



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



RODRIGO BARBOSA CÁRIA GABRIEL

**MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA DA OPERAÇÃO DE
TORNEAMENTO DE UM FERRO FUNDIDO CINZENTO NO
SOFTWARE ADVANTEDGE®**

**OURO PRETO - MG
2021**

RODRIGO BARBOSA CÁRIA GABRIEL

rodrigo.gabriel@aluno.ufop.edu.br

**MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA DA OPERAÇÃO DE
TORNEAMENTO DE UM FERRO FUNDIDO CINZENTO NO
SOFTWARE ADVANTEDGE®**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Bárbara Cristina Mendanha Reis

Professor coorientador: DSc. Vinícius Carvalho Teles

**OURO PRETO – MG
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G118m Gabriel, Rodrigo Barbosa Caria .
Modelagem e análise numérica da operação de torneamento de um
ferro fundido cinzento no software advantedge ®. [manuscrito] / Rodrigo
Barbosa Caria Gabriel. - 2021.
60 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Barbara Cristina Mendanha Reis.
Coorientador: Prof. Dr. Vinicius Carvalho Teles.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Torneamento. 2. Ferro Fundido - Cinzento. 3. Método dos
Elementos Finitos. 4. Simulação. I. Reis, Barbara Cristina Mendanha. II.
Teles, Vinicius Carvalho. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV.
Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

RODRIGO BARBOSA CÁRIA GABRIEL

Modelagem e análise numérica da operação de torneamento de um ferro fundido cinzento no *software* AdvantEdge®

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 09 de agosto de 2021

Membros da banca

Doutora - Profª. Bárbara Cristina Mendanha Reis - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Prof. Vinicius Carvalho Teles- Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Anderson Júnior dos Santos - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sudeste de Minas Gerais Campus Muriaé
Doutor - Washiington Luís Vieira da Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Bárbara Cristina Mendanha Reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/08/2021



Documento assinado eletronicamente por **Bárbara Cristina Mendanha Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2021, às 16:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0205617** e o código CRC **AF4EE75F**.

A minha família pelo apoio incondicional.

A meus amigos pela companhia.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Antônio e Cristina pelo apoio incondicional e por terem sempre acreditado em mim.

À minha tia Maria José e minha avó Célia por todo o carinho e confiança.

Ao meu irmão Daniel, minha prima Júlia e meu primo Lucas por todo o carinho e incentivo.

À minha parceira de vida Beatriz por todo o apoio e motivação.

À minha orientadora Bárbara, pela paciência, ajuda e incentivo nesse trabalho.

À todos os professores, funcionários e colegas da UFOP que contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho.

RESUMO

GABRIEL, R.B.C. Modelagem e análise numérica da operação de torneamento de um ferro fundido cinzento. 2021. Monografia. (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

Estudos de formação de cavaco de um determinado processo, a fim de se obter os melhores parâmetros de corte, são de custos elevados além de demandar muito tempo para serem realizados. Nesse cenário, uma alternativa é a simulação numérica. No entanto, para a realização desse estudo para qualquer processo de fabricação é necessário o entendimento de muitas variáveis envolvidas no processo de corte. Dessa forma, essa pesquisa se realizou a partir de uma concisa revisão bibliográfica que esclareceu conceitos atrelados a propriedades dos ferros fundidos, torneamento e simulação de torneamento. Esse trabalho teve como objetivo modelar numericamente, pelo do método dos elementos finitos, o processo de torneamento, por meio de um corte ortogonal, um Grey Iron ASTM A48 Class 30, disponível no *software* AdvantEdge®, a partir dos seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte (v_c) 240, 360 e 480 m/min, avanço (f) de 0,25 e 0,50 mm/rev e ferramentas de corte com e sem quebra-cavaco. As simulações foram realizadas no programa comercial AdvantEdge ® considerando os efeitos térmicos do processo originados a partir da deformação do material e do atrito existente entre a peça-cavaco-ferramenta. Os resultados obtidos numericamente foram comparados aos resultados experimentais de Reis (2021). Os resultados da temperatura do cavaco simulada foram distintos das temperaturas experimentais, ao nível de 5% de significância, no entanto, essa diferença foi em média 10,7%, fato que permitiu validar os resultados desse modelo. As menores temperaturas encontradas na modelagem numérica foram justificadas à luz da menor tensão limite de resistência do Grey Iron ASTM A48 Class 30 em relação aos corpos de prova estudados por Reis (2021). De maneira geral, as maiores temperaturas do cavaco foram encontradas para os maiores valores de v_c , f e ferramenta sem quebra-cavaco. Por fim, os resultados numéricos para a força de corte apresentaram erro médio de cerca de 20%, o que invalidou o modelo proposto.

Palavras-chave: Torneamento, Ferro Fundido Cinzento, Método dos Elementos Finitos, Simulação.

ABSTRACT

GABRIEL, R.B.C. *Modeling and numerical analysis of the gray cast iron turning operation*. 2021. Thesis. (Mechanical Engineering). Federal University of Ouro Preto.

Chip formation studies of a given process, in order to obtain the best cutting parameters, are costly and require a long time to be carried out. In this scenario, an alternative is numerical simulation. However, to carry out this study for any manufacturing process it is necessary to understand many variables involved in the cutting process. Thus, this research was carried out from a concise bibliographical review that clarified concepts linked to the properties of cast iron, turning and turning simulation. This work aimed to numerically model, by the finite element method, the turning process, through an orthogonal cut, a Gray Iron ASTM A48 Class 30, available in the AdvantEdge® software, from the following cutting parameters: speed cutting speed (vc) 240, 360 and 480 m/min, feed (f) of 0.25 and 0.50 mm/rev and cutting tools with and without a chipbreaker. The simulations were carried out in the commercial AdvantEdge® program considering the thermal effects of the process originated from the deformation of the material and the friction between the piece-chip-tool. The results obtained numerically were compared to the experimental results of Reis (2021). The simulated chip temperature results were different from the experimental temperatures, at the 5% significance level, however, this difference was on average 10.7%, a fact that allowed us to validate the results of this model. The lowest temperatures found in the numerical modeling were justified in light of the lower ultimate tensile strength of the Gray Iron ASTM A48 Class 30 in relation to the specimens studied by Reis (2021). In general, the highest chip temperatures were found for the highest values of vc, f and tool without a chipbreaker. Finally, the numerical results for the cutting force showed an average error of about 20%, which invalidated the proposed model.

Key-words: Turning, Gray Cast Iron, Finite Element Method, Simulation.

LISTA DE SIMBOLOS

v_c	Velocidade de corte
(f)	Avanço
(a_p)	Profundidade de usinagem
(F_u)	Força de usinagem
(F_f)	Força de avanço
(F_p)	Força passiva
(F_c)	Força de corte
γ_0	Ângulo de saída da ferramenta
α_0	Ângulo de folga da ferramenta

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de equilíbrio ferro-carbono.....	6
Figura 2: Reticulado cristalino da grafita em lamelas	12
Figura 3: Distribuição da grafita dos ferros fundidos cinzentos.....	12
Figura 4: Relação concentração de Nb em %p com a resistência à tração e a com a dureza...	15
Figura 5: Morfologia da grafita no ferro fundido cinzento.	16
Figura 6: Parâmetros de Usinagem.....	20
Figura 7: Exemplificação da formação de cavaco na liga de ferro fundido cinzento:	21
Figura 8: Decomposição das forças de usinagem.....	23
Figura 9: Malha 2D de elementos finitos	29
Figura 10: Partes de elementos finitos que compõe uma malha	29
Figura 11: Diferença entre superfície de verdade e uma malha de elementos finitos	30
Figura 12: Desenvolvimento do trabalho	33
Figura 13: Condições de contorno empregadas no modelo numérico proposto.....	33
Figura 14 - Simulação final do processo de torneamento 2D com ferramenta de corte sem quebra cavaco	39
Figura 15: simulação final do processo de torneamento 2D com ferramenta de corte com quebra cavaco	40
Figura 16: Distribuições de temperatura na interface cavaco/ferramenta no torneamento 2D com avanço 0,25 mm/rev e ferramenta de corte sem geometria de quebra cavaco com velocidades de corte: (a) 240 m/min; (b) 360 m/min; (c) 480 m/min	41
Figura 17: Distribuições de temperatura na interface cavaco/ferramenta no torneamento 2D com avanço 0,5 mm/rev e ferramenta de corte sem geometria de quebra cavaco com velocidades de corte: (a) 240 m/min; (b) 360 m/min; (c) 480 m/min	42
Figura 18: Distribuições de temperatura na interface cavaco/ferramenta no torneamento 2D com avanço 0,25 mm/rev e ferramenta de corte com geometria de quebra cavaco com velocidades de corte: (a) 240 m/min; (b) 360 m/min; (c) 480 m/min	43

Figura 19: Distribuições de temperatura na interface cavaco/ferramenta no torneamento 2D com avanço 0,50 mm/rev e ferramenta de corte com geometria de quebra cavaco com velocidades de corte: (a) 240 m/min; (b) 360 m/min; (c) 480 m/min	44
Figura 20: Influência da velocidade de corte nas temperaturas médias dos cavacos obtidos pelo modelo numérico	46
Figura 21: Influência do avanço nas temperaturas médias dos cavacos obtidos pelo modelo numérico	47
Figura 22: Influência da geometria do quebra cavaco nas temperaturas médias dos cavacos obtidos pelo modelo numérico	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características com relação ao tipo de grafita, principais propriedades e algumas aplicações dos ferros fundidos.....	8
Tabela 2: Composição química dos ferros fundidos cinzentos	10
Tabela 3: Efeitos de alguns elementos na estrutura do ferro fundido cinzento.....	11
Tabela 4 - Principais propriedades dos NbC em temperatura ambiente.....	17
Tabela 5: Testes de malha com velocidade de corte 240 m/min, avanço 0,25 mm/rev e ferramenta de corte com geometria sem quebra cavaco.....	34
Tabela 6: Variáveis e Indicadores	36
Tabela 7: Composição química dos corpos de prova (%peso).....	37
Tabela 8: Comparação de composições químicas experimentadas e simuladas (%peso).....	38
Tabela 9: Comparação das propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos utilizados por Reis (2021) com o utilizado na modelagem numérica.....	38
Tabela 10: Resultados das temperaturas médias experimentais do cavaco e as obtidas por MEF.....	45
Tabela 11: Informações de agrupamento usando Método de Tukey e 95% de confiança	46
Tabela 12: Resultados das forças de corte médias experimentais e as obtidas por MEF.....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Ferro Fundido	6
2.2	Ferro Fundido Cinzento.....	9
2.2.1	Influência da matriz microestrutural nos ferros fundidos cinzentos.....	10
2.2.2	Influência da velocidade de resfriamento dos ferros fundidos cinzentos.....	13
2.2.3	Principais propriedades dos ferros fundido cinzentos e aplicações.....	14
2.3	Nióbio em Ferro Fundido Cinzento.....	15
2.4	Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento.....	18
2.4.1	Torneamento e o processo de formação de cavaco do ferro fundido cinzento...	19
2.4.2	Temperatura de usinagem.....	22
2.4.3	Forças de usinagem e suas componentes.....	23
2.5	Simulação de usinagem	25
2.5.1	Elementos Finitos	28
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	Tipos de Pesquisa	31
3.2	Materiais e Métodos	32
3.3	Variáveis e Indicadores	35
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	36
3.5	Tabulação de Dados.....	36
3.6	Considerações Finais do Capítulo	36
4	RESULTADOS	37
4.1	Características do material modelado.....	37
4.2	Método de elementos finitos para a temperatura do cavaco.....	39
4.3	Método de elementos finitos para a força de corte.....	48

5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	51
5.1	Conclusão	51
5.2	Recomendações	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Segundo Souza (2012), as características dominantes do campo industrial de fundição são o uso abundante de mão-de-obra e a utilização de matérias primas de origem nacional, o que confere ao setor uma dependência apenas do mercado interno e uma importância extra. De acordo com a Associação Brasileira de Fundição – ABIFA (2021), o ramo empregou, em março de 2021, cerca de 60,1 mil brasileiros e finalizou o ano de 2020 com, aproximadamente, 1100 empresas de fundição.

Para Souza (2012), a indústria de fundição gera peças nas mais variadas ligas, a saber: aços, ligas de magnésio, ligas de cobre, ferros fundidos, por exemplo. Este último grupo, foi definido por Chiaverinni (1990) como uma liga ternária de ferro-carbono-silício (Fe-C-Si) que possui um teor de carbono acima de 2,0% apresentando parte desse carbono livre, na forma de grafita. Os ferros fundidos podem apresentar também outros elementos como o manganês, fósforo, enxofre além de cromo, níquel, Cobre em quantidades residuais ou especiais (SOUZA, 2012).

Os ferros fundidos representam o segundo material metálico mais utilizado em todo o mundo (ELORZ; GOLZÁLEZ E VERDEJA, 2018) e refletem cerca de 80% da produção total da indústria de fundição do Brasil (ABIFA, 2011). Com relação à produção brasileira de fundidos, o ferro fundido cinzento representa aproximadamente 57% de toda essa produção (MODERN CASTING STAFF REPORT, 2018).

Conforme Souza (2019) e Chiaverinni (1990), a classe mais comum e utilizada dos ferros fundidos são os ferros fundidos cinzentos. Tais fatos podem ser justificados à luz do custo relativamente baixo, da elevada fluidez na fundição, da boa usinabilidade, da facilidade de fabricação, da boa resistência à compressão e corrosão e da boa capacidade de amortecimento. Nesse sentido, os autores acrescentam que essas características tornam o material excelente para a utilização em bases de máquinas, polias, cabeçote de cilindros, motores elétricos, entre outros.

Souza (2012) explica que no setor de fundidos, o aumento da procura de materiais novos está diretamente relacionado com o custo do próprio material e com a melhor relação eficiência/peso que o material pode proporcionar. Na tentativa de atingir determinadas exigências em relação as propriedades do material para determinada aplicação, pode-se

utilizar materiais novos com densidade mais baixa e resistência parecida, ou, tentar obter as propriedades através de elementos de liga ou de tratamentos térmicos em ligas tradicionais (SOUZA, 2012).

Adicionar elementos de liga como o cromo, o nióbio, o vanádio e o molibdênio têm apresentado resultados de formação e estabilização de carbonetos em ligas de ferros fundidos cinzentos (BERNS e THEISEN, 2008). Vale destacar o nióbio, elemento de liga utilizado no material de estudo de Reis (2021), cujos resultados experimentais serão utilizados para comparação com o modelo numérico desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso. Este elemento pode causar mudanças na microestrutura do ferro fundido cinzento, tais como refinamento do espaçamento interlamelar da perlita, da grafita e das células eutéticas (NYLÉN, 2001). Tais modificações podem conferir a esse material aumento da dureza, do limite de resistência à tração e ao desgaste (MOHRBACHER E ZAI, 2011).

Cervelin (2009) explica que os produtos obtidos por processos de manufatura como a fundição, na maior parte das vezes, não alcançam as tolerâncias, o acabamento necessário ou até mesmo a forma final para que possam ser devidamente utilizados e comercializados. Para resolver esse problema, é necessário processar os produtos em questão novamente, geralmente por meio de um processo de usinagem (CERVELIN, 2009). E, conforme Childs *et al.* (2000), para a obtenção de peças metálicas, entre os tipos de processos de usinagem, o torneamento é um dos processos mais utilizados na indústria.

Oden e Reddy (2011), ao tratar de processos de usinagem de peças por meio de ligas, relataram que há diversas técnicas analíticas de estudo em que modelos podem resolver, de forma aproximada, as equações que governam esses processos. Os autores complementam que uma das melhores ferramentas para simular diferentes questões de engenharia, seja processos de fabricação, mecânicas dos sólidos ou fluidos, transferência de calor, entre outros é o método dos elementos finitos (MEF).

Quando a simulação é utilizada em processos de usinagem, Almeida (1998) explica que a mesma permite ao programador estudar a trajetória que será executada pela ferramenta além de possibilitar a análise de falhas que podem ocorrer durante o processo. Ademais, essa técnica contribui para a otimização dos processos de fabricação propriamente ditos, seja pela redução de custos, pelo aumento de produtividade e/ou pela qualidade do produto. Em vista da circunstância evidenciada indaga-se:

Como simular método de elementos finitos o processo de torneamento, com parâmetros pré-definidos, de ferro fundido cinzento comparando com os resultados experimentais obtidos por Reis (2021)?

1.2 Justificativa

Estima-se que, somente nos Estados Unidos, o valor gasto por ano em usinagem ultrapassa 100 bilhões de dólares (CERVELIN, 2009). O que mostra a relevância deste processo para a economia e justifica o estudo e qualquer outro estudo realizado objetivando a melhoria do processo. Entretanto, o aumento da preocupação com o ambiente, a economia do consumo de energia, a grande quantidade de matérias-primas, de fluidos lubrificantes e de refrigerantes utilizados também estimulam esses estudos (CERVELIN, 2009).

Segundo Belhadi *et al.* (2005), grande parte das pesquisas tem como intuito aperfeiçoar a taxa de remoção de material e reduzir os custos de produção. Para isso, máquinas com maior potência e de maior robustez foram desenvolvidas, entretanto, mesmo com máquinas melhores, algumas características do produto como a integridade e qualidade superficial e as tolerâncias dimensionais costumam não ser alcançadas durante o processo de usinagem. Ainda conforme o autor, a escolha de parâmetros de usinagem adequados, a exemplo, a velocidade de corte e de avanço e a profundidade de usinagem, podem promover a melhoria dessas características. O problema é que a escolha dos parâmetros corretos para tal é uma tarefa difícil, porque além deles, fatores como tratamento térmico, pré-usinagem, material e geometria da ferramenta de corte e material da peça também interferem de forma direta no processo de usinagem.

O estudo da formação de cavacos por meio de uma abordagem experimental em processos de usinagem é de custo elevado e é necessário muito tempo quando se leva em conta a grande gama de parâmetros envolvidos (MACKERLE, 2003). Em frente a essas questões, Pantalé *et al.* (2004) explicam que muitas pesquisas foram iniciadas em busca de modelos analíticos e numéricos que conseguissem gerar respostas satisfatórias à tal estudo. Entre essas técnicas, vale destacar o MEF em razão da sua capacidade de resolver problemas não-lineares (SOO; ASPINWALL, 2007) e de reproduzir, como função da tensão, da temperatura e da taxa de deformação, as propriedades dos materiais (NG; ASPINWALL, 2002).

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Simular, por meio do método dos elementos finitos, o processo de formação de cavacos no torneamento do ferro fundido cinzento, *Grey Iron ASTM A48 Class 30*, disponível na biblioteca do *software* AdvantEdge®, a partir de diferentes velocidades de corte (240, 360, 480 m/min), avanços (0,25 e 0,50 mm/rev), geometrias de quebra-cavaco (com e sem) e profundidade de usinagem fixada em 1mm.

1.3.2 Específicos

- Estabelecer um breve quadro conceitual e teórico do trabalho a respeito da modelagem numérica do torneamento de ferro fundido cinzento;
- Modelar o torneamento do ferro fundido cinzento, *Grey Iron ASTM A48 Class 30*, conforme parâmetros de cortes e condições descritas no objetivo geral no *software* AdvantEdge®;
- Verificar a distribuição da temperatura no cavaco via simulação para as operações de torneamento estudadas;
- Obter as forças de usinagem via simulação para as operações de torneamento estudadas;
- Comparar os resultados simulados com os resultados experimentais expostos por Reis (2021).

1.4 Estrutura do Trabalho

Para a análise desses objetivos (geral e específicos) e garantia que eles sejam atingidos, o trabalho está estruturado conforme descrito a seguir:

➤ Capítulo 2. Revisão Bibliográfica: apresenta o levantamento bibliográfico sobre o ferro fundido com ênfase no cinzento e no uso de nióbio, assim como as características de seu torneamento e trabalhos que utilizaram a simulação.

➤ Capítulo 3. Metodologia: apresenta os materiais, equipamentos e métodos empregados na parte experimental deste trabalho.

- Capítulo 4. Resultados e Discussão: apresenta os resultados à luz da revisão bibliográfica.
- Capítulo 5. Conclusões: apresenta as principais conclusões do presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferro Fundido

Francklin (2009) informou que o ferro fundido foi conhecido por volta de 500 (d.C.) e passou a ser comercializado em 1388. Para Elliott (1998), o termo “ferro fundido” é genérico e usado para as ligas ternárias compostas por ferro, carbono e silício (Fe-C-Si), contendo impurezas em quantidades menores que 0,1% e, constantemente, elementos de liga em quantidades maiores que 0,1%, podendo ser empregado na condição de fundição ou em seguida a um tratamento térmico. As adições de elementos de liga e os tratamentos térmicos realizados nessas ligas ferro-carbono permitiram sua utilização em aplicações que eram destinadas apenas aos aços (CHIAVERINNI, 1990). Alguns exemplos de aplicações dos ferros fundidos são: carcaças de máquinas, discos de freios, dutos e tubulações e afins.

O ferro fundido apresenta teor de carbono maior que 2,0% e o silício varia entre 0,5 a 3% (CHIAVERINNI, 1990). Na Figura 1 foi exemplificado um diagrama ferro carbono (Fe-C) de forma a tratar as transformações em equilíbrio de fases desse material.

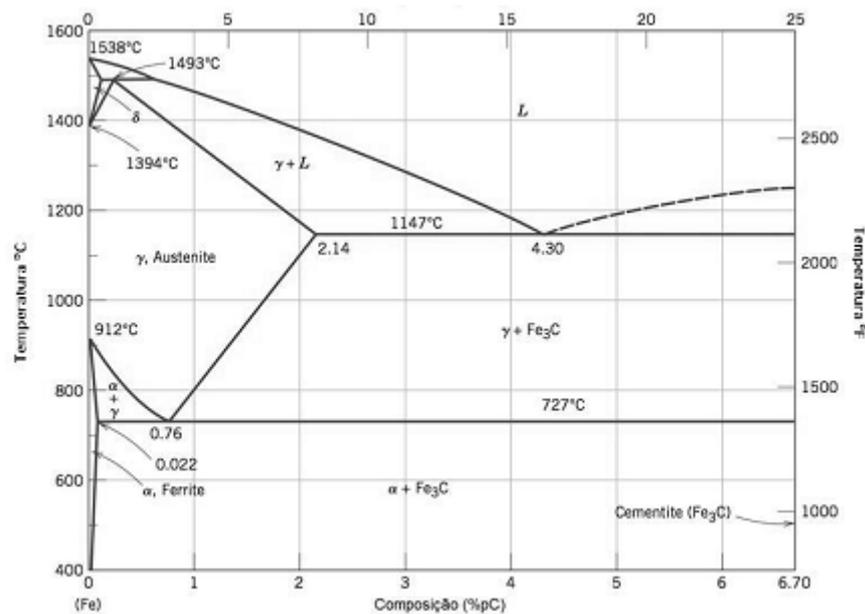


Figura 1: Diagrama de equilíbrio ferro-carbono.
Fonte: Callister (2007)

Na Figura 1 observa-se que o ferro puro, quando aquecido, passa por duas mudanças em sua estrutura cristalina antes de fundir. A sua forma estável, em temperatura ambiente, é conhecida por ferrita, ou ferrita α , fase macia e dúctil que possui uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). A primeira transformação polimórfica que o ferro experimenta, à temperatura de 912°C, é a de se tornar austenita, também conhecida como ferro γ , fase

importante para o tratamento térmico dos aços que possui estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) que se mantém estável até 1394°C. Nessa temperatura a estrutura CFC retorna à fase com estrutura CCC, nomeada por ferrita δ , idêntica à ferrita α , porém estável apenas em temperaturas mais elevadas. No fim do eixo das composições, em 6,7% de carbono em peso, é formado o carboneto de ferro, nomeado cementita (Fe_3C), composto intermetálico duro e frágil. Sua formação ocorre quando é ultrapassado o limite de solubilidade do carbono na ferrita α , principalmente em temperaturas menores que 727°C. A perlita é um constituinte gerado a partir de duas fases: ferrita (α) e cementita (Fe_3C) e, mecanicamente, possui propriedades intermediárias entre a ferrita e a cementita. A grafita é o carbono originado pela decomposição da cementita em ferro α e carbono na forma de grafite. Por fim, para composições geradas entre 6,7 e 100% de carbono em peso tem-se grafite puro (CALLISTER, 2008).

Goodrich (2003) ressaltou que a resistência mecânica da grafita é muito baixa pelo fato de exercer um efeito de concentração de tensões, de forma que, sob a ótica de propriedades mecânicas, a sua existência é comparada como uma descontinuidade na matriz.

Ainda de acordo com a Figura 1, Colpaert e Costa (2008) explicaram que a liga com 4,3% de carbono está localizada no ponto de transição eutético e, portanto, é a mais fácil de ser fundida. À medida em que ocorre a elevação do teor de carbono até 4,3% (ponto eutético), há uma diminuição da temperatura de fusão desse material. Contudo, ultrapassando o limite de 4,3% de carbono, haverá novamente um aumento dessa temperatura de fusão.

Chiaverinni (1990) explicou que a velocidade de resfriamento pode influenciar diretamente a microestrutura do ferro fundido. Por exemplo, em sessões mais espessas essa velocidade é lenta se comparada a sessões mais finas, a consequência disso é que em sessões mais finas, como essa velocidade é maior, não há tempo para que ocorra a decomposição da cementita, de forma que, dependendo do teor de silício e carbono, pode ocorrer pouca ou nenhuma grafitização. Já nas sessões mais espessas, em que as velocidades de resfriamento são mais demoradas, acontece a grafitização, dependendo da quantidade de silício. O autor ressaltou que a velocidade de resfriamento não afeta somente a grafitização, mas também o tamanho dos veios de grafita. Velocidades mais baixas resultam em veios grosseiros de grafita, velocidades médias entregam tamanhos normais e, por fim, velocidades altas geram veios finos.

Outro fator que influencia a determinação da estrutura do ferro fundido é a composição química (CHIAVERINNI, 1990). No tópico 2.2, esse tema será abordado para o ferro fundido cinzento, foco de estudo desse trabalho.

Afim, de classificar os diferentes tipos de ferros fundidos, Guessser (2009) classificou-os em cinco famílias distintas a partir de distintos critérios: (i) forma da grafita (ferro fundido nodular, ferro fundido vermicular); (ii) aspecto da fratura (ferro fundido cinzento, ferro fundido branco) e (iii) propriedade mecânica importante (ferro fundido maleável). Na Tabela 1 foram relacionadas essas famílias de ferro fundido destacando-se tipo de grafita e matriz metálica, propriedades mecânicas e/ou térmicas e algumas aplicações.

Tabela 1: Características com relação ao tipo de grafita, principais propriedades e algumas aplicações dos ferros fundidos

Classificação	Característica com relação ao tipo de grafita e matriz	Principais Propriedades	Aplicações
Cinzento	Grafita lamelar com orientação aleatória.	Alta Resistência Mecânica à compressão. Resistência ao desgaste.	Discos e tambores de freios, polias, carcaças.
	Matriz perlítica e/ou ferrítica.	Boa capacidade de amortecimento.	
Nodular	Grafita em forma de nódulos.	Alta Resistência Mecânica Resistência ao desgaste.	Virabrequins, engrenagens, eixos de comandos de válvulas.
	Matriz perlítica e/ou ferrítica.	Alta resistência à fadiga de contato Alta ductilidade Resistência à variação cíclica de temperatura	
Maleável	Grafita em forma de nódulos irregulares.	Baixa dureza	Correntes, rodas dentadas, bielas.
	Matriz perlítica, ferrítica ou de martensita revenida.	Alta ductilidade	
Vermicular	Grafita em forma de vermes conectados.	Meio termo entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular	Blocos e quadros de motores a diesel, geradores de energia, carcaças de bomba.
	Matriz ferrítica e/ou perlítica.		
Branco	Matriz ferrítica, perlítica austenítica, martensítica ou combinado entre os tipos citados.	Alta dureza	Aplicações de moagem e bolas de moagem
		Elevada resistência ao desgaste	

Fonte: Adaptado de Chiaverinni (1990) e Guessser (2009)

As diferenças de propriedades, representadas na Tabela 1, se resumem, basicamente, à forma que o carbono foi precipitado e a microestrutura da matriz (GUESSER, 2009). O mesmo autor explicou que os veios de grafita podem ser concentradores de tensões na matriz

devido à sua baixa resistência mecânica, apesar disso, se a grafita estiver em forma de veios, contribuirá para boa condutividade térmica, bom amortecimento das vibrações e boa usinabilidade (Tabela 1). Já a presença de carbonetos está diretamente relacionada à elevação de dureza e resistência à abrasão. A partir disso, Pereira (2012) concluiu que a classe dos ferros fundidos é constituída por materiais com diversas combinações de propriedades, entretanto, em cada classe de ferros fundidos haverá propriedades que são melhores e outras com comportamento oposto.

O material analisado neste trabalho é um ferro fundido cinzento. Dessa maneira, apresenta-se um breve embasamento sobre ferro fundido em um contexto geral.

2.2 Ferro Fundido Cinzento

Conforme Askeland *et al.* (2011), o ferro fundido cinzento (FC) é, entre os ferros fundidos, o mais empregado e é assim denominado devido à sua cor cinzenta na superfície de fratura. Ribeiro (2013) acrescentou que sua utilização é justificada devido ao seu baixo custo e à facilidade de produção por conta da elevada fluidez durante a fundição, o que permite o preenchimento de moldes com geometria complexa e mais finos.

Oliveira (2017) e Vidal (2013) apresentaram as propriedades dos ferros fundidos cinzentos que se destacam, a saber: (i) baixo ponto de fusão se comparado com outras ligas de ferro-carbono, principalmente os aços; (ii) boa usinabilidade, o que implica em uma maior durabilidade das ferramentas de usinagem, em comparação a outros ferros fundidos como o vermicular e o nodular ou aços com baixo teor de carbono; (iii) moldagem praticável em areia a base de sílica, de baixo custo comparadas à areias utilizadas em moldagem de aços; (iv) baixa resistência mecânica se comparado aos outros ferros fundidos; (v) resistência ao desgaste diretamente relacionada à quantidade de perlita presente na microestrutura; (vi) boa capacidade de amortecimento de vibrações comparado aos demais ferros fundidos; e (vii) boa condutividade térmica comparada aos outros ferros fundidos.

Colpaert (2008) justificou as diversas aplicações dos ferros fundidos cinzentos devido às suas características mecânicas, a saber: peças e mesas sujeitadas a solicitações térmicas tal qual discos de freio e blocos de motor, máquinas operatrizes como barramentos. Outras aplicações segundo a ASM (1990) são: pequenos blocos de cilindros, cabeças de cilindros, placas de embreagem, caixas de engrenagem, volantes de automóveis de passageiros e caminhões leves, entre outros.

Para a compreensão das propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzentos, é importante que se entenda a formação da microestrutura nesses materiais (REIS, 2021). Chiaverini (1990) categorizou a composição química e a velocidade de resfriamento como os fatores de maior importância na determinação da estrutura dos ferros fundidos. No próximo tópico, estes conceitos serão relacionados brevemente.

2.2.1 Influência da matriz microestrutural nos ferros fundidos cinzentos

Na Tabela 2, a seguir, foram apresentadas as faixas da composição química típica dos ferros fundidos cinzentos:

Tabela 2: Composição química dos ferros fundidos cinzentos

C	Si	Mn	P	S
2,5 a 4,0%	1,0 a 3,0%	0,2 a 1,0%	0,02 a 1,0%	0,02 a 0,25%

Fonte: Chiaverinni (1990)

Conforme a Tabela 2 e segundo Chiaverinni (1990) os elementos com maior influência na estrutura dos ferros fundidos cinzentos são o carbono e o silício: o primeiro define a quantidade de grafita que pode ser gerada enquanto o segundo é o elemento que mais favorece a decomposição da cementita e, portanto, a grafitização. O manganês, ao contrário do silício, estabiliza a cementita, contrabalanceando a ação grafitizante gerada por esse elemento. O fósforo é um bom estabilizador da cementita, entretanto, ele, juntamente ao enxofre formam o sulfeto de manganês (MnS), o qual favorece a nucleação da grafita e, conseqüentemente, favorece a usinabilidade do material. Ademais, na Tabela 3, foram sumarizados os efeitos de alguns elementos quando presentes na estrutura do ferro fundido cinzento.

Tabela 3: Efeitos de alguns elementos na estrutura do ferro fundido cinzento

Elemento	Efeitos durante a solidificação	Efeito durante a reação eutetóide
Alumínio	Forte grafitizante	Promove a formação da ferrita e grafita
Antimônio	Nas quantidades usadas, pequeno efeito	Forte estabilizador da perlita
Boro, até 0,15%	Forte grafitizante	Promove a formação da grafita
Boro, acima de 0,15%	Estabilizados do carboneto	Forte tendência à retenção da perlita
Cromo	Forte ação carbonetante. Forma carbonetos complexos muito estáveis	Forte tendência à formação de perlita
Cobre	Grafitizante Fraco	Promove a formação de perlita
Manganês	Fraca tendência carbonetante	Formador de perlita
Molibdênio	Fraca tendência carbonetante	Forte formador de perlita
Níquel	Grafitizante Fraco	Fraco promotor de perlita
Silício	Forte grafitizante	Promove a formação de ferrita e grafita
Telúrio	Forte tendência carbonetante, mas não estabilizadora	Muito fraco estabilizador da perlita
Estanho	Pequeno efeito na quantidade usada	Forte tendência à retenção da perlita
Titânio até 0,25%	Grafitizante Fraco	Promove a formação de grafita
Vanádio	Forte tendência carbonetante	Forte formador da perlita

Fonte: Chiaverinni (1990)

Segundo Guesser (2009) os ferros fundidos cinzentos possuem a grafita na forma de veios ou de lamelas. Chiaverinni (1990) e Hanna (2011) explicaram que o tamanho e a distribuição da grafita são controlados pela composição química da liga, pela taxa de resfriamento que ocorreu durante o processo de fundição e pela quantidade em peso de carbono.

O reticulado cristalino da grafita é do tipo hexagonal (Figura 2). Segundo Souza Santos e Castello Branco (1991), nas ligas de Fe-C-Si, a grafita cresce no sentido dos planos basais, na direção *c*. Entretanto, a existência de elementos tensoativos, a exemplo o oxigênio e o enxofre, modificam essa direção de crescimento. Esses elementos se depositam nos planos prismáticos fazendo a grafita crescer na direção *a*, explicando o crescimento da grafita lamelar no ferro fundido cinzento.

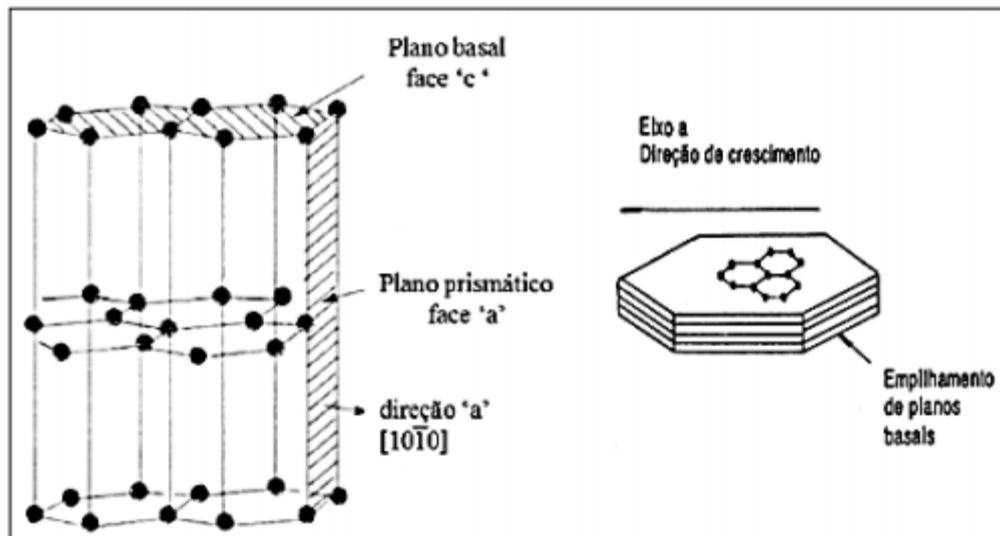


Figura 2: Reticulado cristalino da grafita em lamelas
Fonte: Souza (1991)

As classificações das distribuições da grafita existentes nos ferros fundidos cinzentos, foram ilustradas na Figura 3.

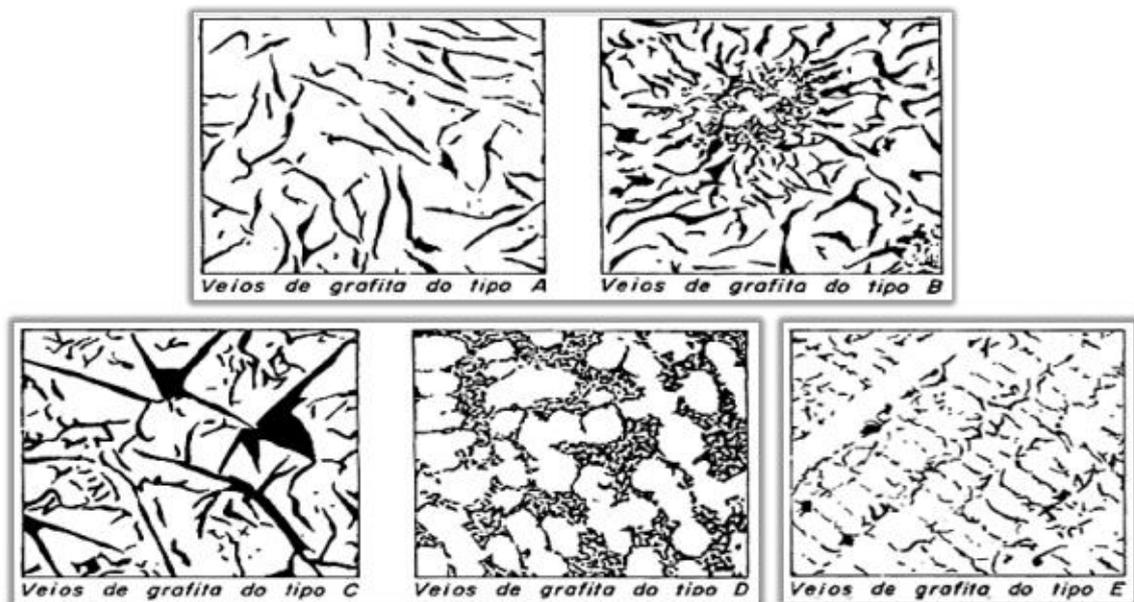


Figura 3: Distribuição da grafita dos ferros fundidos cinzentos
Fonte: ASTM A 48 (1965)

Oliveira (2017) explicou que a distribuição do tipo A representa uma distribuição uniforme e aleatória sendo a distribuição em especificações dos produtos que requerem a associação de condutividade térmica, amortecimento de vibrações e resistência mecânica. Na grafita com distribuição B, ocorre a formação de rosetas com um esqueleto formado por grafita fina e borda de grafita grosseira, resultando em ferros fundidos cinzentos com baixo limite de resistência à tração. A grafita com distribuição do tipo C possui características intermediárias entre A e B, sendo típica de ferros fundidos cinzentos hipereutéticos. As

grafitas com distribuição do tipo D e E estão associadas a ferros fundidos cinzentos com baixos teores de carbono, possuem orientação interdendrítica. As condições de crescimento associadas às distribuições D e E geralmente ocasionam veios finos de grafita mas dificultam a obtenção de uma microestrutura perlítica, fato que pode prejudicar o desempenho mecânico do ferro fundido cinzento. Dependendo da geometria da peça, distintas distribuições da grafita podem ser encontradas em uma mesma peça.

Mendas e Benayoun (2018) descreveram que a grafita livre adiciona características lubrificantes ao material, os autores observaram que o coeficiente de atrito, durante algum carregamento deslizante, é reduzido devido ao reticulado cristalino da grafita. Vidal (2013) acrescentou que a grafita na forma lamelar favorece boa condutividade térmica, propriedade essa que faz com que o ferro fundido cinzento possa ser usado em componentes sujeitos à fadiga térmica, como por exemplo, discos e freios tambores e cabeçotes de motor. Entretanto, flocos grosseiros de grafita acarretam propriedades como baixa resistência à tração e baixa ductilidade, o que limita a aplicação do ferro fundido cinzento (WEI, 2007).

Com relação a ferrita e a perlita na matriz, ambas podem modificar as propriedades do material (ABDOU *et al.*, 2018). Quando se trata do ferro fundido cinzento, Chiaverinni (1990) explicou que nas situações em que há a predominância da ferrita, a usinabilidade do material será melhor, em contrapartida sua resistência mecânica e ao desgaste serão prejudicadas. O mesmo autor complementou que na dominância da perlita a propriedade que se destacará será a resistência mecânica.

2.2.2 Influência da velocidade de resfriamento dos ferros fundidos cinzentos

A velocidade de resfriamento afeta de forma direta a estrutura do ferro fundido que será formado, como já explicado. Guessser (2009) detalhou que a formação do ferro fundido cinzento é favorecida com resfriamentos mais lentos, já resfriamentos mais rápidos tendem a formar o ferro fundido branco. Taxas de resfriamento mais altas produzem grafitas finas, velocidades médias produzem grafitas medianas e as velocidades baixas resultam em grafitas grosseira (CHIAVERINNI, 1990).

Segundo Guessser (2009), o resultado de partículas grosseiras é a concentração de tensão que facilita a nucleação e crescimento de trincas. O mesmo autor acrescentou que a velocidade de resfriamento pode ser reduzida com o aumento da espessura da peça e com a diminuição da condutividade térmica do molde e machos (molde de metal, conhecidos como coquilhas, extraem calor mais rapidamente que moldes de areia). Não sendo executado esse

controle da taxa de resfriamento da liga, as peças de ferro fundido cinzento que possuem, na maioria das vezes, formas complexas com espessura variável, tendem a apresentar propriedades mecânicas variadas ao longo de suas seções.

2.2.3 Principais propriedades dos ferros fundido cinzentos e aplicações

Hect (1996) tratou a propriedade de alta condutividade térmica do ferro fundido cinzento como uma das suas principais vantagens, e relatou que essa característica é permitida pela estrutura contínua das grafitas, que facilita a dissipação de calor.

Silva (2017) explicou que a eficiência do ferro fundido cinzento em dissipar calor gera uma diminuição do gradiente térmico das peças feitas por essa liga, o que melhora o desempenho em relação à fadiga térmica. O autor acrescentou que a morfologia da grafita lamelar explica a elevada eficiência, porque além da conectividade das lamelas, sua condutividade térmica é maior do que a da matriz perlítica ou ferrítica, além de ser maior em relação ao plano basal (Figura 2) do que em relação ao plano prismático.

Conforme Guessser (2009), a microestrutura dos ferros fundidos cinzentos os torna frágeis e menos resistentes em comparação aos demais ferros fundidos. Isso ocorre porque as pontas das lamelas de grafita servem como pontos de concentração de tensão. Entretanto, quando se trata de cargas compressivas essa liga apresenta maior resistência e ductilidade. Chiaverinni (1990) completou que como os veios de grafita não apresentam resistência mecânica, são como vazios na estrutura do material que permitem a deformação plástica da matriz ao redor desses veios, porém sob tensões nominais menores.

A boa usinabilidade do ferro fundido cinzento é função, principalmente, da presença da grafita e, também, como dito anteriormente, pela própria matriz ferrítica ou ferrítico-perlítica (CHIAVERINNI, 1990).

A presença de grafita livre adiciona ao material propriedades de lubrificação permitindo diminuir o atrito entre as partes em contato e, favorecendo a alta resistência ao desgaste (CHIAVERINNI, 1990). Conjuntamente à boa fundição e ao baixo custo, essas características enunciadas dos ferros fundidos cinzentos justificam sua utilização em elementos de máquinas sujeitos à fricção (MENDAS e BENAYOUN, 2018).

No presente trabalho, estudou-se a adição de nióbio ao ferro fundido cinzento. Por esta perspectiva, uma vez que explicado, brevemente, as microestruturas dos ferros fundidos cinzentos, variáveis do processo e as propriedades físicas e mecânicas que influenciam

diretamente o desempenho de um ferro fundido cinzento, torna-se oportuno enfatizar o efeito da adição desse elemento adicionado ao material desta pesquisa.

2.3 Nióbio em Ferro Fundido Cinzento

Sweden (2001) mencionou que as pesquisas mais importantes em relação a adição de nióbio em ferros fundidos, até a data de publicação do artigo, eram relacionadas a utilização em indústria automotiva (anéis para pistão, cabeçotes de cilindro, por exemplo). Entretanto, a adição de nióbio ainda não é totalmente dominada para esse material (BEDOLLA; JACUINDE, 2016). Chen *et al.* (1993) relatou que a adição de nióbio no ferro fundido cinzento, em percentuais baixos, de 0,01-0,5% em peso, confere melhoria de resistência mecânica para a liga.

Sweden (2001) adicionou nióbio em ferro fundido cinzento (teores inferiores à 0,5% em peso) e verificou mudanças nas precipitações de carbonetos de nióbio (NbC), na estabilidade da austenita, na microdureza e, também, no refino da estrutura grafitica. Segundo Mariani *et al.* (2020), os precipitados de NbC são uma fase dura na matriz de ferro fundido que podem colaborar para o aumento da resistência ao desgaste da liga. Na Figura 4 foi ilustrada a relação de concentração do nióbio em peso, o limite de resistência à tração e a dureza.

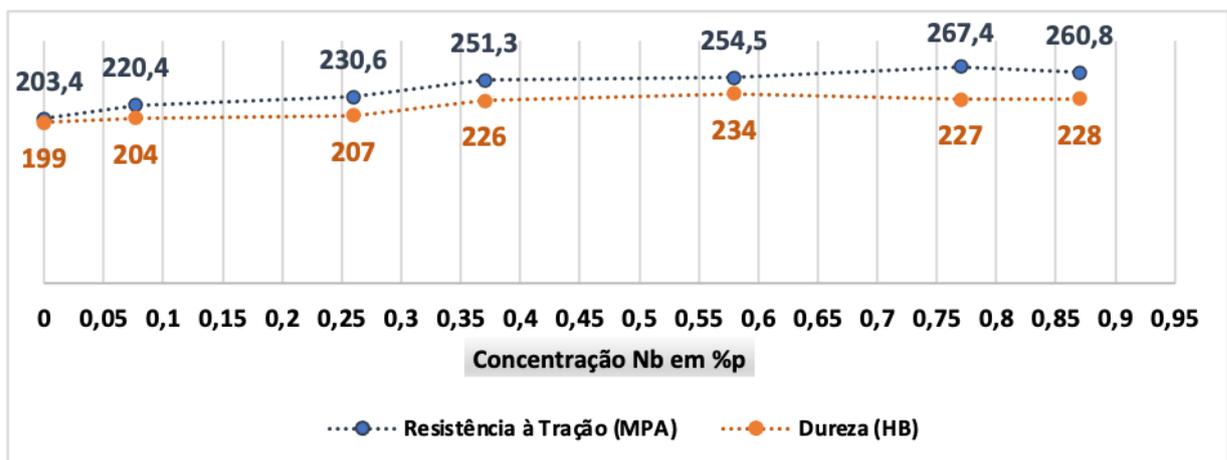


Figura 4: Relação concentração de Nb em %p com a resistência à tração e a com a dureza
Fonte: Adaptado de Sweden (2001)

A partir da Figura 4, percebe-se que com o aumento da quantidade de nióbio há o aumento do limite de resistência à tração e da dureza. Além disso Sweden (2001) ressaltou que, em relação à microestrutura gerada nos ferros fundidos cinzentos, a formação dos NbC ocorreu em temperaturas bastante elevadas.

Mohrbacher (2011) estudou e explicou a morfologia da grafita em ferro fundido cinzento para diferentes adições de nióbio conforme apresentado na Figura 5.

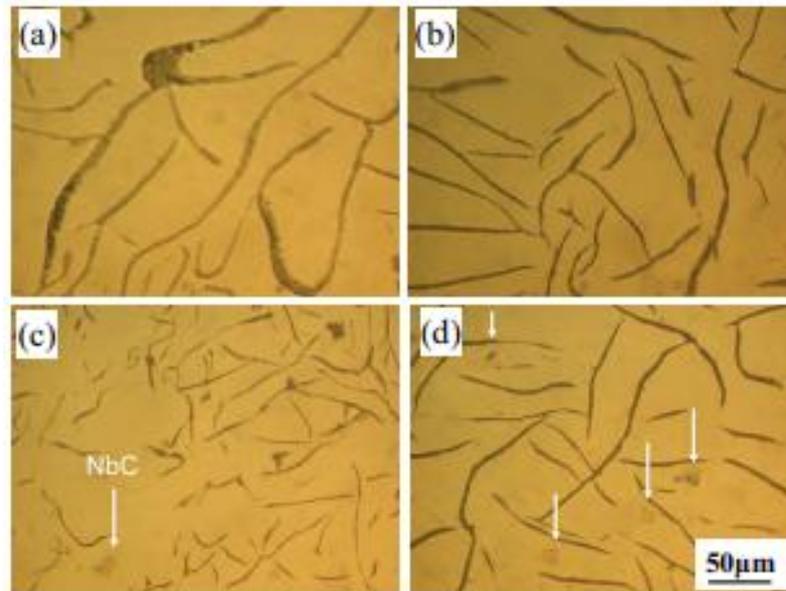


Figura 5: Morfologia da grafita no ferro fundido cinzento.
(a) 0,042%Nb, (b) 0,29%Nb, (c) 0,85%Nb, (d) 1,48% Nb
Fonte: Mohrbacher e Zhai (2011)

Todas as amostras elaboradas apresentaram grafita com distribuição do tipo A. Entretanto, os tamanhos mudaram consideravelmente. A grafite na Fig. 5-a apresentou um aspecto mais grosseiro, mas com a massa distribuída. Ocorreu um refinamento da grafita com o aumento do teor de nióbio de 0,042% para 0,29% (Fig. 5-a para Fig. 5-b). Na Fig. 5-c, para 0,85 % em peso de nióbio, foi observado os menores e mais finos veios de grafita bem como o surgimento de NbC. Finalmente, na Fig 5-d, para o teor de nióbio de 1,48%, o efeito do refinamento saturou, sendo observado um tamanho de grafita maior novamente, porém com uma quantidade maior de NbC. O autor explicou que o mecanismo de refinamento do nióbio na grafita pode ser em função do nióbio impedir o carbono de se mover durante a solidificação, o que restringe o crescimento da grafita.

Segundo Mohrbacher (2011) há dois motivos para o refinamento do nióbio na grafita. Em primeiro lugar, durante o resfriamento pequenos precipitados de NbC se aglomeram e se tornam partículas maiores, entretanto é inevitável que pequenos precipitados de NbC permaneçam durante esse resfriamento, atuando então como pontos de nucleação para a grafita. Em segundo lugar, o nióbio impede a movimentação do carbono no decorrer do resfriamento, restringindo então o crescimento da grafita.

Para se conquistar uma boa distribuição dos NbC é necessário uma fusão bastante controlada (NYLÉN, 2007). Na Tabela 4 foram apresentadas algumas propriedades físicas dos carbonetos de nióbio considerando a temperatura ambiente.

Tabela 4 - Principais propriedades dos NbC em temperatura ambiente

Propriedade Física	Unidade	Valor
Ponto de Fusão	°C	3520
Densidade	kg.m ⁻³	7780
Módulo de elasticidade	GPa	380-480
Dureza Vickers	GPa	17-22
Condutividade Térmica	W.m ⁻¹ .k ⁻¹	14
Calor Específico	J.kg ⁻¹ .k ⁻¹	0,351

Fonte: Mohrbacher *et al.* (2016)

Nylén (2001) afirmou que a densidade dos NbC é bastante similar ao ferro fundido. Mohrbacher *et al.* (2016) elucidaram que os NbC possuem temperatura de fusão bastante elevada, e isso provavelmente limitava seu amolecimento térmico e sua tendência ao desgaste adesivo. O autor acrescentou que o NbC possui maior módulo de elasticidade se comparado com os outros carbonetos metálicos refratários e que, por apresentar características metálicas, o NbC tem uma boa resistência térmica. Por fim, finalizou explicando que em temperaturas altas a sua propriedade de condutividade térmica cresce consideravelmente.

Ao tratar de difusão e reação de difusão das ligas Fe-C-Nb, Pérez, Gás e Maugis (2007) avaliaram as diferenças de dissolução de nióbio nos dois casos de solução sólida. Para realização do estudo, os autores usufruíram de três teores de carbono, nióbio puro (99,99% em peso) e ferro puro (99,999% em peso). A inclusão do nióbio ocorreu em um forno a vácuo, por meio da difusão no estado sólido, com a submissão e a elevação da temperatura das amostras. Pérez, Gás e Maugis (2007) verificaram que solubilidade do nióbio no ferro e, consequentemente, seu coeficiente de difusão, reduz de acordo com o acréscimo do carbono. Notou-se também uma solubilidade pequena de nióbio da matriz. Os autores explicaram que para uma interação entre nióbio e carbono, houve uma forte interação entre vacâncias dos átomos da matriz de ferro alfa juntamente com os átomos de carbono e, devido a isso, houve uma redução do coeficiente de difusão citado.

Mohrbacher (2018) analisou uma liga de ferro fundido cinzento com 2% em peso de silício e 3,7% em peso de carbono e as consequências da adição de nióbio com teores, em peso, de: 0,10%, 0,17% e 0,29%. Para a liga contendo 0,10% o autor observou que houve a

diminuição da quantidade de precipitados eutéticos de NbC que são responsáveis pela formação de locais de nucleação da grafita. As ligas com 0,17% permitiram uma formação de veios de grafita muito finos e, esse fato se deve a uma precipitação eutética de NbC que desencadeia uma grande atividade de nucleação. Já a liga contendo 0,29%, pelo contrário, possibilitou a formação de veios mais compridos e mais grosseiros de grafita na estrutura (MOHRBACHER, 2018).

Outro estudo variando os teores de nióbio em ferros fundidos cinzentos foi realizado por Castello Branco (1984) que variou o teor de nióbio em 0,00, 0,25, 0,75 e 1,5 (% em peso). Foi constatado que, a partir dessas alterações da composição química das ligas, não houve nenhuma mudança expressiva na distribuição da grafita bem como na porcentagem de ferrita. Entretanto, notou-se que a grafita tendeu a ser menor a partir do incremento de nióbio nos ferros fundidos cinzentos.

Por essa perspectiva, torna-se oportuno apresentar uma breve discussão sobre a usinabilidade do ferro fundido cinzento, à luz do processo de fabricação foco desse trabalho de conclusão de curso, o torneamento.

2.4 Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento

Almeida (2015) definiu usinagem como um processo de fabricação mecânica que atua na remoção do material da peça através do corte, seja utilizando máquinas ou ferramentas manuais. Diniz *et al.* (2014) conceituaram a usinabilidade como o nível de dificuldade de usar um material. Weingaertner e Schroeter (2002) explicaram que para avaliar a usinabilidade, basicamente, são utilizados quatro fatores, a saber: força de usinagem; tempo de vida da ferramenta de corte; qualidade conquistada na superfície da peça e formação de cavacos, considerando as formas e os tamanhos gerados durante a usinagem.

Machado *et al.* (2004) explicaram que usar ferros fundidos que possuem o carbono na forma de grafita é relativamente fácil se comparada aos aços com resistência mecânica parecida. Esses autores acrescentaram que essa facilidade de se realizar a usinagem pode ser demonstrada por meio de alguns critérios de usinabilidade, a saber: (i) menor força de usinagem (consequentemente haverá um gasto menor de energia durante o corte); (ii) menor calor desenvolvido no decorrer do corte (logo haverá uma temperatura de usinagem mais baixa); (iii) menor taxa de desgaste das ferramentas (por conseguinte haverá aumento de vida

e melhor controle da saída dos cavacos, principalmente nos ferros fundidos cinzentos devido ao fato deles serem descontínuos).

De acordo com Guessser (2009), a microestrutura do ferro fundido cinzento contribui, de forma direta, na sua usinabilidade, a dizer: (i) quebra do cavaco: a grafita lamelar, facilita a quebra do cavaco reduzindo tanto o tempo de contato entre o cavaco e a ferramenta quanto o tamanho da região de contato e (ii) lubrificação na interface cavaco/ferramenta: a ação lubrificante é devido, principalmente, a presença, no material da peça, de grafita e de partículas de MnS.

Dias e Diniz (2013) confirmaram que um dos principais indicadores da usinabilidade do ferro fundido cinzento é a sua microestrutura. Além desse material metálico possuir uma usinabilidade boa, seu desempenho no decorrer da usinagem pode sofrer pequenas alterações devido às pequenas variações microestruturais, entre essas variações tem-se: distribuição, quantidade, e forma da grafita, fração perlita/ferrita, fração de fases, dimensão das células eutéticas, espaçamento interlamelar da perlita e, por fim, elementos de liga na forma de precipitados.

Guessser (2009) esclareceu que a usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos diminui à medida que ocorre uma redução da quantidade de grafita dispersa sobre a matriz metálica (ou seja, se desloca para as classes que possuem maior resistência mecânica), ocasionando uma redução da ação lubrificante e da facilidade de quebra do cavaco. Ainda segundo esse autor, o aumento da quantidade de perlita na matriz metálica, contribui para a elevação da abrasividade e, por consequência, diminuição da usinabilidade do ferro fundido cinzento.

Nesta revisão bibliográfica, vale ser discutido alguns pontos fundamentais a respeito do torneamento e do processo de formação de cavaco do ferro fundido cinzento.

2.4.1 Torneamento e o processo de formação de cavaco do ferro fundido cinzento

Trent e Wright (2000) explicaram que a retirada do cavaco acontece por meio de uma combinação de fatores, entre eles: profundidade de usinagem; velocidade de corte e velocidade de avanço. Todos esses fatores são mantidos constantes durante o processo, o que permite gerar uma superfície com o perfil desejado.

Em relação aos parâmetros de corte, Machado *et al.* (2015) citaram a velocidade efetiva de corte (v_c), o avanço (f) e a profundidade de usinagem (a_p), ilustrados na Figura 6.

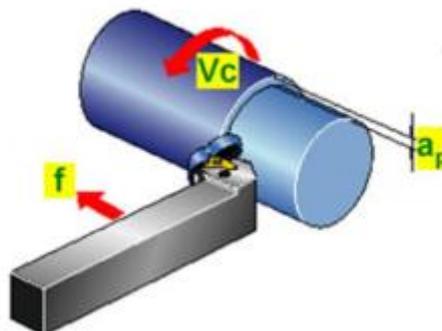


Figura 6: Parâmetros de Usinagem
Fonte: Mascarenhas (2013)

A velocidade efetiva de corte (v_c), ou velocidade de corte, foi definida por Machado *et al.* (2015) como a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta. Esses autores definiram também o avanço (f) como o percurso de avanço em cada volta da peça, medido em $\text{mm}\cdot\text{rev}^{-1}$, e a profundidade de usinagem (a_p) que se trata do quanto que a ferramenta adentra a peça, medida feita de forma perpendicular ao plano de trabalho.

Machado *et al.* (2015) descreveram que o processo de usinagem firma-se no estudo da geração do cavaco. Além disso, elucidaram que, como consequência da inserção da ferramenta de corte em uma peça, uma mínima parcela do material é pressionada contra superfície de saída da ferramenta. Nesse momento o material sofre primeiro uma deformação elástica e, após isso, uma deformação plástica que será elevada de forma progressiva até que ocorra a ruptura do material devido ao elevado estado de tensões que foi alcançado (MACHADO *et al.*, 2015).

A formação de cavacos não é estática, a zona primária de cisalhamento foi determinada por meio de uma zona entre o cavaco e a peça que é definida por planos instantâneos de ruptura e propagação das trincas (MACHADO *et al.* 2015). Os autores complementaram que à medida que ferramenta adentra a peça, há uma quebra parcial ou completa na região de cisalhamento, variando de acordo com a extensão que a trinca se propaga. Por fim, devido ao movimento relativo que há entre a peça e a ferramenta, o cavaco começa a escorregar por cima da superfície de saída da ferramenta e, sincronicamente, uma nova parcela de material deformado será formada e o processo será reiniciado (MACHADO *et al.* 2015).

Segundo Voigt, Marwanga e Cohen (1999), quando os ferros fundidos cinzentos são analisados isoladamente, as ocorrências de fratura são os que prevalecem. Os cavacos descontínuos são gerados pelas fraturas que acontecem por meio das lamelas de grafita (VOIGT, MARWANGA e COHEN, 1999). Na Figura 7 foi exemplificado a formação do cavaco no ferro fundido cinzento.

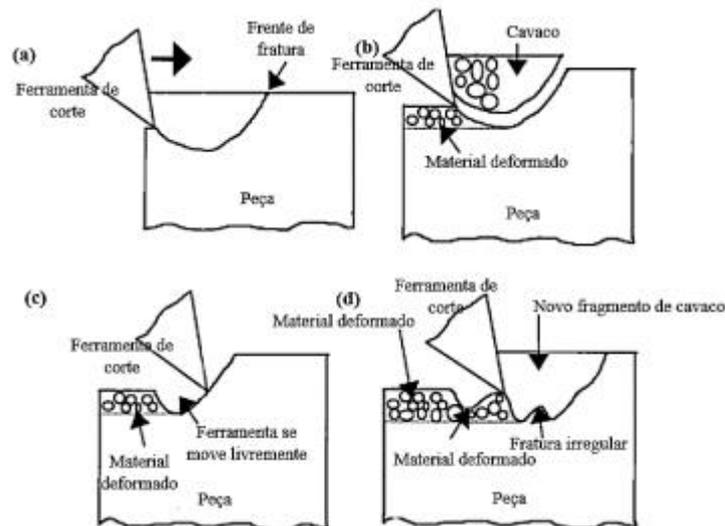


Figura 7: Exemplificação da formação de cavaco na liga de ferro fundido cinzento: (a) tamanho da fratura abaixo e a frente da ferramenta; (b) parte do material totalmente fraturada; (c) distância sem a usinagem do material; (d) superfície irregular
Fonte: adaptado de Voigt, Marwanga e Cohen (1999) e Reis (2021)

Na Fig. 7-a é representada a frente de fratura, quanto mais grosseiros são os veios de grafita, maior é o alcance da fratura. Ao passo que a ferramenta avança, uma parte do material se rompe totalmente, como mostrado na Fig. 7-b. Simultaneamente, uma região danificada com pequenos pedaços compactados do material é gerada logo abaixo da ferramenta. Especialmente no ferro fundido cinzento, pode acontecer uma fratura irregular na usinagem e, quando acontece, a ferramenta se move livremente em uma distância sem promover o corte do material. Isso ocorre até que a ferramenta entre em contato novamente com a peça, Fig. 7-c. Por fim, na Fig. 7-d é apresentada uma superfície irregular que é, basicamente, um fator fundamental que determina um limite para o acabamento superficial dos ferros fundidos no geral. Os autores elucidaram que os cavacos dos ferros fundidos cinzentos são mantidos, por muito pouco tempo, em contato com a ferramenta e são altamente descontínuos.

2.4.2 Temperatura de usinagem

Diniz, Marcondes e Coppini (2006) explicaram que toda a energia mecânica envolvida no processo de usinagem é convertida em energia térmica (calor). A geração de calor no processo de corte ocorre devido a três fatores: (i) atrito da peça com a ferramenta, (ii) atrito da ferramenta com o cavaco e (iii) devido ao cisalhamento e a deformação do cavaco no plano de cisalhamento. A divisão do calor entre peça, ferramenta de corte, cavaco e entorno varia em função da ferramenta de corte e dos parâmetros de usinagem empregados, sendo que, quanto maior os parâmetros utilizados, maior a geração de calor. Esses autores acrescentaram que, geralmente, o cisalhamento e a deformação do cavaco no plano de cisalhamento constituem a maior fonte de geração de calor, tendo o atrito da ferramenta com o cavaco o segundo lugar e o atrito da peça com a ferramenta a terceira posição. Vale ressaltar que, no cavaco, a quantidade do calor total que é dissipado eleva-se com o aumento da velocidade de corte, portanto, para velocidade muito altas, a maior parte do calor gerado no processo é dissipado pelo cavaco (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2006).

Ao tratar a influência do material da peça na dissipação de calor, Diniz, Marcondes e Coppini (2006) elucidaram que quão melhor for a propriedade de condutividade térmica do material mais calor será dissipado por ela. Nesse sentido, Holmgren (2005) detalhou que o ferro fundido cinzento apresenta boa condutividade térmica devido, principalmente, a configuração de suas células eutéticas que compõem uma grande rede interconectada de grafita, o que permite uma propagação de calor eficiente.

Reis (2021) alegou que a quantidade de nióbio empregada em sua tese nas amostras de ferro fundido cinzento (0,02% e 0,23% de nióbio em peso, respectivamente) não alterou de forma significativa (para um nível de confiança de 95%) a temperatura do cavaco, entretanto, os parâmetros de usinagem afetaram significativamente. Em conformidade com Machado *et al.* (2015), a v_c encontrada por Reis (2021) foi o parâmetro de maior contribuição para a variação da temperatura do cavaco havendo uma diferença de cerca de 7,4% entre a temperatura encontrada com a maior v_c (480 m.min⁻¹) quando comparada com a temperatura encontrada com a menor v_c (240 m.min⁻¹). Também em conformidade com Machado *et al.* (2015), o segundo parâmetro que mais influenciou a temperatura do cavaco foi o avanço. Reis (2021) demonstrou isso ao dobrar f e constatar um aumento de cerca de 9,3% na temperatura do cavaco. A autora também constatou o aumento da temperatura do cavaco para todas as interações velocidades de corte e avanço, entretanto, esse aumento ocorreu em taxas progressivamente menores. Reis (2021) explicou que o aumento de f permite um contato de

maior área do plano de cisalhamento primário e zona de cisalhamento secundário, o que facilita a dissipação de calor tanto na ferramenta quanto na peça de trabalho. Entretanto, com os resultados obtidos em sua pesquisa, foi concluído que o aumento de f não incrementou efetivamente a área de contato cavaco e ferramenta.

2.4.3 Forças de usinagem e suas componentes

O conhecimento da força de usinagem e a análise de suas componentes são fundamentais, pois quando se trata da ferramenta de corte há uma relação direta do seu desgaste com os esforços de corte, o que influencia a viabilidade econômica do processo de fabricação (MACHADO *et al.*, 2015). Esses autores complementaram que a geometria e material da ferramenta, a área da seção de corte, os parâmetros utilizados para o corte, a lubrificação e a refrigeração e o material da peça afetam diretamente a força de usinagem.

Ferraresi (1970) sugeriu a decomposição da força de usinagem (F_u) em três componentes: força de avanço (F_f), força de profundidade ou passiva (F_p) e força principal de corte (F_c), conforme ilustrado na Figura 8.

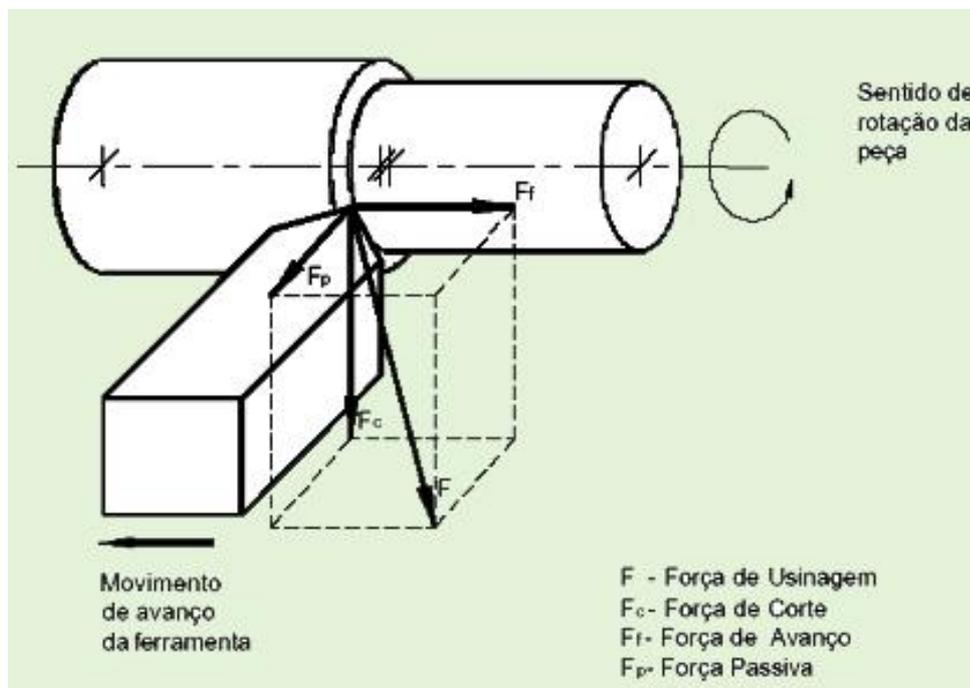


Figura 8: Decomposição das forças de usinagem
Fonte: adaptado Machado *et al.* (2015)

Da Figura 8, segundo Ferraresi (1970), a F_c é a projeção da F_u sobre o plano que possui as direções de corte e avanço (plano de trabalho), na direção do corte, definida pela velocidade de corte (v_c). A F_f é semelhante a F_c sendo a projeção de F_u sobre o plano de trabalho, porém na direção em que a ferramenta avança, definida pela velocidade de avanço (v_f). Por fim, a força de apoio nomeada como força passiva (F_p) é a projeção da F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço, posta no plano de trabalho.

Li (2014) reforçou que, normalmente, cavacos quebradiços e com mínima deformação são gerados em processos de fabricação do ferro fundido cinzento. Para o autor isso significa que este tipo de cavaco colabora para uma pequena área de contato na superfície de saída da ferramenta de corte e, por consequência, a força de corte e o gasto de energia para realizar essa operação são relativamente baixos.

Klocke (2011) acrescentou que os veios de grafita se encontram com certa abundância no decorrer do plano de cisalhamento, realizando um papel de lubrificante sólido durante o processo de corte, colaborando para que haja, relativamente, uma baixa força de atrito entre a superfície de saída da ferramenta e os cavacos. Além disso, tende a ser pequena a deformação mecânica que ocorre na aresta de corte durante a operação de usinagem da liga de ferro fundido cinzento, o que também implica em forças resultantes relativamente baixas (KLOCKE, 2011).

Reis (2021) estudou as componentes da força de usinagem tanto para as amostras de ferro fundido cinzento com baixa adição de nióbio (0,02% em peso) quanto para as de ferro fundido cinzento com alta adição desse elemento (0,23% em peso). Por meio de estimativas pontuais para as componentes F_c e F_f , foi verificado um aumento dos esforços de corte em 3% e 5%, na devida ordem, como consequência do aumento do teor de nióbio. A autora acrescentou que a adição de 0,23% de nióbio refinou consideravelmente a perlita e deixou o material com maior resistência ao cisalhamento, o que requereu forças de usinagem maiores. A partir disso, com o refinamento da estrutura-base das amostras com alto teor de nióbio, a trinca, durante seu processo de propagação, foi forçada a alterar a sua direção. Consequentemente, houve o aumento tanto das componentes de F_u quanto o consumo de energia, o que prejudicou o desempenho de corte. Quanto a F_p Reis (2021) explicou que foram requeridas forças bastante diferentes o que levou a um alto desvio-padrão. Segundo a autora, a matriz do ferro fundido cinzento é heterogênea, portanto, as distintas propriedades das fases constituintes podem ter colaborado para a dispersão dos valores de F_p .

A partir da exposição dos principais critérios associados a usinabilidade do ferro fundido cinzento e resultados encontrados por Reis (2021), dados experimentais que serão modelados e analisados numericamente nesse trabalho de conclusão de curso, torna-se conveniente a discussão sobre a simulação de ferro fundido cinzento, objeto desta pesquisa.

2.5 Simulação de usinagem

Duarte (2003) definiu simulação como o processo de elaborar um modelo computacional que imite o funcionamento de um sistema real e que permita a condução de experimentos com ele, a fim de estudar o seu comportamento. Antoniacomi e Souza (2010) explicaram que a simulação possibilita o uso de diversos tipos de ferramentas em substituição ao cálculo manual, reduzindo as chances de grandes erros, custos e tempo gasto, principalmente se for tratado casos mais complexos ou de pouco domínio da pessoa que utilizará o meio manual. Duarte (2003) acrescentou que a simulação extingue dúvidas e questões iniciais, porém uma simulação inadequada pode tornar o projeto sem aplicações práticas.

Naves e Cunha (2011) explicaram que as simulações são realizadas por meio de ferramentas computacionais tais como os *softwares Solidworks®*, *Abaqus®*, *Ansys®*, entre outros e a escolha de um dos *softwares* vai da adequação à necessidade, do valor monetário e da capacidade execução de trabalhos nesses.

Quando se trata de problemas de maior complexidade de engenharia, Antoniacomi e Souza (2010) afirmaram que o uso de ferramentas computacionais se faz necessário, pois devido ao nível de dificuldade, técnicas como elementos finitos são imprescindíveis para a modelagem e análise dos fenômenos que ocorrem.

As simulações de usinagem em três dimensões (3D) surgiram nos anos de 1990. Ceretti *et al.* (2000) simularam em 3D duas operações de torneamento sendo a primeira uma operação de corte ortogonal em uma liga de alumínio e a segunda uma operação de corte oblíquo em uma liga de aço baixo carbono (0,45% em peso). Em ambos os casos, a fim de estudarem as forças de usinagem e a distribuição de temperaturas, modelaram a ferramenta como corpo rígido, não atribuindo propriedades mecânicas à mesma. A força significativa encontrada no primeiro caso foi a de corte que diferenciou-se cerca 3% do valor experimental e a distribuição de temperatura foi avaliada qualitativamente pelos autores levando os a conclusão de que o *software* conseguiu prever padrões realistas para essa variável. Com relação as componentes da força de usinagem encontrada na segunda simulação, todas as três

componentes atingiram valores muito próximos aos experimentais. Por fim, a distribuição de temperatura também foi realizada qualitativamente pelos autores que afirmaram terem obtidos resultados aproximados aos da realidade.

Hui (2007) realizou uma simulação de torneamento da liga de aço AISI 4340 a fim de estudar a distribuição das temperaturas. O autor concluiu que em cavacos que não ocorre a ruptura do material da peça são mais deformados e assim mais energia é convertida em calor, isso implica que cavacos descontínuos, por possuírem menor deformação, menos energia é necessário e, portanto, menor é a geração de calor. Também concluiu que o avanço, a velocidade de corte e a profundidade de usinagem também atuam diretamente na geração de calor na interface ferramenta cavaco.

Ng *et al.* (1999) modelaram o processo de torneamento do aço AISI H13 tendo como um dos objetivos estudar a temperatura do cavaco. Dessa forma, obtiveram a temperatura da superfície do cavaco por meio da soma das diferentes temperaturas dos nós na superfície do cavaco dividido pelo número de nós. A diferença entre os resultados modelados e os dados experimentais foram de 6%.

Tu e Shi (2020) simularam a formação de cavacos pelo processo de torneamento do ferro fundido cinzento por meio do *software* Abaqus. Com o objetivo de melhorar a eficiência computacional, as malhas na camada de corte da peça de trabalho foram refinadas e as demais malhas foram mantidas esparsas. Os autores confirmaram, pela simulação feita, que o cavaco do ferro fundido cinzento é segmentado devido ao fato do material ser quebradiço. Acrescentaram também que os cavacos formados apresentaram diversos formatos devido ao próprio material da peça, à geometria da ferramenta, aos parâmetros de corte e outras condições no processamento. Explicaram que a região de maior temperatura na ferramenta foi a ponta pelo fato do cavaco ser quebradiço, o que, por consequência, torna o contato entre o cavaco e a ferramenta muito rápido. Por fim, também mostraram que a força de corte oscilou durante a formação dos cavacos segmentados. A força variou de quase 100 N para 0 N que era o momento em que ocorria a segmentação do cavaco.

Guo e Yen (2004) simularam o torneamento de uma liga de aço AISI 4340 com objetivo de estudar a formação de cavacos descontínuos. Segundo os autores, os cavacos descontínuos são um dos principais tipos de cavacos e são, geralmente, formados na usinagem de ligas de maior dureza e em altas velocidades. Os autores concluíram que a formação do cavaco descontínuo ocorre devido à iniciação e propagação de rachaduras internas na frente da ferramenta e acima do corte. Para resolver as dificuldades associadas à grande distorção do

elemento foi utilizado uma malha adaptativa. Com relação as forças de corte, houve uma oscilação durante o processo, havendo forças de alto valor absoluto quando o cisalhamento do material está ocorrendo e um valor mais baixo quando uma propagação de trinca está em andamento até que o cavaco se desprende da peça de trabalho, entretanto não houve comparações com dados experimentais pois os autores não possuíam os mesmos.

Fiorini *et al.* (2010) exploraram simulações de operações de torneamento, que envolviam cortes de alto desempenho de ferro fundido cinzento. Neste trabalho os autores perceberam que a medida em que se aumentava a remoção do material tempo de usinagem era reduzido e a qualidade do produto era mantida a mesma. Também foi abordado a redução da energia de corte de acordo com a mudança no ângulo de ataque de quando se alterava o ângulo do negativo para um ângulo positivo. Também demonstraram as limitações da máquina-ferramenta para velocidades mais elevadas (750m/min) e para altas taxas de remoção de material (900 cm³/min).

Gok (2015) analisou numericamente e experimentalmente as temperaturas da ferramenta e da peça, bem como a força de corte e de avanço durante o torneamento do aço AISI 1045. O autor conseguiu resultados similares, com erros na faixa de 5%, entre os testes experimentais e os numéricos. Os resultados referentes às forças de corte e de avanço mostraram que os valores da força de avanço e da força de corte diminuía com o aumento da velocidade de corte. Entretanto, com relação aos valores de temperatura da peça e da ferramenta, esses mostraram aumentar com a elevação da velocidade de corte.

Rezende (2020) também comparou numericamente e experimentalmente as forças de corte e a temperatura do cavaco durante o processo de torneamento do ferro fundido vermicular. Para execução desse trabalho foram utilizadas ferramentas de corte sem revestimento, com revestimento de óxido de alumínio e com revestimento de multicamadas, velocidades de corte de 125, 175 e 225 m/min e avanços de 0,1, 0,2 e 0,3 mm/rev. Como resultados a autora explica com o aumento do avanço houve ao aumento das temperaturas durante a utilização de todas as ferramentas de corte e explica que isso se deve ao fato de maiores avanços exigirem maiores esforços para a realização do corte, o que gera, por consequência, mais calor na região de corte. De forma similar, o aumento da velocidade de corte no processo de torneamento implicou no aumento de temperatura.

2.5.1 Elementos Finitos

Soriano (2003) explicou que o método dos elementos finitos (MEF) teve como precursores dois engenheiros, Kelsey e Argyris, que aplicaram essa ferramenta em chapas que compunham a asa de um avião com o intuito de entender como a tensão estava distribuída sobre essas chapas, entretanto, apenas em 1965 que foi descoberto que esse método era um caso específico do Método de Rayleig-Ritz.

Assan (2003) explicou que o método de Rayleigh-Ritz se trata de um método que possui uma ótima adaptabilidade quando relacionado aos problemas que envolvem mecânica dos sólidos, isso por portar, de forma natural, um funcional com princípio mínimo, que pode ser explicado como uma técnica capaz de criar funções que se aproximam dos mais variados problemas, considerando que essas funções são estabelecidas no domínio de todos os pequenos elementos ao contrário de encontrar uma única função que solucione todas as condições de contorno do domínio como um todo. Em outras palavras, o Rayleigh-Ritz é compreendido, basicamente, pela substituição da função correta por uma função que se aproxima por meio de parâmetros que podem ser ajustados, sendo a função elaborada pela combinação linear de outras funções, nomeadas funções de forma (ASSAN, 2003).

Segundo Almeida (2000) o MEF é uma excelente solução para resolver problemas de projeto de engenharia, sejam em análises estruturais, transferência de calor, mecânica dos sólidos, processos de fabricação, entre outros. É um método que permite obter respostas estáticas ou dinâmicas de questões e/estruturas consideravelmente complexas em um nível que não se pode usar as teorias de resistência dos materiais diretamente, além de não ser economicamente viável a criação de modelos em escalas menores (ALMEIDA, 2000).

A técnica de elementos finitos é fundamentada no dimensionamento da malha (ALMEIDA, 2000). Owen (1998), por sua vez definiu uma malha como uma junção das subdivisões dos elementos, e que sua eficiência dependerá da adaptação feita por meio de refinamento. Na Figura 9 foi exemplificado uma malha de elementos finitos.

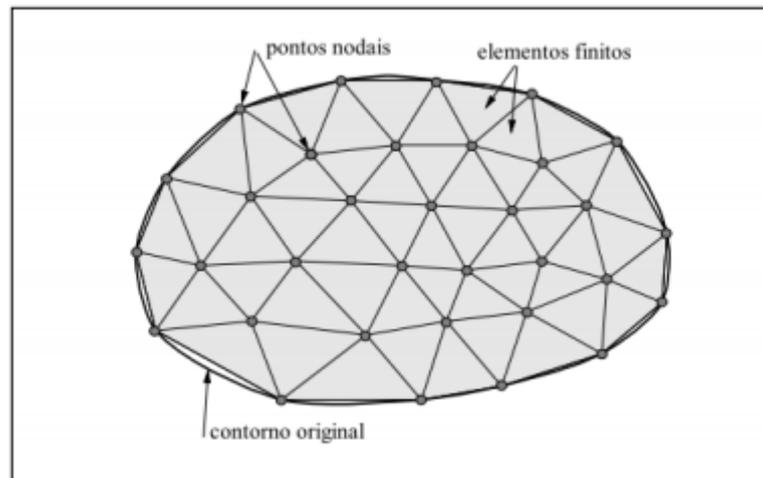


Figura 9: Malha 2D de elementos finitos
Fonte: Souza (2003)

Segundo Almeida (2000) o dimensionamento de uma malha se trata um método de discretização, em que a qualidade da resposta está diretamente ligada ao tamanho das partes que dividem o todo e, desse modo, com o número de partes que o todo foi dividido. Na Figura 10 foi exemplificado as partes de elementos finitos que compõe uma malha.

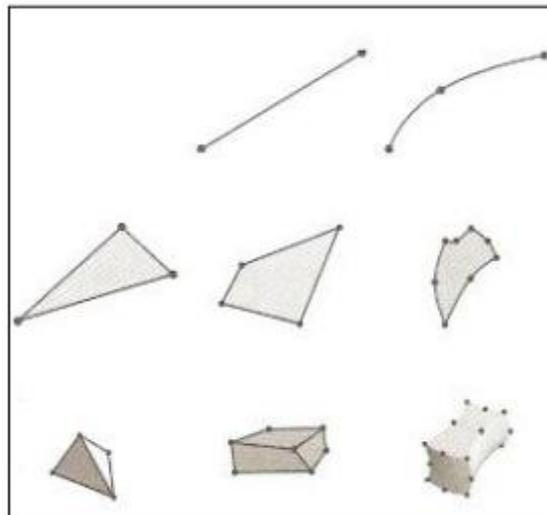


Figura 10: Partes de elementos finitos que compõe uma malha
Fonte: Souza (2003)

Owen (1998) afirmou que o refinamento de uma malha é dependente de operações aritméticas e a malha apresenta diversos tipos de modelamento, como os apresentados na Figura 10. Outro fator que deve ser levado em conta para a convergência dos resultados é a escolha do número de nós, conforme exemplificado na Figura 11.

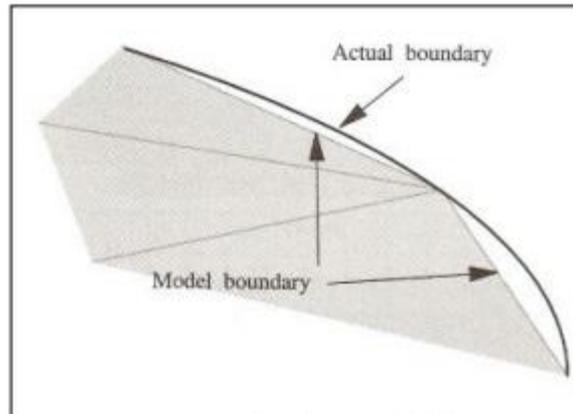


Figura 11: Diferença entre superfície de verdade e uma malha de elementos finitos
Fonte: Silva (2009)

À medida que se aumenta o número de elementos, a diferença entre a superfície verdadeira e a malha é reduzida, em outras palavras, conforme a quantidade de nós aumenta ao infinito e o tamanho dos elementos aproxima-se de zero o resultado se aproxima cada vez mais da solução exata. Porém, tem-se como consequência um aumento no tempo necessário para se processar os dados e, simultaneamente, aumento do custo computacional (SOUTO FILHO, 2003; SOUZA, 2003; BATHE, 1996).

Neste capítulo foi dissertado toda a fundamentação teórica e conceitos ligados aos ferros fundidos, ferros fundidos cinzentos, adição de nióbio em ferros fundidos cinzentos, sua usinabilidade e sua simulação numérica para o estudo da modelagem numérica do processo de torneamento dessa liga. A partir disso, torna-se oportuno apresentar a metodologia do presente trabalho.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo caracterizar o tipo da pesquisa, descrever os materiais e métodos adotados, as variáveis e indicadores, os instrumentos de coletas de dados, o *software* e a metodologia utilizados no desenvolvimento da simulação, e por fim, a tabulação e análise dados.

3.1 Tipos de Pesquisa

Para Alyrio (2009), a pesquisa científica são várias atividades com o objetivo em comum de buscar um determinado conhecimento ou resposta. Além disso, só se inicia uma pesquisa caso exista uma indagação para a qual se deseja buscar por uma resposta (GERHARDT & SILVEIRA, 2009)

Pesquisa é definida por Gil (2002, p.17) da seguinte maneira:

O procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. A pesquisa é requerida quando não se dispõe de informação suficiente para responder ao problema, ou então quando a informação disponível se encontra em tal estado de desordem que não possa ser adequadamente relacionada ao problema.

Gil (2002) classifica as pesquisas em descritivas, explicativas ou exploratórias. Para Alyrio (2009), a pesquisa descritiva tem por objetivo buscar principalmente enumeração e ordenação de dados, sem a necessidade de refutar ou comprovar hipóteses de caráter exploratórias, abrindo espaço a uma pesquisa explicativa nova, com embasamento em experimentos.

A pesquisa explicativa tem como objetivo principal verificar as causas e os fatores que permitem determinado fenômeno de acontecer. Há um elevado risco de imprecisão para esse tipo de pesquisa, por se tratar de uma pesquisa mais minuciosa e labiríntica que representa um elevado estudo do conhecimento da realidade (GIL, 2002)

A pesquisa exploratória, segundo Richardson (1999), tem como objetivo investigar a fundo os conhecimentos das características de um determinado fenômeno a fim de buscar motivos das suas causas e consequências por meio da utilização de alguns objetos, a saber: (i) buscar problemas do comportamento humano, procurar conceitos ou variáveis e propor hipóteses verificáveis; (ii) conferir se pesquisas parecidas já foram feitas, quais os métodos e técnicas utilizados e quais os resultados obtidos, indicar tendências, verificar relações

potenciais entre variáveis e definir caminhos para pesquisas posteriores mais rigorosas; (iii) ajudar na definição de variáveis a serem tratadas em um problema de pesquisa; (iv) colaborar no desenvolvimento ou na geração de hipóteses explicativas de questões a serem estudadas em uma pesquisa causal; (v) familiarizar e aumentar o entendimento de um problema de pesquisa e perspectiva (MATTAR, 1994; MALHOTRA, 2005; SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2010).

Gerhardt e Silveira (2009) explicam que a pesquisa pode também ser fragmentada em relação à sua abordagem, sendo pesquisa qualitativa ou quantitativa. Pesquisa qualitativa se trata do entendimento de uma organização ou de um grupo social e é possível observar uma variação entre interpretação, investigação e reflexão durante o estudo. Já a pesquisa quantitativa é realizada uma estruturação das hipóteses por meio de tabelas com objetivo de que elas sejam testadas (GIL, 2002).

A partir das informações apresentadas, esse trabalho é classificado como quantitativo, pois utiliza dados numéricos gerados a partir de simulação computacional conjuntamente a modelos matemáticos para o estudo e análise do caso. Com relação ao objetivo, essa pesquisa é classificada como descritiva, visto que observa o princípio físico e o funcionamento de um torno, com o objetivo de determinar a temperatura e as forças de usinagem no processo de torneamento do ferro fundido cinzento com adição de nióbio. Esse trabalho possui também caráter bibliográfico, visto que é fundamentado em dissertações, livros, artigos, com objetivo de elevar o acervo teórico.

3.2 Materiais e Métodos

O presente trabalho inicia-se pela formulação do problema a ser questionado juntamente da identificação dos objetivos geral e específicos do trabalho.

Aragão e Neta (2017) explicaram que a revisão bibliográfica tem o objetivo de proporcionar os conceitos teóricos que baseiam o que será estudado. Dessa forma, uma análise bibliográfica fundamentada em artigos, dissertações, livros e teses a respeito do ferro fundido cinzento sem e com adição de nióbio e simulação computacional se fez necessária.

Na Figura 12 é elucidado a forma sistemática em que o desenvolvimento do trabalho será dado:

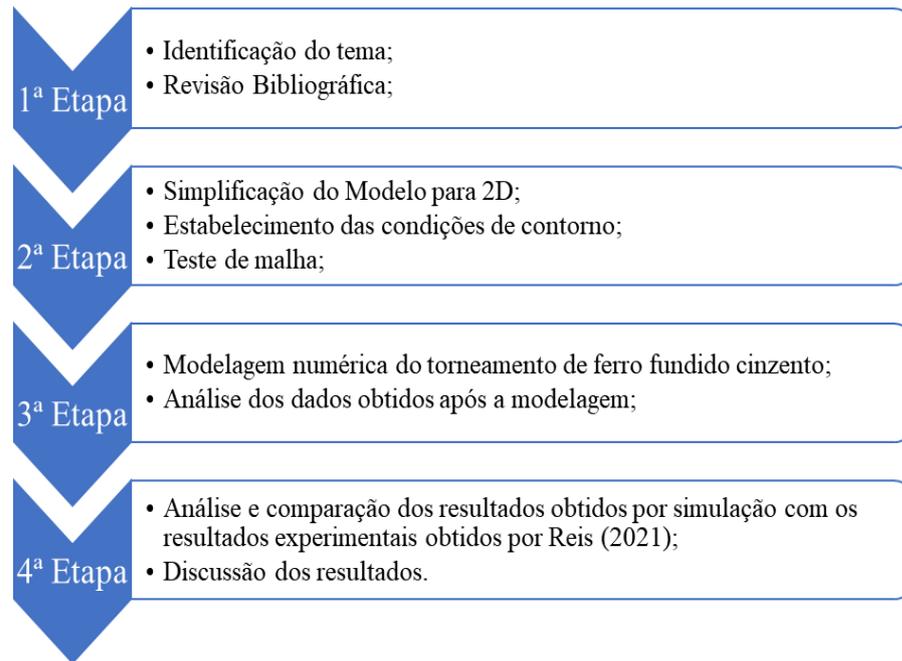


Figura 12: Desenvolvimento do trabalho
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Para o desenvolvimento da modelagem numérica do ferro fundido cinzento o torneamento foi simplificado para um corte ortogonal (Figura 13) com o auxílio do *software* AdvantEdge.

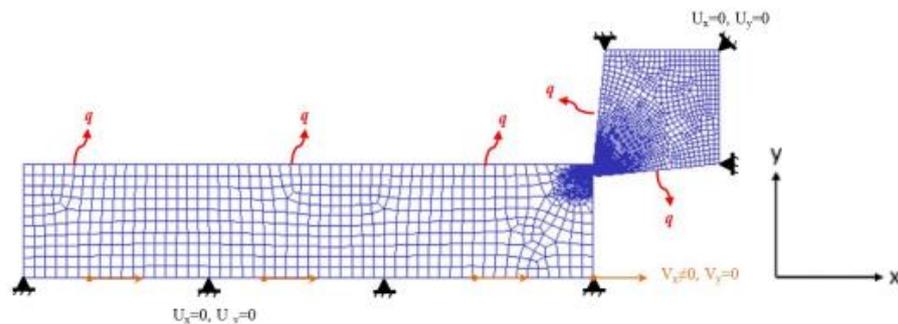


Figura 13: Condições de contorno empregadas no modelo numérico proposto
Fonte: Rezende (2020)

A representação das peças de ferro fundido cinzento, *Grey Iron* ASTM A48 Class 30, foram feitas por meio de um retângulo com as dimensões de 2 mm de altura e 4 mm de comprimento. A direção y da peça foi fixada, e a direção x foi usada para aplicação da velocidade de corte com relação a ferramenta de corte. À luz de Rezende (2020), com relação à ferramenta de corte, foram aplicadas restrições de movimento em y e x quando não era estabelecido contato da mesma com o material que estava sendo usinado, também representado na Figura 13. Para a representação da geometria do inserto sem quebra cavaco, foram estabelecidos o ângulo de saída da ferramenta ($\gamma_0 = 0^\circ$) e de folga da ferramenta ($\alpha_0 = 0^\circ$). Para a representação da geometria do inserto com quebra cavaco GH utilizado por Reis

(2021) foi utilizado o inserto disponível na biblioteca do *AdvantEdge*® que mais se aproximava das dimensões (CCMT3(2p5)2_UM). A ferramenta de corte foi modelada para se aproximar de um comportamento de um corpo rígido, a fim de que não houvesse deformações plásticas, mas, sem inibir sua capacidade de realizar trocas de calor com a peça e com o meio (REZENDE, 2021).

O valor do tamanho dos elementos da malha da ferramenta, do cavaco e da peça foi determinado após a realização de alguns testes numéricos (Tabela 5), utilizando como critério a variável temperatura da interface cavaco/ferramenta, a fim de se obter uma melhor correlação entre tempo computacional e precisão dos resultados.

Tabela 5: Testes de malha com velocidade de corte 240 m/min, avanço 0,25 mm/rev e ferramenta de corte com geometria sem quebra cavaco

Teste	Tamanho Máximo dos Elementos (mm)	Tamanho Mínimo dos Elementos (mm)	T1	T2	T3	T4	T5	Tempo médio de Processamento (h)
1	0,1	0,02	515,95	484,95	453,96	422,96	391,93	1,5
2	0,05	0,009	516,22	485,21	454,19	423,18	392,17	2,5
3	0,03	0,007	518,97	487,78	456,6	425,41	394,23	4
4	0,01	0,005	526,38	494,73	463,08	431,44	399,79	8
5	0,01	0,003	527,11	495,24	463,97	432,34	401,28	12

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Na Tabela 5 foram representados os testes de malhas realizados com os tamanhos dos maiores e menores elementos dimensionados, junto das 5 maiores temperaturas da interface cavaco/ferramenta e com o tempo de processamento necessário para realização da simulação. Os resultados obtidos no 4º teste já não mostraram uma diferença significativa em relação ao 5º teste e o tempo de processamento foi cerca de 4 horas a menos. A partir disso, padronizou-se para as demais simulações o tamanho máximo dos elementos em 0,01 mm e mínimo em 0,005 mm, semelhantes aos utilizados no 4º teste. Todos os modelos possuíam no máximo 24000 nós. Vale ressaltar que os menores elementos ficaram compreendidos nas zonas em que houve a formação do cavaco e também na face ativa de corte da ferramenta de corte.

Por fim, aproximou-se a operação de torneamento para um modelo em duas dimensões (2D), como representado na Figura 13, pelo fato do ângulo de posição da ferramenta utilizado por Reis (2021) ser de 90°.

No modelo numérico apresentado, além do comprimento da peça modelada ser de 4 mm, para que houvesse a separação do cavaco em relação a peça, foi utilizado o processo de

remalhamento automático (*remeshing*) e não um critério de fratura dúctil, o que resultou em um cavaco contínuo, conforme detalhado por Rezende (2020).

As simulações foram desenvolvidas em um Windows 10, processador Intel Core i5-3570k CPU @ 3.40GHz 3.80 GHz e memória RAM de 8 gigabytes.

O material da peça, conforme exposto por Rezende (2020), teve seu regime elástico desconsiderado. Para os parâmetros de corte foram consideradas as velocidades de corte (240, 360 e 480 m/min), com uma profundidade de usinagem de 1 mm e avanços (0,25 e 0,5 mm/rev), à luz dos resultados de Reis (2021).

Vale ressaltar que o modelo de falha utilizado foi o de Jhonson-Cook, entretanto, esses parâmetros já estavam definidos no software de acordo com o material.

Por fim, foram realizadas uma comparação e discussão dos dados de força de usinagem e temperatura do cavaco obtidas numericamente com os dados experimentais reportados por Reis (2021).

3.3 Variáveis e Indicadores

Gil (2018) destacou a definição de indicadores como um ponto essencial para as pesquisas. O autor explicou que essa é uma tarefa bastante delicada e que exige do investigador muita experiência e argúcia do investigador. Um grande problema que ocorre é o fato de existir vários indicadores para a mesma variável, o que dificulta na escolha dos mais adequados. Portanto, para selecionar os indicadores é necessário que o pesquisador seja portador de grande intuição e bom conhecimento do tema estudado. Do contrário, a pesquisa tenderá a produzir resultados equivocados (GIL, 2018).

Neste trabalho as variáveis são de natureza quantitativa. Para a medição e o estudo de cada variável, houve indicadores que foram escolhidos em conformidade com os objetivos da pesquisa.

Tabela 6: Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Velocidade efetiva de corte (v_c);	Forças de usinagem simuladas
Avanço (f);	Temperaturas dos cavacos simuladas
Geometria de quebra-cavaco;	

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Esta pesquisa é considerada de caráter bibliográfica, quantitativa e descritiva, de forma que todos os dados e informações necessárias para a realização do estudo foram adquiridas por meio de pesquisas bibliográficas, teses, livros, dissertações e manuais. Ademais, houve etapas computacionais, permitindo observações indiretas, com objetivo de coletar dados para a realização do trabalho proposto.

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos dados relatados por Reis (2021) e os obtidos nesse trabalho por meio do *software* AdvantEdge®, foi utilizado o *software* Microsoft Excel® para a tabulação deles, bem como a construção de tabelas e gráficos necessários. Por fim, utilizou-se o *software* Microsoft Word® para tradução dos dados obtidos em texto de forma explicativa, incluindo as conclusões.

Desta forma, todos os dados alcançados foram organizados, permitindo que fossem apresentados de forma a facilitar o entendimento do processo.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado a metodologia que foi utilizada no presente trabalho, explicando o tipo de pesquisa utilizado, a abordagem utilizada e os procedimentos técnicos utilizados.

Em seguida, foi elucidado os métodos e materiais utilizados para a coleta e tabulação de dados e a forma como estes foram adquiridos e como foram estudados.

A partir disso, torna-se oportuno a entrada para o próximo capítulo, onde é tratado a análise dos resultados obtidos de acordo com o método utilizado na pesquisa.

4 RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado a análise da modelagem numérica do torneamento do ferro fundido em duas dimensões (2D) por meio da utilização do *software* AdvantEdge® e análise dos mesmos em relação aos resultados experimentais obtidos a partir da pesquisa de Reis (2021).

4.1 Características do material modelado

Reis (2021) relatou que o material utilizado para a fabricação dos corpos de prova usados em seu trabalho foi um ferro fundido cinzento perlítico, que estaria próximo a classe G2500a. A composição química dessas amostras pode ser vista na Tabela 7.

Tabela 7: Composição química dos corpos de prova (%peso)

Identificação	C	Si	Cu	Mn	Cr	Ni	S	Ti	N	Sn	Nb	P
Amostra 01	3,42	1,62	0,51	0,44	0,16	0,13	0,09	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
Amostra 02	3,53	1,77	0,50	0,44	0,15	0,11	0,10	0,02	0,02	0,02	0,21	0,01
Amostra 03	3,49	1,77	0,50	0,43	0,15	0,11	0,09	0,02	0,02	0,02	0,24	0,01
Amostra 04	3,46	1,62	0,50	0,46	0,17	0,13	0,09	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02

Fonte: Reis (2021).

A fim de estabelecer um critério para a escolha do material no *software* AdvantEdge®, buscou-se estabelecer a composição química média dos corpos de prova experimentados por Reis (2021). O material, *Grey Iron* ASTM A48 Class 30, disponível na biblioteca do *software* AdvantEdge®, foi aquele que mais se aproximou da composição química média calculada. Na Tabela 8, foram sumarizados esses resultados. Vale ressaltar a presença de nióbio nas amostras estudadas por Reis (2021) em quantidades de 0,02% e 0,23%, sendo o principal elemento diferenciador das amostras, o que justificou a não necessidade do cálculo da média para ele.

Tabela 8: Comparação de composições químicas experimentadas e simuladas (% peso)

Identificação	C	Si	Cu	Mn	Cr	Ni	S	Ti	N	Sn	P
Composição química média - Reis (2021)	3,48	1,7	0,5	0,44	0,16	0,12	0,09	0,02	0,02	0,02	0,01
Grey Iron ASTM A48 Class 30 - AdvantEdge	3,45	2,1	-	0,75	-	-	0,15	-	-	-	0,15

Fonte: Adaptado de Reis (2021) e AdvantEdge.

Ainda da Tabela 8, destaca-se que os elementos químicos disponibilizados para a caracterização do *Grey Iron ASTM A48 Class 30* no *software AdvantEdge®* carbono, silício, manganês, enxofre e fósforo, foram aqueles classificados por Chiaverinni (1990) como elementos com maior influência na estrutura dos ferros fundidos cinzentos. A análise comparativa sugere que a quantidade de grafita encontrada por Reis (2021) deve aproximar ao material simulado, visto os teores de carbono similares. As diferenças entre silício e manganês, elementos que conforme Chiaverinni (1990) mais favorece e estabiliza a cementita, respectivamente, podem justificar eventuais modificações de propriedades mecânicas.

As propriedades mecânicas dureza (Brinell) e comportamento mecânico em tração (tensão limite de resistência) dos corpos de prova experimentados por Reis (2021) e disponibilizados para o *Grey Iron ASTM A48 Class 30* na biblioteca do *AdvantEdge®* foram comparados conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Comparação das propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos utilizados por Reis (2021) com o utilizado na modelagem numérica

Propriedade mecânica			
Fonte	Material	Dureza Brinell (HB)	Tensão limite de resistência (σ_{LR})
Reis (2021)	Ferro fundido cinzento com 0,02% de nióbio em peso	193 ± 2	294 ± 12
Reis (2021)	Ferro fundido cinzento com 0,23% de nióbio em peso	195 ± 3	291 ± 10
AdvantEdge	Grey Iron ASTM A48 Class 30	187	207

Fonte: Adaptado de Reis (2021) e AdvantEdge®

Reis (2021) explicou que não existia diferença significativa, ao nível de 95% de confiança, de dureza e tensão limite de resistência para os ferros fundidos cinzentos estudados

em função do teor de nióbio. Mediante esse resultado, justifica-se a simplificação do modelo simulado para um único material. Da Tabela 9, verifica-se que a dureza Brinell do Grey Iron ASTM A48 Class 30 corrobora os resultados descritos por Reis (2021). Apesar das diferenças das tensões limite de resistência (Tabela 9) do material simulado em relação aos resultados apresentados por Reis (2021), as semelhanças de composição química e dureza justificaram a escolha do material para o modelo numérico. Ademais, destaca-se a tensão limite de resistência não estava disponível para todos os ferros fundidos disponíveis na biblioteca do *software*.

4.2 Método de elementos finitos para a temperatura do cavaco

A simulação no processo de torneamento 2D, por meio do método dos elementos finitos, com uma ferramenta de corte sem quebra cavaco e com quebra cavaco, foram ilustradas nas Figuras 14 e 15, respectivamente. Dado limitação computacional justifica-se o comprimento da peça simulada de 4 mm. Não houve a quebra do cavaco devido esse comprimento de corte.

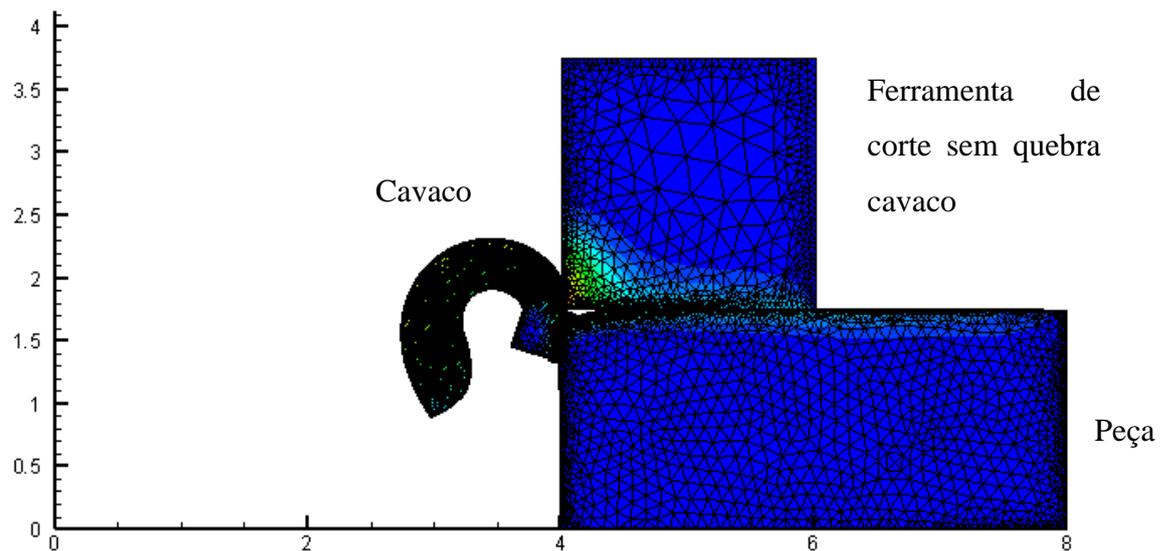


Figura 14 - Simulação final do processo de torneamento 2D com ferramenta de corte sem quebra cavaco
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

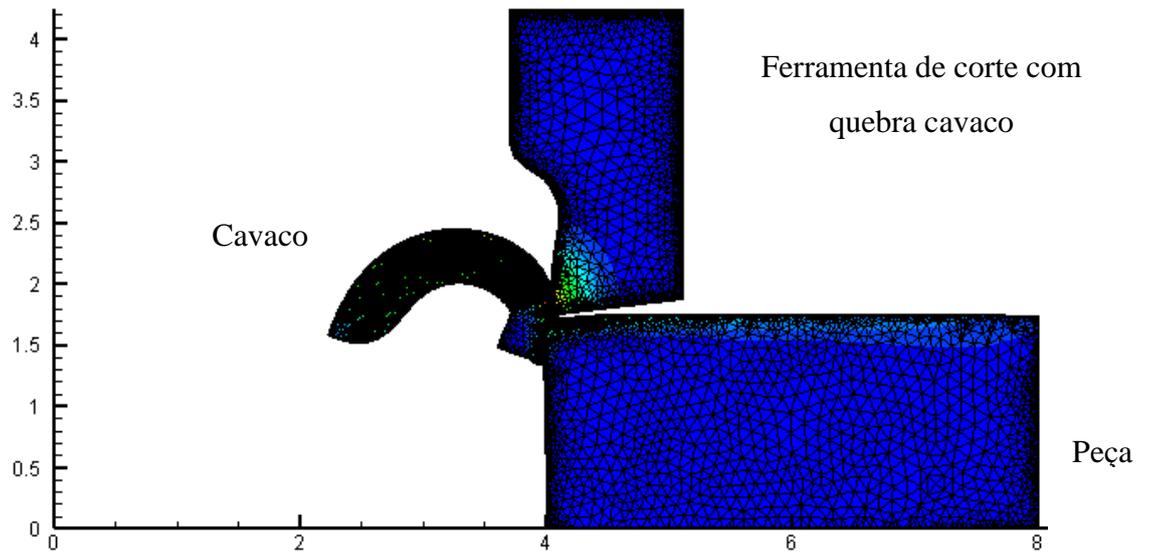


Figura 15: simulação final do processo de torneamento 2D com ferramenta de corte com quebra cavaco
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Nas Figuras 16, 17, 18 e 19 foram apresentadas as distribuições de temperaturas na interface cavaco/ferramenta para velocidade de corte de 240, 360 e 480 m/min e avanço 0,25 e 0,50 mm/rev, para as ferramentas de corte sem quebra cavaco e com quebra cavaco.

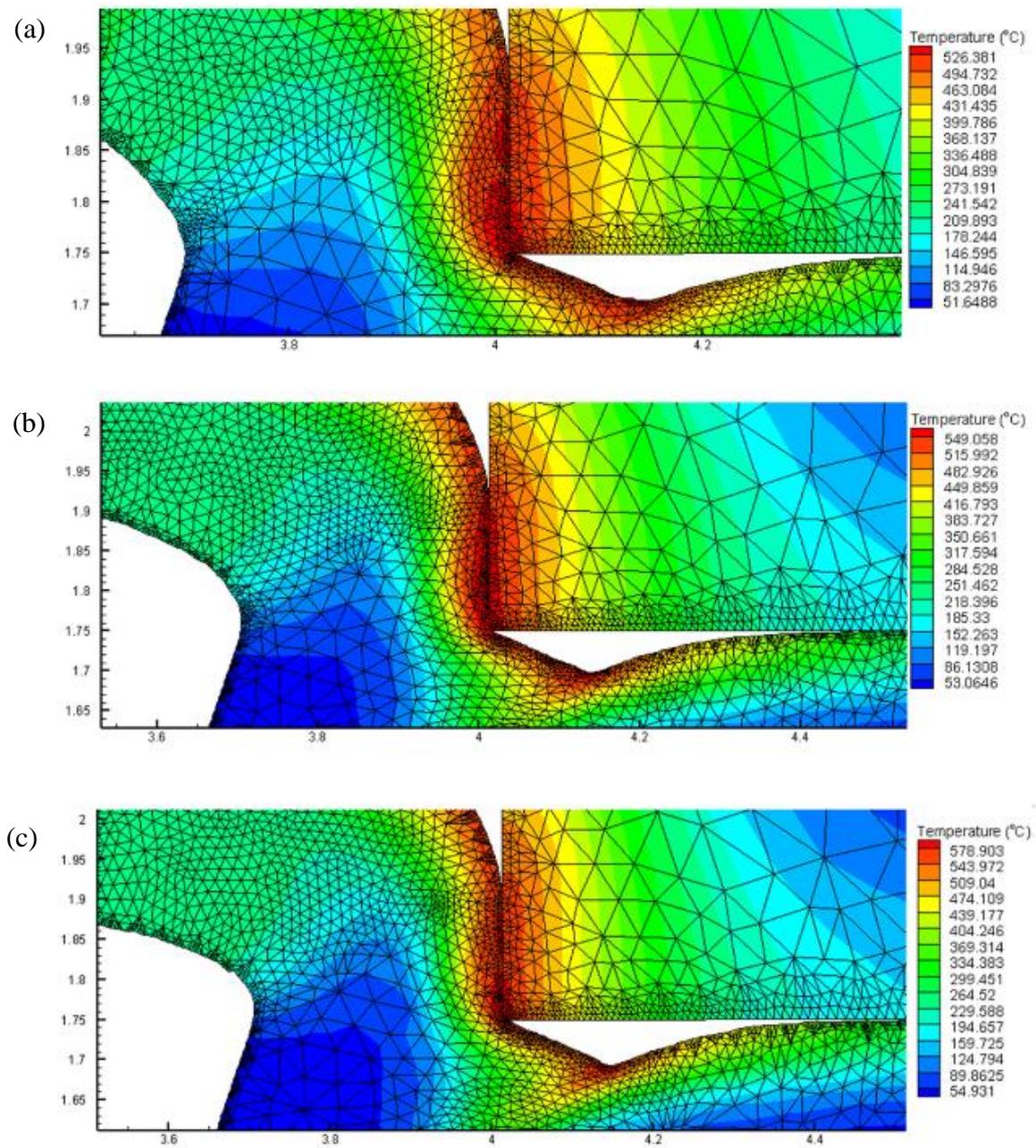


Figura 16: Distribuições de temperatura na interface cavaco/ferramenta no torneamento 2D com avanço 0,25 mm/rev e ferramenta de corte sem geometria de quebra cavaco com velocidades de corte: (a) 240 m/min; (b) 360 m/min; (c) 480 m/min

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

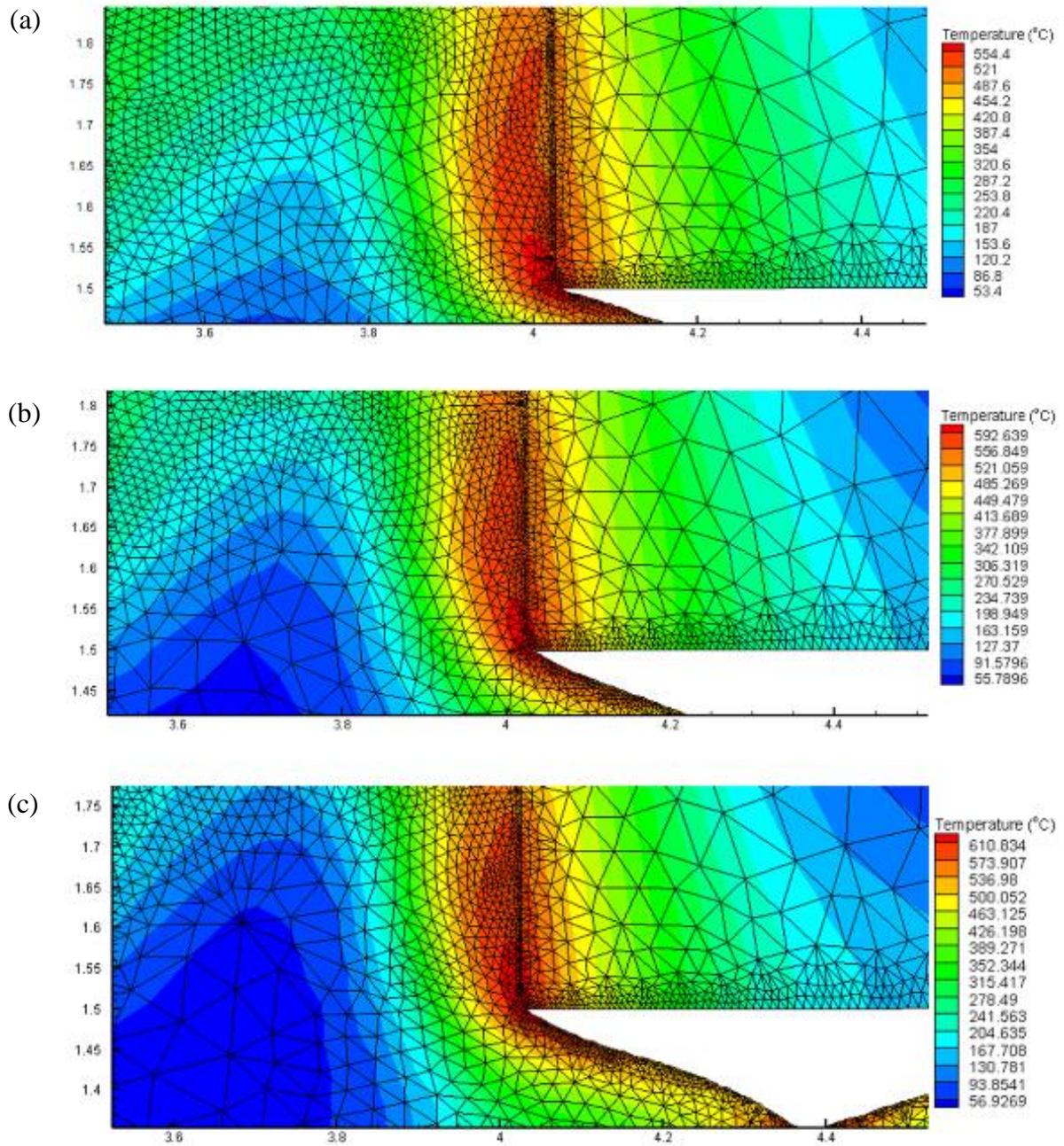


Figura 17: Distribuições de temperatura na interface cavaco/ferramenta no torneamento 2D com avanço 0,5 mm/rev e ferramenta de corte sem geometria de quebra cavaco com velocidades de corte: (a) 240 m/min; (b) 360 m/min; (c) 480 m/min

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

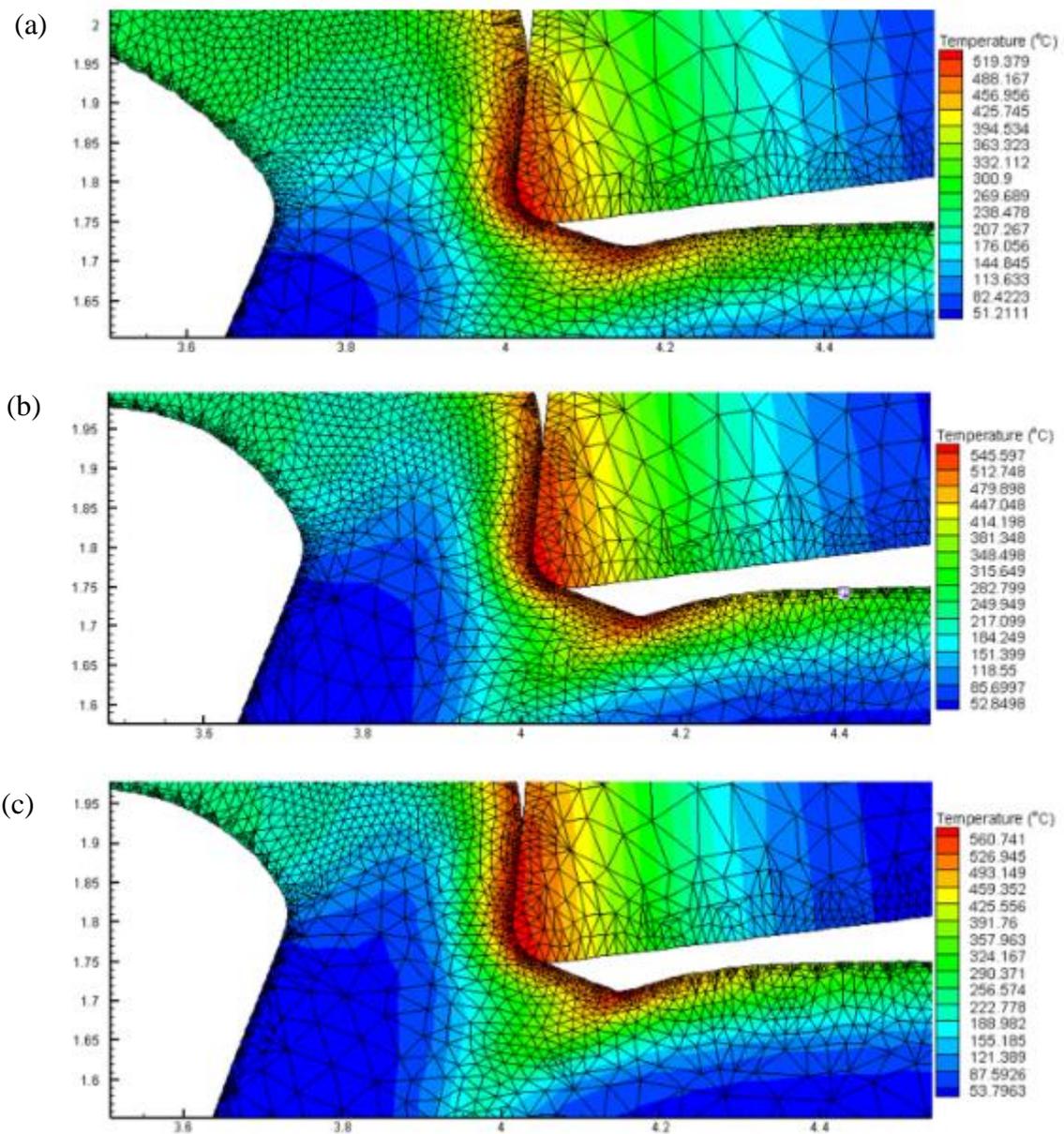


Figura 18: Distribuições de temperatura na interface cavaco/ferramenta no torneamento 2D com avanço 0,25 mm/rev e ferramenta de corte com geometria de quebra cavaco com velocidades de corte: (a) 240 m/min; (b) 360 m/min; (c) 480 m/min

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

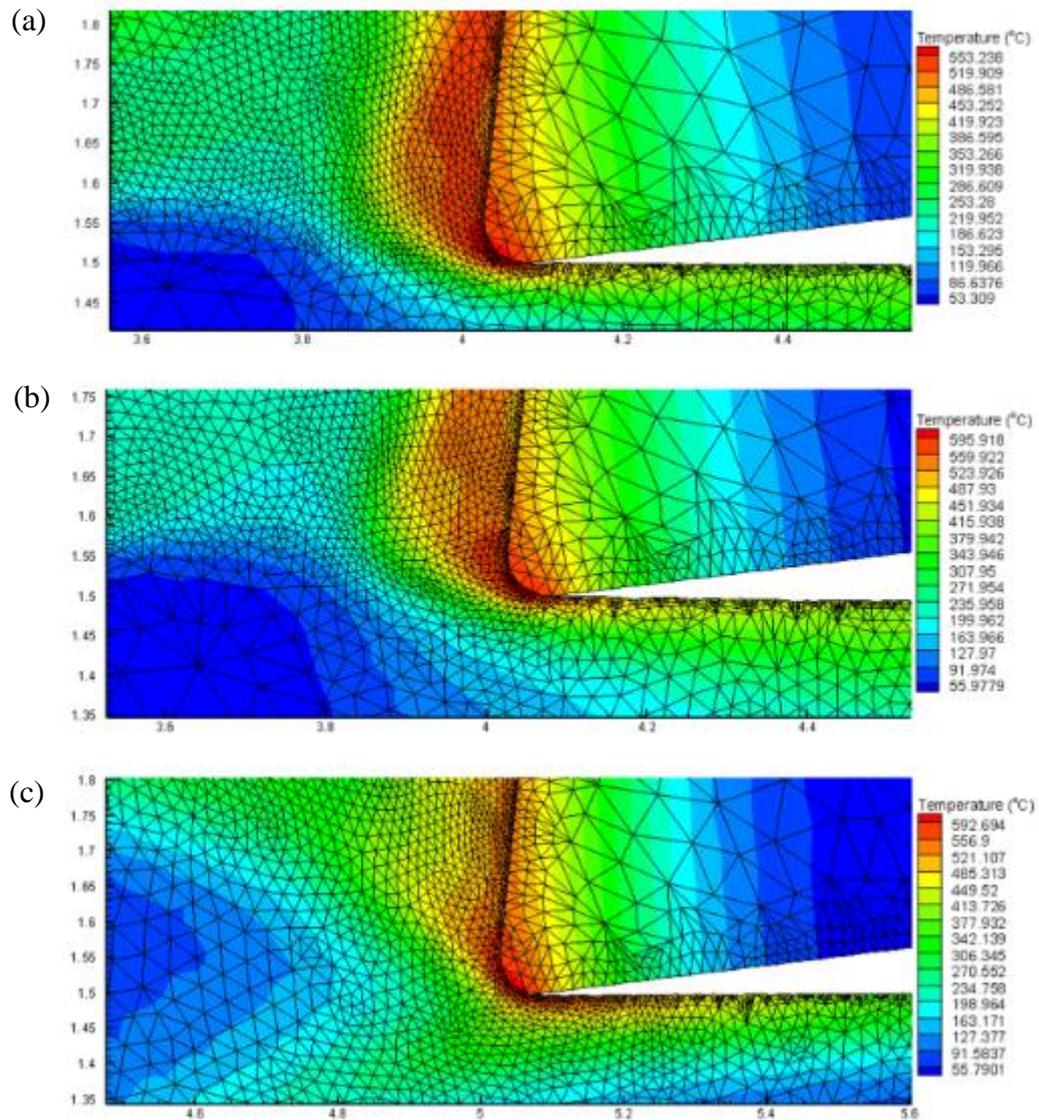


Figura 19: Distribuições de temperatura na interface cavaco/ferramenta no torneamento 2D com avanço 0,50 mm/rev e ferramenta de corte com geometria de quebra cavaco com velocidades de corte: (a) 240 m/min; (b) 360 m/min; (c) 480 m/min

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Das Figuras 16, 17, 18 e 19 depreende-se que as zonas de maior temperatura na ferramenta encontravam-se em suas pontas. Tu e Shi (2020) explicaram que esse fato se deve ao cavaco descontínuo do ferro fundido cinzento o que, por consequência, torna o contato entre o cavaco e a ferramenta muito rápido.

A fim de validar o modelo numérico obtido, todas as simulações numéricas foram comparadas aos resultados experimentais obtidos por Reis (2021), por meio da análise da temperatura do cavaco. Na Tabela 10 foram retratadas as temperaturas médias da superfície do cavaco para as todas as condições de corte tanto do modelo numérico proposto nesse trabalho quanto dos resultados experimentais de Reis (2021). As temperaturas médias dos cavacos no modelo numérico foram obtidas por meio da média das temperaturas das cinco

regiões de maiores temperaturas da superfície do cavaco. Vale ressaltar que os erros percentuais (originados devido a simplificação do modelo, devido também a homogeneidade do material simulado, ao fato de não ter adotado o critério de fratura frágil, a não especificação do revestimento utilizado nas ferramentas, a determinação da curva de fluxo do material usinado e a não consideração do desgaste das ferramentas), foram calculados por meio da Equação 1:

$$\text{Erro} = \frac{\text{Temperatura experimental} - \text{Temperatura numérica}}{\text{Temperatura experimental}} (\%) \quad (1)$$

Tabela 10: Resultados das temperaturas médias experimentais do cavaco e as obtidas por MEF

Teste	Ferramenta	Veloc. de Corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Temp. experimental média FC 0,02% Nb (°C)	Temp. experimental média FC 0,23% Nb (°C)	Temp. pelo MEF Média (°C)	Erro em relação ao FC 0,02% Nb	Erro em relação ao FC 0,23% Nb
1	Sem Quebra Cavaco	240	0,25	494,06	492,92	463,1	6,27%	6,05%
2	Sem Quebra Cavaco	240	0,5	564,5	570,26	487,6	13,62%	14,50%
3	Sem Quebra Cavaco	360	0,25	536,14	541,59	482,94	9,92%	10,83%
4	Sem Quebra Cavaco	360	0,5	590,96	593,42	521,1	11,82%	12,19%
5	Sem Quebra Cavaco	480	0,25	572,46	571	509,03	11,08%	10,85%
6	Sem Quebra Cavaco	480	0,5	604,51	606,37	536,97	11,17%	11,45%
7	Com Quebra Cavaco	240	0,25	481,84	482,48	456,96	5,16%	5,29%
8	Com Quebra Cavaco	240	0,5	545,1	555,9	486,58	10,74%	12,47%
9	Com Quebra Cavaco	360	0,25	538,75	539,58	479,9	10,92%	11,06%
10	Com Quebra Cavaco	360	0,5	575,81	582,1	523,96	9,00%	9,99%
11	Com Quebra Cavaco	480	0,25	573,23	570,56	493,15	13,97%	13,57%
12	Com Quebra Cavaco	480	0,5	599,67	600,85	521,11	12,10%	12,27%

Fonte: Reis (2021) e Pesquisa Direta (2021)

Da Tabela 10, observa-se que, independentemente do parâmetro de corte e condição de quebra-cavaco simulado, os erros foram inferiores à 15%. Gok (2015) e Rezende (2020) detalharam em suas pesquisas que erros inferiores à 15% permitem a validação do modelo numérico proposto.

Por meio de um teste de Tukey (Tabela 11) para comparações múltiplas das temperaturas médias simuladas e experimentais, conclui-se, ao nível de significância de 5% que não existe diferença significativa nas temperaturas dos cavacos para as amostras experimentadas em função do teor de nióbio, corroborando os resultados de Reis (2021), no entanto, as temperaturas experimentais são diferentes das temperaturas obtidas via modelagem numérica. Acredita-se que os distintos valores de tensão limite de resistência (σ_{LR}), apresentados na Tabela 9, justificam essa diferença.

Tabela 11: Informações de agrupamento usando Método de Tukey e 95% de confiança

Fator	N	Média	Agrupamento
Temp. experimental média Ferro Fundido Cinzento 0,02% Nb (°C)	12	556,4	A
Temp. experimental média Ferro Fundido Cinzento 0,23% Nb (°C)	12	558,9	A
Temp. pelo MEF Média (°C)	12	497,37	B
<i>Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.</i>			

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Validado o modelo numérico, justifica-se a discussão das Figuras 16, 17, 18 e 19 por meio das Figuras 20, 21 e 22.

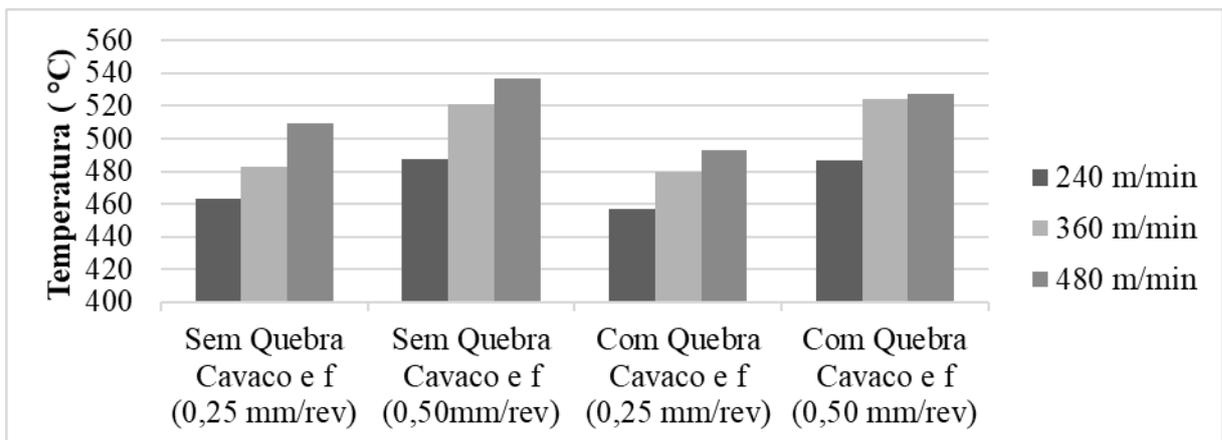


Figura 20: Influência da velocidade de corte nas temperaturas médias dos cavacos obtidos pelo modelo numérico
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

A partir da Figura 20 é possível observar a influência das velocidades de corte na temperatura do torneamento em conformidade com Machado *et al.* (2015). À medida em que se aumentou a velocidade de corte houve também uma maior geração de calor no processo, independente da ferramenta de corte possuir ou não quebra cavaco, o que implicou, consequentemente, na elevação da temperatura.

Pode-se verificar também a influência do avanço na temperatura. Da Figura 21, verificou-se que o aumento do avanço exigiu um maior esforço para a realização dos cortes e, consequentemente, também houve uma geração maior de calor na região de corte, de forma similar ao exposto por Reis (2021). Dessa maneira, a mais alta temperatura resultou da combinação de condição de corte mais extrema utilizada nesse trabalho ($f = 0,5$ mm/rev e $v_c = 480$ m/min).

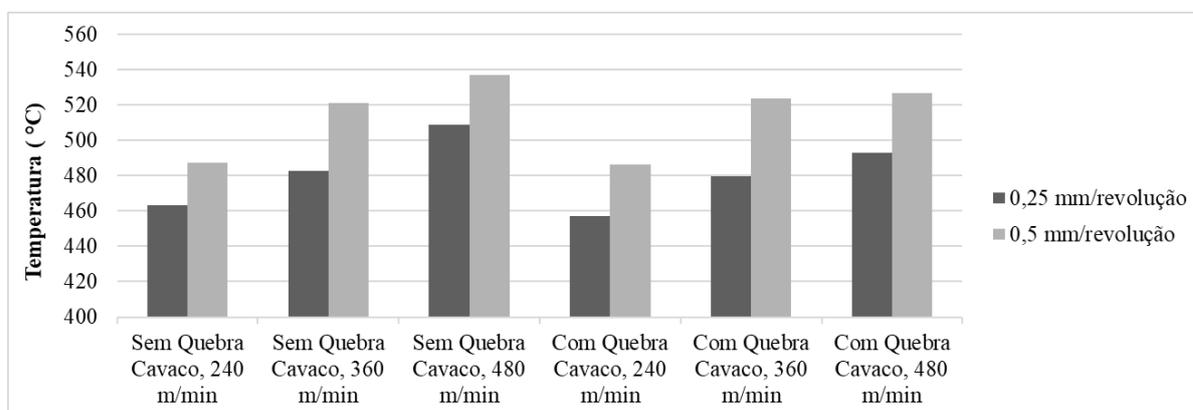


Figura 21: Influência do avanço nas temperaturas médias dos cavacos obtidos pelo modelo numérico
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Por fim, com relação à geometria do quebra-cavaco, é mostrado na Figura 22 que os testes realizados com a ferramenta sem quebra cavaco geraram uma temperatura mais alta para o cavaco quando comparados aos testes com a ferramenta com quebra cavaco, de forma semelhante a Reis (2021). Por meio da observação das seções das ferramentas de corte (Figuras 14 e 15), é possível verificar que a ferramenta com quebra cavaco possui uma geometria que facilita a retirada dos cavacos da zona de corte, o que diminuiu o tempo e o comprimento de contato deles com a ferramenta de corte.

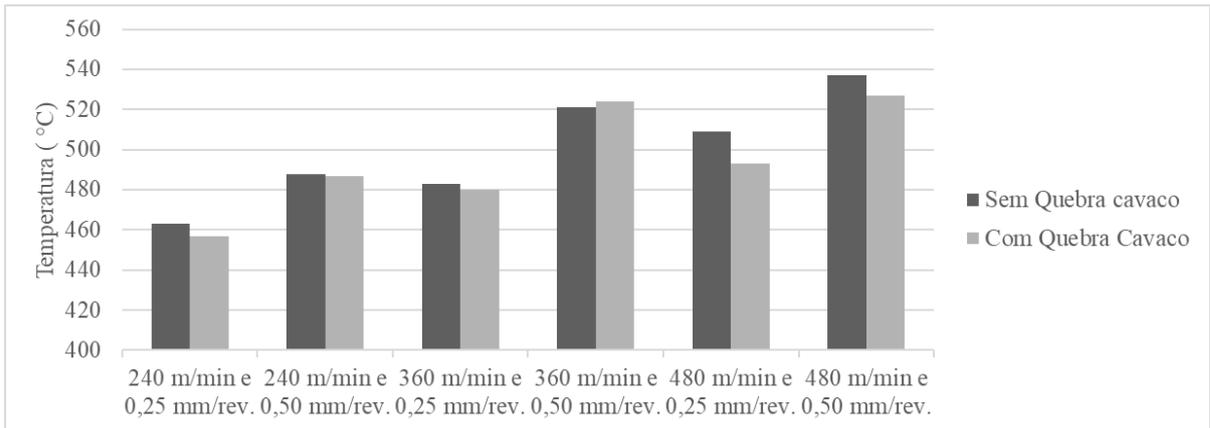


Figura 22: Influência da geometria do quebra cavaco nas temperaturas médias dos cavacos obtidos pelo modelo numérico

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

4.3 Método de elementos finitos para a força de corte

Os resultados obtidos numericamente para a força de corte também foram comparados aos resultados experimentais de Reis (2021). Na Tabela 12 foram retratados todos os dados que se referem tanto à análise experimental quanto numérica das forças de corte no processo de torneamento do ferro fundido cinzento. Com relação a análise numérica, as forças de corte obtidas representam a força média coletada a partir de valores da região de estabilidade da força de corte. Vale ressaltar que os erros foram calculados por meio da Equação 2:

$$Erro = \frac{\text{Força de corte experimental} - \text{Força de corte numérica}}{\text{Força de corte experimental}} \quad (2)$$

Tabela 12: Resultados das forças de corte médias experimentais e as obtidas por MEF

Ferramenta	Vel. de Corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Força de corte (F_c) experimental média FC 0,02% Nb (N)	Força de Corte (F_c) experimental média FC 0,23% Nb (N)	Força de corte (F_c) pelo MEF Média	Erro em relação ao FC 0,02% Nb	Erro em relação ao FC 0,23% Nb
Sem Quebra Cavaco	240	0,25	581,75	625,72	446,81	23,20%	28,59%
Sem Quebra Cavaco	240	0,5	882,95	916,72	744,1	15,73%	18,83%
Sem Quebra Cavaco	360	0,25	568,19	640,76	446,21	21,47%	30,36%
Sem Quebra Cavaco	360	0,5	888,08	918,91	757,56	14,70%	17,56%
Sem Quebra Cavaco	480	0,25	567,98	579,47	432,31	23,89%	25,40%
Sem Quebra Cavaco	480	0,5	908,33	879,09	744,16	18,07%	15,35%
Com Quebra Cavaco	240	0,25	550,25	599,45	433,18	21,28%	27,74%
Com Quebra Cavaco	240	0,5	833,45	876,04	744,33	10,69%	15,03%
Com Quebra Cavaco	360	0,25	571,29	584,06	436,56	23,58%	25,25%
Com Quebra Cavaco	360	0,5	841,23	871,53	744,56	11,49%	14,57%
Com Quebra Cavaco	480	0,25	561,75	541,6	427,76	23,85%	21,02%
Com Quebra Cavaco	480	0,5	846,73	871,64	687,93	18,75%	21,08%

Fonte: Reis (2021) e Pesquisa Direta (2021)

Os erros em relação à força de corte entre os resultados experimentais e numéricos foram maiores que 15%. Quando analisado o ferro fundido cinzento com 0,02% de nióbio tem-se os maiores erros encontrados para as condições de corte ($v_c = 480$ m/min e $f = 0,25$ mm/rev), em ambos tipos de ferramentas de corte utilizados. Já em relação ao ferro fundido cinzento com 0,23% de nióbio tem-se os maiores erros encontrados para as condições de corte ($v_c = 240$ m/min e $f = 0,25$ mm/rev), também em ambos os tipos de ferramentas de corte. Em

conformidade com Rezende (2020), justifica-se esse comportamento a partir das seguintes fontes de erro:

- simplificação do modelo numérico do corte ortogonal para 2D;
- não utilização do critério de fratura frágil;
- homogeneidade e das características do material simulado;
- ausência da escolha do coeficiente de atrito.

Logo, os erros discutidos acima não permitem a validação do modelo numérico proposto para a força de corte.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

O presente estudo teve por objetivo simular, por meio do método dos elementos finito, o processo de formação de cavacos no torneamento do ferro fundido cinzento, *Grey Iron ASTM A48 Class 30*, a partir de parâmetros de corte similares aos utilizados por Reis (2021). O objetivo da revisão bibliográfica foi fornecer os conceitos necessários para a realização e entendimento da simulação do processo de torneamento do ferro fundido cinzento. Os dados obtidos foram compilados no *software* Microsoft Excel®. Após isso, foi possível realizar a análise desses dados e responder à pergunta: como simular o processo de torneamento, com parâmetros pré-definidos, um ferro fundido cinzento comparando com os resultados obtidos por experimentos?

- O modelo analítico proposto, em relação a temperatura do cavaco, apresentou erros relativos próximos a 10,5%, fato que permitiu sua validação. Para todas as condições simuladas experimentalmente, foram encontradas temperaturas do cavaco inferiores às respectivas condições experimentais. Tal fato foi justificado à luz da menor tensão limite de resistência do material simulado comparado aos valores encontrados por Reis (2021) para seus corpos de prova.
- Com relação aos resultados obtidos para a temperatura do cavaco, a velocidade de corte, o avanço e a geometria da ferramenta apresentaram influência sobre os resultados.
- A menor temperatura do cavaco simulada (456,96 °C) foi obtida na condição mais leve de corte: ferramenta com quebra cavaco, velocidade de corte 240 m/min e avanço 0,25 mm/rev. Esse arranjo proporcionou o menor erro das condições simuladas (5,16% para o ferro fundido cinzento com adição de 0,02% de nióbio e 5,29% para o ferro fundido cinzento com adição de 0,23% de nióbio).
- A maior temperatura do cavaco simulada (536,95 °C) foi obtida na seguinte condição de corte: ferramenta sem quebra cavaco, velocidade de corte 480 m/min e avanço 0,50 mm/rev, estando em total acordo com a literatura. Esse arranjo proporcionou um erro mediano das condições simuladas (11,17% para o ferro fundido cinzento com adição de 0,02% de nióbio e 11,45% para o ferro fundido cinzento com adição de 0,23% de nióbio).

- Dentre as temperaturas obtidas por meio do modelo numérico as que apresentaram maior erro foram: 493,15 °C, onde foi utilizado ferramenta com quebra cavaco, velocidade de corte 480 m/min e avanço 0,25 mm/rev, possuindo erro de 13,97% em relação ao ferro fundido cinzento com 0,02% de nióbio; 487,6 °C, onde foi utilizado ferramenta de corte sem quebra cavaco, velocidade de corte de 240 m/min e avanço de 0,5 mm/rev, com erro de 14,50% em relação ao ferro fundido cinzento com 0,23% de nióbio.
- As forças de cortes obtidas por meio do modelo numérico mostraram-se distantes (maioria acima de 15%), sendo que o maior erro foi de 23,89% em comparação a condição do ferro fundido cinzento com 0,02% de nióbio com ferramenta sem quebra cavaco, com velocidade de corte de 480 m/min e avanço 0,25 mm/ver. Para a condição do ferro fundido cinzento com 0,23% de nióbio o maior erro foi de 30,36% com velocidade de corte 360 m/min e avanço de 0,25 mm/rev. Esses erros invalidaram o modelo numérico proposto e foram relacionados a simplificação do modelo 3D para 2D, da homogeneidade do material simulado, das propriedades mecânicas consideradas, da ausência de escolha do coeficiente de atrito e da não utilização de um critério de fratura frágil.
- As formas obtidas dos cavacos não apresentaram semelhança devido ao pequeno comprimento de corte (4 mm) utilizado na simulação.

5.2 Recomendações

A partir do conhecimento adquirido durante a realização deste trabalho, sugerem-se algumas possibilidades para trabalhos futuros.

1. Modelagem e análise numérica da operação de torneamento de ferro fundido cinzento a partir de ferramentas de corte revestidas.
2. Modelagem e análise numérica da operação de torneamento de ferro fundido cinzento com adição de nióbio considerando o desgaste das ferramentas.
3. Modelagem e análise numérica da operação de torneamento de ferro fundido cinzento com adição de nióbio considerando a heterogeneidade do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOU, Shaban et al. **Wear behaviour of grey cast iron with the presence of copper addition.** Advances in Mechanical Engineering, v. 10, n. 10, p. 1687814018804741, 2018.

ALMEIDA, Alcir R. B. **Reengenharia florestal: necessidade perante a evolução do mercado consumidor.** Revista da madeira. n. 21, p. 9, mar. /abr. 1998.

ALMEIDA, F. J. **O projetista pode tirar mais proveito do Método de Elementos Finitos.** Máquinas e Metais, n. 412, p. 116-127, 2000.

ALMEIDA, Paulo Samuel. **Processos de usinagem: utilização e aplicações das principais máquinas operatrizes.**-. 2015.

ALYRIO, Rovigati Danilo. **Métodos e Técnicas de Pesquisa em Administração.** Volume único – Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2009. 281p.

AMERICAN SOCIETY OF METAL. ASM Handbook: **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**, v.1, 1990.

ANTONIACOMI e SOUZA, **A Técnica Dos Múltiplos Domínios Aplicada À Geração De Malhas No Software Ansys Cfx-Mesh.** Conen 2010, Campina Grande, Paraíba.

ARAGÃO, José Wellington Marinho de; NETA, Maria Adelina Hayne Mendes: **Metologia Científica.** Salvador: UFBA, Faculdade de Educação, Superintendência de Educação a Distância, 2017, 51p: il.

ASSAN, Eloísio Ernesto. **Método dos elementos finitos: primeiros passos.** 2ª edição, São Paulo: Unicamp, 2003.

Associação Brasileira de Fundição (ABIFA). Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/primeiro-quadrimestre-de-2021-e-marcado-por-alta-de-quase-20-da-producao-de-fundidos/>>. Acesso em: 28/06/2021

ASTM A 48. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS.** Standard Specification for Gray Cast Iron, 1965.

BATHE, Klaus Jurgen. **Finite Element Procedures.** Prentice Hall: New Jersey, 1996.

BEDOLLA-JACUINDE, A. **Niobium in Cast Irons.** In: Progress in Metallic Alloys. IntechOpen, 2016.

- BELJHADI, S. et al. **Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 219, n. 7, p. 515-524, 2005.
- BERNS, H.; THEISEN, W. **Ferrous materials: steel and cast iron.** Springer Science & Business Media, 2008.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction.** New York: John Wiley & Sons, 2008.
- CASTELLO BRANCO, C. H., Beckert, Niobium Technical Report NbTR 05/84, CBMM, São Paulo (Brazil), 1984.
- CERETTI, E. et al. **Turning simulations using a three-dimensional FEM code.** Journal of Materials Processing Technology. Vol. 98, p. 99-103, 2000.
- CERVELIN, José Eduardo. **Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento.** 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- 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. 6º Edição. Publicado da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.** São Paulo, 1990.
- CHILDS, Thomas HC et al. **Metal machining: theory and applications.** Butterworth-Heinemann, 2000.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns – Revisão Técnica André Luiz V. da Costa e Silva – 4ª edição – São Paulo Edgard Blucher – 2008.**
- COLPAERT, H.; COSTA, A.L.V. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** Editora Blucher, 2008.
- DE SORDI, José O. **Desenvolvimento de projeto de pesquisa 1ª Ed.** São Paulo: Saraiva, 2017.
- DEGARMO, Ernest Paul et al. **Materials and process in manufacturing.** Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.
- DIAS, L.R.M.; DINIZ, A.E. **Effect of the gray cast iron microstructure on milling tool life and cutting force.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 35, n. 1, p. 17-29, 2013.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. “**Tecnologia da Usinagem dos Metais**”. 9ª ed. – São Paulo: Editora Artliber, 2014.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artliber Editora, 2006.

DUARTE, R.N. **Simulação Computacional: análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de autopeças**. Universidade Federal de Itajubá. Dissertação em engenharia de Produção. 2003. 187pg.

ELLIOTT, R. **Cast iron technology**. Butterworth-Heinemann, 1988

ELORZ, J.A.P.S.; GONZÁLEZ, D.F.; VERDEJA, L.P. **Physical Metallurgy of Cast Irons**. Springer, 2018.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Blucher, 1970.

FRANCKLIN, Alexandre Reis. **Um breve estudo sobre ferro fundido nodular**. Centro universitário Estadual da Zona Oeste. RJ, p. 17, 2009.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural do SEAD/UFRF – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa 6ª Ed.** São Paulo: Atlas, 2018

GIL, ANTONIO CARLOS. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. THIOLLENT, Michel. Metodologia da pesquisa - ação. 2. ed. São Paulo: Cortez, 1986

GOK, K. Measurement, v. 75, p. 57-68, 2015.

Goodrich, W.L. Iron **Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations**. Castings Engineering Handbook. AFS, 2003.

GUESSER, W.L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. Blucher, 2009.

GUO, Y.B.; YEN, D. W. **A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining**. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 155-156, p. 1350-1356, 2004.

HANNA, I. **Mechanical Properties of Niobium Alloyed Gray Iron**. 2011. 80f. Dissertação (Mestrado em Dinâmica Veicular, Engenharia Aeronáutica e Veicular) – Royal Institute of Technology, Estocolmo, 2011

HECT, R. L., DINWIDDIE, R. B., PORTER, W. D., WANG, H., **Thermal Transport Properties of Grey Cast Irons**, SAE paper, 1996.

HOLMGREN, D. **Review of thermal conductivity of cast iron**. International Journal of Cast Metals Research, v. 18, n. 6, p. 331-345, 2005.

HUI, H.H. **Simulação da formação de cavacos usando fem (finite elemento method) – temperatura e força**. 2007. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

JOHNSON, Gordon R.; COOK, William H. **Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures**. Engineering fracture mechanics, v. 21, n. 1, p. 31-48, 1985.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Springer, 2011.

LI, B. **An experimental investigation of dry cutting performance for machining gray cast iron with carbide coating tool**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 71, n. 5-8, p. 1093-1098, 2014

LJUSTINA, Goran; LARSSON, Ragnar; FAGERSTRÖM, Martin. **A FE based machining simulation methodology accounting for cast iron microstructure**. Finite elements in analysis and design, v. 80, p. 1-10, 2014.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.SILVA, M. B. D. **Teoria da usinagem dos materiais**. Blucher, 2ª Edição, 2015.

MACHADO, A. R.; BOEHS, L.; SANTOS, M. T.; GUESSER, W. L. **Usinagem de ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular**. IFM – Instituto Fabrica do Milênio, 2004.

MACKERLE, Jaroslav. **Finite element analysis and simulation of machining: an addendum: A bibliography (1996–2002)**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 43, n. 1, p. 103-114, 2003.

MALAKIZADI, Amir; SADIK, Ibrahim; NYBORG, Lars. **Wear mechanism of CBN inserts during machining of bimetal aluminum-grey cast iron engine block**. Procedia CIRP, v. 8, p. 188-193, 2013.

MALHOTRA, N.; ROCHA,I.; LAUDISIO, M.C. **Introdução à pesquisa de Marketing**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

MARIANI, F. E.; RÊGO, G. C.; BONELLA, P. G.; NETO, A. L.; TOTTEN, G. E.; CASTELETTI, L. C. **Wear Resistance of Niobium Carbide Layers Produced on Gray Cast Iron by Thermoreactive Treatments.** Journal of Materials Engineering and Performance, p. 1-7, 2020.

MASCARENHAS, Rafael. **Torneamento e fresamento: quais os cálculos usados nesses processos?** Cad.cursosguru.com.br. 22/10/2013. Disponível em: <<https://cad.cursosguru.com.br/torneamento-fresamento-quais-calculos-usados-nesses-processo/>> Acessado em: 17/06/2021.

MATTAR, F.N. **Pesquisa de marketing: metodologia, planejamento, execução e análise.** 2.ed. São Paulo: Atlas, 1994.

MENDAS, Mohammed; BENAYOUN, Stéphane. **Comparative study of abrasion via microindentation and microscratch tests of reinforced and unreinforced lamellar cast iron.** Friction, v. 7, n. 5, p. 457-465, 2019.

MODERN CASTING STAFF REPORT. **Faircast's Fresh Start, Modern Casting.** American Foundry Society, 2018.

MOHRBACHER, H.; WOYDT, M.; VLEUGELS, J.; HUANG, S. **Niobium Carbide—An Innovative and Sustainable High-Performance Material for Tooling, Friction and Wear Applications.** Advances in Materials Science for Environmental and Energy Technologies V: Ceramic Transactions, v. 260, p. 67-80, 2016.

MOHRBACHER, H.; ZHAI, Q. **Niobium alloying in gray cast iron for vehicle brake discs.** In: AIST Steel Properties and Applications Conference Proceedings-Combined with MS and T'11, Materials Science and Technology, p. 137-148, 2011.

NAVES, G.F.; CUNHA, J. **Simulação numérica do comportamento estrutural e pré-dimensionamento das estruturas arco e cúpula.** Revista Horizonte Científico, Uberlândia, n. 1, v. 5, p. 1-20, 2011.

NG, E.-G. et al. **Modelling of temperatura and forces When orthogonally machining hardened steel.** International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 39, p. 885-903, 1999.

NG, Eu-Gene; ASPINWALL, David K. **The effect of workpiece hardness and cutting speed on the machinability of AISI H13 hot work die steel when using PCBN tooling.** J. Manuf. Sci. Eng., v. 124, n. 3, p. 588-594, 2002.

NYLÉN, T. **Niobium in cast iron.** In: **International Symposium on Niobium.** 2001. p. 1-25

NYLÉN, T.. **A adição de nióbio em ferros fundidos.** Fundação e Serviços, São Paulo: Aranda Editora Técnica Cultural, v. 17, n. 177, p. 72-87, set. 2007

Oden, J. T.; Reddy, J. N. **An Introduction to the Mathematical Theory of the Finite Element Method.** [S.l.]: Dover, 2011. ISBN 978-0-486-46299-8.

OLIVEIRA, Izaias de. **Avaliação do comportamento de desgaste do ferro fundido cinzento FC25 com adição de antimônio.** 2017.

OLIVEIRA, Izaias de. **Avaliação do comportamento de desgaste do ferro fundido cinzento FC25 com adição de antimônio.** 2017.

OWEN, S.J., **A survey of unstructured mesh generation technology,** in: Proc. 7th Internat. Meshing Roundtable, Dearborn, MI, USA, October 1998.

PANTALÉ, Olivier et al. **2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects.** Computer methods in applied mechanics and engineering, v. 193, n. 39-41, p. 4383-4399, 2004.

PEREIRA, Fernando de Souza et al. **Torneamento em alta velocidade do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramenta de nitreto de silício.** 2012.

PÉREZ, R. A.; GAS, P.; MAUGIS, P. **Study of diffusion and reaction diffusion in Fe-C-Nb system.** Trans Tech Publications, Swizerland, n., p.163-169, 2007.

REIS, Bárbara Cristina Mendanha. **Influência da adição de nióbio sobre a usinabilidade de ferro fundido cinzento perlítico na operação de torneamento.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

REZENDE, Bruna Aparecida. **Modelagem analítica da temperatura de corte no torneamento do ferro fundido vermicular utilizando insertos de metal duro revestidos experimentalmente pelo processo sol-gel.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

RIBEIRO, Paulo Jorge Nunes. **Transformação de fase em ferro fundido cinzento de matriz perlítica induzida pelo processo de eletroerosão.** 2013.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa Social: métodos e técnicas.** São Paulo: Atlas, 1999.

SAMPIEIRI, R.H.; COLLADO, C.F.; LUCIO, M.D.P.B. **Metodologia de pesquisa**. 5 ed. São Paulo: Mc-Graw-Hill, 2010.

SILVA, Marcos Alexandre da. **Efeito do elemento de liga nióbio na condutividade térmica, microestrutura e propriedades mecânicas de uma liga de ferro fundido cinzento**. 2017.

SILVA, R. C. S.C. **Dissolução de ferronióbio em ferro fundido**. 2000. 75 f. Dissertação (Mestre) - Curso de Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SOO, S. L.; ASPINWALL, D. K. **Developments in modelling of metal cutting processes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 221, n. 4, p. 197-211, 2007.

SORIANO, Humberto Lima. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. São Paulo: EDUSP, 2003.

SOUSA, T. L. C. **Análise estrutural e dinâmica de ventilador industrial** - Trabalho de Conclusão de Curso - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

SOUTO FILHO, Marcello Varella. 2002. 110 f. Mestrado (em engenharia de estruturas). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2002.

SOUZA SANTOS, A. B., CASTELLO **Modelagem numérica de reforço estrutural em vigas de concreto armado**.BRANCO, C. H., **Metalurgia dos ferros Fundidos cinzentos e nodulares**, São Paulo; Editora IPT (1991).

SOUZA, Ludivar Junior de et al. **Avaliação da influência da microestrutura de ferro fundido cinzento FC-15 sobre as características de usinagem e rugosidade de peças fundidas**. 2019.

SOUZA, Remo Magalhães. **O problema dos elementos finitos aplicado a condução de calor**. Material Didático. Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

SOUZA, Tania Nogueira Fonseca. **Produção e caracterização física e mecânica de ferros fundidos nodulares e ferros fundidos nodulares austemperados com adição de Nióbio**. 2012.

SWEDEN. **A adição de nióbio em ferros fundidos**. Fundação e Serviços. p. 72 - 86. set 2001

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. Metal cutting. Butterworth-Heinemann, 2000.

TU, Lihui; SHI, Weimin. **Establish Using FEM Method of Constitutive Model for Chip Formation in the Cutting Process of Gray Cast Iron.** Metals, v. 10, n. 1, p. 33, 2020.

VIDAL, DOUGLAS FERREIRA. **Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino.** 2013. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado.

VOIGT, R.C.; MARWANGA, R. O.; COHEN, P. H. **Machinability of gray iron—mechanics of chip formation.** International Journal of Cast Metals Research, v. 11, n. 6, p. 567-572, 1999.

WEI, P. A. N. G. **A Study on Melting Technique of HT300-Grade Hi-Strength Gray Iron for Cylinder Blocks and Heads [J].** Modern Cast Iron, v. 6, 2007.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – Parte I.** Tradução do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen” de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis, 2002.

ZHU, Xiaoming; WANG, Yongzhang; FU, Hongya. **A 3-D simulation system for milling machining based on STEP-NC.** In: 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE, 2006. p. 6137-6141.