada galpão, podemos estimar o impacto ambiental que acontecerá em cada caso, conforme descrito na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7. Comparativo de emissão de CO₂ baseado na fabricação dos perfis.

	Peso Total (kN)	Peso Total (t)	Coefficiente de Emissão (kgCO₂/t)	Total de Emissão (kgCO₂)
ASTM A36	647,25	66,00	550 ⁽¹⁾	36.300,00
ASTM A572 Gr 50	473,98	48,33	550 ⁽¹⁾	26.581,50

(1) WSA (2008)

Também é possível realizar uma comparação de emissão de dióxido de carbono baseada no transporte dos perfis ao local de execução do galpão, supondo que a transportadora percorrerá 70km da usina até o destino final.

Para este cálculo, foi considerado o uso de um caminhão truck para transporte dos perfis, separando sua carga por tipologia de perfil e por altura máxima permitida de carga, que para esse caso, é de 4,4m do chão.

Tabela 8. Comparativo de emissão de CO₂ baseado no transporte dos perfis.

	Peso Total da Carga (t)	Distância Percorrida (km)	Coefficiente de Emissão (kgCO₂/km)	Total de Cargas Previstas	Total de Emissão (kgCO₂)
ASTM A36	66,00	70	0,217 ⁽¹⁾	7	106,33
ASTM A572 Gr 50	48,33	70	0,217 ⁽¹⁾	5	75,95

(1) ALVARES & LINKE (2001)

Com os respectivos resultados, podemos concluir que há uma redução de 26% de emissão de CO₂ quando estrutura é executada em aço microligado a nióbio somente na produção dos perfis, porém, quando somados ao transporte do material, este valor aumenta para 55%. Resultando assim, em uma estrutura que pode ser considerada como mais sustentável, quando olhamos para todo o seu processo de fabricação e transporte.

Conforme explicitado anteriormente, o consumo médio de energia para produzir uma tonelada de aço é de aproximadamente 22,52 GJ (LEONARDO SILVESTRE, 2012). Com esta informação em mãos, pode se estimar o consumo de energia utilizado para produzir as duas estruturas hipotéticas em análise. No primeiro caso, para a estrutura em aço A36, pesando 66,01 toneladas, o gasto de energia seria de aproximadamente 1.486,54 GJ, ao passo que, no segundo caso, para a estrutura idealizada com aço de alta resistência A572Gr50, pesando 48,33 toneladas, o gasto de energia seria de aproximadamente 1.088,39 GJ. Podendo-se concluir que haveria uma redução hipotética no

consumo de energia estimada de aproximadamente 398,15 GJ, equivalente a 27% de ganho em eficiência energética.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das análises realizadas através do *SAP 2000* e das bibliografias referenciadas, entende-se que utilizar aço microligado à nióbio para estruturas metálicas na construção civil, ainda que seja pouco conhecido no meio técnico-acadêmico, tem um enorme potencial para ser mais difundido e utilizado.

A análise financeira demonstrou que, mesmo o custo do quilo do aço microligado à nióbio sendo mais elevado de início; com a possível redução de sessão e conseqüentemente, de material necessário para realizar a mesma estrutura, em comparação com o tradicional aço ASTM A36, o aço A572Gr50 se torna mais viável economicamente falando, o que faz com que este método de construção seja uma alternativa para os que buscam economia na obra, além de ganho de produtividade com as máquinas e a mão de obra empregada.

Além disto, tendo em vista as tendências de mercado, que trazem para pauta construtivas mais eficientes e sustentáveis; a análise de sustentabilidade demonstrou que o aço microligado à nióbio também se faz distinto nessa categoria, apresentando indicadores positivos quando se pensa em utilizar menos energia e ter uma menor emissão de gás carbônico na atmosfera, quando comparado à produção do aço ASTM A36. Não somente o meio ambiente pode valer-se destes benefícios, como também as empresas que podem fazer utilização deste material especial.

Ressalta-se ainda, que o costume de se conceber a calcular estruturas metálicas em aço de alta resistência é pouco habitual no Brasil, fazendo com que a difusão da aplicação do material se torne mais difícil, enquanto em outros países, esta prática já é em muitos casos, tomada como uma alternativa prática de imediato.

Sugere-se então, para trabalhos e pesquisas futuras, métodos e estratégias de popularização da utilização deste material nobre, através de estudos de casos em que o aço especial já fora empregado ou em projeções econômicas para produção em larga escala, que confirmem os dados aqui apresentados; enquanto do ponto de vista técnico-acadêmico, pode-se pensar na realização de estudos e ensaios para inserção de barras de aço de alta resistência a ser introduzidas dentro do concreto armado, a fim de se obter vigas e pilares com maiores resistências à tração, sem a necessidade da protender os mesmos.

REFERÊNCIAS

ADOLPHO JOSÉ MELFI, AROLDO MISI, DIÓGENES DE ALMEIDA CAMPOS E UMBERTO GIUSEPPE CORDANI (Rio de Janeiro) (org.). **Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. 422 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. Brasília: ANM, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf. Acesso em: 20 maio 2021.

ALMEIDA, Guilherme Camelier; BARROS, José C.; MONTEIRO, Robson de Souza. **Nióbio: o elemento do século XXI**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2019. 14 v. Disponível em: <http://quid.s bq.org.br/wp-content/uploads/2019/05/SBQ-Cole%C3%A7%C3%A3o-Celebrando-a-Qu%C3%ADmica-vol14-niobio-FINAL-correto.pdf>. Acesso em: 20 maio 2021.

ALMEIDA, S. R. M., **Método dos elementos finitos**. Faculdade Federal de Goiás. Goiânia/Go, 2014.

AMARAL, Thiago de Souza *et al.* USO DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA MICROLIGADO AO NIÓBIO COM LIMITE DE ESCOAMENTO DE 450 MPA PARA CONSTRUÇÕES MAIS EFICIENTES. In: - ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALURGICA, DE MATERIAIS E DE MINAS, 71., 2016, Rio de Janeiro. **USO DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA MICROLIGADO AO NIÓBIO COM LIMITE DE ESCOAMENTO DE 450 MPA PARA CONSTRUÇÕES MAIS EFICIENTES**. Rio de Janeiro: [S.I.], 2016. p. 1375-1386. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/uso-de-aco-de-alta-resistencia-microligado-ao-niobio-com-limite-de-escoamento-de-450-mpa-para-construcoes-mais-eficientes>. Acesso em: 18 maio 2021.

ÁLVARES JR, O.M. & LINKE, R.R.A. **Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases do efeito estufa de frotas de veículos no Brasil**. 2001. São Paulo: CETESB.

AMARAL, Thiago de Souza; SILVESTRE, Leonardo Magalhães; LANGENBERG, Peter; JORDÃO, Alexandre Magnus; MEIRA, Marcos Paulo; CARBONI, Marcelo Carboneri. **USO DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA MICROLIGADO AO NIÓBIO COM LIMITE DE ESCOAMENTO DE 450 MPA PARA CONSTRUÇÕES MAIS EFICIENTES**, p. 1375-1386. In: *71th ABM Annual Congress*, Rio de Janeiro, 2016.

AMARAL, Thiago de Souza; CARBONI, Marcelo Carboneri; SCOTTI, Américo. **Avaliação da Aplicação de um Atlas de Soldagem de um Aço Bainítico Microligado ao Nióbio**. 2017. 10 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Ufu, Universidade Federal de Uberlândia, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/WW9YkQTPWX6Qjhf4spf6kWN/?format=html>. Acesso em: 27 maio 2021.

AZEVEDO, A. F. M., **Método dos elementos finitos**. 1 ed, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto/Pt, 2003.

CARVALHO, Marcos de. **PAMPLONA - Solicitação de Orçamento (Perfis Metálicos)**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <fernando.felix@rfm.com.br>. em: 26 maio 2020.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferro Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, 2012. 599 p.

COOK, R. D. MALKUS, D. S. PLESHA, M. E. WITT, R. J., **Concepts and applications of finite elemento analysis**. 4 ed, University of Wisconsin/Madison, 2001.

HAHN, Sookap. Os papéis da ciência dos materiais e da engenharia para uma sociedade sustentável. **Estud. av.**, São Paulo, v. 8, n. 20, p. 36-42, Apr. 1994. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141994000100010&lng=en&nrm=iso>. access on 03 May 2021.

LEONARDO SILVESTRE (Singapura) (org.). **Value-Added Niobium Microalloyed Construction Steels Symposium**. Singapura: Tms, 2012. 284 p

MARTINS, Vinícius Lopes Vieira *et al.* **MECANISMOS DE ENDURECIMENTO EM AÇO MICROLIGADO Nb-Ti-V**. 2014. 7 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www2.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/t3m2014.pdf>. Acesso em: 17 maio 2021.

MELFI, Adolpho José; MISI, Aroldo; CAMPOS, Diógenes de Almeida; CORDANI, Umberto G. **Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: [S.I.], 2016. Disponível em: <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-7006.pdf>. Acesso em: 17 maio 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Relatório técnico 20: perfil da mineração do nióbio**. Brasília, 2010.

PREÇO aços Brasil. [S. l.], 1 jan. 2021. Disponível em: http://www.brasil.geradordeprecos.info/obra_nova/Estruturas/Mistas/Vigas/Aco_em_vigas_mistas.html#gsc.tab=0. Acesso em: 1 dez. 2021.

RIBEIRO, Dimas Betioli. **ESTUDO E APLICAÇÃO DE UM ELEMENTO DE CONTORNO INFINITO NA ANÁLISE DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA VIA COMBINAÇÃO MEC/MEF**. 2009. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: http://sistemas.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2009DO_DimasBetioliRibeiro.pdf. Acesso em: 19 maio 2021.

SILVA, Andréa Regina Dias da. **Sistema Computacional para Análise Avançada Estática e Dinâmica de Estruturas Metálicas**. 2009. 341 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2247/1/TESE_SistemaComputacionalAn%c3%a1lise.pdf. Acesso em: 18 maio 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Sustainability Report: Of the World Steel Industry**. Bélgica, 2008.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Professor Doutor Alfonso Pappalardo Júnior, pelo apoio nas modelagens da estrutura através do *software* SAP2000.

Aos colaboradores da CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração), por se reunirem conosco a fim de esclarecer todas as dúvidas, explicarem um pouco mais sobre o uso do nióbio no Brasil e no mundo, e apresentarem projetos para futuras pesquisas.

A todos os nossos amigos e familiares que nos apoiaram em cada etapa de nossa formação acadêmica, com muito carinho, respeito e paciência.