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

CAXIAS DO SUL
2025

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC
MESTRADO PROFISSIONAL

FILIPE FERNANDO DA CUNHA

A INFLUÊNCIA DO NIÓBIO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE LIGA DE FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

CAXIAS DO SUL
2025

FILIPE FERNANDO DA CUNHA

A INFLUÊNCIA DO NIÓBIO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE LIGA DE FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

Dissertação apresentada à Universidade de Caxias do Sul como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação e Produção de Componentes, Ferramentas e Matrizes.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vieceli

CAXIAS DO SUL

2025

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

C972i Cunha, Filipe Fernando da
A influência do nióbio na resistência à fadiga de liga de ferro fundido nodular austemperado [recurso eletrônico] / Filipe Fernando da Cunha. – 2025.
Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.
Orientação: Alexandre Vieceli.
Modo de acesso: World Wide Web
Disponível em: https://repositorio.ucs.br

1. Metais - Fadiga. 2. Ferro fundido - Propriedades mecânicas. 3. Nióbio. I. Vieceli, Alexandre, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.178.3

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

A INFLUÊNCIA DO NIÓBIO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE LIGA DE FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

Dissertação apresentada à Universidade de Caxias do Sul como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação e Produção de Componentes, Ferramentas e Matrizes

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vieceli

Aprovado em 21/08/2025.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof.ª Dr.ª Maria Cristina Moré Farias
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dr. Leonardo Pereira
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação não seria possível sem a presença, o apoio e a dedicação de pessoas que caminharam ao meu lado durante toda esta jornada.

Em primeiro lugar, agradeço com todo o meu coração à minha esposa, Chris Royes Shardosim, pela compreensão, paciência e apoio incondicional em todos os momentos. Sua força e incentivo foram a base que sustentou cada passo dado até aqui. Este trabalho também é seu.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Vieceli, pela dedicação, pela orientação precisa e pelo apoio constante. Suas contribuições foram inestimáveis e ajudaram a transformar esta pesquisa em algo de valor acadêmico e prático.

À Metalúrgica Rio, pela oportunidade única de participar de um projeto de tamanha relevância, e a todos os seus colaboradores, que, com expertise e dedicação, contribuíram diretamente para o sucesso desta pesquisa. À empresa ANGRA, pela realização dos tratamentos térmicos que viabilizaram etapas fundamentais do estudo.

Expresso também minha gratidão aos respeitáveis membros da banca, cujas análises e reflexões enriqueceram profundamente este trabalho.

À Universidade de Caxias do Sul (UCS), instituição que proporcionou a base sólida de conhecimento e me deu a oportunidade de trilhar essa caminhada acadêmica.

À minha família, que sempre foi meu alicerce e porto seguro em todas as fases da vida, e aos meus amigos, que me apoiaram e foram parte essencial na preparação dos corpos de prova, contribuindo de forma significativa para a realização deste trabalho.

Por fim, em memória e com profunda emoção, agradeço ao meu pai, por tudo o que representou em minha vida. Sua lembrança continua sendo fonte de inspiração e motivação para que eu buscasse alcançar este objetivo.

A todos vocês, meu mais sincero muito obrigado.

RESUMO

Esta dissertação investigou a influência da adição de nióbio nas propriedades mecânicas e na resistência à fadiga de um ferro fundido nodular austemperado (ADI – *Austempered Ductile Iron*), com o objetivo de avaliar seu potencial como substituto parcial do molibdênio e explorar aplicações industriais. Foram produzidas três ligas com teores de nióbio de 0 %, 0,23 % e 0,29 %, submetidas ao tratamento térmico de austêmpera. As amostras foram caracterizadas quanto à composição química, microestrutura, propriedades mecânicas (tração, impacto, dureza) e resistência à fadiga por flexão rotativa. A adição de nióbio reduziu a nodularização e a densidade de nódulos, além de promover a formação de carbonetos de nióbio (NbC), confirmados por MEV e EDS. Observou-se aumento significativo no limite de escoamento com 0,23 % de Nb e uma diminuição do alongamento com 0,29 % de Nb. A tenacidade apresentou comportamento não crescente, com melhora para 0,23 % e queda para 0,29 %, enquanto a dureza aumentou com o teor de Nb, porém com maior dispersão na liga de maior concentração. Nos ensaios de fadiga, a liga sem Nb apresentou alta dispersão e baixo coeficiente de correlação ($R^2 = 0,3$), ao passo que as ligas com nióbio mostraram maior uniformidade e previsibilidade dos dados ($R^2 = 0,80$ e 0,76). No entanto, o limite de fadiga para vida infinita foi reduzido para 0,23 % de Nb e parcialmente recuperada com 0,29 % de Nb. Os resultados indicam que a adição de nióbio contribui para o aumento da resistência mecânica e para a diminuição da variabilidade no comportamento da fadiga para vida finita, sendo o teor de 0,23 % o mais promissor para aplicações que demandam melhor confiabilidade. Os resultados indicam que a adição de nióbio, como elemento de liga, pode contribuir para a melhoria de propriedades mecânicas do ferro fundido nodular austemperado. Entretanto, a aglomeração de carbonetos primários de NbC tende a prejudicar a tenacidade, ductilidade e resistência à fadiga.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular austemperado. Nióbio. Fadiga. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This master's thesis investigates the influence of niobium addition on the mechanical properties and fatigue strength of austempered ductile iron (ADI), with the aim of evaluating its potential as a partial substitute for molybdenum and exploring industrial applications. Three alloys were produced with niobium contents of 0 %, 0.23 %, and 0.29 %, and subjected to austempering heat treatment. The samples were characterized in terms of chemical composition, microstructure, mechanical properties (tensile strength, impact strength, hardness), and rotating bending fatigue strength. The addition of niobium reduced nodularity, and nodule density and promoted the formation of niobium carbide (NbC), confirmed by SEM and EDS analyses. A significant increase in yield strength was observed with 0.23 % Nb, along with a decrease in elongation at 0.29 % Nb. Toughness showed a non-monotonic trend, improving at 0.23 % and declining at 0.29 %, while hardness increased with niobium content, although with greater dispersion in the alloy with the highest concentration. In fatigue tests, the alloy without niobium showed high data dispersion and a low correlation coefficient ($R^2 = 0.3$), whereas the niobium-containing alloys exhibited greater uniformity and predictability ($R^2 = 0.80$ and 0.76). However, the endurance limit was reduced by 0.23 % Nb and was partially recovered with 0.29 % Nb. The results indicate that niobium addition contributes to increased mechanical strength and reduced variability in fatigue behavior for finite life, with 0.23 % Nb being the most promising content for applications requiring higher reliability. The results suggest that niobium, as an alloying element, can enhance the mechanical properties of austempered ductile iron. Nevertheless, the agglomeration of primary NbC carbides tends to impair toughness, ductility, and endurance limit.

Keywords: Austempered Ductile Iron. Niobium. Fatigue. Mechanical properties.