

UNIVERSIDADE DE UBERABA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL

MARCOS PAULO MEIRA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO FERRO FUNDIDO CINZENTO COM ADIÇÃO
DE NIÓBIO PARA TRABALHO A QUENTE**

UBERABA, MG
2020

MARCOS PAULO MEIRA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO FERRO FUNDIDO CINZENTO COM ADIÇÃO
DE NIÓBIO PARA TRABALHO A QUENTE**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Orientador:

Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima

Coorientador:

M.Sc. Francisco Manoel Perez do Nascimento

UBERABA, MG

2020

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

- M478e Meira, Marcos Paulo.
Estudo das propriedades do ferro fundido cinzento com adição de nióbio para trabalho a quente / Marcos Paulo Meira. – Uberaba, 2020.
101 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química, concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.
Orientador: Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima.
Coorientador: Prof. M. Sc. Francisco Manoel Perez do Nascimento.
1. Ferro fundido. 2. Nióbio. 3. Molibdênio. I. Lima, Euclides Antônio Pereira de. II. Nascimento, Francisco Manoel Perez do. III. Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química. IV. Título.

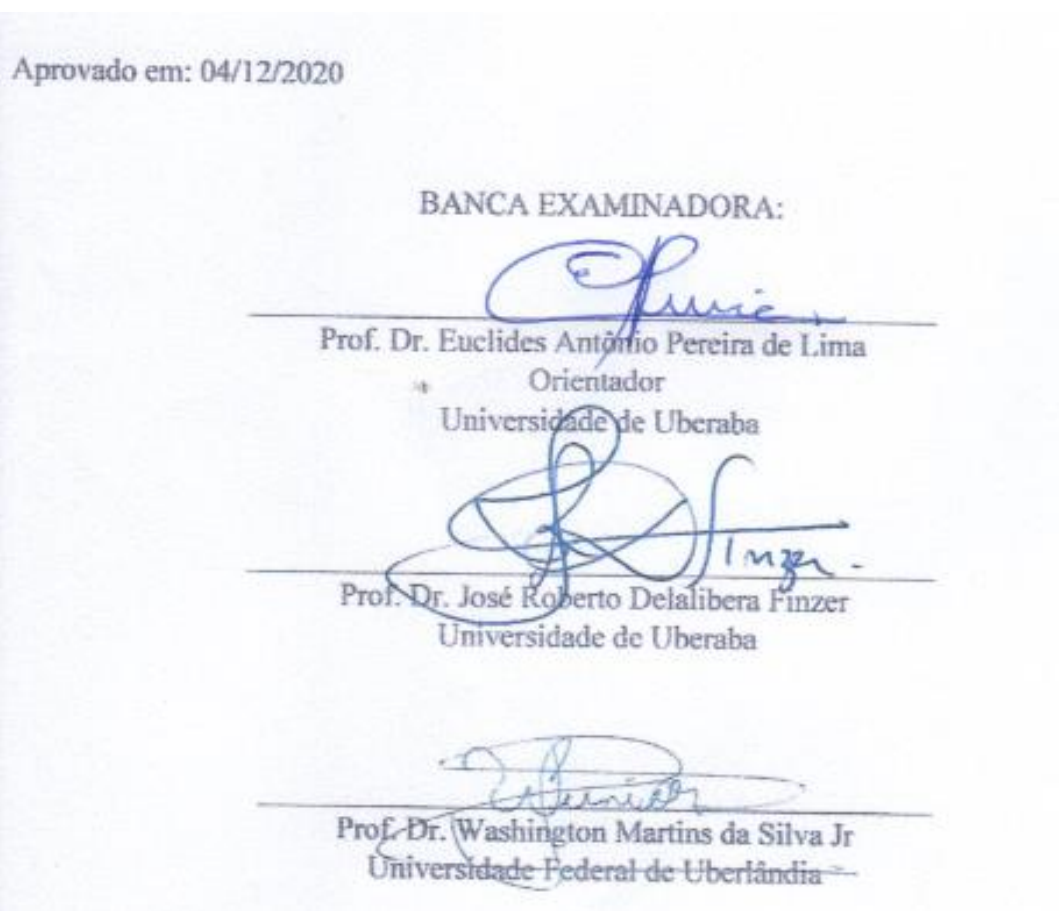
CDD 669.141

MARCOS PAULO MEIRA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO FERRO FUNDIDO CINZENTO COM ADIÇÃO
DE NIÓBIO PARA TRABALHO A QUENTE**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.



UBERABA, MG
2020

Este trabalho é dedicado à minha família e aos meus queridos colegas de trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por ter me mantido na trilha certa durante este projeto de pesquisa com saúde e forças para chegar até o final.

Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deu durante toda a minha vida.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima, e ao meu coorientador, M.Sc. Francisco Manoel Perez do Nascimento, pelo incentivo e pela dedicação e tempo ao meu projeto de pesquisa.

Também quero agradecer à CBMM-Companhia brasileira de Metalurgia e Mineração, pela confiança depositada na minha proposta de projeto durante todo o processo.

RESUMO

Com o crescimento do mercado automobilístico, o desenvolvimento de novos materiais que podem proporcionar a este segmento melhor desempenho, segurança e conforto torna-se um grande desafio para a área de engenharia. Um dos principais materiais na fabricação de peças automobilísticas é o ferro fundido cinzento, material utilizado na fabricação de discos de freios. O ferro fundido cinzento tem aplicação em peças onde existe a necessidade de uma boa resistência mecânica associada a uma boa resistência à fadiga térmica para suportar as cargas e tensões térmicas a que são submetidas. A proposta deste estudo foi avaliar o comportamento mecânico e físico de quatro ligas de ferro fundido cinzento de matriz perlítica utilizadas para a fabricação de discos de freios. Para tanto, quatro ligas denominadas liga base, liga base + 0,10% Nb, liga base + 0,20% Nb e liga base + 0,15% Mo foram fundidas e posteriormente avaliadas quanto a: composição química, resistência à tração nas temperaturas de 22°C, 380°C, 480°C, 580°C e 680°C, dureza, microestrutura e difusividade térmica. Nos testes de resistência à tração nas temperaturas de 22°C a 680°C, pôde-se observar que não existe diferença significativa entre as ligas base com adição de 0,20% Nb e 0,15% Mo, e essas ligas apresentam valores superiores de limite de resistência à tração em relação à liga base. Quando adicionados na liga base, os elementos nióbio ou molibdênio aumentam a dureza do ferro fundido cinzento, pois são fortes formadores de carbonetos de alta dureza que potencializam o refino da perlita, fato que contribui significativamente para a elevação dos resultados de dureza. Com relação à microestrutura, foi possível observar que a matriz metálica é muito similar para todas as ligas, com uma tendência a diminuir o tamanho da grafita quando são adicionados os elementos nióbio ou molibdênio. Através dos ensaios de difusividade, pôde-se observar que a liga denominada liga base + 0,10% Nb apresenta um resultado melhor de difusividade em todas as temperaturas testadas (380°C, 480°C, 580°C e 680°C). Este fato pode ser atribuído à maior quantidade de grafita e à adição de nióbio no teor de 0,10%. Associada aos bons resultados de resistência à tração, essa constatação indica que a liga com teor de nióbio de 0,10% pode ser uma excelente alternativa para aplicações susceptíveis a temperaturas elevadas, principalmente temperaturas de trabalho de até 580°C.

Palavras Chave: Ferro fundido cinzento, nióbio, molibdênio, discos de freios.

ABSTRACT

A growing automobile market has demanded the development of new materials able to provide the segment with better performance, safety and comfort, which is a great challenge to the engineering sector. Gray cast iron is one of the most important materials used to fabricate automotive parts, including brake discs. It is appropriate for those parts that require good mechanical and thermal fatigue to withstand the loads and thermal strain put on them. The aim of this study is to evaluate the mechanical and physical performances of four gray cast iron alloys of perlite matrix used to fabricate brake discs. For this purpose, four alloys – base cast iron, base cast iron + 0.10% Nb, base cast iron + 0.20% Nb, and base cast iron 0.15% Mo – were cast and then studied for their chemical composition, tensile strength (at temperatures of 22°C, 380°C, 480°C, 580°C, and 680°C), hardness, microstructure, and thermal diffusivity. Tensile strength tests at temperatures of 22°C to 680°C showed that there is no significant difference between the 0.20% Nb and the 0.15% Mo base cast iron alloys and these alloys have a higher tensile resistance comparing to that of the base alloy. Either the niobium or the molybdenum alloyed gray cast iron showed an increase in hardness, for these elements are strong carbide builders. Carbides enhance perlite refining that significantly contributes to increase hardness results. Regarding its microstructure, the metallic matrix proved to be very similar in all four alloys, and the graphite size tends to decrease in the niobium and molybdenum alloyed irons. Diffusivity tests showed that the base cast iron + 0.10% Nb has better diffusivity results at all tested temperatures (380°C, 480°C, 580°C, and 680°C). This fact may be associated with the increased amount of graphite and the addition of 0.10% niobium content. This evidence, together with good tensile strength results, indicates that the alloy with added niobium at 0.10% can be an excellent alternative to applications susceptible to high temperatures, especially those of up to 580°C.

Keywords: Gray cast iron, niobium, molybdenum, break discs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Produção mundial estimada de automóveis de 2000 a 2019	2
Figura 2	Utilização de materiais em automóveis europeus, 2005.....	2
Figura 3	Micrografias dos ferros fundidos cinzento, nodular, grafita compactada maleável e branco	6
Figura 4	Diagrama de equilíbrio Fe-C	7
Figura 5	Representação esquemática da solidificação e resfriamento lento dos aços e dos ferros fundidos	8
Figura 6	Representação esquemática da solidificação do ferro fundido cinzento eutético estável e metaestável	9
Figura 7	Curvas de resfriamento das ligas hipoeutética (1), eutética (2) e hipereutética (3)	10
Figura 8	Curvas de resfriamento de um ferro fundido	11
Figura 9	Curvas de resfriamento de um ferro fundido hipoeutético	12
Figura 10	Relação entre % C, TL e TS	14
Figura 11	Cristalografia da grafita (a); Direção de crescimento da grafita lamelar (b).....	15
Figura 12	Curva de resfriamento típica para a formação do tipo de grafita obtido	16
Figura 13	Representação do tamanho de grafita de acordo com a norma ASTM A247, 2017, tipo A; B; C; D e E	17
Figura 14	Representação do tipo de grafita no ferro fundido cinzento de acordo com a norma ASTM A247, 2017, tipo A (grafitas de veios alongados); B (grafitas de núcleos eutéticos); C (grafitas grosseiras); D (dendritas de ferrita ou perlita) e E (dendritas de ferrita ou perlita e steadita).....	17
Figura 15	Efeito dos elementos de liga na temperatura do eutético estável e metaestável....	19
Figura 16	Diagrama de equilíbrio metaestável Fe-C-Si para quatro diferentes teores de silício	19
Figura 17	Quantidade aproximada de carbono e silício em ligas ferrosas.....	20
Figura 18	Influência nas temperaturas de equilíbrio eutético de elementos formadores de carbonetos	22
Figura 19	Influência do teor percentual de molibdênio em ferro fundido cinzento, 0,16% e 0,60%Cr, no valor máximo de resistência à tração quando exposto a diferentes temperaturas por 100 horas	23

Figura 20	Morfologias de grafite nos diferentes ferros fundidos (a); GCI (b); GCI-Sn (c); GCI-Nb (d); GCI-Sn-Nb.....	24
Figura 21	Efeito da adição de nióbio no aumento da dureza e evolução do desgaste no ferro fundido	25
Figura 22	Efeito dos elementos de liga na grafitação e formação de carbonetos	26
Figura 23	Grupos de inoculantes.....	27
Figura 24	Efeito do carbono equivalente sobre o limite de resistência ferros fundidos cinzentos	28
Figura 25	Relação entre limite de resistência e dureza para ferro fundido cinzento de acordo com a Norma ABNT NBR 6589/1986.....	30
Figura 26	Variáveis da microestrutura e de processos que podem influenciar no limite de resistência à tração em ferro fundido cinzento	30
Figura 27	Efeito do carbono equivalente na difusividade.....	34
Figura 28	Capacidade de amortecimento de vibração de aço e ferro fundido grafítico pelo método Foppel-Pertz.....	36
Figura 29	Forno acoplado à máquina de ensaios de resistência à tração a quente	37
Figura 30	Resistência a quente (LR) de ferro fundido cinzento com diferentes combinações de elemento de liga	37
Figura 31	Modelo de disco de freio automobilístico utilizado como corpo de prova.....	41
Figura 32	Modelos de disco de freio automobilístico	42
Figura 33	Moldes de disco de freio automobilístico	42
Figura 34	Esquema e equipamento de análise térmica marca Heraeus ElectroNite	43
Figura 35	Forno de indução.....	43
Figura 36	Sequência do carregamento das matérias primas e dos insumos	44
Figura 37	Corpo de Prova (CDP) segundo norma ASTM E21:2017 utilizado nos ensaios de tração até ruptura a elevadas temperaturas	45
Figura 38	Máquina de ensaios de tração mecânica universal a quente (a); Máquina de tração tipo EMIC (b)	46
Figura 39	Amostras retiradas das regiões Pista e Cubo dos discos de freios brutos de fundição	47
Figura 40	Calota esférica impressa no material ensaiado, dureza Brinell	48
Figura 41	Espectrômetro de emissão ótica EPECTROMAXX	49
Figura 42	Forno e sensores para análise de difusividade	50
Figura 43	Corpo de prova usinado para ensaio de difusividade.....	51

Figura 44	Resultado de carbono equivalente das ligas: base, 0,10%Nb, 0,20%Nb e 0,15%Mo	55
Figura 45	Resultados de análise de distribuição dos dados de resistência máxima à tração ambiente (22°C) em corpos de prova retirados de disco de freio bruto de fusão ..	56
Figura 46	Resultados das análises de resistência máxima à tração na temperatura de 380°C em corpos de prova retirados de disco de freio bruto de fusão	56
Figura 47	Resultados das análises de resistência máxima à tração na temperatura de 480°C tração a 380°C, 480°C, 580°C e 680°C	57
Figura 48	Resultados das análises de resistência máxima à tração na temperatura de 580°C em corpos de prova retirados de disco de freio bruto de fusão	57
Figura 49	Resultados das análises de resistência máxima à tração na temperatura de 680°C em corpos de prova retirados de disco de freio bruto de fusão	58
Figura 50	Comparativo dos resultados médios de resistência à tração em diferentes temperaturas.....	58
Figura 51	Resultados da análise de dureza Brinell de amostra do cubo dos discos de freio	60
Figura 52	Resultados da análise de dureza Brinell de amostra da pista dos discos de freio	61
Figura 53	Análise metalográfica para o corpo de prova liga base sem ataque (a) e com ataque Nital 5% (b)	61
Figura 54	Análise metalográfica para o corpo de prova de liga base + 0,10% Nb sem ataque (a) e com ataque Nital 5% (b)	62
Figura 55	Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,20%Nb sem ataque (a) e com ataque Nital 5% (b); presença de carbonetos tipo NbC (c)	63
Figura 56	Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,15%Mo sem ataque (a) e com ataque Marble (b)	64
Figura 57	Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base no teste de tração a 380°C, 480°C. 580°C e 680°C	64
Figura 58	Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,10%Nb no teste de tração a 380°C, 480°C. 580°C e 680°C.....	65
Figura 59	Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,20%Nb no teste de tração a 380°C, 480°C. 580°C e 680°C.....	65
Figura 60	Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,15% Mo no teste de tração a 380°C, 480°C. 580°C e 680°C	66
Figura 61	Resultados da quantificação da grafita com distribuição dos dados <i>boxplots</i>	68

Figura 62	Análise metalográfica de quantificação da grafita utilizando software <i>Zeiss</i>	69
Figura 63	Análise metalográfica de quantificação das células eutéticas de acordo com ABNT NBR 6849 [sem data]	70
Figura 64	Resultados da quantificação das células eutéticas com distribuição dos dados <i>boxplots</i>	71
Figura 65	Ensaio de difusividade térmica nas temperaturas de 380°C, 480°C, 580°C e 680°C, referentes às ligas: base, base + 0,10% Nb, base + 0,20% Nb e base + 0,15% Mo	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composições químicas típicas de cada classe de ferro fundido	7
Tabela 2	Propriedades mecânicas e físicas e expectativa de desempenho em peças de ferros fundidos cinzentos com diâmetro de fundição de 30 mm	31
Tabela 3	Propriedades físicas de ferros fundidos cinzentos Norma EN 1561/1997	33
Tabela 4	Calor específico (capacidade térmica) de ferros fundidos gráfiticos para faixas de temperatura de 100°C	34
Tabela 5	Propriedades físicas de ferros fundidos cinzentos Norma EM 1561/1977	39
Tabela 6	Variações dos elementos químicos mantendo a composição base (%)	39
Tabela 7	Composição química dos elementos de liga, das barras de aço e do ferro-gusa ...	40
Tabela 8	Quantificação de corpo de prova para testes e temperaturas de ensaios por tipo de corrida	46
Tabela 9	Resultados da análise química das corridas de ferro fundido cinzento com adição de nióbio e molibdênio	54
Tabela 10	Resumo dos resultados dos ensaios de tração em diferentes temperaturas do ferro fundido cinzento com adição de nióbio e molibdênio	59
Tabela 11	Resultados da análise metalográfica	67
Tabela 12	Resumo dos resultados de quantificação da grafita utilizando software <i>Minitab</i>	68
Tabela 13	Resumo dos resultados estatísticos de quantificação da célula eutética Utilizando <i>Minitab</i>	69
Tabela 14	Resultados das análises térmicas nas ligas base, base + 0,10%Nb, base + 0,20%Nb, base + 0,15%Mo	71
Tabela 15	Resultados de difusividade térmica nas temperaturas 380°C, 480°C, 580°C e 680°C	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFS	Sociedade Americana de Fundição (<i>American Foundry Society</i>)
ANOVA	Análise de Variância (<i>Analysis of variance</i>)
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
BCIRA	Associação Britânica de Pesquisa em Ferro Fundido (<i>British Cast Iron Research Association</i>)
CBMM	Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia
Ceq	Carbono Equivalente
DIN	Instituto Alemão de Normalização (<i>Deutsches Institut für Normung</i>)
HB	Dureza Brinell (<i>Brinell Hardness</i>)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Intervalo de Previsão
ISO	Organização Internacional de Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
LAMAT	Laboratórios de análises em materiais
LR	Limite de resistência à tração
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
SAE	Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (<i>Society of Automotive Engineers</i>)
TAL	Temperatura de Início de Crescimento das Dendritas de Austenita
TC	Temperatura de Equilíbrio do Eutético Formador de Carboneto
TE	Temperatura de Equilíbrio do Eutético
TEE	Temperatura do Eutético Estável

TEM	Temperatura do Eutético Metaestável
TES	Temperatura de Início da Nucleação das Células Eutéticas
TEU	Temperatura de Super-resfriamento
TER	Temperatura de Recalescência Eutética
TL	Temperatura de Liquidus

LISTA DE SÍMBOLOS

%CE Porcentagem de Carbono Equivalente

Fe₃C Cementita

FeNb Ferro nióbio

MnS Sulfeto de manganês

NbC Carboneto de nióbio

TiC Carboneto de titânio

TaC Carboneto de tântalo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	4
3	REVISÃO DA LITERATURA	5
3.1	FERROS FUNDIDOS	5
3.1.1	Diagrama Fe-C.....	7
3.1.2	Solificação dos ferros fundidos	8
3.1.3	Solificação do ferro fundido cinzento.....	11
4	FORMAÇÃO DA GRAFITA NOS FERROS FUNDIDOS	14
4.1	CRESCIMENTO	14
4.2	MORFOLOGIA DA GRAFITA NOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS	16
4.3	EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA NA SOLIDIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO	18
4.3.1	Efeito da adição do silício.....	20
4.3.2	Efeito da adição do enxofre e do fósforo.....	21
4.3.3	Efeito da adição do cobre	21
4.3.4	Efeito da adição do manganês	21
4.3.5	Efeito da adição do cromo	21
4.3.6	Efeito da adição do níquel	22
4.3.7	Efeito da adição do molibdênio	22
4.3.8	Efeito da adição do estanho	23
4.3.9	Efeito da adição do antimônio	24
4.3.10	Efeito da adição do nióbio	24
4.4	ELEMENTOS DE LIGA COM POTENCIAL GRAFITIZANTE	26
4.5	INOCULAÇÃO	26
4.6	PROPRIEDADES GERAIS	28
4.6.1	Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento	28
4.6.2	Propriedades físicas do ferro fundido cinzento	31
4.6.2.1	Densidade	32
4.6.2.2	Expansão térmica.....	32

4.6.2.3	Condutividade térmica.....	32
4.6.2.4	Calor específico	33
4.6.2.5	Difusividade Térmica	34
4.6.2.6	Propriedades acústicas e de vibração.....	35
4.6.2.7	Resistência a quente.....	36
5	MATERIAL E MÉTODOS	39
5.1	DESCRIÇÃO GERAL	39
5.2	MATERIAL.....	39
5.2.1	Elementos de liga.....	39
5.2.2	Dimensionais e equipamentos	41
5.3	MÉTODO	43
5.3.1	Esquemas gerais das fundições dos discos de freio referentes às corridas 1 a 4 ..	43
5.3.2	Ensaaios mecânicos	45
5.3.2.1	Ensaaios de tração	45
5.3.2.2	Ensaaios de dureza	47
5.3.3	Ensaaios químicos	48
5.3.4	Ensaaios metalográficos	49
5.3.5	Ensaaios de difusividade térmica	50
5.3.6	Estatística	51
5.3.7	Fluxograma de Processo	53
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
6.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	54
6.2	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	55
6.3	ENSAIO DE DUREZA BRINELL	60
6.4	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	61
6.5	CÉLULAS EUTÉTICAS.....	69
6.6	ANÁLISE TÉRMICA	71
6.7	DIFUSIVIDADE TÉRMICA	72
7	CONCLUSÕES	75
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
	REFERÊNCIAS	78
	ANEXOS	83
	ANEXO A – TESTES A 22°C	83
	ANEXO B – TESTES A 380°C	86

ANEXO C – TESTES A 480°C	90
ANEXO D – TESTES A 580°C	94
ANEXO E – TESTES A 680°C	98

1 INTRODUÇÃO

O metal ferro foi descoberto pelo homem através de seu contato com ferro meteorítico, utilizado para a fabricação de ferramentas, adornos e armas. De acordo com antigos relatos, a tecnologia de fabricação do ferro pertencia ao povo Chalibas entre 1200 a.C. e 1400 a.C. Juntamente com a evolução da civilização, o processo siderúrgico de transformação do minério de ferro também evoluiu, mantendo-se, entretanto, sua essência, qual seja, a utilização de uma fonte de carbono que reage com sopro de ar para extrair o ferro do minério e promover energia no processo, seguindo para tratamentos térmicos e mecânicos (MEDEIROS, 2010; MOURÃO, 2011).

Os produtos siderúrgicos comuns são ligas de ferro-carbono com teores de 0% a 4,5% de carbono, sendo os produtos mais conhecidos o aço e o ferro fundido. Os aços contêm de 0% a 2% de carbono, já os ferros fundidos contêm teores de carbono entre 2% e 4,5%. O ferro fundido pertence a um grupo importante e fundamental para a indústria. Devido ao maior teor de carbono, sua temperatura de fusão é menor que a do aço, fato que reduz o custo de produção (energia e refratário), além de permitir a fundição de peças complexas difíceis de serem obtidas através de outros processos (COLPAERT, 1983).

Os ferros fundidos passam pela reação eutética durante a solidificação e possuem microestrutura com grafitas e uma matriz ferrítica ou perlítica. A grafita possui resistência mecânica muito baixa. A matriz metálica, constituída de ferrita (ferrítica), apresenta valores baixos de resistência à tração, enquanto a matriz constituída de perlita (perlítica) apresenta valores altos de resistência associados a baixos valores de ductilidade e tenacidade (GUESSER, 2009).

O Brasil é o 7º produtor de fundidos, com um total de 1.778.330 toneladas de materiais fundidos produzidos em 2017 (ABIFA, 2017). O desenvolvimento de novos produtos é necessário pela demanda constante de aumento do desempenho, segurança e conforto associado à redução de custo. Para isto, a tecnologia tem buscado recursos e métodos inovadores no segmento de materiais fundidos.

Um dos principais mercados de aplicação de ferro fundido é o automobilístico, que nos últimos anos vem possibilitando a redução considerável de consumo de combustível através da redução de peso de seus componentes. Desta forma, a engenharia recebe uma responsabilidade ainda maior na busca de soluções eficientes na redução de peso dos automóveis. Os projetos mecânicos de otimização para a redução das cotas de seus componentes necessitam utilizar materiais que suportem as solicitações do novo

projeto. Para tanto, os materiais selecionados devem ter uma resistência mecânica elevada, suportando as cargas ou tensões a que serão submetidos. Outro ponto fundamental é a resistência à temperatura de trabalho a que os componentes são expostos. Essas variáveis serão parte fundamental deste trabalho. Dados de 2019 (AUTOMOBILE STATISTA, 2019) apresentam o crescimento aproximado da produção de veículos no mundo no período de 2000 a 2019 (Figura 1). A Figura 2 apresenta dados da utilização de materiais em automóveis europeus em 2005.

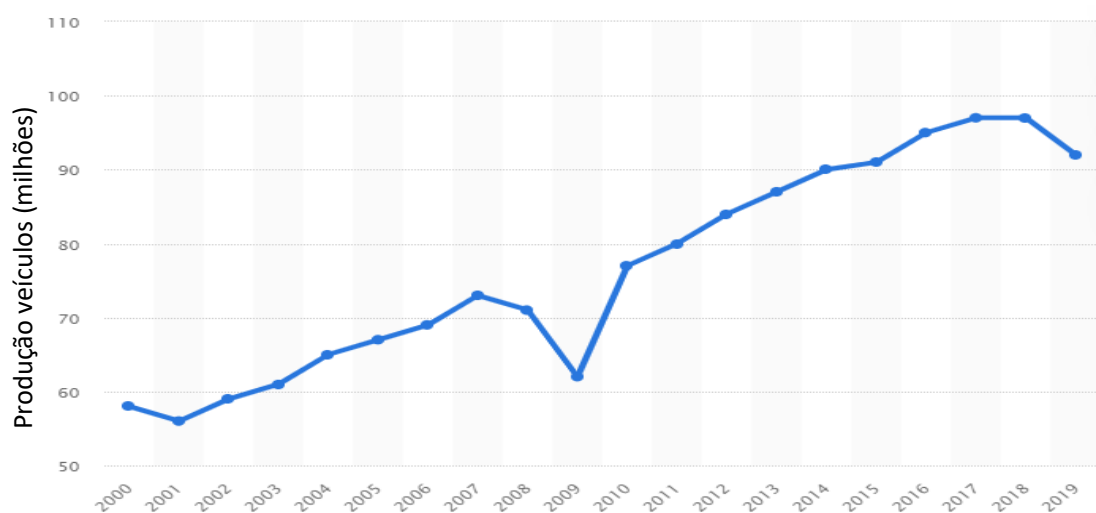


Figura 1 - Produção mundial estimada de automóveis de 2000 a 2019

Fonte: [Adaptado de] Automobile Statista (2019)

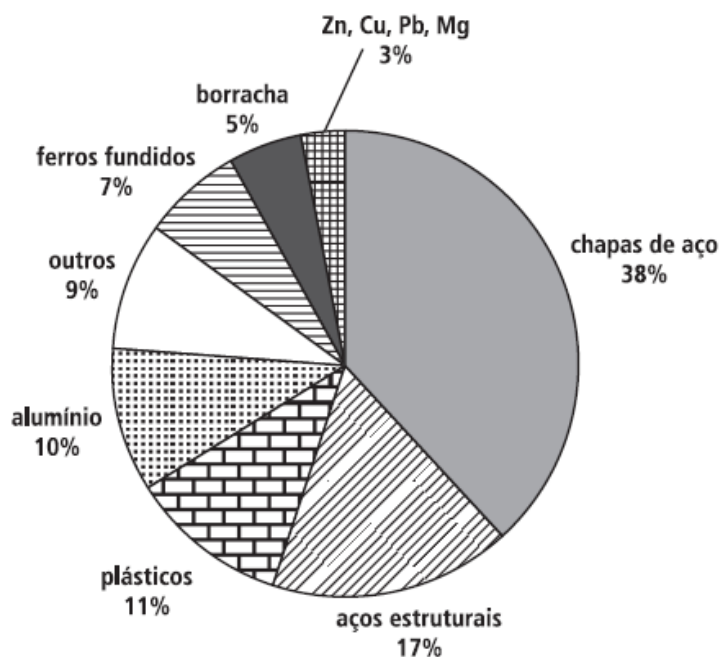


Figura 2 - Utilização de materiais em automóveis europeus, 2005

Fonte: [Adaptado de] Costes (2006)

Para que um veículo automotivo tenha um elevado desempenho, é necessário associar segurança e eficiência. Quando se trata de segurança, é fundamental a evolução do sistema de frenagem com melhores peças fundidas, que serão submetidas a tensões térmicas e mecânicas relativamente altas durante o ciclo de frenagem, avaliando-se com precisão o seu comportamento térmico e dinâmico (MALUF, 2017).

O entendimento da composição química é fundamental para elevar a resistência mecânica e térmica do ferro fundido. Os elementos básicos que influem nas propriedades mecânicas são o carbono e o silício. Entretanto, alguns elementos de liga, como o Cu, S, Mn, Ni, Ti, Cr, Sn, Nb e V, são adicionados nos ferros fundidos a fim de se aumentar as suas propriedades mecânicas. Nos ferros fundidos grafiticos, a adição de elementos de liga baseia-se no aumento da quantidade de perlita na estrutura e na diminuição do espaçamento interlamelar perlítico (CHIAVERINI, 2015).

O nióbio tem sido considerado como um elemento de liga para ferros fundidos que promove melhorias na resistência mecânica e fadiga térmica. Vários autores investigaram a influência da adição de nióbio para ferros fundidos, principalmente a classe dos grafiticos, onde o mesmo proporciona o refino de células eutéticas e diminuição do espaçamento interlamelar da perlita (ZHAI et al., 2011).

Neste contexto, o presente trabalho visou avaliar as características químicas, a microestrutura, as propriedades mecânicas e o comportamento térmico do ferro fundido cinzento com adição do elemento de liga nióbio ou molibdênio, aplicados em discos de freios automobilísticos. O estudo comparou quatro ligas de ferro fundido cinzento de matriz perlítica. As principais diferenças entre os 4 materiais foram os teores de molibdênio e nióbio. Os materiais estudados, ferros fundidos cinzentos com adição de elementos de liga, foram comparados com a liga base que possui uma composição típica de mercado. O molibdênio e o nióbio são elementos de liga formadores de carbonetos e muito utilizados na indústria de aços ligados e aços refratários fundidos resistentes a altas temperaturas. Os ferros fundidos cinzentos deste estudo possuem principalmente lamelas de grafita que são consideradas refinadas e de excelente dissipação térmica. Com isto, procurou-se entender o efeito que os elementos molibdênio e nióbio exercem na grafita e na matriz perlítica.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal estudar o comportamento, em elevadas temperaturas, de ferros fundidos cinzentos com adição de nióbio ou molibdênio, que são empregados na fabricação de discos de freios automobilísticos.

Os objetivos específicos foram:

1. Determinar o limite máximo de resistência à tração às temperaturas de 22°C, 380°C, 480°C, 580°C e 680°C, em quatro diferentes tipos de ferros fundidos cinzentos denominados: liga base; liga base com adição de 0,10% de Nb; liga base com adição de 0,20% de Nb e liga base com adição de 0,15% de Mo;
2. Caracterizar a dureza dos ferros fundidos cinzentos;
3. Analisar o efeito do molibdênio e do nióbio como elementos de liga;
4. Avaliar a estabilidade estrutural do ferro fundido cinzento a elevadas temperaturas;
5. Avaliar a difusividade térmica dos materiais em diferentes temperaturas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 FERROS FUNDIDOS

Os ferros fundidos possuem, como principal característica, o elevado percentual de carbono, acima de 2,14%, e de silício, entre 1,0% e 3,0%, podendo ainda conter outros elementos de liga. Outra característica importante dos ferros fundidos é a presença de grafitas com uma matriz de ferrita α e ou de perlita (CALLISTER, 2011).

Devido à presença de grafita, considerada uma descontinuidade da matriz e, portanto, um ponto de tensão, os ferros fundidos grafíticos possuem baixa resistência mecânica. Entretanto, a presença da grafita favorece as propriedades de condutividade térmica e, em alguns casos, o amortecimento da vibração e boa usinabilidade (GUESSER, 2009).

O ferro fundido pode ser considerado como liga de Fe-C-Si, visto que a influência da quantidade de carbono e silício que ele contém é fundamental na formação de suas características e de sua forma durante o processo de fabricação.

O formato da grafita obtida no processo dos ferros fundidos influencia diretamente nas propriedades mecânicas. Basicamente, cinco principais famílias de ferros fundidos são consideradas: Ferro Fundido Cinzento, Ferro Fundido Maleável, Ferro Fundido Nodular, Ferro Fundido Grafita Compactada e Ferro Fundido Branco (CHIAVERINI, 2011). Na Figura 3, pode-se observar as diferentes formas da grafita nos ferros fundidos citados.

As composições químicas típicas de cada classe de ferro fundido são mostradas na Tabela 1 (CHIAVERINI, 2015).

Principais características dos ferros fundidos:

- Ferro Fundido Cinzento – Grafitas lamelares em forma de veios, baixa resistência mecânica, boa condutividade térmica, amortecimento de vibrações e boa usinabilidade (GUESSER, 2009).
- Ferro Fundido Branco – Possui carbono na forma combinada Fe_3C e com menor teor de Si, com elevada resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 2015).
- Ferro Fundido Maleável – Ferro obtido a partir do Ferro Fundido Branco, com aplicação de tratamento térmico especial, transformação de toda a grafita em forma de nódulos irregulares (CHIAVERINI, 2015).

- Ferro Fundido Nodular – Grafitas na forma de esferas, possui boa ductilidade (GUESSER, 2009).
- Ferro Fundido de Grafita Compactada – Grafita na forma de escamas ou estrias, podendo ser considerado um material intermediário entre o Ferro Cinzento e o Nodular, com melhor resistência mecânica e ductilidade em relação ao ferro fundido cinzento para algumas aplicações específicas (CHIAVERINI, 2015).

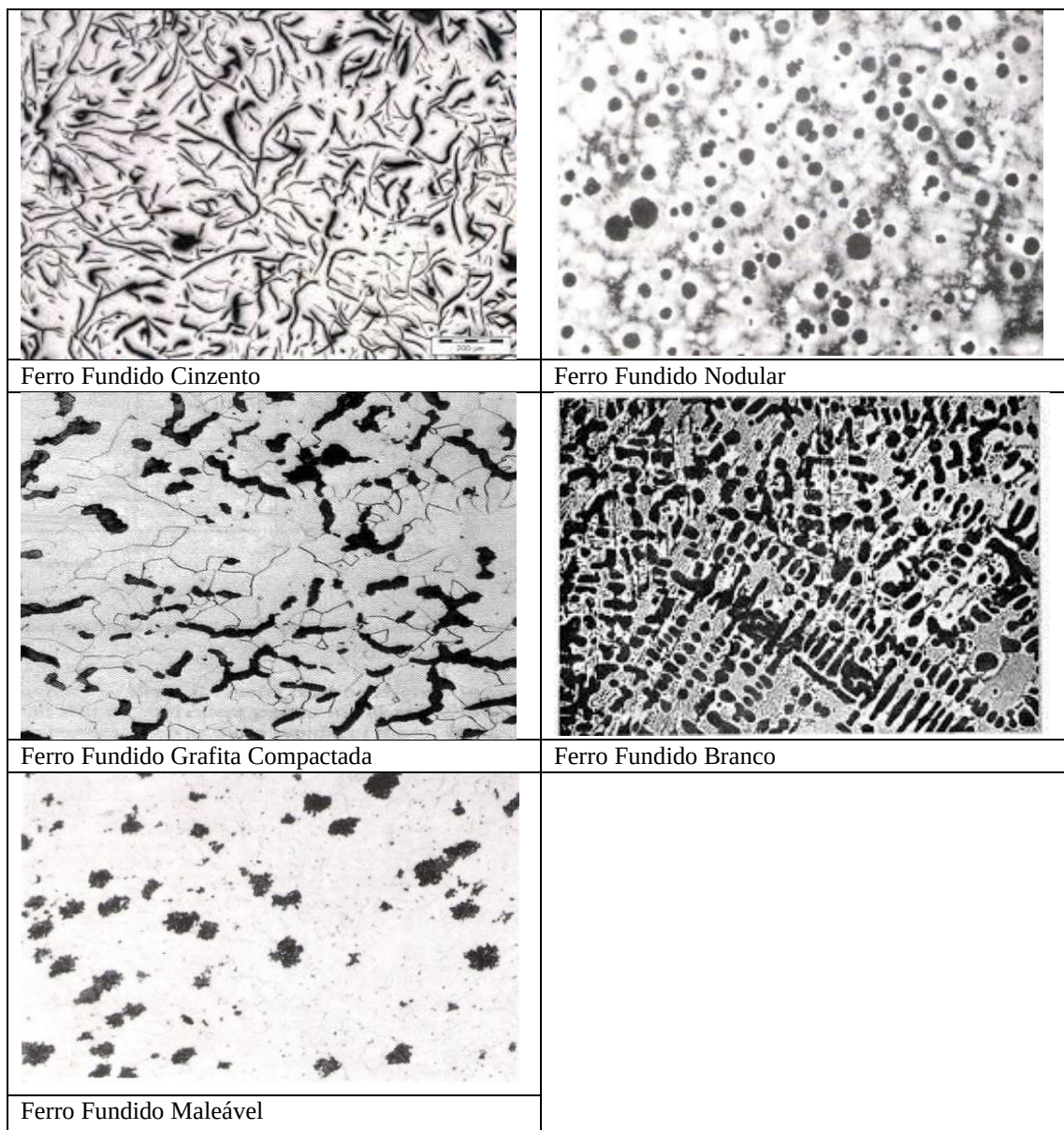


Figura 3 – Micrografias dos ferros fundidos cinzento, nodular, grafita compactada, maleável e branco

Fonte: Colpaert (1983)

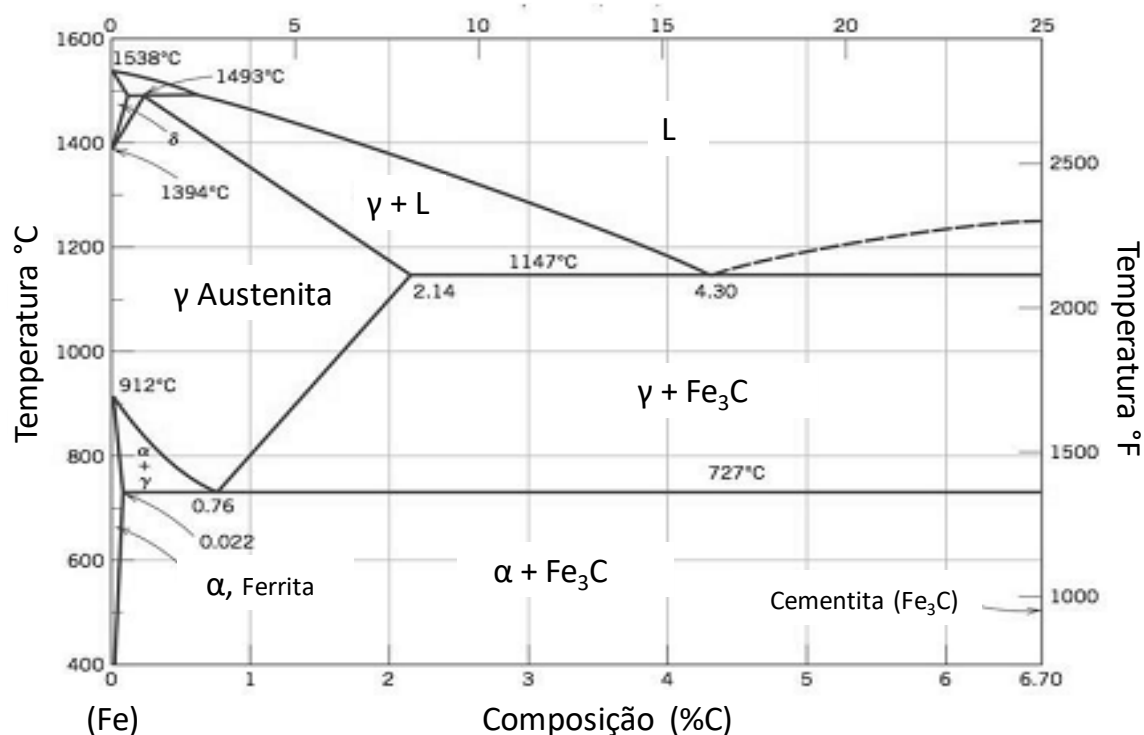
Tabela 1 – Composições químicas típicas de cada classe de ferro fundido

Tipo	Composição Química				
	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,8 - 3,6	0,5 - 1,9	0,25 - 0,80	0,06 - 0,20	0,06 - 0,20
Maleável	2,2 - 2,9	0,9 - 1,9	0,15 - 1,20	0,02 - 0,20	0,02 - 0,20
Cinzento	2,5 - 4,0	1,0 - 3,0	0,20 - 1,00	0,02 - 0,25	0,02 - 1,00
Nodular	3,0 - 4,0	1,8 - 2,8	0,10 - 1,00	0,01 - 0,03	0,01 - 0,10
Grafita Compactada	2,5 - 4,0	1,0 - 3,0	0,20 - 1,00	0,01 - 0,03	0,01 - 0,10

Fonte: Chiaverini (2015)

3.1.1 Diagrama Fe-C

Como a base constituinte do ferro fundido são os elementos ferro e carbono, conforme a Figura 4, utiliza-se o diagrama binário de equilíbrio Fe-C para analisar a sua formação. Esse diagrama apresenta teores de carbono até 6,7% por ser esse o limite para a formação do composto Fe_3C .

**Figura 4** – Diagrama de equilíbrio Fe-C

Fonte: [Adaptado de] Callister (2011)

3.1.2 Solidificação dos ferros fundidos

Como citado no item 3.1.1, para se compreender a solidificação do ferro fundido em condições de equilíbrio, utiliza-se o diagrama binário Fe-C. A Figura 5 apresenta a solidificação de um ferro fundido hipoeutético, com 3% carbono, onde ocorre a formação das dendritas de austenita com teor de carbono de aproximadamente 1,5%. Durante a solidificação o carbono é rejeitado para o líquido, e assim, com a redução da temperatura, ocorre o aumento da quantidade de austenita formada, enquanto a composição do líquido remanescente caminha para o ponto eutético 4,3% de carbono. A uma temperatura de 1153°C, a austenita tem composição de 2,0% C e a fase líquida está com 4,3% C. Neste ponto, acontece a transformação eutética, onde todo o líquido restante se transforma em dois sólidos austenita e grafita (GUESSER, 2009).

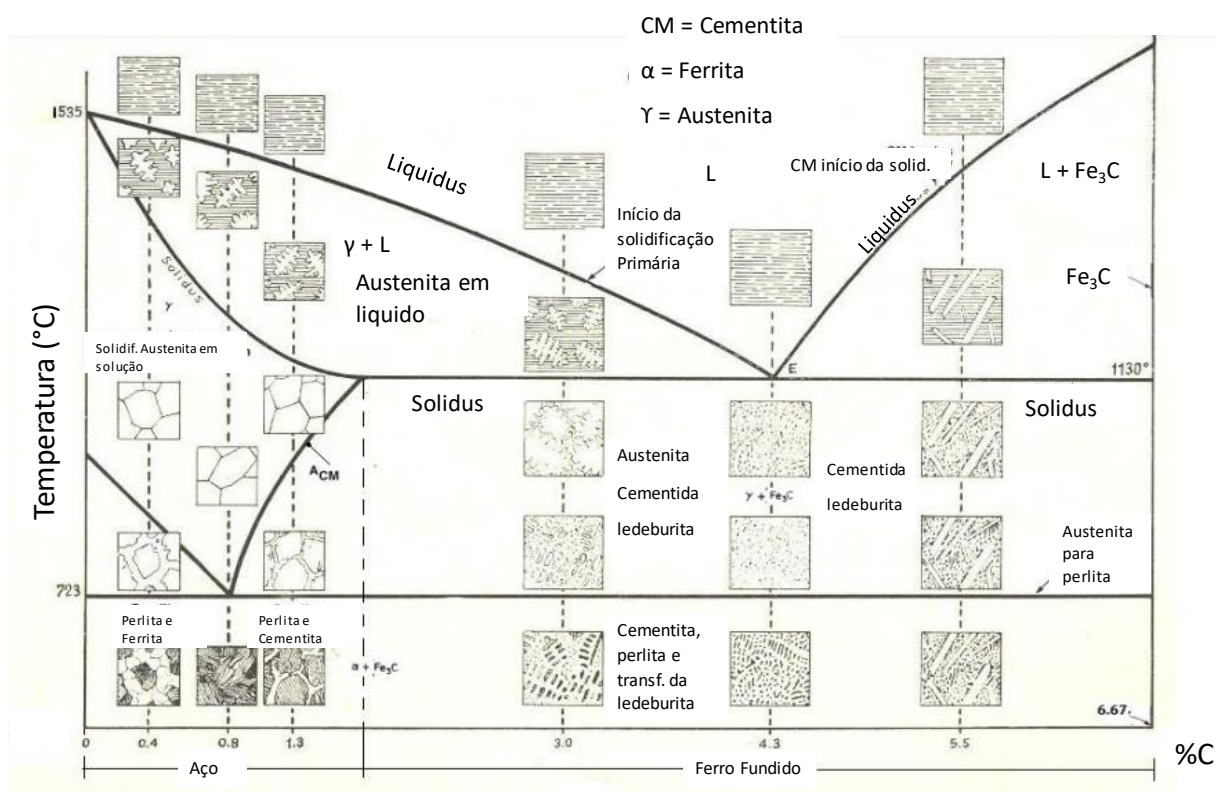


Figura 5 – Representação esquemática da solidificação e resfriamento lento dos aços e dos ferros fundidos

Fonte: Colpaert (1983)

A Figura 6 apresenta a solidificação do ferro fundido cinzento, objeto deste estudo. Essa solidificação é mais complexa por diferentes fenômenos que ocorrem em uma região do diagrama conhecida como região de equilíbrio eutético estável (austenita + grafita (G)) e do eutético metaestável (austenita + cementita). A reação do eutético

estável (TEE) ocorre em temperatura de 1153°C, com um teor de carbono de 4,3%, e a reação do estético metaestável (TEM) ocorre em temperatura um pouco abaixo do estável, em 1147°C.

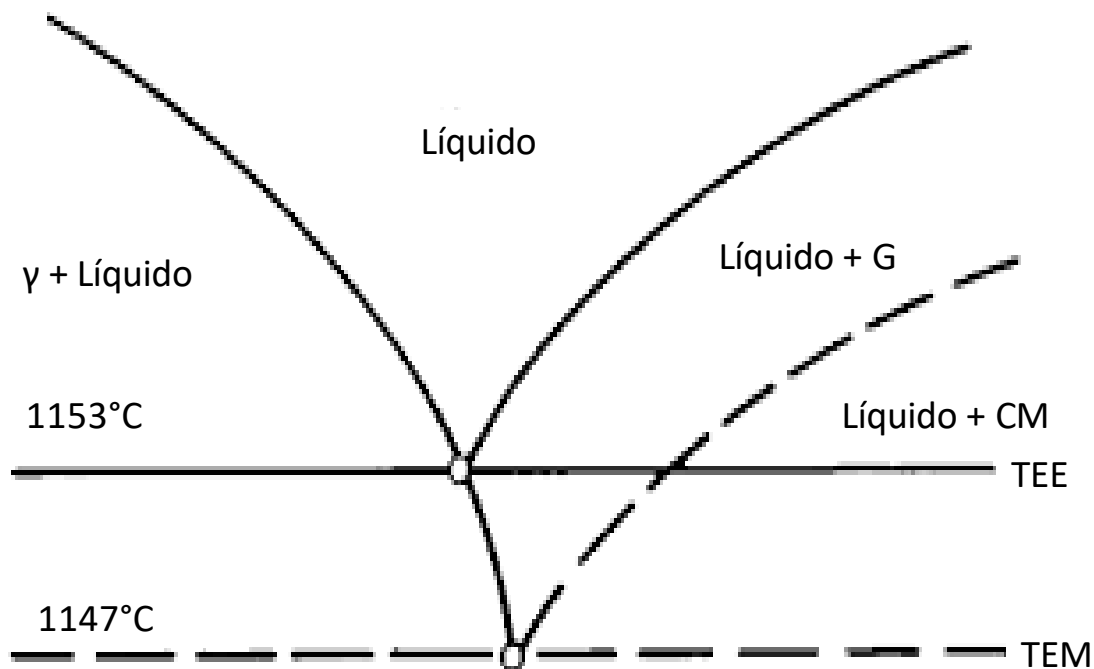


Figura 6 – Representação esquemática da solidificação do ferro fundido cinzento eutético estável e metaestável

Fonte: [Adaptado de] UNISOCIESC (2017)

A solidificação no intervalo ΔTE apresenta a formação de eutético de austenita mais grafita. O material deve iniciar a solidificação no ponto eutético. Os pontos de solidificação entre o TEE e TEM são fundamentais para a formação do tipo de ferro fundido obtido, visto que há uma pequena diferenciação de 6°C entre os pontos eutéticos estável e metaestável (PIESKE, 1980).

Como a diferença entre os pontos é relativamente pequena, a tendência da liga é solidificar entre estes dois eutéticos. Assim, a adição de silício torna-se essencial para definir o comportamento da solidificação do ferro fundido, pois na adição de aproximadamente 2% de Si, o intervalo de temperatura ΔTE , pode aumentar em até 35°C. (PIESKE, 1980).

Os ferros fundidos podem ser classificados de acordo com a composição química em: eutético com carbono equivalente (Ceq) de 4,3%, hipereutético $Ceq > 4,3\%$ e hipoeutético $Ceq < 4,3\%$. De acordo com Santos (1991), na fase primária, forma-se um primeiro patamar tratado como nucleação. Na liga hipoeutética, as dendritas de austenita

são constituídas nessa fase, enquanto na liga hipereutética é constituída a grafita, solidificada diretamente a partir do líquido e denominada de grafita primária. A Figura 7 mostra as curvas de resfriamento das ligas hipoeutética, eutética e hipereutética.

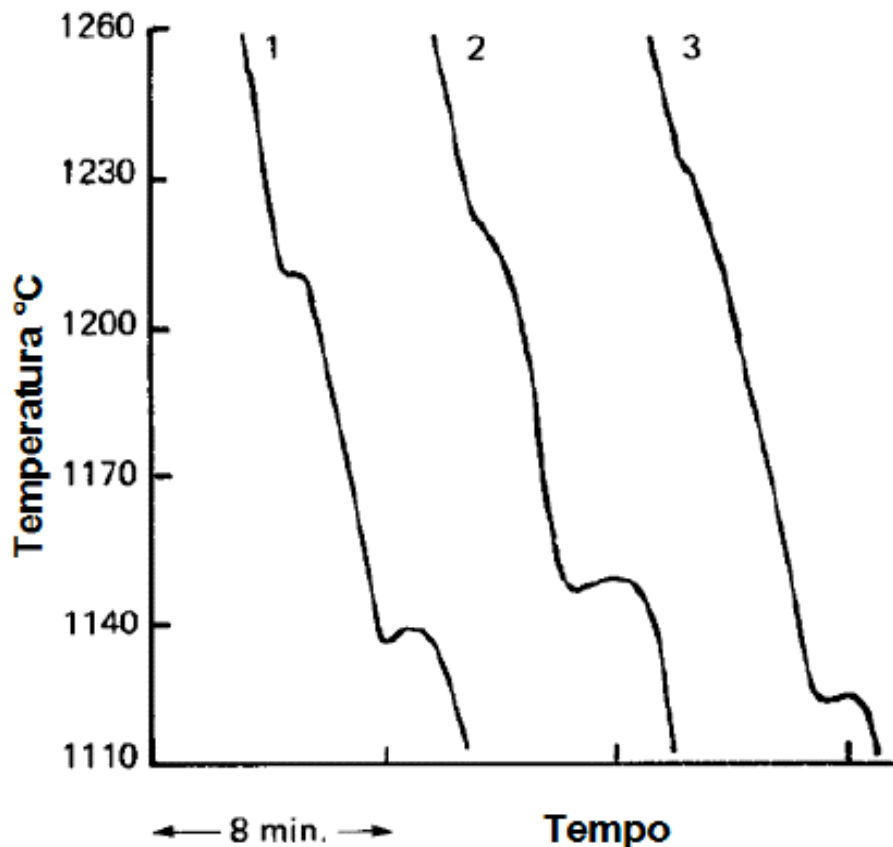


Figura 7 – Curvas de resfriamento das ligas hipoeutética (1), eutética (2) e hipereutética (3)
Fonte: Elliot (1988)

Os ferros fundidos grafíticos apresentam em seu resfriamento muitas variáveis que podem influenciar em sua microestrutura, proporcionando em sua formação o aparecimento de austenita primária em ferro fundido eutético e ligeiramente hipereutético. Essas estruturas podem ser explicadas pela presença de uma zona acoplada, ou zona de crescimento cooperativo. A zona acoplada é a faixa de temperatura logo abaixo da eutética. Assim, a solidificação ocorre em condições sob as quais duas fases eutéticas podem crescer em uma interface comum. A forma da zona acoplada é determinada pelo crescimento característico das duas fases em condições de solidificação (ELLIOT, 1988).

3.1.3 Solidificação do ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento tem como característica em sua solidificação uma etapa primária e outra eutética. Nos dois processos ocorre nucleação. A Figura 8 representa resfriamento típico de um ferro fundido cinzento hipoeutético, onde: TL é a temperatura do líquidus; TE é a temperatura de equilíbrio eutético; TC é a temperatura de equilíbrio eutético de carboneto; (1) TAL é o início do crescimento das dendritas de austenita; (2) TES é a temperatura de início da nucleação das células eutéticas; (3) TEU é a temperatura de super-resfriamento eutético; (4) TER é a temperatura de recalescência eutética; (5) TEE é o fim de solidificação eutética (ELLIOT, 1988).

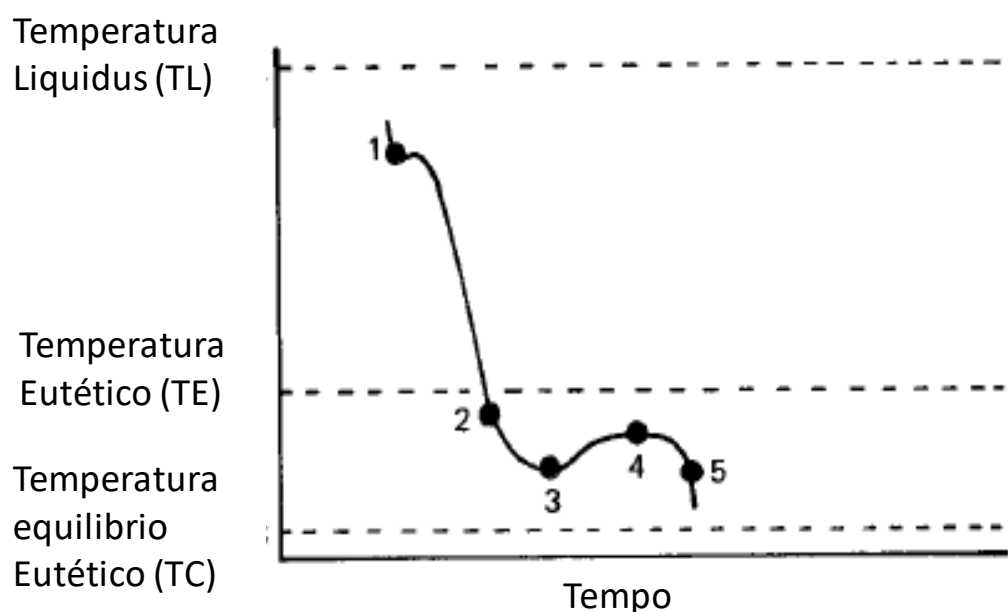


Figura 8 – Curvas de resfriamento de um ferro fundido
Fonte: Elliot (1988)

O primeiro patamar é onde ocorre o início do crescimento das dendritas de austenita (TAL). Neste ponto (Ponto 1 da Figura 8) acontece um super-resfriamento em relação à temperatura *liquidus*. No ponto 2 inicia-se o crescimento das células eutéticas, ocorrendo a recalescência no ponto 3. Sendo assim, o ponto 4 apresenta o super-resfriamento seguindo para o resfriamento no ponto 5. O diagrama de Fe-C binário não pode ser usado para análises térmicas dos ferros fundidos, por causa da influência do Fe-C-Si-P (elementos base do ferro fundido). Assim, para evitar a complexidade dos diagramas quaternários, estudos estatísticos foram elaborados por vários autores,

encontrando uma correlação direta entre a temperatura *liquidus* e o conteúdo de C, Si e P, aplicando conceitos de análise de regressão múltipla conforme a Equação 1 (PERRE, 2007).

$$TAL = 1623,60 - 112,36 (\%C + \%Si/4 + \%P/2) \quad (1)$$

O crescimento da dendrita de austenita continua à medida em que a temperatura decresce. E enquanto cresce, a dendrita de austenita rejeita uma parcela de carbono, ocorrendo um enriquecimento progressivo de carbono no líquido. Este fenômeno ocorre até que a temperatura do eutético fique estável (TEE) e o seu carbono equivalente fique próximo ao do eutético, ocorrendo a transformação do eutético de austenita + grafita após um certo super-resfriamento. A Figura 9 apresenta a curva de resfriamento do ferro fundido cinzento hipoeutético, observando-se que os pontos TEE e TE estão muito próximos.

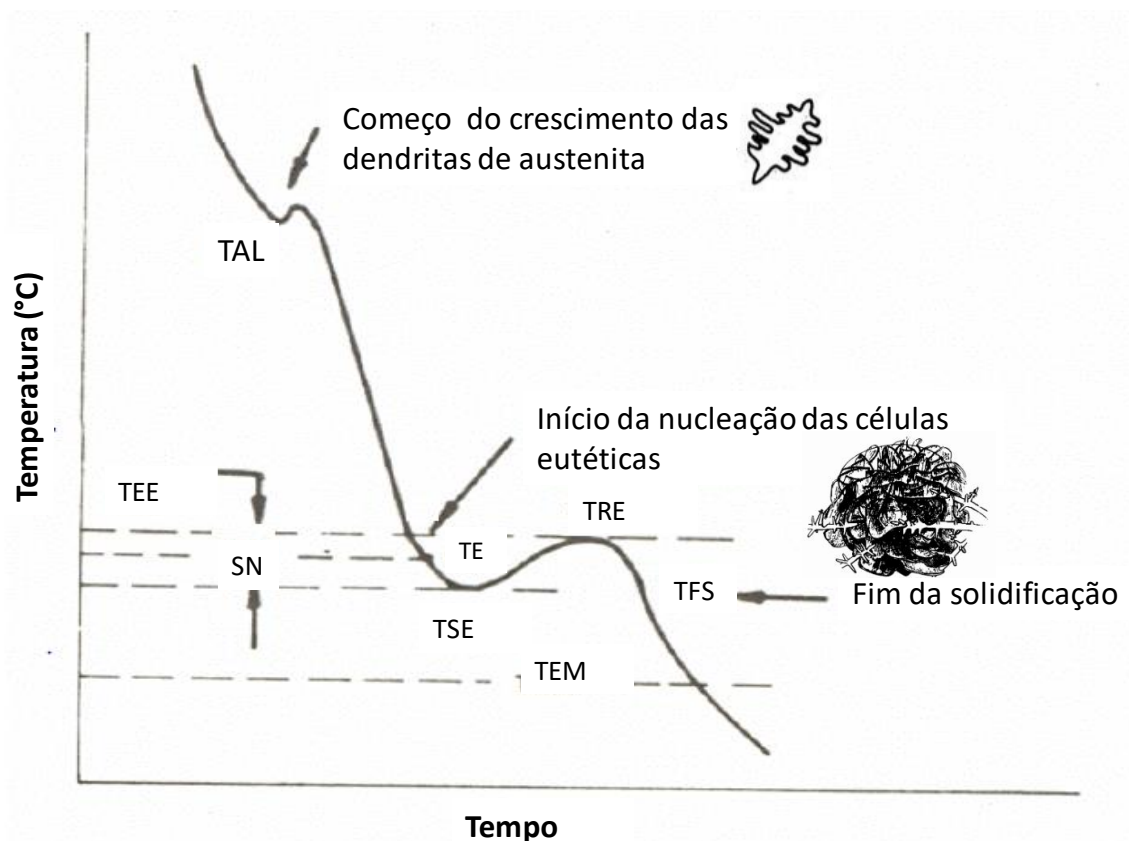


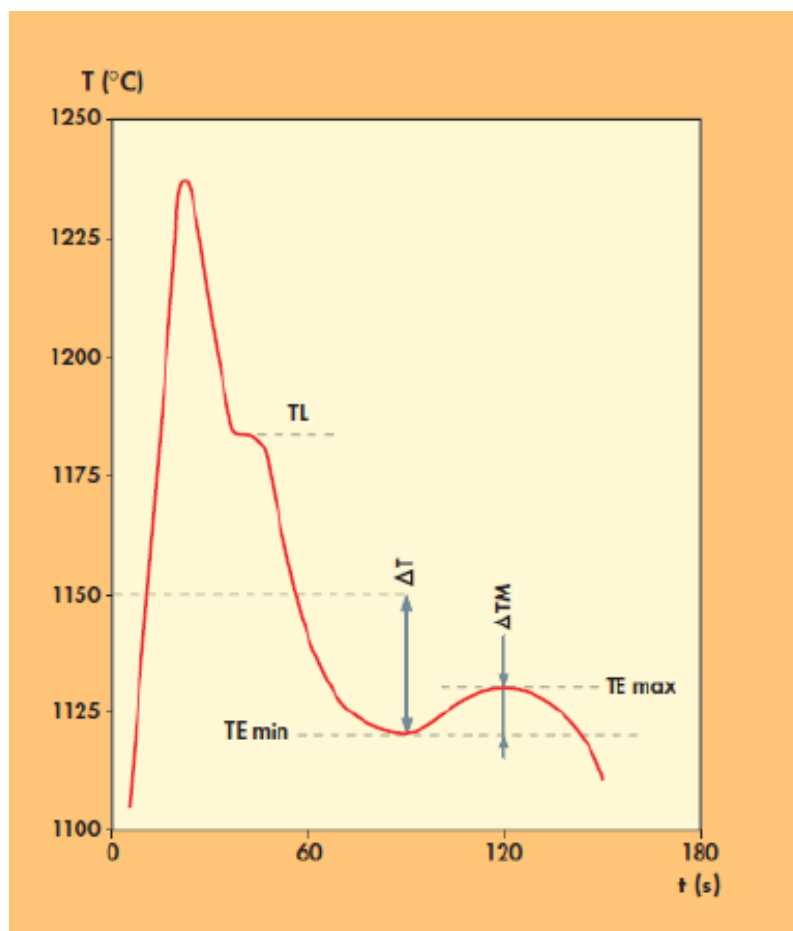
Figura 9 – Curvas de resfriamento de um ferro fundido hipoeutético

Fonte: [Adaptado de] Santos (1989)

Segundo Perre (2007), pode-se determinar o carbono equivalente utilizando-se o método aprimorado, calculado diretamente a partir das medidas de temperatura de *líquidus*, medida por meio de análise térmica. A Equação 2 é graficamente representada pela Figura 10.

$$\%C = -6.51 - 0,0084. TL + 0,0178.TS \quad (2)$$

A análise térmica é um método muito utilizado na fundição de ferro para a obtenção de resultados rápidos. Ela é confiável e de baixo custo, feita no chão de fábrica, permitindo determinar o carbono equivalente, como já mencionado, o grau de saturação (Sc), os teores de carbono e silício, o ponto do super-resfriamento eutético e controlar o grau de inoculação. Também pode prever algumas propriedades mecânicas e físicas, como resistência à tração, a dureza, o quociente de resistência à tração / dureza (Z / H), o fator de grafitação (K) e a quantidade de grafita eutética (MEG) em peças vazadas de ferro fundido cinzento não ligado (PERRE, 2007).



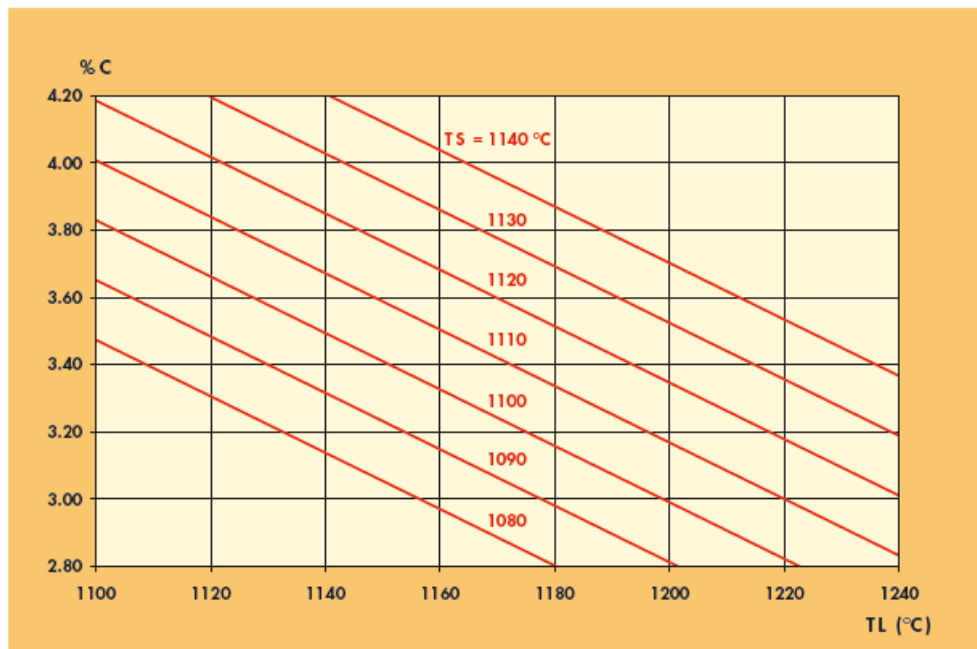


Figura 10 – Relação entre % C, TL e TS
Fonte: Perre (2007)

4 FORMAÇÃO DA GRAFITA NOS FERROS FUNDIDOS

4.1 CRESCIMENTO

A grafita é a primeira fase a se formar nos ferros fundidos hipereutéticos. Possui alta entalpia de fusão e difere da austenita em seu comportamento de solidificação. Considerando que a austenita cresce a uma taxa controlada por difusão com todos os átomos encontrando um lugar na sua interface sólido-líquido, o crescimento da grafita é controlado na interface sólido-líquido que está podendo incorporar átomos. Durante a nucleação na fase líquida, as interfaces escalonadas de alto índice crescerão relativamente rápido e desaparecerão, limitando as partículas de baixo índice. Isso é ilustrado por um cristal bidimensional simples na Figura 11 (a). A presença de elementos tensoativos, como o enxofre, altera o crescimento da grafita. Assim, quando estes elementos estão presentes na liga, são absorvidos no plano prismático, reduzindo a energia de interface entre esses planos e o equilíbrio, até atingir valor menor que o correspondente à energia de interface entre os planos basais da grafita e o líquido. Dessa forma, os átomos se depositam preferencialmente nos planos prismáticos, havendo um crescimento na posição do eixo “a”, e formando lamelas como apresentado na Figura 11 (b).

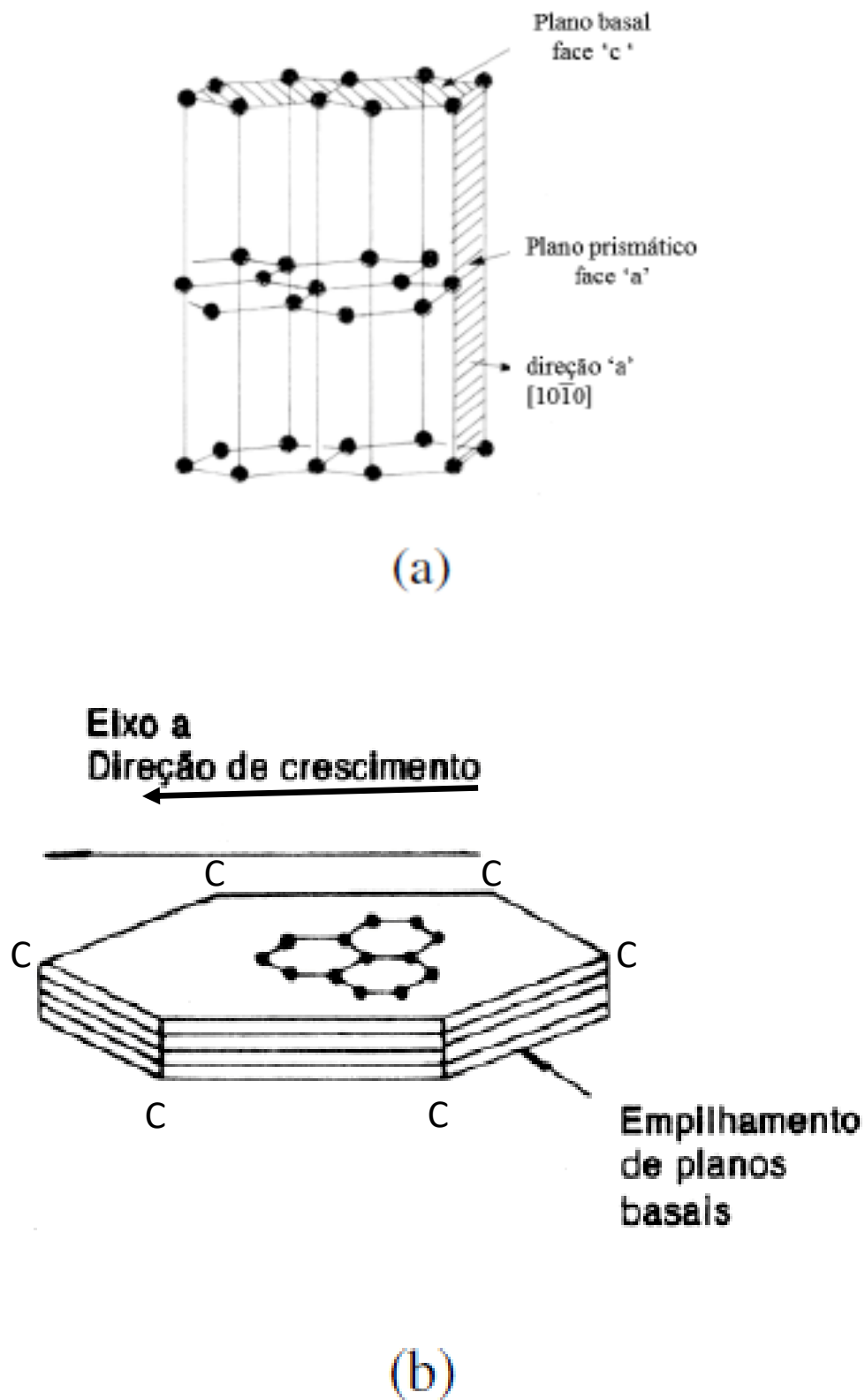


Figura 11 – Cristalografia da grafita (a); Direção de crescimento da grafita lamelar (b)
Fonte: [Adaptado de] Elliot (1988)

A Figura 12 representa as curvas típicas para formação dos tipos da grafita.

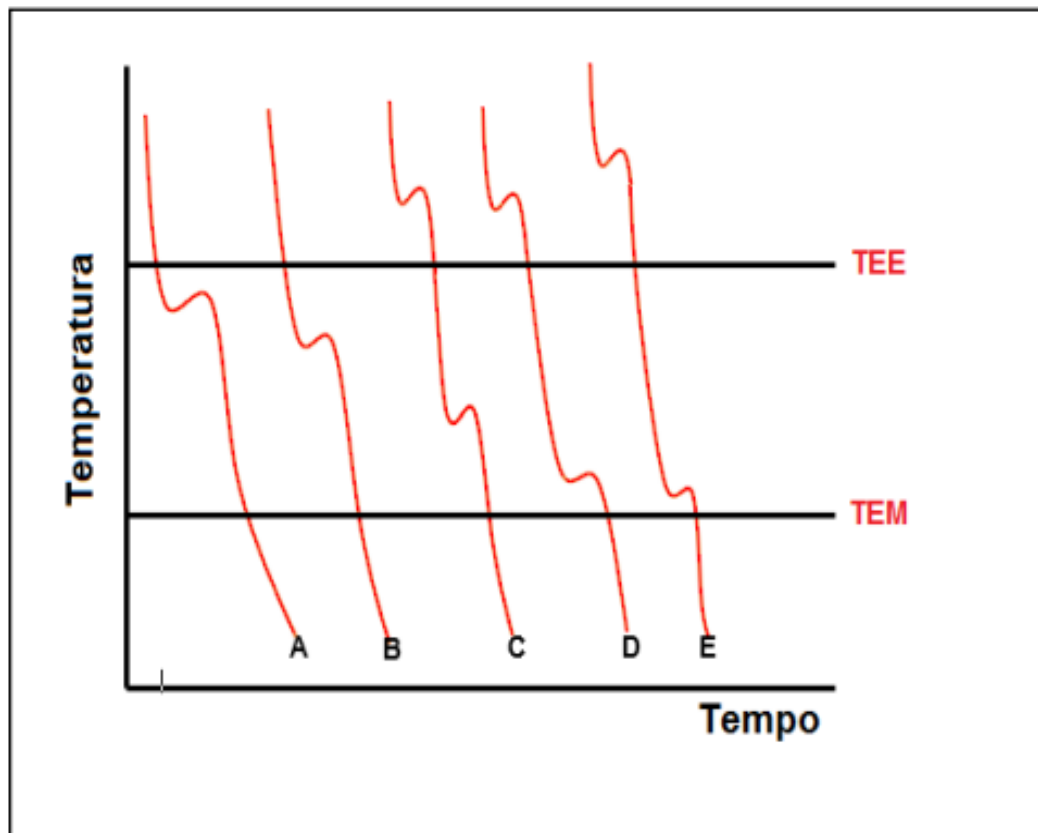


Figura 12 – Curva de resfriamento típica para a formação do tipo de grafita obtido

Fonte: [Adaptado de] UNISOCIESC (2017)

4.2 MORFOLOGIA DA GRAFITA NOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS

A morfologia da grafita em ferros fundidos está classificada de acordo com a norma ASTM A 247. Estas variações de morfologia estão ligadas diretamente ao processo de solidificação do eutético e ocorrem quando as variáveis de processo são modificadas, tais como a composição química, o grau de nucleação e a velocidade de resfriamento.

O tipo da grafita também é um parâmetro importante, pois está diretamente relacionado com a resistência do material. O tamanho pode ser classificado de acordo com a norma ASTM A 247. A Figura 13 mostra o tamanho da grafita.

A Figura 14 mostra a morfologia do tipo de grafita no ferro fundido cinzento de acordo com a norma ASTM A 247 2017.

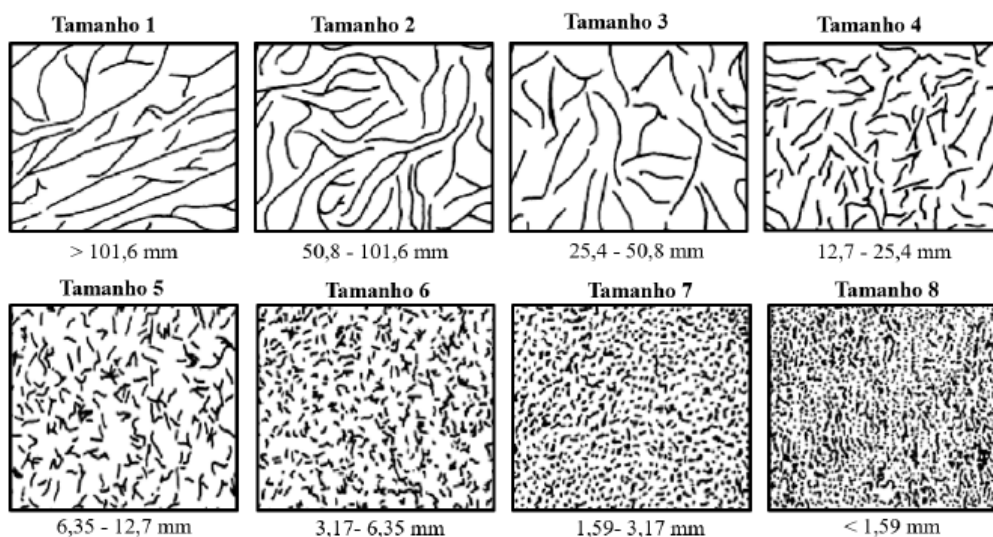


Figura 13 – Representação do tamanho de grafita de acordo com a norma ASTM A 247, 2017

Fonte: ASTM A 247 (2017)

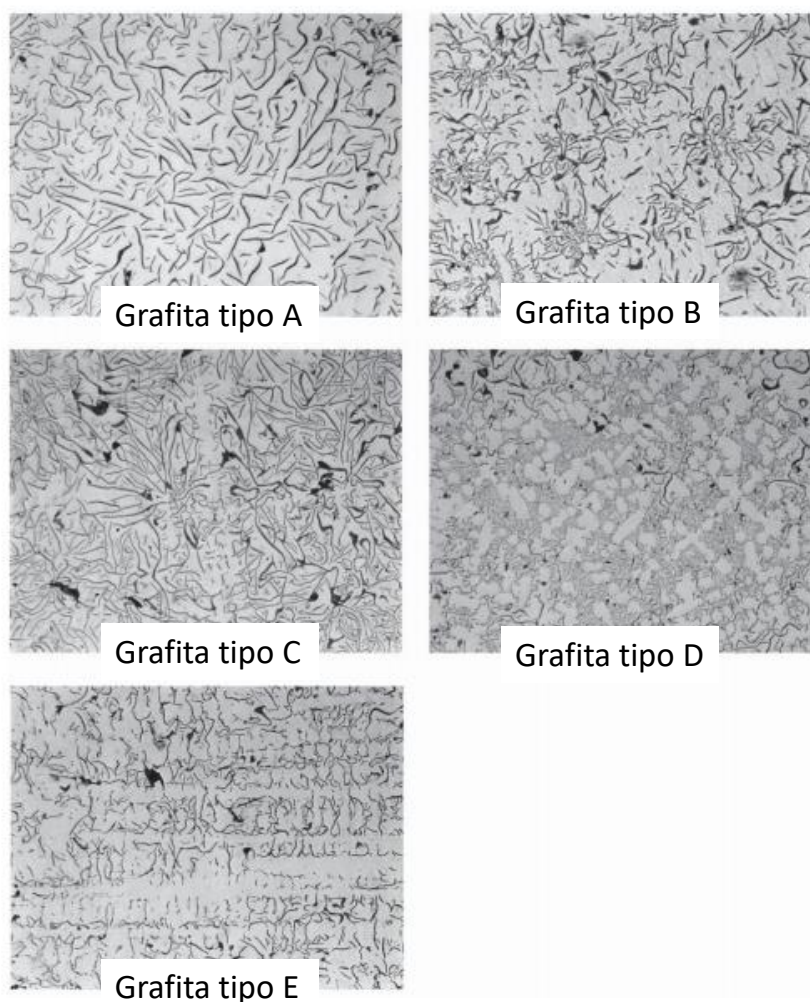


Figura 14 – Representação do tipo de grafita no ferro fundido cinzento de acordo com a norma ASTM A 247, 2017, tipo A (grafitas de veios alongados); B (grafitas de núcleos eutéticos); C (grafitas grosseiras); D (dendritas de ferrita ou perlita) e E (dendritas de ferrita ou perlita e steadita)

Fonte: [Adaptado de] ASTM A 247 2017

4.3 EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA NA SOLIDIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO

Quando são adicionados alguns elementos, pode-se observar que a composição do eutético se altera diminuindo o teor de carbono à medida em que o teor de silício aumenta. Ao mesmo tempo, nota-se que a reação do eutético ocorre num intervalo de temperatura, ao contrário do que acontece no diagrama binário Fe-C, onde tal reação se dá a uma temperatura praticamente constante.

Nos ferros fundidos tomados como ligas ternárias em que o silício está presente em teores relativamente elevados, utiliza-se um conceito ou fórmula que possibilita considerar o efeito do silício nas transformações estruturais e, portanto, nas propriedades dos ferros fundidos. A Equação 3 apresenta o carbono equivalente considerando os teores de Si e P.

Outra forma de se expressar é através do grau de saturação (Sc). A Equação 4 apresenta a relação entre a porcentagem de carbono total da liga e o teor de carbono eutético.

$$Ceq = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (3)$$

$$Sc = \frac{\%C}{4,3 - \frac{(\%Si + \%P)}{3}} \quad (4)$$

Quando se deseja obter determinadas propriedades, as variáveis mais importantes a considerar isoladamente são a composição química e os elementos de liga adicionados. Os principais elementos presentes nos ferros fundidos são: carbono, silício, enxofre, fósforo, cobre, manganês, estanho, cromo, níquel, antimônio e molibdênio.

A Figura 15 mostra os efeitos da adição dos elementos de liga nas temperaturas do eutético estável e do metaestável, atuando diretamente na formação do ferro fundido.

No diagrama metaestável pode ocorrer a decomposição do Fe₃C em ferro e carbono no formato de grafita, decomposição esta acelerada pela presença de silício, como demonstrado na Equação 5. O diagrama ternário de Fe-C-Si, para teores determinados de silício de 2,3%, 3,5%, 5,2% e 7,9%, é mostrado na Figura 16 (CHIAVERINI, 2015)

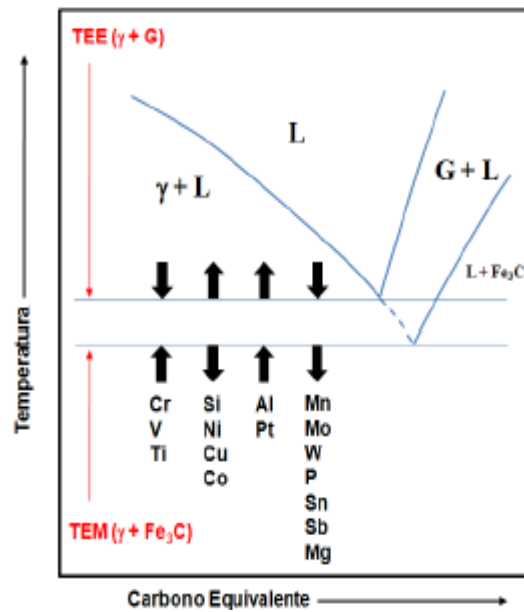
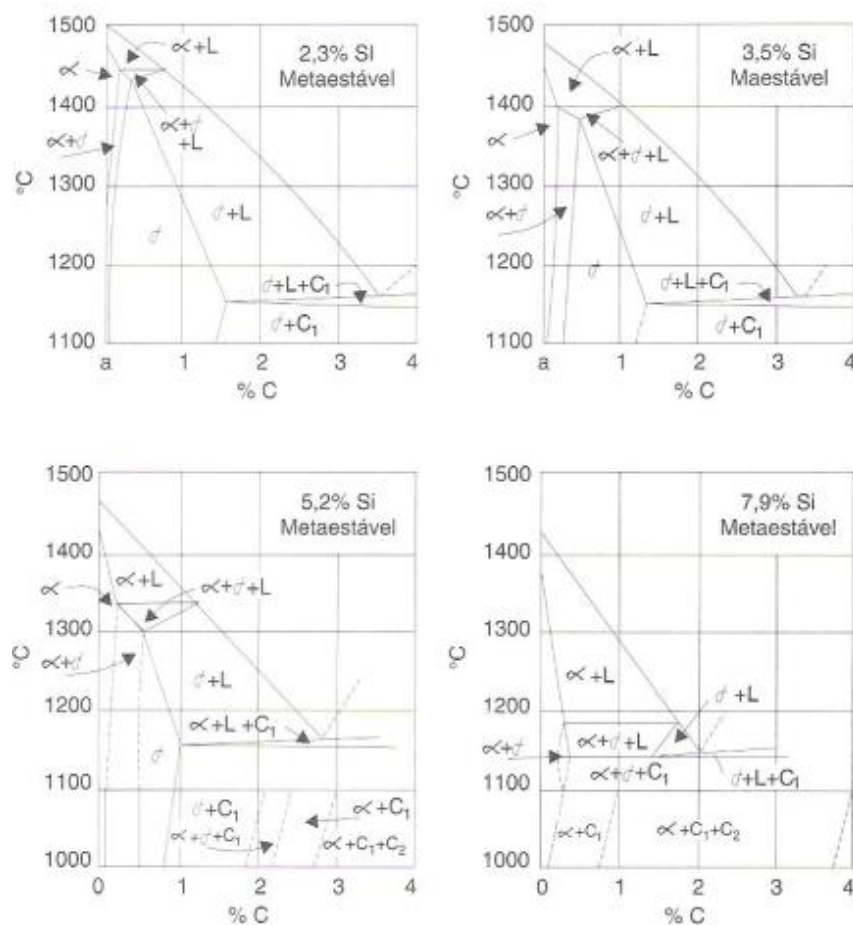


Figura 15 - Efeito dos elementos de liga na temperatura do eutético estável e metaestável
Fonte: Rosario (2012)



4.3.1 Efeito da adição do silício

O silício é o elemento mais importante para a liga de ferro-carbono. Ele contribui nas propriedades mecânicas e tem como principal função garantir o grau de grafitização. O fator da decomposição da cementita (carboneto de ferro) está associado à grafitização. A Equação 5, citada anteriormente, apresenta a formação de grafita pela decomposição da cementita (composto instável) e é favorecida pela presença silício no ferro fundido cinzento.

O elemento silício modifica o diagrama de equilíbrio reduzindo a solubilidade do carbono no ferro fundido, motivo pelo qual foi elaborado o conceito de carbono equivalente (C_{eq}), conforme demonstrado na Figura 17 (PIESKE,1980; CHIAVERINI, 2015) e anteriormente na Equação 3 (PIESKE,1980; CHIAVERINI, 2015).

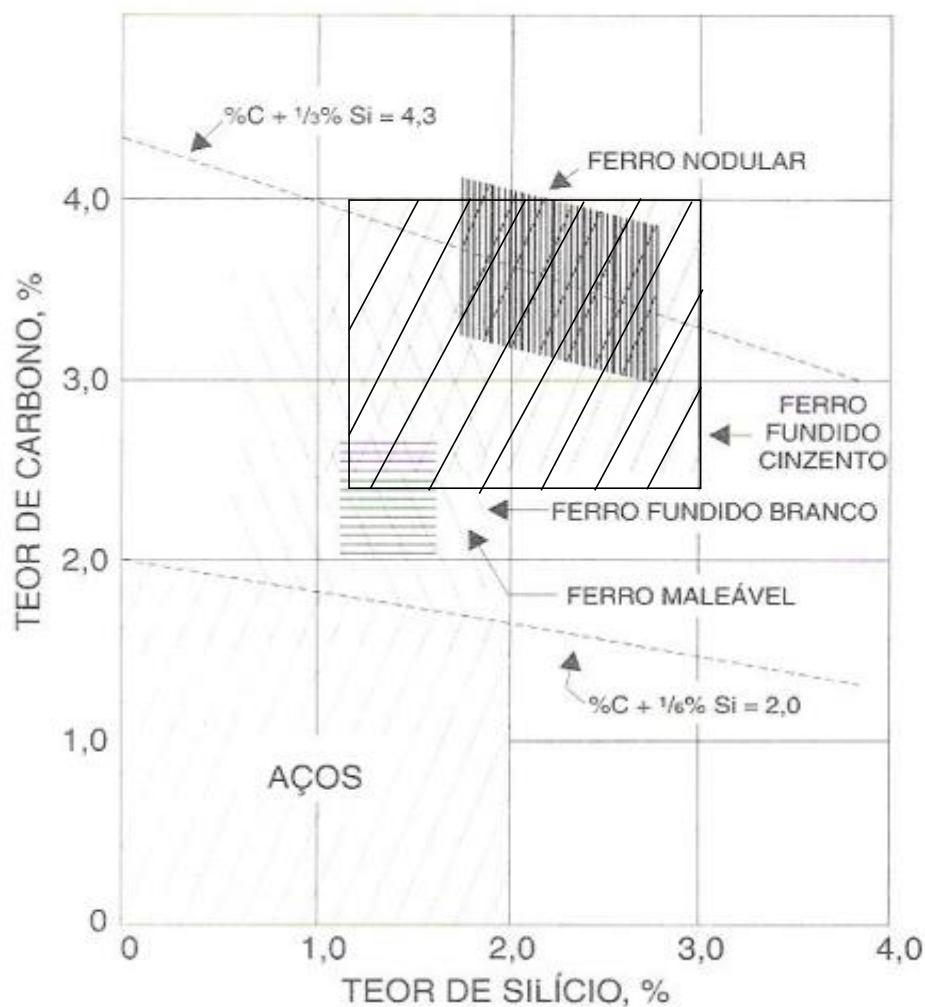


Figura 17 – Quantidade aproximada de carbono e silício em ligas ferrosas

Fonte: Chiaverini (2015)

4.3.2 Efeito da adição do enxofre e do fósforo

O enxofre e o fósforo não têm uma ação muito significativa na tendência grafitizante. O fósforo é um estabilizante do carboneto de ferro, formando um composto de natureza eutética chamada steadita (CHIAVERINI, 2015).

4.3.3 Efeito da adição do cobre

O cobre, um dos elementos mais utilizados nas fundições de ferro fundido, tem o efeito de aumentar a temperatura do eutético estável e diminuir a temperatura do eutético metaestável, o que favorece a formação da grafita. É um elemento perlitizante que aumenta a resistência ao desgaste elevando a dureza dos materiais sem formação de carbonetos. O cobre apresenta uma solubilidade limitada em ferros fundidos e, como medida de segurança para se evitar a formação de fase rica em cobre, é necessário limitar a sua utilização em 1,5% (BERTOLI, 1981).

4.3.4 Efeito da adição do manganês

O manganês promove a formação de perlita. Porém, se adicionado em quantidades superiores a 0,8%, pode promover a formação de carbonetos (UNISOCIESC, 2017). Em ferro fundido, o manganês tende a promover a formação de uma estrutura perlítica, aumentando a resistência mecânica e a dureza (MILAN, 2004).

4.3.5 Efeito da adição do cromo

O cromo tem o efeito de reduzir a temperatura do eutético estável e aumentar a temperatura do eutético metaestável. Quando adicionado com teores de até 0,30%, torna-se estabilizador de carbonetos diminuindo a formação de grafita. O cromo é muito utilizado para aumentar a resistência ao desgaste por seu forte potencial coquilhante que leva à formação de carbonetos livres. A Figura 18 apresenta a influência nas temperaturas de equilíbrio eutético de elementos grafitizantes e elementos formadores de carbonetos (UNISOCIESC, 2017).

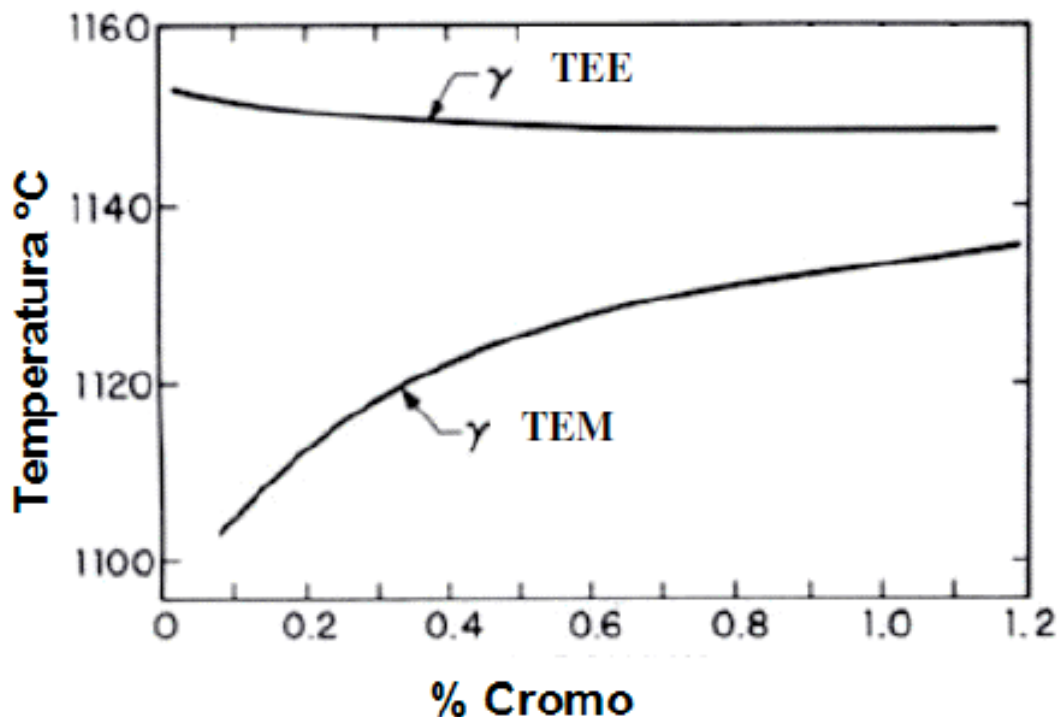


Figura 18 – Influência nas temperaturas de equilíbrio eutético de elementos formadores de carbonetos
Fonte: Santos (1991)

4.3.6 Efeito da adição do níquel

Ao contrário do elemento cromo, o níquel tem o efeito de aumentar a temperatura do eutético estável e diminuir a temperatura do eutético metaestável. O níquel é um agente perlitizante fraco e ajudar na redução do coquilhamento (BERTOLI, 1981).

4.3.7 Efeito da adição do molibdênio

O molibdênio, assim como o cromo, tem o efeito de reduzir a temperatura do eutético estável, promovendo um aumento da resistência à tração e contribuindo para o aumento da resistência à fluência em temperaturas elevadas. O molibdênio possui uma tendência ao coquilhamento, apresentando-se como um forte formador de carbonetos, que provocam perda significativa de ductilidade e usinabilidade. A formação de carboneto é mais evidenciada quando a adição é acima de 0,3%. (MILAN, 2004).

Turnbull (1959) estudou os efeitos causados nas propriedades de tração, até a ruptura, nas temperaturas 425°C, 540°C e 600°C para ferros fundidos cinzentos com

adição de diferentes teores de Mo, quando expostos a essas temperaturas por 100 horas. A Figura 19 apresenta esses resultados de tração.

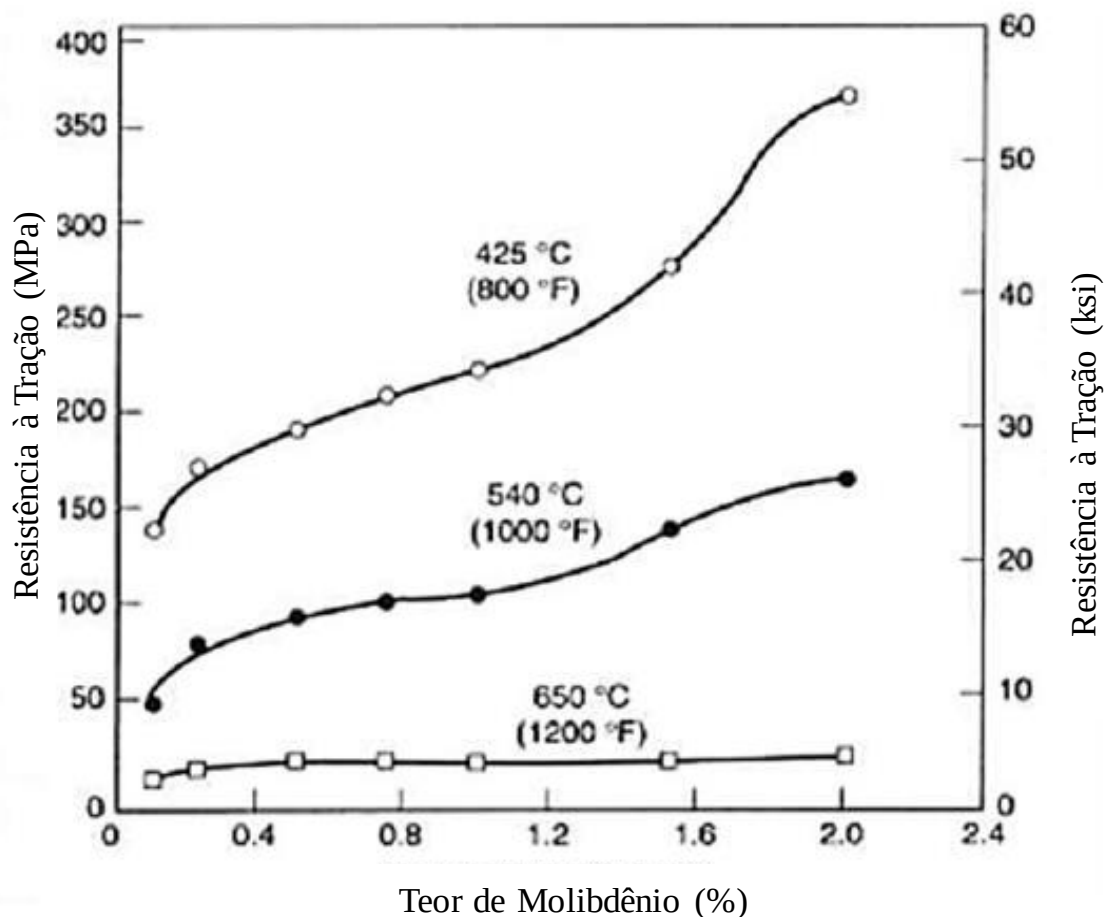


Figura 19 – Influência do teor percentual de molibdênio em ferro fundido cinzento, 0,16% e 0,60%Cr, no valor máximo de resistência à tração quando exposto a diferentes temperaturas por 100 horas
Fonte: Turnbull (1959)

4.3.8 Efeito da adição de estanho

O estanho tem o efeito de reduzir as temperaturas do eutético estável e do metaestável. É adicionado em quantidades baixas (até 0,1%) e possui forte potencial perlitizante, aumentando a dureza e a resistência ao desgaste. Entretanto, pode reduzir a tenacidade. De acordo com Huang (2020), o elemento estanho, adicionado aos ferros fundidos cinzentos, promove a geração de grafita tipo A e a formação de perlita. Associado ao elemento nióbio, eles promovem o refino da grafita e da estrutura perlítica (Figura 20).

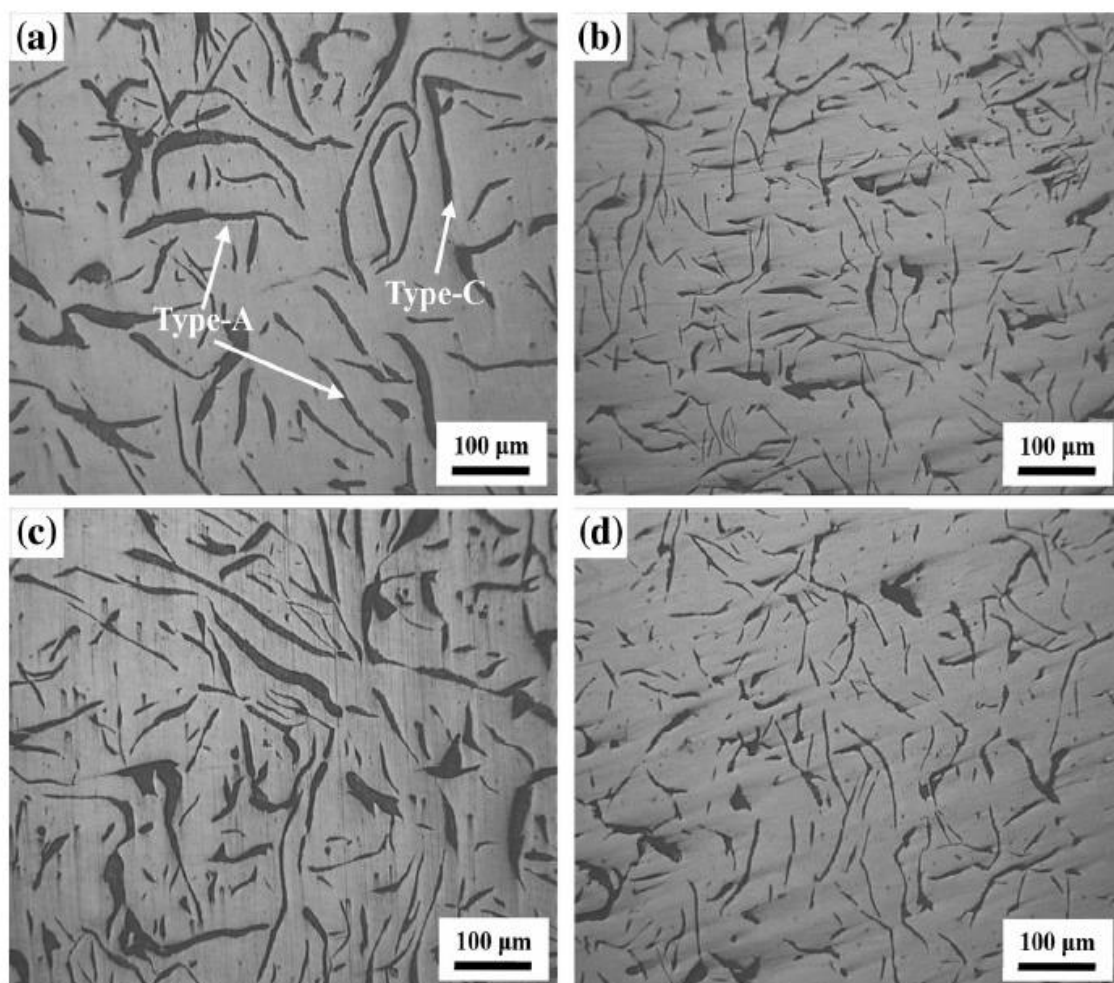


Figura 20 – Morfologias de grafite nos diferentes ferros fundidos (a); GCI (b); GCI-Sn (c); GCI-Nb (d); GCI-Sn-Nb

Fonte: [Adaptado de] Huang (2020)

4.3.9 Efeito da adição do antimônio

Assim como o estanho, o antimônio tem o efeito de reduzir as temperaturas do eutético estável e do metaestável, e possui forte potencial perlitizante. Devido ao seu alto potencial perlitizante, recomenda-se a utilização de teores abaixo de 0,01%. Alguns autores alertam quanto ao perigo de perda das propriedades mecânicas, formação da grafita de super-resfriamento e tendência à formação de carbonetos eutéticos (BCIRA, 1984).

4.3.10 Efeito da adição do nióbio

De acordo com Zhai et al. (2009), o nióbio promove um aumento da resistência à tração. Resultados experimentais indicaram que o aumento no nióbio favorece o refino da grafita, da célula eutética e reduz o espaçamento interlamelar da perlita. Outro fato é o aumento da dureza elevando a resistência ao desgaste. A Figura 21, segundo Zhai et al. (2009), apresenta a relação do aumento da dureza e da redução do desgaste do ferro fundido com a adição do elemento nióbio.

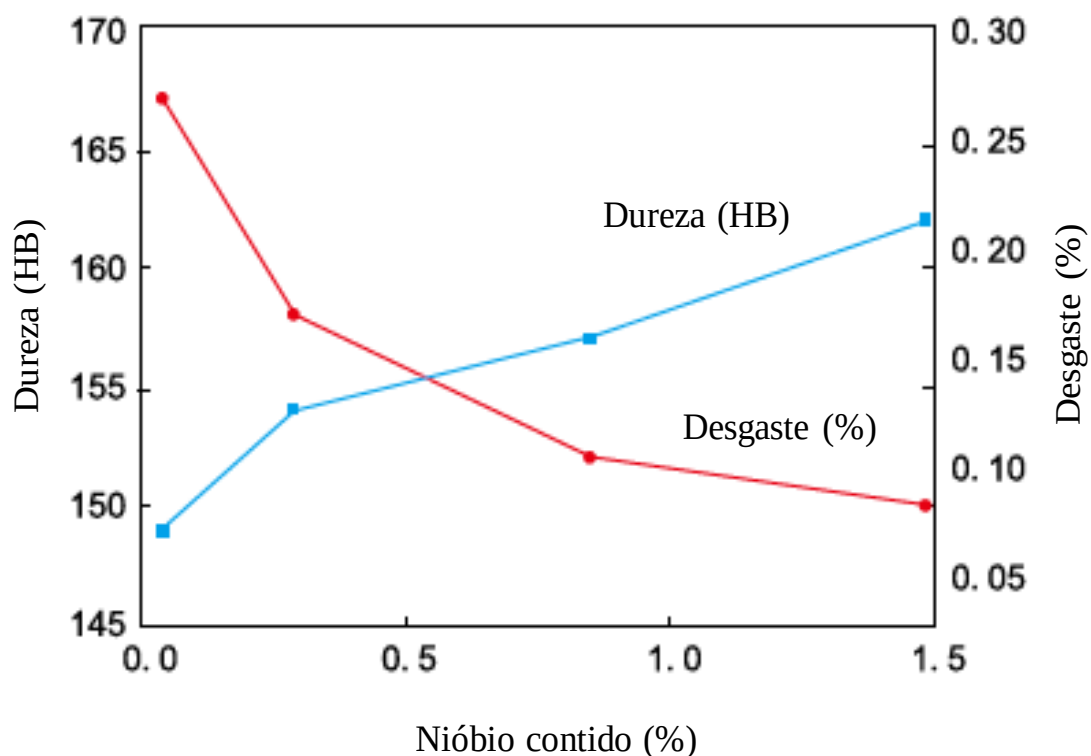


Figura 21 - Efeito da adição de nióbio no aumento da dureza e redução do desgaste no ferro fundido

Fonte: Zhai et al. (2009)

Mohrbacher (2011) relatou que a adição de Nb diminui o diâmetro médio das células eutéticas para testes realizados com adição de 0,042% Nb e 0,29% Nb. Constata também que a redução do diâmetro médio das células é mais forte na faixa de 0,2% Nb. O mecanismo de refinamento da grafita pode ser explicado considerando que pequenos carbonetos de NbC precipitam e crescem em partículas maiores. Contudo, é inevitável que alguns pequenos precipitados residuais de NbC permaneçam durante o resfriamento até a temperatura eutética, atuando como locais de nucleação heterogênea para o crescimento da grafita na reação eutética. Como resultado, o aumento da taxa de nucleação resulta em grafita de morfologia mais refinada. Outro aspecto importante é que

o nióbio diminui a difusão do carbono durante a solidificação, o que também restringe o crescimento da grafita.

4.4 ELEMENTOS DE LIGA COM POTENCIAL GRAFITIZANTE

Os elementos grafitizantes têm a finalidade de elevar o valor do carbono equivalente e promover a formação da grafita na solidificação, o que é diretamente ligado à solubilidade do carbono no ferro líquido. Os principais elementos grafitizantes do ferro fundido cinzento são: carbono (C), silício (Si), alumínio (Al) e os já citados elementos níquel (Ni), cobre (Cu) (PIESKE, 1980). A Figura 22 apresenta graficamente o efeito dos elementos de liga na grafitação e na formação de carbonetos.

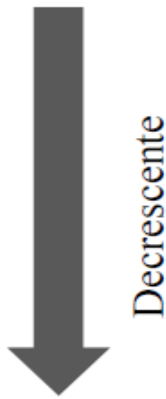
	Tendência à:	
	Grafitização	Formação de carbonetos
	Si	B
	Al	$S_{(\geq 0,45\%)}$
	$C_{(CE < 3,5)}$	V
	Cu	Cr
	Co	$S_{(< 0,45\%)}$
	P	Nb
	Ni	Sn
	$C_{(CE \geq 3,5)}$	W
		Mn
		Mo
		Sb

Figura 22 - Efeito dos elementos de liga na grafitação e na formação de carbonetos

Fonte: [Adaptado de] Kanno (2005)

4.5 INOCULAÇÃO

O processo de inoculação nos ferros fundidos ocorre pela adição de pequenas quantidades de material composto de partículas nucleantes no metal fundido. A adição ocorre antes e, em alguns casos, durante o vazamento do metal líquido, com o objetivo de controlar a microestrutura final e, assim, as propriedades mecânicas do material (SINATORA, 1976). O objetivo da inoculação é minimizar a formação de carbonetos na

estrutura do material, proporcionando um aumento de células eutéticas disponíveis para a formação de grafitas refinadas. O aumento do número de células eutéticas disponíveis diminui o super-resfriamento na solidificação, facilitando a solidificação do eutético estável (FULLER, 1977). Sendo assim, o maior número de núcleos potenciais para a nucleação e crescimento da grafita resulta em uma estrutura mais refinada, que implica em melhores propriedades mecânicas e físicas (OLAH NETO, 1985). A Figura 23 apresenta os grupos de principais inoculantes.

Grupos de Inoculantes	Inoculantes
Inoculantes grafitizantes comuns	Silício metálico
	Ferro-silício 50%
	Ferro-silício 75%
	Ferro-silício Tipo A
	Ferro-silício Tipo B
	Ferro-silício 85%
	Ca-Si
Inoculantes grafitizantes especiais	Ca-Si-Ti
	Ca-Si-Mn
	Ca-Si-Mn-C
	Fe-Si-Zr
	Fe-Si-Zr-Ca
	Ca-Si-Ba
	Fe-Si-Mn-Zr-Ba
	Si-Mn-Ca-Ba
	Si-Terras Raras
Inoculantes estabilizadores perlitizantes	Fe-Cr
	Cr-Si-Mn
	Cr-Si-Mn-C

Figura 23- Grupos de inoculantes
Fonte: UNISOCIESC (2017)

4.6 PROPRIEDADES GERAIS

4.6.1 Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento

O projeto de um componente mecânico ou equipamento industrial requer conhecimento das propriedades dos materiais disponíveis. Para a seleção de um tipo de material para o projeto, são avaliadas as suas propriedades mecânicas e o seu comportamento mecânico. Essas características são obtidas através de ensaios mecânicos normalizados e através de normas técnicas que descrevem o procedimento do ensaio, bem como os requisitos mínimos de resistência mecânica e dureza para diversas classes de ferros fundidos. As propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento estão diretamente relacionadas com a quantidade e o tamanho das partículas de grafita que, por sua vez, estão relacionadas aos valores de carbono equivalente. O aumento no teor de carbono equivalente reduz o limite de resistência do material, influenciado pelo aumento da quantidade e do tamanho da grafita (MALUF, 2009).

A Figura 24 apresenta variações do limite de resistência em função do teor de carbono equivalente.

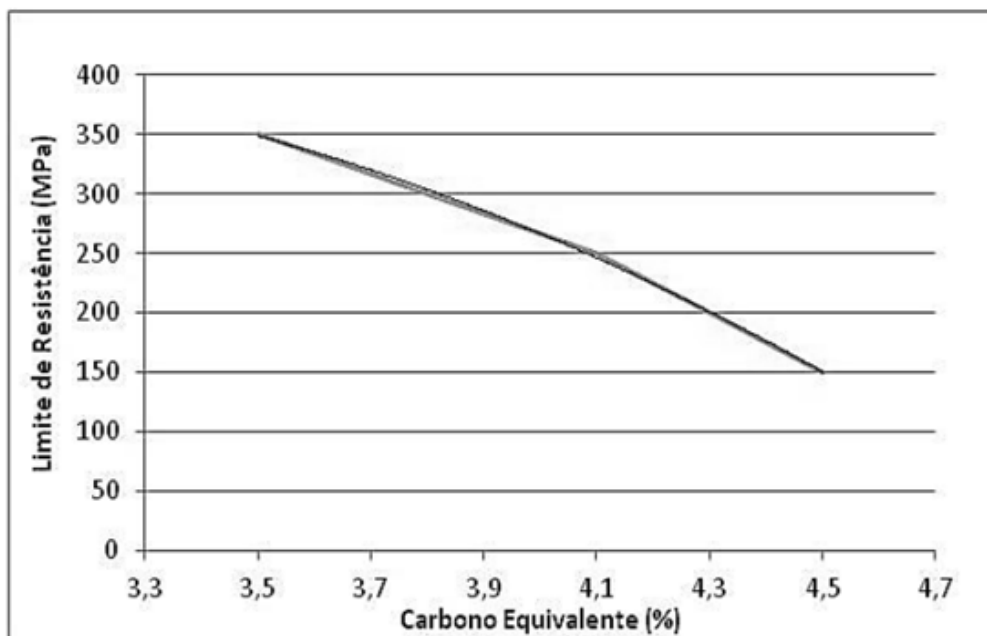


Figura 24 – Efeito do carbono equivalente sobre o limite de resistência de ferros fundidos cinzentos

Fonte: Walton (1981, apud GUESSER 2009)

Maluf (2007) observou que a adição de elementos de ligas aumenta a dureza do ferro fundido aplicado a disco de freio e, aqueles que formam soluções sólidas intersticiais têm este efeito mais pronunciado que os substitucionais. Os elementos de liga podem atuar indiretamente no aumento da resistência através do refino de grão e na formação de carbonetos, como já comentado, melhorando as propriedades física e/ou mecânica, tais como resistência mecânica, tenacidade, resistência à corrosão, resistência a altas temperaturas, desgaste, condutividade elétrica e permeabilidade magnética, por meio de alterações na estrutura cristalina ou microestrutura.

A adição de elementos de ligas promove a alteração do diagrama Fe-Fe₃C notadamente no ponto eutetóide. Dependendo do tipo de elemento, a temperatura eutetóide pode aumentar ou diminuir. Além disso, os elementos de liga, em geral, provocam uma redução do teor de carbono no ponto eutetóide. Além destes efeitos em comum, os elementos de liga possuem particularidades que os tornam mais adequados para serem adicionados em um material, dependendo do tipo de aplicação (Milan, 2004).

Outro fator importante, que deve ser levado em consideração, é que a inoculação é outra variante tão importante quanto a quantidade e tamanho da grafita presente no ferro fundido cinzento. A inoculação permite evitar, ou balancear, a presença de carbonetos, e aumentar o número de células eutéticas refinando, então, partículas de grafita e elevando a quantidade de regiões intercelulares (PIESKE, 1975).

O controle dessas propriedades oscila de acordo com sua aplicação, e existem normas regulamentadoras para cada classe de ferro fundido. A norma ABNT NBR 6589/1986 estabelece classes de ferro fundido de acordo com o limite de resistência. A Figura 25 apresenta os valores de resistência e dureza de acordo com a Norma ABNT NBR 6589/1986.

A taxa de resfriamento na fase líquida de solidificação do ferro fundido é um dos fatores determinantes na composição da matriz. A matriz tem grande influência sobre as propriedades do material. De forma geral, as matrizes perlíticas exibem maior resistência mecânica que as matrizes ferríticas (SANTOS, 1991).

De acordo com Guesser (2009), a resistência é aumentada com os teores crescentes de perlita, que substitui a ferrita presente no ferro fundido, e com a diminuição do seu espaçamento interlamelar. A quantidade de perlita e seu espaçamento interlamelar também são influenciados pela velocidade de resfriamento no estado sólido (refinando e

aumentando a quantidade de perlita) e pela adição de certos teores de elementos de liga (Cu, Sn, Cr e Mn são os mais comuns).

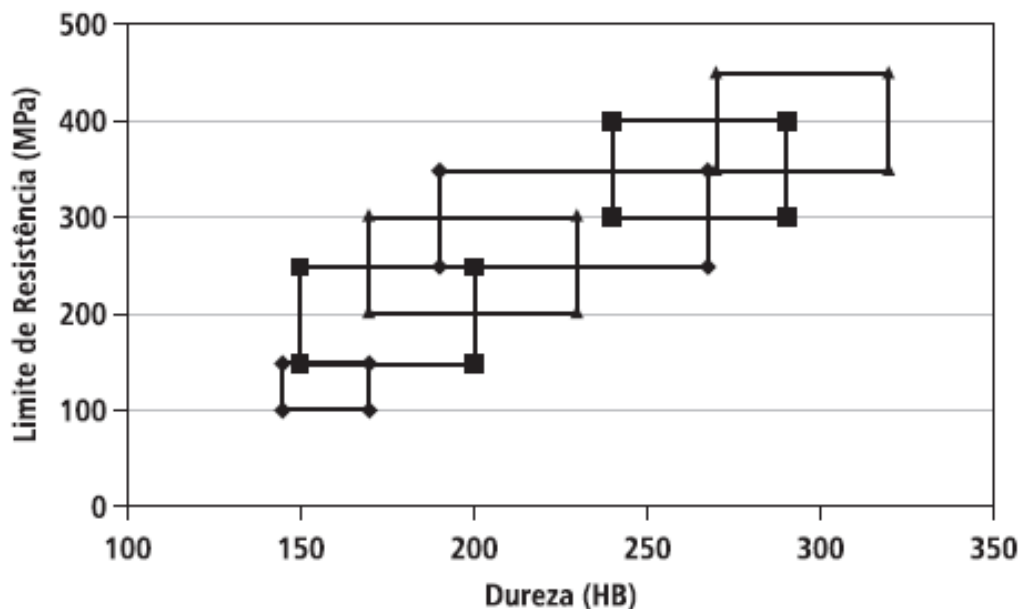


Figura 25 – Relação entre limite de resistência e dureza para ferro fundido cinzento de acordo com a Norma ABNT NBR 6589/1986

Fonte: [Adaptado de] Guesser 2(009)

A Figura 26 apresenta variáveis da microestrutura e de processos que podem influenciar nas propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento (GUESSER, 2009).

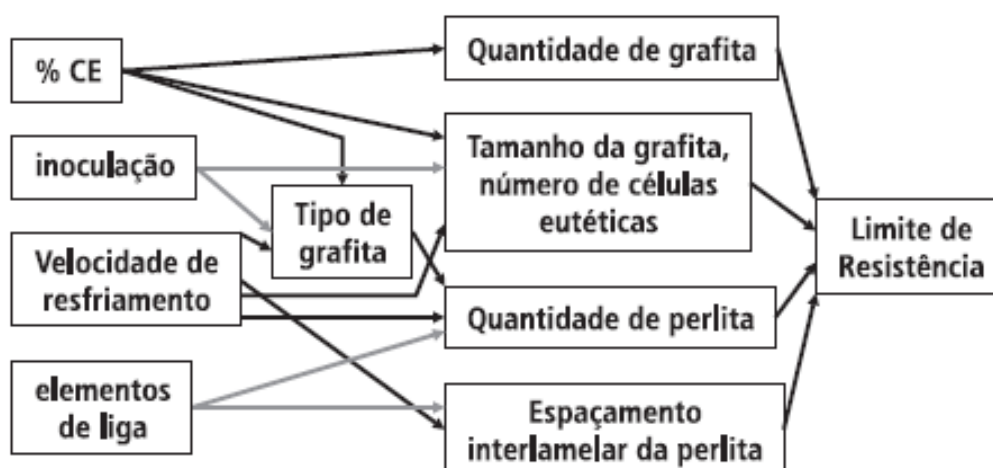


Figura 26 – Variáveis da microestrutura e de processos que podem influenciar no limite de resistência à tração em ferro fundido cinzento

Fonte: [Adaptado de] Guesser (2009)

Outras variáveis podem influenciar na microestrutura, como os teores de Mn, S e inoculante e técnicas de inoculação, como já mencionado anteriormente. Nos processos de fundição, emprega-se usualmente um excesso de manganês de 0,3%, isso garante que o enxofre combine com o manganês ao invés do ferro. A Equação 6 contribui para evitar a formação de ferro fundido branco na microestrutura, evitando problemas durante a usinagem (ADERSON, 1985).



A Norma ISO 185/2005 classificou o ferro fundido cinzento em função de variações de dureza e da espessura da peça, bem como sua predecessora, a Norma Europeia EN 1561/1997, que apresentou uma síntese da maioria das características mecânicas e físicas deste material, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas e físicas e expectativa de desempenho em peças de ferros fundidos cinzentos com diâmetro de fundição de 30 mm

Designação do Material	EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300	EN-GJL-350
Estrutura Básica	Ferrítica/ Perlítica		Perlítica		
Característica					
Resistência à tração (N.mm ⁻²)	150 a 250	200 a 300	250 a 350	300 a 400	350 a 450
Alongamento (%)	0,8 a 0,3				
Resistência à compressão (N.mm ⁻²)	600	720	840	960	1080
Resistência à flexão (N.mm ⁻²)					
Módulo de elasticidade (kN.mm ⁻²)	78 a 103	88 a 113	103 a 118	108 a 137	123 a 143
Tenacidade (N.mm ⁻²)	320	400	480	560	650
Densidade (g.cm ³)	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30

Fonte: [Adaptado de] Norma Européia EN 1561 (1997)

4.6.2 Propriedades físicas do ferro fundido cinzento

As propriedades físicas, assim como as propriedades mecânicas, são muito importantes para a seleção da aplicação dos ferros fundidos. As principais propriedades físicas são: densidade, expansão térmica, condutividade térmica, calor específico, propriedades elétricas, magnéticas e acústicas.

4.6.2.1 Densidade

A constituição do ferro fundido é extremamente importante para determinar a densidade. A grafita tem a densidade de 2,25 g/cm³ e os microconstituintes da matriz apresentam densidade entre 7,3 a 7,9 g/cm³. Consequentemente, quanto maior a quantidade de grafita, menor a densidade do ferro fundido. De acordo com Palmer (1987), a densidade nos ferros fundidos cinzentos pode ser estimada a partir dos constituintes (ver Equação 7).

Alterações na densidade e na variação das temperaturas ocorrem devido à expansão térmica. Nos ferros fundidos cinzentos, a ciclagem de temperatura através da zona crítica reduz a densidade (PALMER, 1976).

$$\text{Densidade (g/cm}^3\text{)} = 8,105 - 0,223 \times \%C - 0,091 \times \%Si - 0,071 \times \%P \quad (7)$$

4.6.2.2 Expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica é a medida de alteração relativa de comprimento, ou volume, dentro de um recipiente que experimenta uma alteração na temperatura, resultando, assim, em uma dilatação térmica. A medida usual de expansão térmica dos materiais é o coeficiente de expansão térmica linear (α) que é mostrado na Equação 8 (Guesser, 2009).

$$\alpha = \Delta L / L_o \times \Delta T \quad (8)$$

sendo:

α – coeficiente de expansão térmica linear (°C⁻¹)

L_o – Comprimento inicial

ΔL – Variação do comprimento

ΔT – Variação de temperatura (°C)

4.6.2.3 Condutividade térmica

Na seleção de materiais, a condutividade térmica é uma das principais propriedades físicas a ser observada, especialmente em componentes que sofrem fadiga térmica, como cabeçotes de motores e discos de freios. O ferro fundido cinzento possui

uma maior condutividade térmica em relação aos outros ferros fundidos grafíticos pois possui a grafita paralela ao plano basal (HASSE,1996).

De acordo com a norma europeia EN 1561/1997, na Tabela 3 constam propriedades físicas de diversas classes de ferros fundidos cinzentos. Observa-se que o coeficiente de dilatação térmica não é afetado pela classe de ferro fundido cinzento, enquanto a condutividade térmica aumenta à medida que se caminha para classes menor de resistência mecânica. Isto é devido à contribuição da grafita na condutividade térmica, de modo que as classes que contêm maiores quantidades de grafita apresentam maior condutividade térmica (e menor resistência mecânica).

Tabela 3 – Propriedades físicas de ferros fundidos cinzentos Norma EN 1561/1997

Característica	Classe EM-GJL				
	150	200	250	300	350
Densidade ρ g/cm ³	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30
Calor específico C_p J/(kg.K)					
entre 20° e 200°C	460				
entre 20° e 600°C	535				
Coef. expansão térmica linear α $\mu\text{m}/(\text{m.K})$					
entre -100 e +20°C	10,0				
entre 20 e 200°C	11,7				
entre 20 e 400°C	13,0				
Condutividade térmica λ W/(m.K)					
a 100°C	52,5	50,0	48,5	47,5	45,5
a 200°C	51,0	49,0	47,5	46,0	44,5
a 300°C	50,0	48,0	46,5	45,0	43,5
a 400°C	49,0	47,0	45,0	44,0	42,0
a 500°C	48,5	46,0	44,5	43,0	41,5

Fonte: [Adaptado de] Norma Europeia EN 1561 (1997)

4.6.2.4 Calor específico

O calor específico é a quantidade de calor necessária para aumentar em 1°C uma quantidade de 1 kg do material. É um parâmetro utilizado para calcular as perdas térmicas durante o resfriamento ou para determinar a carga na peça até o ponto de fusão, sendo fundamental para o cálculo da difusividade térmica. O calor específico da grafita é

superior ao da matriz (GUESSER, 2009). A Tabela 4 apresenta o calor específico (capacidade térmica) de ferros fundidos grafíticos em função da temperatura.

Tabela 4 – Calor específico (capacidade térmica) de ferros fundidos grafíticos para faixas de temperatura de 100°C

Calor específico médio para cada faixa de temperatura (J/kg.k)								
100 a 200°C	200 a 300°C	300 a 400°C	400 a 500°C	500 a 600°C	600 a 700°C	700 a 800°C	800 a 900°C	900 a 1000°C
540	585	635	690	765	820	995	750	850

Fonte: [Adaptado de] Guessser (2009)

4.6.2.5 Difusividade Térmica

A formação da grafita influencia diretamente nas propriedades térmicas do ferro fundido cinzento, material deste estudo. Segundo Wang (1999), verificou-se que a difusividade térmica do ferro fundido cinzento aumenta com carbono equivalente e tem uma forte correlação linear com o comprimento da grafita. O aumento no tamanho da grafita resulta em um aumento significativo na difusividade térmica. A Figura 27 apresenta a evolução da difusividade em função do teor de carbono equivalente dos ferros fundidos cinzentos.

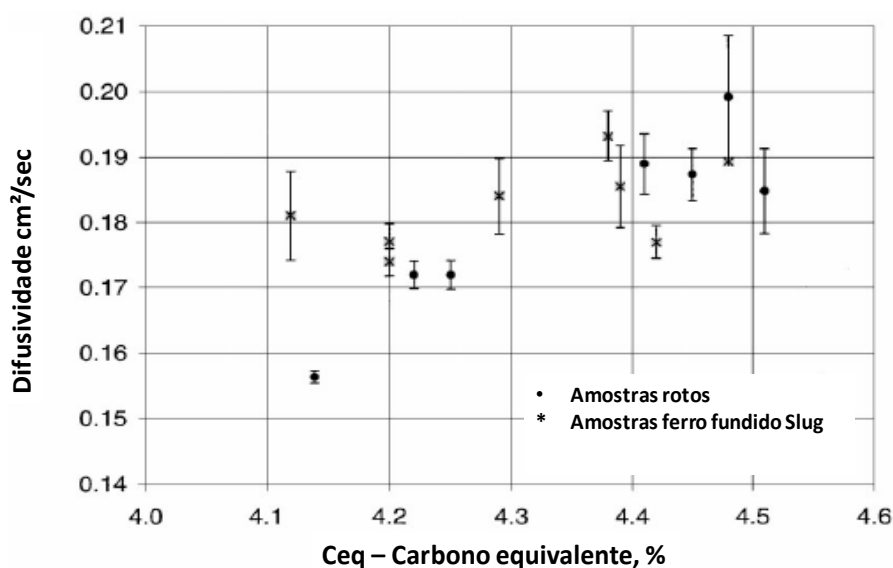


Figura 27 - Efeito do carbono equivalente na difusividade
Fonte: [Adaptado de] Wang (1999)

O aumento da difusividade térmica melhora as propriedades do material ao transferir calor, sendo fundamental no dimensionamento de discos de freios automobilísticos. Através da obtenção de resultados de difusividade, pode-se calcular a condutividade térmica. Discos de freios com elevada condutividade apresentam melhor resistência à nucleação e à propagação de trincas térmicas (Jimbo, 1990).

A difusividade indica a rapidez com que o calor se difunde através de um material e possui unidades m^2/s . A Equação 9 apresenta a denotação α para determinação da difusividade.

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot cp} \quad (9)$$

Onde:

α – Difusividade (m^2/s)

K – Condutividade ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

ρ – Densidade ($kg.m^3$)

Cp – Calor específico ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)

4.6.2.6 Propriedades acústicas e de vibração

Para se avaliar as propriedades acústicas e de vibração, são utilizados os testes de frequência de ressonância e velocidade de ultrassom. Elas estão diretamente relacionadas com o módulo de elasticidade (E).

A capacidade de amortecimento de vibrações é o resultado do atrito entre a grafita e a matriz metálica durante a solicitação mecânica. A capacidade de amortecimento de vibração é avaliada através do coeficiente de amortecimento. Chiaverini (2015) destaca a capacidade de amortecimento dos ferros fundidos cinzentos, e define essa capacidade como a habilidade de um metal absorver vibrações resultantes de tensões cíclicas, por fricção interna, transformando a energia mecânica em calor. A capacidade de amortecimento dos ferros fundidos cinzentos foi demonstrada através do ensaio de Foepppl-Pertz. A Figura 28 mostra a capacidade de amortecimento de vibração do aço em relação ao ferro fundido cinzento, onde é possível observar a grande capacidade de amortecimento de vibração do ferro fundido grafítico (Angus, 1976).

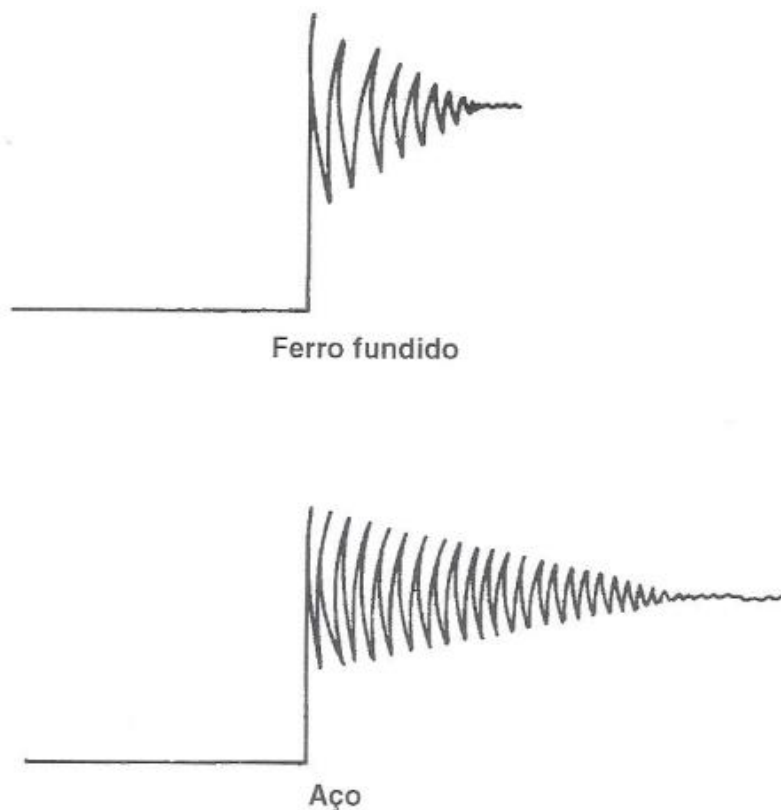


Figura 28 – Capacidade de amortecimento de vibração de aço e ferro fundido gráfico pelo método Foppel-Pertz.

Fonte – [Adaptado de] Chiaverini (2015)

4.6.2.7 Resistência a quente

Os testes de resistência a quente são ensaios mais simples que os de resistência à fadiga térmica, pois envolvem um pouco de exposição à temperatura, não considerando, assim, a decomposição da perlita.

Os ensaios são realizados conforme a norma ASTM E21. O corpo de prova de tração é aquecido em um forno elétrico com capacidade de aquecimento de até 1000°C, com controle de temperatura medida através de um termopar de contato. A Figura 29 mostra uma típica máquina para avaliação da resistência a quente dos materiais.

Nos ferros fundidos cinzentos, a resistência decresce levemente com o aumento da temperatura até 200°C, e ocorre um leve aumento na temperatura em torno de 400°C. Para temperaturas superiores a 400°C, a resistência cai acentuadamente. A Figura 30 mostra o comportamento de vários ferros fundidos ligados e não ligados.

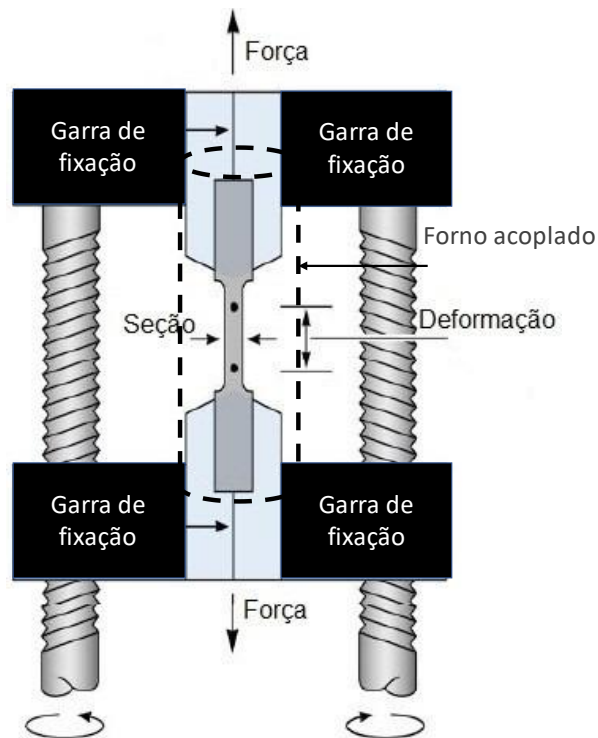


Figura 29 – Forno acoplado à máquina de ensaios de resistência à tração a quente
Fonte - Sampaio et al. (2017)

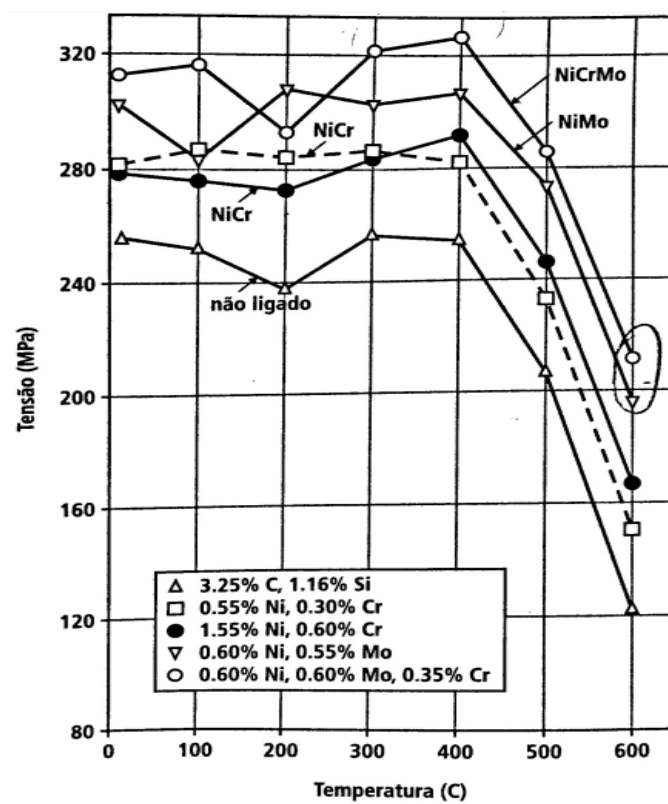


Figura 30 – Resistência a quente (LR) de ferro fundido cinzento com diferentes combinações de elemento de liga

Fonte – Nechteberger (1980, apud GUESSER, 2009)

O módulo de elasticidade é a indicação da rigidez do material e depende diretamente das forças de ligação interatômicas, ou seja, ligação entre átomos, íons ou moléculas. Quanto maior o módulo de elasticidade, menor a deformação elástica resultante de uma aplicação de uma determinada tensão. Portanto, o módulo de elasticidade é inversamente proporcional à temperatura. Isso explica a queda acentuada de resistência à tração a elevadas temperaturas. Entretanto, no ferro fundido cinzento, outros fatores devem ser observados, como formação da grafita, presença de carbonetos e inclusões. Nos ferros fundidos cinzentos a deformação varia de acordo com a classe de resistência (ASM HANDBOOK,1998). Este trabalho tem como objetivo principal estudar o comportamento, em elevadas temperaturas, de ferros fundidos cinzentos com adição de nióbio ou molibdênio, que são empregados na fabricação de discos de freios automobilísticos.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 DESCRIÇÃO GERAL

Visando avaliar a influência da adição de nióbio no ferro fundido cinzento para trabalho a quente, foram produzidas para estudo quatro ligas diferentes, sendo uma delas a liga base utilizada na produção de discos de freios automobilísticos. As adições dos elementos de liga foram realizadas em forno de indução e foram produzidos discos de freios para retirada de corpos de prova para ensaios mecânicos e químicos.

5.2 MATERIAL

Para a realização dos testes comparativos das ligas de ferros fundidos cinzentos aplicados a discos de freios automobilísticos, foram elaboradas quatro composições químicas. A Tabela 5 apresenta a especificação da liga base. As cargas das corridas foram constituídas de ferro-gusa e barras de aço, sendo que as barras de aço laminado de um mesmo lote para garantir a homogeneidade da composição. A Tabela 6 apresenta a variação dos elementos de liga deste estudo.

Tabela 5 – Composição química da base prevista para testes (%)

Limites	C	Si Base	Si Inoc	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Ceq
Mín.	3,70	1,45	1,75	0,40	0,00	0,08	0,10	0,30	0,02	4,30
Máx.	3,75	1,50	1,80	0,50	0,05	0,10	0,15	0,35	0,03	4,37
Meta	3,72	1,47	1,77	0,45	0,00	0,09	0,13	0,33	0,025	4,34

Fonte: Autor

Tabela 6 – Variações dos elementos químicos mantendo a composição base (%)

Limites (%)	Teste 1 Nb ou Mo	Teste 2 Nb	Teste 3 Nb	Teste 4 Mo
Mín.	0,00	0,08	0,18	0,14
Máx.	0,00	0,12	0,22	0,16
Meta	0,00	0,10	0,20	0,15

Fonte: Autor

5.2.1 Elementos de liga

Os elementos de ligas foram adicionados durante a fusão. A Tabela 7 apresenta os resultados da composição química dos elementos de liga, das barras de aço e do ferro-gusa.

Tabela 7 – Composição química dos elementos de liga, das barras de aço e do ferro-gusa

Composição Química/Granulometria	Elemento	Concentração %
1. FeMo 10-60mm	Molibdênio (Mo)	60,58
2. FeCr 10mm	Carbono (C)	6,60
	Enxofre (S)	0,06
	Alumínio (Al)	1,27
	Cálcio (Ca)	3,58
	Manganês (Mn)	0,06
3 FeSi 10-60mm	Fósforo (P)	0,03
	Bário (Ba)	0,00
	Zircônio (Zr)	0,02
	Estrôncio (Sr)	0,01
	Silício (Si)	75,34
4. Granalha de cobre	Cobre (Cu)	99,91
	Oxigênio (O)	0,02
	Estanho (Sn)	99,94
	Chumbo (Pb)	0,05
	Bismuto (Bi)	0,00
5. Estanho	Ferro (Fe)	0,00
	Antimônio (Sb)	0,00
	Cobre (Cu)	0,00
	Alumínio (Al)	0,00
	Níquel (Ni)	0,00
	Manganês (Mn)	79,96
6. FeMn AC 10-60mm	Silício (Si)	0,51
	Fósforo (P)	0,30
	Carbono (C)	6,60
	Alumínio (Al)	0,48
	Cálcio (Ca)	1,03
	Manganês (Mn)	0,04
7. Inoculante FeSi CaAlBa 1-3mm	Fósforo (P)	0,03
	Bário (Ba)	1,58
	Zircônio (Zr)	0,03
	Estrôncio (Sr)	0,02
	Silício (Si)	76,16
	Silício (Si)	1,90
	Alumínio (Al)	<0,30
	Fósforo (P)	0,10
8. FeNb 1-5mm	Ferro (Fe)	29,10
	Carbono (C)	0,12
	Enxofre (S)	0,02
	Nióbio (Nb)	66,60
	Carbono (C)	4,39
	Manganês (Mn)	0,58
9. Ferro-gusa	Silício (Si)	0,64
	Fósforo (P)	0,08
	Enxofre (S)	0,02
	Carbono (C)	0,08
	Manganês (Mn)	0,00
10. Barra de aço	Silício (Si)	0,02
	Fósforo (P)	0,02
	Enxofre (S)	0,01

Fontes: Certificado Cometa Ferro Liga: 1, 4, 5, 6; certificado de Análise CBMM: 8; Autor: 2, 3, 7, 9, 10

5.2.2 – Dimensionais e equipamentos

Conforme descrito no Item 5.1, os corpos de prova para caracterização das propriedades mecânicas e químicas foram retirados de discos de freios automobilísticos produzidos de acordo com a Figura 31.

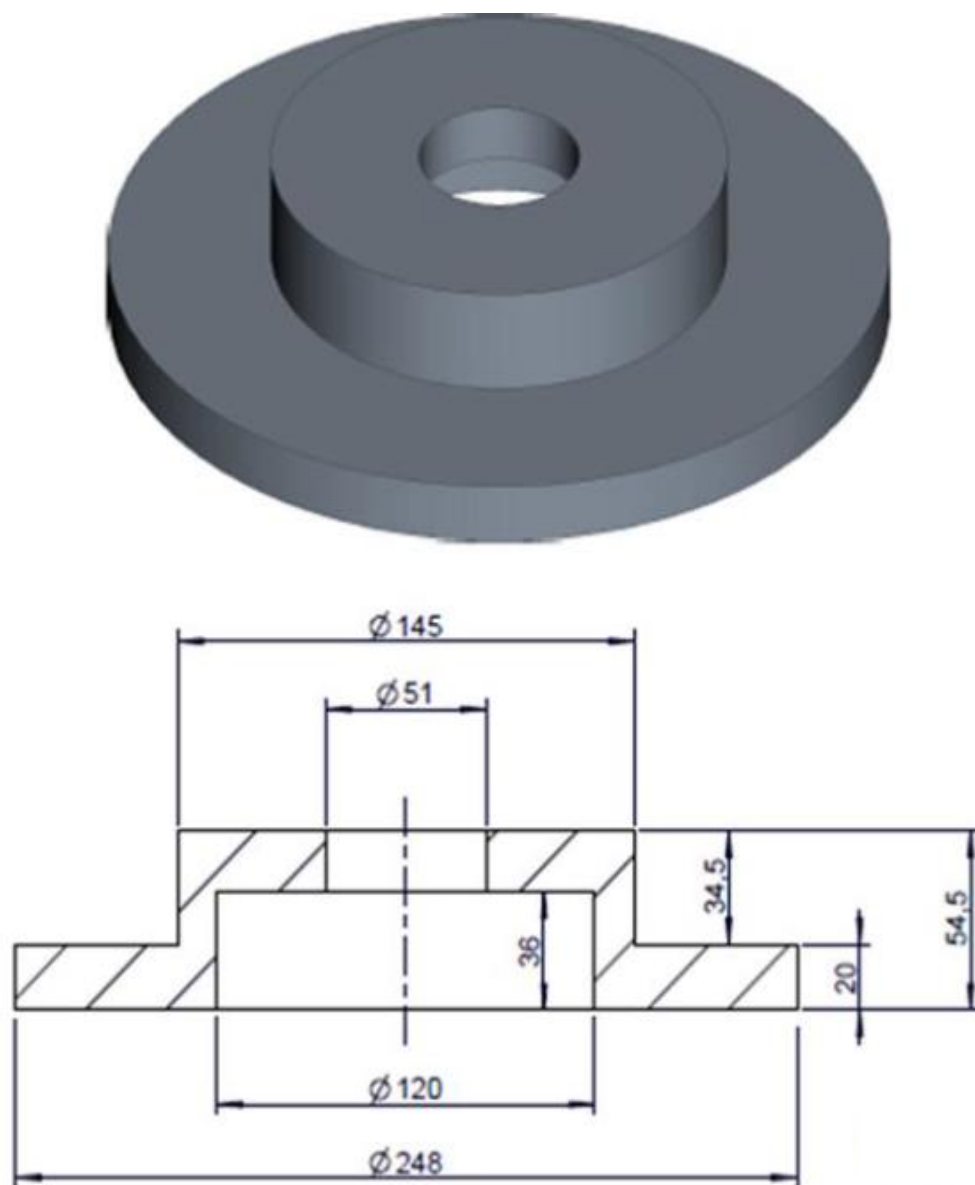


Figura 31 – Modelo de disco de freio automobilístico utilizado como corpo de prova

Fonte: [Adaptado de] Relatório Senai Sistema FIEMG

Os modelos de fundição para obtenção dos moldes dos discos de freio utilizados como corpos de prova foram produzidos em madeira e moldados em areia de sílica

aglomerada com resina. As Figuras 32 e 33 apresentam os modelos e alguns moldes utilizados neste estudo.



Figura 32 – Modelos de disco de freio automobilístico

Fonte: Autor



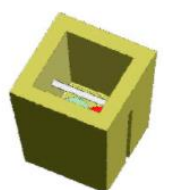
Figura 33 – Moldes de disco de freio automobilístico

Fonte: Autor

A análise térmica de solidificação foi utilizada na avaliação dos efeitos dos elementos nos parâmetros de solidificação do ferro fundido cinzento. A Figura 34 mostra o equipamento da marca Heraeus Electro-Nite existente no SENAI Itaúna CETEC.



Coleteta de metal líquido



Cápsula
de análise
térmica

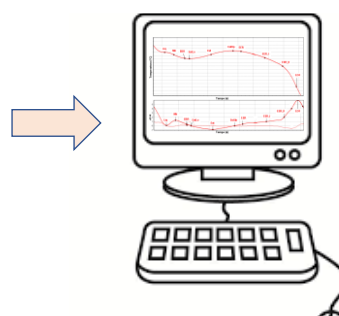




Figura 34 - Esquema e equipamento de análise térmica marca Heraeus ElectroNite
Fonte: [Adaptado de] Relatório Senai Sistema FIEMG CETEC

Os materiais da liga foram fundidos em aproximadamente 1480°C em forno à indução, com carga de 120 kg. A Figura 35 apresenta o forno de indução de 120 kg.



Figura 35 – Forno de indução
Fonte: [Adaptado de] Relatório Senai Sistema FIEMG CETEC

5.3 MÉTODOS

5.3.1. Esquema geral das fundições dos discos de freio referente às corridas 1 a 4

Foram elaboradas 4 corridas para a produção dos discos automobilísticos. A sequência de carregamento das matérias primas e dos insumos, descrita abaixo, é mostrada na Figuras 36.



Carregamento do forno



Adição dos elementos de liga



Controle de temperatura



Coleta de amostra



Coleta de amostra para análise térmica



Transferência e inoculação no jato



Vazamento da panela

Figura 36 – Sequência do carregamento das matérias primas e dos insumos**Fonte:** Autor

1. Fez-se o carregamento do forno utilizando-se ferro-gusa e barras de aço;
2. Assim que o ferro fundido liquefez, com a temperatura em torno de 1200°C, realizou-se a limpeza com retirada da escória, adicionou-se os elementos de ligas e elevou-se a temperatura a 1400°C para manter o banho líquido e evitar inclusões.
3. Coletou-se amostra para análise química com manutenção da temperatura a 1400°C;
4. Coletou-se amostra para análise térmica;
5. Elevação da temperatura até 1470°C, transferência do metal do forno para a panela e a inoculação no jato de metal líquido.
6. Vazamento do metal da panela para o molde a uma temperatura de 1370 a 1420°C; este controle é foi realizado para evitar o superaquecimento perdendo a eficiência do inoculante que aumenta a reação do metal e consequentemente defeitos como penetração de metal na areia. As temperaturas baixas demais produzem secções finas que evidenciam o aparecimento de vários outros defeitos
7. Os discos de freios foram desmoldados após quarenta e cinco minutos, para padronização do tempo de resfriamento.

5.3.2 Ensaios Mecânicos

5.3.2.1 Ensaios de tração

Os testes de tração foram realizados em corpos de prova retirados dos discos de freio brutos de fundição. A Figura 37 apresenta o desenho do corpo de prova utilizado seguindo a norma ASTM E21:2017 (Seleção e Preparação).

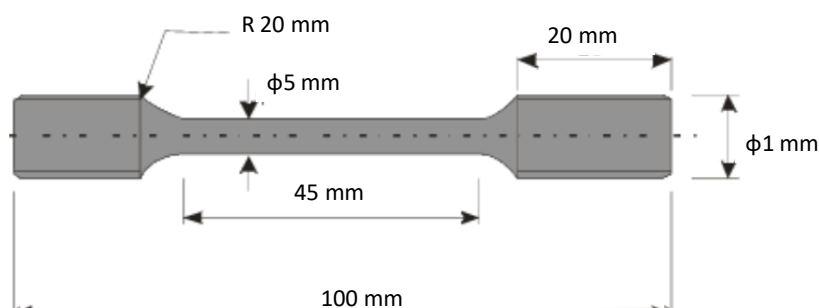


Figura 37– Corpo de Prova (CDP) segundo norma ASTM E21:2017 utilizado nos ensaios de tração até ruptura a elevadas temperaturas

Fonte: [Adaptado de] ASTM E21:2017

O equipamento utilizado para realização dos ensaios de tração em elevadas temperaturas foi o modelo universal de ensaios de tração com faixa nominal de 1000 kN. A taxa aproximada de aplicação de força foi de 3,7 mm/min permitindo uma variação da temperatura de aproximadamente 3°C. Os ensaios de tração em temperatura ambiente foram realizados em máquina de tração tipo EMIC modelo DL 10000 com capacidade de 100 kN, calibrada conforme ABNT NBR ISO 7500-1:2016. A Figura 38 (a) apresenta a máquina de ensaios de tração mecânica universal a quente e a Figura 38 (b), a máquina de tração ambiente tipo EMIC.

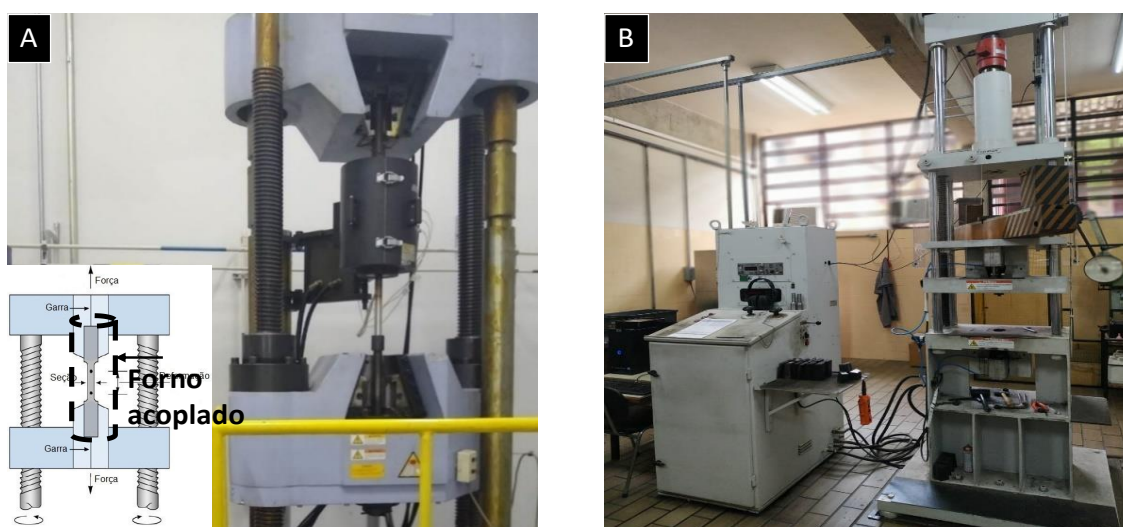


Figura 38 – Máquina de ensaios de tração mecânica universal a quente (a); Máquina de tração tipo EMIC (b)

Fonte: Autor

Foram usinadas 200 amostras distribuídas nas 4 composições químicas de ferros fundidos cinzentos estudados. Ensaios de tração foram realizados até a ruptura em cinco diferentes temperaturas. O planejamento da distribuição de temperaturas de ensaios está apresentado no Tabela 8.

Tabela 8 – Quantificação de corpo de prova para testes e temperatura de ensaios por tipo de corrida

Ensaio	Liga base	Liga Base + 0,10% Nb	Liga Base + 0,20% Nb	Liga Base + 0,15% Mo
Número de corpos de prova				
Tração Ambiente	10	10	10	10
Tração 380°C	10	10	10	10
Tração 480°C	10	10	10	10
Tração 580°C	10	10	10	10
Tração 680°C	10	10	10	10
Total de Corpos de Prova	50	50	50	50

Fonte: Autor

5.3.2.2 Ensaios de dureza

Os testes de dureza foram realizados de acordo com a norma ASTM E10-18 (Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials). Este método de teste abrange a determinação da dureza Brinell para materiais metálicos fornecendo requisitos para uma máquina de teste Brinell e os procedimentos para executar. O teste de dureza Brinell é especificado em unidades de quilograma-força (kgf).

Para a realização da análise de dureza Brinell, foram retirados corpos de prova (amostras) das regiões de pista e do cubo dos discos de freios brutos de fundição, conforme mostram as Figura 39, mapeando-os em cinco pontos referentes ao cubo e nove pontos referentes à pista.

O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço temperado de diâmetro D sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga F , durante um tempo t , produzindo uma calota esférica de diâmetro d .

A Figura 40 mostra a compressão e a medida da esfera nos pontos apresentados da penetração em forma de calota. A dureza Brinell é representada pelas letras HB . Essa representação vem do inglês Hardness Brinell. A dureza Brinell (HB) é a relação entre a carga aplicada (F) e a área da calota esférica impressa no material ensaiado, como na Equação 10.

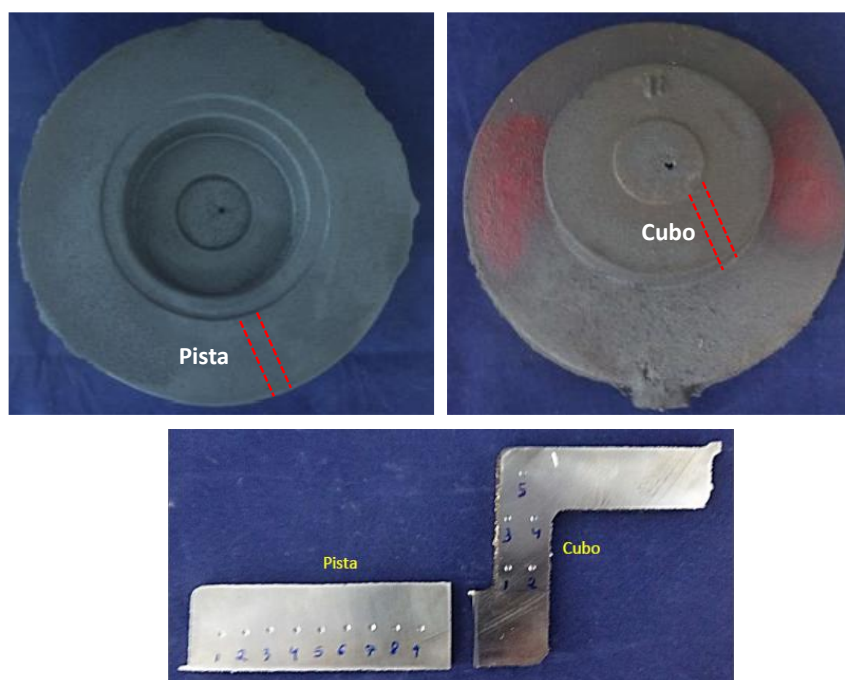


Figura 39 – Amostras retiradas das regiões Pista e Cubo dos discos de freios brutos de fundição

Fonte: Autor

$$HB = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot p} \quad (10)$$

Onde p é a profundidade da calota

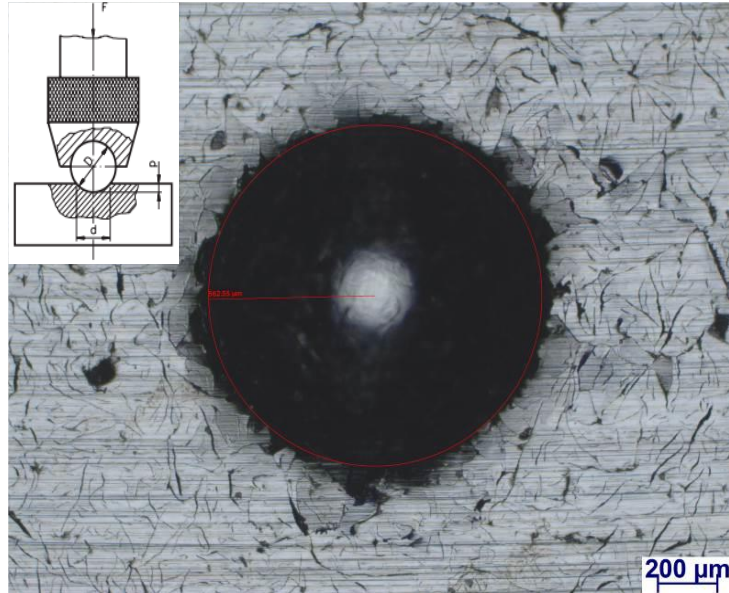


Figura 40 – Calota esférica impressa no material ensaiado, dureza Brinell

Fonte: Autor

Na análise da medição da profundidade (p), que é um valor muito pequeno, utiliza-se uma relação matemática entre a profundidade (p) e o diâmetro da calota (d). A Equação 11 apresenta o cálculo da dureza HB.

$$HB = \frac{2 F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (11)$$

5.3.3 Ensaios químicos

As análises químicas foram realizadas pelo laboratório Senai FIEMG CETEC por espectrometria de emissão ótica sendo o método de análise mais utilizado na metalurgia. A técnica realiza análises químicas multielementares em um curto espaço de tempo. A centelha elétrica é capaz de produzir altas temperaturas, excitando um grande número de átomos, que produzem um número considerável de íons, portanto, permitem a análise de um grande número de elementos. A análise é realizada através da identificação do comprimento de onda emitido característico para cada elemento. A análise foi realizada

de acordo com a norma ASTM 415:2014, ASTM E 1086:2014 e ASTM A751:2014. A Figura 41 apresenta o modelo SPECTROMAXX.

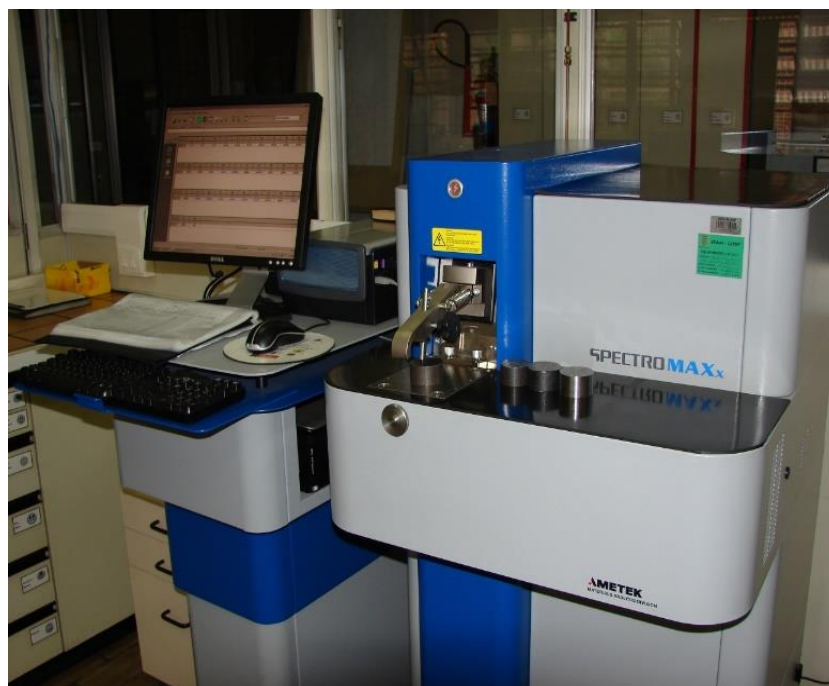


Figura 41 – Espectrômetro de emissão ótica SPECTROMAXX

Fonte - [Adaptado de] Relatório Senai Sistema FIEMG CETEC

5.3.4 Ensaios metalográficos

As análises de microestrutura foram realizadas utilizando-se da técnica de Microscopia Óptica (MO) no equipamento Axio Observer da marca Zeiss. O procedimento de preparação das amostras para análise se divide em três etapas descritas a seguir:

- I. Processo de embutimento a quente: realizado após os corpos de prova serem cortados;
- II. Processo de preparação metalográfica: consiste em corte, lixamento e polimento, utilizando-se lixas de carbeto de silício nas malhas 220, 320, 400, 600 e 1000 e, por fim, no processo de polimento utiliza-se diamante policristalino em suspensão de 6, 3 e 1 μm ;
- III. Processo de ataque para revelação da matriz metálica: utiliza-se Nital 5% pelo método de imersão durante aproximadamente 20 segundos.

Análises metalográficas foram utilizadas para avaliar a medição quantitativa e qualitativa de grafita presente nos ferros fundidos cinzentos através da técnica de

microscopia óptica e do software que compila os resultados médios através do método comparativo por diferença de tonalidades de Pixels de imagens bifásicas.

5.3.5 Ensaio de difusividade térmica

Os ensaios de difusividade térmica deste estudo foram realizados em cada uma das quatro ligas (liga base, liga base + 0,10% Nb, liga base + 0,20% Nb e liga base + 0,15% Mo) nas temperaturas de 380°C, 480°C, 580°C e 680°C. Foram retirados cinco corpos de prova de cada liga nas dimensões de 35 mm de comprimento, 35 mm de largura e aproximadamente 7 mm de espessura. Os testes realizados nestes corpos de prova seguiram o seguinte procedimento:

1. Realizou-se a medida da espessura do corpo de prova;
2. Revestiu-se as amostras com grafite coloidal Acheson Aerodag G nas faces frontal e oposta;
3. Posicionou-se as amostras sobre os três sensores “tricouple” com aquisição de três canais distintos em Voltz (proporcional à variação de temperatura);
4. Pressionou-se as amostras contra os sensores por meio de engate rápido e mola enquanto se inseriu o porta-amostra no forno;
5. Após a estabilização da temperatura desejada e sua verificação nas amostras, seguiu-se com disparos de fonte de laser (flash) para obtenção de sinais;
6. Os sinais foram condicionados e tratados no software *Origin* e *Matlab*.

A Figura 42 mostra o posicionamento das amostras no forno e os três sensores “tricouple”.



Figura 42 – Forno e sensores para análise de difusividade
Fonte: Autor

A Figura 43 apresenta os corpos de prova para ensaio de difusividade retirados dos discos de freios fundidos.



Figura 43 – Corpo de prova usinado para ensaio de difusividade
Fonte: Autor

5.3.6 Estatística

Para a avaliação dos resultados foram aplicados modelos que procuram representar o comportamento de determinado evento em função da frequência de sua ocorrência em um intervalo de valores. Essas análises estatísticas foram realizadas utilizando o Software *Minitab*, onde foi possível realizar diferentes testes como: normalidade, análise de variância (ANOVA), método de múltiplas comparações (Tukey) e estatísticas descritivas (média, desvio padrão, quantis e índice de confiança (IC), além da obtenção de gráficos *Boxplot*.

A distribuição normal é muito utilizada para analisar a função *densidade de probabilidade*. Essa distribuição normal possui dois parâmetros: a média (μ), onde estão centralizados os valores, e a variância, que descreve o seu grau de dispersão. O modelo da função *probabilidade normal* pode ser expressa matematicamente de acordo com a Equação 12.

$$P(a < X < b) = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad -\infty < x < \infty \quad (12)$$

A distribuição normal é a distribuição estatística mais comum para este estudo. Os testes de normalidade utilizados foram os testes de Ryan-Joiner, que avaliam a

normalidade através do cálculo da correlação entre os dados e as contagens normais de seus dados. Se o coeficiente de correlação estiver próximo de 1, a população tende a ser normal. A estatística de Ryan-Joiner avalia também a força dessa correlação; se for menor que o valor crítico adequado, deve-se rejeitar a hipótese nula de normalidade da população. Este teste é semelhante ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Os pontos de dados ficam relativamente próximos à linha de distribuição normal ajustada, assim o valor de p é maior do que o nível de significância de 0,05 (95% de índice de confiança). Portanto, o cientista não rejeita a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição normal.

Outro método utilizado para validação dos resultados foi o da análise de variância que se baseia na soma dos desvios elevados ao quadrado, uma medida de variabilidade onde $X_{ij} - X_{..} = X_{ij} - X_{i.} + X_{i.} - X_{..}$. A análise de variância (ANOVA) pode determinar se as médias de três ou mais grupos são diferentes, testando estatisticamente a igualdade entre as médias. Utiliza-se o teste F para determinar se as médias dos grupos são iguais. O teste F é obtido da razão variância entre as médias da amostra e a variância dentro da amostra.

Para a ANOVA, com um fator, a razão entre a variabilidade entre os grupos e a variabilidade intragrupo segue uma distribuição F quando a hipótese nula é verdadeira. Como a distribuição F assume que a hipótese nula é verdadeira, podemos colocar o valor F de nosso estudo na distribuição F para determinar quão consistentes são nossos resultados com a hipótese nula e calcular a probabilidade. Essa probabilidade conhecida como valor p permite determinar quão comum ou raro é o valor F , supondo-se que a hipótese nula seja verdadeira. Se a probabilidade for baixa o suficiente, pode-se concluir que os dados são inconsistentes com a hipótese nula.

Para determinar se alguma das diferenças entre as médias é estatisticamente significativa, compara-se o valor p com o seu nível de significância a fim de avaliar a hipótese nula. A hipótese nula afirma que as médias populacionais são todas iguais.

A análise de variância foi aplicada para as quatro ligas deste estudo: liga base, liga base + 0,10% Nb, liga base + 0,20% Nb e liga base + 0,15% Mo. Foram realizados testes comparativos de variância através do método de Bonett e Levene, observando-se a maior variância em relação à menor variância e calculando-se a probabilidade (p valor), sendo este $> 0,05$ (95% do índice de confiança).

Para evidenciar estatisticamente a diferença entre as ligas deste estudo, aplicou-se o teste de Tukey, também conhecido como “teste da diferença honestamente

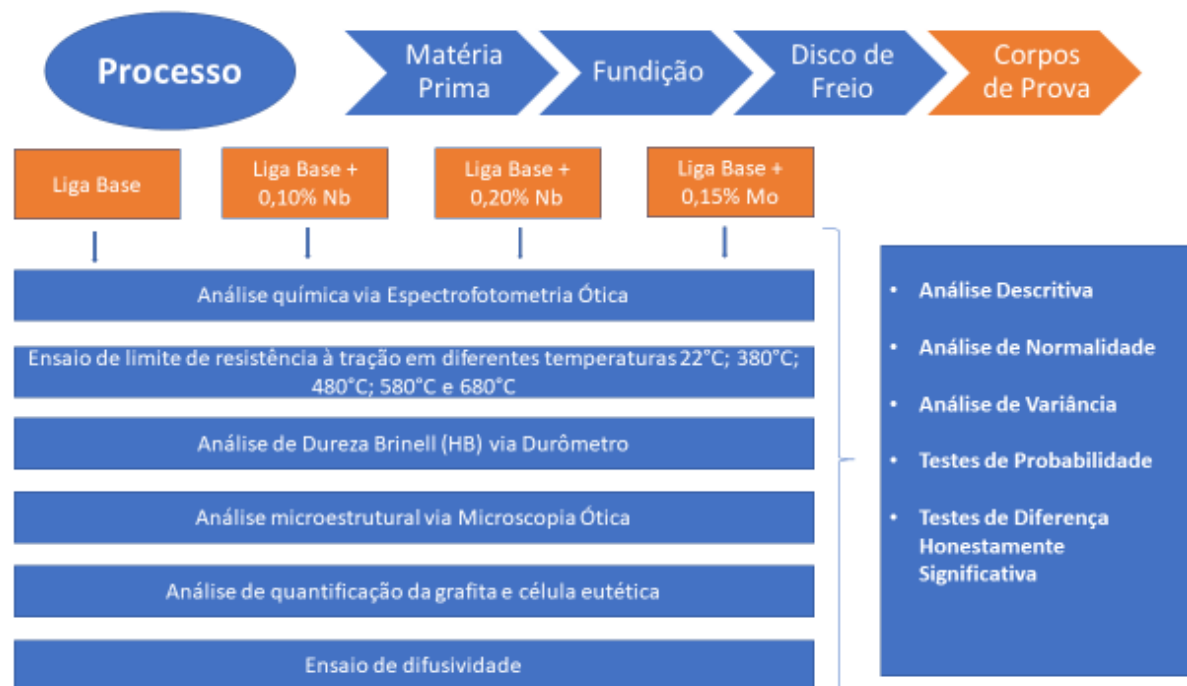
significativa” (honestly significant difference). É um teste exato que compara as médias duas a duas, sendo a taxa de erro da família dos testes (FWER) indicada por α (intervalo de confiança, que é exatamente $1-\alpha$). Para tamanhos de amostras iguais (dados balanceados), o teste de Tukey declara duas médias significativamente diferentes se o valor absoluto de suas diferenças amostrais ultrapassar $|y_i - y_j| > TSD$. A Equação 13 apresenta o cálculo para obtenção de TSD.

$$TSD = q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{QME}{n}}. \quad (13)$$

Um intervalo de confiança de 100 $(1-\alpha)$ % para a diferença entre todos os pares das médias é dado na Equação 14.

$$\bar{y}_i - \bar{y}_j - q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{QME}{n}} \leq \mu_i - \mu_j \leq \bar{y}_i - \bar{y}_j + q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{QME}{n}}, \quad i \neq j. \quad (14)$$

5.3.7 Fluxograma de Processo



6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A Tabela 9 mostra os resultados das análises químicas realizadas.

Tabela 9 – Resultados da análise química das corridas de ferro fundido cinzento com adição de nióbio e molibdênio

Elementos (%)	C	Si Base	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Nb*	Mo*	Ceq* *
Limite Superior	3,75	1,50	1,80	0,50	0,05	0,10	0,15	0,35	0,03	0,01	0,01	4,37
Meta	3,72	1,47	1,77	0,45	0,00	0,09	0,13	0,33	0,03	0,00	0,00	4,34
Limite Inferior	3,70	1,45	1,75	0,40	0,00	0,08	0,10	0,30	0,02	0,00	0,00	4,30
Liga base	3,81	1,47	1,80	0,45	0,05	0,08	0,13	0,32	0,03	<0,01	<0,01	4,43
Liga base + 0,10% Nb	3,84	1,46	1,84	0,44	0,05	0,09	0,12	0,32	0,03	0,08	<0,01	4,47
Liga base + 0,20% Nb	3,77	1,36	1,72	0,42	0,04	0,08	0,10	0,27	0,02	0,22	<0,01	4,35
Liga base + 0,15% Mo	3,72	1,41	1,80	0,48	0,04	0,08	0,13	0,38	0,03	0,01	0,15	4,33

*Elementos de liga adicionados de acordo com Tabela 2, já apresentada neste estudo: Adição de 0,10% Nb, 0,20% Nb e 0,15% Mo

**O percentual de carbono equivalente foi obtido através da Equação 3 (Ceq)

Foi possível observar que os elementos manganês, fósforo, enxofre, cromo, nióbio e molibdênio estão dentro da especificação. Houve um pequeno desvio no resultado de estanho, silício, cobre, porém não impactando na formação do ferro fundido, considerando que para este estudo as faixas especificadas foram extremamente reduzidas para garantir a qualidade e reduzir a variabilidade do processo produtivo.

O elemento carbono apresentou uma pequena variação acima da especificação para as corridas de liga base e liga base com adição de nióbio 0,10%. O resultado do teor de silício ficou inferior à meta na corrida com adição de nióbio de 0,20%. Os resultados influenciaram no resultado de carbono equivalente, como mostra a Figura 44.

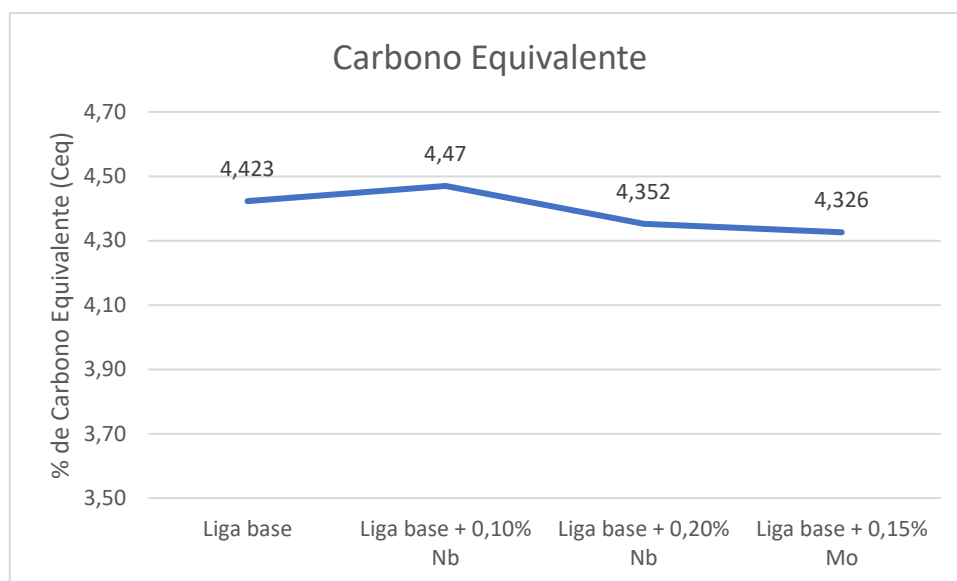


Figura 44– Resultado de carbono equivalente das ligas: base, 0,10% Nb, 0,20% Nb e 0,15% Mo

Guesser (2016; 1997) demonstra que ferros fundidos com maior porcentagem de Cr e Mo apresentaram melhor estabilidade microestrutural, e que adições de Nb em camisas de cilindro de ferro fundido cinzento e em anéis de ferro fundido nodular resultaram em um aumento significativo da resistência ao desgaste, característica crítica neste tipo de componente. Singh (2014) afirma que elementos adicionados ao ferro fundido cinzento promovem o aumento da resistência mecânica, deixando o ferro fundido mais resistente ao calor e à corrosão. O autor também concluiu que a adição de Cu promove o aumento da perlita, o que aumenta a resistência à tração. Neste mesmo estudo, identificou-se que o molibdênio refina a perlita do ferro fundido cinzento.

6.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os ensaios de resistência à tração foram realizados em 5 diferentes temperaturas: 22°C, 380°C, 480°C, 580°C e 680°C. Pôde-se observar que, ao se adicionar os elementos de liga nióbio e molibdênio no ferro fundido cinzento, ocorreu um acréscimo na resistência à tração em todas as temperaturas nas quais foram realizados os ensaios. As Figuras 47, 48, 49, 50 e 51 mostram os resultados e informações sobre outliers, bem como sobre a variabilidade das amostras, avaliando a distribuição dos dados.

O teste 3 da liga de ferro fundido cinzento (liga base) com adição de 0,20% de Nb apresentou melhor resultado de resistência à tração nas temperaturas ambiente, 380°C e 480°C. Para os testes realizados em temperaturas de 580°C e 680°C, o melhor resultado

apresentado foi no teste 4, da liga de ferro fundido cinzento (liga base) com adição de 0,15% de Mo. O teste 2, da liga de ferro fundido cinzento (liga base) com adição de 0,10% de Nb, apresentou bons resultados em todas as temperaturas dos testes realizados, podendo ser uma excelente alternativa econômica para aplicações susceptíveis a temperaturas elevadas, principalmente até temperaturas de trabalho de 580°C.

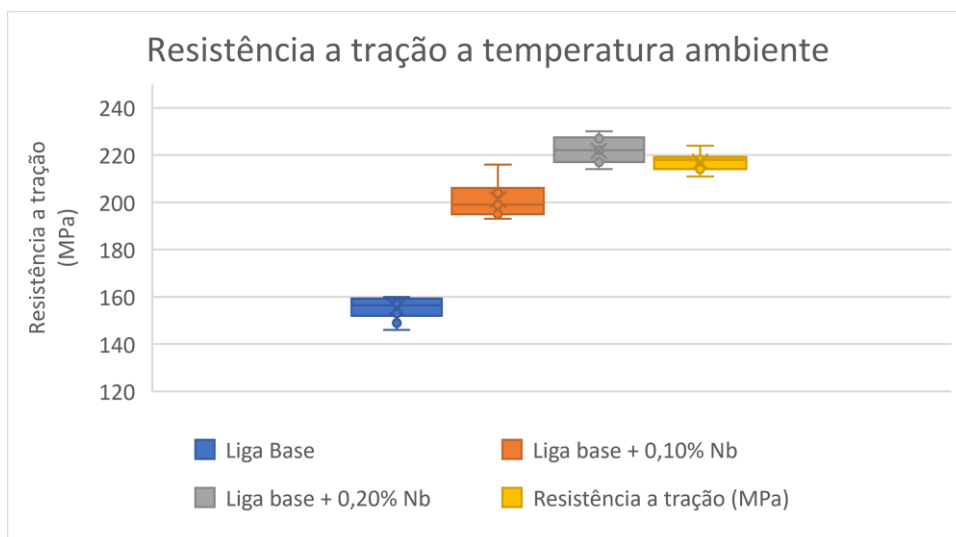


Figura 45 – Resultados da análise de distribuição dos dados de resistência máxima à tração ambiente (22°C) em corpos de prova retirados de disco de freio bruto de fusão

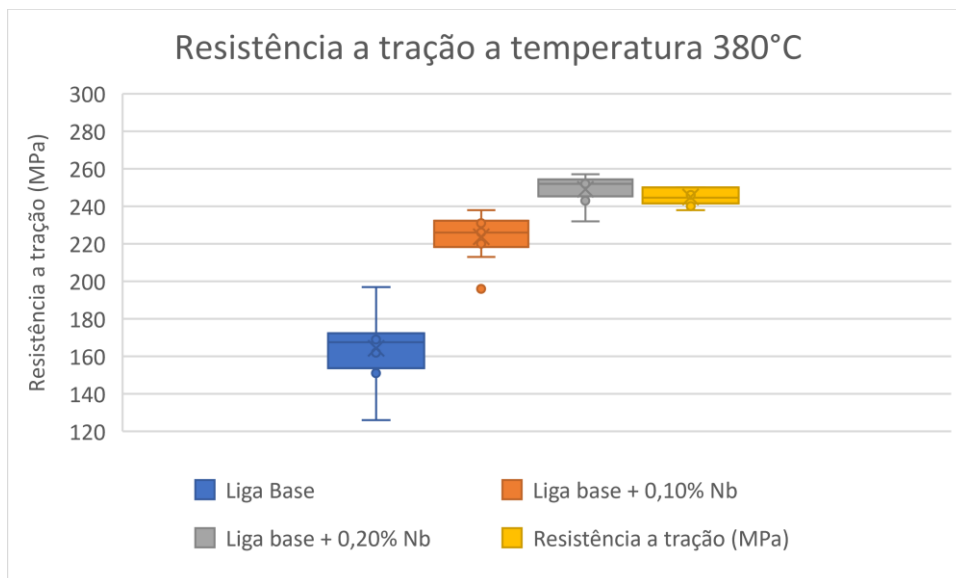


Figura 46 – Resultados da análise de resistência máxima à tração na temperatura de 380°C em corpos de prova retirados de disco de freio bruto de fusão

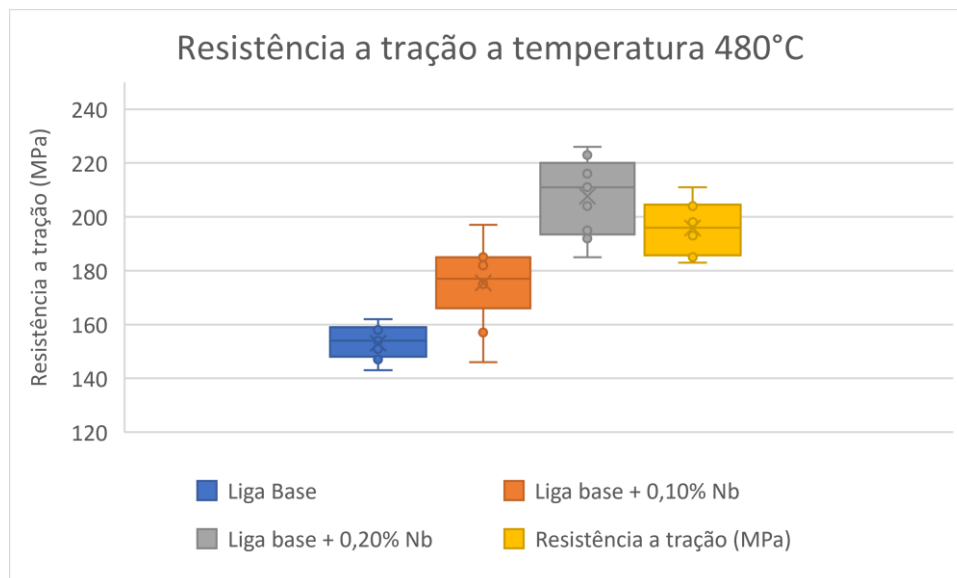


Figura 47 – Resultados da análise de resistência máxima à tração a temperatura de 480°C em corpos de prova retirados de disco de freio bruto de fusão

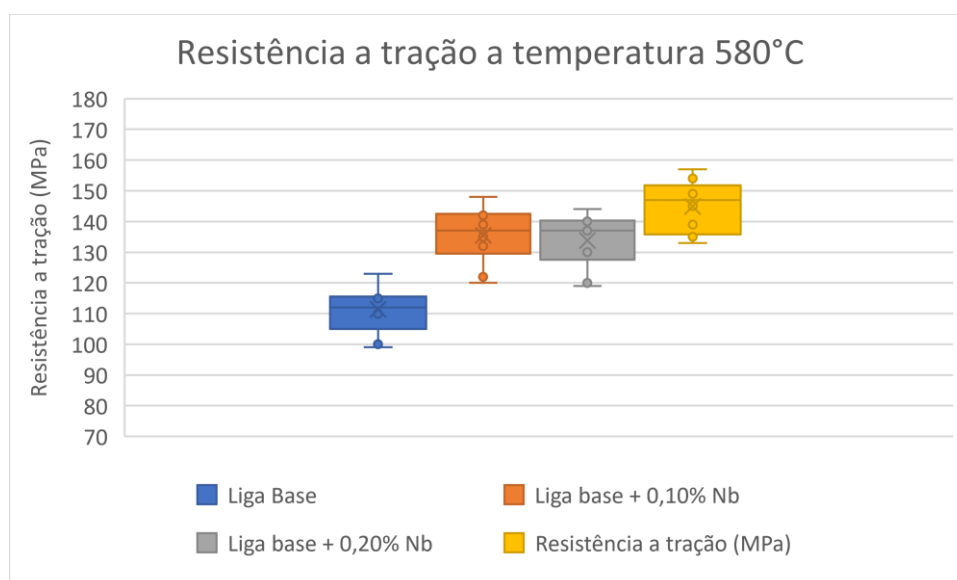


Figura 48– Resultados da análise de resistência máxima à tração a temperatura de 580°C em corpos de prova retirados de disco de freio bruto de fusão

De acordo com a literatura, o comportamento dos ferros fundidos cinzentos apresenta um leve aumento da resistência na temperatura em torno de 400°C e decresce acentuadamente em temperaturas maiores. Este comportamento pode ser evidenciado nos testes de resistência à tração em diferentes temperaturas.

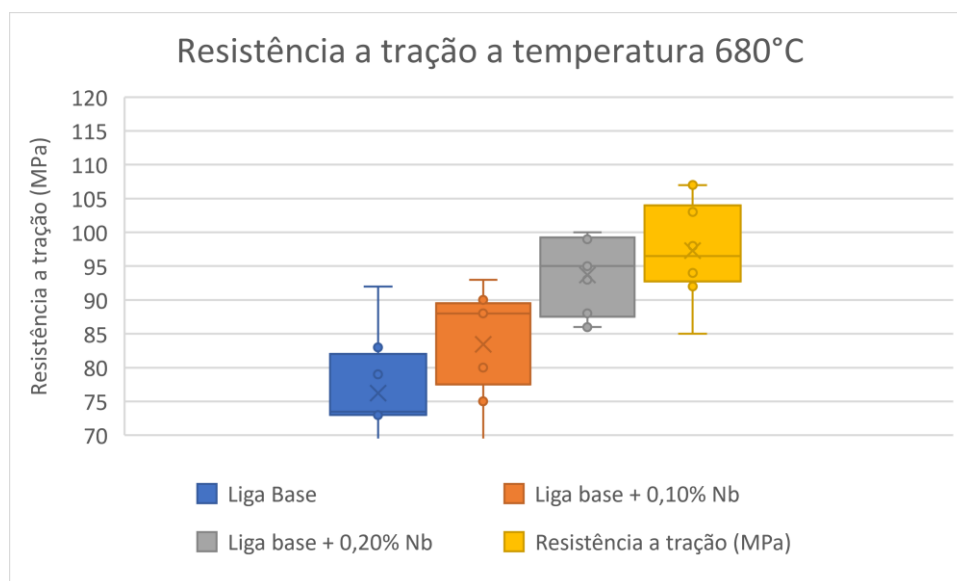


Figura 49 – Resultados da análise de resistência máxima à tração a temperatura de 680°C em corpos de prova retirados de disco de freio bruto de fusão

A Figura 50 mostra um comparativo dos resultados de resistência à tração em diferentes temperaturas das quatro ligas deste estudo.

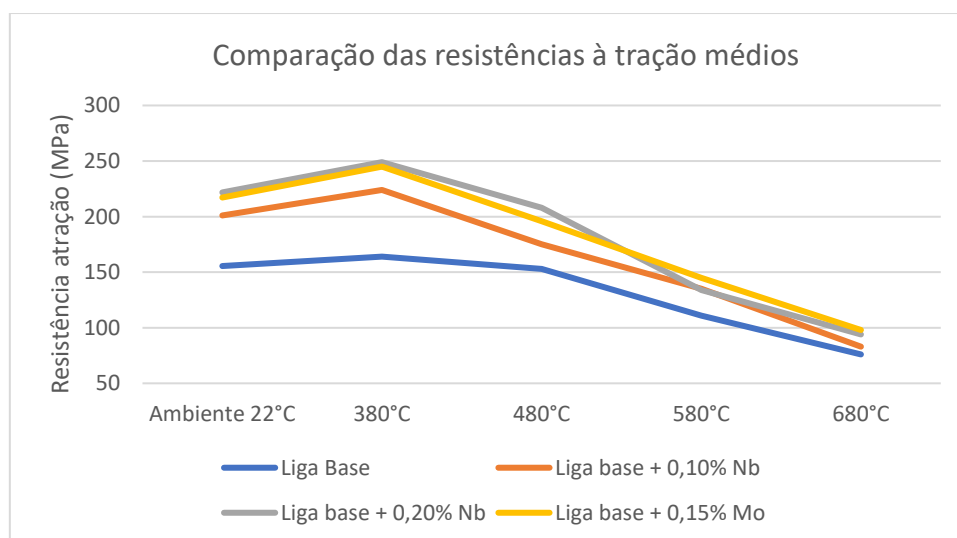


Figura 50 – Comparativo dos resultados médios de resistência à tração em diferentes temperaturas

Com base nos dados obtidos, foram realizados vários testes estatísticos de normalidade, de variância e de Tukey. Através destes testes, pôde-se avaliar a consistência dos dados comparando-se as médias das diferenças realmente significativas, o que possibilitou uma avaliação de intervalos menores de comparação múltipla. A Tabela 10 apresenta um resumo da avaliação estatística dos dados.

Tabela 10 – Resumo dos resultados dos ensaios de tração em diferentes temperaturas do ferro fundido cinzento com adição de nióbio e molibdênio

Teste	ID	N	Média	DesvPad	EP Médio	Q1	Q3	DIQ	IC de 95% para μ
22°C	Liga Base	10	155,4	4,72	1,49	152	159	7,25	(152,03; 158,78)
	0,10% Nb	7	201,1	8,15	3,08	195	206	11,00	(193,60; 208,68)
	0,20% Nb	9	221,8	5,65	1,88	217	227	10,50	(217,43; 226,12)
	0,15% Mo	10	217,2	3,65	1,15	214	219	5,25	(214,59; 219,81)
380°C	Liga Base	8	162,25	20,18	7,14	154	172	18,5	(147,38; 181,12)
	0,10% Nb	10	223,80	12,11	3,83	218	232	14,0	(215,14; 232,46)
	0,20% Nb	10	249,00	7,47	2,36	245	254	9,0	(243,66; 254,34)
	0,15% Mo	10	244,90	4,36	1,38	242	241	8,50	(241,78; 248,02)
480°C	Liga Base	10	153,11	6,25	2,08	148	159	11,0	(148,30; 157,92)
	0,10% Nb	7	175,44	15,41	5,14	166	185	19,0	(163,60; 187,29)
	0,20% Nb	9	207,67	14,46	4,82	193	220	26,5	(196,55; 218,78)
	0,15% Mo	10	195,90	9,46	2,99	186	204	18,5	(189,13; 202,67)
580°C	Liga Base	10	111,33	7,64	2,55	105	115	10,50	(105,45; 117,21)
	0,10% Nb	7	135,50	9,10	2,88	129	142	13,00	(128,99; 142,01)
	0,20% Nb	9	133,80	8,56	2,71	127	140	12,75	(127,68; 139,92)
	0,15% Mo	10	144,90	8,58	2,71	135	152	16,00	(138,76; 151,04)
680°C	Liga Base	8	76,25	8,58	3,03	73	82	9,00	(69,09; 83,41)
	0,10% Nb	9	83,44	8,73	2,91	77	89	12,00	(76,73; 90,16)
	0,20% Nb	10	93,70	5,42	1,71	87	99	11,75	(89,81; 97,58)
	0,15% Mo	10	97,30	6,98	2,21	92	104	11,25	(92,31; 102,29)

N = Número de amostras; DesvPad = Desvio Padrão; EP Médio = Erro Padrão Médio; Q1 = Primeiro quartil; Q = Segundo Quartil; DIQ = Diferença Interquartil; IC = Intervalo de confiança

Para esta avaliação, utilizou-se o software Minitab e pôde-se observar que, nos testes de resistência à tração em diferentes temperaturas, não existe diferença significativa entre as ligas base com adição de 0,20% Nb e 0,15% Mo (ver ANEXOS). O dado já observado da liga base + 0,10% Nb, que apresentou bom desempenho no teste de resistência à temperatura de 580°C, não apresentou diferença significativa em relação aos testes nas ligas base com adição de 0,20% Nb e 0,15% Mo nessa mesma temperatura, sinalizando que, para aplicações até 580°C, a liga base + 0,10% Nb apresenta um excelente desempenho associado a uma ótima relação custo/benefício.

6.3 ENSAIO DE DUREZA BRINELL

As Figuras 51 e 52 mostram os resultados dos ensaios de dureza Brinell realizados em amostras retiradas do cubo e da pista dos discos de freios de acordo com cada composição. Pôde-se observar que, na liga base, houve um aumento na dureza Brinell ao se adicionar elementos de liga como nióbio e molibdênio, formadores de carbonetos de alta dureza que potencializam o refino da perlita, fato que contribui significativamente com os resultados de dureza.

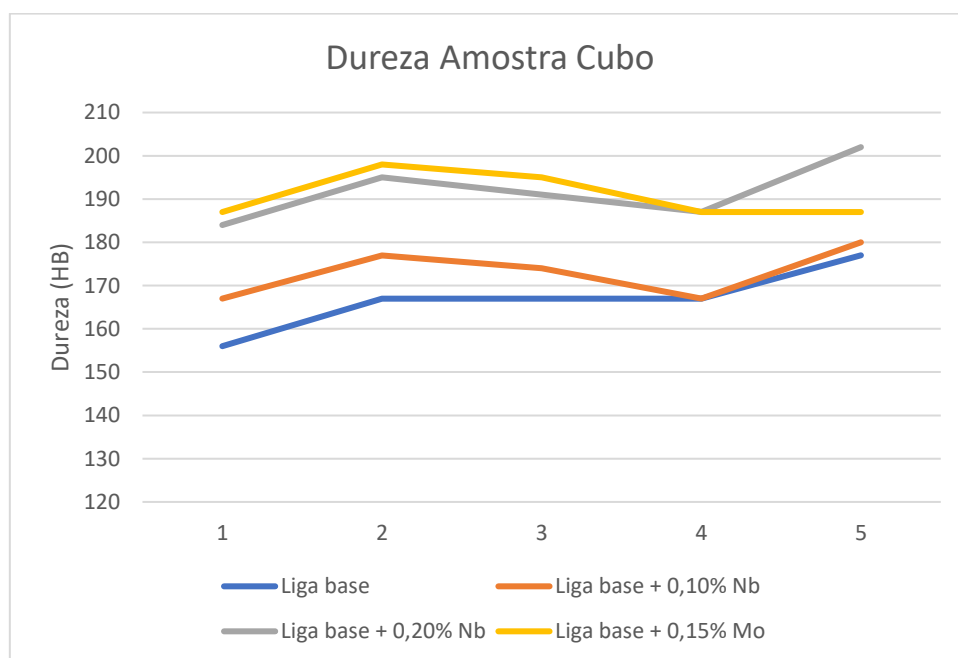


Figura 51 – Resultados da análise de dureza Brinell de amostra do cubo dos discos de freio

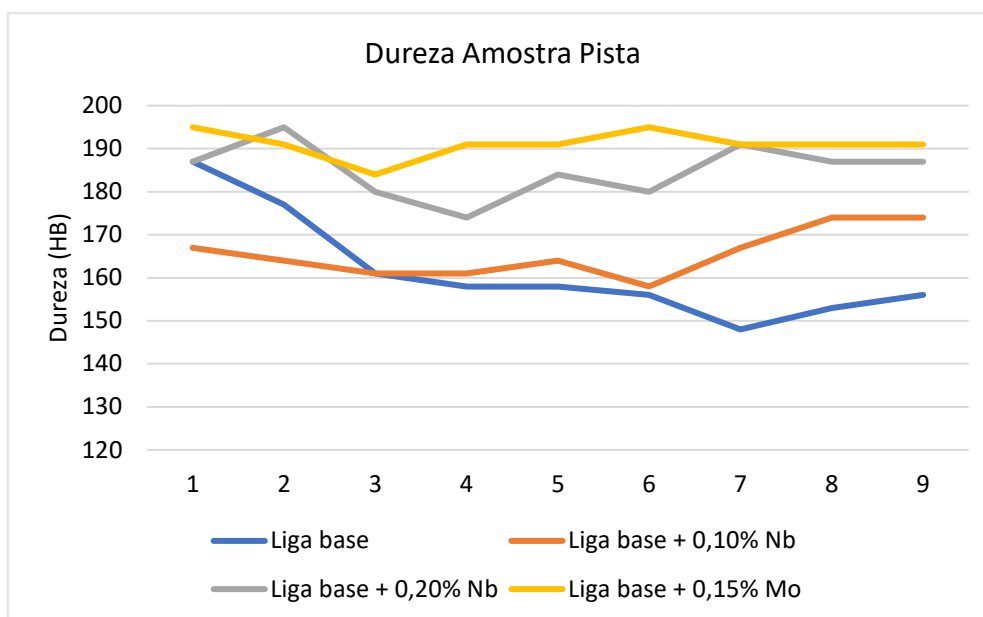


Figura 52 – Resultados da análise de dureza Brinell de amostra da pista dos discos de freio

6.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A Figura 53(a) apresenta a imagem metalográfica de liga base sem ataque e a Figura 53(b), a imagem metalográfica após ataque com Nital 5%.

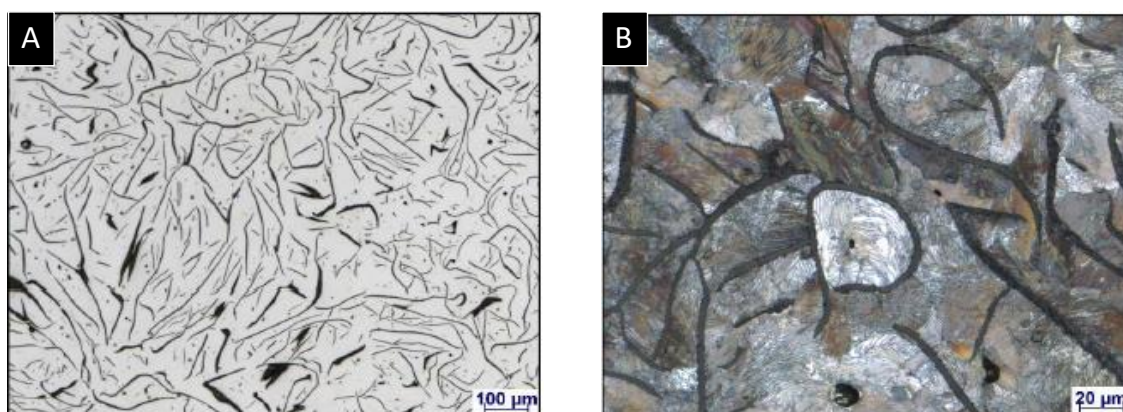


Figura 53 – Análise metalográfica para o corpo de prova de liga base sem ataque (a) e com ataque Nital 5% (b)

Fonte: Autor (2020)

A grafita predominante nestes corpos de prova foi do tipo A e tamanho 4, estando presente também, em menores proporções, o tamanho 5. Trata-se de uma matriz metálica perlítica com aproximadamente 1% de ferrita. Wang (1999) afirma que a morfologia e a geometria dos flocos de grafita afetam a difusividade no ferro cinzento e, em amostras com carbono equivalente constante, o comprimento médio e máximo dos flocos tem uma

forte correlação linear com difusividade térmica: quanto mais grafita por área maior a difusividade. A Figura 54, de maneira análoga, apresenta as imagens metalográficas para os corpos de prova da liga base + 0,10% Nb. Assim como os corpos de prova da liga base, a grafita predominante foi do tipo A com raras proporções de tipo B. Os tamanhos predominantes de grafita foram tamanhos 4 e 5, estando presente também, em menores proporções, o tamanho 6, com uma matriz metálica 100% perlítica.

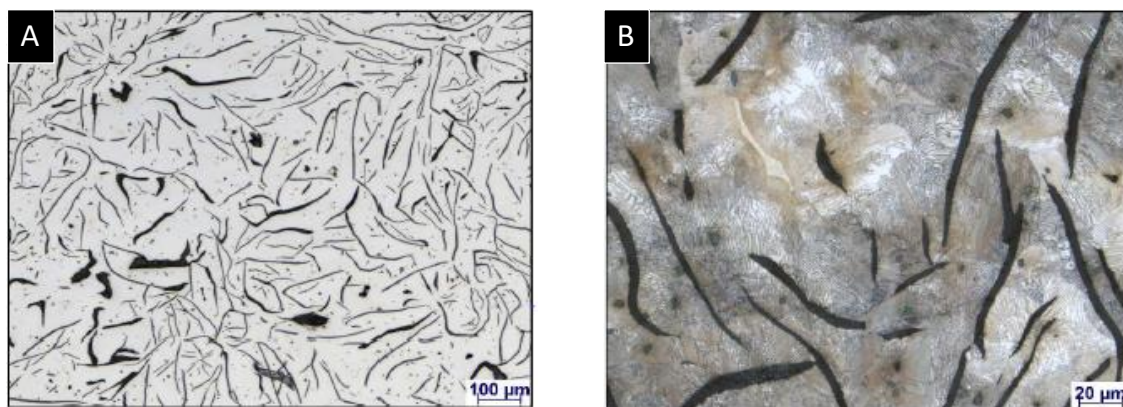


Figura 54 – Análise metalográfica para o corpo de prova de liga base + 0,10% Nb sem ataque (a) e com ataque Nital 5% (b)
Fonte: Autor (2020)

Zhai et al. (2011) indicam, através de resultados experimentais, que o aumento da adição de nióbio (até um certo nível) refina a grafita e a célula eutética, e reduz o espaçamento interlamelar perlítico causado principalmente pela diminuição da temperatura eutetóide. Além disso, a adição de nióbio ocasionou uma formação de fase dura rica em carboneto de nióbio que efetivamente aumentou a dureza e a resistência ao desgaste. Foi possível observar também a presença de fase refinada de grafita e perlita.

A Figura 55 apresenta as imagens metalográficas para os corpos de prova da liga base + 0,20% Nb. Assim como os corpos de prova da liga base, a grafita predominante foi do tipo A, com raras proporções do tipo B. Os tamanhos predominantes de grafita foram os tamanhos 3, 4 e 5, estando presente também, em menores proporções, o tamanho 6, com uma matriz metálica 100% perlítica. Na análise da amostra, foi possível observar a presença de carbonetos de NbC tipo escrita chinesa, destacado na Figura 55 (c). Mohrbacher e Zhai (2011) mostram que, em amostras com adição de 0,29% Nb, foi possível observar algumas fases de NbC em blocos e em forma de escrita chinesa formadas, provavelmente, durante a solidificação.

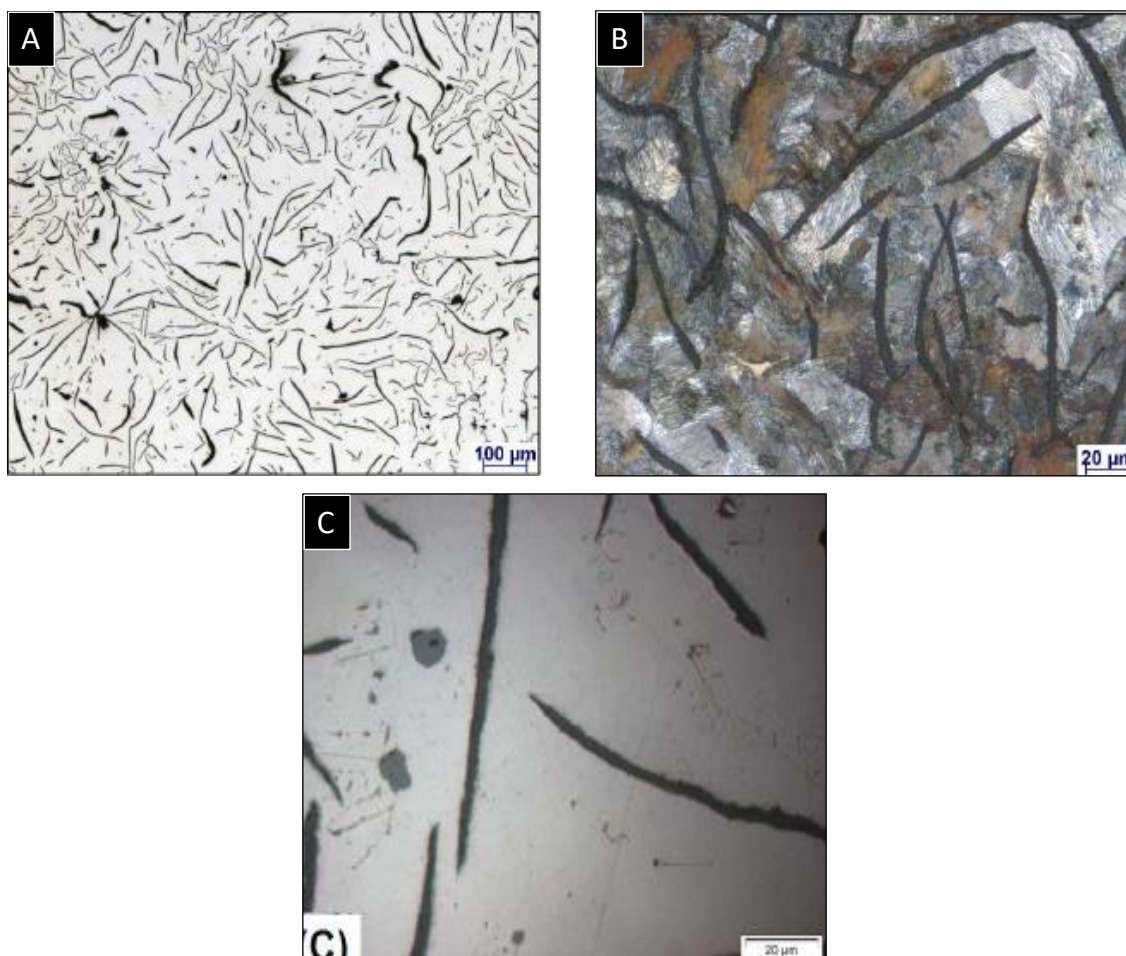


Figura 55 – Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,20% Nb sem ataque (a) e com ataque Nital 5% (b); presença de carbonetos tipo NbC (c)

Fonte: Autor (2020)

A Figura 56 apresenta as imagens metalográficas para os corpos de prova da liga base + 0,15% Mo. A grafita predominante foi do tipo A, com raras proporções dos tipos B e C. Os tamanhos predominantes de grafita foram os tamanhos 3 e 4, estando presentes também, em menor proporção o tamanho 5, com uma matriz metálica 100% perlítica. Guesser (2009) afirma que, para ferros fundidos cinzentos, a utilização de molibdênio aumenta a resistência a quente e a fadiga térmica.

A liga base apresentou ausência de grafitas tipo E. Entretanto, nas corridas com nióbio e molibdênio, mesmo que em raras proporções, essas foram observadas. Em relação ao tamanho das grafitas, observa-se que nióbio e molibdênio tendem a diminuir os seus tamanhos, e há uma leve tendência do nióbio a concentrar mais a distribuição das grafitas entre os tamanhos de 3 a 6.

A matriz metálica é muito similar para todas as corridas, mesmo com a variação de temperatura que as amostras tiveram nos testes de resistência à tração em temperaturas elevadas (380°C, 480°C, 580°C e 680°C).

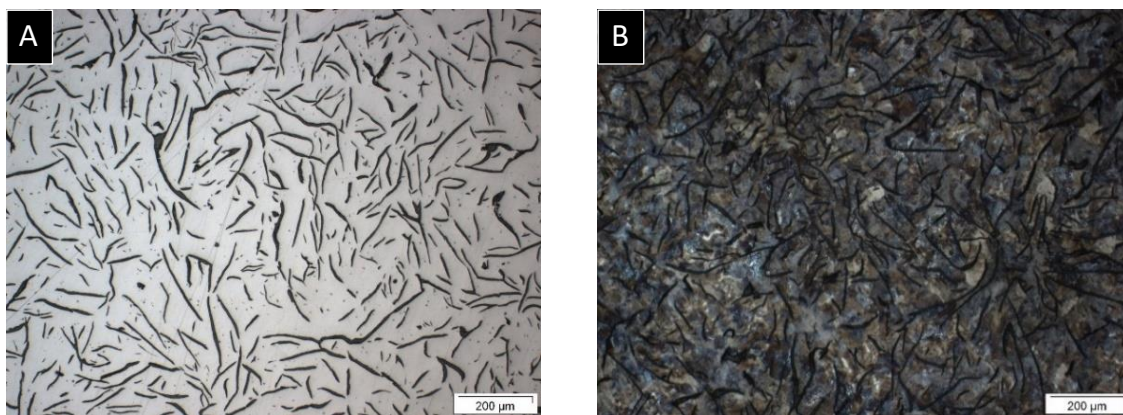


Figura 56 – Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,15% Mo sem ataque (a) e com ataque Marble (b)

Fonte: Autor (2020)

As morfologias das grafitas e as estruturas dos materiais testados não apresentaram alteração quando submetidos aos testes de resistência a quente. As Figuras 57 a 60 apresentam as morfologias nos corpos de prova submetidos a testes de resistência à tração em elevadas temperaturas nos diferentes ferros fundidos cinzentos deste estudo.

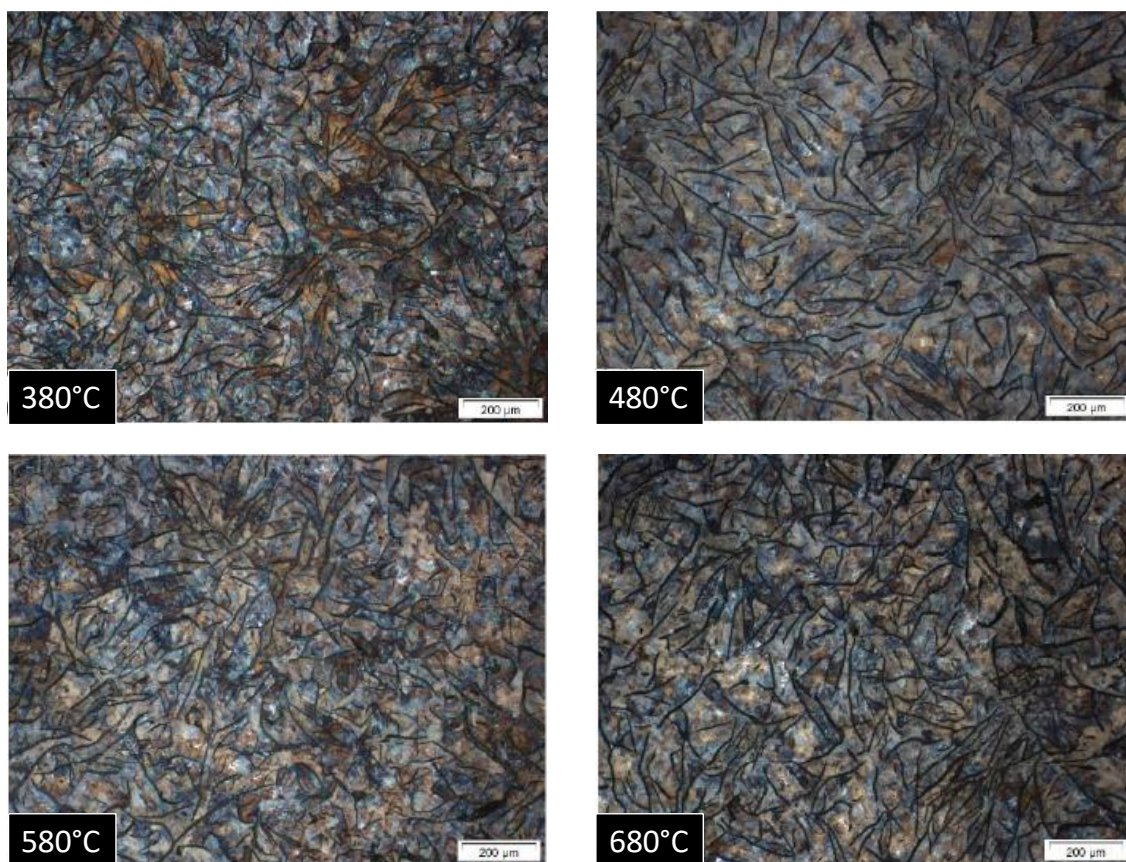


Figura 57 – Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base no teste de tração a 380°C, 480°C, 580°C e 680°C

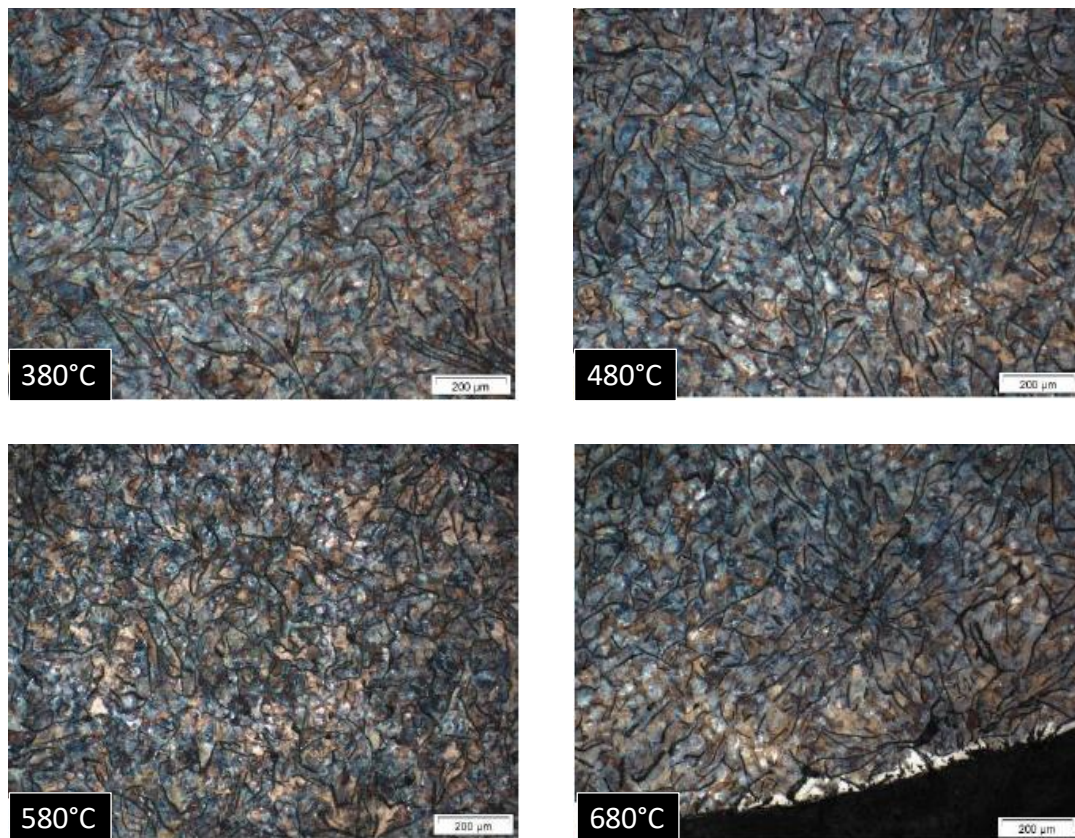


Figura 58 – Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,10% Nb no teste de tração a 380°C, 480°C, 580°C e 680°C

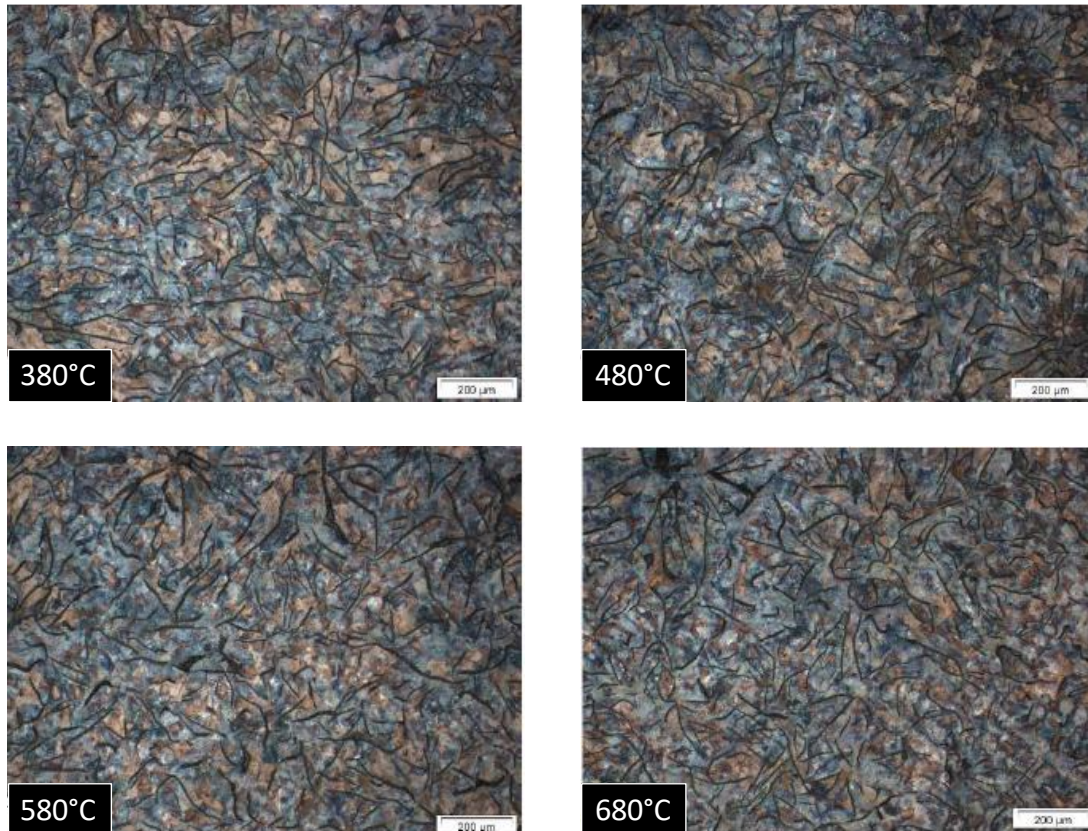


Figura 59– Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,20% Nb no teste de tração a 380°C, 480°C, 580°C e 680°C

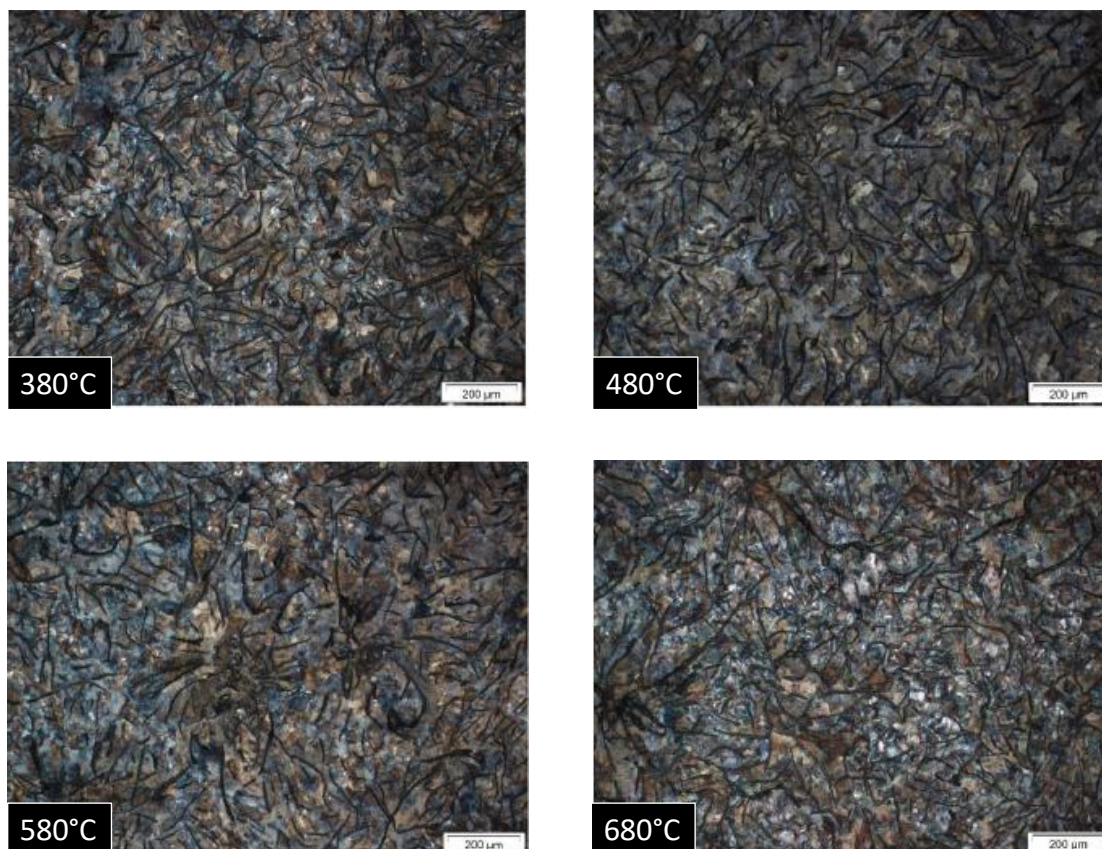


Figura 60 – Análise metalográfica para o corpo de prova da liga base + 0,15% Mo no teste de tração a 380°C, 480°C, 580°C e 680°C

A Tabela 11 mostra os resultados obtidos de forma sintética em todos os testes e temperaturas (ambiente 22°C, 380 °C, 480°C, 580°C e 680°C).

Para realizar a quantificação das grafitas e obter uma melhor representatividade, foram observadas dez imagens em aumentos iguais de 100x em microscópico ótico. Os dados de quantificação da grafita foram analisados no software Minitab (Tabela 12), onde observou -se uma quantidade média de grafita de 10,5% e 10,7% para a liga base e liga base + 0,10% Nb, respectivamente. A liga base + 0,20% Nb apresentou redução da quantidade de grafita para valores de 8,9% (redução de 1,6% de grafita), fenômeno este também observado mais acentuadamente na análise realizada na liga base + 0,15% Mo, com valores de 7,9% (redução de 2,6 % de grafita).

A liga base obteve um desvio padrão maior que as outras ligas estudadas. Assim, podemos concluir que a liga base + 0,10% Nb, possui uma quantidade maior de grafita por área analisada, visto que seu desvio padrão é de 0,80. A Figura 62 mostra os resultados com as informações sobre outliers bem como sobre a variabilidade das amostras avaliando a distribuição dos dados.

Tabela 11 – Resultados da análise metalográfica

Identificação	Tipo de grafita					Tamanho da grafita								Matriz e Carbonetos		
	A	B	C	D	E	2	3	4	5	6	7	8		Perlita	Ferrita	C
Liga base	MA			ME		R	P	P	ME	ME	R			100	0	R
Liga base 380°C	MA			ME		R	P	P	ME	ME	R			100	0	R
Liga base 480°C	MA	ME		R		P	P	ME	ME	R				100	*1	R
Liga base 580°C	MA			ME		R	P	P	ME	ME	R			100	0	R
Liga base 680°C	MA			R		P	P	ME	ME	R				100	0	R
Liga base + 0,10%Nb	MA	ME			R	ME	P	P	ME	R	R			100	0	R*2
Liga base + 0,10%Nb 380°C	P	ME					P	P	ME	R				100	0	R*2
Liga base + 0,10%Nb 480°C	MA	ME			R	ME	P	P	ME	R	R			100	0	R*2
Liga base + 0,10%Nb 580°C	MA	ME		R	R		P	P	ME	ME	R			100	0	R*2
Liga base + 0,10%Nb 680°C	P	ME		R	R		P	P	ME	ME	R			100	*1	R*2
Liga base + 0,20%Nb	P	ME			R		P	P	ME	ME				100	0	R*2
Liga base + 0,20%Nb 380°C	MA	ME			R		P	P	ME	ME				100	0	R*2
Liga base + 0,20%Nb 480°C	P	ME			R		P	P	ME	ME				100	0	R*2
Liga base + 0,20%Nb 580°C	P	ME			R	R	P	P	ME	ME				100	0	R*2
Liga base + 0,20%Nb 680°C	MA	ME			R	R	P	P	ME	ME				100	0	R*2
Liga base + 0,15%Mo	P	P			R		P	P	ME	ME	R			100	0	0,4%
Liga base + 0,15%Mo 380°C	MA	ME		R	R		P	P	ME	ME	R	R		100	0	0,3%
Liga base + 0,15%Mo 480°C	MA	ME			R	R	P	P	ME	ME	R			100	0	0,3%
Liga base + 0,15%Mo 580°C	MA	ME				R	P	P	ME	ME	R			100	0	0,3%
Liga base + 0,15%Mo 680°C	MA	ME			R		P	P	ME	ME	R			100	0	0,3%

Legenda: P = Predominante; MA = Maior proporção; ME = Menor proporção; R = Rara proporção; C = Carbonetos; *1 = pequenas áreas de decarbonetação superficial; R*2 = além destes raros carbonetos têm-se carbonetos ricos em N

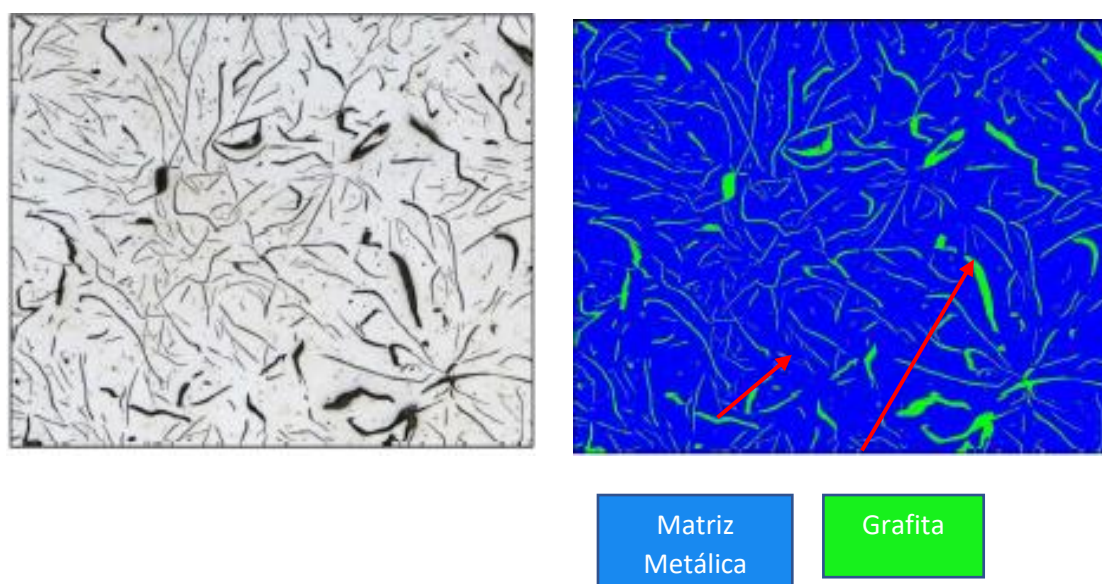
Tabela 12 – Resumo dos resultados de quantificação da grafita utilizando software *Minitab*

ID	N	Média	DesvPad	EP Médio	Q1	Q3	DIQ	IC de 95% para μ
Liga Base	10	10,5	3,41	1,08	8,38	11,1	2,75	(8,06; 12,94)
0,10% Nb	10	10,7	0,80	0,25	10,3	11,2	0,92	(10,12; 11,27)
0,20% Nb	10	8,9	0,44	0,14	8,4	9,3	0,87	(8,58; 9,22)
0,15% Mo	10	7,9	0,86	0,27	7,5	8,5	0,97	(7,37; 8,60)

Stefanescu, Davis e Destefani (1988) salientam que flocos de grafita longos estão associados a ferros com alto teor de carbono e baixas taxas de resfriamento, sendo desejáveis em aplicações que exijam alta condutividade térmica e capacidade de amortecimento. Analogamente, Serbino (2005) avaliou que a quantidade de grafita, o tamanho e a distribuição das células eutéticas são importantes para as propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos.

Os principais fatores que influenciam a transferência de calor nos ferros fundidos cinzentos são a distribuição, o tamanho e a morfologia da grafita, sendo que os veios de grafita possuem condutividade térmica maior que a matriz perlitica deste estudo.

A Figura 61 mostra a imagem da quantificação da grafita através do software *Zeiss* acoplado do microscópio ótico.

**Figura 61** – Análise metalográfica de quantificação da grafita utilizando software *Zeiss*

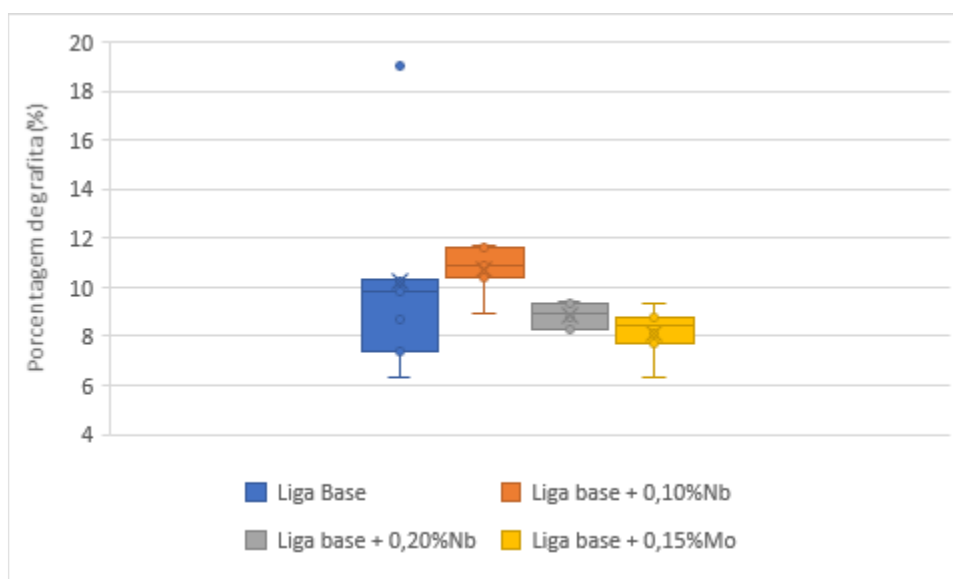


Figura 62 – Resultados da quantificação da grafita com distribuição dos dados *boxplots*

6.5 CÉLULAS EUTÉTICAS

A Tabela 13 apresenta o resumo dos resultados de número de células eutéticas por centímetro quadrado. A composição da liga base apresentou um número médio de 203 ± 40 Cel.cm⁻², valor ligeiramente inferior ao da liga base + 0,10% Nb que teve resultados de 215 ± 40 Cel.cm². Comparando-se a liga base com as ligas que tiveram 0,20% Nb e 0,15% Mo adicionados, nessas ligas, o aumento de células foi de 23,2% aproximadamente, evidenciando-se um possível efeito de nucleação e modificação na estrutura. Mohrbacher e Zhai (2011) afirmaram que pequenas partículas residuais de NbC permanecem durante o resfriamento e agem como núcleos heterogêneos de nucleação para o grafita na reação eutética, proporcionando um aumento da taxa de nucleação e modificando a morfologia da grafita resultante do tamanho e formação da célula eutética.

Tabela 13 - Resumo dos resultados estatísticos de quantificação da célula eutética

ID	N	Média	DesvPad	EP Médio	Q1	Q3	DIQ	IC de 95% para μ
Liga Base	10	203	47,3	21,1	152	241	89	(144,3; 261,7)
0,10% Nb	10	215	43,4	19,4	180	250	70	(161,5; 269,3)
0,20% Nb	10	247	22,5	10,1	267	267	38	(219,2; 275,2)
0,15% Mo	10	251	13,9	6,22	238	261	23	(234,1; 286,6)

A Figura 63 mostra as células eutéticas dos corpos de prova deste estudo.

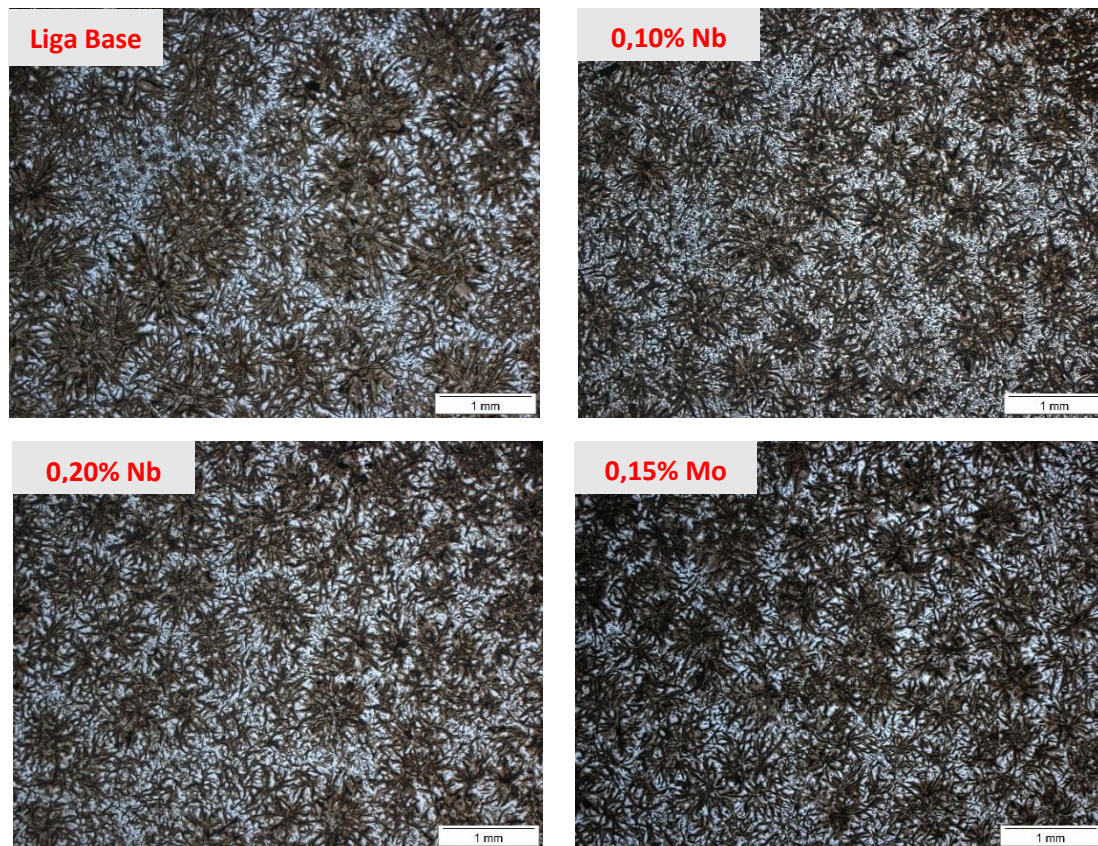


Figura 63 – Análise metalográfica de quantificação das células eutéticas de acordo com ABNT NBR 6849 [sem data]

Fonte: [Adaptado de] Relatório Senai Sistema FIEMG CETEC

A Figura 64 apresenta a distribuição das células eutéticas, onde se pode observar uma grande variabilidade dos resultados, principalmente na análise da amostra da liga base. A análise é realizada em diferentes campos da amostra, entretanto, a quantificação é muito aleatória e de difícil interpretação. Para se obter e reduzir a variabilidade, é necessário realizar uma amostragem maior. Porém, de acordo com a literatura, podemos entender que as amostras com adição de Nb e Mo apresentam resultados mais estáveis do que a amostra de liga base.

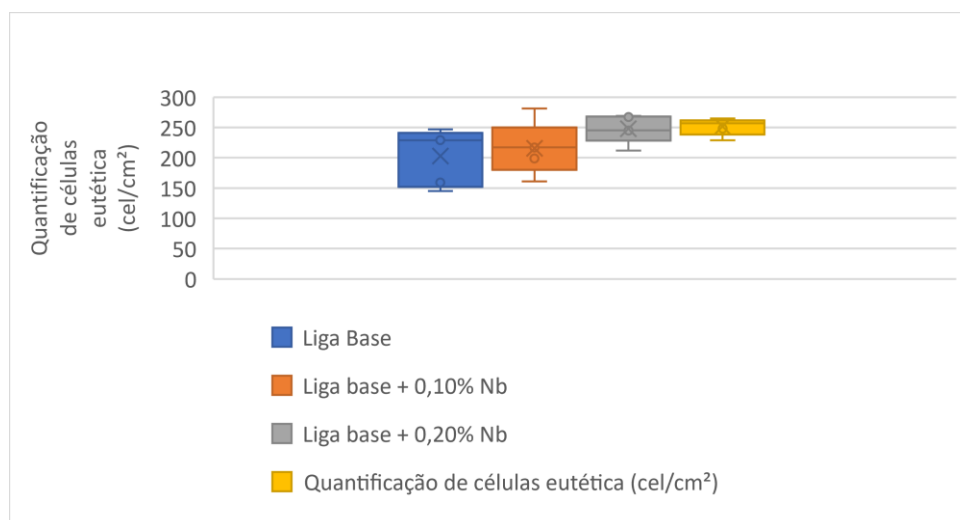


Figura 64 – Resultados da quantificação das células eutéticas com distribuição dos dados *boxplots*

6.6 ANÁLISE TÉRMICA

Foram realizadas análises térmicas em todas as ligas fundidas deste estudo para determinar as temperaturas de solidificação da fase primária (início da solidificação) e da solidificação eutética. Pode-se observar que a liga base + 0,15% Mo aumenta um pouco o super-resfriamento e o ΔT de recalescência, o que pode prejudicar as condições de nucleação. Entretanto, este fenômeno não é conclusivo, pelo fato de o resultado ter sido verificado em somente uma corrida para cada liga. A Tabela 14 mostra os resultados das curvas obtidas nas análises térmicas utilizando-se equipamento e software *Heraeus ElectroNite*.

Tabela 14 – Resultados das análises térmicas nas ligas base, base + 0,10%Nb, base + 0,20%Nb, base + 0,15%Mo

Testes	Ceq	Temp. Líquidus	Temp. Eutética Mín.	Temp. Eutética Máx	ΔT Rec	Temp. Eutética estável	Super Resf. S_N
Liga Base	4,155	1157	1138	1141	3	1151	13
0,10%Nb	4,155	1157	1138	1143	5	1151	13
0,20%Nb	4,128	1160	1136	1140	4	1150	14
0,15%Mo	4,190	1167	1133	1139	6	1150	17

6.7 DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A Figura 65 apresenta o gráfico dos resultados de difusividade térmica nas temperaturas de 380°C, 480°C, 580°C e 680°C, referentes às ligas denominadas liga base, liga base + 0,10% Nb, liga base + 0,20% Nb e liga base + 0,15% Mo. Nota-se que a difusividade diminui com o aumento da temperatura em todas as ligas deste estudo, confirmando os dados de literatura. A liga denominada liga base + 0,10% Nb apresenta um resultado melhor de difusividade em todas as temperaturas, fato que pode ser atribuído à maior quantidade de grafita associada à adição de 0,10% de nióbio. Isso pode ser confirmado comparando-se o resultado da liga com adição de 0,10% Nb e o resultado da liga base, onde observou-se uma quantidade similar de grafita por área. Porém, os valores de difusividade na liga base foram inferiores ao da liga base + 0,10% Nb. As ligas denominadas liga base + 0,20% Nb e liga base + 0,15% Mo apresentaram valores de difusividades menores em relação à liga base e à liga base + 0,10% Nb, em todas as temperaturas, fator atribuído à menor quantidade de grafita por área e à maior presença de carbonetos.

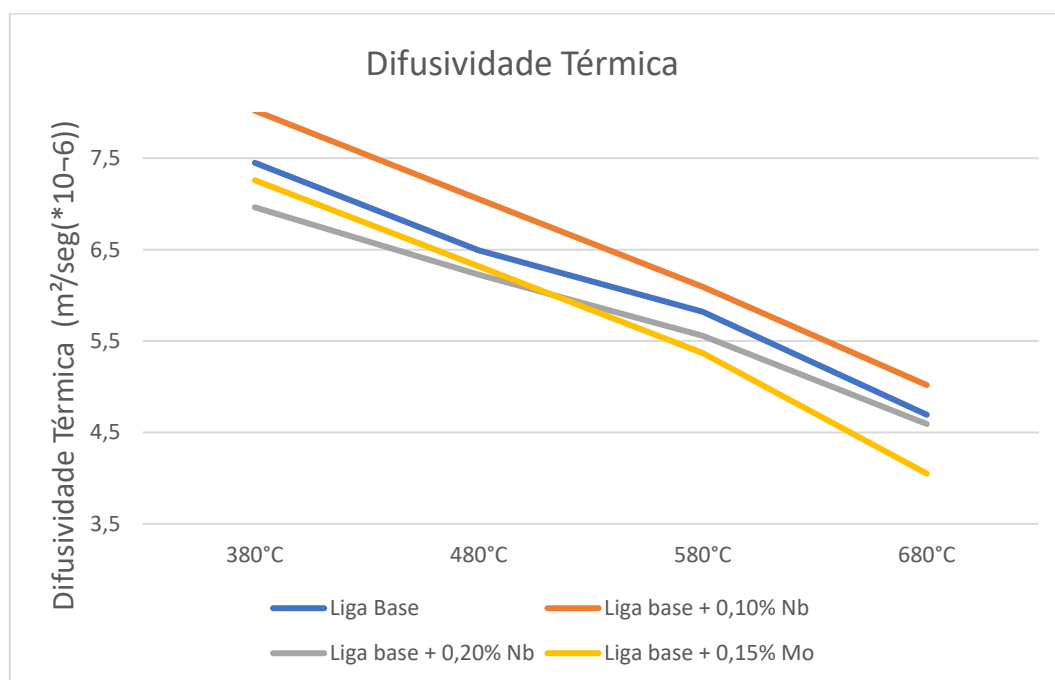


Figura 65 – Ensaio de difusividade térmica nas temperaturas de 380°C, 480°C, 580°C e 680°C, referentes às ligas: base, base + 0,10% Nb, base + 0,20% Nb e base + 0,15% Mo

A Tabela 15 apresenta os resultados de cada ensaio. Pôde-se observar que os resultados são uniformes, apresentando um desvio padrão médio ≤ 1 em todas as amostras analisadas.

Tabela 15 – Resultados de difusividade térmica nas temperaturas de 380°C, 480°C, 580°C e 680°C

Teste Liga Base	Espessura Corpo de prova (mm)	Temperatura			
		380°C	480°C	580°C	680°C
1A	4,96	6,852	7,132	5,335	4,036
1B	7,00	5,789	5,005	5,119	4,767
1C	7,00	7,178	5,172	4,976	4,747
1D	7,00	9,326	6,723	7,186	4,989
1E	7,00	8,102	8,418	6,473	4,927
Média		7,4494	6,49	5,8178	4,6932
Desv Pad		1,012	1,121	0,809	0,263
Teste Liga Base + 0,10% Nb					
2A	*	*	*	*	*
2B	*	*	*	*	*
2C	7,01	7,283	5,733	6,766	5,495
2D	7,00	8,608	7,586	6,270	5,016
2E	7,02	8,167	7,834	5,239	4,542
Média		8,019	7,051	6,092	5,018
Desv Pad		0,491	0,879	0,568	0,318
Teste Liga Base + 0,20% Nb					
3A	7,02	6,415	4,665	4,232	2,133
3B	4,98	6,848	5,469	5,265	4,662
3C	7,01	6,249	6,07	5,721	4,768
3D	7,02	7,418	7,261	5,958	5,797
3E	7,01	7,882	7,661	6,606	5,602
Média		6,9624	6,2252	5,5564	4,5924
Desv Pad		0,550	0,989	0,646	0,984
Teste Liga Base + 0,15% Mo					
4A	6,99	6,790	5,974	4,855	3,307
4B	4,97	6,290	5,182	5,169	4,364
4C	6,99	6,913	6,269	5,596	4,750
4D	6,98	8,986	7,651	5,942	3,581
4E	6,99	7,313	6,503	5,275	4,246
Média		7,2584	6,3158	5,3674	4,0496
Desv Pad		0,713	0,609	0,321	0,484

*Amostra com defeito de fundição

A difusividade térmica é um dos principais parâmetros para dimensionamento do material a ser utilizado para fabricação do ferro fundido cinzento utilizado em disco de

freio automobilístico, pois descreve a taxa de propagação do calor, sendo que através de sua medida pode-se também obter a condutividade térmica, ou seja a capacidade de um material conduzir calor, sendo assim a difusividade também está diretamente ligada a morfologia (grafita+matriz) do ferro fundido cinzento e suas variáveis como a composição química, o grau de nucleação consequentemente velocidade de extração de calor

7 CONCLUSÕES

Após a apresentação e a discussão dos resultados, verifica-se que a adição de nióbio ou molibdênio no ferro fundido cinzento, aplicado ao seguimento de discos de freios automobilísticos, melhora as propriedades mecânicas e térmicas do mesmo, permitindo as seguintes conclusões:

1. O teste 3 da liga de ferro fundido cinzento (liga base + 0,20% de Nb) e o teste 4 (liga base + 0,15% Mo) apresentaram resultados de resistência à tração em todos os ensaios realizados nas temperaturas ambiente, 380°C, 480°C, 580°C e 680°C estatisticamente iguais, obtendo valores superiores de 25 a 40% em relação ao teste 1 (liga base) e de 10 a 15% acima do teste 2 (liga base + 0,10% de Nb). O teste 2 apresentou também resultados de resistência à tração superiores ao teste 1 (liga base) obtendo valores acima de 10 a 38%, podendo ser uma excelente alternativa econômica para aplicações susceptíveis a temperaturas elevadas, principalmente para temperaturas de trabalho de até 580°C.
2. Quando adicionados os elementos de liga nióbio ou molibdênio na liga base, houve um aumento na dureza Brinell, pois são fortes formadores de carbonetos de alta dureza que potencializam o refino da perlita, fato que contribui significativamente com os resultados de dureza;
3. Com relação à microestrutura, foi possível observar que a liga base apresentou ausência de grafitas do tipo E. Entretanto, nas corridas com nióbio e molibdênio, mesmo que em raras proporções, estas foram observadas. Em relação ao tamanho das grafitas, observa-se que o nióbio e o molibdênio tendem à diminuição dos seus tamanhos, e há uma leve tendência do nióbio a concentrar mais a distribuição das grafitas entre os tamanhos de 3 a 6. A matriz metálica é muito similar para todas as corridas, mesmo com a variação de temperatura que as amostras tiveram nos testes de resistência à tração em temperaturas elevadas (380°C, 480°C, 580°C e 680°C);

4. Na análise de quantificação da grafita foi possível observar uma quantidade média de área de grafita de 10,5% e 10,7% para a liga base e liga base + 0,10% Nb, respectivamente. A liga base + 0,20% Nb apresentou redução da quantidade de grafita para valores de 8,9% (redução de 1,6% de grafita), fenômeno este também observado mais acentuadamente na análise realizada na liga base + 0,15% Mo, com valores de 7,9% (redução de 2,6 % de grafita);
5. Foi possível observar, através da análise de célula eutética, que a composição da liga base apresenta um número médio de células de 203 ± 40 Células/cm², valor ligeiramente inferior ao da liga base + 0,10% Nb que teve resultados de 215 ± 40 Células/cm². Já as ligas base + 0,20% Nb e + 0,15% Mo apresentaram valores similares de aproximadamente 250 ± 30 Células/cm². Nessas últimas duas ligas pôde-se evidenciar um possível efeito de nucleação e modificação na estrutura;
6. Através dos ensaios de difusividade, pôde-se observar que a liga denominada liga base + 0,10% Nb apresenta um resultado melhor de difusividade em todas as temperaturas testadas (380°C, 480°C, 580°C e 680°C), fato este que pode ser atribuído à maior quantidade de grafita associada à adição de um teor de nióbio de 0,10%.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste estudo estimulam a realização de uma análise tribológica para aplicação em discos de freios, com foco nos quatro materiais de discos testados e no material de atrito, abordando:

1. Performance: para avaliação do coeficiente de atrito dos materiais, conforme Norma SAE J2522;
2. Durabilidade: para avaliação da resistência ao desgaste, conforme Norma SAE J 2707;
3. Conforto: para avaliação do ruído, vibração e aspereza, conforme Norma SAE J2521;
4. Integridade do componente disco de freio: conforme Norma ECE R90 Anexo 11;
5. Desempenho na utilização conjugada de Nb, Mo, Cr, Cu e Sn avaliando os discos de freios automobilísticos.

REFERÊNCIAS

- ABIFA. 2017. Disponível em: <http://www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2018/01/12-DEZEMBRO2017>. Acesso em: 20 set. 2018.
- ABNT. NBR.8583. **Peças em Ferro Fundido Cinzento Classificadas Conforme a Dureza Brinell**. 1981.
- ABNT. NBR.6589. **Peças em Ferro Fundido Cinzento Classificadas Conforme a Resistência à Tração**. 1986.
- ANGUS, H. T.; LAMB, A.D.; SCHOLLES, J. P. Conditions Leading to Failure in Cast Iron Brakes. **BCIRA Journal**, Birmingham, p. 375-385, 1966.
- ASTM A 247. **Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings**. 2017.
- ASTM A 48/A48M. **Standard Specification for Gray Iron Castings**. 2016.
- ASTM E1019:2011. **Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques**. 2011.
- AUTOMOBILE STATISTA. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/262747/worldwide-automobile-production-since-2000/>. Acesso em: jan. 2020.
- BERTOLI, C.; ROHRIG, K. Seleção e Efeitos Gerais de Elemento de Liga em Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares. **Revista Fundição**, 1981.
- CALLISTER JÚNIOR. W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro; LTC, 2002.
- CALLISTER JÚNIOR. W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- CHEN, X.; XU, J.; HU, H.; MOHRBACHER, H.; KANG, M.; ZHANG, W.; GUO, A.; ZHAI, Q. Effects of Niobium Addition on Microstructure and Tensile Behavior of as Cast Ductile Iron. **Materials Science and Engineering A**, v. 688, p. 416–428, 2017.
- CHEN, H. X.; CHANG, Z. C; LU, J. C; LIN, H. T. Effect of Niobium on Wear Resistance of 15% Cr White Cast Iron. **Wear**, v. 166, n. 2, p. 197-201, 1993.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: Ferro Fundido**. 7. ed. rev. São Paulo: ABM, 2015.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda, 1986.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns: Ferros Fundidos comuns**. 3. ed. rev. São Paulo: Blucher, 1983.

COMIN, G. D. **Estudo do Efeito do Cobre e do Estanho na Formação da Perlita e nas Propriedades Mecânicas do Ferro Fundido Nodular**. TCC. Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, 2013.

COSTES, M. L. Aluminium dans l'Industrie Automobile Européenne: Vue du Present, Vision du Future. **Fondeurie Fondeur d'aujourd'hui**, n. 256, p. 38-43, 2006.

DEVECILI, A. O; YAKUT, R. The Effect of Nb Supplement on Material Characteristics of Iron with Lamellar Graphite. **Materials Science and Engineering**, 2014.

DUARTE, H. A. Ferro: Um Elemento Químico Estratégico que Permeia História, Economia e Sociedade, **Química Nova**, v. XY, n. 00, 1-8, 200. In: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170443>.

ELLIOT, R. **Cast Iron Technology**. 1. ed. Britain: Butterworth & Co. Ltd., 1988.

FOUNDING GREY CAST IRON. EN 1561:1997. **British Standard**. This document specifies the characterizing properties of grey cast irons, thickness, tensile strength, hardness, thermal conductivity, electrical resistivity, coercivity, permeability, Brinell hardness measurement, symbols, grades (quality) 2011.

FRAS, E.; GÓRNY, M.; WIENCEK, K.; LOPEZ, H. Density of Eutectic Cells in Casting of Gray Cast Iron: A Theoretical Model and Experimental Verification, **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 50, n. 4, 2005.

FULLER, A. G. Evaluation of the Graphite Form in Perlitic Ductile Iron by Ultrasonic and Sonic Testing and Effect of Graphite Form on Mechanical Properties. **AFS**, v. 85, p. 509-526, 1977.

GASPARIN, H. D. et al. Propriedades Mecânicas a Altas Temperaturas de Ferros Fundidos Cinzentos Aplicados a Cabeçotes de Motor a Diesel. In: 69º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2014, São Paulo. **Anais do Congresso Anual da ABM**, v. 69, n. 69, p. 6294-6303, São Paulo: 2014.

GOO, B.; LIM, C. Thermal Fatigue of Cast Iron Brake Disk Materials, **Journal of Mechanical Science and Technology**, 26 (6), p. 1719-1724, 2012.

GUESSER, W. L.; KRAUSE, W.; PIESKE, A. A Fragilização Intergranular de Ferros Fundidos de Alta Ductilidade. **ABM**, v. 40, n. 322, p. 485-490, 1984.

GUESSER, W. L.; MASIERO, I.; MELLERAS, E.; CABEZAS, C. Fatigue Strength of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Engine Cylinder Blocks. **SAE Brasil**, São Paulo, 2004.

GUESSER, W. L.; HILÁRIO, D. G. Ferros Fundidos Nodulares Perlíticos. Contribuição ao CONAF 99, **ABIFA**, São Paulo, out. 1999.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1. ed. São Paulo: Blücher, 2009.

GUESSER, W. L.; MASIERO, I.; MELLERAS, E.; CABEZAS, C. S. Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads, **Revista Matéria**, v. 10, n. 2, p. 265-272, jun. 2005.

GUNDLACH, R. B. The Effects of Alloying Elements on the Elevated Temperature Properties of Gray Irons. **AFS**, v. 91, p. 389-422, 1983.

HANNA, I. **Mechanical Properties of Niobium Alloyed Gray Iron**. Tese (Doutorado). Vehicle Dynamics Aeronautical and Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2011.

HASSE, S. **Duktilen Gusseisen**. Berlin: Schiele & Schon, 1996.

HUANG, W. QIANG, G. YANAN, Z. YANING, Z. HAIBO, L. HAONAN, R. YAMEI, Z. XUEFEI, H. Influence of Sn and Nb Additions on the Microstructure and Wear Characteristics of a Gray Cast Iron. **Materials Science & Processing**, 2020.

ISO 185:2019. Grey Cast Iron Classification. This Document Specifies the Characterizing Properties of Grey Cast Irons. 2019.

JASZAROWSKI, J. K; CONKLIN, R.W.; MATHENY, L.W.; MOTYL, M. J. High Strength Gray Cast Iron Containing Niobium. **International Publication**, set. 2008.

KANNO, T. Effect of Alloying Elements on the Eutectic Temperatures in Cast Iron. **AFS**, v. 113, p. 1-9, 2005.

LACAZE, J.; SERTUCHA, J.; LARRANAGA, P.; SUÁREZ, P. Statistical Study to Determine the Effect of Carbon, Silicon, Nickel and Other Alloying Elements on the Mechanical Properties of As-Cast Ferritic Ductile Irons, **Revista de Metalurgia**, v. 52, n. 2, 2016.

LLAVONA, J. M. A. **Influence of Molybdenum on Mechanical and Thermal Properties in Lamellar Graphite Cast Iron**, Paper. Materials and Manufacturing Engineering, School of Engineering, Jonkoping University, May, 2016.

MALUF, O. **Fadiga Termomecânica em Ligas de Ferro Fundido Cinzento para Discos de Freios Automotivos**. Tese (Doutorado). USP São Carlos, 2007.

MALUF, O. et al. Effects of Alloying Elements on Thermal Diffusivity of Gray Cast Iron Used in Automotive Break Disks. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 18, n. 7, p. 980-984, 2009. Disponível em: <http://producao.usp.br/handle/BDPI/14650>.

MEDEIROS, M. A. Elemento Químico Ferro. **Química Nova**, v. 32, 2010

MILAN, M. T.; MALUF, O. SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W. W. **Metais: Uma Visão Objetiva**. São Carlos: Suprema, 2004.

MOHRBACHER, H. Grain Size Control by Niobium Microalloying in Gear Steel during High Temperature Carburizing. **NiobelCon**, Belgium, 2007.

MOHRBACHER, H.; ZHAI, Q. Niobium Alloying in Gray Cast Iron for Vehicle Brake Discs. In: AIST Steel Properties and Applications, **Materials Science and Technology**, p. 137-148, 2011.

MOURÃO, M. (coord.). **Introdução à Siderurgia**. 1. ed. aum. São Paulo: ABM, 2007.

OLAH NETO, A. **Estudo da Solidificação de Ferros Fundidos através de Análise Dilatométrica**. Dissertação (Mestrado). UFSCar, São Carlos, 1985.

PALMER, K. B. Design with Cast Irons at High Temperatures: Growth and Scaling. **BCIRA Journal**, Report 1248, p. 589-609, 1976.

PALMER, K. B. Design with Cast Irons at High Temperatures: Tensile, Creep and Rupture Properties. **BCIRA Journal**, Report 1251, p.31-50, 1977.

PERRE, W. V. Thermal Analysis Principles and Applications, **Heraeus**, p.5-8, 2007.

PIESKE, A.; CHAVES FILHO, L. M.; REIMER, J. F. **Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade**. 3. ed. Joinville: set. 1980.

PIESKE, A; CHAVES FILHO, L.M.; GRUHL, A. As variáveis metalúrgicas e o controle da estrutura de ferros fundidos cinzentos, **Metalurgia ABM**, 1975.

PORKERT, J.; LOTZ, W. **Optimized Gray Cast Iron Plate Alloy for Utility Vehicle Brake Disks**. U.S. Patent n. 5.894.010, 13 abr. 1999.

RELATÓRIO SENAI SISTEMA FIEMG CETEC. **Avaliação de Ferro Fundido Cinzento Eutético com Adição de Nióbio para Trabalho a Quente**, 2020.

ROSARIO, A. M. **Estudo dos Efeitos de Elementos de Liga na Solidificação de um Ferro Fundido Cinzento Via Análise Térmica**. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2012.

SANTOS, A. B. S., CASTELO, B. C. H. **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares**. São Paulo: IPT, 1991.

SANTOS, A. B. S.; BRANCO, C. H. C. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo, IPT, 1989.

SINATORA, A.; SANTOS, A. B. S. Efeito da porcentagem de Fe-Si utilizado como inoculante na estrutura e propriedades de ferro nodular, **Metalurgia**, 1976.

STEFANESCU, D. M. (ed.). Cast Iron. **ASM Handbook**, 7. ed. [S. l.]: ASM International®, v. 15, p. 169-181, 1988.

TURNBULL, G. K.; WALLACE, J. F. Molybdenum Effect on Gray Iron Elevated Temperature. **AFS**, vol. 67, p. 35-46, 1959.

UNISOCIESC. **Ferro Fundido Cinzento**, 2017. Apostila. Pós-graduação em Metalurgia, Sociedade Educacional de Santa Catarina - UNISOCIESC, Joinville, 2017.

VAN VLACK, L. H. **Princípio de Ciências dos Materiais**. 13. ed. rev. São Paulo: Blucher, 2000.

WALTON, C. F; OPAR, T. J. **Iron Casting Handbook**. Iron Casting Society, Inc. 1981.

ZHAI Q.; ZHOU W.; ZHU H.; ZHENG D.; ZHENG H.; HUA Q. Niobium Alloying Effect in High Carbon Equivalent Grey Cast Iron. **China Foundry**, v. 8, n. 1, p. 36-40, 2011.

WANG, H. The Effect of Graphite Flake Morphology on the Thermal Diffusivity of Gray Cast Irons Set for Automotive Brake Discs, **Materials Science**, p. 4775-81, 1999.

ZHANG, J. T.; REN, F. Z. Study on the Influences on Microstructure and Properties of High-Strength Grey Cast Iron in Addition to Alloying Elements Nb. **Materials Research**, p. 221-224, 2013.

ZHONG, L.; XU, Y.; YE, F. **In Situ NbC Particulate-Reinforced Iron Matrix Composite**: Microstructure and Abrasive Wear Characteristics. **Tribology Letters**, v. 47, n. 2, p. 253-259, 2012.

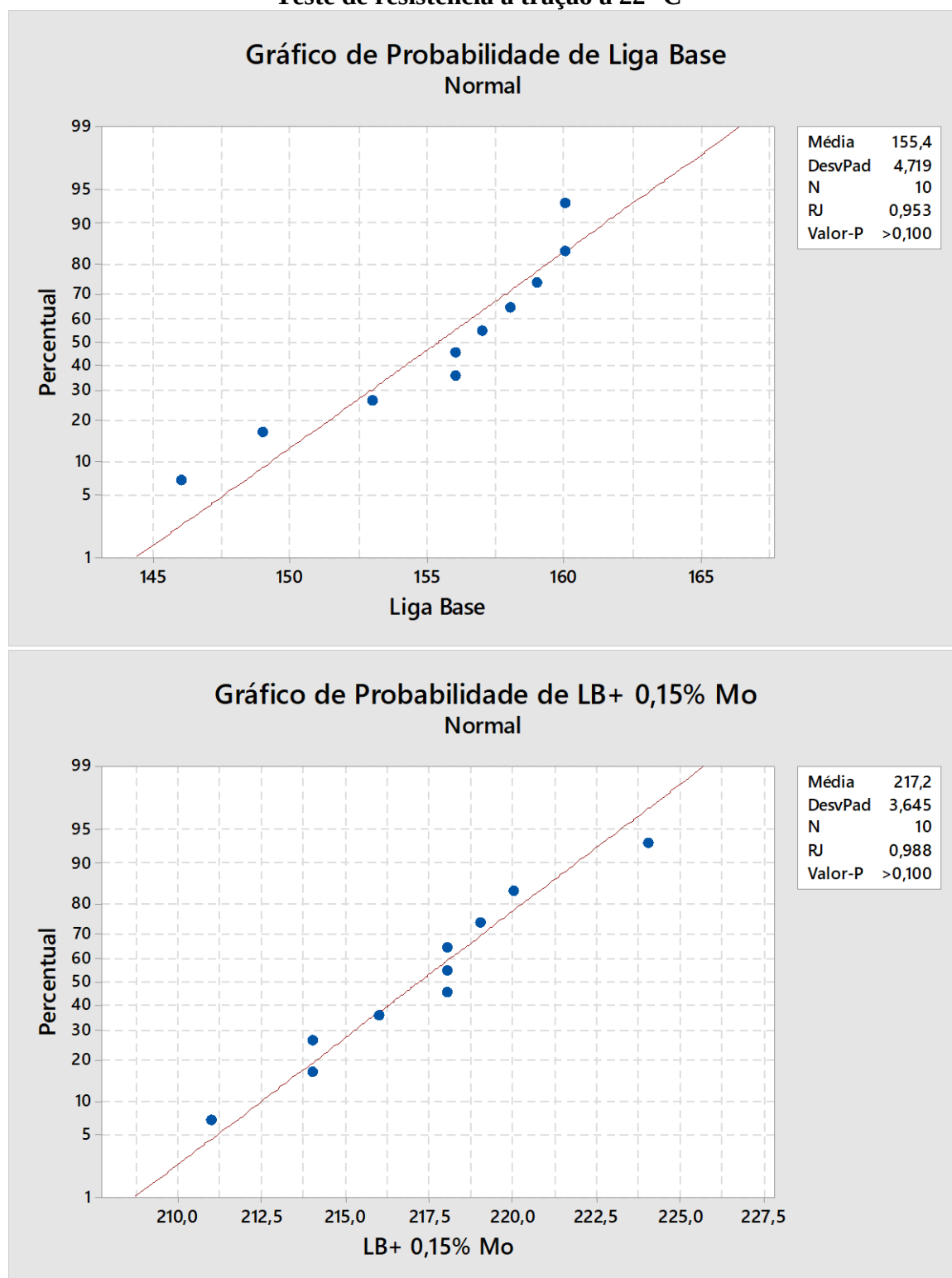
ANEXOS: AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS DADOS

Normalidade Shapiro - Wilk – Dados Normais para P valor >0,05

ANEXO A – TESTES A 22°C

TESTES DE NORMALIDADE A 22°C

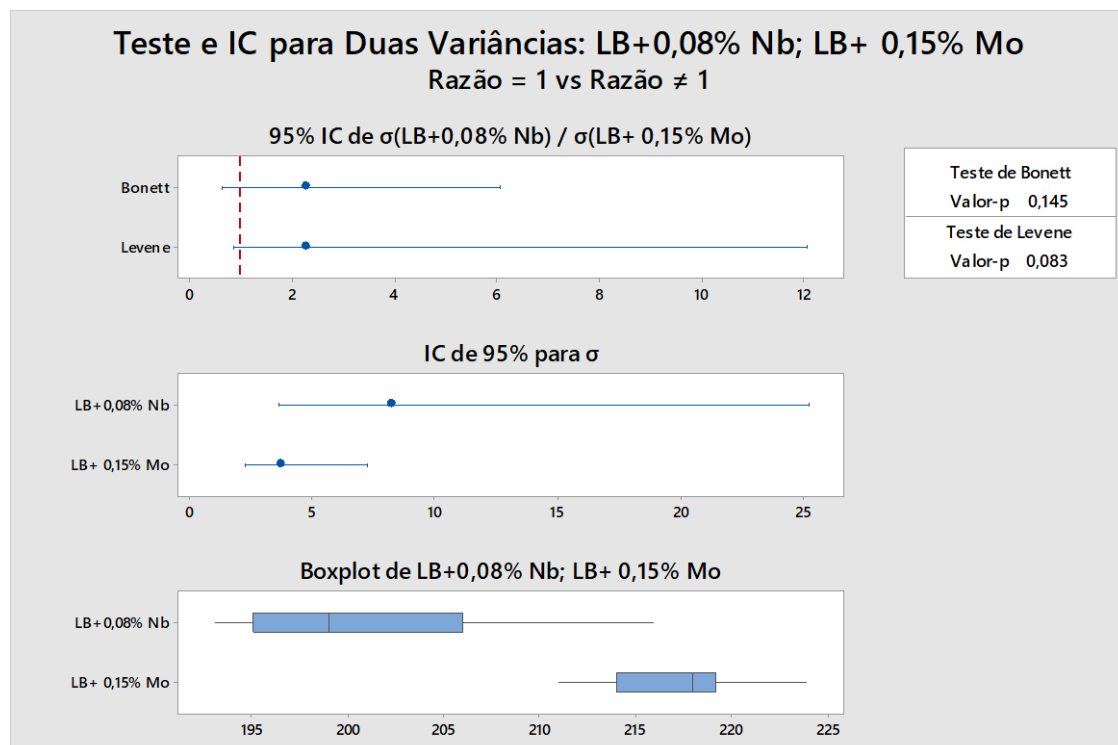
Teste de resistência à tração a 22 °C



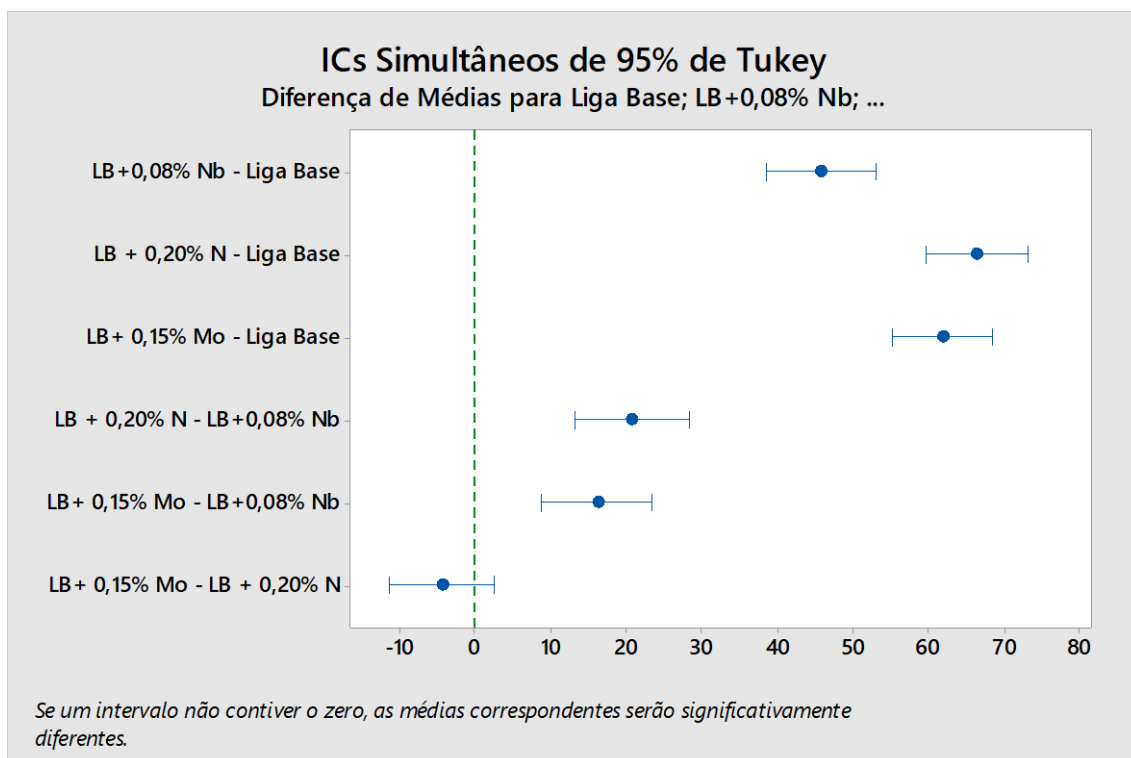
Estatísticas

Variável	Variância
Liga Base	22,27
LB+0,08% Nb	66,48
LB + 0,20% Nb	31,94
LB+ 0,15% Mo	13,29

TESTE DE VARIÂNCIA A 22°C



TESTES DE TUKEY A 22°C



Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Fator	N	Média	Agrupamento		
LB + 0,20% Nb	9	221,78	A		
LB+ 0,15% Mo	10	217,20	A		
LB+0,08% Nb	7	201,14		B	
Liga Base	10	155,40			C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes
ICs Simultâneos de 95% de Tukey

ANEXO B - TESTES A 380°C

TESTE DE NORMALIDADE A 380°C

Teste de resistência à tração a 380 °C

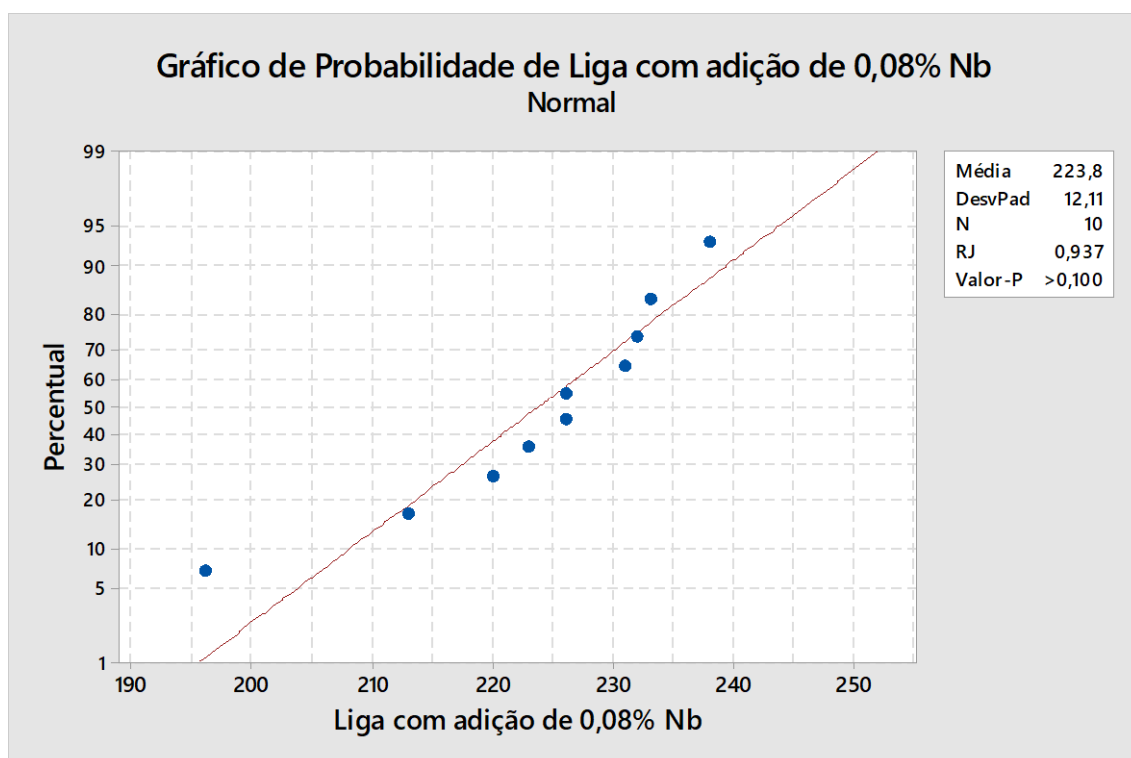
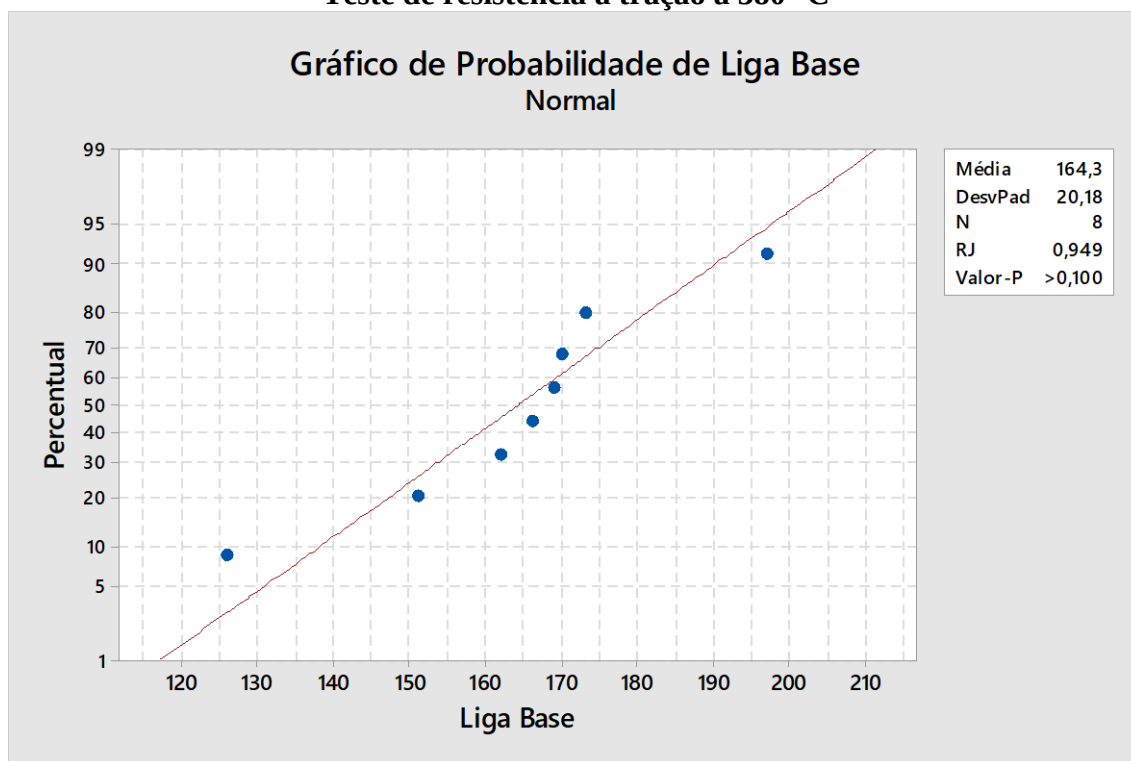


Gráfico de Probabilidade de Liga com adição de 0,20% Nb
Normal

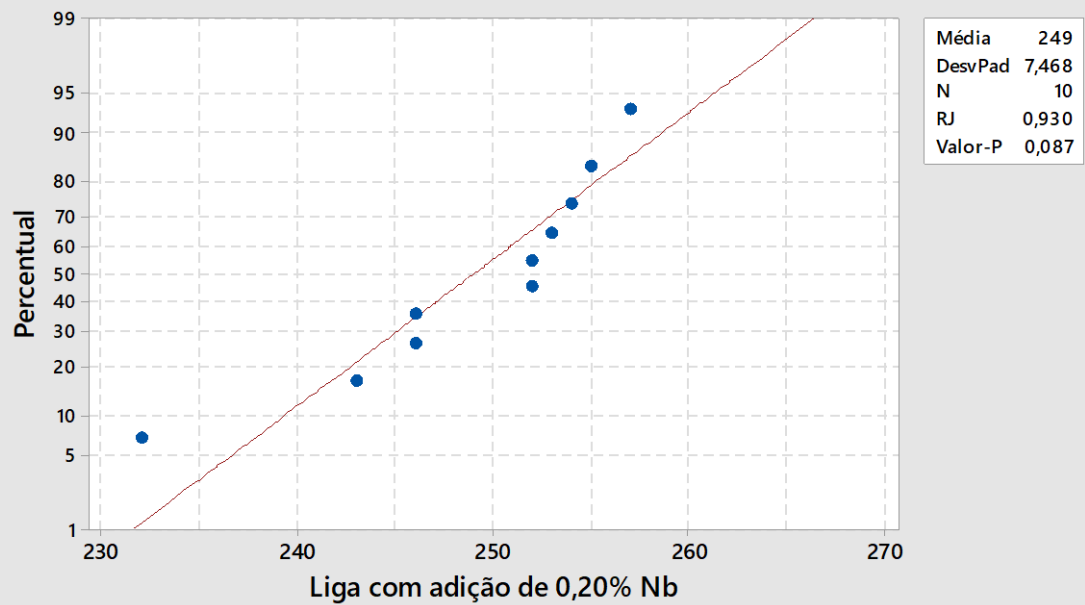
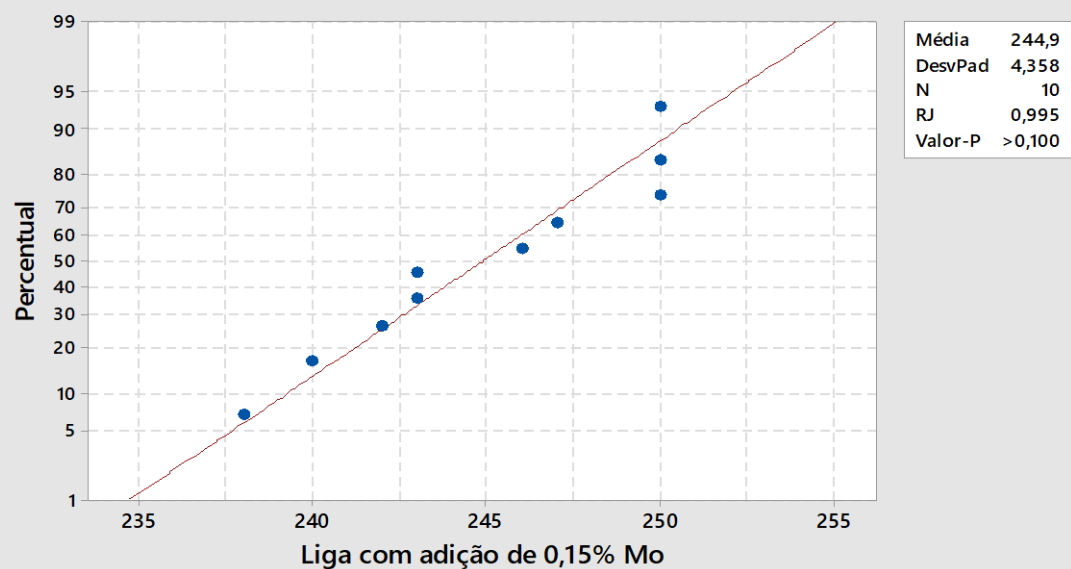


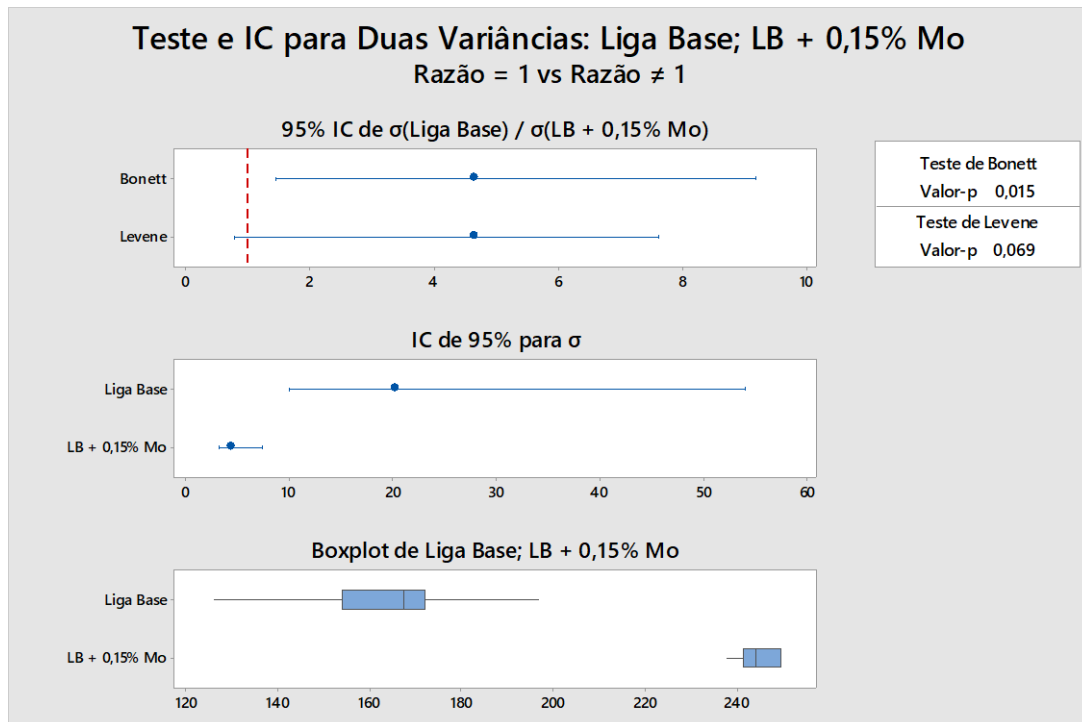
Gráfico de Probabilidade de Liga com adição de 0,15% Mo
Normal



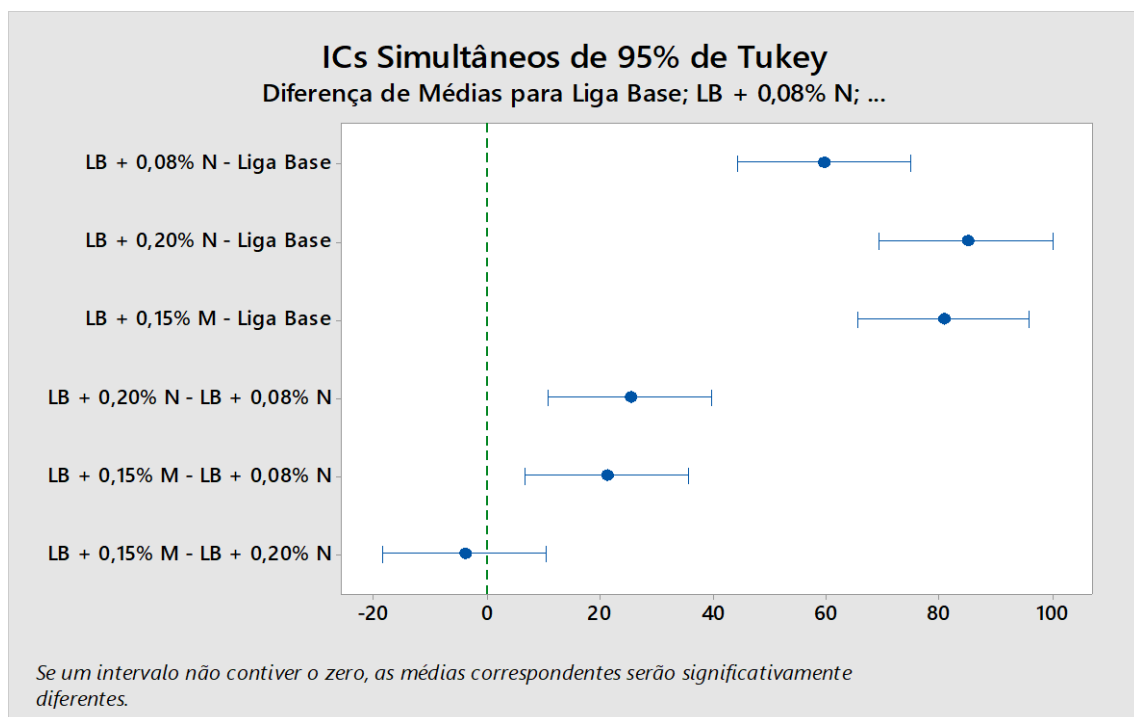
Estatísticas

Variável	Variância
Liga Base	407,36
LB + 0,08% Nb	146,62
LB + 0,20% Nb	55,78
LB + 0,15% Mo	18,99

TESTE DE VARIÂNCIA A 380°C



TESTE DE TUKEY A 380°C



Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Fator	N	Média	Agrupamento		
LB + 0,20% Nb	10	249,00	A		
LB + 0,15% Mo	10	244,90	A		
LB + 0,08% Nb	10	223,80		B	
Liga Base	8	164,25			C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes

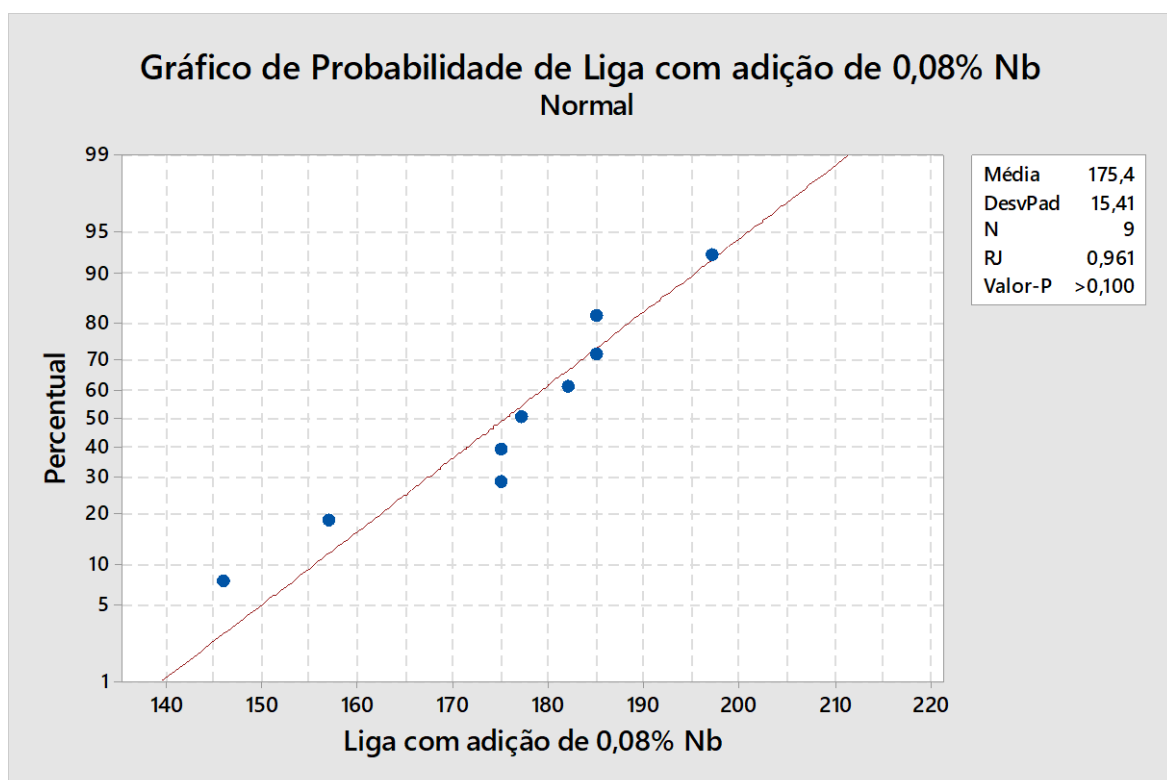
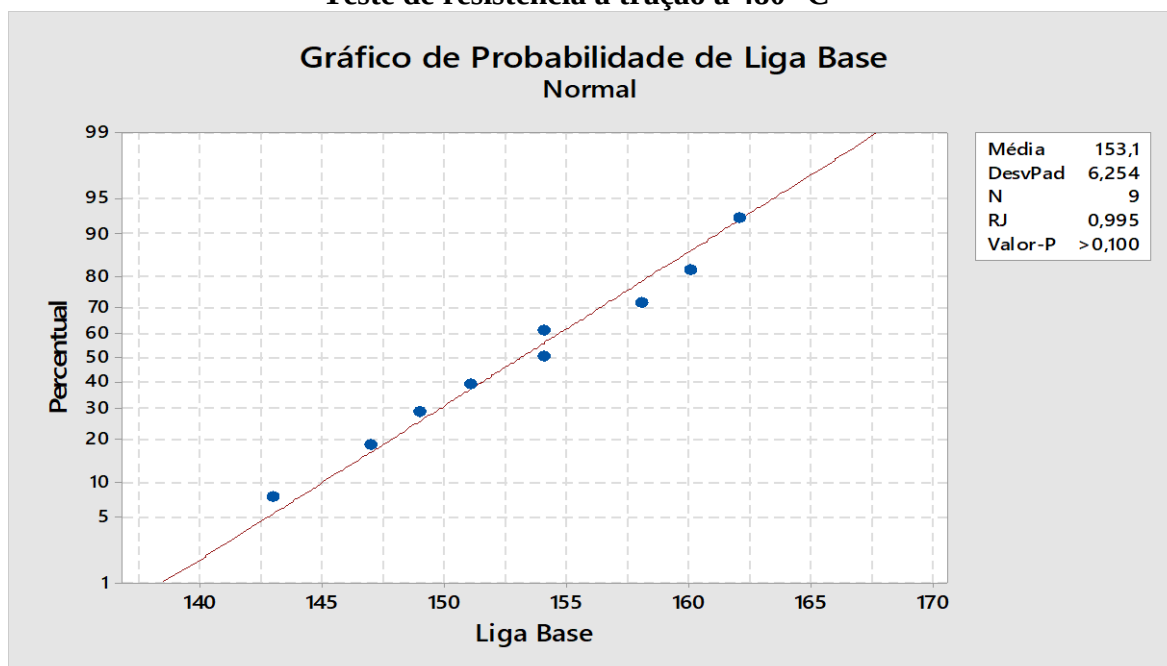
ANEXO C - TESTES A 480°C**TESTE DE NORMALIDADE A 480°C****Teste de resistência à tração a 480 °C**

Gráfico de Probabilidade de Liga com adição de 0,20% Nb
Normal

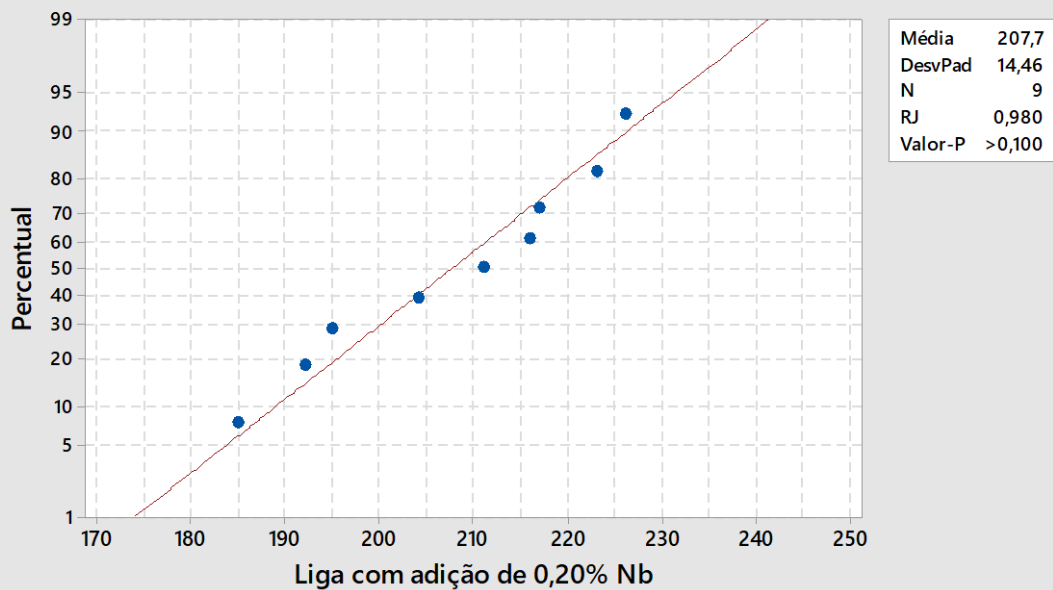
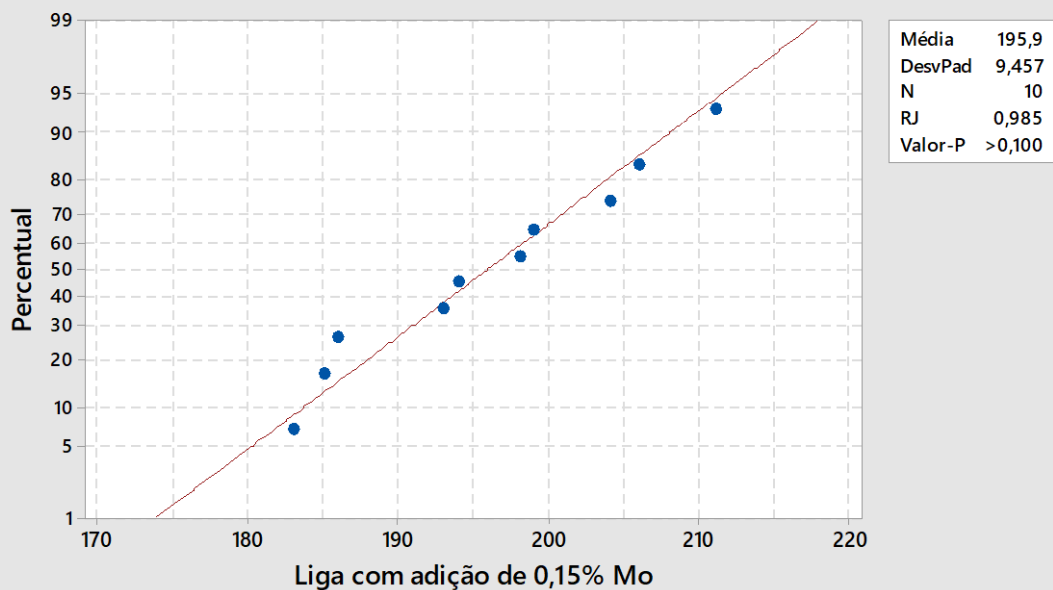


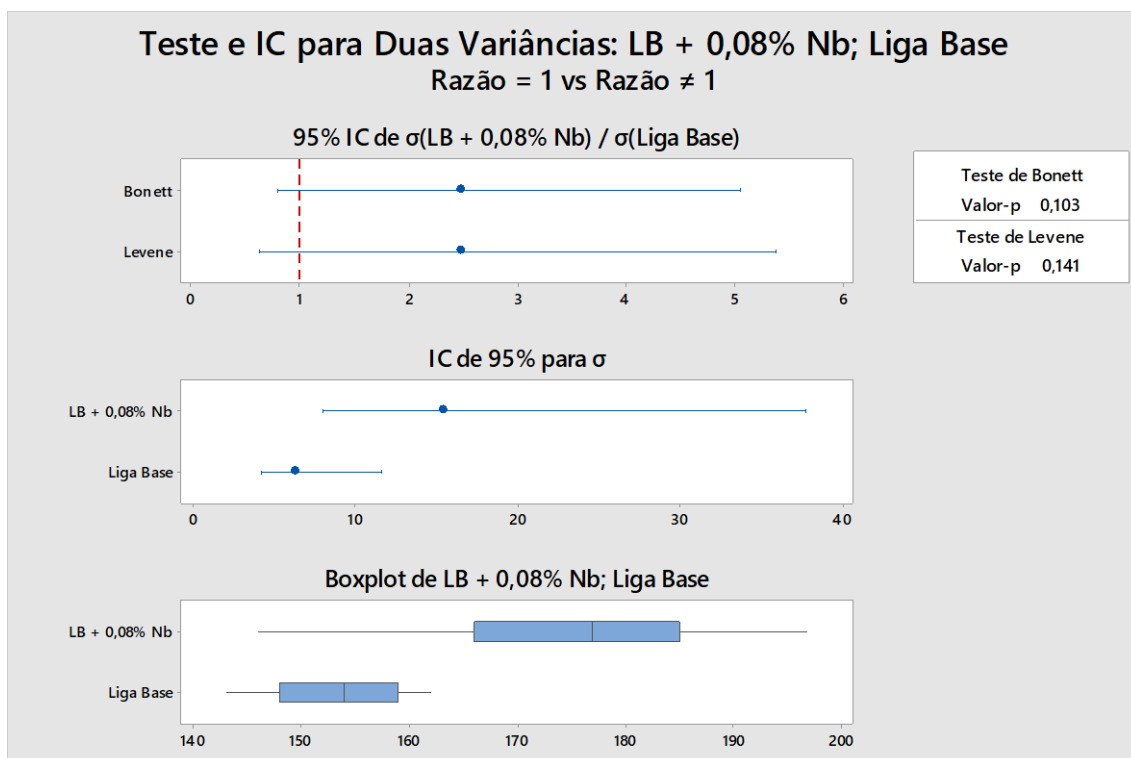
Gráfico de Probabilidade de Liga com adição de 0,15% Mo
Normal



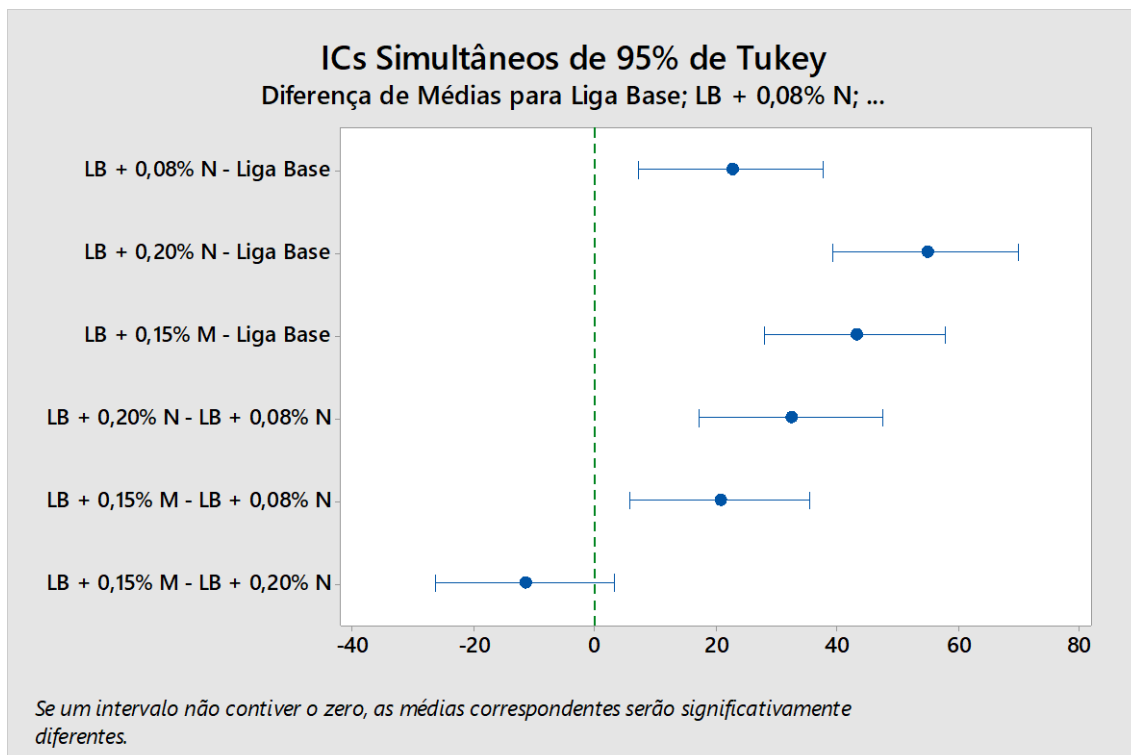
Estatísticas

Variável	Variância
Liga Base	39,11
LB + 0,08% Nb	237,53
LB + 0,20% Nb	209,00
LB + 0,15% Mo	89,43

TESTE DE VARIÂNCIA A 480°C



TESTE DE TUKEY A 480°C



Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Fator	N	Média	Agrupamento		
LB + 0,20% Nb	9	207,67	A		
LB + 0,15% Mo	10	195,90	A		
LB + 0,08% Nb	9	175,44		B	
Liga Base	9	153,11			C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes

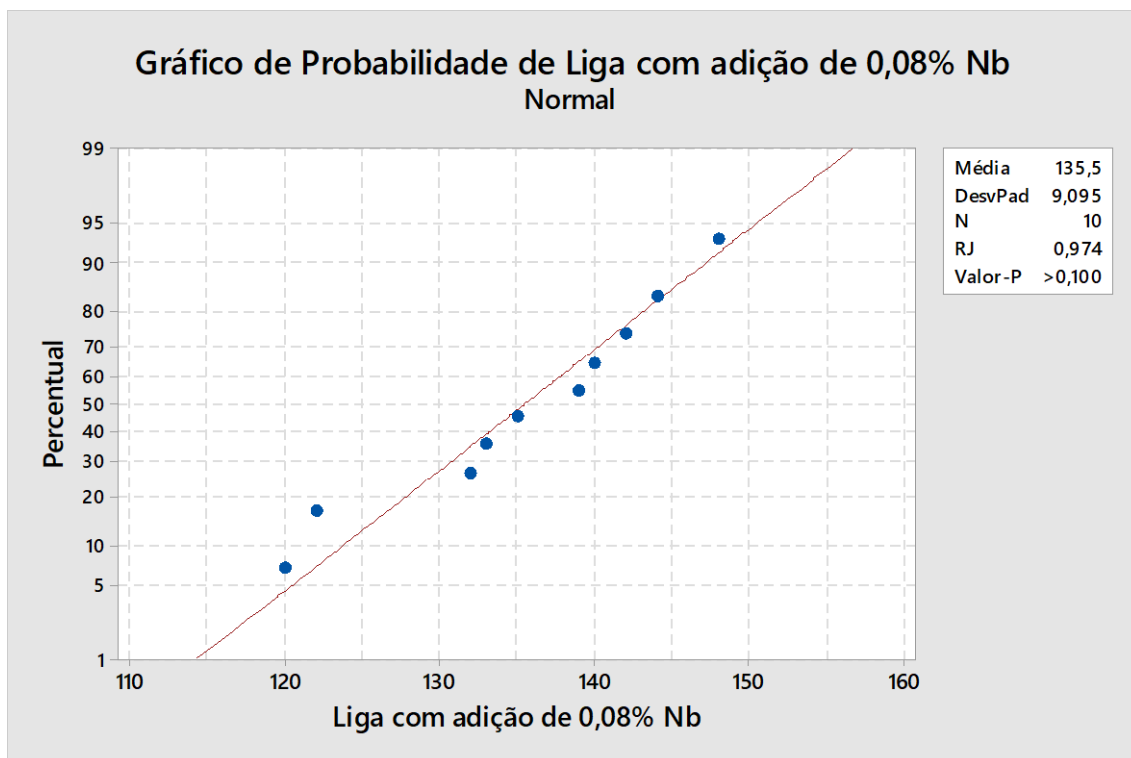
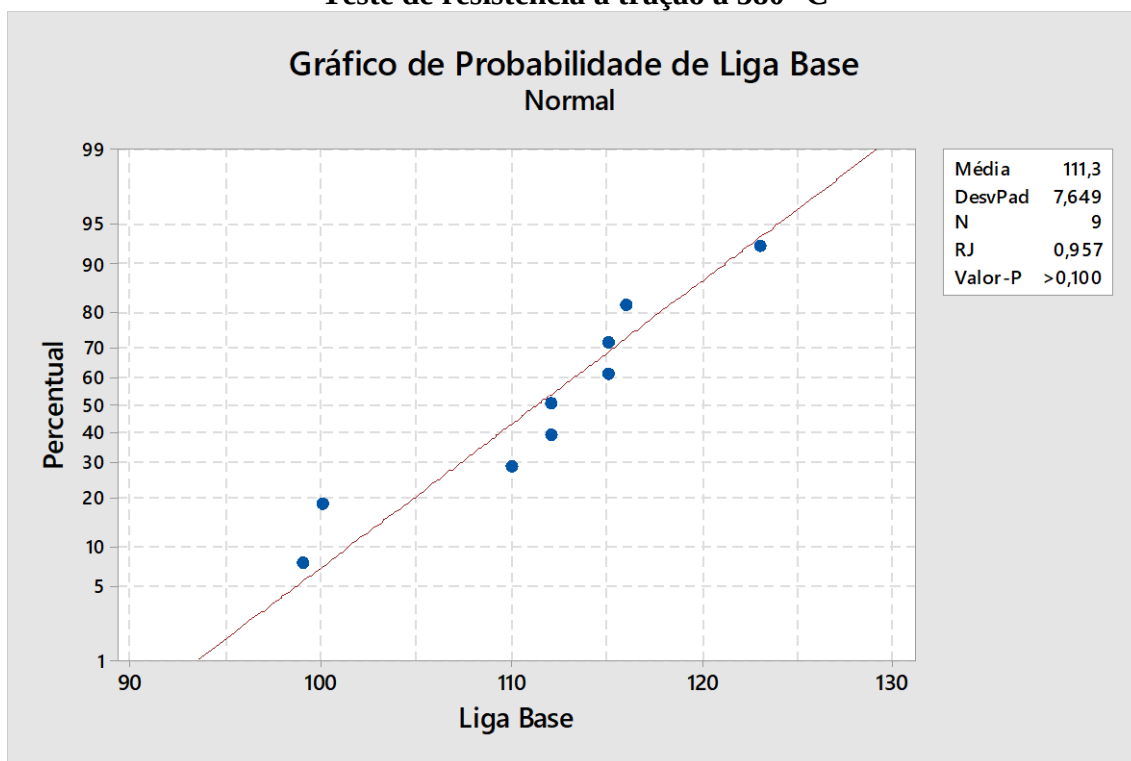
ANEXO D - TESTES A 580°C**TESTE DE NORMALIDADE A 580°C****Teste de resistência à tração a 580 °C**

Gráfico de Probabilidade de Liga com adição de 0,20% Nb
Normal

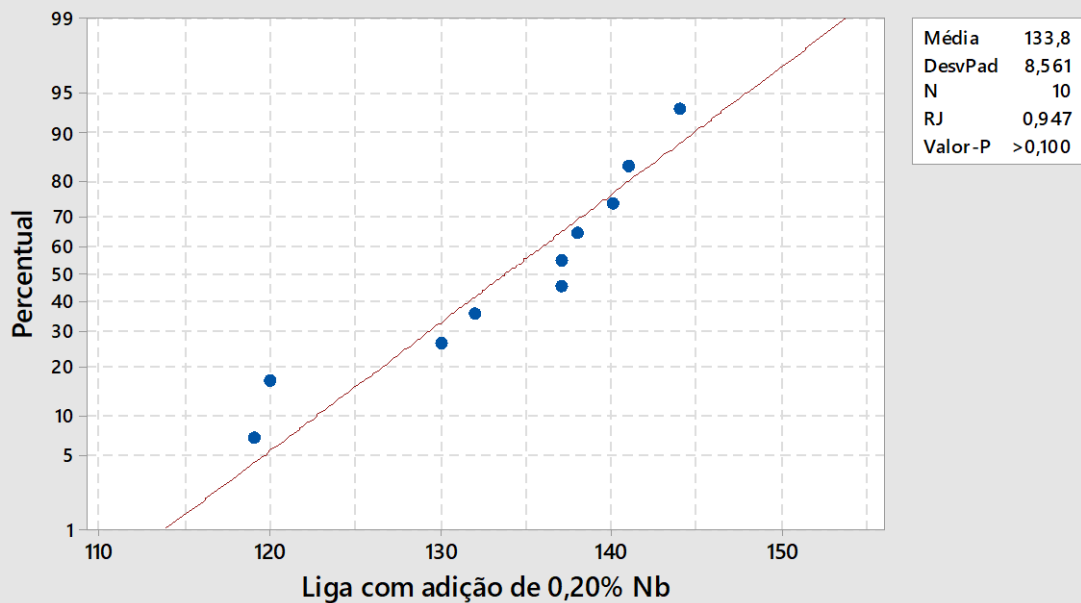
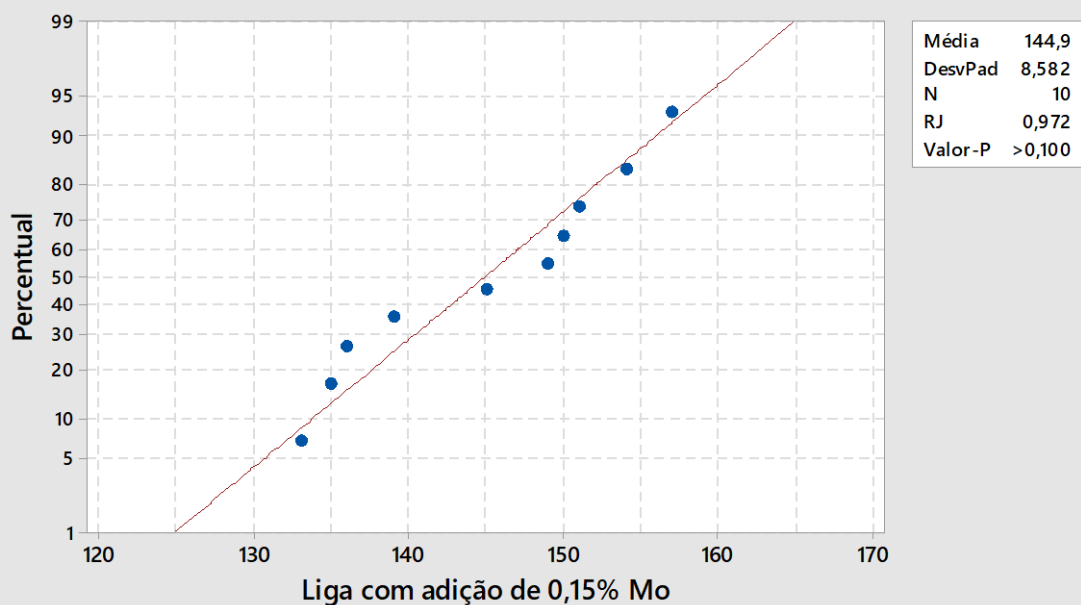
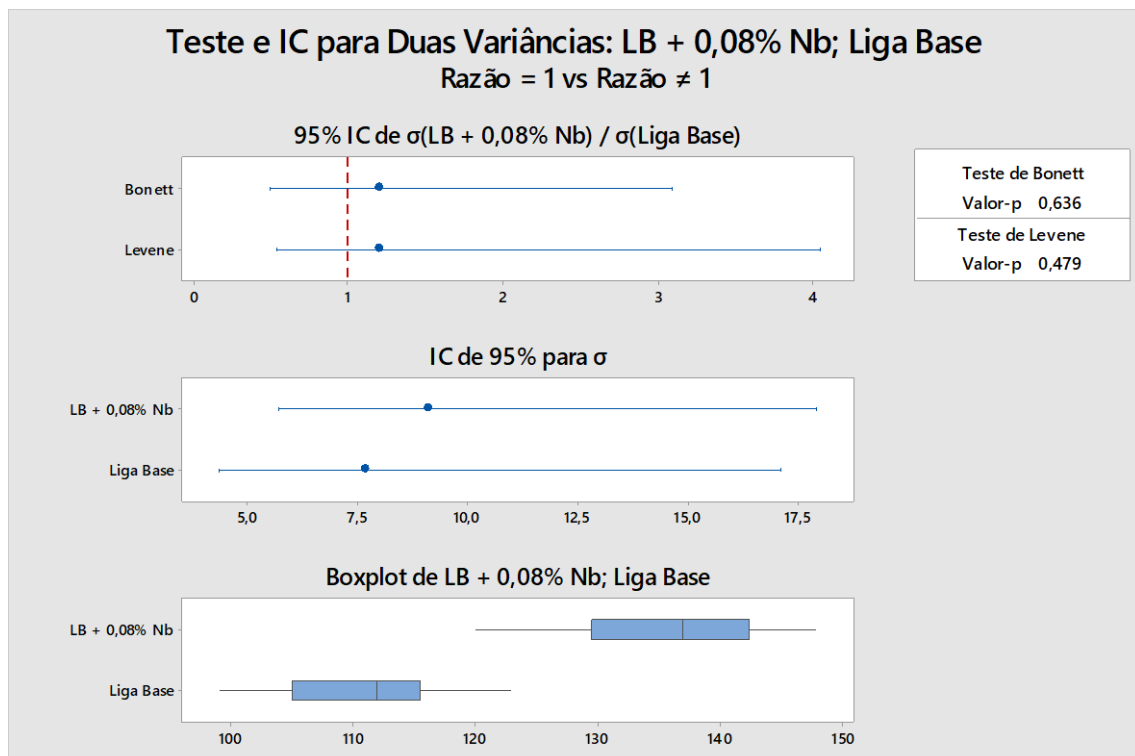


Gráfico de Probabilidade de Liga com adição de 0,15% Mo
Normal

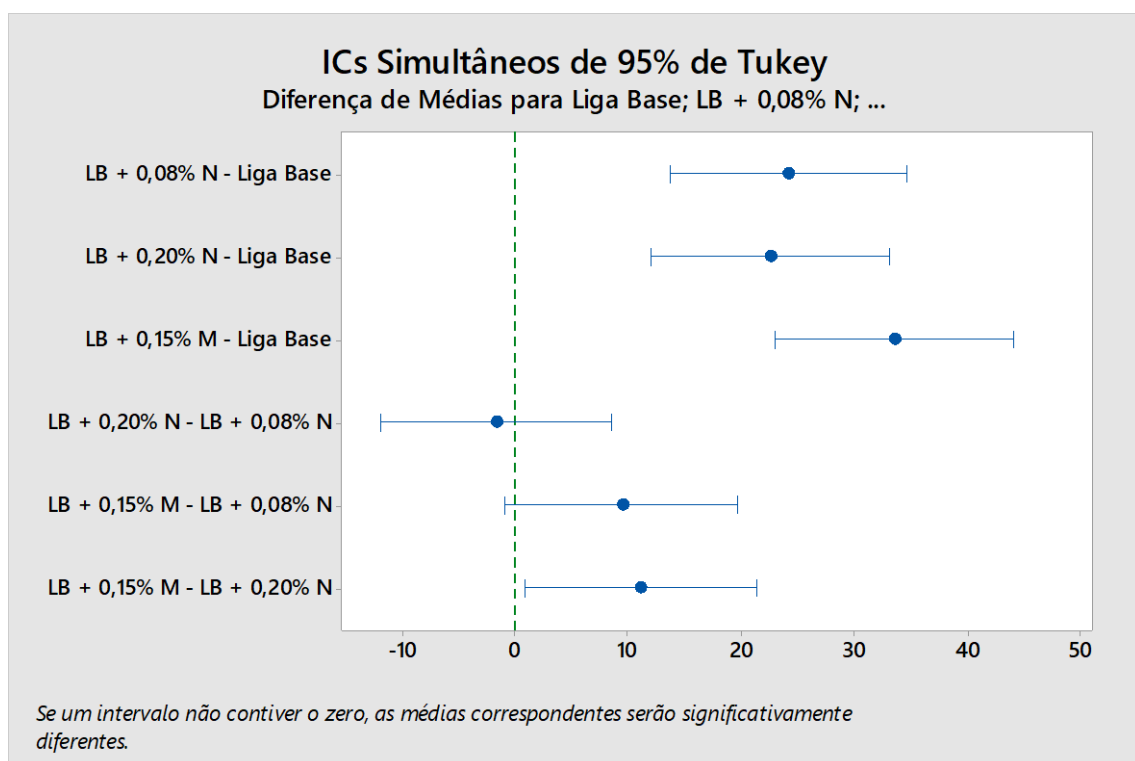


Variância	Variável
58,50	Liga Base
82,72	Liga com adição de 0,08% Nb
73,29	Liga com adição de 0,20% Nb
73,66	Liga com adição de 0,15% Mo

TESTE DE VARIÂNCIA A 580°C



TESTE DE TUKEY A 580°C



Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Fator	N	Média	Agrupamento	
LB + 0,15% Mo	10	144,90	A	
LB + 0,08% Nb	10	135,50	A	B
LB + 0,20% Nb	10	133,80		B
Liga Base	9	111,33		C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

ANEXO E - TESTES A 680°C

TESTE DE NORMALIDADE A 680°C

Teste de resistência à tração a 680 °C

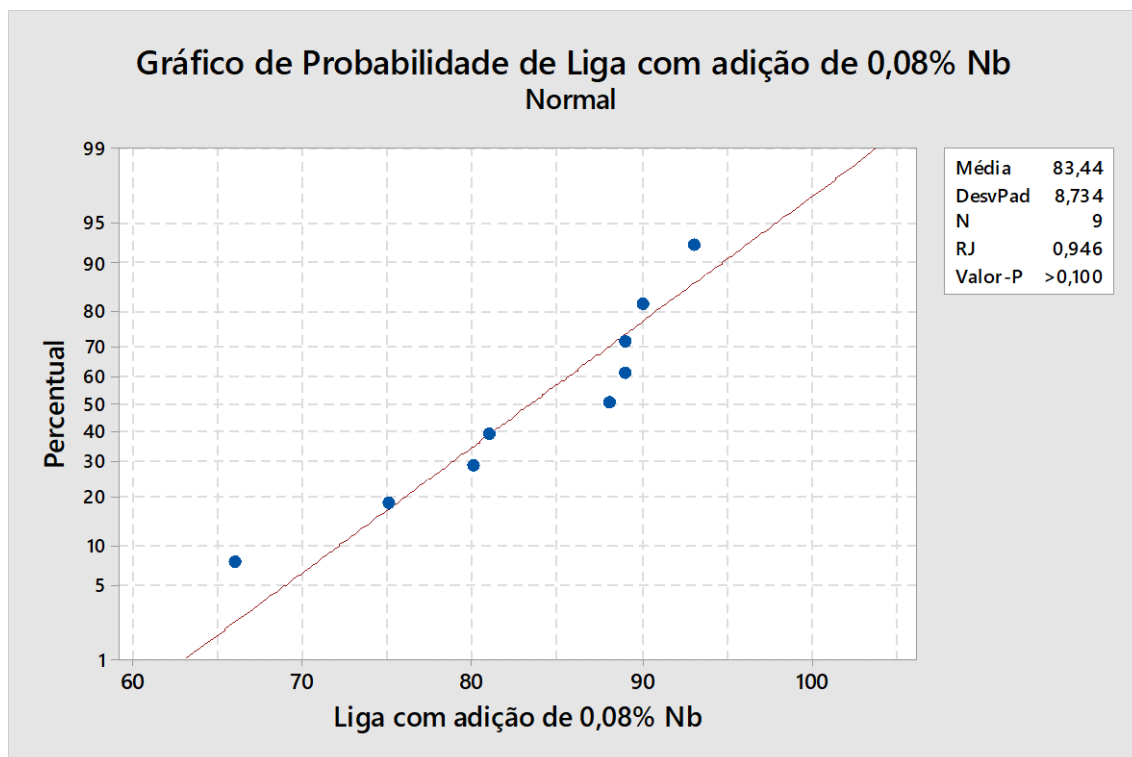
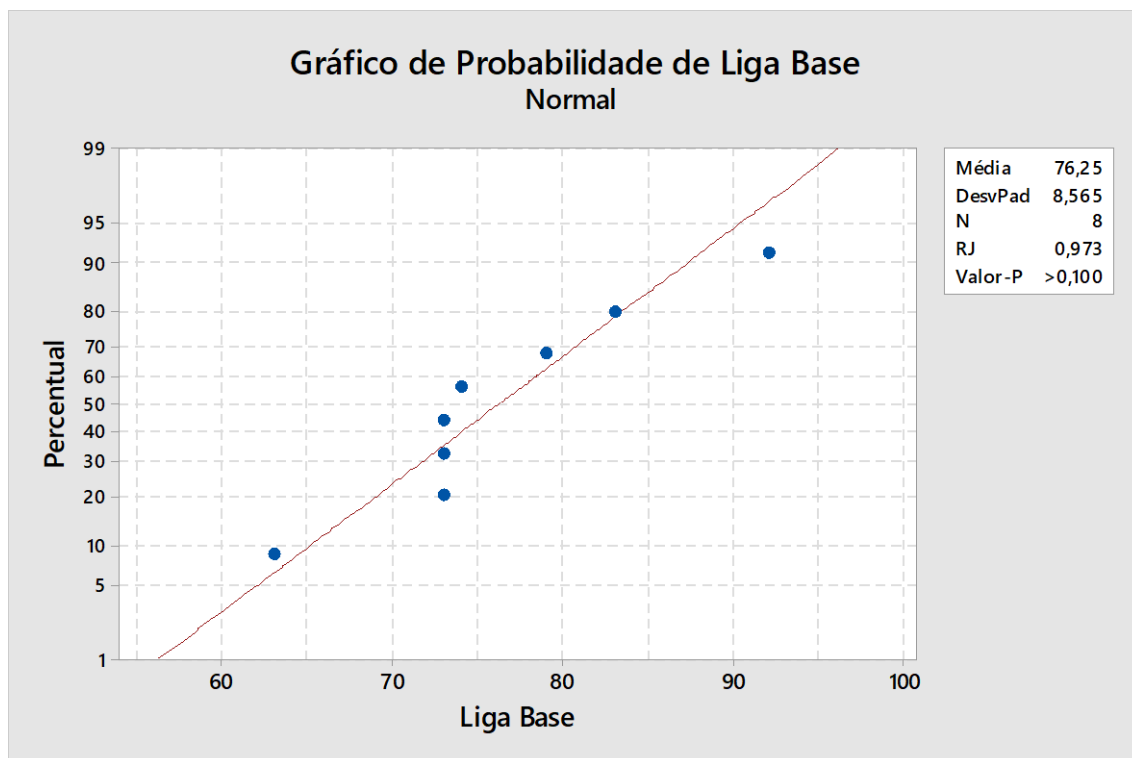


Gráfico de Probabilidade de Liga com adição de 0,20% Nb
Normal

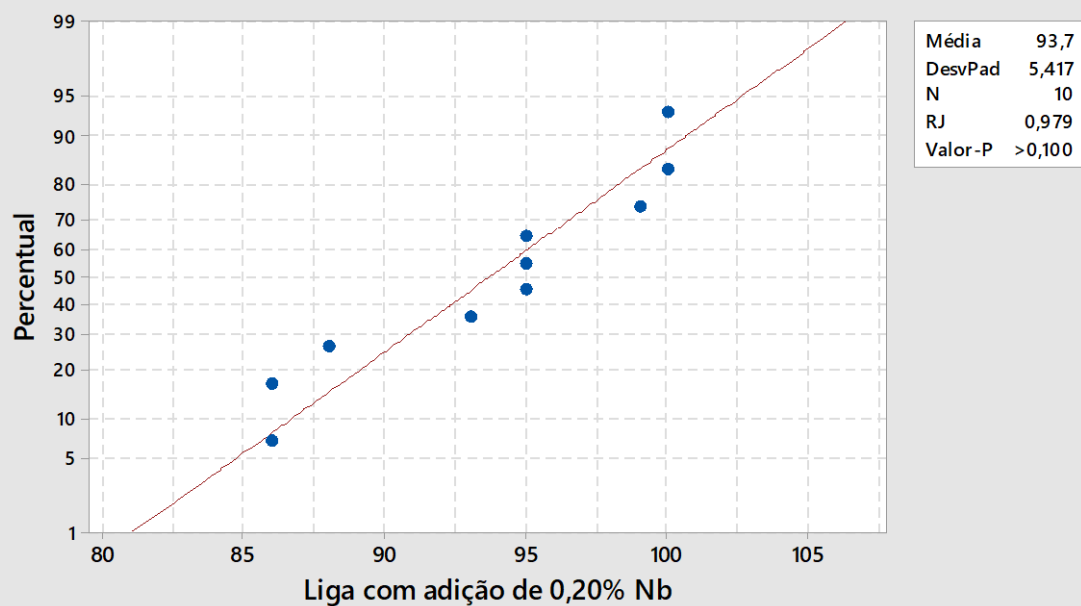
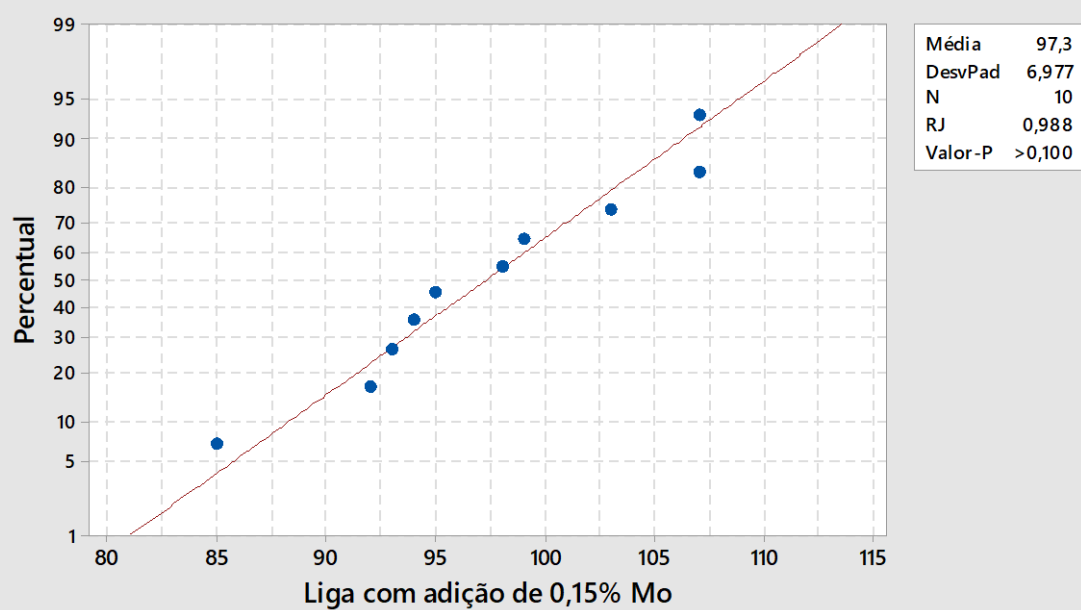


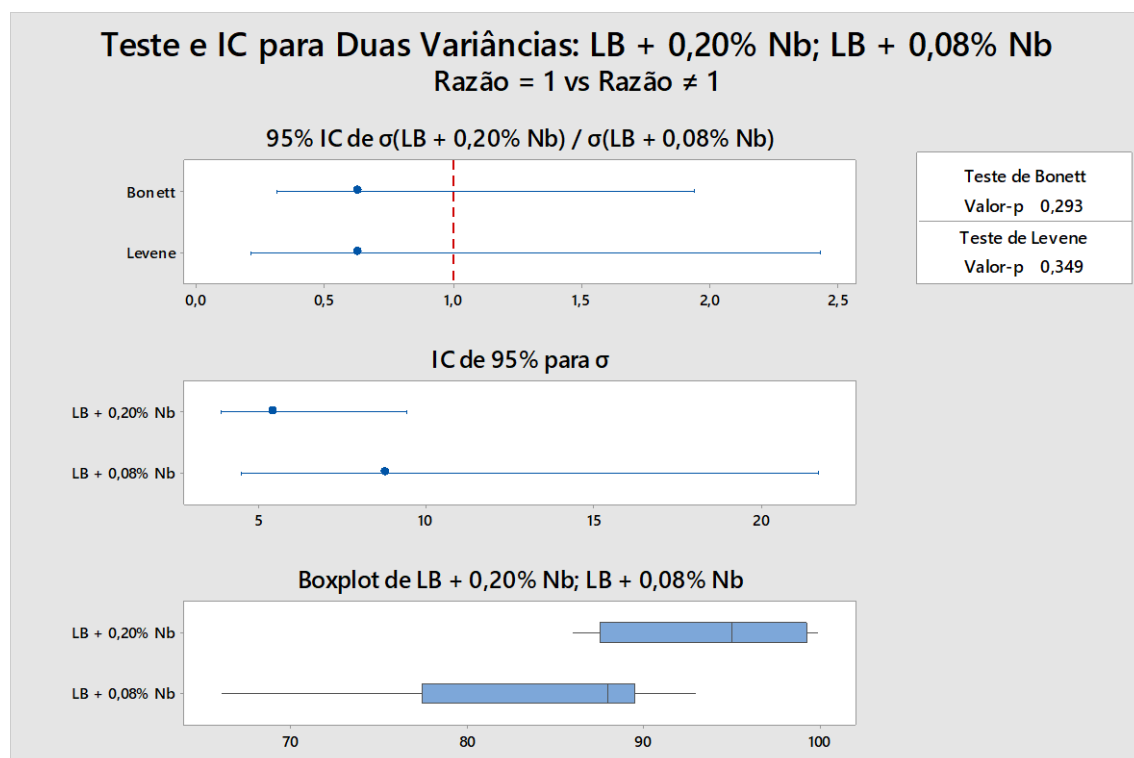
Gráfico de Probabilidade de Liga com adição de 0,15% Mo
Normal



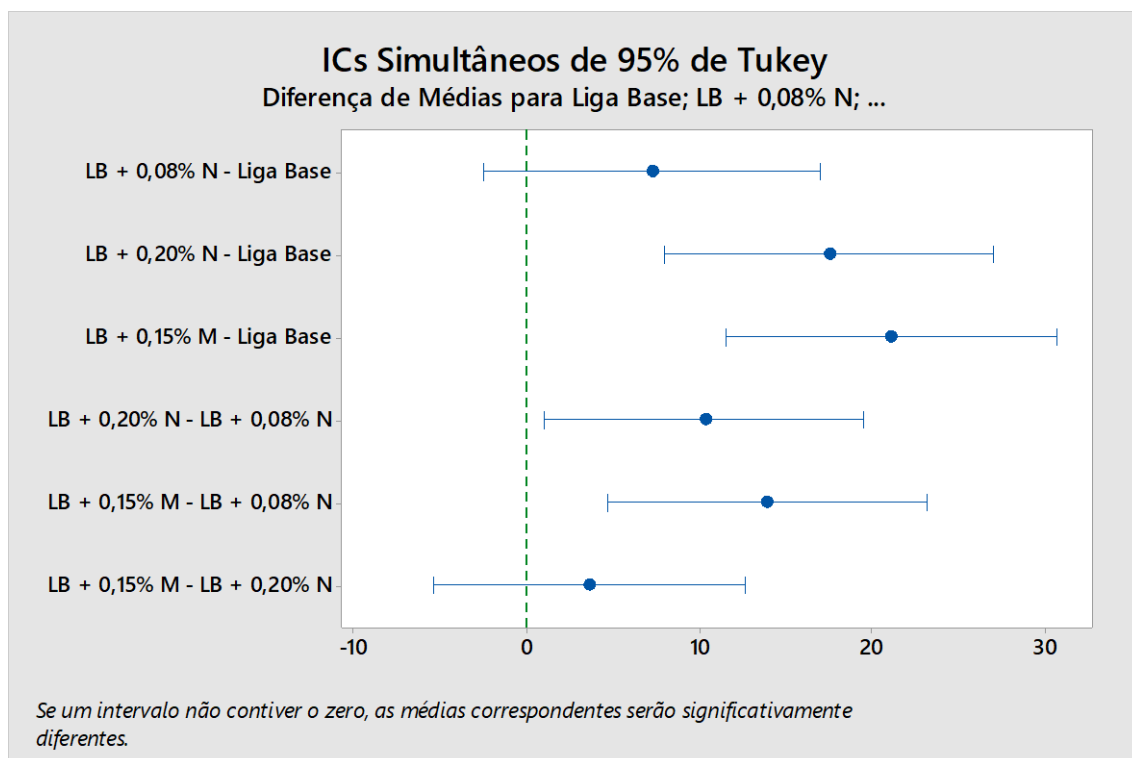
Estatísticas

Variável	Variância
Liga Base	73,36
LB + 0,08% Nb	76,28
LB + 0,20% Nb	29,34
LB + 0,15% Mo	48,68

TESTE DE VARIÂNCIA A 680°C



TESTE DE TUKEY A 680°C



Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%.

Fator	N	Média	Agrupamento
LB + 0,15% Mo	10	97,30	A
LB + 0,20% Nb	10	93,70	A
LB + 0,08% Nb	9	83,44	B
Liga Base	8	76,25	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.