

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

JAINI DE SOUSA SILVA

ADIÇÃO DE NÍOBIO NO AÇO CARBONO E SUA APLICABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Cajazeiras-PB
2023

JAINI DE SOUSA SILVA

ADIÇÃO DE NÍÓBIO NO AÇO CARBONO E SUA APLICABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Raquel Nascimento

Cajazeiras-PB
2023

IFPB/ Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na Fonte: Cicero Luciano Felix CRB – 15/750

S586a Silva, Jaine de Sousa.
Adição de nióbio no aço carbono e sua aplicabilidade na construção civil / Jaine de Sousa Silva.– 2023.

22f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.

Orientador(a): Prof^a. Me. Raquel Ferreira do Nascimento.
Coorientador(a): Prof. Me. Leonardo Pereira da Silva.

1. Construção civil. 2. Elemento alternativo de liga. 3. Nióbio. 4. Sustentabilidade. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

ADIÇÃO DE NIÓBIO NO AÇO CARBONO E SUA APLICABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

JAINI DE SOUSA SILVA

jainisousa2@gmail.com

RAQUEL NASCIMENTO

raquel.nascimento@ifpb.edu.br

LEONARDO PEREIRA DE LUCENA SILVA

lucena.leonardo@ifpb.edu.br

RESUMO

O aço carbono é amplamente utilizado na construção civil devido ao seu alto teor de resistência e baixo custo de produção. Entretanto, atualmente a indústria de construção civil tem apresentado demandas cada vez mais altas por aços que proporcionem menos desgaste ambiental e que ao mesmo tempo mantenha ou melhore as suas funcionalidades. Dessa maneira, o aço carbono vem sendo estudado e aperfeiçoado há anos, a partir de adições de ligas com o objetivo de aprimorar suas características e minimizar a emissão de CO₂. Contudo, a maioria das ligas utilizadas, não favorecem ambos os aspectos necessários ou apresentam resultados inferiores aos estudos que utilizam o nióbio como liga central. Diante disso, o presente trabalho faz uma revisão sistemática das melhorias apresentadas com adição de nióbio como elemento de liga no aço carbono utilizado na engenharia civil, sua aplicabilidade e as vantagens comparadas aos aços já utilizados atualmente. Teores de liga nióbio que variam entre 0,01% à 0,07%, estão diretamente ligados ao alto poder do nióbio de uniformização dos grãos presentes na estrutura química do aço, o que aprimora o retardo no processo de recristalização, favorecendo o resfriamento saudável da estrutura, potencializando o processo metalúrgico, aperfeiçoando a soldabilidade e favorecendo uma boa trabalhabilidade, melhorando a resistência e tenacidade, além de ser capaz de reduzir seções e perfis, proporcionando alta economia de materiais e conseqüentemente, menos emissão de gases.

Palavras-Chave: engenharia civil; nióbio; elemento de liga; sustentabilidade.

ABSTRACT

Carbon steel is currently widely used in civil construction due to its high strength content and low production cost. However, nowadays the civil construction industry has increasingly high demands for steels that provide less environmental impact and tear and at the same time maintain or improve their functionality. Thus, carbon steel has been studied and improved for years, based on the additions of alloys with the aim of improving its characteristics and minimizing CO₂ emissions. Nevertheless, most of the alloys used do not add both the necessary aspects or present inferior results when compared to studies that use niobium as a central alloy. Therefore, this present work makes a systematic review of the improvements presented with the addition of niobium as an alloying element in carbon steel used in civil engineering, and its applicability and the advantages compared to steel already used today. Niobium alloy contents ranging from 0.01% and 0.07% are directly linked to the high power of niobium to standardize the grains present in the chemical structure of the steel. This improves the delay in the recrystallization process, adding healthy cooling of the structure, enhancing the metallurgical process, improving weldability and providing good workability, resistance and tenacity. It can also be able to reduce sections and profiles, providing high savings in materials and consequently less gas emissions.

Keywords: civil engineering; niobium; alloy element; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Instituto Aço Brasil, cerca de 41% de todo o aço mundialmente produzido foi destinado a engenharia civil em 2020. Só no Brasil foi produzido cerca de 31,401 milhões de toneladas de aço, o que resulta na emissão de aproximadamente 47,013 milhões de toneladas de CO₂ na natureza. Amaral *et al.* (2016) apontam a tendência da utilização de recursos naturais com diminuição nas emissões de gases que prejudiquem o meio ambiente, além de usos mais conscientes dos recursos naturais que otimizem os custos de produção, entrega e utilização final do aço na construção, tendo em visto a competitividade global.

Contudo, Silvestre *et al.* (2013) ainda apontam a necessidade de atingir maiores eficiências econômicas, construir com menos materiais e muito mais rápido, encontrando estratégias para minimizar os teores energéticos e a própria matéria prima utilizada. Assim atualmente construções alternativas que consumem menos e atinjam o seu objetivo com rapidez vem se tornando cada vez mais o aporte da demanda mundial na área construtiva. Dessa maneira para que exista uma redução de custo final, é essencial atentar a necessidade de encontrar estratégias que garantam a redução do uso de aço, a diminuição na emissão de gases, o ganho em propriedades específicas, a diminuição no tempo de execução e um modelo de obra mais econômico.

Mamede *et al.* (2021) em seus estudos, trazem o processo de realizar adições de elementos de liga ao aço carbono como uma solução em sustentabilidade, visto a diminuição na emissão de CO₂, redução do peso final do elemento e melhor trabalhabilidade. Segundo Jansto (2018), a única microliga capaz de oferecer a combinação dessas melhorias e aprimorar o suporte estrutural do aço é o nióbio, já que ele lidera uma tendência global de aço estrutural para a nova geração.

Segundo a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM, 2022), o nióbio (Nb) é um metal com alta condutividade térmica e elétrica, maleabilidade, ductibilidade e é muito resistente a corrosão, ao calor e ao desgaste, possuindo tecnologia de extração e produção em solo brasileiro, com cerca de 95% de toda a reserva mundial. Logo, isso vêm possibilitando a utilização desse material como um agregado em potencial na melhoria do aço carbono, o que tornou possível a utilização do nióbio como elemento de microliga que quando adicionado ao aço carbono viabiliza um amplo aumento nas propriedades físicas do aço. A CBMM (2022) afirma ainda que o nióbio atribui ao metal aptidão de melhorar suas propriedades e funcionalidades, o que favorece e o torna mais eficiente, auxiliando na solução de desafios e problemas complexos de engenharia, propiciando mais economia de material e sustentabilidade.

Compreende-se que o modelo atual de fabricação e composição se torna essencial, visto que favorecer um aumento do uso do aço na construção civil devido as possibilidades de aferir maiores qualidades e eficiência às construções no Brasil e de favorecer fabricações menos poluentes e ecologicamente corretas, sobretudo as necessidades de melhorias das propriedades do aço para ampliar as suas aplicações e facilitar seu manuseio, assegurando o desenvolvimento de modelos estruturais específicos na construção civil.

Dessa forma, pode-se elencar algumas aplicabilidades na área de construção civil que podem aferir ganhos significativos com aços microligados ao nióbio, tais como: ligas metálicas utilizadas em pontes, viadutos, gasodutos e elementos metálicos estruturais em edifícios de grande e médio porte, e elementos de vigas de aço para concretagem.

Nesse sentido, o problema norteador dessa pesquisa baseia-se na análise da influência da adição de nióbio nas propriedades do aço carbono com diferentes teores de nióbio, sua aplicabilidade dentro da engenharia civil e como isso pode conceder avanços estruturais, além das vantagens e limitações proporcionadas por essa adição.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção serão apresentados alguns tópicos construídos com o objetivo de facilitar a compreensão sobre esse estudo.

2.1 Aço como material de construção civil

A necessidade de acompanhar a demanda por tendências mundiais fez e continua fazendo com que a engenharia civil mantenha altos padrões de estratégias que viabilizem inovações dentro da área.

A substituição do aço pelo concreto ganhar mais visibilidade quando inicialmente se consideraram quesitos como peso da estrutura, o valor gasto para manutenção, a própria vida útil dos materiais e o tempo gasto para se construir.

A CBCA (2022) afirma que existem mais de 3500 tipos de aços diferentes e que 75% dentre eles foram criados nas últimas 2 décadas. No que diz respeito a construção civil, o interesse maior é em aços estruturais de média e alta performance, com resistência mecânica comprovada, que em outras palavras tem resistência, ductibilidade e outras propriedades adequadas para serem utilizadas como elementos sujeitos a carregamentos.

Assim, segundo a Associação Brasileira de Construções Metálicas (ABCEM, 2022), a produção de elementos de aço em 2020, destinados as obras de estruturas metálicas, chegaram à 487,4 mil toneladas e que esse setor cresceu o equivalente a 24,9%, sem falar nos altos índices de faturamento e investimento. Dessa forma, pelo terceiro ano seguido houve aumento da capacidade produtiva, chegando à marca de 13,9% de saldo positivo em relação ao ano de 2020.

O Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2022) garante que sua utilização reduz cerca de 20% o peso da obra quando comparado ao concreto. Além de ser um material sustentável e ser utilizado com diversas finalidades ele também tem um custo de manutenção e aplicação abaixo do concreto convencional.

Ferreira (2021) afirma que esse mineral pode auxiliar em modelos de estratégias que facilitem a execução de projetos mais ousados. Ainda favorece praticidade e fácil acesso, visto que no mercado comumente se encontra aços de diferentes formatos, que podem atender diversas finalidades construtivas e facilitar a execução de projetos mais audaciosos.

No Quadro 1, a CBCA (2022) listou 12 benefícios que podem-se alcançar com a utilização do aço em edifícios em comparação ao modelo convencional.

Quadro 1 – Benefícios do uso do aço em edificações.

Elemento	Benefícios
a)	Liberdade de criação no projeto arquitetônico: a tecnologia do aço confere ao arquiteto total liberdade criadora, permitindo a elaboração de projetos arrojados e de expressão arquitetônica marcante
b)	Racionalização de materiais e mão-de-obra: numa obra, por meio de processos convencionais, o desperdício de matéria pode chegar a 25% em peso. A estrutura em aço possibilita a adoção de sistemas industrializados, fazendo com que o desperdício seja sensivelmente reduzido
c)	Maior área útil, uso de seções de pilares e vigas de aço: as seções dos pilares e vigas de aço são substancialmente mais esbeltas do que as equivalentes em concreto, resultando em melhor aproveitamento do espaço interno e aumento da área útil, fator muito importante, principalmente, em garagens
d)	Alívio de carga nas fundações: por serem mais leves, as estruturas em aço podem reduzir em até 30% o custo das fundações
e)	Compatibilidade com outros elementos: o sistema construtivo em aço é perfeitamente compatível com qualquer tipo de material de fechamento, tanto vertical como horizontal, admitindo desde os mais convencionais (tijolos e blocos, lajes moldadas <i>in loco</i>) até componentes pré-fabricados (lajes e painéis de concreto, painéis <i>dry-wall</i> , entre outros)
f)	Flexibilidade: a estrutura em aço mostra-se especialmente indicada nos casos onde há necessidade de adaptações, ampliações, reformas e mudança de ocupação de edifícios. Ainda torna mais fácil a passagem de utilidades como água, ar condicionado, eletricidade, esgoto, telefonia, informática, etc.
g)	Menor prazo de execução: a fabricação da estrutura em paralelo com a execução das fundações, a possibilidade de se trabalhar em diversas frentes de serviços simultaneamente, a diminuição de formas e escoramentos e o fato da montagem da estrutura não ser afetada pela ocorrência de chuvas, pode levar a uma redução de até 40% no tempo de execução quando comparado com os processos convencionais
h)	Auxílio na preservação do meio ambiente: a estrutura em aço é menos agressiva ao meio ambiente, pois além de reduzir o consumo de madeira na obra, diminui a emissão de material particulado e poluição sonora geradas pelas serras e outros equipamentos

Elemento	Benefícios
i)	Durabilidade e garantia de qualidade: a fabricação de uma estrutura em aço ocorre dentro de uma indústria e conta com mão-de-obra altamente qualificada, o que dá ao cliente a garantia de uma obra com qualidade superior devido ao rígido controle existente durante todo o processo industrial
j)	Antecipação do ganho: em função da maior velocidade de execução da obra, haverá um ganho adicional pela ocupação antecipada do imóvel e pela rapidez no retorno do capital investido
k)	Organização canteiro de obra: como a estrutura em aço é totalmente pré-fabricada, há uma melhor organização do canteiro devido à ausência de grandes depósitos de areia, brita, cimento, madeiras e ferragens, reduzindo também o desperdício desses materiais. O ambiente limpo com menor geração de entulho oferece ainda melhores condições de segurança ao trabalhador contribuindo para a redução dos acidentes na obra
l)	Precisão construtiva: enquanto nas estruturas de concreto a precisão é medida em centímetros, numa estrutura em aço a unidade empregada é o milímetro. Isso garante uma estrutura perfeitamente aprumada e nivelada, facilitando atividades como o assentamento de esquadrias, instalação de elevadores, bem como redução no custo dos materiais de revestimento

Fonte: CBCA, 2022

Ainda é válido destacar que existe uma adversidade em se trabalhar com aço na área estrutural visto a dificuldade no seu manuseio e transporte, o que gera prazos específicos e necessidade de mão de obra especializada. Mesmo assim, a CBCA (2022) afirma que ao utilizar o aço como alternativa que substitui o concreto pode-se garantir uma redução de até 40% no tempo de execução quando comparado ao concreto convencional, com isso uma redução significativa no custo final da obra, isso é possível devido à ausência da necessidade de parar a obra em decorrência das chuvas.

Do mesmo modo, a CBCA (2022) afirma que estruturas em aço conseguem atingir amplitude nos espaços internos da estrutura em decorrência dos pilares e vigas metálicas serem menores que as estruturas em concreto, gerando um aumento na área útil da edificação.

Assim, pode-se atribuir que para cada aço utilizado na construção civil se tem um modelo de fabricação necessário para que se atinja as propriedades básicas para aplicação na obra, sendo que cada elemento de liga utilizado ou modelo de produção e manejo tem o poder de aferir propriedades.

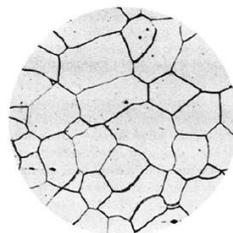
Logo, fica claro o quanto é necessário o estudo e aperfeiçoamento dos modelos de aços utilizados na engenharia, visto que um aço mais leve, mais resistente, mais maleável, com boa trabalhabilidade a quente e a frio, além de aplicações mais práticas se torna a demanda do presente e do futuro da construção, porque fornece segurança e economia para a obra, tanto no que diz respeito ao tempo para se construir, quanto no que se refere ao custo final da obra.

2.2 Tipos e propriedades do aço

Segundo Ferraz (2005) o aço pode ser diferenciado entre si pelo formato e tamanho do seu grão. Assim sendo, o aço é um elemento que pode facilmente sofrer alterações na sua composição química para que se atinja algum objetivo específico, seja ele para alcançar certos graus de resistência mecânica, ou modelos de barras com mais soldabilidade ou até aços com melhor resistência a corrosão. Todas as alterações e adições de ligas tem por propósito melhorar algum aspecto específico para aplicação e execução.

A Figura 1 mostra, o aço é analisado de acordo com o tamanho de seus grãos, esse modelo em particular é um aço com baixo teor de carbono.

Figura 1 – Microestrutura típica dos grãos em aço de baixo teor de C. Aumento: 100x.



Fonte: Caram (2006).

Ferraz (2005) também define o aço como um agregado cristalino, em que os grãos que o compõem são justapostos. Afirma ainda que cada propriedade do aço depende de como se deu a formação da sua estrutura cristalina. Em outras palavras, quanto mais a sua composição química apresentar modelos de grãos uniformes e agrupados, melhor serão certas propriedades. Contudo, entendendo como se dá sua estrutura cristalina, a indústria siderúrgica e de montagem pode atingir com tratamentos térmicos e modelagem mecânica, modificações na estrutura dos seus arranjos, adicionando ligas que podem melhorar ou não o refinamento dos seus grãos, modificando o tamanho e formato dos elementos da sua estrutura, alterando suas propriedades de acordo com a necessidade de sua aplicação.

De acordo com Ferraz (2005), para determinar e definir as principais propriedades do aço foram feitos estudos até se encontrar um padrão. Nesse sentido, ele afirma que em testes de resistência quando se submete barras metálicas a esforços de tração crescentes, o aço em estudo apresentará uma deformação de extensão e que assim pode-se chegar através da análise desse aumento do comprimento, conceitos e propriedades dos aços.

O Quadro 2 apresenta as principais características das propriedades do aço.

Quadro 2 – Propriedade dos aços e suas características.

Propriedades	Características
Ductibilidade	É a capacidade do material de se deformar plasticamente sem se romper e é definida pela extensão do patamar de escoamento. Nas estruturas metálicas, esta característica é de extrema importância pelo fato de permitir a redistribuição de tensões locais elevadas. Desse modo, as peças de aço sofrem grandes deformações antes de se romper, constituindo um aviso da presença de tais tensões. Além disso, a ductibilidade é uma propriedade que torna o aço resistente a choques bruscos
Tenacidade	É a capacidade do material de absorver energia quando submetido à carga de impacto. É a energia total, elástica e plástica, absorvida pelo material por unidade de volume até a sua ruptura, representando a área total do diagrama tensão de formação. Logo, um material dúctil com a mesma resistência de um material frágil possui uma maior tenacidade, já que requer maior quantidade de energia para ser rompido
Elasticidade	É a capacidade do material de voltar à forma original após sucessivos ciclos de carregamento e descarregamento. O aço sofre deformações devido ao efeito de tensões de tração ou de compressão. Tais deformações podem ser elásticas ou plásticas, devido à natureza cristalina dos metais através de planos de escorregamento ou de menor resistência no interior do reticulado. Os aços estruturais possuem um módulo de elasticidade da ordem de 205000 MPa, a uma temperatura de 20°C
Plasticidade	É uma deformação definitiva provocada pelo efeito de tensões iguais ou superiores ao limite de escoamento do aço. Deve-se impedir que a tensão correspondente ao limite de escoamento seja atingida nas seções transversais das barras, como forma de limitar a sua deformação
Dureza	É a resistência ao risco ou abrasão: a resistência que a superfície do material oferece à penetração de uma peça de maior dureza. Sua análise é de fundamental importância nas operações de estampagem de chapas de aços
Fadiga	É a ruptura de um material sob esforços repetidos ou cíclicos. A ruptura por fadiga é sempre uma ruptura frágil, mesmo para materiais dúcteis

Fonte: Ferraz (2005); Bandeira (2008); Teobaldo (2004).

Assim, cada modelo de aço pode aferir, combinado ou não a outros elementos, resultados eficazes. Dessa forma, pode-se genericamente tipificar os aços utilizados na engenharia de acordo com sua utilização.

Os aços estruturais segundo Ferraz (2005) são combinados a outros elementos para gerar resistências maiores e fornece certa eficiência. Dentre eles estão os vergalhões que funcionam como reforço para o concreto, barras, chapas e perfis para pilares, lajes, vigas e dentre outros.

A norma que regulariza e classifica as estruturas em aços para concreto armado é NBR 7480 (ABNT, 2022), que determina as bitolas das barras e classifica a resistência de cada modelo de barra de acordo com sua fabricação e propriedades químicas. Assim, entre as barras mais comercializadas e utilizadas estão, a CA25, a CA50 e a CA60 e são utilizadas de acordo com o dimensionado no projeto.

Da mesma, forma Imianowsky e Walendowsky (2015), retratam que os aços em estruturas metálicas apresentam alta resistência, baixa liga e são utilizados como base para sustentação no lugar das estruturas convencionais. Como exemplo, temos as pontes, os viadutos e as estruturas metálicas convencionais.

Pannoni (2005) afirma que os aços carbonos estruturais são os mais utilizados para estruturas metálicas, já que aços desse porte dependem do seu teor de carbono para ter resistência. O ASTM A36 é um dos mais conhecidos e utilizados, por ser classificado como de média resistência e apresentar limite de escoamento entre 170 MPa e 275 MPa. Entretanto, existem outros modelos, como o ASTM A-572, ASTM A-588 e ASTM A-242, que são usados para a fabricação de perfis, chapas e etc. Esses aços apresentam porcentagem de nióbio que variam de 0,005 – 0,05%.

Ainda assim, Ferraz (2005) afirma ser necessário entender que não existe uma forma de classificação dos aços considerada precisa ou completa suficiente, principalmente quando se consideram os aços com modelos de ligas pois, a cada dia que passa padrões de aços surgem e/ou se aperfeiçoam, resultando em novos tipos de aços.

Gerdau (2021) garante que as especificações de materiais que são utilizadas em projetos mecânicos usam as determinações e designações de diversas normas como a SAE/AISI americana, a DIN alemã, a brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, japonesa JIS, a francesa AFNOR e a inglesa BS.

Ferraz (2005) assegura que as classificações dos modelos da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e da *American Iron and Steel Institute* - SAE/AIS tem fornecido excelentes resultados, muito embora existam outras, essas cumprem e se adequam bem às problemáticas da construção civil atualmente.

2.3 Nióbio

O nióbio (Nb) é um metal de transição e tem número e peso atômico, respectivamente de 41 e 92,906u, estando vinculado ao grupo 5 na tabela periódica de classificação dos elementos. Segundo Seer e Moraes (2018) o nióbio foi descoberto em 1801 por Charles Hatchett, mas só foi oficialmente reconhecido em 1865. Por sua vez na natureza ele não é encontrado de forma livre, mas sim em minérios.

Seer e Moraes (2018) afirmam que já foram descobertas mais de 90 espécies minerais de nióbio na natureza, muitas das quais altamente raras como as do grupo fergusonita, que apresenta em sua composição óxido de nióbio enriquecido. No entanto, assim como grupos mais raros, existem minerais mais fáceis de encontrar, como os que estão presentes no Brasil. Entre eles, estão a Columbita-tantalita e o Pirocloro, ambas são minérios com composição variada.

A Columbita-Tantalita tem composição básica $(\text{Fe,Mn})_2(\text{Nb,Ti})(\text{O,F})_7$ e pode apresentar teores de até 76% de Óxido de Nióbio (Nb_2O_5). Já o Pirocloro tem a seguinte composição $(\text{Na}_2,\text{Ca})_2(\text{Nb,Ti})(\text{O,F})_7$ e pode apresentar teores de até 71% de Nb_2O_5 . Bruziquesi *et al.* (2019) ainda, afirmam que as maiores reservas desse mineral estão presentes no Brasil, nos estados de Goiás e Minas Gerais. Na Figura 2 pode-se ver cristais de Pirocloro extraídos na sua forma bruta.

Figura 2 – Cristais Hexaocataédricos de pirocloro. Fotografado por Cristian Rewitzer.



Fonte: Bruziquesi *et al.* (2019)

A CBMM lidera o ranking mundial de produção de nióbio no mundo. Segundo Bruziquesi *et al.* (2019), a empresa é a principal produtora de Ferro-Nióbio (Fe-Nb) e nióbio metálico, e ainda carrega o título de ser a única responsável pela produção brasileira de Nb₂O₅, o insumo a base de nióbio mais utilizado nas principais aplicações tecnológicas.

A maior jazida lavrável de pirocloro do mundo encontra-se em Minas Gerais, na cidade de Araxá e é administrada pela CBMM. Existem ainda, jazidas em Goiás, Amazonas e Rondônia.

A Quadro 4 apresenta as principais porcentagens de óxido de nióbio contido nos minerais extraídos por essas Jazidas brasileiras.

Quadro 4 – Porcentagem média de Nb₂O₅ presente nos minerais extraídos por jazidas no Brasil.

Substância	Quantidade	Min. Contido	Teor de Oxido de Nióbio
MG - Pirocloro	132.501 t	71.453 t	53,93%
GO - Pirocloro	20.208 t	10.578 t	52,35%
AM – Columbita Tantalita	16.815 t	1.681 t	10,00%
RO – Columbita Tantalita	5.160 t	477 t	9,24%
TOTAL	174.683 t	84.189 t	48,20%

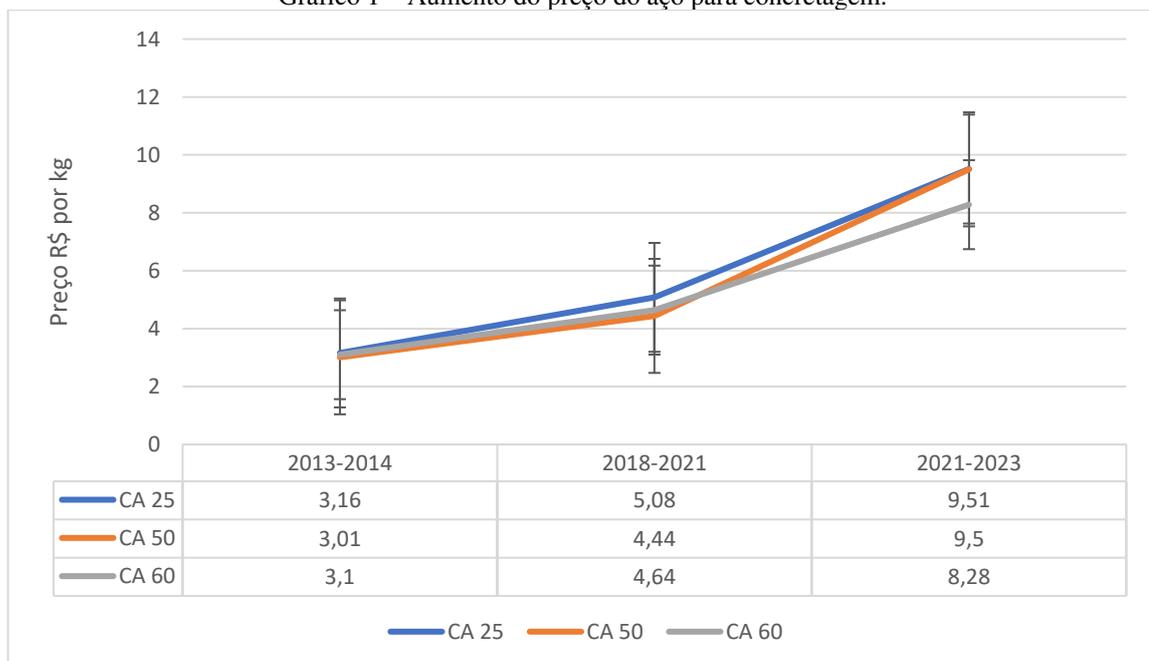
Fonte: Adaptado de Pinheiro, Ferreira Filho e Neves (2016)

Assim a Quadro 4 expõe as porcentagens de extração do Nb₂O₅ que representam de forma positiva expectativas que facilitem a fabricação, comercialização e utilização de aços a base de nióbio, visto que a maior produtora desse modelo de aço tem extração e produção brasileira.

2.4 Utilização do nióbio em aços microligados

Atualmente modelos de ligas vem ganhando mercado quando se quer alcançar parâmetros de aços estruturais com maior economia, trabalhabilidade e melhores propriedades. Além de inúmeros outros fatores, o aumento no preço do aço tanto o estrutural quanto o para concretagem é um forte influenciador para se procurar alternativas mais viáveis. De acordo com os dados da Secretaria de Infraestrutura do Ceará – SEINFRA, de 2013 a 2023 o aumento nos preços dos aços utilizados para concretagem (CA 25, CA 50 e CA 60) mais que triplicaram nos últimos anos como mostra o Gráfico 1.

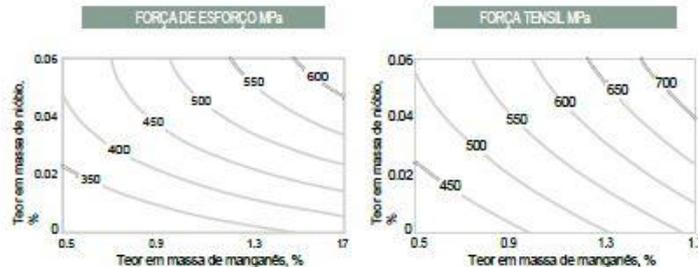
Gráfico 1 – Aumento do preço do aço para concretagem.



Fonte: Adaptado de Seinfra (2013 – 2023)

A CBMM (2020) traz um modelo de aço estrutural de até 355 MPa com adições pequenas de Nb, 0,01% e redução do Manganês de 1,5% para 0,85%, gerando uma economia de mais de 30% em materiais de liga, o equivalente a cerca de 6,79 USD por tonelada de aço quando se utiliza 0,01% de Nb e se diminui o uso do Manganês para 0,85. Na Figura 3, podemos perceber uma relação entre a massa de Manganês e a do nióbio necessárias para atingir certo grau em MPa.

Figura 3 – Teor de adição de nióbio e magnésio



Morosov, Y.D.; Stepahin, A.M.; Aleksandrov, S.V. - Effect of Manganese and Niobium and Rolling Conditions on the Properties of Low Alloy Steel, Metallurgist, 2002.
Estudo do aço 0,10%C, espessura da chapa de 8mm a 12mm.

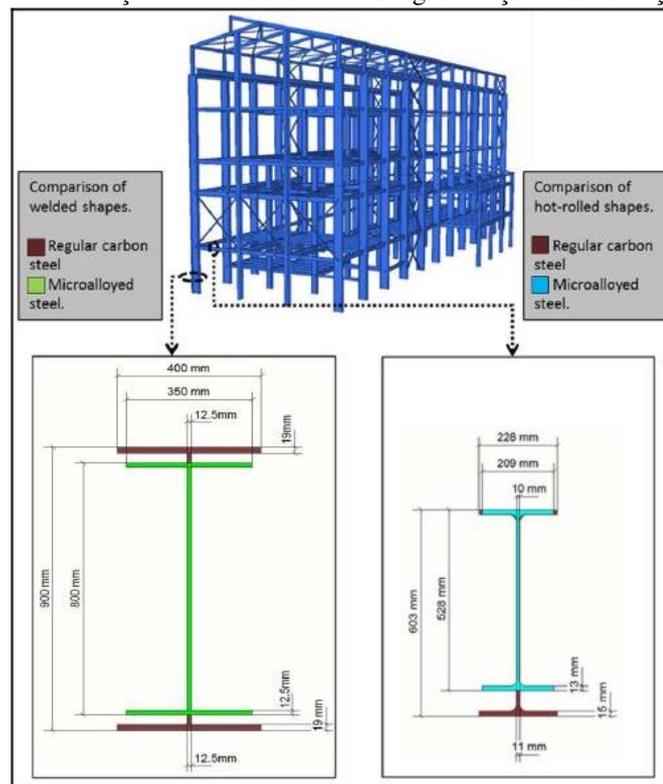
Fonte: CBMM, 2020.

Segundo Silvestre *et al.* (2013), os aços microligados apresentam propriedades modificadas através de adições pequenas de elementos de liga, que comumente se apresentam em teores menores que 0,15%. Isso vem se tornando possível visto a necessidade em diferentes setores de utilizar aços com características de aprimoramento específicas, mais econômicos e de fácil soldagem.

Atualmente, no mercado existem inúmeros elementos de ligas que melhoram a resistência, a trabalhabilidade, a soldabilidade ou agregam propriedades específicas aos aços. Segundo a CBMM (2022), o nióbio apresenta-se como uma excelente opção, sendo um surpreendente refinador de grãos, tornando as microestruturas mais homogêneas e agregando com isso aumento na resistência e na tenacidade simultaneamente, com porcentagens muito baixas, o que vem gerando economia e por esse motivo aumentando o uso desse elemento ligante. Além disso, reduz os níveis de carbono, melhorando a soldabilidade, a resistência a altas temperaturas, reduzindo o tamanho e peso das estruturas e consequentemente diminui a emissão de CO₂ visto que massas menores geram menos emissões.

A Silvestre *et al.* (2013) realizaram um estudo para obtenção de uma engenharia otimizada reprojeto um edifício feito pela CODEME em 2011, para CBMM. O estudo consiste na aplicação e redimensionamento das vigas e perfis do projeto substituindo o aço ASTM A572 Gr 50 microligado e o ASTM A36 por aços microligados ao nióbio. A Figura 4, apresenta as reduções nas dimensões das barras.

Figura 4 – Diferença de dimensões entre as vigas de aço carbono e aço nióbio.



Fonte: Silvestre *et al.* (2013)

Nitidamente, houve redução não só na quantidade de material a ser utilizado no novo modelo de estrutura, mas também redução na emissão de CO₂, no consumo de energia e no próprio custo final da obra.

Silvestre *et al.* (2013) obtiveram os seguintes resultados com o novo projeto: redução de massa em cerca de 22%, redução na emissão de CO₂ equivalente a 21,7% e gasto energético reduzido em 21%, o equivalente a 1.779 GJ a menos. O que em geral apresentou uma redução no custo final da obra, em cerca de 17% para a estrutura que utiliza o aço nióbio.

3 MÉTODO DE PESQUISA

O modelo de pesquisa metodológica utilizado nesse estudo é o de revisão sistemática, que consiste num levantamento de estudos análogos sobre o tema pesquisado, com a finalidade de desenvolver de forma pertinente e bem fundamentada os objetivos traçados. Além de exploratório e descritivo, esse modelo de elaboração de pesquisa é bibliográfico, com método de coletas com base em bancos de dados primários e secundários, sistematizados para se alcançar uma ideia menos enviesada e mais confiável, com sínteses de evidências. Sampaio e Mancini (2007) afirmam que as revisões sistemáticas são favoráveis para conciliar informações de um compilado de estudos que inicialmente foram realizados separadamente, onde os resultados podem ser conflitantes ou coincidentes, assim como categorizar temas que precisam de mais evidências para auxiliar na orientação de investigações do futuro.

Desse modo, a busca bibliográfica realizada na categorização dos dados foi extraída do centro de pesquisa da CBMM, denominada Niombiun NB e de bancos de dados de estudos publicados, como Google acadêmico, a Capes, o Scopus e o Scielo por serem os mais renomados e amplamente difundidos no meio acadêmico. Com a finalidade de reunir um conjunto de pesquisas que auxiliam na caracterização do nióbio e do aço carbono, as atribuições de valores agregados encontradas com a adição do nióbio, foram utilizadas algumas combinações de palavras chaves como modelo de filtro, tais como: “civil Engineering”, “construction”, “infrastructure”, “structural”, “Nióbio na engenharia”, “Aço com adição nióbio”, “Nióbio como liga”, “Aço nióbio para estrutura” e “Estrutura em nióbio”.

A partir disso foram definidos três critérios de exclusão, visto a necessidade de afunilar e agrupar os estudos mais relevantes para essa pesquisa, como mostra o Quadro 4.

Quadro 4 – Critérios de exclusão.

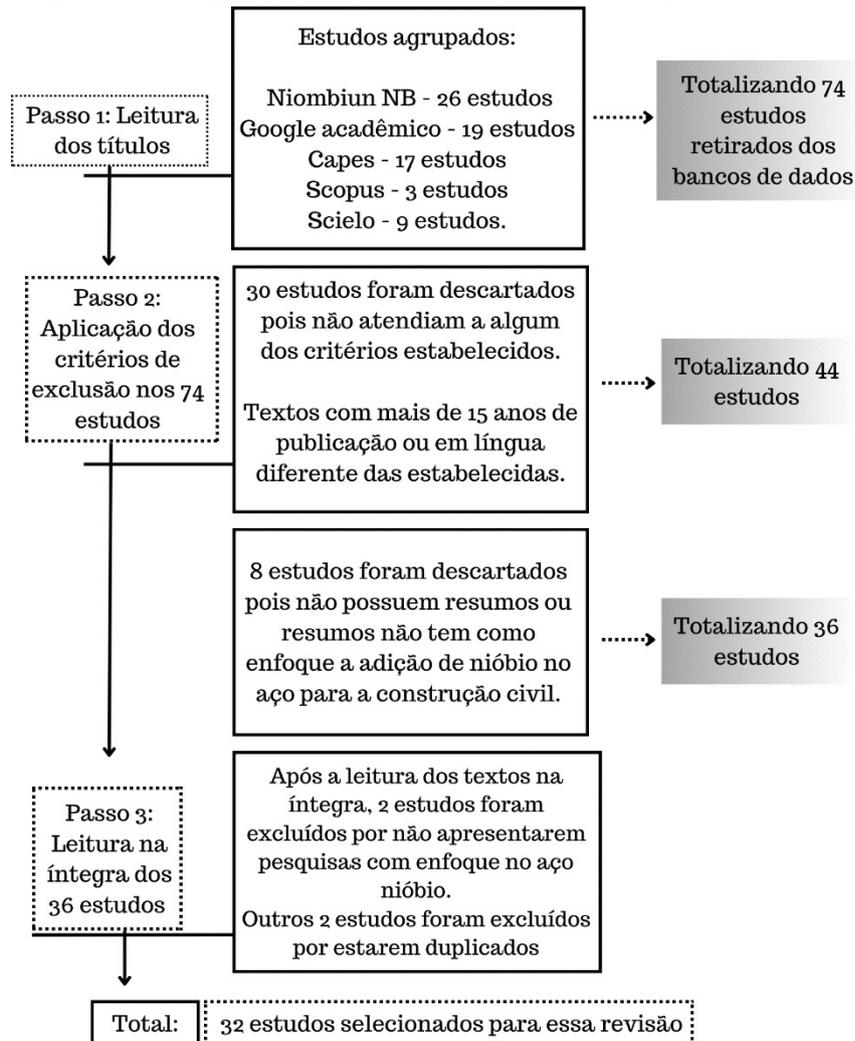
Critérios	Estudos
1	Textos científicos publicados ou escritos nos últimos 15 anos
2	Textos escritos em língua portuguesa ou inglesa
3	Textos sem resumos
4	Textos com resumos sem enfoque no tema dessa revisão
5	Textos que não apresentam estudo relevante ao tema abordado

Fonte: Autoria própria, 2023.

Em suma, as bases de dados foram consultadas nos meses de março, abril, maio e junho de 2023, resultando num total 74 textos científicos como mostra o fluxograma da Figura 4.

Ainda é importante destacar que, embora os textos tenham sido retirados de bancos de dados diferentes, 2 dos textos se apresentaram duplicados e, após a leitura na íntegra, um dos estudo foi descartado por não apresentar relevância para essa revisão. Desse modo o total de textos selecionados para serem utilizados nessa revisão bibliográfica foram de 32 estudos, como mostra em detalhes o fluxograma da Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma do processo de seleção dos estudos para essa revisão.

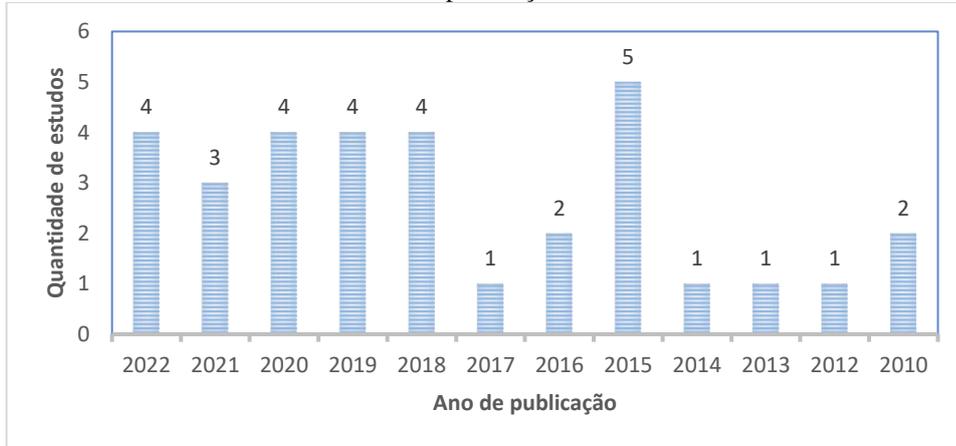


Fonte: Autoria própria, 2023

Um conjunto anual das publicações dos 32 estudos utilizados nessa revisão são apresentados no Gráfico 1. É perceptível que ao longo dos anos, principalmente a partir do ano de 2015, houve um

interesse maior pelo assunto em análise, muito embora o acervo de estudos publicados até hoje sejam abaixo do que se espera.

Gráfico 2 – Taxa anual de publicação dos estudos em análise



Fonte: Autoria própria, 2023.

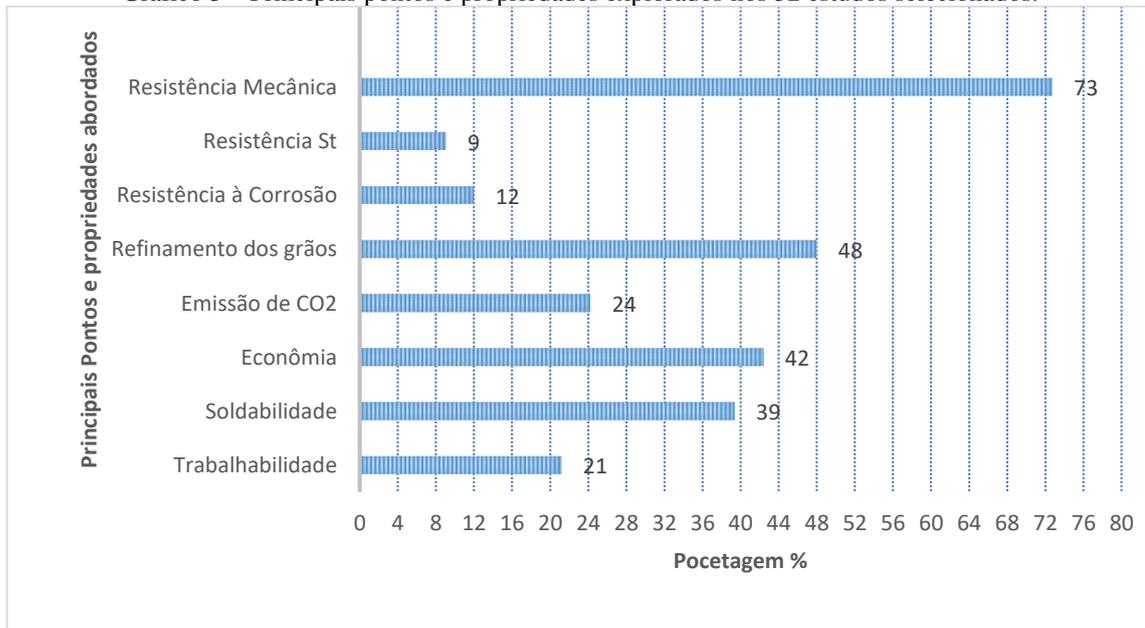
Contudo foram explorados todos os textos da base de dados bibliográficos com a finalidade de agrupar de maneira sistemática os textos selecionados, criando categorias com critério de afinidade entre os textos, de forma a tornar possível discussões comparativas dos estudos e revisões de literaturas entre os textos estudados, auxiliando na verificação dos dados, tabelas, gráficos e da conclusão final do projeto.

4 RESULTADOS DA PESQUISA

Os estudos selecionados para essa revisão apresentam enfoques com diferentes finalidades, porém todos compartilham do mesmo interesse, visto que o objetivo central de todas as pesquisas é esclarecer as vantagens e limitações da adição de nióbio no aço comum.

O Gráfico 3 traz, em porcentagens, os principais pontos e propriedades explorados pelos autores nos estudos utilizados para essa revisão.

Gráfico 3 – Principais pontos e propriedades explorados nos 32 estudos selecionados.



Fonte: Autoria Própria, 2023

Como detalhado no Gráfico 3, cerca de 73% dos textos utilizados nessa revisão, retratam a resistência mecânica como parte importante na pesquisa, pois essa é uma propriedade central quando o assunto em questão é o aço utilizado na construção. Isso é possível devido ao alto poder refinador que

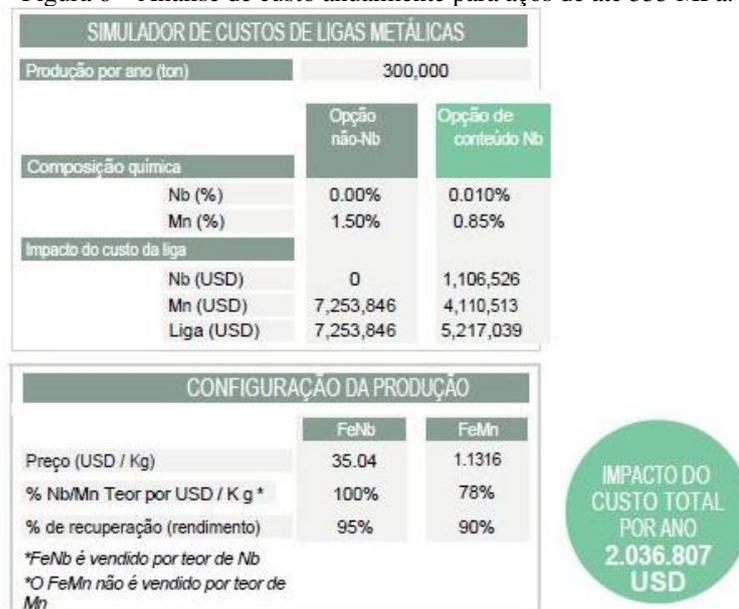
o nióbio proporciona a estrutura em sua recristalização. Dentre os textos em análise, 48% deles relatam melhorias na uniformização dos grãos do aço com a adição do Nb.

As porcentagens da liga nióbio utilizadas nos estudos variam de 0,01% a 0,08%, esses valores podem variar de acordo com grau de resistência e soldabilidade desejados. Mesmo que aparentemente sejam valores baixos, os estudos em análise garantem que o mesmo proporciona resistência e limite de escoamento que variam de 355 MPa até 460 MPa o que dá suporte para utilização em estruturas tanto de pequeno porte quanto arranha-céus de alto padrão.

Outro ponto fundamental e muito retratado, foi a economia gerada com a utilização do aço Nb. Cerca de 42% dos estudos compartilham certo grau de economia, seja na quantidade de materiais utilizados para finalização da obra, seja na quantidade de mão de obra especializada necessária.

A CBMM (2020) apresenta dados de alta economia para aço de até 355 MPa com adição de Nb em pequenas quantidades. Como mostra a Figura 6, a economia pode chegar a 2.036.807 USD por ano, dependendo da produção anual do aço, o que equivale a aproximadamente R\$ 9.715.569,00, considerando o dólar de R\$ 4,77.

Figura 6 – Análise de custo anualmente para aços de até 355 MPa.



Fonte: CBMM, 2020.

A economia em mão de obra se dá em grande parte pelas melhorias na soldabilidade e trabalhabilidade do aço, que são retratados simultaneamente em 39% e 21% dos estudos em análise. Esses são aspectos importantes quando se consideram modelos novos de aços, visto a necessidade de apresentar vantagens para sua utilização.

Ainda é importante destacar, que 24% dos estudos trazem a emissão de CO₂ como ponto importante a se melhorar nos aços utilizados na construção atualmente, já que parâmetros menos poluentes são sempre positivamente difundidos no meio acadêmico.

4.1 Estudos com resultados positivos com adição de Nb

Cerca de 66% dos estudos utilizados nessa revisão apresentaram resultados positivos com adição de Nb. Ao todo, 21 estudos apresentam melhorias, seja em propriedades mecânicas, maior economia de materiais ou menores taxas de emissão de gases. Modelos de aços com maior resistência, favorecem a utilização de seções e perfis menores, o que influencia diretamente na diminuição do peso da estrutura e na quantidade necessária de aço para a execução, gerando dessa forma maior economia de materiais e diminuição na emissão de gases, uma vez que menores quantidades de aço geram menores taxas de emissão de CO₂. Melhorias na soldabilidade e trabalhabilidade também foram destacadas, gerando uma maior economia de mão de obra especializada e redução no tempo de execução da obra. Abaixo estão listados todos os 21 estudos, o foco de cada pesquisa e seus principais resultados.

Speer *et al.* (2010) desenvolveram um estudo com adições que variam de 0,007% até 0,016% de nióbio em diferentes combinações com microligas a base de molibdênio (Mo), vanádio (V) e cobre (Cu). Cada combinação (Mo-Nb, V-Nb e Cu-Nb) foi sujeita a testes de tração e resistência ao escoamento, dentre todas elas a que apresentou o melhor resultado para limite de escoamento foi Mo-Nb atingindo assim valores superiores a 500 MPa em temperaturas de aproximadamente 300 C°.

Araújo *et al.* (2012) fizeram uma análise da biocorrosão do aço carbono AISI 1020 de proteção com tinta pigmentada com óxido de Nb. O aço com revestimento preparado com Nb se mostrou tóxico a diversas bactérias heterotróficas aeróbicas e redutoras de sulfato, além das precipitantes de ferro, comprovando uma resistência a corrosão no aço pigmentado.

Gomes *et al.* (2014) desenvolveram pesquisas sobre o efeito do nióbio na trabalhabilidade a quente do aço S3204 e nos ensaios isotérmicos mesmo com temperaturas acima 1100 C° nenhuma das ligas com Nb se rompeu já o aço sem Nb se rompeu 1150 C°. Dessa forma, foi percebido melhorias na trabalhabilidade a quente e diminuição na fração volumétrica da ferrita.

Oliveira (2015) analisou a influência da adição de nióbio sobre as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão de aços inoxidáveis super martensíticos. O Aço Nb em estudo apresentou valores médios de limite de escoamento e limite de resistência superiores ao aço comum para revenimento de 600 C° por 2h, que apresentou um grau de limite de escoamento superior ao máximo da norma ISSO/DIS 6980:2007, o que resultou em um aumento nas propriedades mecânicas e na resistência sem perda de alongamento.

Soldatt (2015) investigou a influência da adição do nióbio no comportamento mecânico e microestrutural do aço SAE 6150. Sua pesquisa obteve como resultado a diminuição na fração de ferrita assim como houve uma diminuição de 50% no tamanho do grão em relação ao aço sem Nb. Para os ensaios de tração o aço nióbio apresentou melhores resultados com aumento de 5% na resistência. Valores em energia absorvida em temperaturas elevadas não apresentaram mudanças significativas, já para temperaturas negativas o aço nióbio apresentou valores superiores e tenacidade à fratura melhorada.

Kirkwood (2015) analisou modelos de soldabilidade nos aços modernos microligados ao nióbio. Como resultado ele percebeu que o aço Nb pode se comparar ao aço HSLA de mesma resistência, visto que o aço Nb não apresenta defeitos de liquefação, rasgo laminar ou fissuração por solidificação, no entanto houve um aumento na tenacidade, proporciona um endurecimento adequado, sem fragilidade no aço em estudo.

Jansto (2015) teve como foco para sua pesquisa os aços de construções com nióbio e as tendências globais de aplicação. Ele afirma que a microligação de Nb assegurou que os aços de baixo carbono (até 0,1%) atinjam rendimentos e resistência a tração no estado laminado, que se equiparam com os aços de carbono mais elevados. Maior resistência a fadiga, a fratura, ao fogo e absorção de energia no ensaio de Charpy, são as principais propriedades melhoradas com a adição do Nb, porém também existem melhorias nas propriedades siderúrgicas e redução no custo operacional por tonelada.

Bizarria e Souza (2016) desenvolveram seu estudo sobre as propriedades mecânicas do nióbio microligado ao aço SAE 1070 e notaram que o aço nióbio proporcionou um aumento em cerca de 200% na absorção de energia por impacto e de 20% na dureza, o que comprova um aumento considerável nas propriedades mecânicas, de forma *hall-petch*, ou seja, aumento em ambas as propriedades simultaneamente.

Amaral *et al.* (2016) investigou o uso do aço de alta resistência microligado ao nióbio com limite de escoamento de 450Mpa. A adição de pequenas quantidades de nióbio favoreceu o refinamento dos tamanhos dos grãos, aumento da resistência e da tenacidade, redução do consumo total do aço em 10% do peso, redução de 9% da energia consumida e na emissão de gases, além das melhorias na soldabilidade.

Amaral, Carboni e Scott (2017) avaliaram a aplicação de um atlas de soldagem de um aço bainítico microligado ao nióbio, chegaram à conclusão que pelo o uso do mesmo é possível aumentar a confiança nos parâmetros e processos de soldagem. Não haveria necessidade para o aço nióbio do uso de pré-aquecimento para evitar trincas, estruturas frágeis ou um amplo envelope de soldabilidade, obtendo uma redução e reorganização dos grãos.

CBMM (2018a) examinou projetos de liga de aço econômicos com nióbio e obtiveram como resultados ligas com Nb que necessitam de 30% a 50% menos ligas para atingir as mesmas propriedades, o que equivale a uma economia de até 10 dólares em cada tonelada.

Espíndola e Lussoli (2019) buscaram analisar a utilização do nióbio e do níquel no aço 1020, com o objetivo de investigar o aumento da resistência mecânica. Após testes em laboratório obtiveram melhorias em todas as propriedades mecânicas medidas nos corpos de prova analisados, entretanto a tenacidade do material foi a que teve maior aumento.

Oliveira e Costa (2019) buscaram entender a influência da microestrutura na resistência ao desgaste microabrasivo de ligas de F-Cr-C e Fe-Cr-C-Nb. A combinação com nióbio contribuiu para uma maior resistência a abrasão devido a sua presença no revenimento e muita aderência, dificultando o processo de desgaste. Os autores utilizaram o aço ASTM A36 com 5% de nióbio para combinação F-Cr-C-Nb, já para a combinação F-Cr-C tiveram duas variações uma com 25% de Cr e outra com 45% Cr.

CBMM (2019) investigou projetos de ligas de baixo custo para aços estruturais e afirmou que modelos de liga com 0,01% de Nb podem atingir resistências iguais a: $YS = 359$ MPa e $TS = 481$ MPa com bem menos Mn, cerca de 0,8%, e mesmo assim ter excelente soldabilidade e resultados em custo de fabricação mais baixos.

CBMM (2020) analisou a redução dos custos de ligas para produtos planos estruturais de 355Mpa. Eles afirmam que o nióbio pode acrescentar até 355 MPa no limite de elasticidade aos aços estruturais com pequenas porcentagens, reduzindo o custo de produção e sem exigência de alterar o processo de fabricação ou de laminagem. Para atingir $YS = 350$ MPa necessita apenas 0,010% de Nb, o que reduz Mn de 1,5% para 0,85%, com isso um impacto de custo de 2.036.807 USD por ano.

Prado, Lino e Vaz (2020) apuraram os efeitos do aporte de calor e da adição de nióbio na zona afetada pelo calor (HAZ) de aços microligados para barras de reforço. Eles afirmam que altas entradas de calor precisão ser feitas com cautela, visto o aumento dos grãos em altas temperaturas. Entretanto independente do calor, quando comparados ao aço Nb os tamanhos dos grãos são bem menores que o do aço comum, havendo alterações quase que imperceptíveis, já em baixo aporte térmico (0,4kJ/mm) levou a formação de microestruturas de elevada dureza o que pode inferir na tenacidade e justificar a necessidade do material de resistir a uma temperatura maior para não influenciar nas propriedades mecânicas do aço.

Mamede *et al.* (2021) estudaram o efeito da adição de nióbio no aço para a construção civil e afirmam que o aço Nb proporciona maior economia de material e de mão de obra especializada, melhor sustentabilidade, redução na emissão de CO_2 e maior resistência quando comparado ao aço comum.

A CBMM (2021a) analisou os aços estruturais multigraduados de nióbio buscando melhorar a eficiência das cadeias de suprimentos, ela garante que o nióbio proporciona alto refinamento nos grãos em produtos laminados com porcentagens de 0,035% ou até valores menores, afirma ainda que o aço com nióbio tem aumento de tensão, preserva a ductibilidade e o alongamento, ajuda a conciliar as propriedades mais elevadas de cada aço, resultando num produto mais confiável e econômico.

Pessoa (2022) verificou quais os efeitos do nióbio no comportamento mecânico de um aço alto carbono utilizado em concreto protendido. Ele obteve como resultado redução do tamanho dos grãos e homogeneidade da microestrutura do aço utilizado na pesquisa, aumento no limite de resistência, na dureza e boa redução global de custo, que chegou a 9%.

Gorni, Rebellato e Silvestre (2022) investigaram a substituição parcial do manganês pelo nióbio em aços estruturais de baixo carbono. Chegaram à conclusão que modelos de ferramentas metalúrgicas como o MicroSim possibilitam otimizar os tratamentos termomecânicos até extrair o máximo efeito dos elementos de liga, e assim ocasionar diminuição nos tamanhos dos grãos, aumento no limite de escoamento e ainda, uma redução na quantidade de material de liga com troca de 0,30% a 0,50% de manganês por 0,010% de nióbio, gerando menos aquecimento global

A CBMM (2022a) desenvolve um estudo para analisar soluções de Nb ultra baixa para aços estruturais de qualidade de base, ou seja, com limite de elasticidade ≤ 355 MPa. Eles afirmam que quantidades muito baixas de Nb, porcentagem com variações $\leq 0,01\%$, reduz diretamente o Mn e elimina a necessidade de adicionar V, sem exigência de mudanças no procedimento de laminação, sem percas no cumprimento das propriedades mecânicas, além de trazer redução de custo.

4.2 Estudo de caso – Aço nióbio em estruturas na prática

Dentre os textos selecionados para essa revisão temos os estudos de casos, pesquisas que tem como foco comprovar na prática que estruturas de alto padrão já construídas poderiam ter maior

desempenho, economia e sustentabilidade se tivessem sido projetadas com o aço nióbio ao invés do aço carbono comum ou ainda explicar os benefícios atribuídos às estruturas construídas com aço nióbio. Para isso, os autores recalcularam modelos estruturais de prédios de alto porte substituindo o aço comum por aço Nb e estabeleceram comparativos que levam em consideração resistência, soldabilidade, tensões de ruptura, melhoria na tenacidade e, conseqüentemente, diminuição de seção de vigas e pilares.

Luru (2010) realizou um levantamento do aço estrutural utilizado em grandes projetos de construção. Ele exemplifica diversos casos onde se utilizou aços microligados ao nióbio de alta resistência, entre os aços mais citados estão Q235, Q390, Q420, Q445 e Q460 e entre os projetos citados estão o *National Stadium (Bird Nest)*, o *New CCTV station* e o *Guangzhou new tower*. Execuções bem sucedidas de alto padrão com resultados excelentes.

Silvestre *et al.* (2013) expuseram aços de alta resistência como solução para o design enxuto de edifícios industriais. Eles desenvolveram um comparativo entre dois edifícios industriais hipotéticos para abrigar a planta de Sinterização II da CBMM em Araxá, um com aço Nb e outro com aço comum (C-Mn). Inicialmente a estrutura em aço C-Mn apresenta vigas e pilares com dimensões e uma área de seção transversal maiores, em virtude de a resistência ser menor, já a estrutura em aço Nb apresentou menos emissão de CO₂, cerca de 127.972 kg, redução de peso e do custo em 22% e 17% respectivamente e uma economia de energia, em cerca 1779 GJ.

O'Connor (2015) analisou projetos de arranha-céus e uso de aço de alta resistência. Ele afirma que os tipos de aço mais comuns utilizados na concepção atual de edifícios altos são o S355 para seções e chapas estruturais laminadas a quente e o S460 para varões de reforço, principalmente para resistências de 355 a 460 N/mm², para atingir temperaturas necessárias a microliga nióbio é a principal forma. Pois permite elevadas resistências e maior tenacidade, diminuindo a porcentagem de carbono e os teores de outras ligas mantendo ao mesmo tempo valores elevados de tenacidade, boa soldabilidade e mantendo ou aumentando a resistência a tração, como exemplos de arranha-céus já construídos nesses parâmetros *Torre Nakheel* e *Índia Tower*.

CBMM (2018b) desenvolveu um estudo sobre a Ponte ferroviária Zandhazen que utilizou o aço S460 de alta resistência com limites de elasticidade de 460 MPa, reduziu em cerca de 30% o peso da estrutura, as chapas que antes eram 160mm passaram a ser 90mm, uma economia significativa. O aço S355 com 350 MPa também foi usado, ambos os aços microligados ao Nb com adições de 0,03% melhorando a tenacidade, resistência e soldabilidade, diminuindo o carbono presente no aço. A quantidade de aço utilizado para esse projeto se aproxima da necessária para Torre Eiffel.

CBMM (2018c) realizou um estudo de caso do Moorgate Exchange em London um edifício de 12 andares todo feito em aço S355J2H com tensão de ruptura de 355 MPa e adição de Nb de 0,03% de acordo com a norma EN 10210.

Jansto (2020) analisou a demanda por aços para pontes de alto desempenho com nióbio. Ele afirmar que é possível obter uma economia de até 10% no custo total da estrutura com a utilização do aço Nb, gerando aços com mais facilidade de manuseio e instalação, redução de 30% no custo do ciclo de vida do aço, maiores resistências a intemperes e benefícios ambientais.

Jordão *et al.* (2020) desenvolveram um estudo de caso do IMS Paulista o centro cultural Instituto Moreira Salles em São Paulo feito todo em estrutura metálica. Executado com aço ASTM A572 Gr50 – 355 MPa e aço ASTM A572 GR60 – 420 MPa fornecidos pelo Gerdau e pela Usiminas com teores de C inferiores a 0,18%, microligado ao Nb com teores entre 0,02 e 0,04% para máxima eficiência, redução das seções dos elementos estruturais e conseqüentemente no peso da estrutura, refinando os grãos e melhorando as propriedades mecânicas, atendendo a norma ASTM A572 nos níveis de 50 e 60 com elevado padrão de segurança.

CBMM (2021b) elaborou um estudo de caso sobre STIGA Sport Arena, que foi toda construída com aços S355, S420 e S700 com porcentagem que chegaram a 0,07% de Nb de acordo com a norma NA 10219:2006. A CBMM afirma que a estrutura feita com aço nióbio melhorou a resistência e a tenacidade, diminuindo a necessidade de pré-aquecimento antes do processo de solda.

CBMM (2022b) investigou o processamento controlado termomecânico para oferecer as vantagens da tecnologia do nióbio. Segundo eles, o Nb é o único elemento que permite a laminação à temperaturas superiores as normais, evitando assim o regime de processamento da austenita, retardando a recristalização e recuperação, diminuindo posteriormente a temperaturas de início de transformação de austenita em ferrita. Tudo isso contribui para que o aço tenha alta resistência e tenacidade. Eles ainda

afirmam que Linepipe (Tubos de ligações) de alta resistência capazes de atender as demandas mais onerosas de usuários finais exigentes não poderia ser produzido sem o uso do elemento Nb.

Ao todo 9 estudos de casos apresentam na prática execuções de projetos para edifícios eficientes com estruturas de alta padrão e referência em desempenho utilizando aços com liga de nióbio em sua composição, o que equivale a 28% dos estudos em análise nessa revisão. Tais estudos apresentam adições da liga Nb que variam de 0,02% a 0,07%, para aços com resistência 355Mpa a 460Mpa, com rendimentos significativos no que diz respeito a redução de materiais, pela diminuição de seções, chapas e perfis e conseqüentemente de peso e gasto energético.

Entre os aços mais utilizados estão o S355 e S460, mas também foram utilizados o S420 e S700. Entretanto aqui no Brasil, o ASTM A575 GR50 e GR60 podem ser fornecidos por empresas brasileira como Gerdau e Usiminas, duas dentre as empresas mais conhecidas na produção de aço no Brasil.

4.3 Pesquisas com resultados limitados com adição do nióbio

Dentre os 32 textos analisados, apenas 2 não obtiveram resultados acima do padrão com a adição de Nb. Ambos os estudos fizeram comparações com as ligas Titânio (Ti) e Vanádio (V), entretanto não significa que os resultados obtidos com adição de Nb tenham sido inferiores às outras ligas. Pelo contrário, o aço com Nb apresentou características similares com os aços a base de outras ligas, obtendo boa resistência, boa tenacidade, excelente soldabilidade e boa trabalhabilidade, porém não foram resultados muito acima dos resultados encontrados com as demais ligas (Ti e V) utilizadas para comparação.

Helleis *et al.* (2018) caracterizaram revestimentos de nióbio e titânio como protetor à corrosão do aço carbono SAE1020. Eles adicionaram um revestimento a base de resina de óxido de nióbio e titânio pelo método Pechini, em placas quadradas de aço carbono SAE 1020. Segundo eles os ensaios eletroquímicos indicaram que houve maior proteção nas placas contra corrosão, onde a resina teve aumento de titânio, o melhor resultado contra corrosão foi para a proporção Ti:AC – 1:10.

Silva *et al.* (2019) analisaram o desenvolvimento e a caracterização de vergalhões de aço CA-50 microligados com nióbio. Eles utilizaram a seguinte composição dos aços: aço Nb com teor de 0,025% e o aço V com teor de 0,03%. Segundo eles, a deformação de ambos os aços se mostraram similares nos ensaios de torção a quente, após deformação a quente as estruturas austenita exibem semelhanças e os volumes de dureza também permaneceram sem diferenças significativas.

Ainda é importante entender que o estudo de Helleis *et al.* (2018) foi desenvolvido com enfoque em tipos de revestimentos para o aço, ou seja, a base de uma resina de Nb e a base de uma resina de Ti, o que não influencia no processo de recomposição química interna da estrutura do aço C, onde o nióbio apresenta seu maior potencial de refinamento dos grãos das estruturas e diminuição do teor de carbono, como trazem os demais estudos.

5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

É muito importante conhecer as vantagens e limitações da adição de nióbio nos aços mais utilizados na construção civil, investigar os efeitos dessa adição em aços com diferentes teores de carbono categorizando as ligações estruturais, sua aplicabilidade e os resultados relevantes a esse estudo.

Assim, dentre os 32 estudos utilizados nessa revisão, aproximadamente 66% deles apresentaram algum resultado positivo em relação as melhorias com a adição de Nb para os principais aços no mercado atualmente. Considerando os 28% que representam os estudos de caso, que na prática são exemplos de modelos estruturais em aço Nb, o percentual de aproveitamento positivo com adição sobe para 95%.

Teores de liga nióbio que variam entre 0,01% a 0,07%, estão diretamente ligados ao alto poder do nióbio de uniformização dos grãos presentes na estrutura química do aço, o que aprimora o retardo no processo de recristalização, favorecendo o resfriamento saudável da estrutura, potencializando o processo metalúrgico, aperfeiçoando a soldabilidade e favorecendo uma boa trabalhabilidade, melhorando a resistência e tenacidade, reduzindo seções e perfis e proporcionando alta economia de materiais e menos emissão de gases. Portanto fica claro que existe inúmeros benefícios em se utilizar o nióbio como microliga, pois o mesmo agrega diversas propriedades ao aço estrutural, o que garante mais economia e muito mais eficiência.

Os estudos de casos demonstram na prática a alta eficiência que aço Nb pode oferecer, arranha-céus que conferem economia, segurança e menos poluição. O Instituto Cultural Moreira Salles é um

exemplo da viabilidade de compra do aço Nb no mercado brasileiro, visto que empresas como Gerdau, Usiminas e CBMM são grandes produtores de um modelo de aço inovador de alto padrão com Nb.

Como sugestão para novas pesquisas nessa área de estudo, seria interessante desenvolver ensaios de corrosão e resistência ao desgaste em laboratório, com modelos de aços utilizados para concretagem, como o CA 50 e CA 60, desenvolver ensaios de comparação entre o aço Nb e aço V, visto que os únicos estudos utilizados nessa revisão que tiveram limitações com adição do Nb, foram justamente estudos sobre a resistência à corrosão que essa liga proporciona e os benefícios que se assemelham a liga vanádio, quanto a resistência e o limite de escoamento.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Lindomar C. A.; REZNIK, Leila Y.; LUTTEBACH, Márcia T. S.; CARVALHO, Ladimir J.; SERVULO, Eliana F. C. **Análise da biocorrosão do aço carbono AISI 1020 em face a proteção de uma tinta pigmentada com óxido de nióbio.** Intercorr, salvador, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. **Produção de estruturas e materiais em aço cresce 24,9%**. 2022. Disponível em: <https://www.abcem.org.br/site/blog/producao-de-estruturas-e-materiais-em-aco-cresce-24-9>. Acesso em: 23 maio 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7480: Aço destinados às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2022.
- AMARAL, Thiago de Sousa; CARBONI, Marcelo Carboneri; SCOTTI, Américo. **Avaliação da aplicação de um atlas de soldagem de um aço bainítico microligado ao nióbio.** Cbecimet, Foz do Iguaçu, 2017.
- AMARAL, Thiago de Sousa; 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 450Mpa para construções mais eficientes.** Abm Week, 2016.
- BANDEIRA, Adriana Almeida de Castro. **Análise do uso de estruturas de aço em edificações habitacionais de interesse social.** 2008. 109 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- BIZARRIA, Bruno Benedito; SOUZA, Fernando Gomes. **Propriedades mecânicas do nióbio microligado ao aço SAE 1070.** Sinergia, V. 17, N. 2, P. 156-160, São Paulo, abr./jun. 2016.
- BRUZIQUESI, Calos G. O.; BALENA, Jose Gabriel; PEREIRA, Márcio César; SILVA, Adilson C.; OLIVEIRA, Luiz C. A. Nióbio: um elemento químico estratégico para o Brasil. **Química Nova**, V. 42, N. 10, 2019.
- CARAM, Rubens. **Estrutura e propriedades dos materiais: estrutura cristalina.** [S.L]: Unicap, 2006. 70 slides, color, 24cm x 18cm.
- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Construção em aço e sustentabilidade.** [2022]. Disponível em: <https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/vantagens-e-sustentabilidade/>. Acesso em: 10 maio 2023.
- COMPANHIA BRASILEIRO DE METALOGIA E MINERAÇÃO-CBMM. **Cost-efficient steel alloy design with niobium.** Niobium NB, Brasil, 2018a.
- COMPANHIA BRASILEIRO DE METALOGIA E MINERAÇÃO-CBMM. **Discover how niobium can reduce alloying costs for 355Mpa grade structural flat products.** Niobium NB, Brasil, 2020.
- COMPANHIA BRASILEIRO DE METALOGIA E MINERAÇÃO-CBMM. **Low-cost alloy design for structural steels: A new approach.** Niobium NB, 2019.
- COMPANHIA BRASILEIRO DE METALOGIA E MINERAÇÃO-CBMM. **Moorgate Exchange:** London, UK. Steel Knowledge, 2018c.

COMPANHIA BRASILEIRO DE METALOGIA E MINERAÇÃO-CBMM. **Niobium multigrade structural steels: improving the efficiency of supply chains.** Niobium NB, 2021a.

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALOGIA E MINERAÇÃO-CBMM. **O que é o Nióbio.** (2022). Elaborado por Niobium Nb. Disponível em: <https://cbmm.com/pt/Niobio>. Acesso em: 08 abr. 2023.

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALOGIA E MINERAÇÃO-CBMM. **Stiga Sports Arena:** Eskilstuna, Sweden. Steel Knowlwdge, 2021b.

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALOGIA E MINERAÇÃO-CBMM. **Thermomechanical controlled processing (TMCP) delivering the advantages of niobium technology.** Niobium NB, 2022b.

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALOGIA E MINERAÇÃO-CBMM. **Ultra low Nb (ULNb):** Solution for commodity grade structural steels. Niobium Nb, 2022a.

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALOGIA E MINERAÇÃO. **Zandhazen Railway Bridge:** The Netherlands. Steel Knowlwdge, 2018b.

ESPÍNDOLA, Luiz Ricardo Wensing; LUSSOLI, Rosineide Junkes. **Utilização do nióbio e níquel no aço 1020, visando aumento a resistência mecânica.** Unisociesc, 2019.

FERREIRA, Rafael Guilherme Gomes. **O uso do aço na construção civil.** CONTECC, Brasília, 2021.

FERRAZ, Henrique. O aço na construção civil. **Revista Eletrônica de Ciência**, n. 22, 2005.

GERDAU. **Tipos de aço e sua classificação** – normas SAE/AISI/ABNT. 2021. Disponível em: <https://mais.gerdau.com.br/blog-do-aco/automotivo/tipos-de-aco-e-sua-classificacao-normas-sae-aisi-abnt/>. Acesso em 22 maio 2023.

GOMES, Thiago Evangelista; OLIVEIRA, Nilton José Lucinda; REIS, Thompson Júnior Ávila; ANDRADE, Margareth Spangler. **Efeito do nióbio na trabalhabilidade a quente do aço UNS S32304.** Laminação Rolling, Foz do Iguaçu, 2014.

GORNI, Antonio Augusto; REBELLATO, Marcelo Arantes; SILVESTRE, Leonardo Magalhães. **Substituição parcial do manganês pelo nióbio em aços estruturais de baixo carbono.** Eng Brasil, 2022.

IMIANOWSKY, Guilherme Wanka; WELENDOWSKY, Marcus Alberto. **Os principais aços carbono utilizados na construção civil.** UNIFEFE, 2015.

JANSTO, Steven. G. **Meeting global demand for safe trustworthy infrastructures with Low-Cost niobium-containing steels.** Niobium Nb, 2018.

JANSTO, Steven. G. **Niobium-bearing construction steels and global application trends.** CBMM and TMS, 2015.

JANSTO, Steven G. **Steel producers respond to demand for high performance bridge steels with niobium.** Niobium NB, 2020.

JORDÃO, Alexandre M.; MORETTIN, Marcelo H.; ANDRADE, Vinicius H.; CANAL, José Luis; REBELLO, Yopanan; DINIZ, Giselly; SILVESTRE, Leonardo M. **IMS Paulista headquarters: the high strength and light weight of steel in architecture.** Niumbio NB, 2020.

KIRKWOOD, P. **The weldability of modern niobium microalloyed structural steels.** CBMM and TSM, 2015.

LURU, Chen. **Survey of structural steel used in major construction projects.** TMS, 2010.

MAMEDE, Erivaldo; MENDES, Fernanda Lopes; OLIVEIRA, Gabriel Lukiantchuki de Melo; VATAVUK, Jan. **O estudo dos efeitos da adição de nióbio no aço para construção civil.** Brasil, 2021.

O'CONNOR, M. **High-rise design and the use of high strength steel.** CBMM and TMS, 2015.

OLIVEIRA, Mariana Perez. **Influência da adição de nióbio sobre as propriedades mecânicas e de resistência a corrosão de aços inoxidáveis supermartensíticos.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015, 154 f.

OLIVEIRA, Tatiane Gabi; COSTA, Adilson Rodrigues. Influência da microestrutura na resistência ao desgaste microabrasivo de ligas de F-Cr-C e Fe- Cr-C-Nb. **Revista Matéria**, s. l., v. 24, n. 01, 2019.

PANNONI, Fabio Domingos. **Aços estruturais.** USP, Brasil, 2005.

PESSOA, Ricardo Amorim. **Efeito do nióbio no comportamento mecânico de um aço alto carbono utilizado em concreto protendido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022, 64 f.

PINHEIRO, W. F.; FERREIRA FILHO, O. B.; NEVES, C. A. R. (coords.). **Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas.** Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2016, 31 p.

PRADO, Juscelino Mendes; LINO, Roney Eduardo; VAZ, Cláudio Turani. **Effects of heat input and niobium addition microalloyed steels for reinforcing bars.** Solsagem & Inspeção, Minas Gerais, 2020.

SAMPAIO, RF; MANCINI, MC. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa de evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, 2007.

SEER, Hildor José; MORAES, Lucia Castanheira de. **Nióbio.** UFMG, 2018.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA DO CEARÁ-SEINFRA. **Tabela de preço de insumos/serviços.** 2013-2014.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA DO CEARÁ -SEINFRA. **Tabela de preço de insumos.** 2018-2021.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA DO CEARÁ -SEINFRA. **Tabela de preço de insumos/serviços.** 2021-2023.

SILVA, Ana Clara Fonseca; BITTENCOURT, Tiago Seixas; PEREDA, Beatriz; REBELLATO, Marcelo Arantes; SILVA, Andre Luiz Vasconcellos da Costa. **Niobium microalloyed CA-50 rebars: development and characterization.** Abm week, 3. edição, São Paulo, 2019.

SILVESTRE, Leonardo M.; STUART, Marcos A.; MOURA, Hermane R. S.; JORDÃO, Alexandre M.; RIBEIRO, Rodolfo; ROCHA, Leonardo; BURATTO, Felipe. **High strength steel: the solution for the lean design of industrial buildings**. PSSSC, Brasil, 2013.

SOLDATTI, Heitor Barbosa. **Influência da adição do nióbio no comportamento mecânico e microestrutural do aço SAE 6150**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015, 76 f.

SPEER, John G.; REGIER, Ryan w.; MATLOCK, David K.; JANSTO, S. G. **Nb-microalloyed fire resisitant constructional steels**. TSM, 2010.

TEOBALDO, Izabela Naves Coelho. **Estudo do aço como objeto de reforço estrutural em edificações antigas**. 2004. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

HELLEIS, R.; BERBEL, L. O.; COSTA, G. T. TRACTZ; OLISZESKI, D. C. S. BANCZEK, E. P. **Caracterização de revestimento de nióbio e titânio como protetor da corrosão do aço-carbono (SAE 1020)**. Cbecimat, Foz do Iguaçu, 2018.

JAINI DE SOUSA SILVA

ADIÇÃO DE NIÓBIO NO AÇO CARBONO E SUA APLICABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, *Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 13 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **RAQUEL FERREIRA DO NASCIMENTO**
Data: 15/08/2023 16:29:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Raquel Nascimento – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO PEREIRA DE LUCENA SILVA**
Data: 15/08/2023 20:26:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leonardo Pereira da Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **JOHN WILLIAMS FERREIRA DE SOUZA**
Data: 15/08/2023 15:27:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

John Williams Ferreira de Souza – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC - Completo

Assunto: TCC - Completo
Assinado por: Jaini Silva
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Jaini de Sousa Silva, ALUNO (201622200640) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS**, em 15/08/2023 21:50:35.

Este documento foi armazenado no SUAP em 15/08/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 910108
Código de Autenticação: a895db33ea

