



**CONFORME SOLICITAÇÃO DO AUTOR, ESTA
PRODUÇÃO INTELECTUAL POSSUI RESTRIÇÃO
DE ACESSO**

**CAXIAS DO SUL
2025**

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

MATHEUS TUZZIN

**EFEITO DA ADIÇÃO DE ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS A QUENTE DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS APLICADOS A
DISCOS DE FREIO**

CAXIAS DO SUL

2025

MATHEUS TUZZIN

**EFEITO DA ADIÇÃO DE ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS A QUENTE DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS APLICADOS A
DISCOS DE FREIO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais.

Orientador: Prof. Robinson Carlos Dudley Cruz, Dr.

Caxias do Sul

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

T968e Tuzzin, Matheus

Efeito da adição de elementos de liga nas propriedades mecânicas a quente de ferros fundidos cinzentos aplicados a discos de freio [recurso eletrônico] / Matheus Tuzzin. – 2025.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2025.

Orientação: Robinson Carlos Dudley Cruz.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Ferro fundido. 2. Microestrutura. 3. Desgaste mecânico. 4. Metais - Fadiga. 5. Materiais. I. Cruz, Robinson Carlos Dudley, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 669.131.6

Catálogo na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Márcia Servi Gonçalves - CRB 10/1500

MATHEUS TUZZIN

**EFEITO DA ADIÇÃO DE ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS A QUENTE DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS APLICADOS A
DISCOS DE FREIO**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 24 de outubro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Alexandre Vieceli, Dr.
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Prof. Giovani Dambros Telli, Dr.
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Leonardo Pereira, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais.

Prof^a. Janaina da Silva Crespo, Dr^a
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Robinson Carlos Dudley Cruz, Dr.
Orientador

Caxias do Sul, 2025.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o soberano criador, por ter me fortalecido e sustentado para concluir mais essa etapa.

A minha amada noiva Indianara, amiga, companheira e guerreira, que nunca mediu esforços para me apoiar e incentivar ao longo de todo esse curso.

Aos meus pais, Zulmira e Baltazar (*in memoriam*), por sempre acreditarem em mim e por terem abdicado de suas vidas em prol das realizações e da felicidade de seus filhos. Ao meu irmão Glaiton, por sua preocupação, carinho e incentivo.

Ao Instituto Hercílio Randon (IHR), empresa que viabilizou a realização desse curso me concedendo as horas necessárias para as aulas, o tema de pesquisa e toda a infraestrutura necessária para realização desta pesquisa. Aos colegas Angelo Pradella Tilton e Carlos Henrique Raposo Lopes, pela grande ajuda na realização de ensaios experimentais e discussão de resultados.

Ao meu orientador, Prof. Robinson Cruz, que confiou no meu projeto de pesquisa, pelo apoio e pelos valiosos ensinamentos durante o curso.

À empresa Fremax e a empresa Frasle Mobility, que viabilizaram a realização da fundição dos exemplares, bem como os dinamômetros para testes dos mesmos, fundamentais para os resultados desse trabalho.

Por fim, aos professores e colegas, pelo conhecimento que me ajudaram a adquirir.

Meus sinceros agradecimentos.

"No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, à dedicação, não existe meio-termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz."

Ayrton Senna

RESUMO

O presente trabalho avaliou o impacto de modificações metalúrgicas em um ferro fundido cinzento FC200 destinado à aplicação em discos de freio, por meio da adição controlada de elementos de liga: cromo (0,15 %), vanádio (0,1 %), molibdênio (0,3 %), cobre (0,15 %) e nióbio (0,07 %), todos em porcentagem em peso. Comparada à liga base, a liga modificada apresentou propriedades mecânicas superiores: a resistência à tração aumentou 70 % em temperatura ambiente, mantendo um ganho médio de 79 % a quente em toda faixa de temperatura, e demonstrou estabilidade nas propriedades mecânicas a quente, com apenas 1 % de perda de resistência até 250 °C (contra 12 % da liga base). As durezas Brinell e Vickers também cresceram, em média, 34 % e 46 %, respectivamente. A microestrutura da liga modificada revelou uma redução de 54,5 % na fração de ferrita (de 1,1 % para 0,5 %) e um aumento na fração volumétrica de perlita (de 86,6 % para 89,3 %), confirmando a formação de uma matriz predominantemente perlítica. Essa alteração foi acompanhada por um refinamento microestrutural, evidenciado pela redução do teor de grafita de 12,4 % para 10,2 % e pelo aumento no número de veios finos. No desempenho em serviço, a resistência à fadiga térmica aumentou 56 % na iniciação de trincas e 16 % na falha catastrófica. Conclui-se que as modificações metalúrgicas promoveram um material com desempenho mecânico superior, caracterizado por maior estabilidade mecânica e resistência à fadiga em aplicações de alta exigência.

Palavras-chave: Ferro Fundido Cinzento; Modificações Metalúrgicas; Propriedades Mecânicas a Quente; Fadiga Térmica; Microestrutura.

ABSTRACT

The present work evaluated the impact of metallurgical modifications on a grey cast iron FC200 intended for brake disc applications through the controlled addition of alloying elements: chromium (0.15 wt. %), vanadium (0.10 wt. %), molybdenum (0.30 wt. %), copper (0.15 wt. %), and niobium (0.07 wt. %). Compared to the base alloy, the modified alloy exhibited superior mechanical properties, with a 70 % increase in tensile strength at room temperature and an average gain of 79 % under elevated temperatures over the entire temperature range evaluated. In addition, the modified alloy demonstrated enhanced high-temperature mechanical stability, with only a 1 % reduction in tensile strength up to 250 °C, compared to a 12 % loss observed in the base alloy. Brinell and Vickers hardness values increased by an average of 34 % and 46 %, respectively. Microstructural analysis revealed a 54.5 % reduction in the ferrite fraction (from 1.1 % to 0.5 %) and an increase in the pearlite volume fraction (from 86.6% to 89.3%), confirming the formation of a predominantly pearlitic matrix. This microstructural modification was accompanied by refinement effects, evidenced by a reduction in the graphite fraction from 12.4 % to 10.2 % and an increase in the number of fine graphite flakes. Regarding in-service performance, thermal fatigue resistance increased by 56 % at crack initiation and by 16 % at catastrophic failure. The results demonstrate that the proposed metallurgical modifications led to a material with superior mechanical performance, characterized by improved mechanical stability and enhanced thermal fatigue resistance for high-demand brake disc applications.

Keywords: Gray Cast Iron; Metallurgical Modifications; Thermo Mechanical Property; Thermal Fatigue; Microstructure.