



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**Matheus Luz Alves**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NO  
ENCRUAMENTO DE UM AÇO HADFIELD.**

**OURO PRETO - MG**  
**2021**

**MATHEUS LUZ ALVES**  
**matheus.luz@aluno.ufop.edu.br**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NO  
ENCRUAMENTO DE UM AÇO HADFIELD.**

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. Igor César Pereira

**OURO PRETO – MG**  
**2021**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A474a Alves, Matheus Luz .

Análise da influência dos parâmetros de corte no encruamento de um aço HADFIELD. [manuscrito] / Matheus Luz Alves. - 2021.  
42 f.

Orientador: Prof. Dr. Igor César Pereira.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Fresagem (Trabalhos em metal) . 2. Aço - Hadfield. 3. Deformações e tensões - Encruamento. I. Pereira, Igor César . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA MECANICA



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Matheus Luz Alves**

**Análise da influência dos parâmetros de corte no encruamento de um aço Hadfield**

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

Aprovada em 16 de dezembro de 2021

**Membros da banca**

DSc - Igor César Pereira - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto  
DSc - Edson Alves Figueira Junior - Universidade Federal de Ouro Preto  
DSc - Gustavo Paulinelli Guimarães - Universidade Federal de Ouro Preto

Igor César Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/12/2021



Documento assinado eletronicamente por **Igor Cezar Pereira, COORDENADOR(A) DE CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**, em 20/12/2021, às 10:20, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0260904** e o código CRC **1B26C548**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.013403/2021-49

SEI nº 0260904

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: - www.ufop.br

A minha mãe dedico mais esta etapa vencida.

A minha família, pelo carinho e principalmente meus primos, meu irmão e minha namorada pelo amor.

A República Vira Saia, meu muito obrigado!

## **AGRADECIMENTO**

Ao meu orientador Igor César Pereira, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o meu crescimento pessoal.

A minha querida república Vira Saia, por mostrar que casa é onde o coração está acolhido!

Ao CAEMEC por ser o melhor Centro Acadêmico da Escola de Minas e por me ensinar a importância de se dedicar por um bem maior.

Aos meus irmãos republicanos de período.

Aos meus amigos da cantina e da mecânica, pois sem vocês seria impossível.

A minha família por estarem sempre do meu lado.

A minha amada namorada Cristiana, muito obrigado por todo companheirismo nessa jornada.

*“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.*

Martin Luther King

## RESUMO

A usinagem, processo de remoção de cavacos, é reconhecida como a técnica de fabricação mais popular do mundo. Dentre as diversas metodologias de produção abrangidas por ela, vale enfatizar a de fresamento, uma vez que tem vantagens como altas taxas de remoção e obtenção de possíveis superfícies de elevada qualidade e complexidade. Já o aço Hadfield é uma liga não magnética com composição química usual de 1 a 1,4% em peso de Carbono e de 10 a 14% em peso de manganês, que apresenta alta capacidade de encruamento, alta ductilidade, microestrutura austenítica e característica lubrificante. Dessa forma, conclui-se que o aço Hadfield possui variada gama de aplicabilidade, o que justifica a necessidade de estudo e análise da influência dos parâmetros de corte no encruamento dele juntos as possíveis transformações de fases da microestrutura. Para tanto, usou-se corpos provas inicialmente cortados por máquina de corte por eletroerosão a fio, Eletrocut AR35, e após fez-se o fresamento seguido do lixamento, polimento e aplicação de reagente Nital 4% por imersão durante 30 segundos e tudo foi analisado por microscopia eletrônica. Mediante ao método supracitado, obteve-se como resultado 3 corpos de provas sem alterações visíveis e um 1 corpo de prova apresentando pequenas maclas de deformação em sua microestrutura. Portanto, conclui-se que o surgimento de maclas pode ser obtido com condições mais severas de avanço e profundidade de corte e recomenda-se completar o estudo realizado com ensaio usando fluido de corte, ferramenta já desgastada anteriormente e adotando condições de cortes mais severas desde o início.

**Palavras-chave:** Processo de usinagem, Fresamento, Aço Hadfield, Encruamento.

## ABSTRACT

*Machining process, the chip removal process, is recognized as the most popular manufacturing technique in the world. Among the various production methodologies covered by it, it is worth emphasizing milling, as it has advantages such as high removal rates and obtaining possible surfaces of high quality and complexity. Hadfield steel, on the other hand, is a non-magnetic alloy with a usual chemical composition of 1 to 1.4% by weight of Carbon and 10 to 14% by weight of manganese, which has high work hardening, high ductility, austenitic microstructure and lubricating characteristic. Thus, it is concluded that Hadfield steel has a wide range of applicability, which justifies the need to study and analyze the influence of the cutting parameters on its work hardening together with the possible phase transformations of the microstructure. For this purpose, test specimens were used, initially cut by a wire EDM (Electrical Discharge Machining) cutting machine, Eletrocut AR35, and then milling followed by sanding, polishing and application of 4% Nital reagent by immersion for 30 seconds and everything was analyzed by electron microscopy. Using the above-mentioned method, the result was 3 specimens without visible changes and a 1 specimen showing small deformation marks in its microstructure. Therefore, it is concluded that the appearance of macules can be obtained with more severe conditions of advance and cutting depth and it is recommended to complete the study carried out with testing using cutting fluid, a tool that has already been worn out previously and adopting more severe cutting conditions since the beginning.*

*Key-words: Machining process, Milling, Hadfield steel, hardening.*

**LISTA DE SIMBOLOS**

$V_c$  – Velocidade de corte  
 $f$  – Avanço [mm/rev]  
 $A_p$  – Profundidade de corte [mm]  
 $F_u$  – Força de usinagem  
 $F_c$  – Força de corte  
 $F_f$  – Força de avanço  
 $F_p$  – Força passiva  
 $L_c$  – Percurso de corte  
 $L_f$  – Percurso de avanço  
 $L_e$  – Percurso efetivo de corte  
 $h$  – Espessura de corte  
 $\psi$  – Letra grega Psi, representa o Ângulo de contato  
 $A$  - Área  
 $K_s$  – Pressão específica de corte  
EFE – Energia de falha de empilhamento  
Mpa – Megapascal  
rev – Revolução

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo no processo de fresamento. ....	5
Figura 2- Fresamento tangencial e os respectivos percursos de corte, avanço e efetivo. Os dentes 1 e 2 mostram o movimento da fresa. ....	6
Figura 3- Ilustração dos tipos fundamentais do processo de fresamento. ....	7
Figura 4- Tipos de fresamento frontal: a) fresamento em cheio, b) fresamento parcial, c) fresamento de face. ....	8
Figura 5- Fresamento discordante e fresamento concordante. ....	9
Figura 6- Forças de usinagem durante o fresamento tangencial e suas respectivas componentes. ....	10
Figura 7 - Classes do aço Hadfield. ....	12
Figura 8 - Diagrama de equilíbrio para o aço C-Mn com 13% de Mn. ....	12
Figura 9 - Temperatura de austenitização para os Aços austenítico manganês com 13%. ....	13
Figura 10 - Células unitárias Cúbica de Face Centrado e Tetragonal de Corpo Centrado. ....	14
Figura 11 - Modelo esquemático de transformação martensítica. ....	15
Figura 12 - Modelo esquemático de deformação por maclação. ....	15
Figura 13 - Energia de Falha de Empilhamento em função da temperatura para um aço Twip. ....	16
Figura 14 - Maclas de deformação de um aço Hadfield. ....	16
Figura 15 - Corpos de prova do aço Hadfield. ....	18
Figura 16 - Processo de fresamento dos corpos de prova. ....	20
Figura 17 – Microestrutura do aço Hadfield pós processo de fresamento com aumento de 100x. Fonte: Pesquisa direta (2021). ....	21
Figura 18 - Microestrutura do aço Hadfield após processo de fresamento com aumento de 200x. ....	21
Figura 19 - Microestrutura do aço Hadfield após o ensaio B com aumento de 200x. ....	22

Figura 20 - Microestrutura do aço Hadfield após o ensaio C e com aumento de 200x.....	23
Figura 21 - Microestrutura do aço Hadfield após o ensaio D e com aumento de 200x. ....	24
Figura 22 - Microestrutura do aço Hadfield após o ensaio D e com aumento de 200x. ....	24

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composição do aço Hadfield utilizado. ....	18
Tabela 2 – Parâmetros de corte utilizado no processo de fresamento. ....	19

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral .....	3
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Processo de Fresamento.....	5
2.1.1	Operações de fresamento.....	7
2.2	Forças no processo de fresamento .....	9
2.2.1	Variáveis que influenciam as forças de usinagem.....	10
2.3	Alteração da integridade superficial no fresamento. ....	11
2.4	Aço Hadfield.....	12
2.5	Alterações devido à deformação do aço Hadfield. ....	14
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>17</b>
3.1	Tipos de Pesquisa .....	17
3.2	Materiais e métodos.....	18
3.3	Variáveis e indicadores.....	20
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>25</b>
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>26</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

A usinagem é reconhecida como o processo de fabricação mais popular do mundo, a qual transforma em cavacos cerca de 10% de toda produção de metais. Esses processos tem como característica principal a remoção de cavacos, que pode ser definido como porção de material retirada pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular (MACHADO *et al*, 2015).

Em meio aos diversos processos existentes, certo grupo de operações tem mais destaque que os demais, sendo considerados os principais da área. Sendo eles, Torneamento, Faceamento, Perfilamento, Sangramento, Recartilhamento, Furação, Alargamento, Rebaixamento, Mandrilamento, Brochamento, Rosqueamento e Fresamento. É importante ressaltar que todas as operações citadas podem ser subdivididas em desbaste e acabamento. Durante o desbaste, o foco é garantir elevada taxa de remoção de material, enquanto, no acabamento, busca-se remover o sobremetal deixado pela operação de desbaste e assim garantir que a qualidade final do produto seja excelente (FERRARESI, 1970).

Diante do exposto, vale enfatizar o processo de fresamento, que possui diversas variações de máquinas utilizadas, movimento da peça e tipos de ferramentas. Este tem como objetivo operações que buscam como resultado ranhuras, rasgos, perfis, contornos, cavidades, roscas, superfícies planas e outras. Dentre suas vantagens de processo, cita-se as altas taxas de remoção e a obtenção de possíveis superfícies de elevada qualidade e complexidade (KRATOCHVIL, 2004).

Ademais, sabe-se que as variáveis destes processos são influenciadas com base no objetivo final do operador e, principalmente, devido as características do material da peça. Sendo esses parâmetros a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. Dessa forma, é necessário conhecer as propriedades do material a ser usinado para que se mantenha a integridade física e vida útil do conjunto máquina/ferramenta.

O aço Hadfield, criado em 1882, por Sir Robert Hadfield, é uma liga não magnética que, usualmente, tem, em sua composição química, de 1 a 1,4% em peso de Carbono e de 10 a 14% em peso de manganês (JAFARIAN *et al.*, 2021). Anos mais tarde, por apresentar grande capacidade de encruamento, alta ductilidade e microestrutura austenítica, além de sua

característica lubrificante, a qual amplifica sua aplicabilidade, esse mesmo aço ainda é um grande avanço tecnológico para a sociedade.

Diante do exposto, devido as suas características mecânicas supracitadas, esse metal recebeu boa aceitação como material de grande utilidade para engenharia, especialmente por sua capacidade excepcional de encruar. Dessa forma, diversos segmentos da indústria adotaram o uso do aço Hadfield, como siderurgia, minas, pedreiras, perfuração de petróleo, dentre outros. Sendo que esse metal também é usado em equipamentos de manuseio e processamento, como britadores, dentes de escavadoras, moinhos de escavação etc (CHIAVERINI, 1996). Tal aplicabilidade pode ser explicada por englobar situações em que há necessidade de equipamentos com alta tenacidade e ductilidade, boa resistência ao desgaste e capacidade de sofrer endurecimento em trabalho, além de que esse metal, devido seu efeito lubrificante, é almejado em situações que contenham desgaste, especificamente o abrasivo.

Ainda é interessante denotar que a capacidade de encruar do aço em questão é justificada por fenômenos como a formação de maclas de deformação, as quais atuam como barreiras que impedem o movimento das discordâncias (LIU *et al*, 2016). Ademais, vale pontuar que as propriedades de endurecimento ao trabalho desse metal só podem ser obtidas por meio de cargas de alto impacto e sob estresse, portanto, logo entende-se que, em baixo impacto de carga, suas propriedades de encruamento se tornam ruins. Dessa forma, conclui-se que sua utilização dele é válida, apenas, quando as peças não necessitam de suportar a deformação plástica, pois tal aço possui alta deformação em serviço (ASM HANDBOOK, 1993).

Por fim, com a modernização das ciências, os aços Hadfield puderam sofrer modificações na sua estrutura química e passar por diferentes processos mecânicos, a fim de se tornarem mais vantajosos às esferas de produção. Dessa forma, ainda são necessários estudos para melhor compreender suas diferentes propriedades.

Com isso, após as informações evidenciadas, surge a seguinte pergunta:

**Como os parâmetros de corte influenciam no encruamento de um aço Hadfield, no processo de fresamento?**

## 1.2 Justificativa

De acordo com Machado *et al* (2015), o processo de usinagem é o mais reconhecido dos processos de fabricação do mundo, além de ser responsável pela renda de dezenas de milhões de pessoas. Dito isso, pode-se notar que esse processo está em constante evolução, buscando a melhoria e eficiência dos métodos e matérias utilizados no meio. Consequentemente, gerando milhões de empregos ao redor do planeta.

Kratochvil *et al* (2004) ressalta a importância de se analisar corretamente todos as variáveis que podem influenciar durante o processo de fresamento, sejam elas das máquinas ou das ferramentas.

Em relação ao material a ser usinado, conclui-se que o aço Hadfield possui uma gama de aplicabilidade muito variada, além da grande capacidade de encruar (CHIAVERRINI 1996). Sendo principalmente utilizado em situações de trabalho pesado, como setores de mineração, agrícolas e de construção civil.

Sendo assim, a usinagem do aço Hadfield pelo processo de fresamento permitirá a análise da influência do encruamento na microdureza da peça e as possíveis transformações de fases da microestrutura.

Esse trabalho consistiu na experimentação da variação dos parâmetros de corte do processo de fresamento e na análise da influência destes na microestrutura. Por fim, as técnicas e estudos desenvolvidos irão contribuir de certa forma para trabalhos futuros e desenvolvimento profissional acadêmico.

## 1.3 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é a análise e a observação do encruamento na superfície usinada de um aço Hadfield, durante o processo de fresamento, com o intuito de estudar a micrografia e o surgimento de possíveis maclas de deformação.

### 1.3.1 Geral

Observação do encruamento na superfície usinada de um aço Hadfield, durante o processo de fresamento.

### **1.3.2 Específicos**

- Analisar a influência dos parâmetros de usinagem no encruamento do aço. Sendo esses parâmetros a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte;
- Analisar a micrografia do aço após processo de fresamento.

### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Esse trabalho será dividido em 5 capítulos com seus respectivos subitens, sendo que o primeiro abrange a formulação da pergunta problema que norteia a justificativa da realização do trabalho, junto aos seus objetivos gerais e específicos.

Já o capítulo 2 tem o propósito de elucidar p conteúdo teórico acerca do material e técnicas envolvidas no estudo, com ênfase em exibir informações e conceitos de maior destaque para o trabalho. Em relação ao terceiro capítulo, nele se expõe a forma como foi construído o método usado para a realização da análise em questão.

Por fim, o capítulo 4 abarca o resultado das amostras analisadas no presente estudo e o capítulo 5 especifica as conclusões e recomendações para trabalhos posteriores mediante ao exposto no penúltimo capítulo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processo de Fresamento

O processo de fresamento exerce uma grande função dentre os processos de fabricação. De modo a facilitar o estudo desse processo, é preciso exemplificar as grandezas físicas envolvidas durante o corte. Com a finalidade de obter as superfícies desejadas, é necessário definir um movimento relativo entre a peça e a ferramenta, escolhido de forma correta (MACHADO *et al*, 2015).

Diante do exposto, para executar o estudo do processo de fresamento, é necessário o entendimento sobre os conceitos básicos dos movimentos e relações geométricas do processo de usinagem. É válido ressaltar que a análise de movimento relativo entre a peça e a ferramenta leva em consideração a peça parada. Além disso, também é importante frisar que existem dois tipos de movimentos, divididos entre os que causam diretamente a saída do cavaco, ativos e os que não fazem parte dessa formação direta, inativos. Dentre estas grandezas, analisara-se os movimentos ativos (FERRARESI, 1970).

Por conseguinte, o primeiro a ser descrito é o movimento de corte, cujo é definido como movimento relativo entre a peça e ferramenta, com a ausência do movimento de avanço, tendo como resultado uma única retirada de cavaco. Em seguida, tem-se o movimento de avanço, o qual é realizado entre a peça e a aresta de corte e com a presença do movimento de corte, o resultado é a retirada contínua de cavaco. Por fim, com a execução simultânea dos movimentos de corte e de avanço, como resultado obtém-se o movimento efetivo de corte (FERRARESI, 1970). Estes movimentos citados podem ser exemplificados na figura 1.

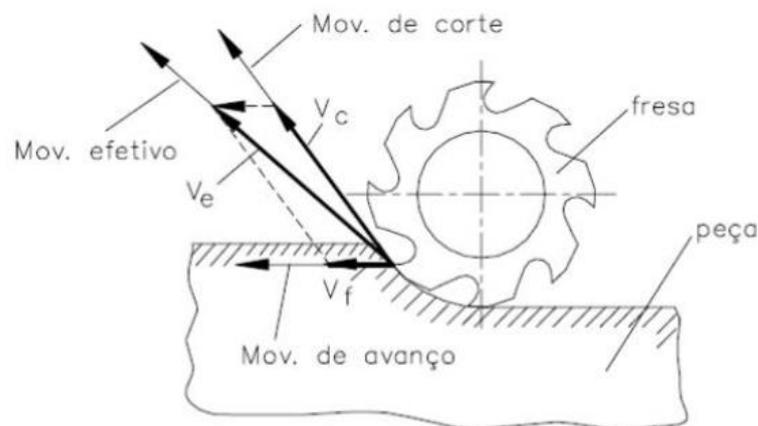


Figura 1- Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo no processo de fresamento. Fonte: Machado *et al* (2013).

Ainda mais sobre as grandezas físicas envolvidas no processo, também é necessário esclarecer e diferenciar as direções dos movimentos de corte. Estas são divididas de forma análoga aos movimentos de corte, sendo elas a direção de corte, direção de avanço e direção efetiva. A direção de corte é definida como a direção instantânea no movimento de corte, enquanto a direção de avanço é a direção instantânea do movimento de avanço. De maneira similar, a direção efetiva de corte é a direção instantânea do movimento efetivo de corte (MACHADO *et al*, 2015).

Ademais, outra grandeza a ser definida é o percurso da ferramenta na peça, o qual se diferencia em percurso de corte, percurso de avanço e percurso efetivo de corte. Por conseguinte, o percurso de corte ( $L_c$ ) é definido como o espaço percorrido pela ferramenta, segundo a direção de corte. Em seguida, o percurso de avanço ( $L_f$ ) pode ser definido como o espaço percorrido pela ferramenta, segundo a direção de avanço. Em algumas situações que existem o movimento de avanço principal e lateral, deve-se distinguir as componentes do percurso de avanço. Por fim, o percurso efetivo de corte ( $L_e$ ) é o espaço percorrido pela ferramenta, segundo o percurso de avanço (MACHADO *et al*, 2015). De modo a ilustrar os percursos citados, pode se observar a figura 2.

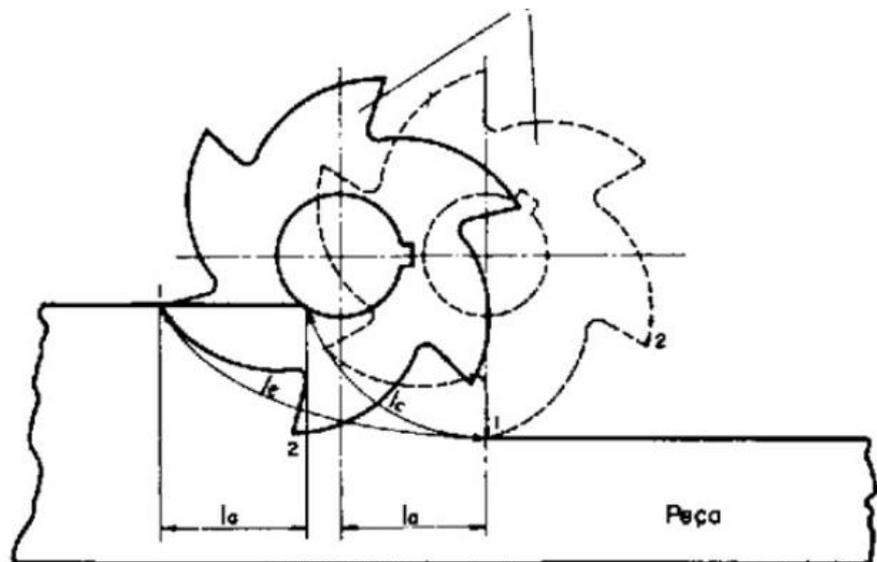


Figura 2- Fresamento tangencial e os respectivos percursos de corte, avanço e efetivo. Os dentes 1 e 2 mostram o movimento da fresa.

Fonte: Ferraresi (1970).

### 2.1.1 Operações de fresamento

Dentre o processo de fresamento, existem os tipos fundamentais. Estes são classificados quanto a posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta, sendo fresamento horizontal quando o eixo estiver na posição horizontal, fresamento inclinado ou vertical. Além da classificação por posição, também se classifica os tipos de fresamento pela disposição dos dentes, dividido em dois tipos, o fresamento tangencial e o fresamento frontal. O tangencial é definido como operação em que o eixo da fresa é paralelo a superfície que está sendo usinada. Enquanto no fresamento frontal, o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada (DINIZ *et al*, 2014). Desse modo, os tipos de fresamento apresentados podem ser demonstrados na figura 3.

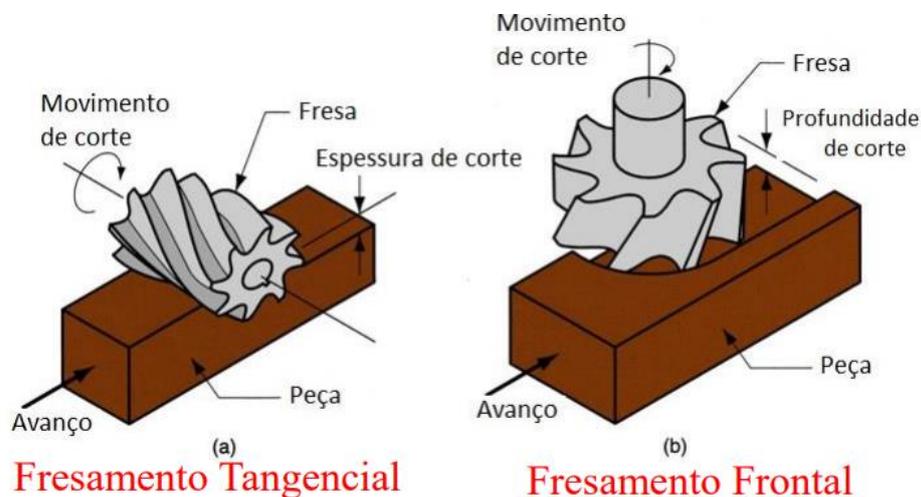


Figura 3- Ilustração dos tipos fundamentais do processo de fresamento.  
Fonte: Jasinevicius (2019).

Diante do exposto, vale ressaltar que ambos os tipos de fresamento ainda podem ser classificados com seus subtipos. O fresamento frontal é distinguido em três formas de fresar, sendo o fresamento em cheio, fresamento parcial e fresamento de face. Estes tipos são diferenciados como: fresamento frontal tem-se que a fresa é sempre menor que a peça e penetra por inteiro a superfície usinada, enquanto no parcial apenas uma parte da fresa penetra na superfície e a outra fica para fora, e no fresamento de face a peça sempre será menor que a fresa (DIB *et al*, 2015). Por fim, os subtipos de fresamento frontal podem ser exemplificados na figura 2.

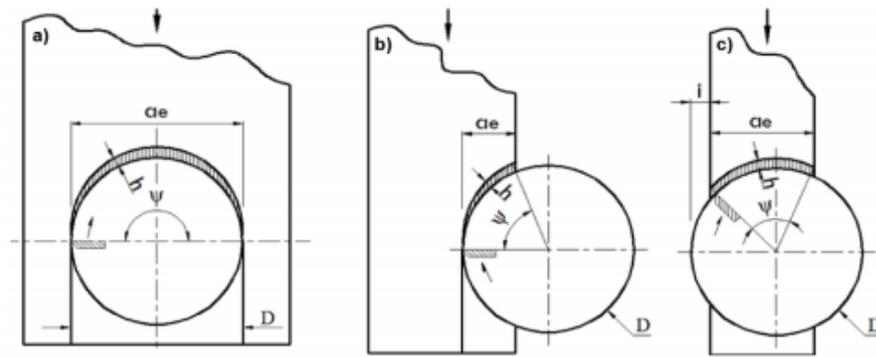


Figura 4- Tipos de fresamento frontal: a) fresamento em cheio, b) fresamento parcial, c) fresamento de face.  
Fonte: Dib *et al* (2015).

Em concordância com a figura 2, é possível observar alguns parâmetros do processo de fresamento, como a espessura de corte ( $h$ ), que está localizada dentro da região do ângulo de contato ( $\psi$ ) e varia. Ademais, pode-se afirmar que essa espessura varia conforme o movimento de giro e avanço da fresa (DIB *et al*, 2015).

De acordo com Rigatti (2010), além dos tipos apresentados, o fresamento também pode ser analisado quanto ao sentido do movimento de avanço, podendo ser concordante ou discordante. No fresamento concordante, o sentido do movimento de avanço é o mesmo do movimento giratório da fresa, enquanto no discordante a situação é oposta.

O processo de fresamento discordante pode ser definido como aquele em que o ângulo  $\psi$  cresce de zero a um valor máximo. Durante este processo, a espessura de corte  $h_0$  aumenta progressivamente até um valor máximo. Quando se inicia o processo de fresamento, realiza-se o contato da aresta de corte com a peça, resultando em um excessivo atrito, que surge devido a deformação plástica na interface ferramenta/peça, ao invés da formação do cavaco, e em altas temperaturas. Outrossim, devido a deformação plástica que ocorre na superfície usinada, tem-se o encruamento do material e conseqüentemente um aumento da resistência mecânica e dureza da superfície. Em decorrência do processo, em um certo momento, a pressão da aresta de corte atinge um valor capaz de vencer a tensão de ruptura da peça e assim retira uma porção de material em formato de vírgula ao final do movimento de corte. Por fim, durante o contato de cada dente da fresa, as forças de usinagem que surgem, tendem a empurrar a peça no sentido oposto ao movimento de avanço (DINIZ *et al*, 2014). Por outro lado, Dib *et al* (2015) diz que é provável que esse processo acelera o desgaste da ferramenta por causa dos altos atritos iniciais, diminuindo sua vida útil.

No processo de fresamento concordante as forças de usinagem tendem a empurrar a peça no sentido do movimento de avanço. Este empurro ocorre com força máxima no início do

movimento de corte, e conforme ocorre a variação de espessura, a força se torna mínima no final do movimento. Deste modo, no início do processo o dente da fresa entra em contato com a espessura máxima, de forma que a aresta não entre em contato com a superfície encruada no corte antecedente. Vale ressaltar que não existe excesso de atrito na decorrência da penetração da ferramenta na peça, pois o corte inicia cisalhando o material (Dib *et al*, 2015). Por fim, o fresamento discordante e concordante podem ser exemplificados na figura 5.

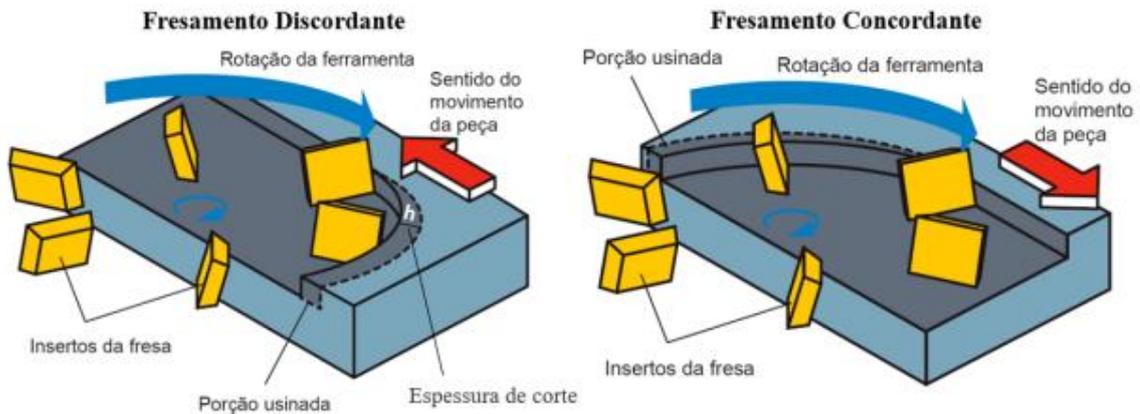


Figura 5- Fresamento discordante e fresamento concordante.  
Fonte: Adaptado de Mitsubishi (2015).

Por último, é possível observar os sentidos dos movimentos das peças em seus respectivos fresamentos.

## 2.2 Forças no processo de fresamento

Com objetivo de realizar o processo, antes é necessário ter o conhecimento prévio sobre as forças de usinagem que atuam na cunha de corte. Tudo isso, a fim de conseguir determinar com clareza as condições de corte, além de ser um critério para determinar a usinabilidade de peças e analisar mecanismos de desgaste, o que impacta diretamente na viabilidade econômica do processo. Diante do exposto, durante a usinagem surgem forças que atuam no processo, como na aresta de corte que se tem a força de usinagem ( $F_u$ ) (MACHADO *et al*, 2015).

Ademais, por se tratar de um processo tridimensional, essa força possui suas componentes e pode ser subdivididas em força de corte  $F_c$ , força de avanço  $F_f$  e força passiva  $F_p$ . A força de corte pode ser definida como a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, fornecida pela velocidade de corte. A força de avanço também é definida como a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, mas na direção de

avanço e dada pela velocidade de avanço. Por fim, a força passiva ou força de profundidade é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho. Com intuito de melhor ilustrar o que foi dito, pode-se observar o desenho esquemático como na figura 6 (FERRARESI 1970).

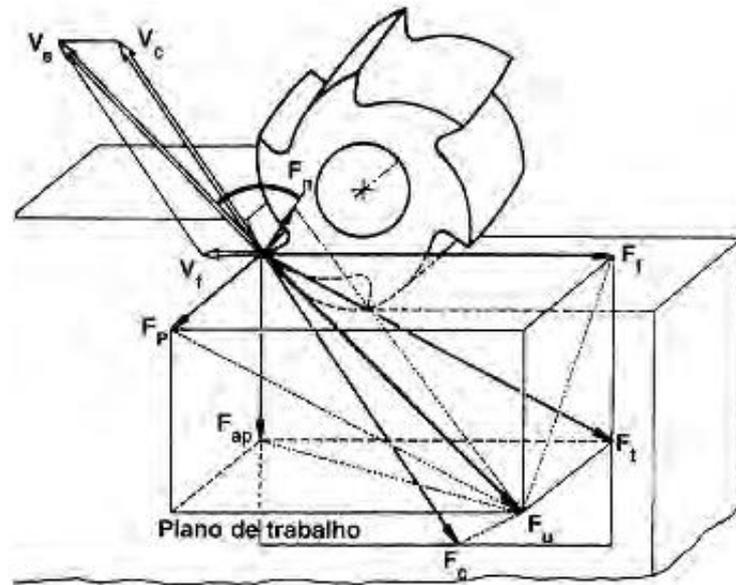


Figura 6- Forças de usinagem durante o fresamento tangencial e suas respectivas componentes. Fonte: Ferraresi (1970).

Diante do exposto, o conhecimento prévio da força de usinagem é de extrema importância, a fim de evitar erros que podem ser causados devido as variações desta, como alterações do acabamento e da tolerância dimensional. Segundo Rigatti (2010), as forças de usinagem dependem de uma série de fatores, como material da peça, área da secção de corte, espessura de corte, geometria da ferramenta, ângulo de posição, estado de afiação da ferramenta, lubrificação e velocidade de corte. Em seguida será feito um estudo das variáveis que afetam a força de usinagem.

### 2.2.1 Variáveis que influenciam as forças de usinagem.

Em primeiro lugar, é necessário definir o ângulo de cisalhamento, o qual é responsável pelo rompimento do material para a formação do cavaco e pode ser definido de forma experimental ou teórica. Com isso, permite-se a projeção da força de usinagem nas direções de interesse do estudo. Após diversos estudos ao decorrer dos tempos, constatou-se de forma experimental que as componentes das forças variavam de acordo com a seção do cavaco, de forma quase linear, em especial a força de corte( $f_c$ ). Assim, a partir da relação linear entre a

força de corte e área da seção de corte, estabeleceu-se a primeira equação para determinar de forma teórica a força de corte (MACHADO *et al*, 2015).

$$F_c = K_s \times A \quad (1)$$

Na equação 1, tem-se pressão específica de corte e área da seção de corte.

Segundo Costa (2003) os parâmetros de corte que são escolhidos para o processo têm influência diretamente no valor das forças de usinagem. Além disso, a força de corte definida na equação 1, geralmente é a componente da força de usinagem que possui os maiores valores e varia de forma distinta conforme os parâmetros associados a ela. Diante do exposto, um aumento do valor do avanço de corte não resulta em um aumento da força de corte na mesma escala, devido à redução da pressão específica de corte ( $K_s$ ). Essa pressão é definida como a razão entre a força de corte e a seção nominal do cavaco, em condições definidas de usinagem. Entretanto, a profundidade não afeta a pressão específica de corte, e é diretamente proporcional a força de corte. Por fim, a influência da velocidade de corte na pressão específica de corte é mínima, exceto que se trabalhe em velocidades altíssimas, fora do padrão usual. (DINIZ *et al*, 2015).

De modo análogo, outras variáveis ainda influenciam na variação da pressão específica de corte, conseqüentemente na força de corte. Dentre estas, tem-se o material da peça, que varia conforme a composição química constituinte da peça em questão. Em seguida, tem-se o material e a geometria da ferramenta utilizada no processo, os quais podem influenciar pela variação do material ou do acabamento na superfície de saída. Também pode ser afetada pelas condições de lubrificação e de refrigeração. Por fim, o desgaste da ferramenta também pode alterar a pressão específica de corte (MACHADO *et al*, 2015).

### **2.3 Alteração da integridade superficial no fresamento.**

De acordo com Pereira (2014) a integridade superficial da superfície tem dois aspectos. Em que o primeiro aspecto diz respeito da topografia da superfície e descreve a rugosidade e textura da camada mais externa da peça, a sua interface com ambiente. A segunda diz respeito à metalurgia e descreve a natureza das camadas abaixo da superfície usinada. A fim de complementar esse estudo, irá analisar apenas o segundo aspecto, precisamente o encruamento e as transformações de fase.

Durante a usinagem, o processo de remoção de cavaco cria uma superfície com uma camada diferente da existente anteriormente ao corte e, invariavelmente com alterações abaixo

da superfície. Dessa forma, é preciso conhecer e identificar essas alterações que estão sujeitas a ocorrer. As principais alterações ocorridas na usinagem são de caráter mecânico e caráter metalúrgicos (MACHADO *et al*, 2015).

## 2.4 Aço Hadfield

O aço Hadfield é um aço com alto teor de manganês tem como características sua baixa resistência, alta ductilidade e alta capacidade de encruar (LIMA, 2008). A figura 7 exemplifica as classes do aço Hadfield.

Classe	Composição (% em peso)						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P
A	1,05 - 1,35	11,0 min	-	-	-	1,00 max	0,07 max
B-1	0,9 - 1,05	11,5 - 14,0	-	-	-	1,00 max	0,07 max
B-2	1,05 - 1,2	11,5 - 14,0	-	-	-	1,00 max	0,07 max
B-3	1,12 - 1,28	11,5 - 14,0	-	-	-	1,00 max	0,07 max
B-4	1,2 - 1,35	11,5 - 14,0	-	-	-	1,00 max	0,07 max
C	1,05 - 1,35	11,5 - 14,0	1,5 - 2,5	-	-	1,00 max	0,07 max
D	0,7 - 1,3	11,5 - 14,0	-	-	3,0 - 4,0	1,00 max	0,07 max
E-1	0,7 - 1,3	11,5 - 14,0	-	0,9 - 1,2	-	1,00 max	0,07 max
E-2	1,05 - 1,45	11,5 - 14,0	-	1,8 - 2,1	-	1,00 max	0,07 max
F	1,05 - 1,35	6,0 - 8,0	-	0,9 - 1,2	-	1,00 max	0,07 max

Figura 7 - Classes do aço Hadfield.  
Fonte: Machado (2017).

A figura 8 ilustra o diagrama de equilíbrio do aço manganês austenítico.

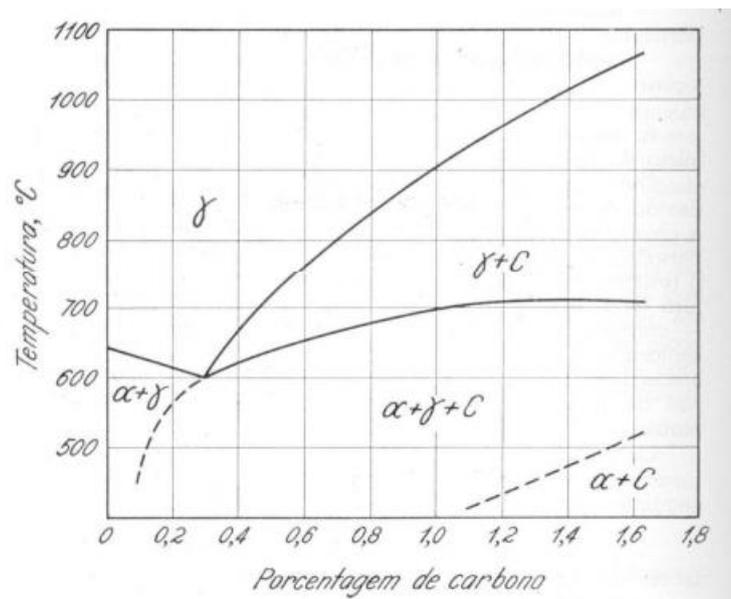


Figura 8 - Diagrama de equilíbrio para o aço C-Mn com 13% de Mn.  
Fonte: Boletim de Geologia e Metalurgia USP (2011).

Abertoni (2017) diz que um alto teor de manganês irá suprir a transformação da austenita, resultando em austenita estável à temperatura ambiente com resfriamento moderadamente rápido. Com o motivo de obter essa estabilidade, o aço Hadfield é austenitizado e depois resfriado em água. Por fim, a austenitização a alta temperatura, entre 982°C e 1065°C, é obrigatória para obter-se uma completa dissolução dos carbonetos. Em seguida, a figura 9 mostra o gráfico de austenitização.

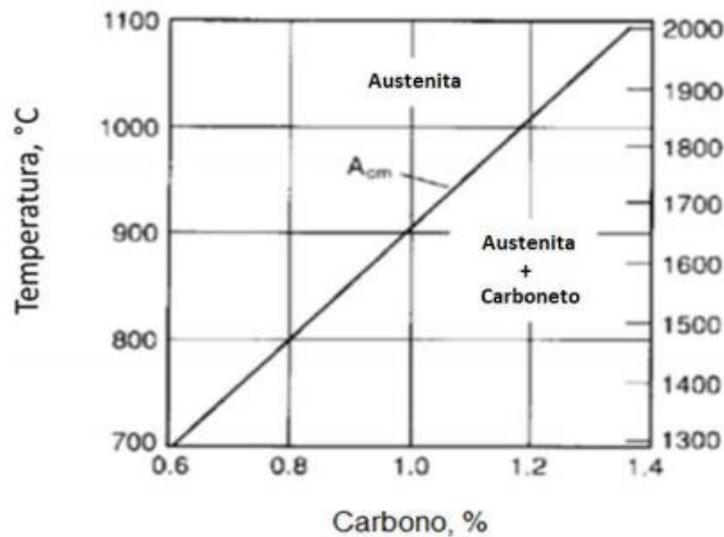


Figura 9 - Temperatura de austenitização para os Aços austenítico manganês com 13%.  
Fonte: Abertoni (2017).

Entretanto, a fim de obter as devidas propriedades é necessário o tratamento térmico seja feito na faixa de temperatura correta, para que ocorra a completa dissociação dos carbonetos. O tempo de resfriamento também deve ser controlado, pois caso seja muito lento pode causar uma dissociação incompleta e resultar nas propriedades mecânicas indesejadas (ALBERTONI, 2017).

Segundo Chiaverini (1985), após o processo de austenitização esse aço apresenta aumento de sua ductilidade além das seguintes propriedades.

- Limite de escoamento entre 180 a 220 Mpa;
- Limite de resistência a tração variando entre 560 a 980 Mpa;
- Dureza Brinell entre 180 e 220;

## 2.5 Alterações devido à deformação do aço Hadfield.

Durante a deformação do aço Hadfield ocorre o encruamento, o qual tem o acréscimo conforme o aumento da energia de impacto. Entretanto, de acordo com Xiaoyun *et al* (2012) quando o encruamento ocorre abaixo da energia crítica de impacto, ele se dá por meio dos movimentos de discordâncias e escorregamento, sendo que, quando este ocorre acima da energia crítica de impacto, o encruamento é obtido pela maclação.

Vale ressaltar que durante o encruamento dos aços manganês austeníticos ocorre a transformação de austenita em martensita, sendo essa transformação induzida pela deformação plástica do material. Essa transformação induzida ocorre em regiões locais de instabilidade da austenita devido à descarbonetação e segregação dos elementos de liga, como carbono e manganês (VENTURELLI, 2018).

Dessa maneira, o aço Hadfield é um dos que possuem a maior capacidade de aumento de dureza devido ao encruamento. Por fim, sua dureza pode aumentar de 200 para entre 500 e 600 Brinell em impacto de serviço. (CHIAVERINI, 1985).

A transformação de fase por deformação plástica ocorre em certos aços de matriz austenítica, em que se altera a estrutura austenítica, cúbica de face centrada (CFC), para estrutura martensítica, tetragonal de corpo centrada (TCC), por meio do cisalhamento na estrutura e resultando um aumento no volume do material, cerca de 1,5% (TRINDADE, 2019). A figura 10 demonstra as células unitárias descritas anteriormente.

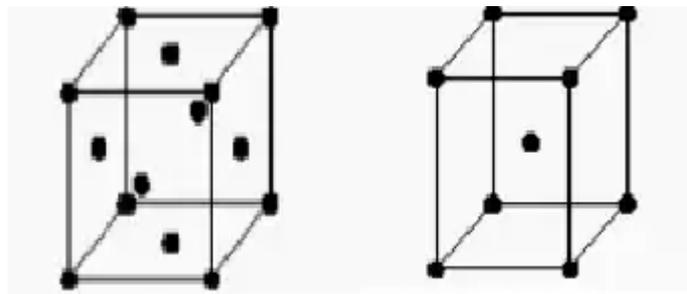


Figura 10 - Células unitárias Cúbica de Face Centrado e Tetragonal de Corpo Centrado.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Além disso, a figura 11 ilustra a transformação martensítica.

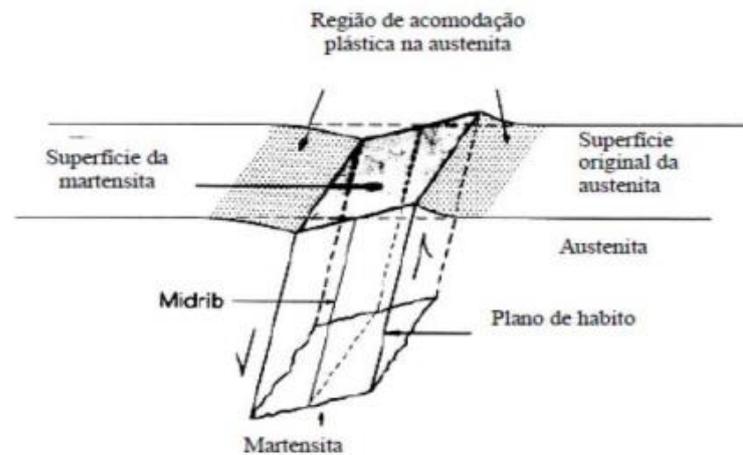


Figura 11 - Modelo esquemático de transformação martensítica.  
Fonte: Cunha (2016).

Por fim, esse rearranjo estrutural induzido por deformação plástica é associado a valores de energia de falha de empilhamento (EFE) inferior a  $18 \text{ mJ/m}^2$  para os aços (MACHADO, 2017).

Em seguida, tem-se o mecanismo de deformação plástica por maclação e metais que apresentam este mecanismo predominante tem um aumento de ductilidade e altas taxas de encruamento. A deformação por maclação ocorre preferencialmente quando o metal apresenta poucos planos de escorregamento livre (VENTURELLI, 2018). A maclação é mais comum em metais que a energia de falha de empilhamento é maior 18 e menor que  $35 \text{ mJ/m}^2$  (MACHADO, 2017).

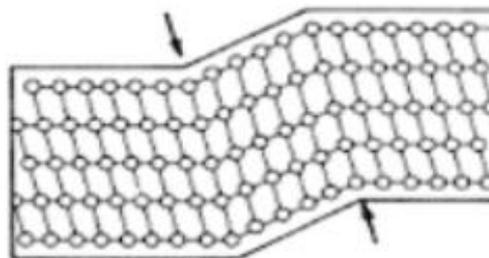


Figura 12 - Modelo esquemático de deformação por maclação.  
Fonte: Machado (2017).

Após uma tensão cisalhante atuar no material, ocorre uma reestruturação em porção dos átomos de modo que forme uma imagem em espelho dos átomos ao seu redor que não sofreram a deformação. Dessa maneira, o novo plano cristalográfico formado é chamado de plano de macla (TRINDADE, 2019).

Entretanto, a maclação depende da energia de falha de empilhamento, devido a energia superficial dos contornos de maclas estarem associadas com a EFE, de modo que quanto menor a essa energia, menor é a tensão necessária para a nucleação de maclas. Além disso, essa energia diminui com o aumento do teor de solutos, como manganês, alumínio e níquel que diminuem o desvio do cruzado (cross-slip), confinando as discordâncias nas bandas em que a tensão de multiplicação das discordâncias promove a nucleação das maclas (VENTURINI, 2018). Em seguida, a figura 13 exemplifica um diagrama que demonstra as regiões de ocorrência de cada mecanismo de deformação plástica da austenita.

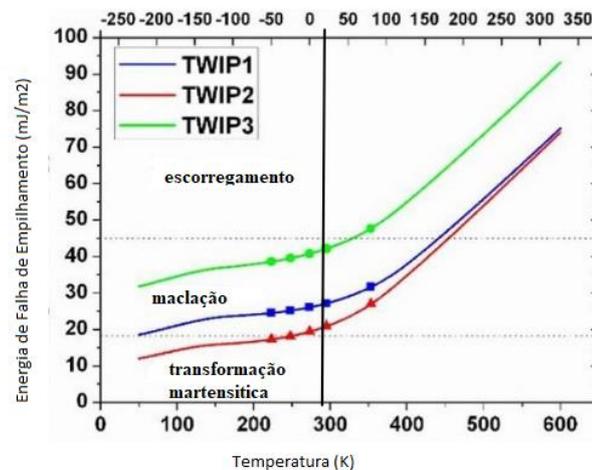


Figura 13 - Energia de Falha de Empilhamento em função da temperatura para um aço Twip.

Fonte: Venturini (2018).

Por fim, segue na figura 14 a demonstração de maclas de deformação em um aço Hadfield.

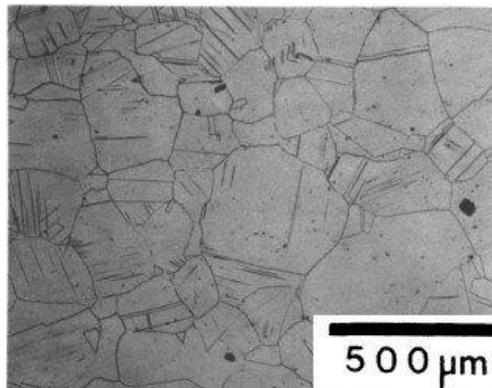


Figura 14 - Maclas de deformação de um aço Hadfield.  
Fonte: Venturelli (2018).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Tipos de Pesquisa

A pesquisa científica pode ser denotada como a realização concreta de uma investigação planejada e desenvolvida cuidadosamente de acordo com as normas consagradas pela metodologia científica. Portanto, pode-se defini-la como o procedimento racional e sistemático, cujo objetivo é proporcionar respostas a problemas propostos (GIL, 2002; CARDOSO, 2003)

As pesquisas podem ser categorizadas de diversas formas, podendo ser de acordo com as abordagens propostas, com os objetivos gerais e com os procedimentos técnicos realizados (GERHARDT; SILVEIRA, 2009; GIL, 2002).

Diante disso, tem-se a classificação intitulada de pesquisa qualitativa, pois nessa especificação o autor deve-se preocupar com o aprofundamento da compreensão de um determinado grupo social ou de uma organização, não se preocupando em representar numericamente tais ideias (GOLDENBERG, 1997 apud GERHARDT; SILVEIRA, 2009). Entretanto, quando essas pesquisas passam a ser quantitativas, tudo que pode ser quantificável é levado em consideração e traduzido em números, opiniões e informações para posterior classificação e análise, requerendo recursos e técnicas estatísticas (SILVA *et al.*, 2005).

Sabe-se que, em relação aos objetivos gerais, as pesquisas podem ser classificadas em três grandes grupos, as exploratórias, as descritivas e as explicativas. Sendo que, as exploratórias são as que tem objetivo de proporcionar maior familiaridade com o problema, de modo a torná-lo mais explícito ou construir hipóteses, envolvendo, geralmente, levantamento bibliográfico, entrevistas e análise de exemplos (SELLTIZ *et al.*, 1967 apud GIL, 2002). Já as descritivas têm como principal objetivo a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis. Por fim, as pesquisas explicativas têm como preocupação central identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, sendo realizada nas ciências naturais quase que exclusivamente do método experimental (GIL, 2002).

De acordo com os objetivos e considerando as definições apresentadas anteriormente, nesse trabalho realiza-se a pesquisa explicativa, uma vez que tem o propósito de discutir os fenômenos observados na variação dos parâmetros de corte no processo de fresamento do aço Hadfield e analisar as alterações de fase e aumento de dureza durante o processo.

Quanto a abordagem, apresenta-se uma pesquisa quantitativa, pois todo resultado será interpretado através de valores obtidos nos ensaios. E por último, levando em consideração os procedimentos técnicos, será utilizada a pesquisa experimental, pois todo o trabalho é desenvolvido baseando-se na análise de resultados obtidos experimentalmente em laboratório, a fim de quantificá-los e avaliar as influências de parâmetros no processo.

### 3.2 Materiais e métodos

Para os corpos de provas, foi usado o aço Hadfield com a composição química exemplificada na tabela 1.

Tabela 1 - Composição do aço Hadfield utilizado.

Elemento Químico	PORCENTAGEM
<b>Carbono (C)</b>	1,15% a 1,27%
<b>Manganês (Mn)</b>	12,7% a 14,0%
<b>Cromo (Cr)</b>	1,60% a 1,90%
<b>Silício (Si)</b>	0,60% a 0,80%
<b>Enxofre (S)</b>	Máx 0,04%
<b>Fósforo (P)</b>	Máx 0,07%

Fonte: Costa (2020).

Em um primeiro momento, para o corte dos corpos usou-se a máquina de corte por eletroerosão a fio, Eletrocut AR35. Após a realização do corte, fez-se o fresamento seguido do lixamento e polimento dos corpos de provas para avaliar a superfície encruada. Por fim, sucedeu-se com a aplicação de reagente Nital 4% (4 ml de ácido nítrico e 96 ml de álcool etílico) por imersão durante 30 segundos e depois utilizou-se o microscópio eletrônico para análise. A figura 15 ilustra os corpos de prova usados.



Figura 15 - Corpos de prova do aço Hadfield.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

### 3.2.1 Especificações de máquinas, equipamentos e ferramentas

- Mini retificadora Chiaperini modelo CHR-20B;
- Fresa CNC ROMI modelo D 600;
- Ferramenta de metal duro CoroMill 245;
- Lixas NORTON modelo T223 ADVANCE;
- Politriz Arotec modelo Aropol 2V;
- Alumina de 1  $\mu\text{m}$ ;

### 3.2.2 Descrição da metodologia de ensaios

Inicialmente foram preparados os corpos de provas para realização do ensaio, cortando-os com o auxílio da máquina de corte por eletroerosão a fio, Eletrocut AR35.

Em seguida os corpos de provas foram levados à fresadora, para realização de um passe de fresamento. Para cada passe foram definidos os parâmetros de corte. Dessa forma, variou-se os parâmetros e a superfície a cada passe realizado.

Os testes foram realizados com as condições de corte exemplificadas na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de corte utilizado no processo de fresamento.

Parâmetros de corte			
Ensaio A	Velocidade de corte	Vc (rpm)	100
	Avanço	f(mm/rev)	0,15
	Profundidade	Ap (mm)	1
Ensaio B	Velocidade de corte	Vc (rpm)	200
	Avanço	f(mm/rev)	0,15
	Profundidade	Ap (mm)	1
Ensaio C	Velocidade de corte	Vc (rpm)	100
	Avanço	f(mm/rev)	0,15
	Profundidade	Ap (mm)	2
Ensaio D	Velocidade de corte	Vc (rpm)	100
	Avanço	f(mm/rev)	0,45
	Profundidade	Ap (mm)	1

Fonte: Pesquisa direta (2021).

A figura 16 demonstra o processo de fresamento.



Figura 16 - Processo de fresamento dos corpos de prova.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

### **3.3 Variáveis e indicadores**

Os dados foram coletados de forma experimental, em que foi observado a influência dos parâmetros de corte, que é a variável deste trabalho, no comportamento do aumento de microdureza no processo de fresamento, que são os indicadores.

## **4 RESULTADOS**

Neste capítulo apresentam-se os resultados encontrados durante os ensaios e uma discussão em cima destes, para melhor entendimento da influência dos parâmetros de corte na formação de maclas de deformação após o processo de fresamento de um aço Hadfield.

### **4.1 Micrografia**

O primeiro corpo de prova, A, foi trabalhado com uma velocidade de 100 rpm, 0,15 mm/rev de avanço e 1 mm de profundidade. Ao se analisar a figura 17, percebe-se que não obteve nenhuma formação de maclas de deformações visíveis.

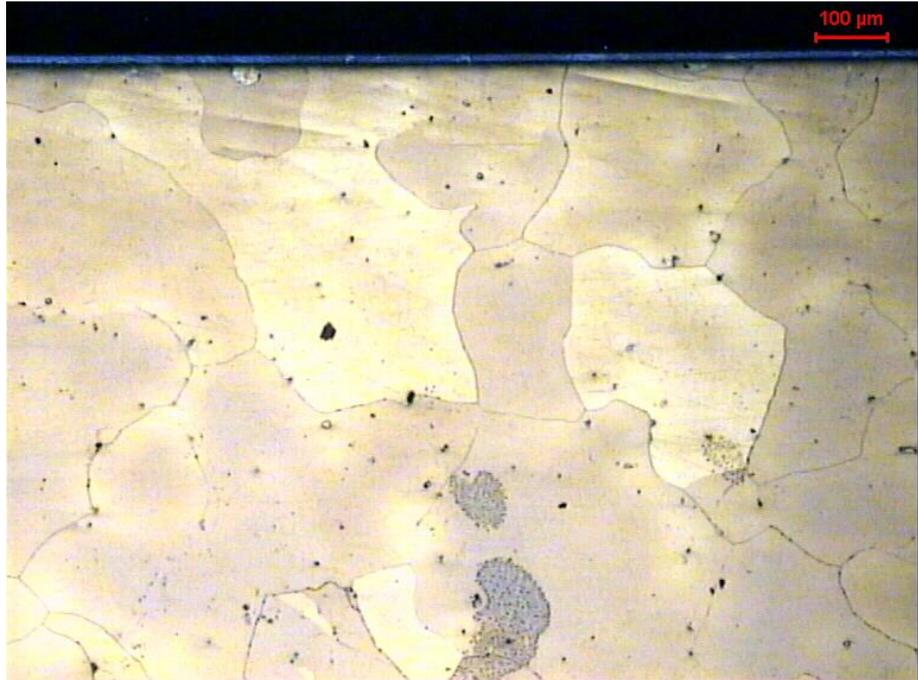


Figura 17 – Microestrutura do aço Hadfield pós processo de fresamento com aumento de 100x.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Já na figura 18, temos o mesmo corpo de prova com um aumento de 200x. Dessa forma, foi possível constatar que as condições de corte não foram suficientes para ocasionar a formação de maclas de deformação.

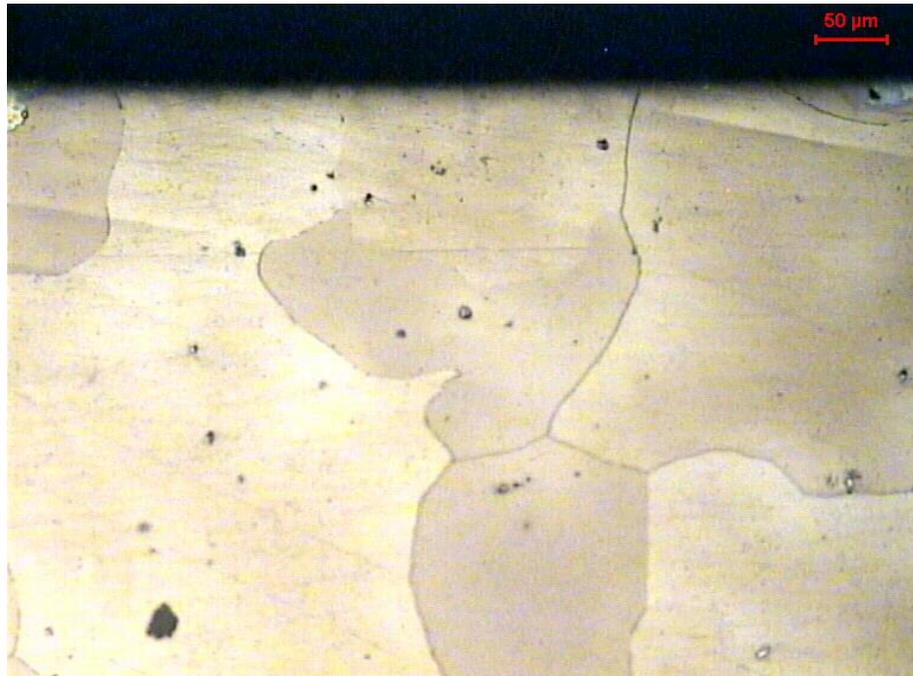


Figura 18 - Microestrutura do aço Hadfield após processo de fresamento com aumento de 200x.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

No segundo corpo de prova foi usinado com os parâmetros do ensaio B (Velocidade de corte de 200 rpm, 0,15 mm/rev de avanço e 1mm de profundidade). Na figura 19 não se observa a presença de maclas de deformação, o que era esperado para esta condição, já que a força de usinagem diminui à medida que a velocidade de corte aumenta.

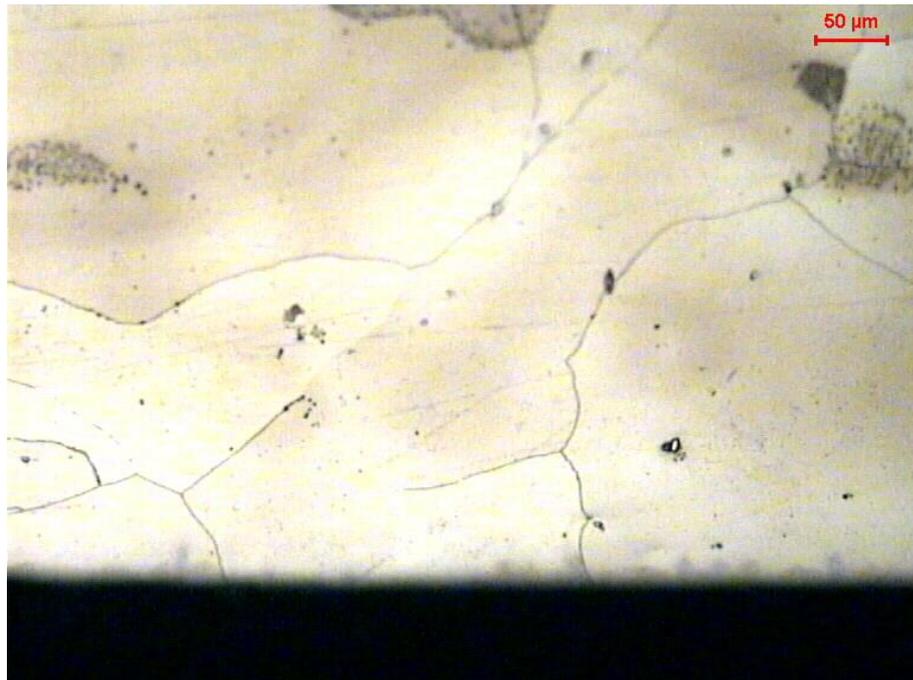


Figura 19 - Microestrutura do aço Hadfield após o ensaio B com aumento de 200x.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Em seguida, o terceiro ensaio foi realizado com a velocidade de corte igual a 100 rpm, avanço de 0,15 mm/ver e uma profundidade de 2 mm. Entretanto de acordo com a figura 20, com essas condições não foi possível observar alguma alteração na microestrutura do aço.



Figura 20 - Microestrutura do aço Hadfield após o ensaio C e com aumento de 200x.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Por fim, o quarto ensaio foi realizado com a velocidade de corte em 100 rpm, o avanço de 0,45 mm/rev e a profundidade de 1 mm. Em relação as amostras anteriores, nota-se uma pequena alteração na microestrutura do aço, com o surgimento de pequenas maclas de deformação plástica. Essa alteração se deve ao aumento da força de usinagem, causada pelo aumento do avanço. Tal alteração pode ser observada na extremidade da figura 21, com a indicação das setas vermelhas.

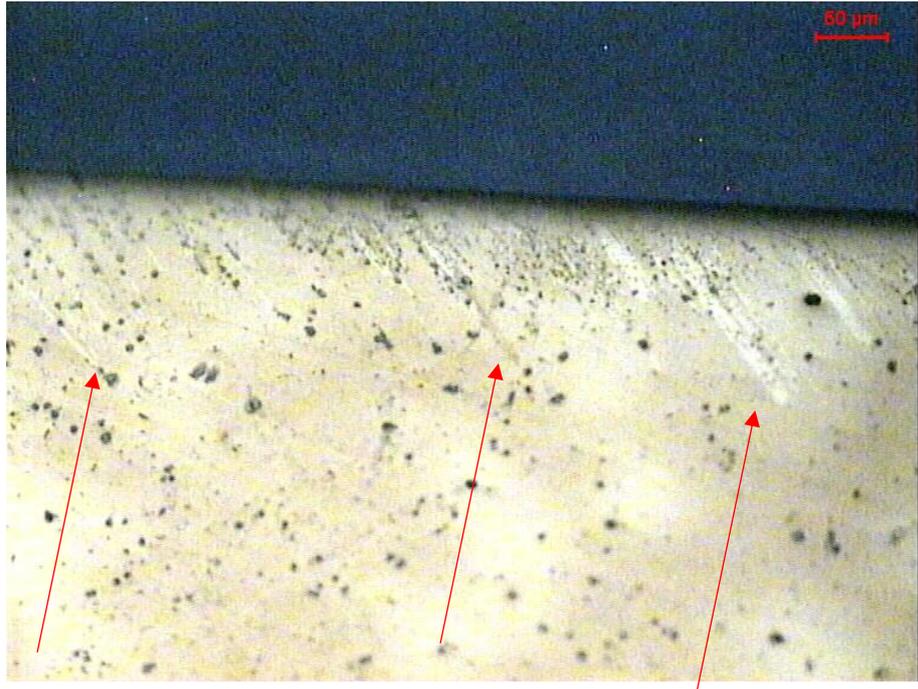


Figura 21 - Microestrutura do aço Hadfield após o ensaio D e com aumento de 200x.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

De maneira mais clara, as pequenas maclas também podem ser observadas na figura 22.



Figura 22 - Microestrutura do aço Hadfield após o ensaio D e com aumento de 200x.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

## **5 CONCLUSÃO**

### **5.1 Conclusões**

Os resultados obtidos neste trabalho nos levam a concluir que:

- As condições de corte dos ensaios 1,2 e 3 não são suficientes para causar uma alteração na microestrutura do aço Hadfield estudado;
- O surgimento de maclas pode ser obtido com condições mais severas de avanço e profundidade de corte.

### **5.2 Recomendações**

Para acrescentar e completar o estudo realizado, as seguintes sugestões são propostas para trabalhos futuros:

- Realizar o ensaio com fluido de corte;
- Realizar o ensaio com uma ferramenta já desgastada anteriormente;
- Realizar o estudo adotando condições de cortes mais severas desde o início do ensaio.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALBERTONI, Matheus Baptista. **Soldabilidade de Aços Hadfield**. 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Soldagem) - A Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2017.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **ASM Handbook**, 1993.
- CALLISTER, William D. et al. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. [S. l.: s. n.], 2012.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. Abm, 1977.
- COSTA, Alex Ribeiro. **Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Insertos Intercambiáveis**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, [S. l.], 2003.
- COSTA, Felipe Luiz Barcaro. Influência do Processo de Usinagem na transformação de um aço Hadfield. *In*: COSTA, Felipe Luiz Barcaro. **Influência do Processo de Usinagem na transformação de um aço Hadfield**. 2020. Iniciação Científica (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2020.
- DIB, Marcel Henrique Militão et al. **Uma Análise Experimental do Fresamento Discordante e Concordante**. A, [s. l.], 15 dez. 2015.
- DINIZ, Anselmo Eduardo et al. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. [S. l.: s. n.], 2014.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Editora blucher, 1970.
- GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo (Org.). **Métodos de Pesquisa**. [s.i.]: UFRGS Editora, 2009. 120 p.
- GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas S.a., 2002. 175 p.
- JAFARIAN, H.R. **The influence of austenitization temperature on microstructural developments, mechanical properties, fracture mode and wear mechanism of Hadfield high manganese steel**. Elsevier, 3 dez. 2020.
- KRATOCHVIL, Rafael. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial**. Tese de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (UFSC). P. 1-119. Florianópolis, 2004.

LIMA, Guilherme da Rocha. **Influência Dos Elementos de Liga no Encruamento Proveniente do Processo de Usinagem nos aços HADFIELD.** [s. l.]. 2008.

LIU, F. et al. **Strain hardening model of TWIP steels with manganese content.** Elsevier, 21 jul. 2016.

MACHADO, Álisson et al., **Teoria da Usinagem dos Materiais.** Editora Edgard Blucher Ltda. 3ª edição, p. 17-21, São Paulo, 2015.

PEREIRA, Luis Antonio. **Influência das condições de fresamento na integridade superficial do aço inoxidável 15-5PH.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, [S. l.], 2014.

RIGATTI, Aldo Marcel Yoshida. **“Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte”.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNESP - Campus de Ilha Solteira, [S. l.], 2010.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação.** 4. ed. Ver. Atual. Florianópolis: UFSC, 2005. 138 p.

VENTURELLI, BIANKA NANI. **EFEITO DO REFINO DO TAMANHO DE GRÃO PELA ADIÇÃO DE Hf NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TRAÇÃO E IMPACTO DO AÇO HADFIELD.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2018.

