



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

OSÉLIO CÂNDIDO DE ARAÚJO LIMEIRA LIMA

**AVALIAÇÃO DO MERCADO BRASILEIRO DE LIGAS METÁLICAS:
PERPECTIVAS E INOVAÇÕES NO USO DO NIÓBIO**

FORTALEZA
2023

OSÉLIO CÂNDIDO DE ARAÚJO LIMEIRA LIMA

AVALIAÇÃO DO MERCADO BRASILEIRO DE LIGAS METÁLICAS: PERSPECTIVAS E
INOVAÇÕES NO USO DO NÍOBIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L699a Lima, Osélio Cândido de Araújo Limeira.
Avaliação do mercado brasileiro de ligas metálicas : perspectivas e inovações no uso do nióbio / Osélio
Cândido de Araújo Limeira Lima. – 2023.
42 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira.

1. Ligas metálicas. 2. Nióbio. 3. Metalurgia. 4. Mineração. 5. Covid-19. I. Título.

CDD 669

OSÉLIO CÂNDIDO DE ARAÚJO LIMEIRA LIMA

AVALIAÇÃO DO MERCADO BRASILEIRO DE LIGAS METÁLICAS: PERSPECTIVAS E
INOVAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 27 /06/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Ao meu pai e minha tia Cláudia

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai por ter sempre me dado apoio e ter ressaltado a importância da graduação, pois caso contrário, não teria tido forças para terminá-la.

Agradeço à minha tia Cláudia que me ajudou em diversos momentos difíceis que passei e que deu todo suporte emocional e psicológico para terminar a graduação.

Agradeço bastante aos professores do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo conhecimento transmitido e pelo carinho de alguns professores como o do Prof. Dr. Ricardo Emilio.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Emilio por ser um grande profissional e uma excelente pessoa na forma de tratar as pessoas e seus alunos. Agradeço a ele também por ter sido flexível no que diz a temática desse trabalho e ter me ajudado a redigila.

Agradeço também ao Antônio, secretário do curso de Engenharia Metalúrgica por ser acessível e dar o apoio necessário nas disciplinas e com a documentação do curso, sendo sempre solícito e paciente em diversas situações.

Agradeço aos meus colegas da Empresa Jr. do curso de Engenharia Metalúrgica por ter me ajudado no desenvolvimento das minhas habilidades sociais e pelos momentos de companheirismo de alguns colegas.

Agradeço imensamente ao meu amigo Danier Azevedo por ter sempre me motivado e ressaltado a importância do término do curso e me apoiar em momentos difíceis que tive ao decorrer do curso.

Agradeço ainda ao meu amigo Renan por me ajudar com ideias do tema desse trabalho e pelo apoio emocional para o término da graduação.

Por fim, agradeço aos meus amigos de faculdade, que me acompanharam e me ajudaram, em especial, aos meus amigos Rubson Guimarães, Kalyne Sevico, Iuri Abreu, Bruno Fontenele, Leonardo Mello e João Vitor.

“Obrigado a todas as pessoas que contribuíram para meu sucesso e para meu crescimento como pessoa. Sou o resultado da confiança e da força de cada um de vocês.” (Augusto Branco).

RESUMO

O setor de metalurgia é um ramo importante de desenvolvimento da indústria de uma nação. A produção de ligas metálicas, destaca-se como atividade fundamental dentro desse ramo, suprimindo demandas de diversas indústrias. Todavia, tal setor é codependente de matérias-primas minerais para garantir a continuidade da produção, o que torna países com boas reservas minerais, promissores produtores de ligas metálicas. O Brasil possui o monopólio na mineração e produção de ligas metálicas com nióbio (Nb), o que o torna pioneiro na criação de produtos com valor agregado com esse minério. A pandemia de COVID-19 paralisou diversos setores produtivos da indústria metalúrgica, obrigando que o mercado de ligas metálicas criasse novos mecanismos para adequar-se às novas exigências da época. Agora, com o retorno a normalidade e o reaquecimento da economia nos setores produtivos, ocorreu o natural retorno da produção aos padrões pré-pandêmicos. Contudo, o setor de ligas metálicas brasileiro não fora afetado quando comparado com outros mercados. Assim, o seguinte trabalho objetivou avaliar o mercado de ligas metálicas com nióbio e suas perspectivas e inovações. Para tanto, foram coletados e avaliados artigos no período de 10 anos utilizando uma abordagem metodológica qualitativa de revisão integrativa de literatura. A amostra final foi composta de treze (13) artigos que foram distribuídos em três categorias (produção, mercado e aplicação). A análise da amostra permitiu concluir que o mercado brasileiro conseguiu contornar com êxito as limitações impostas pela pandemia, investindo em reestruturação de sua cadeia produtiva e otimizando o consumo de matérias primas com uso de inteligências artificiais. Entretanto há ainda desafios a serem superados, como a diversificação do uso do nióbio em outros seguimentos do mercado de ligas.

Palavras-chave: Ligas metálicas; nióbio; metalurgia; mineração, covid-19.

ABSTRACT

The metallurgy sector is an important branch of the development of a nation's industry. The production of metal alloys stands out as a fundamental activity within this branch, meeting the demands of various industries. However, this sector is codependent on mineral raw materials to ensure continuity of production, which makes countries with good mineral reserves promising producers of metal alloys. Brazil has a monopoly in the mining and production of metal alloys with niobium (Nb), which makes it a pioneer in the creation of products with added value with this ore. The COVID-19 pandemic paralyzed several productive sectors of the metallurgical industry, forcing the metal alloy market to create new mechanisms to adapt to the new requirements of the time. Now, with the return to normality and the reheating of the economy in the productive sectors, there has been the natural return of production to pre-pandemic patterns. However, the Brazilian metal alloy sector was not affected when compared to other markets. Thus, the following study aimed to evaluate the market of metal alloys with niobium and its perspectives and innovations. For this purpose, a qualitative methodological approach known as an integrative literature review was employed to collect and evaluate articles spanning a period of 10 years. The final sample was composed of thirteen (13) articles that were distributed into three categories (production, market and application). The analysis of the sample allowed us to conclude that the Brazilian market was able to successfully circumvent the limitations imposed by the pandemic, investing in restructuring of its production chain and optimizing the consumption of raw materials with the use of artificial intelligences, however there are still challenges to be overcome; such as the diversification of the use of niobium in other segments of the alloy market.

Keywords: Metal alloys; niobium; metallurgy; mining, covid-19.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição da amostra (n = 13) quanto ao título, autores, ano, revista e tipo de estudo.	30
Tabela 2 - Descrição da amostra (n = 13) quanto aos objetivos e conclusões	32
Tabela 3 - Categorização de abordagens por autorias e ano	36
Tabela 4 - Tabela FOFA para o Mercado de Nb Brasileiro	38
Tabela 5 - Eventos-chave/ano para o Nióbio	40
Tabela 6 - Relação exportação por carga demandada por período.....	40
Tabela 7 - Relação Produto x Aplicação	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CMOC	China Molybdenium Company
IA	Inteligência Artificial
AMP	Anuário Mineral Brasileiro
MCS	Mineral Commodity Summaries
USGS	United States Geological Survey
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
ANM	Agência Nacional de Mineração
FOB	Free on Board
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga

LISTA DE SÍMBOLOS

Nb	Nióbio
Ta	Tântalo
Ti	Titânio
Va	Vanádio
Al	Alumínio
Cu	Cobre
Fe	Ferro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS	17
2.1	Principal	17
2.2	Secundários	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	Metalurgia	18
3.1.1	<i>Ligas metálicas</i>	18
3.1.2	<i>Principais aplicações de ligas metálicas</i>	19
3.2	Mineração e Metalurgia: desenvolvimento de novos materiais.....	21
3.2.1	<i>Nióbio (Nb)</i>	22
3.2.2	<i>Ligas Fe-Nb</i>	22
3.2.3	<i>ARBL com Nb</i>	23
3.2.4	<i>Substitutos</i>	Error! Bookmark not defined.
3.3	Estrutura de Mercado: produção, consumo e exportação de ligas metálicas..	24
3.4	Investimentos, tecnologia e inteligência artificial	26
4	METODOLOGIA.....	28
4.1	Amostra de Pesquisa.....	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
5.1	Artigos Selecionados.....	30
5.2	Descritores por Objetivos e Conclusões.....	32
5.3	Categorização da Amostra	36
5.4	Discussões: Categoria Mercado	37
5.5	Discussões: Categoria Produção.....	39
5.6	Discussões: Categoria Aplicações	41
6	CONCLUSÃO.....	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

As ligas metálicas estão presentes em praticamente todos os setores da indústria, do latão ao aço, da produção de bens de consumo à construção civil. O metal carrega um peso industrial e comercial enorme no Brasil e no mundo, sendo responsável pela geração de empregos, por acordos comerciais entre países e pelo avanço tecnológico da sociedade como um todo, seja na forma de metal ou de minério.

Durante a pandemia ocasionada pelo coronavírus, SARs-Cov-2, o mercado de ligas metálicas passou por diversos desafios de demanda e oscilações de preços, mas o fato é que as ligas metálicas, de todos os tipos, continuam ocupando um posicionamento único na indústria, como insumo primário para produções que não podem parar as suas atividades por serem consideradas essenciais para a sociedade.

Embora tenha havido uma redução na produção de ligas, a mineração e beneficiamento do nióbio não foram afetados durante os anos pandêmicos e a produção de ligas com nióbio continuaram. O Brasil se destaca pela produção e refinamento de nióbio e por possuir um pioneirismo no desenvolvimento de tecnologias de aplicação do nióbio tem um potencial de crescimento.

Tal resultado brasileiro, na contramão do mercado mundial, traz à tona o questionamento: Por que especificamente esse setor de produção de ligas metálicas com nióbio não fora afetado? Diversos fatores podem ter influenciado esse cenário, contudo não há indicativos notórios que expliquem de modo satisfatório a questão, o que indica que apenas uma análise simples de mercado não seja o suficiente, no caso.

Dessa forma, buscando agregar valor acadêmico à questão, o seguinte trabalho se propôs investigar o cenário brasileiro de produção de ligas metálicas com nióbio, avaliando e pontuando os avanços no setor, as perspectivas de produção, crescimento e expansão do mercado. Com esse intuito, realizou-se uma revisão bibliográfica de literatura dos principais trabalhos publicados na área entre a janela temporal de dez anos.

Este trabalho foi estruturado da seguinte forma: após enunciar os objetivos, é apresentada uma revisão do marco teórico sobre os diversos assuntos que permearam as discussões. No segundo momento, é apresentada a metodologia utilizada e os critérios objetivos que nortearam a composição da amostra dos dados escolhidos. Por fim, são apresentados os resultados e as discussões sobre as nuances de cada trabalho e como eles corroboraram para explicar o questionamento proposto.

2 OBJETIVOS

2.1 Principal

Avaliar o potencial de desenvolvimento do mercado brasileiro de ligas metálicas com nióbio.

2.2 Secundários

- Comparar o potencial produtivo de ligas metálicas do Brasil com os principais produtores mundiais.
- Explorar o desenvolvimento de novas ligas metálicas com nióbio, sua viabilidade e utilização no mercado.
- Identificar os principais desafios dos produtores nacionais de ligas metálicas com nióbio.
- Discutir o papel do engenheiro metalúrgico no cenário competitivo de desenvolvimento de ligas metálicas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Metalurgia

A metalurgia é um ramo da engenharia que se dedica ao estudo e manipulação de metais e ligas metálicas. Ela desempenha um papel de extrema importância tanto do ponto de vista econômico quanto no desenvolvimento de ligas metálicas. Do ponto de vista econômico, a metalurgia é essencial para a indústria, uma vez que fornece os materiais necessários para a fabricação de uma ampla gama de produtos (MME, 2023).

Desde estruturas metálicas utilizadas na construção civil até peças de maquinário e equipamentos industriais, passando por componentes eletrônicos e veículos, a engenharia metalúrgica é responsável por fornecer os materiais que impulsionam o desenvolvimento econômico de diversos setores.

Além disso, a metalurgia tem um papel importante no desenvolvimento de ligas metálicas. As ligas são combinações de dois ou mais metais, com a finalidade de obter propriedades específicas que não podem ser alcançadas com um único metal. Essas propriedades podem incluir resistência mecânica, resistência à corrosão, condutividade elétrica, entre outras. Através da metalurgia, é possível criar ligas com composições precisas e controlar sua estrutura microscópica, o que permite a obtenção de materiais com características sob medida para aplicações específicas.

As ligas metálicas desenvolvidas pela metalurgia têm impacto direto em diversos setores da indústria. Por exemplo, no setor automotivo, as ligas metálicas são utilizadas na fabricação de carrocerias (ROSA *et al.*, 2016), motores e componentes estruturais (WANG, 2010), oferecendo resistência e leveza (WANG, 2017). No setor aeroespacial, as ligas metálicas são fundamentais para a construção de aeronaves e foguetes, proporcionando resistência e desempenho em condições extremas (MENDES, 2005). Na indústria de construção civil, as ligas metálicas são aplicadas em estruturas de edifícios e pontes, oferecendo resistência e durabilidade (COUTINHO, 2018).

3.1.1 Ligas metálicas

As ligas metálicas são materiais compostos por duas ou mais espécies de átomos metálicos, sendo amplamente utilizadas em diferentes setores industriais devido às suas propriedades únicas. Essas ligas podem ser criadas através do processo de metalurgia e

usinagem, onde a combinação de diferentes metais resulta em um material com características superiores em relação aos metais puros.

Uma das principais vantagens das ligas metálicas é a possibilidade de combinar as propriedades individuais dos metais envolvidos para obter um material com propriedades específicas. Por exemplo, a adição de elementos de liga pode melhorar a resistência mecânica (COUTINHO, 2018), a resistência à corrosão (GUNDUZ, 2016; MARTINZ, 2022; MEDEIROS FILHO, 2020), a dureza, a condutividade elétrica (BERALDO, 2022), a resistência térmica (OLIVEIRA, 2016; YILDIRIM, AKDENIZ E MEKHRABOV, 2016), entre outras características desejadas e aplicadas a modelagens específicas.

Ademais, as ligas metálicas podem ser projetadas para ter uma ampla gama de comportamentos, desde ligas de alta resistência e baixa densidade utilizadas em aplicações aeroespaciais (MENDES, 2005), até ligas resistentes à corrosão usadas em ambientes quimicamente agressivos (GUNDUZ, 2016; MARTINZ, 2022; MEDEIROS FILHO, 2020). Isso torna as ligas metálicas altamente versáteis, adaptáveis a diferentes necessidades e demandas para as engenharias.

Outra vantagem significativa das ligas metálicas é a sua maleabilidade e facilidade de processamento. As ligas podem ser conformadas e moldadas em diferentes formas e tamanhos através de processos como fundição, laminação, forjamento e extrusão (SILVA, 2017; SOUTO, 2018). Essa maleabilidade permite a fabricação de uma ampla variedade de produtos, desde componentes estruturais até peças de precisão.

As ligas metálicas também apresentam uma excelente durabilidade e resistência à estresses de fadiga metálica (YILDIRIM, AKDENIZ E MEKHRABOV, 2016), o que as torna adequadas para aplicações em ambientes desafiadores. Elas são frequentemente utilizadas em indústrias como automotiva, aeroespacial, petroquímica e construção civil, onde a combinação de resistência e durabilidade é essencial (GHATEI KALASHAMI, 2017).

3.1.2 Principais aplicações de ligas metálicas

As ligas metálicas encontram aplicação em uma ampla variedade de setores industriais. Seus atributos únicos e propriedades personalizáveis as tornam fundamentais para impulsionar avanços tecnológicos e inovações. A seguir, são destacadas algumas aplicações das ligas metálicas em diferentes setores.

As ligas metálicas são amplamente utilizadas na fabricação de componentes automotivos, como carrocerias, motores e suspensões. Ligas de alumínio e aço de alta resistência são empregadas para reduzir o peso dos veículos, melhorar a eficiência do combustível e aumentar a segurança. Além disso, ligas de cobre e níquel são aplicadas em sistemas de ignição e fiação elétrica.

No setor médico as ligas metálicas já desempenham um papel essencial na medicina, principalmente em implantes e dispositivos médicos (HAWAJREH, 2023). Ligas de titânio são frequentemente utilizadas devido à sua biocompatibilidade, resistência à corrosão e baixa densidade (BERALDO, 2022). Essas ligas são empregadas em implantes ortopédicos, como próteses de quadril e placas para fixação de ossos. Ligas de níquel-titânio, conhecidas como Nitinol, são utilizadas em *stents* vasculares e fios ortodônticos devido às suas propriedades de memória de forma.

Já para a indústria aeroespacial, onde a resistência e a leveza são essenciais. As Ligas de titânio e suas variantes, como a liga de titânio-alumínio, são amplamente aplicadas em componentes estruturais de aeronaves, como asas, fuselagens e motores. Essas ligas oferecem excelente resistência à fadiga, alta resistência específica e boa resistência à corrosão em ambientes desafiadores (GHATEI KALASHAMI, 2017).

No campo energético a utilização de ligas metálicas é fundamental, onde diversas ligas metálicas são empregadas na indústria de energia, tanto em geração quanto em distribuição. Ligas de cobre, como o bronze e o cobre-níquel, são usadas em componentes de sistemas de geração e transmissão elétrica devido à sua alta condutividade elétrica e resistência à corrosão. Além disso, ligas de aço inoxidável são aplicadas em turbinas de energia eólica e em equipamentos de geração de energia nuclear, devido à sua resistência ao calor e à corrosão (GUNDUZ, 2016; MARTINZ, 2022; MEDEIROS FILHO, 2020).

Outro ponto forte de aplicação de ligas metálicas é a flexibilidade no desenvolvimento de novos materiais com propriedades avançadas. A combinação de diferentes metais e elementos de liga permite criar ligas com características personalizadas para aplicações específicas. Por exemplo, ligas com memória de forma são utilizadas em dispositivos biomédicos e em componentes industriais que requerem deformação reversível (HAWAJREH, 2023). Ligas com efeito termoelétrico são empregadas na geração de energia a partir de diferenças de temperatura (MOTA et al., 2020).

3.2 Mineração e Metalurgia: desenvolvimento de novos materiais

A relação entre mineração e metalurgia é fundamental para o desenvolvimento de novos materiais. A mineração é responsável por extrair os minerais metálicos da terra, enquanto a metalurgia é a ciência e a tecnologia que estuda a transformação desses minerais em ligas metálicas e outros materiais.

O processo de mineração envolve a extração dos minerais metálicos das jazidas, que podem ser encontrados na forma de minério. Esses minérios são compostos por uma mistura de minerais, incluindo o mineral metálico desejado e outros materiais indesejados. A extração eficiente e sustentável desses minerais requer conhecimentos técnicos específicos e avançados.

Uma vez extraídos, os minerais passam por um processo de beneficiamento, onde são separados os minerais valiosos dos indesejados. Em seguida, ocorre a etapa de metalurgia, onde os minerais valiosos são transformados em metais e ligas metálicas. Esse processo envolve uma série de etapas, como a fusão, refino, conformação e tratamentos térmicos, que são realizados pelos engenheiros metalúrgicos.

O engenheiro metalúrgico desempenha um papel crucial como o elo entre a mineração e a metalurgia. Ele é responsável por aplicar os conhecimentos de metalurgia para otimizar o processo de transformação dos minerais em metais e ligas. Além disso, cabe ao engenheiro metalúrgico buscar desenvolver novos materiais, explorando combinações de metais e elementos de liga para obter propriedades desejadas.

Outra atividade importante do engenheiro de materiais é na pesquisa e no desenvolvimento de novas tecnologias de extração de minerais, com foco na eficiência energética, na redução do impacto ambiental e na utilização de técnicas mais sustentáveis. Ademais, ele está envolvido na análise e controle de qualidade dos materiais produzidos, garantindo que atendam às especificações e requisitos de desempenho (MME, 2023).

A relação entre mineração e metalurgia é simbiótica, onde a mineração fornece as matérias-primas essenciais para a metalurgia, e esta, por sua vez, transforma essas matérias-primas em materiais valiosos e funcionais (MME, 2023). O engenheiro metalúrgico desempenha um papel central nesse processo, atuando como o elo entre ambos, garantindo a eficiência, a qualidade e o desenvolvimento contínuo de novos materiais metálicos que impulsionam avanços tecnológicos em várias indústrias.

3.2.1 Nióbio (Nb)

Descoberto no início do século XIX pelo químico inglês Charles Hatchett que o nomeou como colúmbio, apenas em 1844 que o mineralogista e químico Heinrich Rose conseguiu o isolar de sua matriz mineral e o renomeou como colúmbio de nióbio em homenagem ao rei Tântalo da mitologia grega, devido a ser comumente encontrado com o tântalo, porém para lidar com a duplicidade de nome a IUPAC definiu oficialmente sua nomenclatura como nióbio em 1950 (TARSELLI, 2015).

O número atômico do Nb é 41, inserido no grupo 5 da tabela periódica, ou seja, é considerado um metal de transição, possui propriedades de micro ligação e resistência à corrosão e devido a sua versatilidade, vantagens e disponibilidade vem tornando sua demanda maior anualmente, principalmente no setor siderúrgico na produção de ligas de aço (MME, 2010).

De acordo com o MCS de 2023, as reservas mundiais somam mais de 17 milhões de toneladas, tendo o Brasil aproximadamente 89% delas e em seguida o Canadá com 9%. De acordo com o AMB de 2022, o Brasil possui 3 minas de porte grande e a céu aberto, tendo 4 usinas grandes e 1 média e suas 3 principais produtoras são: CMOC, CBMM e a Mineração Taboca.

Atualmente, a empresa nacional CBMM é a principal produtora de Nb do mundo, com capacidade de produzir 150 mil toneladas de Fe-Nb por ano, principal produto comercializado. Em 2021, ela já possuía 324 projetos de inovações com o Nb. É a única que além de fornecer o Nb metálico, tem em seu portfólio mais 8 produtos: ferro-nióbio padrão, ferro-nióbio grau vácuo, níquel-nióbio grau vácuo, óxido de nióbio de alta pureza, óxido nióbio grau óptico, oxalato de nióbio grau óptico, óxido de nióbio amorfo e hidratado e óxido de nióbio grau bateria (CBMM, 2021).

3.2.2 Ligas Fe-Nb

Em torno de 85% a 90% da produção de Nb são utilizados para a indústria de aço em forma de FeNb devido ao Nb ter propriedades de formação de carbonetos e nitretos. Sua adição melhora propriedades desejáveis em aços inoxidáveis e previne sua corrosão intergranular. Para a produção de ferronióbio é utilizado o processo aluminotérmico, mesmo processo utilizado para produzir outras ligas especiais de Nb, como as ligas: níquel-nióbio, cobalto-nióbio e alumínio-nióbio (ECTERK, 2012)

Levando em consideração os dados apresentados por USGS e ANM, é possível observar o crescimento anual da produção brasileira de Nb, com exceção de eventos de crise globais, sendo que a produção beneficiada de produtos com nióbio em 2015 foi de 174.683 para 209.300 em 2021, um crescimento de aproximadamente 20%, mas o fator de aquecimento do mercado pós-pandemia é relevante para tal crescimento.

De acordo com o Relatório de Sustentabilidade 2021 da CBMM, a empresa tem capacidade de produzir 150 mil toneladas de FeNb, superando a demanda atual do mercado mundial, e no período pós-pandemia os setores siderúrgico e aeronáutico representou 68% do aumento da receita líquida da empresa.

Contudo, as questões socioambientais se tornam mais relevantes anualmente, fazendo que as empresas se adaptem a essas questões. De acordo com o relatório, a CBMM atualmente desenvolve projetos com a comunidade local, investe em infraestrutura e serviços, investe na redução na emissão de gases. Além disso, 100% da sua energia elétrica é proveniente de fontes renováveis, e são reaproveitados 96.4% da água utilizada. Entretanto, ao estudar sobre o impacto do ciclo de vida do FeNb, Dolganova *et al.*, (2019), avaliaram 7 categorias de impacto e obtiveram 3 fatores relevantes: o alumínio, eletricidade e produtos químicos, no processo de produção.

3.2.3 ARBL com Nb

Em meados de 1900 o aço de alta resistência, com adição de até 0.3% de carbono, foi desenvolvido para ter propriedades mecânicas balanceadas e mais resistentes que o aço comum, chegando a ser duas vezes mais resistente. Entre 1950 e 1960 surgem pesquisas desenvolvendo o aço HSLA, normalmente contendo menos de 0.15% de C, 1% de Mg, 0.1% de algum elemento para micro liga, menos de 0.6% de Si e 0.1% do elemento que irá auxiliar na moldagem (RASHID, 1980).

De acordo com o livro "Handbook of Residual Stress and Deformation"(p.86 do PDF), ao realizar experimentos sobre os efeitos que 27 elementos teriam na resistência a trincas por corrosão sob pressão, foram identificados 4 grupos e o Nb pertence ao grupo dos que melhoram a resistência. Entretanto, devido ao V ser inicialmente mais viável, somente a partir de 1988 verificou-se um uso mais relevante no Nb, saindo de aproximadamente 26% em 1978 para 75% em 1988, em aços microligados (DOLGANOVA *et al.*, 2019).

Com dados da World Steel desde de 1950, a produção de aço cru por milhões de toneladas saiu de 189 em 1950 para 1.951 em 2021, um crescimento superior a 900%, devido ao constante crescimento no seu uso em diversos setores. De modo complementar, os dados disponibilizados pelo Worls Stainless Steel, o aço inox teve sua produção em 58.3 milhões de toneladas em 2020, superando a produção de plástico, e com um crescimento anual de 5.8% desde 1950, superando outros metais como: alumínio (3.66%), cobre (2.54%), aço carbono (2.42%), zinco (2.01%) e chumbo (1.99%).

3.3 Estrutura de Mercado: produção, consumo e exportação de ligas metálicas

A estrutura de mercado das ligas metálicas envolve a produção, o consumo e a exportação desses materiais. Ela é influenciada por vários fatores, como a demanda global por metais, a disponibilidade de matérias-primas, os avanços tecnológicos e as políticas comerciais internacionais (ALVES, 2015).

A produção de ligas metálicas ocorre em várias partes do mundo, com países como China, Estados Unidos, Rússia, Japão e Alemanha liderando a produção (SILVEIRA E RESENDE, 2013). Esses países possuem grandes reservas minerais, infraestrutura industrial desenvolvida e expertise em metalurgia. A produção é realizada por empresas especializadas, que empregam tecnologias avançadas para obter ligas com propriedades específicas (SANTOS, 2017).

O consumo de ligas metálicas é impulsionado pelos inúmeros setores, anteriormente citados (automotivo, construção civil, aeroespacial, eletrônico, médico e energético). Cada setor tem requisitos específicos de desempenho e propriedades dos materiais, levando ao desenvolvimento de ligas customizadas. O consumo varia de acordo com a atividade econômica e o desenvolvimento industrial de cada país.

A exportação de ligas metálicas desempenha um papel importante na economia global. Países com produção excedente de ligas podem exportar para atender à demanda de outros países. As exportações são influenciadas por fatores como a qualidade do produto, a capacidade de produção, a competitividade dos preços, as barreiras comerciais e as políticas governamentais (SANTOS, 2017).

A competitividade na exportação de ligas metálicas depende da eficiência da cadeia de suprimentos, dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, da qualidade do produto e da capacidade de atender às exigências do mercado. Além disso, acordos comerciais e tarifas

podem afetar o comércio internacional de ligas metálicas, podendo favorecer ou prejudicar as exportações.

É importante destacar que a produção, o consumo e a exportação de ligas metálicas podem ser afetados por flutuações nos preços das matérias-primas, como minerais e metais básicos. A disponibilidade e os custos dessas matérias-primas podem impactar a produção e o comércio de ligas metálicas.

A pandemia de COVID-19 teve um impacto significativo na estrutura de mercado de ligas metálicas em todo o mundo. A crise sanitária afetou diversos setores econômicos e industriais, resultando em mudanças na produção, consumo e exportação desses materiais. Algumas das principais influências são:

Com a desaceleração econômica global, muitos setores consumidores de ligas metálicas, como o automotivo, aeroespacial e construção civil, foram impactados. A demanda por ligas metálicas diminuiu devido a restrições na produção, interrupção de cadeias de suprimentos e redução da atividade industrial. Isso levou a uma diminuição nas encomendas e no consumo desses materiais.

A pandemia resultou em interrupções na cadeia de suprimentos global. Restrições de viagens, fechamento de fronteiras e medidas de distanciamento social afetaram a produção e o transporte de ligas metálicas, resultando em atrasos e escassez de matérias-primas. Isso afetou tanto a produção interna quanto as exportações de ligas metálicas.

A pandemia causou volatilidade nos preços das matérias-primas, como minerais e metais básicos. As incertezas econômicas e a redução da demanda afetaram o mercado de commodities, resultando em variações nos preços dos metais utilizados na produção de ligas metálicas. Essas flutuações nos preços podem ter impactado a competitividade e os custos de produção das ligas metálicas.

Para mitigar os impactos da pandemia, muitas indústrias buscaram diversificar suas fontes de suprimento e reduzir sua dependência de determinadas regiões. Isso levou a uma reconfiguração das cadeias de suprimentos, com a busca por fornecedores alternativos de ligas metálicas em regiões mais próximas ou com menor impacto da pandemia. Essa reconfiguração pode ter consequências de longo prazo na estrutura de mercado das ligas metálicas.

A pandemia trouxe à tona a necessidade de maior resiliência e eficiência na indústria. Isso levou a um aumento dos investimentos em automação, digitalização e novas tecnologias na produção de ligas metálicas. A busca por processos mais eficientes, sustentáveis e adaptáveis pode resultar em mudanças na estrutura de mercado, com a adoção de novos métodos de produção e o desenvolvimento de ligas com propriedades aprimoradas.

3.4 Investimentos, tecnologia e inteligência artificial

O desenvolvimento de ligas metálicas está intimamente relacionado aos investimentos, tecnologia e inteligência artificial. Esses elementos desempenham um papel fundamental no avanço da metalurgia e na criação de ligas com propriedades aprimoradas.

Os investimentos públicos e privados desempenham intrínseco no desenvolvimento de ligas metálicas. Aportes financeiros aplicados são necessários para pesquisa, desenvolvimento e implementação de novas tecnologias e processos de produção. Os investimentos podem ser direcionados para a aquisição de equipamentos avançados, a contratação de especialistas em metalurgia e a realização de estudos experimentais (CBMM, 2021). Além disso, os investimentos em pesquisa permitem a descoberta de novos materiais e a exploração de combinações de elementos de liga para obter propriedades desejadas.

A tecnologia é um fator impulsionador do desenvolvimento de ligas metálicas. A metalurgia moderna se beneficia de avanços tecnológicos, como a modelagem computacional, simulações de processos, técnicas avançadas de caracterização e monitoramento em tempo real (MOTA et al., 2020). Essas tecnologias permitem uma compreensão mais profunda dos fenômenos que ocorrem durante a produção de ligas metálicas e auxiliam na otimização de parâmetros de processo. Além disso, tecnologias de análise e controle de qualidade ajudam a garantir a conformidade das ligas com as especificações exigidas (CBMM, 2021).

A inteligência artificial (IA) desempenha um papel crescente no desenvolvimento de ligas metálicas (MENEZES et al., 2022). A IA pode ser usada para analisar grandes volumes de dados e identificar padrões e relações complexas entre as variáveis de processo e as propriedades das ligas. Isso possibilita a descoberta de combinações de elementos de liga mais eficientes e o projeto de ligas com propriedades sob medida (MISRA E JANSTO, 2015). Além

disso, a IA pode ser aplicada no controle de qualidade, na detecção de falhas e no monitoramento de processos, auxiliando na melhoria contínua da produção de ligas metálicas.

A interação entre investimentos, tecnologia e inteligência artificial impulsiona o desenvolvimento de ligas metálicas em várias direções (SANTOS, 2017). Os investimentos permitem a implementação de tecnologias avançadas e a realização de pesquisas inovadoras. A tecnologia, por sua vez, possibilita a análise e o controle precisos dos processos de produção, bem como a otimização das propriedades das ligas. A inteligência artificial, ao incorporar

capacidades de aprendizado e análise de dados em larga escala, amplia o escopo de descoberta de novos materiais e melhoria de processos (MENEZES et al., 2022).

4 METODOLOGIA

Este estudo se trata de uma revisão integrativa de literatura. A metodologia adotada possui como fins objetivos sintetizar conhecimentos sobre um campo de estudo específico, realizando uma análise dos resultados e considerações obtidas de cada estudo adotado e posteriormente confeccionada uma conclusão. Possui como característica principal a diferenciação e colaboração de cada estudo entre si, adotando pontos de divergência e concordância quanto a semelhanças e diferenças (ZIMMER, 2006).

A execução segue um conjunto de etapas pré-estabelecidas: identificação da temática, formulação da questão problema; delineamento do objetivo da revisão; definição de critérios de inclusão e exclusão dos trabalhos para montagem da amostra; seleção das informações a serem extraídas dos artigos validados; avaliação dos estudos incluídos na revisão integrativa; interpretação e apresentação dos resultados da pesquisa.

4.1 Amostra de Pesquisa

Para montar a amostra deste trabalho foi elaborada uma questão norteadora: “quais as perspectivas do mercado de ligas metálicas com o nióbio no Brasil”. Em seguida o levantamento bibliográfico foi feito por meio das bases de dados Science Direct, na base de dados virtuais SciELO (Scientific Electronic Library) e do Google Acadêmico, no período de março de 2023 a maio de 2023.

Para os critérios de inclusão, na seleção de amostras, foram buscados e utilizados os artigos publicados no período de 2002 a 2021, em jornais e revistas nacionais e internacionais, encontrados na íntegra, nos idiomas: português e inglês, relacionados ao tema escolhido. Os descritores utilizados foram: “Ligas metálicas”, “Nióbio”, “Metalurgia”, “Mineração” e “Inteligência Artificial”. Esses cinco últimos foram escolhidos via a plataforma dos Descritores da Scielo. Também foram usados os operadores booleanos “and”, “and not” e “or”, para conectar os descritores dentro dos filtros de pesquisa de cada plataforma.

Foram utilizados como critérios de exclusão artigos que fugiam da temática proposta, ou que apenas se aproximavam do objetivo; artigos com acesso fechado/limitado; não encontrados na íntegra on-line; artigos que não mencionaram a atuação de um engenheiro metalúrgico e de materiais em alguma etapa na realização do problema abordado (ZIMMER, 2006). Foram excluídos textos incompletos, artigos publicados fora do período de 2013 a 2023

(10 anos), trabalhos que não se relacionavam com a pergunta norteadora, artigos indisponíveis para leitura e artigos repetidos nas três plataformas de busca.

No primeiro momento foram encontrados um total de 54 artigos de acordo com os descritores utilizados. Foram encontrados 23 artigos na plataforma Scielo, 17 artigos na plataforma Science Direct e 14 artigos na plataforma Google Acadêmico. Em seguida foram aplicadas as definições de inclusão e exclusão propostas, realizando após uma categorização em tabelas todos os artigos da amostra de acordo com: o título do artigo, autores, local do estudo, tipo de trabalho (classificação, modalidade, abordagem, idioma, instrumento de coleta de dados), periódicos/revistas e o ano do estudo.

Após a aplicação dos critérios de exclusão, a amostra final foi composta por 13 artigos que atenderam aos requisitos estabelecidos. Esses artigos foram minuciosamente analisados, utilizando-se uma abordagem qualitativa. Essa análise considerou diferentes aspectos relacionados à indústria, como aspectos econômicos, tecnológicos e ambientais.

Com objetivo de facilitar à visualização a figura 1 apresenta, através de um fluxograma as etapas que confeccionaram a amostra apresentada.

Figura 1 - Fluxograma da seleção amostral dos estudos incluídos na revisão integrativa.



Fonte: Próprio Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados encontrados durante o levantamento de pesquisa seguindo a metodologia já apresentada. As discussões dos resultados são encontradas posteriormente, a partir da subseção 5.4.

5.1 Artigos Selecionados

A Tabela 1 apresenta o agrupado de artigos que compuseram a amostra, onde cada coluna discrimina uma característica de identificação. Um destaque para essa amostra é que ela é composta quase sumariamente de artigos desenvolvidos por brasileiros e por tipo de pesquisa experimental.

Tabela 1 - Descrição da amostra (n = 13) quanto ao título, autores, ano, revista e tipo de estudo.

Artigo	Título	Autor(es)	Ano	Revista	Tipo de Estudo
1	Competição No Mercado Internacional De Nióbio: Um Estudo Econométrico	Silveira, Jáilson Weilly, Marcelo, Resende	E 2014	Jornal de Economia UFRJ	Exploratório
2	The Evolution Of The Niobium Production In Brazil	Alves, Adilson Rangel Aparecido Dos Reis, Coutinho	E 2015	Materials Research	Exploratório
3	Redução De Custo E Aumento De Vida Útil Em Caçambas De Carregadeiras Usando Aço De Alta Resistência Resistente Desgaste Microligados Nióbio	Rosa, Hugo Leandro Et Al	2016	Congresso anual da ABM	Estudo de caso

4	Nióbio: Caracterização E Análise Do Padrão De Concorrência Do Mercado Através Do Modelo CED Adaptado	Dos Santos, Lais Couto Et Al	2017	ENESEP	Estudo de caso
5	Potential Of Niobium Carbide Application As The Hard Phase In Cutting Tool Substrate	Montenegro, Paula Et Al	2018	International Journal of Refractory Metals and Hard Materials	Experimental
6	Synthesis And Characterization Of Niobium Carbide With Copper Addition Obtained Via Gas Solid Reaction	Souto, Maria Veronilda Macedo Et Al.	2018	Materials Research	Experimental
7	Obtenção De Revestimento Eletroquímico Da Liga Metálica Ni-Fe- Nb Com Resistência À Corrosão Por Eletr deposição	De Medeiros Filho, Francisco Carlos Et Al	2020	Brazilian Journal of Development	Experimental
8	Creating In-Situ Alloys By Welding — New Perspectives For Advanced Materials And Applications	Motta, Marcelo F. Et Al.	2020	Journal of Materials Research and Technology	Experimental
9	Avaliação Microestrutural De Ligas De Al Com Introdução De Nb	Dos Santos Marinho, Kelly; Abdalla, Antonio Jorge	2020	Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo	Experimental
10	Machine Learning- Driven Development Of Niobium- Containing Optical Glasses	Menezes, Andreia Duarte Et Al	2022	Research, Society and Development	Experimental

11	Comportamento Eletroquímico De Ligas De Ti-Mo-Nb As-Cast Para Aplicações Biomédicas	Beraldo, Bianca De Cássia Cardoso Et Al	2022	Congresso Brasileiro de Ciências e Saberes Multidisciplinares	Estudo de caso
12	Ligas Avançadas Ferrosas Resistente A Corrosão E Desgaste A Partir Do Gusa	Martins, Caio Lucas Gueiros Pedrosa Et Al	2022	INOXCORR	Experimental
13	Effect Of The Ti/Ta Ratio On The Feasibility Of Porous Ti25+X-Nb25-Zr25-Ta25-X (X= 0, 5, And 10) Alloys For Biomedical Applications	Al Hawajreh, G. Et Al.	2023	Journal of Materials Research and Technology	Experimental

Fonte: Próprio Autor.

5.2 Descritores por Objetivos e Conclusões

A Tabela 2 apresenta um refinamento dos dados mostrados na tabela 1, onde são apresentados os objetivos e as conclusões de cada artigo da amostra. Pode-se notar que, embora apresentem objetivos distintos e que possam se encaixar em categorias específicas, as quais serão abordadas posteriormente, todos enfocam os eixos temáticos dos objetivos deste trabalho e dos descritores escolhidos para montar a presente amostra.

Tabela 2 - Descrição da amostra (n = 13) quanto aos objetivos e conclusões

Artigo	Objetivo	Conclusões
1	Explicar o comportamento dos preços internacionais com curva de demanda quebrada;	<ul style="list-style-type: none"> • FeNb principal produto comercializado; • participação brasileira no mercado em 2004 era de 90% e em 2010 foi de 96%; • aproximadamente 90% da produção orientada para FeNb; • CBMM supre o mercado interno com menos de 10% da produção; • em 2010 a exportação rendeu US\$ 1,5 bilhão e em 2011 US\$ 1,84 bilhão; • principais importadores em 2011: <ul style="list-style-type: none"> ○ Países Baixos (30%);

-
- China (21%);
 - Singapura (15%);
 - Estados Unidos (14%);
 - Japão (9%);
 - nos EUA, entre 2002 a 2008 90% das importações era brasileira e 5% Canadá e 85% e 13% em 2009 a 2013;
 - O Brasil tem poder de mercado no mercado de Nb, mas os preços vêm mostrando estabilidade;
 - Canadá não possui poder de mercado, apenas tomadora de preço.

2 Estudar a evolução da produção do nióbio no Brasil e as principais aplicações na indústria e na tecnologia

- óxido de nióbio:
 - principais propriedades: alto índice de refração e na constante dielétrica e aumento na transmissão de luz;
 - aplicações: lentes de câmeras, revestimento de monitores, manufatura de niobato de lítio para superfícies acústicas;
- carboneto de nióbio:
 - principais propriedades: deformação a alta temperatura e controle da granulação;
 - aplicações: composição em ferramentas de cortes;
- pó de nióbio:
 - principais propriedades: constante dielétrica alta e estabilidade do dielétrico de óxido;
 - aplicações: capacitores para circuitos elétricos;
- nióbio metálico:
 - principais propriedades: resistente a corrosão;
 - aplicações: equipamentos de processos químicos;
- ferro-nióbio:
 - principais propriedades: redução de peso e aumento na resistência;
 - aplicações: aço inoxidável e ligas de aço
- ligas de nióbio com titânio ou estanho:
 - principais propriedades: baixa resistência elétrica dos fios em baixas temperaturas;
 - aplicações: bobinas magnéticas supercondutoras para ressonância magnética.

3	Estudo de caso sobre os benefícios na substituição de duas caçambas com nióbio	<ul style="list-style-type: none"> ● caçamba para FeNb: <ul style="list-style-type: none"> ○ redução de 25% do peso; ○ aumento de 21% do volume; ○ eliminou a deformação causada por altas temperaturas; ○ aumentou a vida útil em 190%; ○ redução do investimento por hora trabalhada, saindo de US\$ 4,70/h para US\$ 2,30/h; ○ aumentou o custo para produzir a caçamba em 40%; ○ são necessárias 800 horas de trabalho para pagar o investimento; ● caçamba para minério de nióbio: <ul style="list-style-type: none"> ○ redução de 14% do peso; ○ eliminação do desgaste e fissuras após 11 mil horas de trabalho; ○ aumentou a carga útil em 4,7%; ○ redução de 7% para produzir a caçamba.
4	Apresentar as características do mercado de nióbio no Brasil e o padrão de concorrência usando o modelo Capacitação - Estratégia - Desempenho adaptado (CEDa)	<ul style="list-style-type: none"> ● Em 2008, para contornar a crise mundial a CBMM exerceu seu poder de mercado para controlar a disponibilidade do minério no mercado e controlar o preço, enquanto a Anglo American precisou cortar custos e aprimorar processos e ambas investiram na diversificação de mercado; ● Brasil importa nióbio metálico e pode ser uma fragilidade; ● Nb tem forte dependência do mercado de aço.
5	Avaliar as características da ferramenta de corte feito com carboneto de nióbio	<ul style="list-style-type: none"> ● Ferramenta de corte: <ul style="list-style-type: none"> ○ Microestrutura da ferramenta feita com o carboneto de nióbio apresenta alto índice de descontinuidade, caracterizado por porosidade; ○ Análise de revestimento demonstrou baixa adesão interfacial entre o revestimento e o substrato; ○ Fio de corte do Nb se mostrou pior que o do Tungstênio; ● Desgaste: <ul style="list-style-type: none"> ○ Em todas as velocidades o Tungstênio foi superior; ○ Surgimento de substratos entre as fissuras no Nb; ● Nb maior desgaste que o Tungstênio.
6	Avaliar os efeitos da adição de cobre no carboneto de nióbio	<ul style="list-style-type: none"> ● foi possível obter o carboneto de nióbio com cobre de forma eficiente sem fases de oxidação.

- | | | |
|----|---|--|
| 7 | Obter revestimentos de Ni-Fe-Nb por eletrodeposição e caracterizá-los quanto às propriedades de resistência à corrosão. | <ul style="list-style-type: none"> ● Mais suscetível a corrosão devido à maior presença de ferro. |
| 8 | Discutir aplicações de onde a produção <i>in-situ</i> de ligas usando solda TIG foi um sucesso | <ul style="list-style-type: none"> ● É possível produzir ligas <i>in-situ</i> para situações específicas usando TIG; ● Usando TIG e mapeando as combinações de materiais e suas propriedades, é possível produzir a melhor liga pra situação usando elementos comerciais, ampliando a gama de possibilidades. |
| 9 | Analisar a microestrutura das ligas de alumínio, simulando ligas provenientes de sucata (contaminada por ferro), modificada pela introdução de nióbio | <ul style="list-style-type: none"> ● Menor redução no tamanho do grão foi observado com acréscimo de 0,05% de Nb e sem reduções para valores maiores; ● Pouca elevação na dureza. |
| 10 | Analisar um novo vidro óptico usando nióbio que foi apresentado por uma IA (GLAS) e comparar com o principal concorrente, óxido de lantânio | <ul style="list-style-type: none"> ● Óxido de lantânio é inferior ao óxido de nióbio para obter alto índice de refração, menos resistente a cristalização que ocorre durante o resfriamento; ● O vidro resultante da substituição do óxido de Nb pelo óxido de La, na mesma proporção mol, é mais escuro e possui pontos de cristalização; ● Diferente do óxido de Nb, o óxido de La é higroscópico e precisa de tratamento de calcinação; ● Para a mesma quantidade de mol, o óxido de Nb é superior para aprimorar o índice de refração; ● Os resultados medidos foram bem próximos aos apresentados pelo GLAS; ● Possibilidade de desenvolver novas estratégias usando a IA para eliminar etapas laborais; ● Mais estudos se fazem necessários para obter um vidro transparente usando Nb. |
| 11 | Avaliar a resistência à corrosão de ligas experimentais de Ti-Mo-Nb as-cast para aplicações biomédicas | <ul style="list-style-type: none"> ● Liga Ti-12Mo-13Nb apresenta resistência à polarização superior e potencial de corrosão e de pite levemente maiores que Ti-12Mo-3Nb e Ti-12Mo-8Nb; ● Maior quantidade de Nb em Ti-12Mo-Nb melhorou o desempenho nos ensaios eletroquímicos em solução ringer; |

		<ul style="list-style-type: none"> ● Considerar Ti-12Mo-13Nb as-cast como substituto para ligas que possuam elementos citotóxicas.
12	Desenvolver um vidro metálico com elevada resistência à corrosão e ao desgaste a partir do ferro-gusa	<ul style="list-style-type: none"> ● Desenvolvimento de uma liga ferrosa ligada ao cromo, Fe68Cr8Nb4Mo4(C,B)22, não-cristalina, boa tendência para formação de vidro, apresenta boa resistência mecânica, à corrosão e ao desgaste.
13	Estudar os efeitos na proporção de ti/Ta na microestrutura, mecânica, eletroquímica e liberação de íon no sistema TNZT	<ul style="list-style-type: none"> ● Das ligas avaliadas, as ligas Ti30-Nb25-Zr25-Ta20 e Ti35-Nb25-Zr25-Ta15 se mostraram candidatos viáveis para implantes biomédicos; ● Ligas de TNZT apresentaram uma dureza maior que o osso humano e módulo de elasticidade aproximadamente 3 vezes maiores que o fêmur humano, porém menor que implantes de liga de Ti; ● A taxa de corrosão pode ser considerada estável; ● A liga com menor quantidade de Ti e maior de Ta apresentou corrosão local, portanto menor viabilidade para usos em implantes; ● A liberação de íons foi abaixo do nível que coloca a saúde das pessoas e animais em risco.

Fonte: Próprio Autor.

5.3 Categorização da Amostra

Como esperado, nota-se pelos dados obtidos e apresentados nas tabelas 1 e 2, a presença de diferentes objetivos e tipos de pesquisa dos artigos, que era necessário fazer uma diferenciação de abordagens. Assim, foi realizada uma categorização dessas abordagens de acordo com a autoria e ano. Três categorias foram identificadas e são apresentadas na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 - Categorização de abordagens por autorias e ano

Categorias	Autor(es) e Ano
Mercado	<ul style="list-style-type: none"> ● Jáilson Weilly Silveira e Marcelo Resende (2014); ● Lais Couto dos Santos et al (2017).
Produção	<ul style="list-style-type: none"> ● Adilson Rangel Alves e Aparecido dos Reis Coutinho (2015); ● Hugo Leandro Rosa et al (2016); ● Maria Veronilda Macedo Souto et al (2018); ● Francisco Carlos de Medeiros Filho et al (2020);

	<ul style="list-style-type: none"> ● Marcelo F. Motta et al (2020); ● Kelly dos Santos Marinho e Antonio Jorge Abdalla (2020); ● Andreia Duarte Menezes et al (2022) ● Bianca de Cássia Cardoso Beraldo et al (2022); ● Caio Lucas Gueiros Pedrosa Martins et al (2022); ● G. Al Hawajreh et al (2023).
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> ● Hugo Leandro Rosa et al (2016); ● Paula Montenegro et al (2017); ● Andreia Duarte Menezes et al (2022); ● Bianca de Cássia Cardoso Beraldo et al (2022); ● Caio Lucas Gueiros Pedrosa Martins et al (2022); ● G. Al Hawajreh et al (2023)

Fonte: Próprio Autor.

Após a análise das tabelas 1, 2 e 3, foi elaborada uma discussão sobre os assuntos dos trabalhos, avaliadas todas as metodologias, os resultados encontrados e as conclusões. Foi estabelecido um paralelo sobre como esses trabalhos se relacionaram entre si ao longo do período avaliado e como eles oferecem condições para compreender o momento atual dentro do contexto das ligas metálicas.

5.4 Discussões: Categoria Mercado

Desde 1933 o nióbio é usado em conjunto com o aço, inicialmente para estabilizar o aço inoxidável contra corrosão, mas na medida que novas propriedades foram descobertas, como sua capacidade de micro ligação, sua demanda cresceu anualmente. O Brasil, tendo mais de 90% das reservas mundiais, é o principal player no cenário internacional.

O estudo realizado por Alves e Coutinho (2015) relatou que a demanda cresceu 10% entre 2000 e 2010 e isso corrobora com a análise de Silveira e Resende (2014) sobre dados entre 2002 e 2012, apesar deste mesmo estudo ter revelado que, nesse período houve uma queda da participação do Brasil no mercado estadunidense em torno de 5%, ficando em 85%. Ademais, o estudo relatou como o Brasil, com o seu poder de mercado, através da disponibilidade, pode influenciar o preço, enquanto outras empresas são apenas tomadoras de preço.

Fazendo uma análise dos dados entre 2016 e 2022 disponibilizados pela Agência Nacional de Mineração (ANM) do governo brasileiro, o Brasil exportou uma média de 170.541 toneladas de nióbio beneficiado, obtendo aproximadamente uma média de R\$ 764 milhões. Já

a exportação dos bens a base de nióbio obteve uma média de R\$ 1,7 bilhão. Entretanto, o endurecimento da política chinesa para produtos importados provocou uma queda de 5% na demanda entre 2013 a 2016 como relatado por Santos, (2017) acarretando em menores valores para a exportação brasileira em 2016, totalizando R\$ 602 milhões para a beneficiada e um pouco mais de R\$1,4 bilhão para a exportação de bens. A pandemia da COVID-19 foi outro fator determinante na queda brusca, principalmente da exportação de bens derivados do nióbio, que obteve em 2019 mais de R\$ 2,2 bilhões e quase R\$ 1,5 bilhão no ano seguinte.

Dados colhidos nos MCS's e disponibilizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), apontam que nos EUA entre 2012 e 2023, a média das importações foi de US\$ 412 milhões e tendo o ápice de US\$ 500 milhões nos anos de 2013 e 2014, entretanto, pode-se observar uma diminuição de US\$ 100 milhões entre 2014 e 2015 e chegando a um valor de US\$ 290 milhões em 2017, superando apenas em US\$ 10 milhões ao menor valor que foi obtido em 2020.

Entre os anos 2000 e 2023 ocorreram 4 eventos que afetaram todo o mercado internacional: 1) Crise de 2008; 2) Recessão na Europa; 3) Política chinesa mais rígida, que em 2010 importou 25% da produção mundial de Nb segundo Alves e Coutinho (2015); 4) Pandemia da COVID-19, que segundo A USGS provocou uma diminuição de 35% da exportação brasileira nos 9 primeiros meses de 2020.

Ao analisar os artigos, é possível identificar os desafios e oportunidades relacionados ao mercado de nióbio, os quais podem ser traduzidos em uma abordagem SWOT (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças, ou FOFA, em português). Nesse contexto, observa-se que há poucas ameaças que afetam diretamente o mercado de nióbio, o que direciona a atenção para o mercado de aço, que é a principal aplicação desse minério.

A Tabela 4 apresenta a análise pela abordagem FOFA.

Tabela 4 - Tabela FOFA para o Mercado de Nb Brasileiro

Forças:	Fraquezas:
<ul style="list-style-type: none"> Mais de 90% da reserva mundial; Aproximadamente 90% da produção mundial; 	<ul style="list-style-type: none"> Uma pequena quantidade de importação para produção de nióbio metálico
Oportunidades	Ameaças
Oportunidades: <ul style="list-style-type: none"> Novas formas de produção estão constantemente incentivando o consumo; O uso do Nb e suas aplicações está sempre se ampliando; 	Ameaças: <ul style="list-style-type: none"> Dependência do mercado de aço; Não sofre influência do PIB dos importadores, mas o posicionamento de stakeholders importantes, como a

-
- No setor de energia há uma previsão sobre o aumento do consumo de gás natural até 2035, já tendo um aumento de 20% nos países da OCDE e 68% nos que não fazem parte.
 - china, pode influenciar o mercado geral e do Nb;
 - Não há substitutos perfeitos, pois são mais caros e precisam de maiores quantidades, entretanto, eventuais quedas dos preços ainda podem afetar o mercado, como em 2020 com queda do preço do V
-

Fonte: Próprio autor

Por fim, Santos (2017) relata qual foi a reação das duas principais empresas diante de alguns desses eventos que afetaram o mercado e suas estratégias para ampliar a lucratividade. De acordo com a autora, a CBMM detém uma participação de 61% na produção nacional de nióbio e é o principal player internacional nesse mercado. A empresa possui poder de mercado para controlar o preço do nióbio, mas adota uma estratégia de manter o preço estável e baixo, visando desencorajar o uso de substitutos. Além disso, a CBMM vendeu 30% de seu patrimônio como parte de suas iniciativas para melhorar sua lucratividade. A empresa também busca otimizar seus processos e investe em inovações relacionadas ao nióbio, como a implementação de novas caçambas e a capacitação de seus funcionários e aprimoramento da estrutura organizacional. Na época, a Anglo American buscou cortar gastos, investir na capacitação dos funcionários, tornar os processos mais eficientes, além de realizar projetos em conjunto com a população local e de reaproveitamento de recursos, tendo chegado a um reaproveitamento de 85% da água usada.

5.5 Discussões: Categoria Produção

De acordo com os dados do AMB de 2016 a 2022, foram extraídas em média 23.57 milhões de toneladas do minério, contendo em média 160.738 mil toneladas de Nb, resultando em uma produção beneficiada média de 170.837 mil toneladas com um teor médio de 52.17%. Entre 2015 e 2022 a produção beneficiada cresceu em 19%, entretanto, houve uma queda em 2016 e na pandemia, sendo 2016 a menor extração, 17.7 milhões de toneladas, e produção, 142.79 mil toneladas.

Contudo, os dados apresentados pelo AMB são dados quantitativos e gerais, ao contrário dos dados apresentados pelo MCS, que são específicos de um minério e eventos que impactaram no mercado e na produção, como a participação nacional na produção global, que

vem sendo mantida em 90% na média, usando os dados dos MCS's de 2020 a 2023. Para analisar o período da pandemia, foi elaborada a Tabela 5, apresentada a seguir:

Tabela 5 - Eventos-chave/ano para o Nióbio

Ano	Eventos
2019	Em 2018 a China começou a implantar normas mais rígidas nas armações de aço, junto com a substituição do vanádio por nióbio devido à maior disponibilidade e estabilidade nos preços, ocasionou em um aumento de 50% na importação em 2019, criando expectativas de aumentar a exportação e produção e fazendo a principal empresa nacional investir US\$ 200 milhões para aumentar a produção de FeNb em 50% até 2020
2020	As principais fabricantes de aeronaves diminuiram o consumo de Nb na produção de superligas e a COVID-19 afetou a indústria do aço, diminuindo o consumo de Nb consecutivamente. Durante os 9 primeiros meses a China aumentou em 700% a importação de V devido a uma queda nos preços e diminuiu em 36% a de Nb, alertando os produtores, nesse mesmo período o Brasil teve uma queda de 35% na exportação de FeNb, anunciando que o projeto de aumentar a produção até 2020 será estendida até 2021
2021	Os países começam a se recuperar da pandemia, aumentando em 31% a exportação brasileira, exportando principalmente para China, Países Baixos e Coreia do Sul. Anunciado a conclusão da capacitação para aumentar em 50% a produção e mais duas novas empresas anunciam projetos para aumentar a produção
2022	O Brasil teve uma queda de 6% na exportação e ao invés da Coreia teve China, Países Baixos e Singapura como principais clientes. Houve um anúncio de um investimento de US\$ 1,7 bilhão para duplicar o volume de vendas até 2030

Fonte: Próprio autor

Alves e Coutinho (2015) pontuaram que o uso de FeNb para produzir ARBL e superligas, impulsionou a produção, fazendo-a crescer 5,0 vezes entre 1965 e 1995; 4,5 entre 1995 e 2005 e 1,3 entre 2005 e 2010. Ao analisar os dados da AMB e MCS, através de investimentos na capacitação e inovações, percebeu-se que essa produção continuou crescendo. Usando o COMEX STAT com o código 72029300 da Nomenclatura Comum do Mercosul para o FeNb para relacionar essa produção com a quantidade exportada entre janeiro de 2005 a março de 2023 obtiveram-se os seguintes dados, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Relação exportação por carga demandada por período

Período	Quantidade Total	Exportada	Varição entre o início e o fim do período (%)
2005 - 2010	367.982.573		+29,56
2011 - 2015	344.546.373		-2,04
2015 - 2020	417.616.516		+9,47

5.6 Discussões: Categoria Aplicações

Desde o início, o principal uso do Nb foi para melhorar o aço contra corrosão e posteriormente para melhorar as ligas através da sua propriedade de micro ligação, tornando o FeNb o principal produto comercializado e constantemente substituindo seus concorrentes como o V ou Ta.

Durante a pesquisa foram observados majoritariamente dois tipos de estudos, abordando novas aplicações ou formas mais eficientes de produção. Em relação às aplicações, foram analisadas as informações disponíveis nos portais da CBMM e da CMOC, onde há uma explicação sobre as propriedades do minério e como sua aplicação está trazendo inovações nos segmentos de mobilidade, infraestrutura e energia, além de alguns exemplos de aplicação, informações que foram condensadas e agregadas aos resultados obtidos durante a pesquisa, resultando na Tabela 7, apresentada a seguir:

Tabela 7 - Relação Produto x Aplicação

Produto	Aplicação
FeNb	<ul style="list-style-type: none"> • Pontes • Viadutos • Gasodutos • Carrocerias de automóveis e navios
Ligas de grau vácuo	<ul style="list-style-type: none"> • Motores de foguete e aviões • Turbinas terrestres de geração de energia
Óxido de Nb	<ul style="list-style-type: none"> • Telescópios • Lentes para câmeras de segurança • Baterias • Capacitores ceramicos • Catalisadores • Revestimento acústico
Nb metálico	<ul style="list-style-type: none"> • Produzir máquinas de ressonância magnética e tomógrafos • Acelerador de Partículas • Máquinas de processamento químico
Carboneto de Nb	<ul style="list-style-type: none"> • Ferramentas de corte • Revestimentos resistente ao desgaste • Catalisadores
Liga com Ti	<ul style="list-style-type: none"> • Implantes médicos • Bobinas magnéticas

Pó de Nb

- Nano estruturas, possibilidade de produzir computadores quânticos
- Capacitores

Fonte: Próprio autor

Quanto à produção, podemos citar relevantes estudos de autores como Marinho *et al*, (2020) que tenta simular o reaproveitamento de sucatas de ligas de Al para diminuir o custo de produção da liga de AlNb; Martins *et al*, (2022) que estudou a viabilidade de produzir ligas ferrosas através de ferro-gusa; Motta e Resende, (2020) que estudou a viabilidade de usar solda TIG para produzir ligas de aplicações específicas usando materiais mais fáceis de encontrar no mercado; Souto *et al*, (2018) que buscou uma forma mais eficiente de produzir ligas NbC com adição de Cu, conseguindo produzir sem fase de oxidação, precisando de menor temperatura e tempo mais hábil; e apesar do estudo de Hawajreh *et al*, (2023) não tratar da produção de uma liga, sua pesquisa sobre a proporção de Ti/Ta na liga Ti-Nb-Zr-Ta tem relevância devido ao uso em biomedicina, e esta ser uma área promissora e com possibilidade de expansão, pois os implantes de Nb não apresentam grande rejeição e não são citotóxicos.

Por fim, mas não menos relevante, podemos citar o estudo realizado por Menezes *et al*, (2022) para produzir vidros usando IA, que demonstrou que os dados apresentados pelo GLAS foram próximos dos obtidos na prática, mas principalmente, a oportunidade de futuramente utilizar IA's para otimizar fases laborais.

6 CONCLUSÃO

O Brasil possui quase o monopólio das reservas mundiais de Nb: detém em média 90% da produção mundial, possui a única mina a céu aberto do mundo, é referência em investimentos e inovações com o Nb e o uso do Nb nos segmentos de mobilidade, infraestrutura, petrolífero, energia e medicina vem constantemente se tornando mais comum. Portanto, o Brasil possui o privilégio de ditar o fluxo de um mercado em constante expansão e com poucos concorrentes na produção de Nb. Entretanto, o país ainda exporta majoritariamente produtos semimanufaturados, diminuindo possíveis ganhos com produtos de maior valor agregado que são os manufaturados.

Apesar de não haver concorrentes fortes contra o Brasil e o mesmo ser quem define os preços, foi observado que o Brasil ainda possui a “fraqueza” de importar uma pequena quantidade de Nb para produzir Nb metálico. Quanto aos fatores externos, apenas uma eventual queda de preço de seus substitutos ou, principalmente, qualquer fator que atinja o mercado de aço pode afetar negativamente o nióbio brasileiro.

Por fim, normalmente há dois desafios quando se trata do Nb e seus produtos: 1) Explorar novas aplicações e suas limitações; e 2) Conseguir formas mais eficientes de produção do Nb e seus produtos. Porém, foi observada uma área na intersecção desses problemas que está começando a ser explorada e possui um potencial de mudar o mercado: IAs, pois com o uso de algoritmos de aprendizado de máquina e bancos de dados com grandes volumes de dados pode-se produzir novas ligas e produtos de uso geral ou específico e otimizar a produção diminuindo fases laborais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, D. Monopólio brasileiro do nióbio gera cobiça mundial, controvérsia e mitos. Disponível em: Acesso em 02 nov 2018 ALVES, A. R.; COUTINHO, A. DOS R. The evolution of the niobium production in Brazil. *Materials Research*, v. 18, n. 1, p. 106–112, 2015.
- ALVES, A. R.; COUTINHO, A. DOS R. The evolution of the niobium production in Brazil. *Materials Research*, v. 18, n. 1, p. 106–112, 2015.
- AYANDA, O.S. e ADEKOLA, F.A. A review of niobium-tantalum separation in hydrometallurgy. *Journal of Minerals & Materials Characterization & engineering*, v. 10, p. 245-256, 2011.
- BERALDO, Bianca de Cássia Cardoso et al. Comportamento eletroquímico de ligas de Ti-Mo-Nb as-cast para aplicações biomédicas. In: **Congresso Brasileiro de Ciências e Saberes Multidisciplinares**. v. 1, p. 1-9, 2022.
- CBMM. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração. Usos e usuários finais de nióbio. Disponível em Acessado em: 03 abr. 2023.
- COUTINHO, Maycol Moreira (2018). Correlação entre as propriedades mecânicas e microestruturais da liga Al0,4%Nb em diferentes condições de solidificação. Dissertação de Mestrado em Integridade de materiais da engenharia, Publicação 055A/2018, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, v. 2, p. 89, 2018.
- GHATEI KALASHAMI, A. et al. The effect of Nb on texture evolutions of the ultrafine grained dual-phase steels fabricated by cold rolling and intercritical annealing.[s.l.] ElsevierLtd, v. 694, 2017.
- GÜNDÜZ, S. et al. Effect of the addition of niobium and aluminium on the microstructures and mechanical properties of micro-alloyed pm steels. *Materiali in Tehnologije*, v. 50, n. 5, p. 641–648, 2016.
- HAWAJREH, G. Al; GONZALEZ, G.; ROMERO-RESENDIZ, L.; VIDILLI, A.; OTANI, L.B.; AMIGÓ, V.. Effect of the Ti/Ta ratio on the feasibility of porous Ti_{25+x}-Nb₂₅-Zr₂₅-Ta_{25-x} (X= 0, 5, and 10) alloys for biomedical applications. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 24, p. 4364-4378, maio 2023.
- JESUS FILHO, E. S.; JESUS, E. R. B; ROSSI, J. L.; SALGADO, L.; COLOSIO, M. A.; SANTOS. Assentos de Válvula Sintetizados – Avaliação da Usinabilidade e Desgaste. In: XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECI Mat, 17, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu-PR. p. 7358-7368, 2006.
- LEITE, R.C.C.; COMIN, A.; MACHADO JUNIOR, D.L.; PEREIRA, E.S.; MITLAG, H. e QUEIROZ, S.R. Nióbio, uma conquista nacional. São Paulo: Duas Cidades, 1988.
- MARINHO, Kelly dos Santos; ABDALLA, Antonio Jorge. Avaliação microestrutural de ligas de Al com introdução de Nb. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, [S.L.], v. 39, n. 2, p. 204, 27 ago. 2020.

MARTINS, Caio Lucas Gueiros Pedrosa et al. Ligas avançadas ferrosas resistente a corrosão e desgaste a partir da gusa. 2022.

MEDEIROS FILHO, Francisco Carlos de; RAMOS, Jaqueline Ferreira; SILVA, Ana Priscila de Souza; ARAÚJO, Ana Maria de Souza; DANTAS, Lorena Vanessa Medeiros; FERREIRA, Breno do Nascimento; RAMOS, Júlia Daniela Ferreira; SILVA, Paulo Sérgio Gomes da. OBTENÇÃO DE REVESTIMENTO ELETROQUÍMICO DA LIGA METÁLICA NI-FE-NB COM RESISTÊNCIA À CORROSÃO POR ELETRODEPOSIÇÃO / ELECTRICAL COATING OBTAINMENT OF NI-FE-NB METALLIC LINE WITH RESISTANCE TO ELECTRICAL CORROSION. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 10, p. 78007-78016, 2020.

MENDES, M. W. D. Obtenção de pós de nb a partir da redução alumino térmica com ignição por plasma. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

MENEZES, A. D.; TEIXEIRA, E. P.; FINZER, J. R. D.; OLIVEIRA, R. B. de. Desenvolvimento de vidros óticos contendo nióbio por machine learning. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 9, p. e13811931290, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i9.31290. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/31290>. Acesso em: 15 maio. 2023.

MISRA, D.; JANSTO, S. G. Niobium in Heavy and Medium Sections for High – Rise Structures. Proceedings of the Value-Added Niobium Microalloyed Construction Steels Symposium CBMM and TMS, 2015.

MONTENEGRO, Paula; GOMES, Jefferson; REGO, Ronnie; BORILLE, Anderson. Potential of niobium carbide application as the hard phase in cutting tool substrate. **International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials**, [S.L.], v. 70, p. 116-123, jan. 2018.

MOTTA, F. P. Propriedades de revestimentos de nióbio obtidos por aspersão térmica a plasma sobre aço API 5L X65. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 53, p. 1689– 1699, 2013.

MOTTA, Marcelo F.; SANTIAGO, Kamilla G.; PESSOA, Edson F.; RODRIGUES, Ana C.; FERNANDES, Igor P.; MIRANDA, Hélio C. de; SILVA, Cleiton C.. Creating in-situ alloys by welding — new perspectives for advanced materials and applications. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 6950-6956, maio 2020.

OLIVEIRA, T. F. DE. A influência do tratamento térmico em óxidos mistos de nióbio e tântalo nano estruturados a partir da columbita. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

ROSA, Hugo Leandro et al. REDUÇÃO DE CUSTO E AUMENTO DE VIDA ÚTIL EM CAÇAMBAS DE CARREGADEIRAS USANDO AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E RESISTENTE AO DESGASTE MICRO LIGADOS AO NIÓBIO. v. 695, p. 2923–2929, 2020.

RUAN, Y. et al. Rapid eutectic growth and applied performances of Fe[sbnd]Al[sbnd]Nb alloy solidified under electromagnetic levitation condition. *Materia Isand Design*, v. 112, p. 239–245, 2016.

SANTOS, Lais Couto et al. Nióbio: caracterização e análise do padrão de concorrência do mercado através do modelo CED adaptado. 2017.

SILVA, J. I. S. Caracterização Microestrutural e Mecânica de Ligas Diluídas de AlumínioNióbio (Al-Nb). Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, Publicação 52A/2017, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 89p. 2017.

SILVEIRA, Jáilson Weilly; RESENDE, Marcelo. Competição no mercado internacional de nióbio: Um estudo econométrico. **Rio de Janeiro, UFRJ**, 2013.

SOUTO, Maria Veronilda Macedo et al. Synthesis and characterization of niobium carbide with copper addition obtained via gas solid reaction. **Materials Research**, v. 21, 2018.

WANG, C. et al. Microstructure evolutions of Ni-Ti-Nb-Al alloys with different Al addition. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 695, p. 2923–2929, 2017.

WANG, X. L.; ZHANG, K. F. Mechanical alloying, microstructure and properties of Nb16Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 490, n. 1–2, p. 677–683, 2010.

YILDIRIM, M.; AKDENIZ, M. V.; MEKHRABOV, A. O. Microstructural evolution and room-temperature mechanical properties of as-cast and heat-treated Fe50Al50-nNb alloys (n=1, 3, 5, 7, and 9 at%). *Materials Science and Engineering A*, v. 664, p. 17–25, 2016.

YILDIRIM, M.; AKDENIZ, M. V.; MEKHRABOV, A. O. Microstructural evolution and room-temperature mechanical properties of as-cast and heat-treated Fe50Al50-nNb alloys (n=1, 3, 5, 7, and 9 at%). *Materials Science and Engineering A*, v. 664, p. 17–25, 2016.

ZIMMER, Lila. **Qualitative meta-synthesis: a question of dialoguing with texts**. University of Northern British Columbia – 2006.