

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**Prospecção e avaliação de viabilidade de três ligas de aço
inoxidável para aplicação em componentes de sistemas
hidrelétricos**

FELIPE ROSA FURLAN

SÃO CARLOS-SP
2025

FELIPE ROSA FURLAN

**Prospecção e avaliação de viabilidade de três ligas de aço
inoxidável para aplicação em componentes de sistemas
hidrelétricos**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia de Materiais da
Universidade Federal de São Carlos,
como requisito para obtenção do título
de bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dra. Danielle Cristina
Camilo Magalhães

São Carlos-SP

2025



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Felipe Rosa Furlan

RA: 759009

TÍTULO: Estudo da viabilidade de três ligas de aço inoxidável para aplicação em componentes de sistemas hidrelétricos

ORIENTADORA: Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães

DATA/HORÁRIO: 11/07/2025, 9h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães	10,0	10,0
Prof. Dr. José Eduardo Spinelli	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

BANCA – ASSINATURAS:

Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIELLE CRISTINA CAMILO MAGALHAES
Data: 11/07/2025 09:44:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Eduardo Spinelli

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE EDUARDO SPINELLI
Data: 11/07/2025 09:50:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos e todas que, assim como eu, acreditam que cada pequena ação pode contribuir para tornar o mundo um lugar melhor.

Também dedico a todas as pessoas que, ao longo da minha vida, confiaram no meu potencial, me incentivaram a seguir em frente e compartilharam, de alguma forma, experiências e conhecimento — colaborando com a minha trajetória.

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, ao Pedro, meu irmão, à Priscila, minha cunhada que considero como irmã, e aos meus avós, alguns dos quais *in memoriam*. Por sempre terem sido a minha base.

Agradeço à Beatriz por todo amor, carinho, dedicação, por sempre acreditar em meu potencial, mesmo quando eu mesmo duvidei e por fazer meus dias felizes.

Agradeço aos meus amigos do Colégio Técnico de Limeira, que levarei para sempre no coração, alguns dos quais tive a felicidade de compartilhar ótimos momentos também em São Carlos.

Aos amigos que fiz na faculdade, não apenas do meu curso, mas por onde morei, por todos os bons momentos juntos, conversas e risadas.

Agradeço aos professores e técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais, que foram fundamentais para minha formação e também para execução deste trabalho.

Em especial, meu sincero agradecimento à Prof^a Danielle por todos os ensinamentos, inspirações, disponibilidade e apoio incríveis.

RESUMO

O setor hidrelétrico consolida-se como a principal fonte de geração de energia no Brasil, representando cerca de 60% da capacidade instalada. No entanto, muitas usinas operam há décadas, acumulando danos por desgaste e elevando os custos de manutenção — um dos principais desafios do setor. Diante desse contexto, este trabalho avalia a viabilidade de substituir o aço inoxidável martensítico AISI 420 pelas ligas austeníticas AISI 201LN e AISI 304 em componentes de sistemas hidrelétricos sujeitos ao desgaste.

Foram realizados ensaios de caracterização microestrutural, dureza Brinell, desgaste por esfera rotativa e análise das superfícies desgastadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Todas as ligas apresentaram dureza superior a 200 HB, requisito mínimo para a aplicação em conjunto com compósitos autolubrificantes. Os resultados mostraram que os aços austeníticos, especialmente o AISI 201LN, apresentaram menores taxas de desgaste em comparação ao AISI 420, mesmo com durezas semelhantes.

Esse desempenho é atribuído à maior capacidade de encruamento e à transformação de fase induzida por deformação, associada à baixa energia de falha de empilhamento (EFE). A análise de Carbono Equivalente (CE) também evidenciou correlação inversa com a taxa de desgaste.

Apesar dos bons resultados, ressalta-se a necessidade de ensaios adicionais que simulem as condições reais de operação, especialmente em contato com materiais compósitos autolubrificantes. O estudo conclui que a substituição é tecnicamente viável, com potencial de redução de custos e aumento da durabilidade.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis. Energia hidrelétrica. Resistência ao Desgaste. Dureza.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

The hydroelectric sector stands as the main source of energy generation in Brazil, accounting for approximately 60% of the installed capacity. However, many plants have been operating for decades, accumulating wear-related damage and increasing maintenance costs—one of the sector's main challenges. In this context, this study evaluates the feasibility of replacing martensitic stainless steel AISI 420 with austenitic alloys AISI 201LN and AISI 304 in components of hydroelectric systems subjected to wear. Microstructural characterization, Brinell hardness testing, micro-adhesive wear tests (ball crater), and scanning electron microscopy (SEM) analyses of the worn surfaces were conducted.

All alloys exhibited hardness values above 200 HB, meeting the minimum requirement for applications involving self-lubricating composite materials. The results showed that the austenitic steels, particularly AISI 201LN, presented lower wear rates compared to AISI 420, despite similar hardness levels.

This improved performance is attributed to greater work hardening capability and strain-induced phase transformation, associated with low stacking fault energy (SFE). The analysis of Carbon Equivalent (CE) also revealed an inverse correlation with wear rate.

Despite the promising results, further testing under real operating conditions, especially involving contact with self-lubricating composites, is recommended. The study concludes that material substitution is technically feasible, with potential benefits in cost reduction and increased durability.

Keywords: Stainless steels. Hydroelectric energy. Wear resistance. Hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões de Gases do Efeito Estufa por unidade de eletricidade.	1
Figura 2 - Corte horizontal de uma usina hidrelétrica	3
Figura 3 - Corte horizontal da unidade geradora, com enfoque no Sistema Distribuidor e no rotor tipo Francis.	4
Figura 4 – Diagrama de fases da água, demonstrando a cavitação e ebulição	7
Figura 5 – Correlação de taxas de erosão e dureza Vickers de: aços carbono, aços-liga, aços ferramenta, aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, martensíticos, ferros fundidos e cerâmicas	8
Figura 6 - Corte esquemático de um mancal de escora	10
Figura 7 - Representação esquemática do desgaste adesivo	11
Figura 8 - Representação esquemática do filme autolubrificante formado por compósitos de PTFE	12
Figura 9 - Diagrama da composição das famílias de aços inoxidáveis austeníticos a partir da liga 304.	13
Figura 10 - Evolução histórica do preço médio do Ni em US\$/tonelada.	14
Figura 11 – Micrografias da seção longitudinal dos aços AISI 201LN (a), 304 (b) e 420 (c). Ataque com água régia.	23
Figura 12 – Micrografias da superfície das chapas submetidas ao ensaio de desgaste apresentando as duas calotas dos aços AISI: 201LN (a), 304 (b) e 420 (c). Notar que para o aço 420 a imagem está em menor magnificação. Imagem de elétrons secundários.	25
Figura 13 – Detalhes da cratera do aço AISI 201LN com indícios de desgaste abrasivo (a), desgaste oxidativo (b) e adesivo (c) e (d). Imagem de elétrons secundários.	26
Figura 14 - Detalhes da cratera do aço AISI 304 com indícios de desgaste abrasivo (a), desgaste oxidativo (b) e adesivo (c) e (d). Imagem de elétrons secundários.	27
Figura 15 - Detalhes da cratera do aço AISI 420 com indícios de desgaste abrasivo (a), desgaste oxidativo (b) e adesivo (c) e (d). Imagem de elétrons secundários.	28
Figura 16 - Taxa de desgaste em função do teor de Carbono Equivalente.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição e propriedades mecânicas de ligas comerciais.	15
Tabela 2 - Composição química das amostras aferidas por EDS e nominal (em % em peso).	18
Tabela 3 - Tamanho médio de grão ASTM para as amostras.	23
Tabela 4 - Média e desvio-padrão das durezas Brinell aferidas.	24
Tabela 5 - Diâmetros médios, Vw, k, CE para os aços AISI 201LN, 304 e 420.	29
Tabela 6 - Limite de Escoamento, expoente de encruamento, energia de falha de empilhamento (EFE) e taxa de desgaste para os aços AISI 201LN, 304 e 420.	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 MATERIAIS NO SETOR HIDRELÉTRICO	3
2.2 DESGASTE E DESAFIOS OPERACIONAIS DO SETOR HIDRELÉTRICO	5
2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS SÉRIES 200, 300 e 400	12
3 OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVOS GERAIS	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1 MATERIAIS	18
4.2 AVALIAÇÃO METALOGRÁFICA	18
4.3 MEDIDAS DE DUREZA BRINELL	19
4.4 ENSAIO DE DESGASTE E AVALIAÇÃO DAS CRATERAS	19
5 RESULTADOS	21
5.1 METALOGRAFIA	21
5.2 DUREZA BRINELL	23
5.3 ENSAIO DE DESGASTE E MEV	24
6 DISCUSSÃO	30
6.1 REQUISITOS DO COMPONENTE	30
6.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	31
6.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	33
7 CONCLUSÕES	35
8 REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a matriz energética é fortemente ancorada na geração hidrelétrica, que representa cerca de 60% da capacidade instalada total de energia, consolidando-se como a principal fonte de eletricidade do país. Esse protagonismo, aliado à elevada competitividade econômica, torna a energia hidrelétrica imprescindível para a segurança energética nacional (EPE 2023).

A Figura 1 mostra que a hidroeletricidade permanece como uma fonte de energia flexível e sustentável, com baixas emissões de gases do efeito estufa (GEE) em relação à produção de energia termelétrica (carvão e gás natural) e capacidade de resposta rápida às variações de demanda, sendo considerada uma alavanca essencial para a transição energética global (IRENA, 2023).

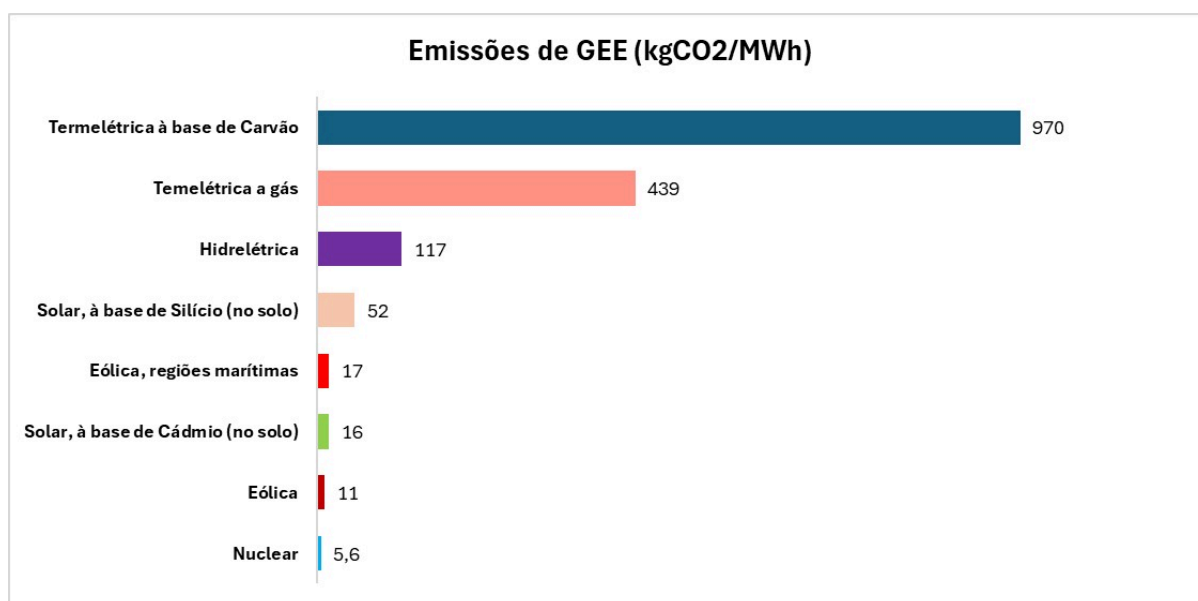


Figura 1 - Emissões de Gases do Efeito Estufa por unidade de eletricidade.

Fonte: adaptado de (OUR WORLD IN DATA, 2021)

Entretanto, a maioria das usinas opera há várias décadas, acumulando desgaste mecânico, erosão e cavitação nos componentes metálicos, o que demanda investimentos contínuos em manutenção e modernização (IRENA, 2023) (INSTITUTO ESCOLHAS, 2018).

Apesar da sua grande importância, as Usinas Hidrelétricas têm desafios para se manterem competitivas frente a geração de energia elétrica por fontes não renováveis. Isso acontece pois os custos do setor são elevados, mas também a estabilidade fornecida pelas usinas termelétricas as colocam como uma presença importante no setor de eletricidade. (FURLAN, 2021)

Diante desse cenário, torna-se evidente a importância de se aprimorar os materiais empregados em sistemas hidrelétricos para garantir maior vida útil, confiabilidade operacional e eficiência econômica. Tradicionalmente, o aço inoxidável martensítico AISI 420 tem sido amplamente empregado nos componentes de turbinas hidrelétricas, como as palhetas diretrizes, e no mecanismo de alavancas, bielas e pinos que movimentam as palhetas. Seu uso é devido à combinação de dureza e resistência à corrosão moderada. Entretanto, questões como tenacidade relativamente baixa, suscetibilidade à trinca sob impacto e oscilações de preço do cromo motivam a busca por materiais alternativos que aliem desempenho mecânico satisfatório, maior resistência à corrosão e custo competitivo, além de menor impacto ambiental.

Assim, este trabalho propõe a prospecção e avaliação da viabilidade de aços inoxidáveis alternativos ao AISI 420, especificamente os aços inoxidáveis austeníticos AISI 201LN e 304, para aplicação em componentes hidrelétricos sujeitos ao desgaste. O objetivo é identificar opções que ofereçam melhor equilíbrio entre propriedades mecânicas, resistência ao desgaste, viabilidade econômica e aspectos de sustentabilidade, contribuindo para a maior confiabilidade operacional e a modernização tecnológica do setor hidrelétrico brasileiro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MATERIAIS NO SETOR HIDRELÉTRICO

O setor hidrelétrico representa mais de 14% da geração de energia elétrica mundial. Em especial, no Brasil, representa mais de 60% da capacidade instalada. Do ponto de vista de materiais usados nas diferentes partes da usina hidrelétrica, tem-se os aços carbono estruturais nas carcaças e instalações da casa de força, com ligas como a ASTM A36 sendo amplamente utilizadas. No sistema de comportas, como representado na Figura 2, incluindo o pórtico para içamento, além dos aços carbonos mencionados, tem-se ligas como a AISI 1045 e AISI 4140, pela necessidade de maior resistência mecânica. No gerador, transformadores e barramentos, naturalmente se emprega o cobre para condutores, com ligas como a C11000, com teor de cobre e prata superior a 99,90 % em peso, com até 0,01% de impurezas como oxigênio, adaptado de (COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC., 2025).

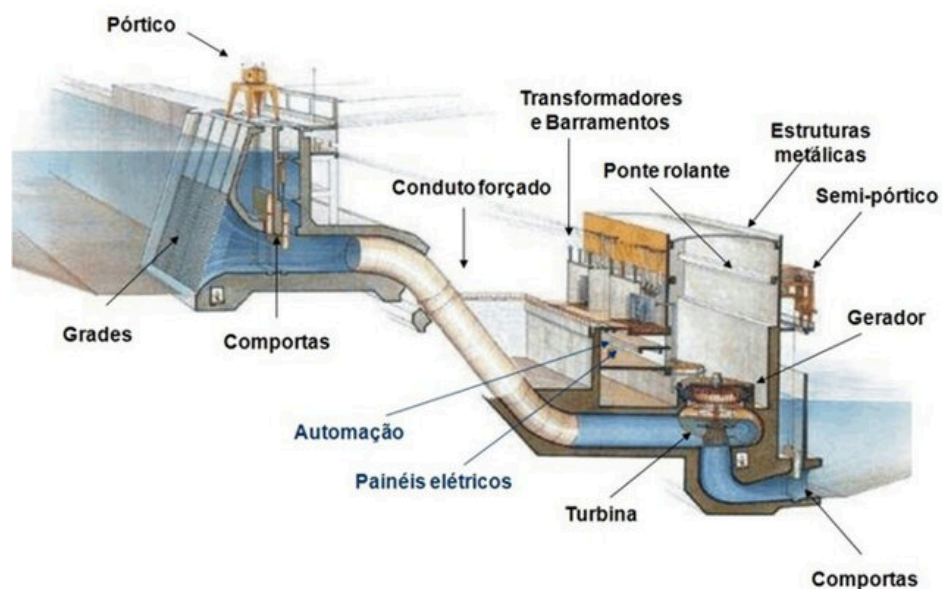


Figura 2 - Corte horizontal de uma usina hidrelétrica

Fonte: (CIOCARI, 2016)

A Figura 3 representa um corte horizontal de uma unidade geradora

completa, com os principais componentes presentes. A turbina detalhada é do tipo Francis, assim como os rotores presentes na Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. O arranjo e componentes presentes podem mudar de acordo com o projeto e tipo de turbina.

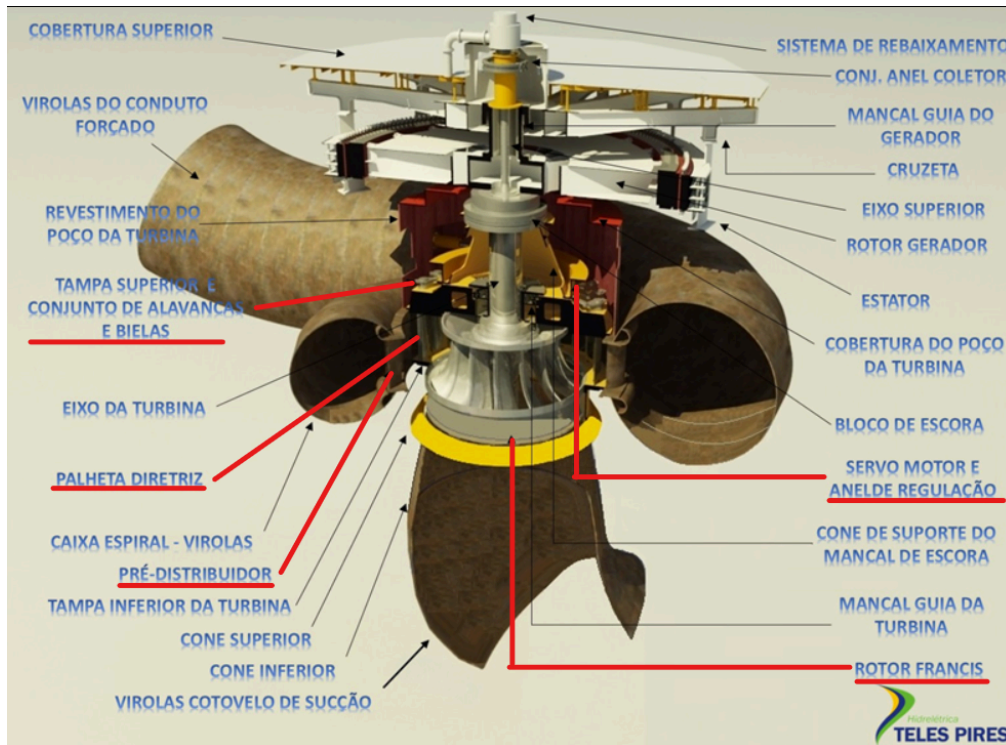


Figura 3 - Corte horizontal da unidade geradora, com enfoque no Sistema Distribuidor e no rotor tipo Francis.

Fonte: Adaptado de (SIEGERENG, 2016)

Conforme detalhado na Figura 3, o percurso do fluxo da água pelo equipamento passa pelo conduto forçado, composto de seções de tubos aplicados no concreto feitos de aço carbono, como a liga AISI 1045. Esse conduto passa por uma redução de seção transversal para aumentar a velocidade da água, formando a caixa espiral. A água é direcionada para o equipamento por meio de palhetas fixas, fabricadas em aços inoxidáveis como a liga AISI 304L e AISI 316L, essa parte é denominada pré-distribuidor.

O controle da vazão é feito por meio das palhetas diretrizes, feitas em aços inoxidáveis martensíticos como a liga AISI 410 e 420, que são movimentadas pelo anel de regulação, fabricado em aço carbono A36. Este anel é movimentado

através do sistema de alavancas e bielas, feitas em aço-liga de alta resistência, como a liga AISI 4140, cujo movimento é realizado por servomotores. Este conjunto é denominado sistema distribuidor, o arranjo dos componentes está exemplificado em destaque na Figura 3.

Focando na turbina hidráulica, para suportar os esforços mecânicos como o peso do equipamento, a força gerada pela passagem de água, além de vibrações sofridas pelo equipamento, o eixo da turbina é fabricado com os aços AISI 1045 e AISI 4140, sendo necessária a aplicação de revestimentos ou pinturas anticorrosivas.

No rotor da turbina, são empregados os aços inoxidáveis martensíticos, por exemplo, AISI 410, AISI 420 e CA6NM. Em particular, a liga CA6NM é popularmente conhecida e usada em rotores ao redor do mundo (TONG, 2018; GOOCH, 2000).

Nota-se, portanto, que a seleção adequada de materiais para cada tipo de componente, levando em conta os seus desafios e exigências, é fundamental para o desempenho adequado da turbina, além de assegurar a vida útil da usina. Falhas acarretam em paradas das máquinas, além de colocar em risco a integridade e a segurança possibilitando inundações, por exemplo. Cada conjunto está sujeito a diferentes esforços mecânicos e desgastes, como o sistema de alavancas, também são sujeitos à corrosão, como o rotor da turbina.

2.2 DESGASTE E DESAFIOS OPERACIONAIS DO SETOR HIDRELÉTRICO

Alguns estudos mostram que grande parte das usinas hidrelétricas instaladas no mundo estão envelhecendo. Na América do Sul, por exemplo, grande parte das usinas possuem mais de 30 anos desde seu comissionamento. Isso se mostra como um grande desafio, pois os custos da substituição dos componentes e o tempo empregado são elevados (IRENA, 2023).

Os pontos críticos no desenvolvimento das usinas estão centrados na vida útil tanto das peças estacionárias, como nas instalações elétricas do gerador, quanto nas rotativas, como a turbina e o sistema distribuidor. Os fatores principais a serem considerados são a vida em fadiga, corrosão e desgaste das peças (GOOCH, 2000).

Especialmente em termos de desgaste das peças da turbina, suas fontes

principais são: erosão causada por lodo ou partículas de areia e lama na água que circula pelo equipamento; erosão causada por bolhas de cavitação, especialmente danosa para o rotor da turbina que gera zonas de baixa pressão na água durante seu movimento; e efeitos do atrito entre as partes móveis e parte fixas (GOOCH, 2005).

Para o último caso, são manufaturadas buchas e anéis de desgaste em bronze ou latão, além do uso de ligas metálicas autolubrificantes, como as ligas a base de Estanho, Chumbo e Antimônio, popularmente chamadas de Metais Patente Babbit.

A necessidade de resistência à corrosão, resistência mecânica, resistência ao desgaste e tenacidade é o motivo da utilização dos aços inoxidáveis martensíticos, como a CA6NM, uma liga ferrosa com composição de Cr em torno de 12% em peso, Ni em torno de 4%, C inferior a 0,06%, traços de Si, Mn e Mo e Fe balanceado. (ASM INTERNATIONAL, 1990)

Entretanto, mesmo essas ligas sofrem desgastes, erosão e corrosão devido às condições inconstantes de operação, ao longo da vida útil estimada em mais de 50 anos para estes equipamentos (SHARMA; GANDHI 2020).

O desgaste e a erosão causados por cavitação são inerentes em qualquer tipo de turbina, além de afetarem hélices de rotores de navios. Em resumo, a cavitação de um líquido surge quando a sua pressão diminui rapidamente sem variação na temperatura. Quando essa variação atinge a pressão crítica de formação de vapor, bolhas se formam, que por sua vez são instáveis e colapsam em implosões. O movimento contrário, em que a temperatura aumenta sem mudanças na pressão até a formação de vapor é chamado ebulição do líquido. A Figura 4 representa o diagrama de fases da água com a ocorrência dos dois processos (GOMES, 2015).

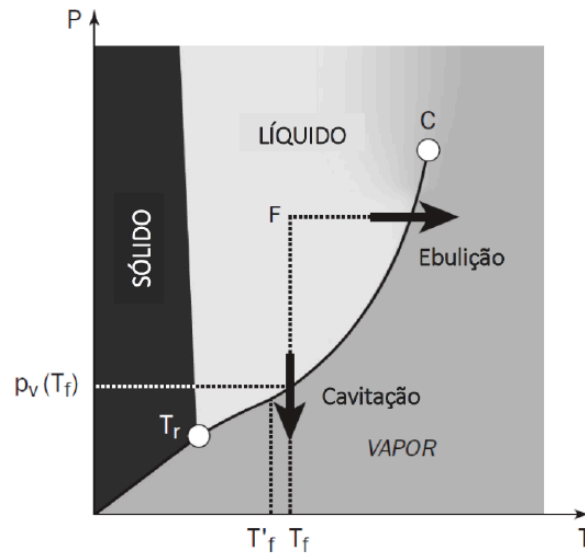


Figura 4 – Diagrama de fases da água, demonstrando a cavitação e ebulição

Fonte: (GOMES, 2015)

Com o fluxo de água, as pás dos rotores da turbina geram zonas de baixa pressão, que por sua vez podem formar bolhas de cavitação. Ao implodirem na superfície, essas bolhas geram micro-jatos de alta pressão que, ao longo do tempo, desgastam a superfície do material, formando tanto cavidades devido à erosão, como pites de corrosão devido a combinação de remoção de material e diminuição da proteção. Além do design das pás da turbina ser otimizado para minimizar esse efeito, materiais com resistência ao desgaste por cavitação são usados, combinando-se com técnicas para aplicação de revestimentos na superfície (KRELLA, 2023).

Alguns estudos envolvendo aços inoxidáveis e resistência à cavitação levaram em conta que uma dureza e resistência mecânica maiores dificultam os danos sofridos pelo processo. Os aços inoxidáveis martensíticos são conhecidos por essas propriedades, sendo populares escolhas de materiais no setor hidrelétrico. Entretanto, alguns estudos indicam que alguns aços inoxidáveis austeníticos, como o AISI 304, possuem resistência à erosão por cavitação próxima à dos martensíticos. Essa resistência é atribuída à decomposição da austenita em martensita, induzida através da deformação causada pela cavitação (KWOK; MAN; CHENG, 1998).

Em outro estudo envolvendo a liga CA6NM foi possível observar esse fenômeno. Após o revenimento, a liga apresentou uma fração de aproximadamente 14% em volume de austenita revertida. Ao sofrer desgastes devido ao processo erosivo, a transformação da austenita em martensita induzida por deformação plástica trouxe aumento na dureza superficial, o que dificultou o desgaste (SANTOS; CARDOSO; BRUNATTO, 2020).

Após um levantamento de dados de diferentes fontes, envolvendo taxas de erosão por cavitação versus dureza, foram obtidas curvas de correlação, apresentadas na Figura 5 abaixo. Apesar de todas serem decrescentes, o que mostra a influência benéfica da dureza, como existem diferentes curvas, é possível que durezas similares tenham taxas de desgaste diferentes. As curvas da [Figura 5](#) demonstram que a dureza da superfície tem um papel importante, mas fatores como homogeneidade da microestrutura, fases presentes, precipitados, entre outros, além de condições dos testes realizados, também influenciam a vida do material em cavitação (KRELLA, 2023).

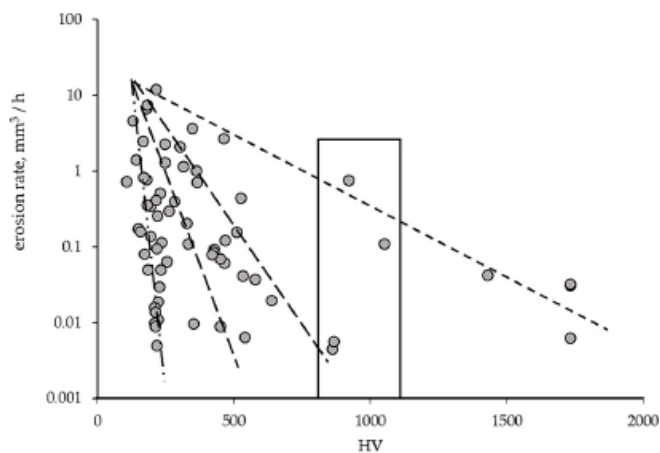


Figura 5 – Correlação de taxas de erosão e dureza Vickers de: aços carbono, aços-liga, aços ferramenta, aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, martensíticos, ferros fundidos e cerâmicas

Fonte: KRELLA, 2023

Apesar disso, a aplicação de técnicas de endurecimento de superfície tem sido foco de interesse em novos desenvolvimentos para melhoria nas taxas de

erosão. Algumas dessas técnicas envolvem nitretação e boretação e, em aços carbono, também pode ser feita a cementação (ALLENSTEIN *et al.*, 2013) (SAENS BETTANCOURT; RODRIGUEZ; CORONADO, 2022).

Outras estratégias envolvem o endurecimento superficial em processos como *shot peening*, ou endurecimento por trabalho a frio. As técnicas mais modernas envolvem a aplicação de revestimentos como Nitretos de Titânio, Alumínio ou Cromo (MUÑOZ-CUBILLOS; CORONADO; RODRIGUEZ, 2019) (SZALA *et al.*, 2019).

O desgaste erosivo causado por partículas sólidas na água, apesar de similar no sentido de afetar o funcionamento da máquina, deteriora componentes por remoção de material. Sua ocorrência depende fortemente da região de instalação da turbina. Por exemplo, em países como a Índia e China, afetados sazonalmente pelo clima de monções, há grande incidência desse fenômeno. No Brasil, regiões do Norte do país, com forte presença de atividade mineradora, também amplia-se o desgaste erosivo por partículas sólidas em turbinas hidrelétricas (SHARMA, GANDHI, 2020).

Um estudo feito para a liga CA6NM, com foco em desgaste erosivo, demonstrou que múltiplos fatores determinaram as taxas de desgaste. O ângulo de impacto da partícula tem efeito variável, com máxima taxa a 30°. Durante o fluxo de água e partículas em um equipamento operacional, diferentes ângulos são obtidos, assim o desgaste em cada seção do perfil é diferente. Além disso, maiores velocidades e tamanhos de partículas tiveram aumento direto no desgaste, atribuído à maior energia das partículas (SHARMA, GANDHI, 2020).

Outro fator importante foi a concentração de sólidos na água. O aumento do volume de sólidos foi inversamente proporcional ao desgaste, sendo atribuído às interações entre partículas na água e à redução da área superficial total das partículas (SHARMA, GANDHI, 2020).

Assim como para os danos por cavitação, o desenvolvimento e emprego de revestimentos com alta dureza também podem influenciar positivamente nas taxas de desgaste observadas. Além disso, em casos extremos em que a presença de partículas no líquido é expressiva, pode ser necessário interromper temporariamente o equipamento para evitar danos (SHARMA, GANDHI, 2020).

Além dos mecanismos de desgaste por cavitação e erosão, outro fator importante a ser considerado na vida útil do equipamento são os efeitos tribológicos

entre as partes fixas e móveis. Componentes como os mancais de guia e escora, buchas e anéis de apoio, possuem superfícies móveis e estacionárias em contato constante, como apresentado esquematicamente na Figura 6. Essas regiões estão sujeitas ao desgaste adesivo e abrasivo (ASM INTERNATIONAL, 1990).

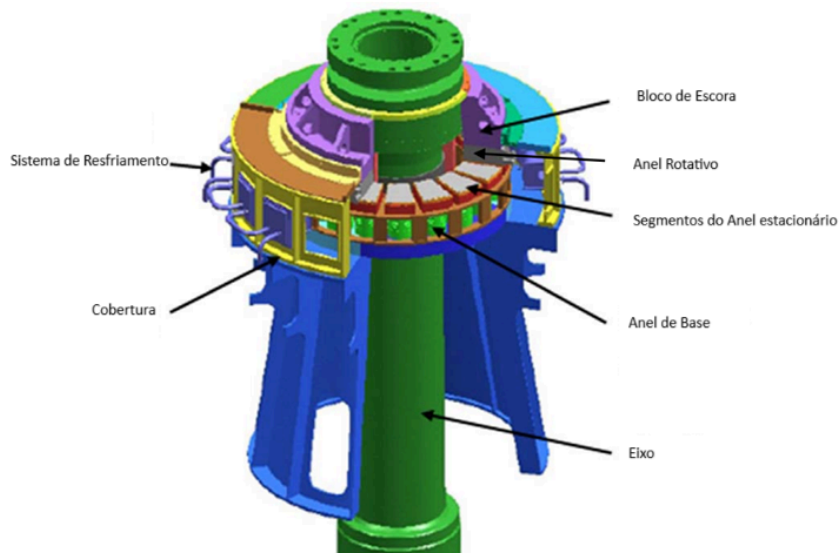


Figura 6 - Corte esquemático de um mancal de escora

Fonte: Adaptado de (LIMING, 2017)

As partes metálicas em contato nos mancais são sujeitas a intensos desgastes abrasivos, especialmente entre o anel rotativo e o estacionário no mancal de escora demonstrados na Figura 6, pois durante a operação há um movimento relativo constante entre essas duas peças. Esses componentes precisam operar constantemente imersos em óleo, além de serem utilizados revestimentos de ligas à base de estanho, popularmente conhecidas como Babbitt. Apesar disso, durante a partida do equipamento, é necessário um sistema de alta pressão para injeção de óleo, formando um filme entre todas as partes móveis. Isso é extremamente importante, pois durante a partida de um equipamento pesado a ocorrência de desgaste adesivo nas superfícies de apoio é severa (THAPAR, 2024).

A Figura 7 apresenta uma ilustração esquemática do mecanismo associado ao desgaste adesivo. Como demonstrado, o desgaste entre peças metálicas é atribuído principalmente à microsoldas que ocorrem nas regiões de contato submetidas à tensão mecânica devido à carga. Essas junções se devem à

movimentação de átomos de grãos entre ambas as partes. (STACHOWIAK, 2005)



Figura 7 - Representação esquemática do desgaste adesivo

Fonte: Adaptado de (STACHOWIAK, 2005)

Fatores como a solubilidade, ou afinidade química entre as ligas envolvidas, acabamento superficial e lubrificação inadequada afetam a ocorrência do fenômeno. De modo geral, uma lubrificação adequada reduz esse tipo de desgaste. Em alguns estudos, aços inoxidáveis martensíticos apresentaram desgaste adesivo, em contrapartida, aços inoxidáveis austeníticos com alto índice de encruamento resistem mais facilmente (ASM INTERNATIONAL, 1990).

O uso de óleos lubrificantes e graxas para proteção contra desgaste em peças metálicas sem contato com a água é uma prática bastante comum. Porém, em alguns componentes da turbina, como os presentes no Sistema Distribuidor, operam em contato direto com a água do rio. Inevitavelmente, as buchas com graxa usadas em projetos mais antigos de usinas causavam a contaminação dos rios, além de precisarem de manutenção frequente para repor a lubrificação. Nos últimos anos, foi popularizada a utilização de buchas autolubrificantes, feitas de materiais compósitos como politetrafluoretileno (PTFE) ou resinas e fibra de carbono ou reforços particulados como SiC, evitando assim a contaminação da água (JONES et al, 1999).

Os compósitos autolubrificantes usados variam muito de fabricante para fabricante. A vida útil da junção metálica e compósito é fortemente influenciada pelo desgaste sofrido pelo material compósito. De modo geral, os polímeros reforçados comumente usados nessas aplicações são sujeitos a desgastes abrasivos, quando ocorre o contato com partículas sólidas, principalmente o desgaste adesivo. O

último caso é atribuído ao destacamento ou rompimento do reforço, quando ele é feito de fibras, e também no transporte de moléculas poliméricas durante o movimento relativo das peças. Como ilustrado esquematicamente na Figura 8, durante a aplicação da carga, o compósito perde material, formando uma camada chamada de filme de transferência, que fornece a propriedade de auto-lubrificação, desde que ele não seja rompido (ASM INTERNATIONAL, 1990) (JONES et al, 1999) (WANG; YAN, 2005).

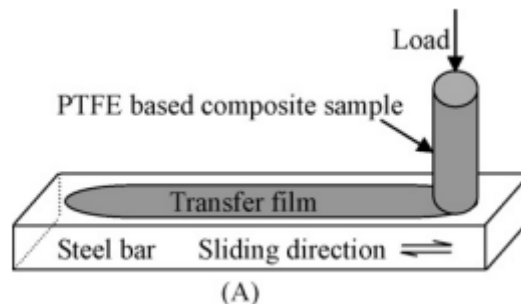


Figura 8 - Representação esquemática do filme autolubrificante formado por compósitos de PTFE

Fonte: Adaptado de (WANG; YAN, 2005)

Além dos avanços tecnológicos no desenvolvimento de peças compósitas para utilização em buchas autolubrificantes, fatores como o acabamento superficial das peças, a interação entre a peça metálica e o filme autolubrificante formado e a dureza da peça metálica influenciam diretamente na vida útil das buchas. É desejado que a dureza Brinell do eixo ou contra peça metálica seja superior à 200 HB para assegurar que nenhum desgaste sofrido pelo metal através do reforço cause o rompimento constante do filme, diminuindo substancialmente a vida útil (ASM INTERNATIONAL, 1990) (JONES et al, 1999) (LI et al, 2024).

2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS SÉRIES 200, 300 e 400

Aços inoxidáveis são uma importante família de ligas ferrosas, que diferentemente de outras famílias, sua resistência à corrosão permitiu sua utilização variada desde utensílios domésticos até componentes marítimos e implantes. Por

definição, aços inoxidáveis são ligas ferrosas com teor mínimo de Cr de 12%, que protege contra corrosão devido à formação de um filme passivo do óxido de cromo (Cr_2O_3).

As designações comerciais da *American Iron and Steel Institute* (AISI) são populares ao redor do mundo, além de possuírem equivalências em normas de diferentes regiões. A Figura 9 apresenta um diagrama de composições das principais famílias de aços inoxidáveis austeníticos das séries 200 e 300, a partir da liga 304.

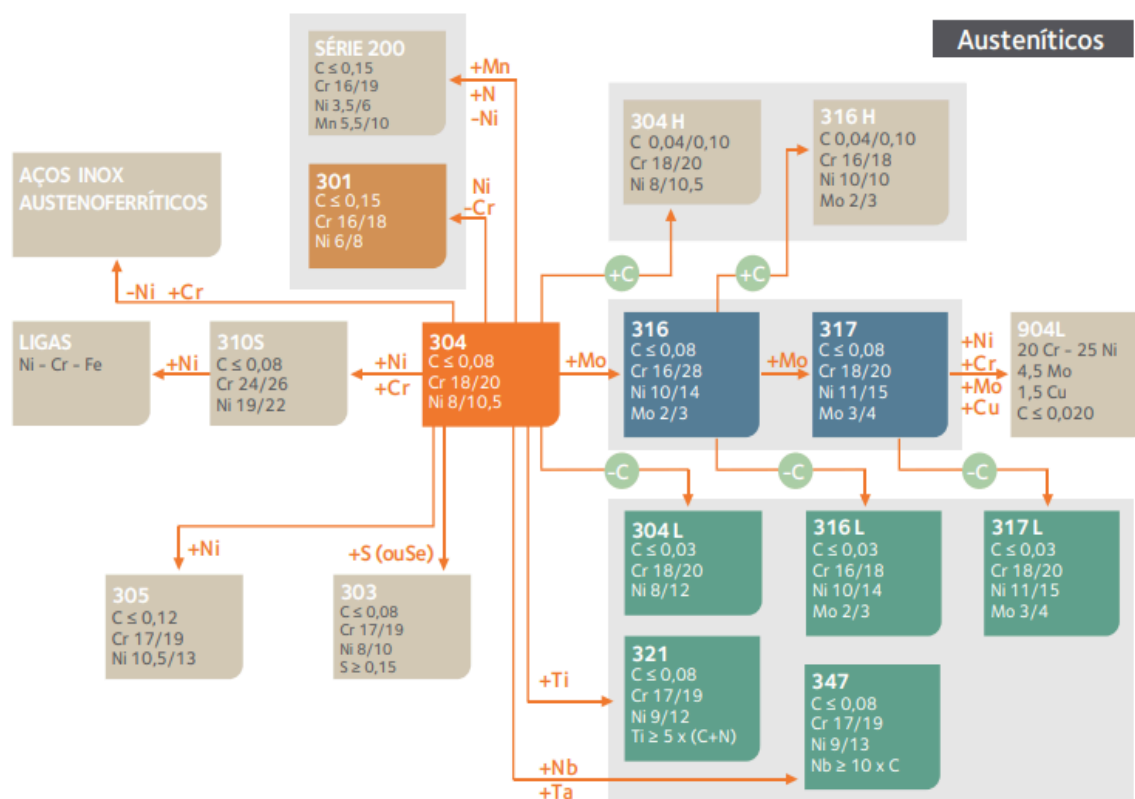


Figura 9 - Diagrama da composição das famílias de aços inoxidáveis austeníticos a partir da liga 304.

Fonte: (CARBÓ, 2008).

As ligas austeníticas são a maior família de aços inoxidáveis em quantidade de ligas e utilização. Possuem como características gerais ótima resistência à corrosão, boa tenacidade, não são magnéticas e não são endurecíveis por tratamentos térmicos, mas podem ser facilmente endurecidas por trabalho a frio. (DAVIS; ASM INTERNATIONAL, 1994). Além disso, como sua estrutura é Cúbica de

Face Centrada, são capazes de manter suas propriedades mesmo em temperaturas criogênicas. (PECKER; DONALD, 1977) (DAVIS; ASM INTERNATIONAL, 1994)

A série 200 é constituída majoritariamente por Cr, Ni e Mn, também conhecida como sistema Cr-Ni-Mn. É um grupo de ligas de aços inoxidáveis austeníticos, assim como a série 300, conhecida como sistema Cr-Ni. (DAVIS; ASM INTERNATIONAL, 1994)

A adição de Mn, além de Ni, como elemento austenitizante torna a série 200 mais barata que a 300. O preço do Ni é historicamente superior a US\$8.000 por tonelada, enquanto o preço do Mn é inferior a US\$10 por tonelada, como apresentado na evolução histórica dos preços de Ni na Figura 10 abaixo (GLOBAL PRICE OF NICKEL, 2024) (MANGANESE PRICE FORECAST, 2024).

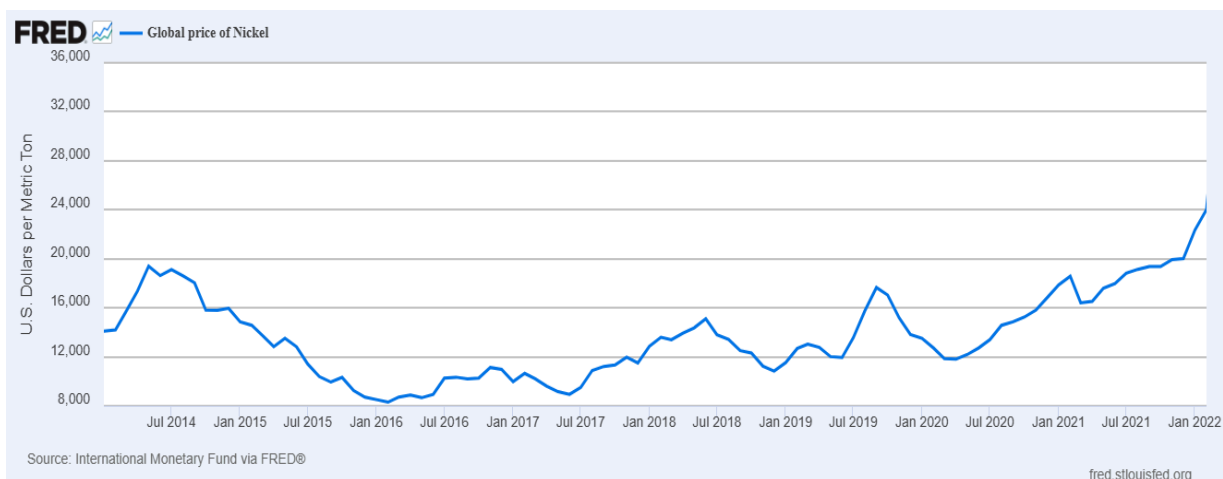


Figura 10 - Evolução histórica do preço médio do Ni em US\$/tonelada.

Fonte: (Global Price of Nickel, 2024)

Além disso, o manganês permite uma maior solubilidade do N. Em algumas literaturas a série 200 é chamada de sistema Cr-Ni-Mn-N. O teor de N também confere propriedades de resistência mecânica geralmente superiores à série 300, além de terem poucas perdas quanto à resistência à corrosão (DAVIS; ASM INTERNATIONAL, 1994).

As ligas da série 200 quando submetidas à deformação plástica transformam a austenita metaestável em martensita, devido ao efeito TRIP (*transformation-induced plasticity* ou, em português, plasticidade induzida por transformação), o que confere resistência mecânica por encruamento e confere

maior alongamento e tenacidade. (CRUZ, 2019).

A série 300, assim como toda a família de aços austeníticos, possui ótima resistência à corrosão, tenacidade, boa usinabilidade, soldabilidade e faixa de temperatura de serviço, podendo operar em altas temperaturas e até em temperaturas criogênicas. A liga 304 é a liga mais popularmente utilizada da série 300, e em situações em que é necessária maior resistência à corrosão por *pites*, como na presença de cloretos, é substituída pela 316 (PECKER; DONALD, 1977).

Além das séries 200 e 300, existe ainda a série de aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos, como o caso da série 400. A série 400 possui ligas ferríticas, como as AISI 405 e 430, e também as martensíticas, como as AISI 410, 416 e 420. Geralmente a resistência mecânica da série 400 é superior à 300, pois possui teores maiores de carbono, porém possui resistência à corrosão inferior devido aos teores menores de Cr. Apesar da designação ferrítica, ligas como a 430, em altas temperaturas, apresentam uma fração de até 50% de austenita, que se transforma em martensita durante a têmpera (SILVA; MEI, 2006).

Focando nas ligas martensíticas, suas propriedades mecânicas são superiores às austeníticas, porém sua soldabilidade é limitada, devido sua alta temperabilidade. A utilização dessas ligas é feita em situações em que a resistência mecânica e a dureza superiores são preferíveis à resistência à corrosão. Diferentemente das séries austeníticas, a série 400 não pode ser empregada em temperaturas criogênicas (SILVA; MEI, 2006). A Tabela 1 traz um resumo dos principais aços inoxidáveis das séries 200, 300 e 400, apresentando a composição típica (% em peso) e os valores mínimos de resistência mecânica, englobando o limite de escoamento e o Limite de Resistência à Tração (L.R.T).

Tabela 1 - Composição e propriedades mecânicas de ligas comerciais.

Liga AISI	Composição Química em %p					Resistência Mecânica (Valores mínimos)		
	C	Mn	Cr	Ni	Outros	Escoamento (MPa)	L.R.T (MPa)	Alongamento (%)
201	0,15 max	5,50-7,50	16,0-18,0	3,50-5,50	0,25 N max	310	655	40
201LN	0,03 max	6,4-7,5	16,0-17,5	4,00-5,00	0,10-0,25 N	350	650	25%
304	0,08 max	2,00 max	18,0-20,0	8,00-10,5	1,0 Si max	205	515	40

316	0,08 max	2,00 max	16,0-18,0	10,0-14,0	2,00-3,00 Mo	205	515	40
410	0,15 max	1,00 max	11,5-13,0	-	1,0 Si max	205	450	20
420	0,15 min	1,00 max	12,0-14,0	-	1,0 Si max	345	690	15

Fonte: Adaptado de (DAVIS; ASM INTERNATIONAL, 1994).

Com relação à resistência ao desgaste, o comportamento varia conforme a liga. Em situações de contato constante entre peças metálicas, predomina a ocorrência de desgaste adesivo. Apesar da resistência mecânica e dureza superiores características dos aços martensíticos, é atribuída aos aços inoxidáveis austeníticos uma resistência superior ao desgaste nesses casos, principalmente devido à sua capacidade superior de endurecimento por trabalho à frio. (ASM INTERNATIONAL, 1992).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GERAIS

Analisar comparativamente a viabilidade do uso de ligas de aços inoxidáveis das séries 200 e 300, em alternativa às ligas da série 400, em componentes utilizados em sistemas hidrelétricos, considerando microestrutura, dureza e resistência ao desgaste.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar os aços inoxidáveis AISI 201LN, 304 e 420 quanto ao tamanho de grão e às fases presentes, visando compreender as diferenças microestruturais entre as séries 200, 300 e 400;
2. Avaliar a dureza das ligas estudadas por meio de ensaio Brinell, correlacionando os resultados com a microestrutura e assegurando condições comparáveis para análise de desgaste;
3. Investigar o comportamento ao desgaste por esfera rotativa dos aços AISI 201LN, 304 e 420, determinando as taxas de remoção de volume e discutindo o desempenho relativo de cada material;
4. Analisar os mecanismos de desgaste atuantes nas superfícies após ensaio, utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), de modo a correlacionar tais mecanismos com as características microestruturais e propriedades mecânicas de cada liga;
5. Avaliar a viabilidade de substituição do aço AISI 420 pelos aços AISI 201LN e 304 em componentes expostos a condições de desgaste em sistemas hidrelétricos, com base nos resultados obtidos e na literatura técnica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Foram utilizadas chapas laminadas comerciais, com espessura nominal de 5mm, das ligas AISI 201LN e 304, escolhidas como representantes das séries 200 e 300, cortadas em amostras retangulares com 30 mm de comprimento, por 20 mm de largura, além de amostras do aço inoxidável martensítico AISI 420, retiradas a partir de um componente real já utilizado nas palhetas diretrizes de uma instalação hidrelétrica. As amostras foram cortadas em seções retangulares de mesma medida, e lixadas uma espessura de 8mm. A composição química das amostras, aferidas através de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), bem como a composição nominal extraída de (ASM INTERNATIONAL, 1992) estão apresentadas na Tabela 2. A avaliação por EDS foi realizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEI-Inspect S50, instalado no Laboratório de Caracterização Estrutural do DEMa/UFSCar.

Tabela 2 - Composição química das amostras aferidas por EDS e nominal (em % em peso).

Referência	Liga AISI	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	C	N
(ASM INTERNATIONAL 1992)	201LN	Balanco	16,0-17,5	4,00-5,00	6,4-7,5	1,0 máx.	0,03 máx.	0,10-0,25
EDS		71,53	18,19	3,90	5,89	0,49	-	-
(ASM INTERNATIONAL 1992)	304	Balanco	18,0-20,0	8,00-10,5	2,00 máx.	1,0 máx.	0,08 máx.	-
EDS		72,92	19,07	7,29	0,24	0,48	-	-
(ASM INTERNATIONAL 1992)	420	Balanco	12,0-14,0	-	1,00 máx.	1,0 máx.	0,15 mín.	-
EDS		85,56	13,42	-	0,58	0,44	-	-

Fonte: O autor.

4.2 AVALIAÇÃO METALOGRÁFICA

Para a análise metalográfica, as amostras foram seccionadas, embutidas

em baquelite, lixadas em lixas de granulometria variando de 400 a 2000 mesh e polidas em suspensão de alumina de 1 μm de granulometria. O ataque químico foi realizado com o uso de água régia, composto de 1 parte de ácido nítrico (HNO_3) em 3 partes de ácido clorídrico (HCl). O ataque foi realizado em temperatura ambiente durante 10 segundos. As microestruturas foram observadas e registradas com auxílio de um microscópio óptico da marca Olympus modelo BX51. A determinação do tamanho médio de grão seguiu o método dos interceptos lineares, conforme estabelecido pela norma ASTM E112-24.

4.3 MEDIDAS DE DUREZA BRINELL

A dureza Brinell foi aferida através da média de quatro impressões em cada amostra com o uso de uma esfera de aço temperado de diâmetro de 2,5 mm, carga de 62,5 kgf e tempo de aplicação de 10 segundos. Os resultados apresentados são médias destes valores. Todas as medidas foram realizadas sobre as superfícies previamente lixadas e polidas. O equipamento utilizado está instalado no Laboratório de Análise Óptica do DEMa/UFSCar.

4.4 ENSAIO DE DESGASTE E AVALIAÇÃO DAS CRATERAS

Para o ensaio de desgaste, as amostras foram previamente lixadas até a granulação de 600 mesh usando lixas d'água de SiC. Foram realizados três ensaios de desgaste a seco por liga, utilizando uma esfera de 25,4 mm de diâmetro de aço ferramenta, com dureza aproximada de 40 a 42 HRC. A carga aplicada em cada ensaio foi de 200 gf (equivalente a 1,96 N), com velocidade de rotação de 200 rpm e duração de 20 minutos, totalizando uma distância percorrida de 319,19 metros. O equipamento utilizado está instalado no Laboratório de Microestrutura e Propriedades em Processos de Solidificação/M2PS, do DEMa/UFSCar.

As condições ambientais durante os ensaios foram registradas: para a liga 201LN, a temperatura ambiente era de 15,7 °C e umidade relativa do ar de 59%; para a liga 304, 18,8°C e 51%; e, para a liga 420, 19,8°C e 52%.

Com a Equação (1) foi determinado o volume removido (V_w) em mm^3 , a partir do diâmetro médio das calotas esféricas (d) em mm, aferidas através da média de medições dos diâmetros das calotas com o uso das microscopias

eletrônicas e do raio da esfera (R) utilizada no ensaio em mm (ALBUQUERQUE *et al*, 2025 p.7287).

$$V_w = \frac{\pi.d^4}{64.R} \quad (1)$$

Com a Equação (2) foi determinada a taxa a desgaste (k) em mm³/N.m, a partir do volume removido (V_w), da distância percorrida (m), em metros, e da carga aplicada (N), em Newtons (ALBUQUERQUE *et al*, 2025 p.7287).

$$k = \frac{V_w}{m.N} \quad (2)$$

Então, utilizando a Equação (3), foi determinado o teor de Carbono Equivalente (CE) para as amostras, a partir dos teores dos elementos químicos em percentual em peso. Destaca-se que para o C e N, a análise de EDS realizada não é quantitativa, sendo adotado o valor máximo nominal previsto para cada liga (DAVIS, ASM INTERNATIONAL, 1994 p.21).

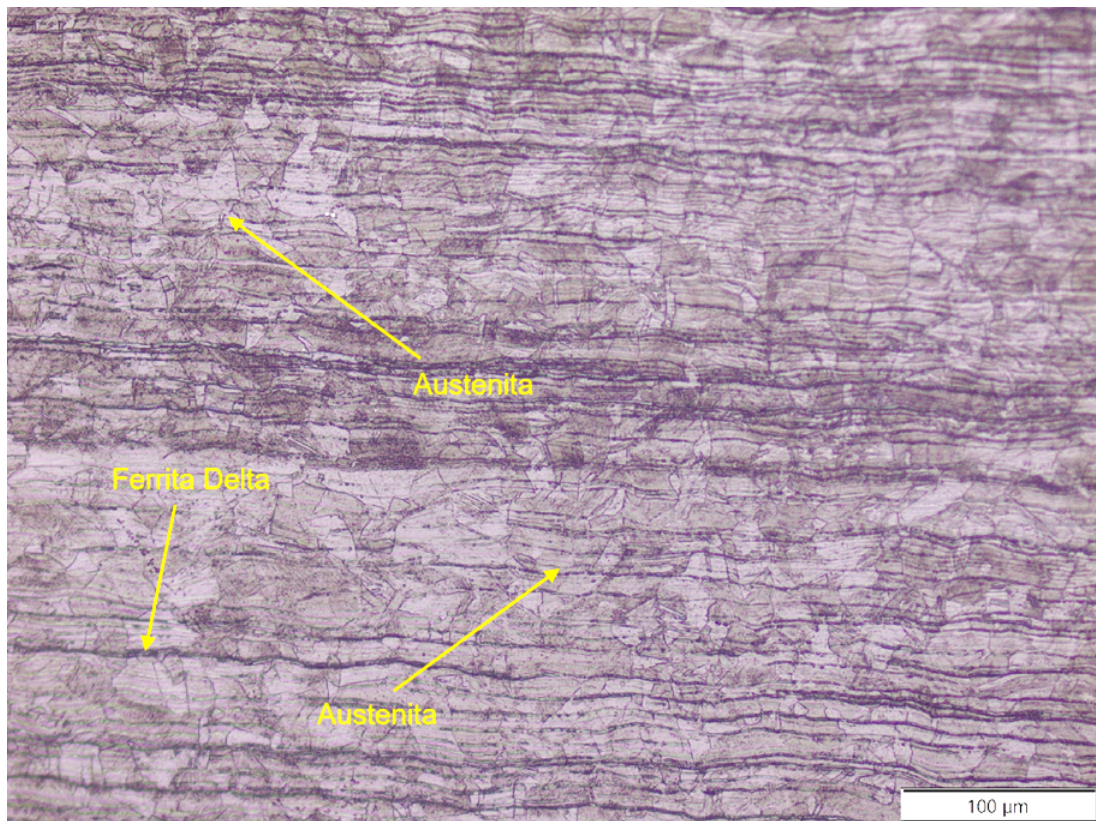
$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Si+\%Ni}{15} \quad (3)$$

Ao término dos ensaios, as superfícies desgastadas foram analisadas por MEV e EDS com o objetivo de identificar os mecanismos de desgaste atuantes. Foi utilizado o equipamento FEI-Inspect S50 instalado no Laboratório de Caracterização Estrutural do DEMa/UFSCar.

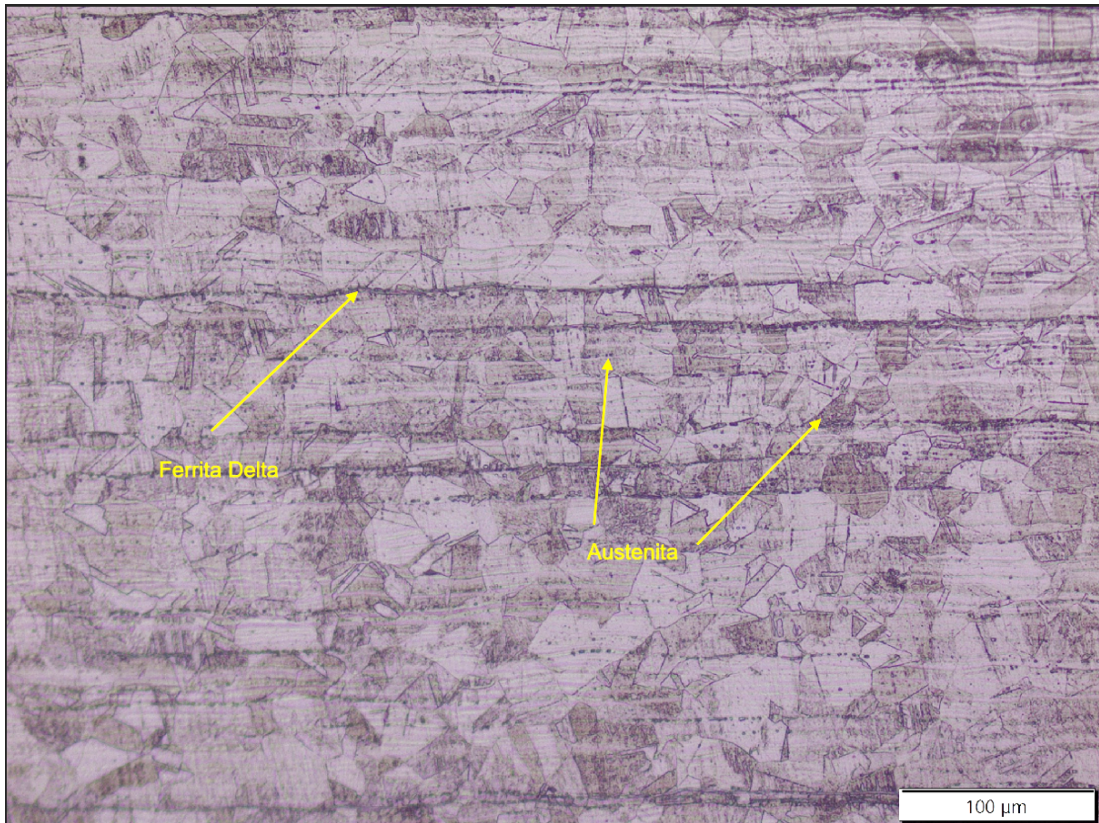
5 RESULTADOS

5.1 METALOGRAFIA

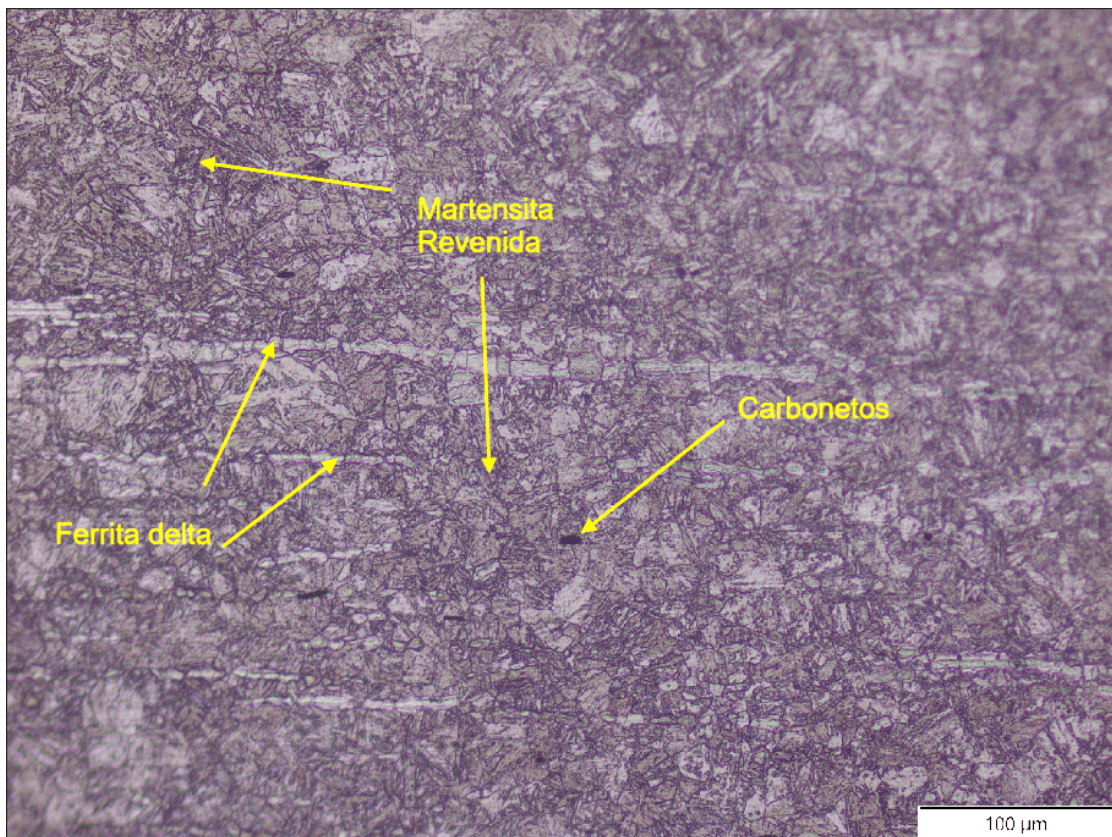
A Figura 11 apresenta as metalografias da seção longitudinal dos aços inoxidáveis 201LN, 304 e 420, nas condições utilizadas nesta investigação.



a)



b)



c)

Figura 11 – Micrografias da seção longitudinal dos aços AISI 201LN (a), 304 (b) e 420 (c). Ataque com água régia.

Fonte: o autor

Na Figura 11(a), pode ser vista a microestrutura do aço AISI 201LN, a qual é predominantemente austenítica, contendo ilhas de ferrita delta alongadas na direção de laminação da chapa. De forma bastante similar, o aço AISI 304 apresentado na Figura 11(b) também é austenítico e apresenta uma baixa fração volumétrica de ferrita delta. Já para o aço AISI 420, na Figura 11(c), nota-se que a matriz é de martensita revenida, com presença de veios de ferrita delta.

A Tabela 3 apresenta os tamanhos médios de grão ASTM das ligas determinados através do método dos interceptos lineares.

Tabela 3 - Tamanho médio de grão ASTM para as amostras.

Liga AISI	Tamanho ASTM (G)
201LN	13,0
304	12,5
420	13,0

Fonte: o autor

Nota-se, pelos dados da Tabela 3, que o tamanho de grão entre os aços é muito similar, assim como já observado na Figura 11. Desta forma, não foram realizados tratamentos térmicos adicionais para ajuste de tamanho de grão, nem para solubilização de ferrita delta nos aços para as análises posteriores.

5.2 DUREZA BRINELL

Com o intuito de aproximar a dureza Brinell das chapas avaliadas para os ensaios de desgaste, foi feita uma laminação a frio para ajuste de dureza no aço AISI 304, com 5% de redução de espessura total. Os aços AISI 201LN e AISI 420 não passaram por nenhum tipo de tratamento ou laminação, sendo utilizados da mesma forma como recebidos (AISI 201LN em chapas comerciais e AISI 420

extraído das palhetas diretrizes). As médias e respectivos desvios-padrão estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Média e desvio-padrão das durezas Brinell aferidas.

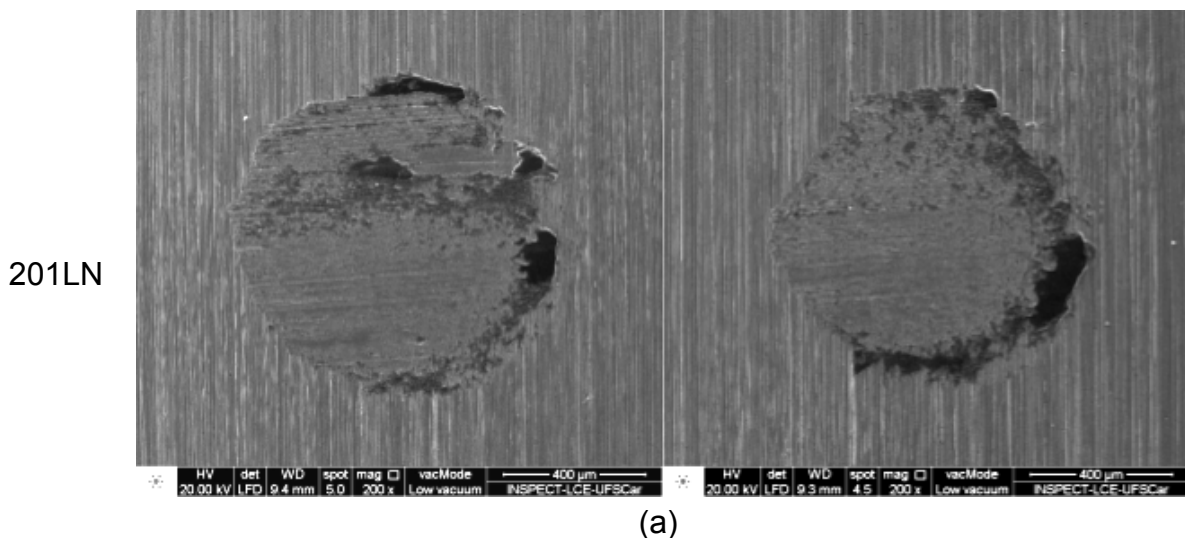
Liga AISI	Média (HB)	Desvio Padrão (HB)
201LN	208,5	3,0
304	221,5	4,0
420	219,8	3,5

Fonte: o autor.

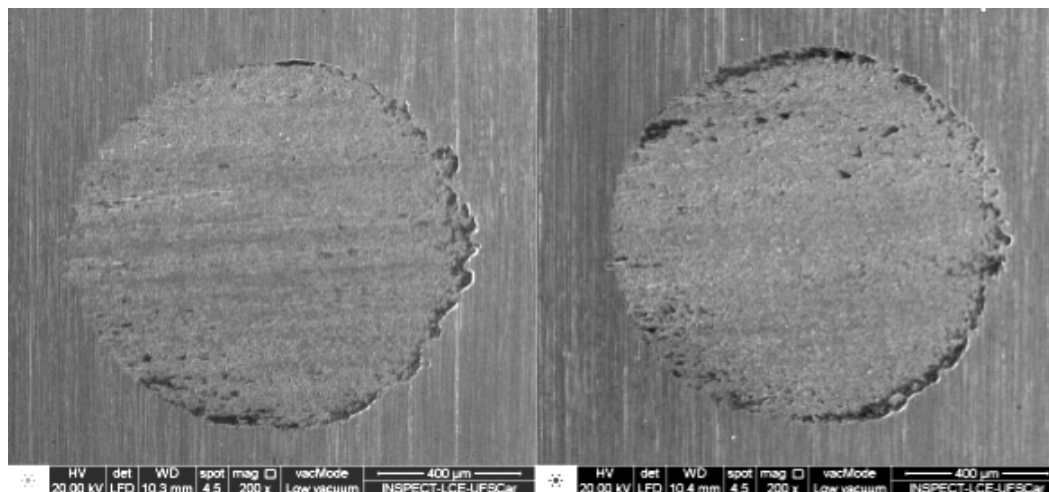
Nota-se, a partir da Tabela 4, que as durezas estão na faixa de 208 a 221 HB. Além disso, as durezas aferidas estão acima de 200 HB, que é o requisito mínimo necessário para a utilização no componente real do sistema distribuidor em que o aço AISI 420 é aplicado. Portanto, os valores de dureza de todos os aços avaliados possuem uma diferença de 6,23% entre a menor dureza, correspondente ao aço AISI 201LN e a maior, correspondente ao aço AISI 304. Minimizando o efeito da dureza dissimilar entre as amostras no ensaio de desgaste.

5.3 ENSAIO DE DESGASTE E MEV

Após os ensaios de desgaste, as amostras ensaiadas foram fotografadas com o uso do MEV e o diâmetro aproximado das calotas esféricas foi determinado através da média dos diâmetros individuais de cada calota. A Figura 12 apresenta a morfologia da superfície das calotas obtidas sob as mesmas condições nos aços AISI 201LN (a), 304 (b) e 420 (c).

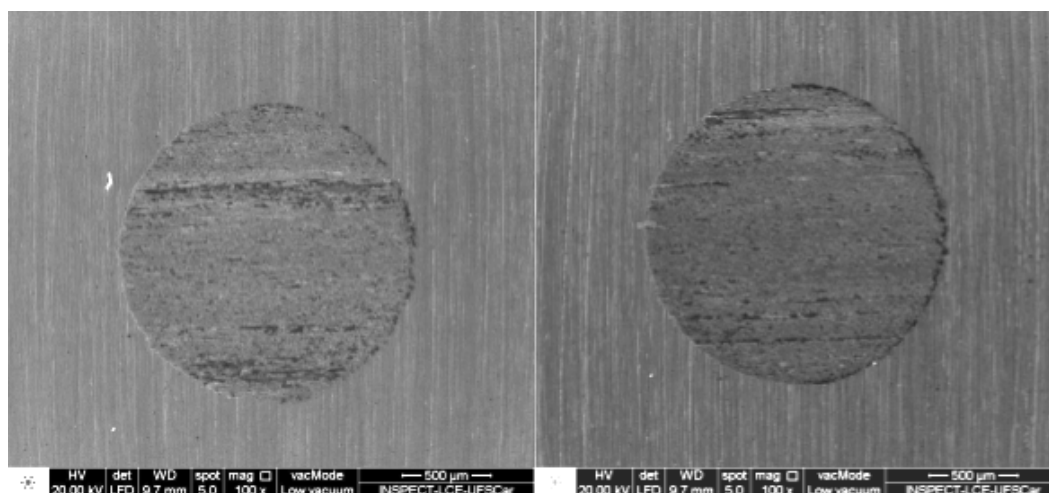


304



(b)

420



(c)

Figura 12 – Micrografias da superfície das chapas submetidas ao ensaio de desgaste apresentando as duas calotas dos aços AISI: 201LN (a), 304 (b) e 420 (c). Notar que para o aço 420 a imagem está em menor magnificação. Imagem de elétrons secundários.

Fonte: o autor

A Figura 13 mostra detalhes das crateras presentes no aço AISI 201LN, com indícios de desgaste abrasivo (a), desgaste oxidativo (b) e desgaste adesivo (c) e (d).

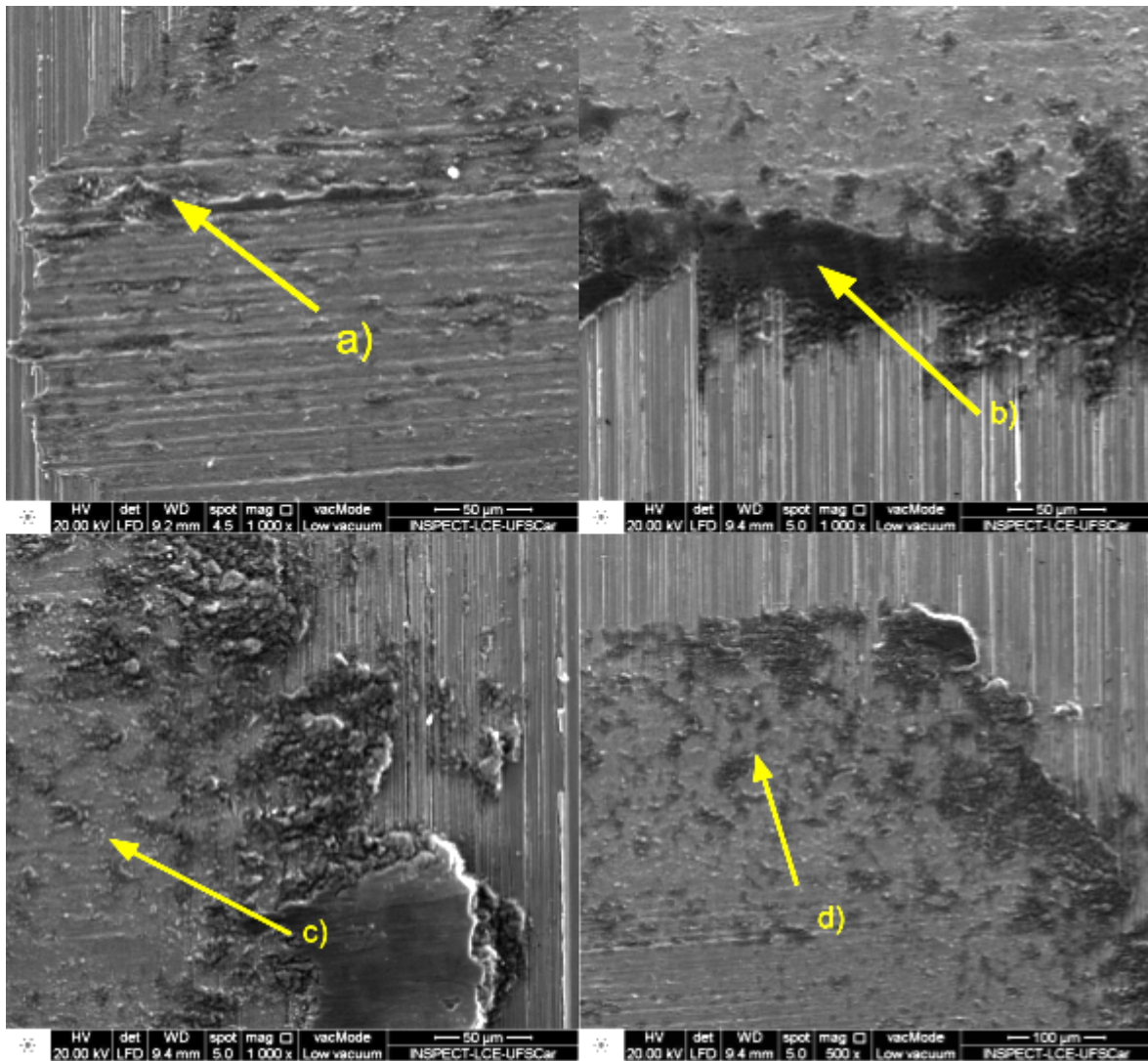


Figura 13 – Detalhes da cratera do aço AISI 201LN com indícios de desgaste abrasivo (a), desgaste oxidativo (b) e adesivo (c) e (d). Imagem de elétrons secundários.

Fonte: o autor

A Figura 14 apresenta detalhes das crateras presentes no aço AISI 304LN, com indícios de desgaste abrasivo (a), desgaste adesivo (b) e (c) e desgaste oxidativo(d).

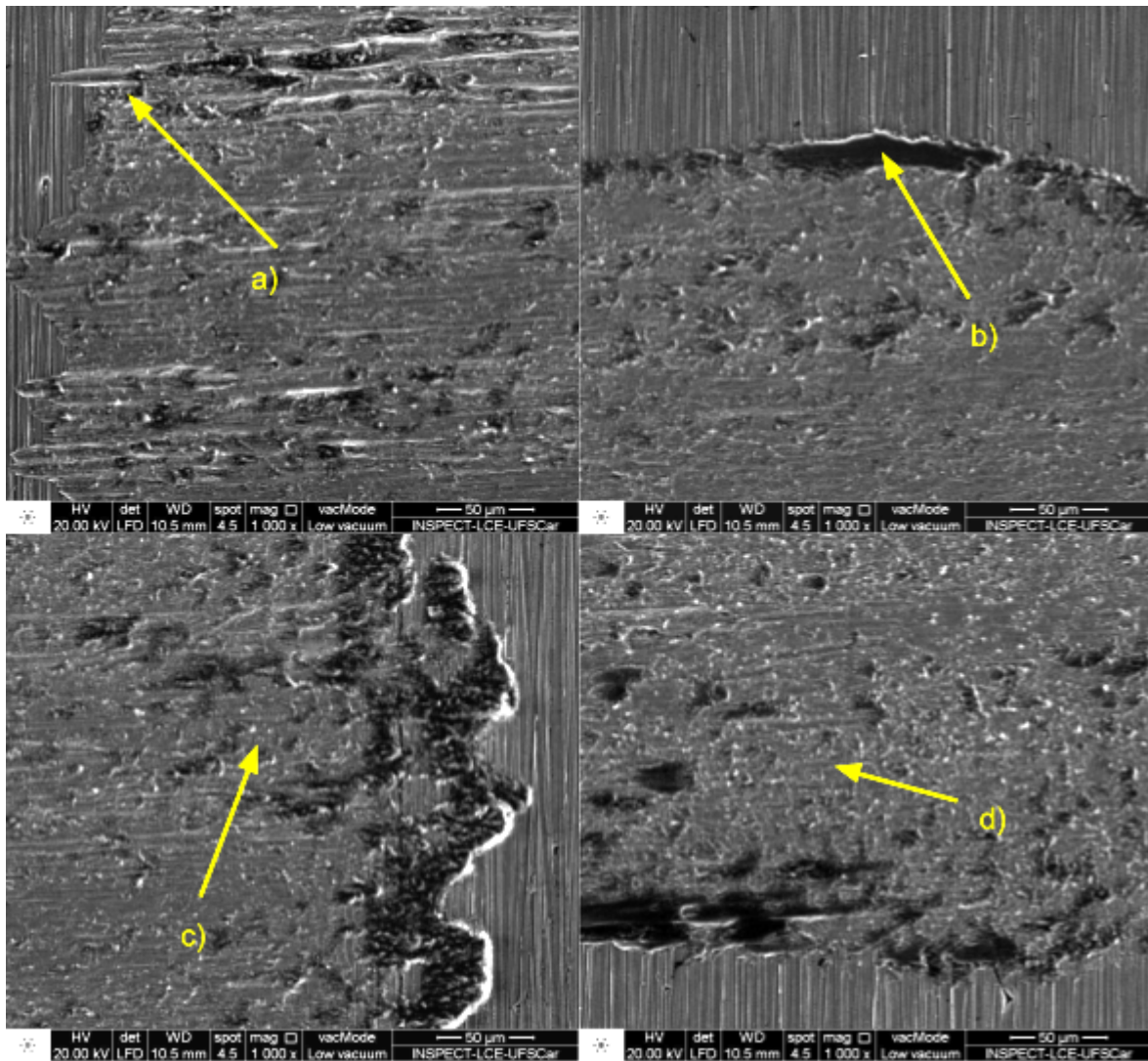


Figura 14 - Detalhes da cratera do aço AISI 304 com indícios de desgaste abrasivo (a), desgaste oxidativo (b) e adesivo (c) e (d). Imagem de elétrons secundários.

Fonte: o autor

A Figura 15 mostra detalhes das crateras presentes no aço AISI 420, com indícios de desgaste abrasivo (a), desgaste adesivo (b) e (c) e desgaste oxidativo(d).

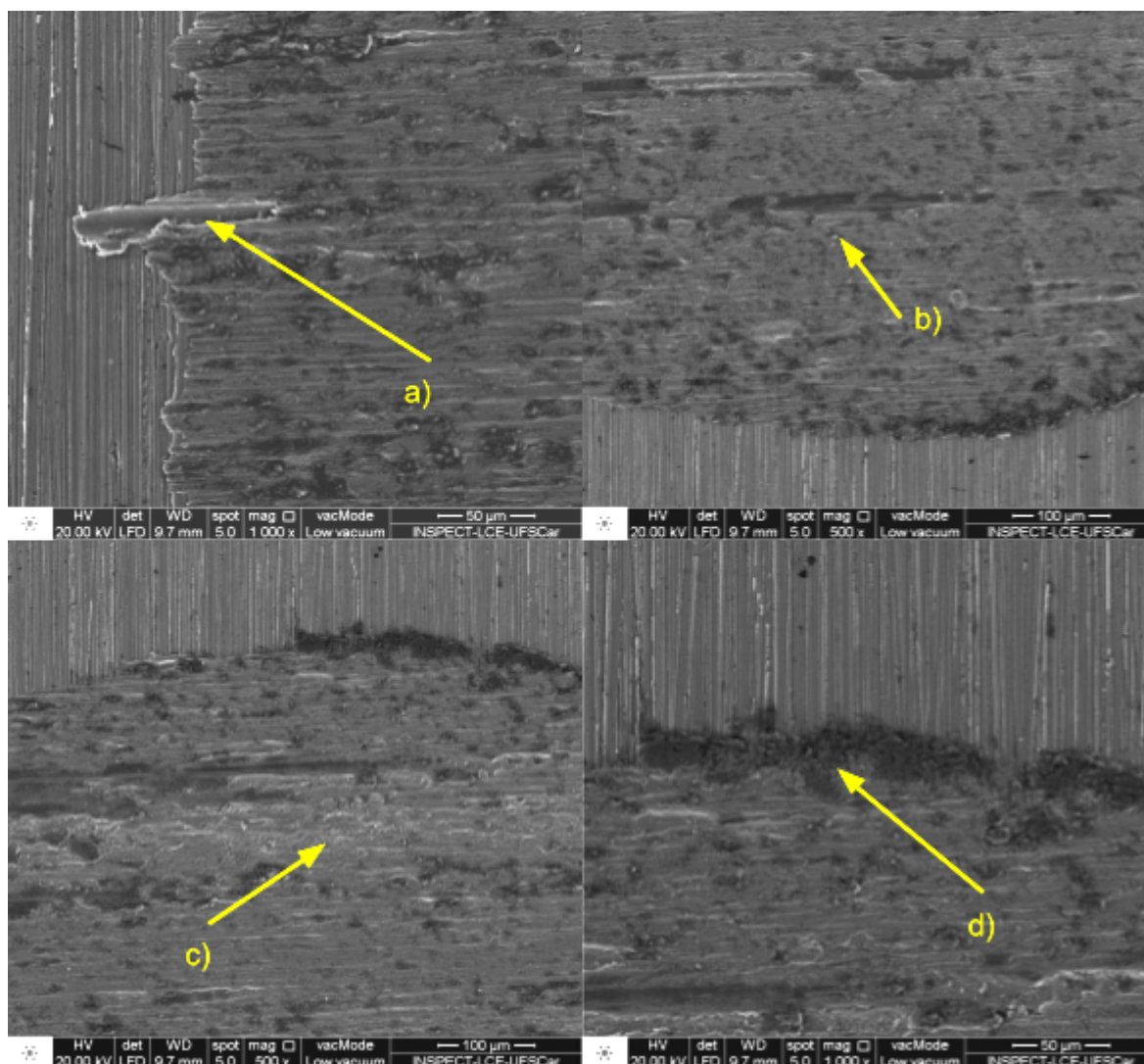


Figura 15 - Detalhes da cratera do aço AISI 420 com indícios de desgaste abrasivo (a), desgaste oxidativo (b) e adesivo (c) e (d). Imagem de elétrons secundários.

Fonte: o autor

Como pode ser observado nas Figuras 13 a 15, para todos os aços sob análise verificou-se a ocorrência de desgaste do tipo abrasivo, oxidativo e adesivo. A predominância de cada mecanismo variou conforme o aço. A ocorrência de óxidos mais expressiva foi observada na liga AISI 201LN, já a liga AISI 420 demonstra sulcos aprofundados, indicando que o desgaste abrasivo foi superior que nos aços austeníticos. Além disso, o diâmetro médio das crateras variou bastante. Por exemplo, para os aços AISI 201LN e 304, foram obtidos os menores valores, em torno de 0,9-1 mm de diâmetro. Já para o aço AISI 420, este valor foi quase o dobro do observado para o aço AISI 201LN, atingindo 1,675 mm de diâmetro e

indicando que houve um grande desgaste no aço martensítico em relação aos aços austeníticos.

Para quantificar melhor a resistência ao desgaste, foram calculadas as taxas de desgaste. A partir dos diâmetros médios obtidos e das equações de (1) a (3), foram determinados os volumes removidos, taxas de desgaste, teor de carbono equivalente, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Diâmetros médios, V_w , k , CE para os aços AISI 201LN, 304 e 420.

Liga AISI	Diâmetro Médio (mm)	V_w (mm ³)	k (mm ³ /N.m)	CE
201LN	0,882	0,00234	3,734E-06	4,94
304	1,082	0,00530	8,468E-06	4,45
420	1,675	0,03041	4,856E-05	2,96

Fonte: o autor

A partir dos dados da Tabela 5 e do teor de CE foi construída a Figura 16, que correlaciona a taxa de desgaste em função do teor de carbono equivalente dos diferentes aços. Nota-se que para menores valores de CE, há um aumento da taxa de desgaste nas condições utilizadas neste estudo. O melhor desempenho entre os materiais estudados é do aço AISI 201LN.

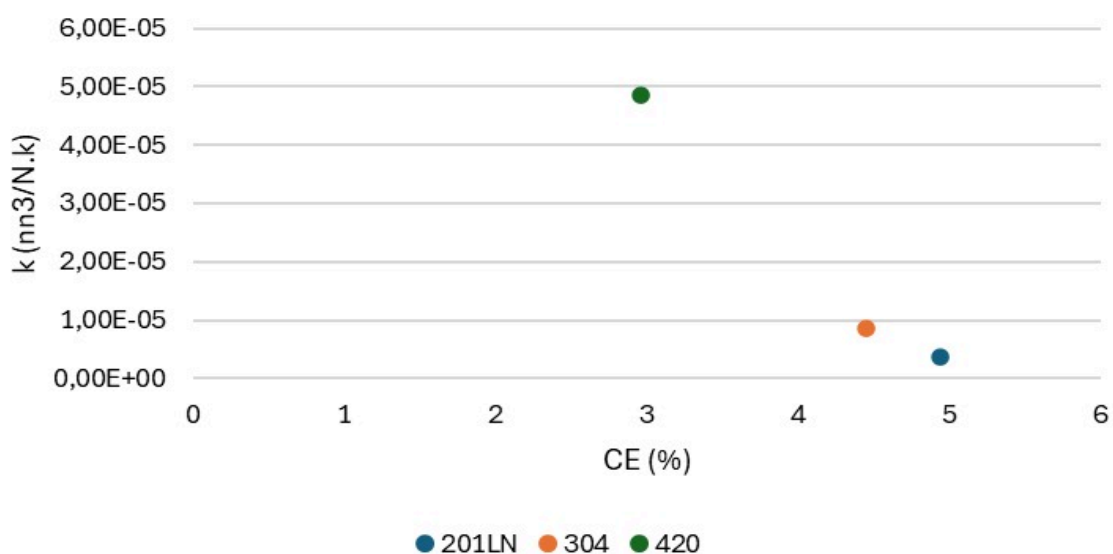


Figura 16 - Taxa de desgaste em função do teor de Carbono Equivalente.

Fonte: o autor

6 DISCUSSÃO

6.1 REQUISITOS DO COMPONENTE

O aço AISI 420, quando utilizado na condição de martensita revenida, apresenta um conjunto de propriedades que o torna adequado para aplicações estruturais sujeitas a desgaste e, ao mesmo tempo, que exijam certa resistência à corrosão. Trata-se de um aço inoxidável martensítico, com teor de cromo entre aproximadamente 12 e 14%, que, após o tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento, desenvolve uma microestrutura predominantemente martensítica, porém aliviada por processos de revenimento que reduzem tensões internas e aumentam a tenacidade do material. Além disso, o maior teor de carbono em relação ao AISI 410, por exemplo, permite a precipitação de carbonetos no revenimento que também contribuem no comportamento mecânico do aço. Nessa condição, o AISI 420 atinge durezas típicas próximas de 200 HB, garantindo boa resistência ao desgaste abrasivo. Essa dureza visa impedir o desgaste acelerado do material polimérico da bucha autolubrificante que fica em contato direto com este componente.

Em aplicações como palhetas diretrizes de turbinas de usinas hidrelétricas, esses requisitos são fundamentais. As palhetas diretrizes são componentes que orientam o fluxo de água para o rotor da turbina, sendo submetidas a esforços mecânicos contínuos, atrito com partículas sólidas em suspensão na água (areia, sedimentos) e ambientes potencialmente corrosivos, principalmente quando ocorrem variações no pH ou contaminações no reservatório. Por isso, o material utilizado precisa ter resistência mecânica suficiente para suportar a pressão hidrodinâmica, considerável dureza para minimizar a perda de material por erosão e desgaste, e resistência à corrosão para evitar falhas prematuras por pite ou corrosão geral.

Comparativamente aos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, o AISI 420

martensítico revenido se destaca por sua dureza e resistência ao desgaste, sendo menos tenaz que os austeníticos, mas apresentando propriedades adequadas para componentes estruturais que não tenham grandes deformações durante o serviço. No entanto, o projeto de turbinas hidrelétricas deve considerar o equilíbrio entre dureza e tenacidade, pois a martensita, mesmo revenida, é mais susceptível à fratura frágil em baixas temperaturas ou sob impactos intensos do que materiais austeníticos como o AISI 304 ou AISI 201LN.

6.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Ao correlacionar os dados da literatura com os resultados experimentais obtidos nos ensaios de desgaste deste trabalho, observa-se que os aços inoxidáveis austeníticos, como os das séries 200 e 300, apresentam resistência significativa ao desgaste abrasivo e adesivo. Esse comportamento está relacionado à elevada capacidade de encruamento, intensificado pela transformação da austenita metaestável em martensita induzida por deformação plástica; esse efeito é chamado de TRIP (*transformation-induced plasticity* ou, em português, plasticidade induzida por transformação) (OLIVEIRA *et al*, 2019). O AISI 201LN, deste trabalho, se destaca por seu baixo custo devido ao menor teor de níquel e pela capacidade de endurecimento por efeito TRIP devido à sua baixíssima energia de falha de empilhamento (EFE). Já o aço AISI 304, também presente nesta investigação, é um aço austenítico tradicional com maior teor de níquel em comparação com o AISI 201LN, porém com comportamento mecânico e resistência à corrosão comparáveis, também experimentando o efeito TRIP devido à sua baixa EFE.

A fim de compreender melhor como se comportam os materiais do presente trabalho, foram coletados dados de limite de escoamento, alongamento total, expoente de encruamento (modelo de Hollomon) e EFE extraídos das referências (ASM INTERNATIONAL, 1990, p. 2044-2068), (OLIVEIRA *et al*, 2019, p. 1666), (OLIVEIRA, ATEM, 2020, p. 6) e das taxas de desgaste calculadas experimentalmente no presente trabalho, e foi construída a Tabela 6.

Tabela 6 - Limite de escoamento, expoente de encruamento, energia de falha de empilhamento (EFE) e taxa de desgaste para os aços AISI 201LN, 304 e 420.

Liga AISI	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento total	Expoente de Encruamento	EFE (J/m ²)	k (mm ³ /N.m) (experimental)
201LN	305	39%	0,51	6,5	3,734E-06
304	350	42%	0,43	15,2	8,468E-06
420	385	19%	0,16	-	4,856E-05

Fonte: adaptado de (ASM INTERNATIONAL, 1990, p. 2044-2068), (OLIVEIRA *et al*, 2019, p. 1666), (OLIVEIRA, ATEM, 2020, p. 6)

Pode-se observar que os aços 201LN e 304, ambos de estrutura austenítica e baixa EFE, apresentaram as menores taxas de desgaste devido ao maior expoente de encruamento, mesmo que tenham dureza similar ao AISI 420. Embora o aço AISI 420 possua um limite de escoamento mais elevado, possui baixa capacidade de encruamento e menor ductilidade, fatos que contribuem na redução da sua resistência ao desgaste. O aço AISI 201LN, em particular, exibiu o menor valor de desgaste entre os três, resultado atribuído à maior tendência de formação de martensita induzida por deformação plástica à frio, efeito favorecido pelo teor inferior de Ni e à adição de Mn e N, elementos estabilizadores da austenita (OLIVEIRA *et al*, 2019).

Comparando-se com a investigação realizada por Oliveira *et al.* (2019), que investigou o comportamento de desgaste erosivo do aço inoxidável austenítico AISI 201LN, comparando-o com os aços AISI 304 (austenítico) e AISI 410 (ferrítico-martensítico), notam-se similaridades com os resultados experimentais deste trabalho. O objetivo foi avaliar a resistência ao desgaste erosivo desses materiais correlacionando com suas propriedades mecânicas e metalúrgicas, considerando também os efeitos sinérgicos de corrosão e desgaste comuns em ambientes agressivos industriais. Os autores determinaram que o aço AISI 201LN também é promissor para aplicações que exigem resistência combinada à corrosão e ao desgaste erosivo, como equipamentos em mineração e agroindústria, devido ao seu baixo custo e melhor desempenho erosivo. O estudo demonstrou que a

escolha de materiais para ambientes erosivos deve considerar não apenas dureza inicial, mas também capacidade de endurecimento superficial por deformação. O aço AISI 410, apesar de inoxidável e de maior dureza inicial, teve desempenho inferior pela baixa ductilidade e ausência de efeito TRIP. Além disso, o aço AISI 304 apresentou um comportamento intermediário entre o AISI 410 e o AISI 201LN nas condições de desgaste avaliadas no estudo, também seguindo a mesma tendência apresentada neste trabalho.

Como já descrito anteriormente, o critério principal estabelecido para o componente real, referente à dureza superficial mínima de 200 HB, o qual foi atendido por todas as amostras ensaiadas. O desempenho superior dos aços AISI 201LN e 304 nos ensaios de desgaste, em comparação ao AISI 420, indica a viabilidade técnica de substituição do aço martensítico atualmente empregado. As propriedades como resistência mecânica, ductilidade e capacidade de encruamento conferem às ligas austeníticas tenacidade e durabilidade adequadas, especialmente em condições de desgaste adesivo e abrasivo. A liga 201LN, em particular, além de atender aos requisitos do componente analisado, apresenta potencial para aplicação em outras partes do sistema, especialmente naquelas que não estão em contato direto com materiais autolubrificantes ou que não operam em regime de imersão contínua, como o sistema de alavancas da turbina, que é sujeito a umidade e a contato contínuo entre peças metálicas.

6.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Embora o estudo tenha indicado a superioridade dos aços inoxidáveis austeníticos em relação aos martensíticos, existem algumas limitações do estudo que precisam ser consideradas antes da substituição de materiais. Apesar da padronização no preparo das amostras, o tamanho de grão e os valores de dureza apresentaram pequenas variações entre os aços analisados. Além disso, os ensaios de desgaste foram realizados sob diferentes condições ambientais, com variações na temperatura e umidade relativa do ar, fatores que podem influenciar nos mecanismos atuantes no processo de desgaste. Os dados referentes ao expoente de encruamento, alongamento e limite de escoamento utilizados para correlação com os resultados experimentais também foram obtidos da literatura e não

calculados diretamente para as amostras testadas no presente estudo, o que representa uma limitação adicional quanto à precisão dessa comparação.

Também, destaca-se que o componente real opera em contato constante com uma peça fabricada em material compósito autolubrificante. Assim, para uma avaliação mais aprofundada da viabilidade de substituição do material, recomenda-se a realização de ensaios específicos que envolvam o contato entre as ligas metálicas avaliadas e o material compósito, de forma a simular com maior fidelidade as condições reais de operação.

Uma completa avaliação e seleção dos aços inoxidáveis AISI 201LN, 304 e 420 para eventual substituição do AISI 420 por outro material, como o próprio 201LN, que apresentou desempenho superior em resistência ao desgaste, requer análises adicionais que vão além dos resultados de ensaios apresentados por este trabalho. Embora o AISI 201LN tenha demonstrado maior resistência ao desgaste devido ao seu efeito TRIP mais pronunciado e menor custo de produção por conter menos níquel, a escolha de materiais para componentes estruturais ou hidráulicos deve considerar um conjunto mais amplo de critérios, incluindo resistência mecânica estática e dinâmica, tenacidade à fratura, resistência à corrosão geral e localizada (principalmente pite e corrosão sob tensão em ambientes clorados ou ácidos), soldabilidade, disponibilidade comercial, facilidade de usinagem, custo de ciclo de vida e compatibilidade metalúrgica com os demais componentes do sistema. Além disso, é necessário avaliar a estabilidade microestrutural do material sob as condições de operação, as consequências do endurecimento por deformação na integridade estrutural e possíveis requisitos normativos ou padrões técnicos do setor hidrelétrico que restrinjam o uso de ligas específicas. Dessa forma, estudos complementares de corrosão, fadiga, análise de tensões residuais e avaliação econômica integrada são indispensáveis para fundamentar uma substituição segura, técnica e economicamente viável para aplicações em palhetas diretrizes, rotores e outros componentes críticos de sistemas hidrelétricos.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a viabilidade de substituição do aço inoxidável martensítico AISI 420 por aços austeníticos de menor custo relativo, mais especificamente os aços AISI 201LN e 304, em componentes submetidos ao desgaste em sistemas hidrelétricos. Para isso, foram realizadas análises metalográficas, ensaios de dureza Brinell, ensaios de desgaste por esfera rotativa e microscopia eletrônica de varredura, além da análise da composição química das amostras.

Os resultados demonstraram que todas as ligas testadas atenderam ao requisito mínimo de dureza superficial de 200 HB, sendo necessária uma deformação a frio de 5% para que a liga 304 atingisse esse valor. Nos ensaios de desgaste, as ligas austeníticas apresentaram desempenho superior em comparação à liga AISI 420, evidenciando menores taxas de desgaste. Esse comportamento está associado ao maior endurecimento por encruamento, característico da decomposição da austenita em martensita pelo efeito TRIP, com destaque para o aço AISI 201LN, cuja taxa de desgaste foi a menor entre as amostras avaliadas.

Os resultados obtidos indicam que os aços AISI 201LN e AISI 304 são candidatos para substituição do aço AISI 420 em aplicações que exigem resistência ao desgaste por deslizamento, além de apresentar potencial para uso em outros componentes do sistema hidrelétrico que não operam em regime de imersão contínua ou em contato direto em juntas metálicas. Entretanto, ressalta-se que algumas limitações dos ensaios realizados, como a variação ambiental durante os testes e a ausência de interação direta com o material compósito real, podem influenciar os resultados. Assim, recomenda-se para trabalhos futuros a realização de ensaios adicionais envolvendo o contato direto entre as ligas metálicas e o compósito autolubrificante, além de variações nos parâmetros do ensaio de desgaste empregado, como rotação e carga, em condições similares às de operação, a fim de validar a aplicabilidade das conclusões obtidas.

8 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Sarah *et al.* **Al–20Sn–1Cu self-lubricating alloy: correlations between microstructure coarsening, mechanical, and application properties.** Journal of Materials Research and Technology, v. 36, p. 7284–7303, 1 Abr 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785425010713?via%3Dihub>>. Acesso em: 25 jun 2025.

ALICJA KRYSZYNA KRELLA. **Degradation and Protection of Materials from Cavitation Erosion: a Review.** Materials, v. 16, n. 5, p. 2058–2058, 2 Mar 2023.

ALLENSTEIN, A.N. *et al.* **Plasma nitriding using high H₂ content gas mixtures for a cavitation erosion resistant steel.** Applied Surface Science, v. 277, p. 15–24, 4 Abr 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433213005230?via%3Dihub>>.

ASM INTERNATIONAL. **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.** Metals Park, Ohio: American Society For Metals, 1990. v. 1. p. 2004–2068

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Friction, Lubrication and Wear Technology.** Metals Park, Ohio: Asm International, 1992. v. 18.

ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE. **Failure Analysis and Prevention.** Materials Park, Oh: Asm International, 1990. v. 11.

CARBÓ, Héctor. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações.** [S.l.]: ArcelorMittal Inox Brasil, Jan 2008. Disponível em: <<https://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>>. Acesso em: 23 jun 2025.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC. C11000 Alloy. Disponível em: <<https://alloys.copper.org/alloy/C11000>>. Acesso em: 24 jul 2025.

CIOCARI, Eduardo e STEFANO FRIZZO STEFENON. **DESAFIOS NA OPERAÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DA BACIA DO RIO URUGUAI.** ResearchGate. [S.l.]: Editora Alternativa. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311983407_DESAFIOS_NA_OPERAÇÃO_DAS_USINAS_HIDRELETRICAS_DA_BACIA_DO_RIO_URUGUAI/figures?lo=1>. Acesso em: 23 jun 2025. , 17 Out 2016

CRUZ, Renato. **INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TERMOMECÂNICO DE REVERSÃO MARTENSÍTICA NAS PROPRIEDADES DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 201LN DEFORMADO VIA ECAP.** 2019. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, 2019.

DAVIS, J R e ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE. **Stainless Steels.** 3. ed. Metals Park, Ohio: Asm International, 1994. v. 7. p. 4–250

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL BRAZILIAN ENERGY BALANCE**. [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Publicacao_sArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 3 jul 2025.

FURLAN, Pedro. **Custos e impactos da geração elétrica por diferentes fontes**. 2021. Monografia (Bacharel em Ciências Econômicas) – Universidade Estadual de Campinas, 2021.

Global Price of Nickel. Disponível em: <<https://fred.stlouisfed.org/series/PNICKUSDM#>>. Acesso em: 23 jun 2025.

GOMES, Mário . **Cavitação Hidrodinâmica Para Tratamento De Águas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente) – Universidade de Coimbra, 2015. Disponível em: <<https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/39013/1/Cavitacao%20hidrodinamica%20%20para%20tratamento%20de%20aguas.pdf>>. Acesso em: 23 jun 2025.

GOOCH, D.J. **Materials issues in renewable energy power generation**. International Materials Reviews, v. 45, n. 1, p. 1–14, Jan 2000.

INSTITUTO ESCOLHAS. **CUSTOS E BENEFÍCIOS DAS FONTES DE GERAÇÃO ELÉTRICA** INSTITUTO ESCOLHAS Agosto de 2018. [S.l: s.n.], Ago 2018. Disponível em: <https://escolhas.org/wp-content/uploads/2018/10/Caderno-Subsidios-e-Emissoes_fi_nal.pdf>. Acesso em: 4 jul 2025.

JONES, John *et al.* **Greaseless Bushings for Hydropower Applications: Program, Testing, and Results**. [S.l: s.n.], 1999. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA371845.pdf>>. Acesso em: 11 jun 2025.

KWOK, C.T. e MAN, H.C. e CHENG, F.T. **Cavitation erosion of duplex and super duplex stainless steels**. Scripta Materialia, v. 39, n. 9, p. 1229–1236, Out 1998.

LI, Ying e CUI, Xueshi e ZHANG, Jin. **A Study on Improving Friction and Wear Performance of Bearing Bush in Radial Piston Hydraulic Motor**. Wear, v. 546-547, p. 205317–205317, 29 Fev 2024.

LIMING, Zhai *et al.* **A review on the large tilting pad thrust bearings in the hydropower units**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 69, p. 1182–1198, 1 Mar 2017.

Manganese Price Forecasts - Energy & Metals Consensus Forecasts. Disponível em: <<https://www.consensuseconomics.com/publications/energy-and-metals-consensus-forecasts/manganese-price-forecasts/>>.

MUÑOZ-CUBILLOS, J. e CORONADO, J.J. e RODRÍGUEZ, S.A. **On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels**. Wear, v. 428-429, p. 24–31, 1 Mar 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164818307993?via%3Dihub>>.

OLIVEIRA, Ana Paula *et al.* **Erosive Wear Study of the AISI 201LN Stainless Steel: A Comparison with the AISI 304 and AISI 410 Stainless Steels.** Metallurgical and Materials Transactions A, v. 50, n. 4, p. 1663–1671, 31 Jan 2019. Acesso em: 3 jul 2025.

OLIVEIRA, Marcelo e ATEM, Eduardo. **Failure Prediction of AISI 420 Martensitic Stainless Steel Using the Theory of Critical Distances.** Materials Research, v. 23, n. 6, 1 Jan 2020. Acesso em: 3 jul 2025.

OUR WORLD IN DATA. **Impacts of Energy Production Data Explorer.** Our World in Data. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/explorers/impacts-of-energy-sources?Impact+metric=Greenhouse+gas+emissions>>. Acesso em: 3 jul 2025. , 2021

PECKNER, Donald e IRVING MELVIN BERNSTEIN. **Handbook of Stainless Steels.** [S.l.]: McGraw-Hill Companies, 1977.

Principais características técnicas Português - Itaipu Binacional. [S.l.: s.n.], [S.d.]. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/af_df/2202_023_revista_aspectos_tecnicos_bizuarios_018.pdf>.

SAENZ-BETANCOURT, C.C. e RODRÍGUEZ, S.A. e CORONADO, J.J. **Effect of boronising on the cavitation erosion resistance of stainless steel used for hydromachinery applications.** Wear, v. 498-499, p. 204330, 22 Mar 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164822000953?via%3Dihub>>.

SANTOS, L.L. e CARDOSO, R.P. e BRUNATTO, S.F. **Behavior of the reversed austenite in CA-6NM martensitic stainless steel under cavitation.** Wear, v. 454-455, p. 203322, 1 Maio 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164819318423?via%3Dihub>>.

SHARMA, Shubham e GANDHI, Bhupendra K. **Erosion Wear Behavior of Martensitic Stainless Steel Under the Hydro-Abrasive Condition of Hydropower Plants.** Journal of materials engineering and performance (Print), v. 29, n. 11, p. 7544–7554, 27 Out 2020.

SIEGERENG. **Foto De Corte De Turbina Hidráulica.** Siegereng.com.br. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.siegereng.com.br/artigos>>. Acesso em: 23 jun 2025. , 2016

SILVA, Andre e MEI, Paulo. **Aços e Ligas Especiais.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. p. 302–312

STACHOWIAK, Gwidon W. (Org.). **Wear - Materials, Mechanisms and Practice.** Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2005. v. 7. p. 9–35

SZALA, Miroslaw *et al.* **Cavitation Erosion and Sliding Wear Mechanisms of AlTiN and TiAlN Films Deposited on Stainless Steel Substrate.** Coatings, v. 9, n.

5, p. 340, 25 Maio 2019. Acesso em: 30 nov 2020.

Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024. v. 03.01. Disponível em: <<https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0112-24%7Cen-US>>. Acesso em: 29 jun 2025.

THAPAR, OD. **Modern Hydroelectric Engineering Practice in India.** Disponível em: <<https://iitr.ac.in/Departments/Hydro%20and%20Renewable%20Energy%20Department/Miscellaneous/Modern%20Hydroelectric%20Engg%20Practice%20by%20Prof%20OD%20Thapar.html>>. Acesso em: 11 jun 2025.

The Changing Role of hydropower: Challenges and Opportunities. [S.l.]: IRENA, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Changing_role_of_hydropower_2023.pdf>.

TONG, Colin. **Introduction to Materials for Advanced Energy Systems.** [S.l.]: Springer Nature, 2018. Acesso em: 11 jun 2025.

WANG, Yunxia e YAN, Fengyuan. **Tribological properties of transfer films of PTFE-based composites.** *Wear*, v. 261, n. 11-12, p. 1359–1366, Dez 2006. Acesso em: 11 abr 2022.