

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Influência dos Parâmetros de Corte nas Tensões
Residuais Geradas no Fresamento do Aço SAE 4340**

Luísa Barros de Mendonça

**Rio de Janeiro
Novembro de 2016**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

Influência dos Parâmetros de Corte nas Tensões Residuais Geradas no Fresamento do Aço SAE 4340

Luísa Barros de Mendonça

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof.^a Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro
Novembro de 2016**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M539 Mendonça, Luísa Barros de
Influência dos parâmetros de corte nas tensões residuais
geradas no fresamento do aço SAE 4340 / Luísa Barros de
Mendonça.—2016.
[xi], 37f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.

Bibliografia : f. 36-37

Orientadora : Tatiane de Campos Chuvás

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Aço. 4.
Fresagem (Trabalhos em metal). 5. Raio X – Difração. I. Chuvás,
Tatiane de Campos (Orient.). II. Título.

CDD 621

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Vanja Maria, à minha tia Patrícia Régia, a todos os meus tios e parentes, bem como aos meus amigos mais próximos e colegas que me apoiaram ao longo do período de realização deste trabalho. Dedico também à professora Tatiane Chuvas e a toda a equipe de professores do CEFET/RJ que colaborou com minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe e à minha tia por terem me incentivado a estudar e buscar excelência em tudo que faço e a todos os meus parentes que me apoiaram e se colocaram à disposição para me ajudar ao longo da minha formação acadêmica. Agradeço aos meus amigos de infância, da faculdade, do intercâmbio, entre tantos outros, pela confiança, paciência e companhia em momentos de alegria e dificuldades.

Agradeço à professora Maria Cindra Fonseca, por ter disponibilizado Laboratório de Análise de Tensões – LAT, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFF para a realização das medições das tensões.

Agradeço também imensamente à professora Tatiane Chuvas pela oportunidade de participar deste projeto sob sua orientação, pela sua paciência, disponibilidade, por sempre ser solícita e por sua persistência em buscar um alto nível de qualidade na realização deste trabalho.

RESUMO

A integridade superficial dos componentes usinados afeta diretamente a sua estabilidade dimensional e, conseqüentemente, a sua vida útil. Por esta razão, é extremamente importante controlar o estado da superfície final das peças após a fabricação por usinagem. Entre os principais fatores que afetam a vida útil de uma peça usinada podem ser citadas as tensões residuais, rugosidade, dureza e microestrutura. Particularmente, as tensões residuais desempenham um papel fundamental na integridade de peças usinadas porque estas podem se somar as tensões aplicadas durante o serviço, conduzindo a um estado de tensões mais elevado e, dessa forma pode ocorrer perda de resistência à fadiga das peças, levando a uma possível falha durante a vida em serviço. As tensões residuais geradas durante a usinagem de determinado material dependem principalmente do material da peça, do tipo e geometria da ferramenta e dos parâmetros de usinagem, tais como, velocidade, avanço e profundidade de corte. Este trabalho tem o intuito de estudar as possíveis influências dos parâmetros de corte, a saber: a velocidade de corte e profundidade de corte, sobre a integridade superficial de amostras de aço SAE 4340, durante o fresamento de topo, com o uso de ferramentas de metal duro. Os resultados mostraram que as tensões residuais tem tendência trativa para as condições de corte aplicadas, porém a magnitude das mesmas aumenta com o aumento da velocidade de corte.

Palavras chaves: Fresamento, Integridade Superficial, Tensões Residuais, Difração de raios-X.

ABSTRACT

The surface integrity of the machined components directly affects their dimensional stability and, consequently, their service life. For this reason, it is extremely important to control the condition of the final surface of the parts after manufacture by machining. Among others, the main factors that affect the service life of a machined part are the residual stresses, surface roughness, hardness and microstructure. Particularly, residual stresses play a fundamental role in the integrity of machined parts because these can be added to the stresses applied during the service, leading to a higher stress state and, in this way, loss of fatigue strength of the parts can occur, leading to possible failure during the life in service. Residual stresses generated during machining of a given material depend primarily on the workpiece material, tool type and geometry, and machining parameters such as speed, feed rate and depth of cut. This work intends to study the possible influences of the cutting parameters, namely: the cutting speed and depth of cut, on the surface integrity of SAE 4340 steel samples, during top milling, with the use of cemented carbide tools. The results showed that the residual stresses have a traction tendency for the applied cutting conditions, but the magnitude of the stresses increases with the increase of the cutting speed.

Keywords: Milling, Surface Integrity, Residual Stresses, X-Ray Diffraction

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processos de usinagem (a) torneamento, (b) furação e (c) fresamento (2 modificado).....	3
Figura 2. Fresa tangencial (a) e Fresas de topo (b) [2 modificado].....	5
Figura 3. Corte concordante (a); Corte discortante (b) (2 modificado).....	5
Figura 4. – <i>ap</i> - profundidade de corte; <i>ae</i> - penetração de trabalho (Fonte: [12])	7
Figura 5. Análise microestrutural via MO do aço 4340. (Fonte: [19]).....	8
Figura 6. Microestrutura martensítica do aço 4340 após têmpera a 850 °C. (Fonte: [18])	9
Figura 7. Resultados de dureza superficial (Fonte: [2])	11
Figura 8. Resultados de rugosidade superficial (Fonte: [2])	12
Figura 9. Tensões residuais em fresamento de topo. (Fonte: [21])	15
Figura 10. Fotografia da fresa proposta por Segawa et al, 2004. (Fonte:[3 – modificado]) ...	15
Figura 11. Perfil de tensões residuais em profundidade em a) lubrificação seca; b) fluido de corte. (Fonte: [30 – modificado])	16
Figura 12. Corpos de prova confeccionados por Lima, 2008. (Fonte: [18])	17
Figura 13. Representação dos Raios-X difratados (Fonte: [33]).....	18
Figura 14. Disco em Aço SAE 4340 (Ø 50 x 30 mm)	20
Figura 15. Estabilização da temperatura do forno.....	21
Figura 16. Imagem esquemática da peça após usinagem de duas amostras.....	23
Figura 17. Analisador de tensões da Stressrad (A - Unidade de controle; B - Sistema de medição;C - Sistema de aquisição e tratamento de dados).....	24
Figura 18. Sentido de análise das tensões residuais nas amostras.....	24
Figura 19. Rugosímetro Taylor Hubson(A- Amostra; B- Apalpador; C - Controlador).....	25
Figura 20. Tensões residuais medidas na direção longitudinal	27
Figura 21. Tensões residuais medidas na direção transversal	28
Figura 22. Valores médios das tensões residuais medidas na Longitudinal.....	29
Figura 23. Valores médios das tensões residuais medidas na Transversal.....	30
Figura 24. Valores médios de rugosidade	31
Figura 25. Valores médios de rugosidade para cada condição de corte.....	32
Figura 26. Valores das médias de TR e Rugosidade	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição Química do Aço SAE 4340 [1].....	8
Tabela 2. Parâmetros de Corte do fresamento. (Fonte: [2]).....	10
Tabela 3. Condições de fresamento por Segawa et al, 2004 [3].....	16
Tabela 4. Composição química do aço SAE 4340, dado pelo fabricante (em % de peso).....	20
Tabela 5. Condições de corte das amostras usinadas.....	21
Tabela 6. Amostras x condições de cortes.....	22
Tabela 7. Valores de tensões residuais das amostras.....	26
Tabela 8. Média dos valores de rugosidade (Ra) das amostras.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI - Sistema americano para a classificação dos aços (American Iron and Steel Institute)

ASTM - American Society for Testing and Materials

V_c – velocidade de corte

V_f – velocidade de avanço

f_z – avanço por dente

a_p – profundidade de corte

a_e – profundidade de penetração

HRC - dureza Rockwell C

TTAT – Tratamento de Alívio de Tensões

MO – Metalografia ótica

Ra – Rugosidade superficial média

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Justificativa	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Metodologia e Trabalho Realizado	2
1.5. Organização do Trabalho	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Fresamento	3
2.2. Aço 4340	7
2.2.1. Fresamento do aço 4340.....	9
2.3. Tensões Residuais	12
2.3.1. Tensões residuais em usinagem	13
2.3.2. Tensões residuais em fresamento.....	14
2.3.3. Tensões residuais no fresamento de aço 4340	16
2.4. Tensometria por Difração de Raios-X	17
3. Materiais e métodos.....	20
3.1. Materiais.....	20
3.2. Fresamento das amostras.....	20
3.3. Medição das tensões residuais	23
3.4. Medidas de rugosidade.....	24
4. Resultados e discussão	26
4.1. Resultados	26
4.1.1. Análise das tensões residuais	26
4.1.2. Rugosidade superficial média (Ra)	30
4.1.3. Relação entre tensões residuais e rugosidade.....	33
5. Conclusão	34
Sugestões para trabalhos futuros	35
Referência Bibliográfica.....	36

Capítulo 1

Introdução

Muitos parâmetros de corte nos processos de fabricação por usinagem podem ser ajustados para que se alcance determinadas características finais e/ou propriedades mecânicas para os inúmeros tipos de peças. É impossível, no entanto, controlar todas as variáveis e obter resultados 100% previsíveis das propriedades do material, como integridade superficial, acabamento, dureza, microestrutura, entre outros. No caso da usinagem, podemos destacar que, salvo peças com dimensões muito pequenas ou geometrias complexas em que deformações macroscópicas são observadas, as características superficiais, como a rugosidade e o acabamento, bem como a integridade superficial como um todo, são os pontos mais críticos a serem avaliados pelo engenheiro de fabricação. Isso se deve ao fato de que são geradas tensões residuais na retirada de material, quando somadas às cargas de trabalho, podem reduzir a durabilidade do produto final, visto que facilitam trincas, corrosões ou outros danos, até mesmo modificações prejudiciais no valor da resistência à fadiga dessas peças.

As tensões residuais produzidas durante a usinagem de um determinado tipo de material estão ligadas principalmente ao material da peça, ao tipo e geometria da ferramenta e aos parâmetros de usinagem, tais como, velocidade, avanço e profundidade de corte. Dessa forma, o estudo sobre a influência dos parâmetros de corte na geração ds tensões residuais é um ponto importante a ser estudado, pois pode ser fundamental na vida em serviço do componente.

1.1. Motivação

A integridade superficial dos componentes usinados afeta diretamente a sua estabilidade dimensional e, conseqüentemente, a sua vida útil. Por esta razão, é extremamente importante controlar o estado da superfície final das peças após a fabricação por usinagem. Ao melhor entender quais relações se formam entre parâmetros de corte e integridade superficial, melhor se pode desenvolver modelos de usinagem mais eficientes e com resultados otimizados, os quais geram peças mais resistentes e com maior aplicabilidade e segurança.

1.2. Justificativa

Como dito anteriormente, os principais fatores que afetam a vida útil de produtos usinados são as tensões residuais, rugosidade, dureza e microestrutura. Particularmente, as tensões residuais desempenham um papel fundamental na integridade de peças usinadas porque estas podem se somar as tensões aplicadas durante o serviço, conduzindo a um estado de tensões mais elevado e, dessa forma pode ocorrer perda de resistência à fadiga das peças, levando a uma possível falha durante a vida em serviço.

1.3. Objetivos

Esse trabalho visa realizar uma análise em busca da interdependência entre os parâmetros de usinagem e seus efeitos na natureza e magnitude das tensões residuais geradas no fresamento de topo de um aço SAE 4340. Será foco neste trabalho, principalmente o entendimento das influências das tensões residuais nas superfícies das amostras, bem como a rugosidade.

1.4. Metodologia e Trabalho Realizado

O desenvolver do presente trabalho pautou-se em pesquisa bibliográfica dos tópicos mais relevantes, aprendidos principalmente de artigos nacionais e internacionais de revistas especializadas, artigos de congressos e outros disponíveis na Internet. Após o estudo prévio da literatura formal e material acadêmico disponível com base experimental correlacionado aos temas abordados nesse trabalho, traçou-se uma estratégia de preparação e métodos de fabricação de amostras, com alternativas baseadas nas possíveis obtenções de qualidade e padrões esperados, passo-a-passo de medições desejadas e sua posterior execução conforme disponibilidade dos laboratórios e professores responsáveis pelos tais.

1.5. Organização do Trabalho

O trabalho está organizada em 4 capítulos, a saber: Capítulo 1 – Introdução, onde o tema deste trabalho é definido e exposto; Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, ; Capítulo 3 – Materiais e Métodos; Capítulo 4 – Resultados e Discussões, referente à pesquisa e definições iniciais do projeto final. Além das sugestões para trabalhos futuros e Referências Bibliográficas, de onde pode-se resgatar as referências colocadas no texto.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Fresamento

As operações de usinagem são de muita relevância na esfera dos processos de fabricação mecânica, principalmente nas indústrias automobilísticas, de eletrodomésticos e máquinas em geral. A usinagem foi descrita por Ferraresi, 1977 [4] como um ciclo de operação de corte de material, realizada geralmente através de uma máquina-ferramenta, sendo as mais comuns: torneamento, fresamento e retificação, como mostra a Figura 1.

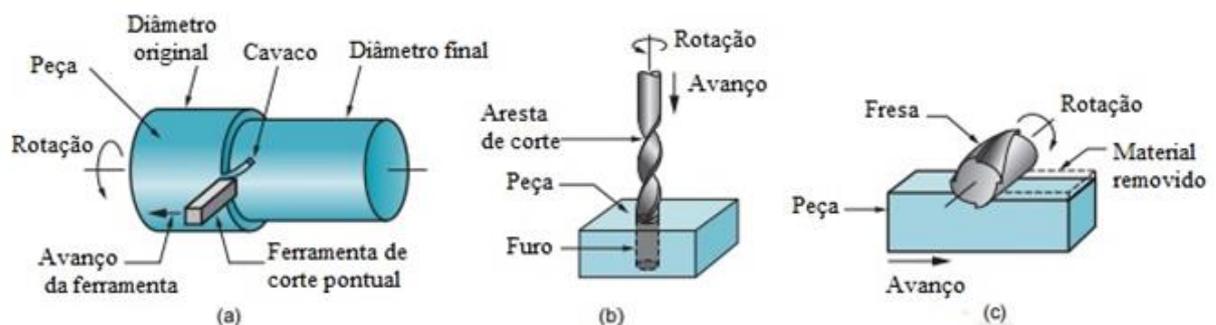


Figura 1. Processos de usinagem (a) torneamento, (b) furação e (c) fresamento (2 modificado)

Atualmente, estima-se que cerca de 15% dos componentes mecânicos sejam de origem usinada ao redor do mundo. Mesmo assim, sendo a usinagem uma operação de fabricação bastante comum e viável em termos de responsabilidade da peça usinada, existem vários fatores que influenciam na escolha do processo para que se justifique o valor do processo. Segundo Poulachon *et al.*, 2003 [5] ao estudar as influências dos parâmetros de usinagem na integridade superficial pode-se agregar vida útil aos produtos produzidos. Isso refletirá na qualidade e, conseqüentemente na credibilidade, de uma empresa. Para isso, é preciso que se analise o processo em vários quesitos, tais como a escolha da ferramenta de corte, os parâmetros de corte a serem utilizados na usinagem e o delineamento da peça, de forma que se obtenha alto rendimento ao usinar, melhorando a qualidade e buscando reduzir os custos e tempos de processo [6, 7].

Em particular, o fresamento pode ser destacado como uma das operações de usinagem mais versáteis para a produção de superfícies planas. Essa versatilidade é devido principalmente pela grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, propiciando assim a geração de inúmeras outras peças [8]. Pode-se descrever o fresamento como o trabalho de corte de diferentes tipos de materiais com auxílio de uma ferramenta multicortante denominada fresa. Nesta operação, o corte é realizado pela rotação da ferramenta ao redor do seu eixo de fixação para a remoção de material, enquanto o deslocamento da peça, em uma determinada direção, dá a geometria do corte. Isto é, o movimento de corte necessário para a usinagem é gerado pela combinação do movimento de rotação da ferramenta de corte com o movimento de avanço da mesa fresadora, na qual a peça está fixada. O eixo de fixação da fresa é fixo, então os movimentos de avanço da mesa ocorrem perpendicularmente ao mesmo [9]. As características mais relevantes desse processo, segundo Rosa & Siqueira, 2001 [10], podem ser definidas como:

- a) Utilização de ferramenta multicortante munida de arestas cortantes distantes simetricamente, ou não, ao redor de um eixo;
- b) Rotação da ferramenta em torno de seu eixo, possibilitando, assim que cada um dos dentes cortantes da fresa retire uma pequena parte de material separadamente;
- c) Movimento de avanço realizado pela mesa da máquina, onde está fixada a peça, que possibilita o prosseguimento da operação, forçando a peça a passar sob a ferramenta, dando a forma e dimensões desejadas a mesma;
- d) Grande diversidade de ferramentas multicortante, que torna esta operação muito abrangente quanto a valores de rugosidade nas várias superfícies e direções de medição, podendo variar bruscamente conforme necessidade.

Existem dois tipos básicos de fresamento, o tangencial (ou radial) e o de topo, como mostra Figura 2. No fresamento tangencial, o eixo da ferramenta está paralelo à superfície a ser usinada e a operação é feita pelos gumes cortantes na periferia do dente. Este tipo de usinagem pode ser feita de forma concordante, quando o vetor da velocidade tangencial do gume cortante da fresa coincide em direção e sentido com o avanço da peça no momento do contato entre a peça e o gume ou de forma discordante, quando esse sentido é invertido (Figura 3).

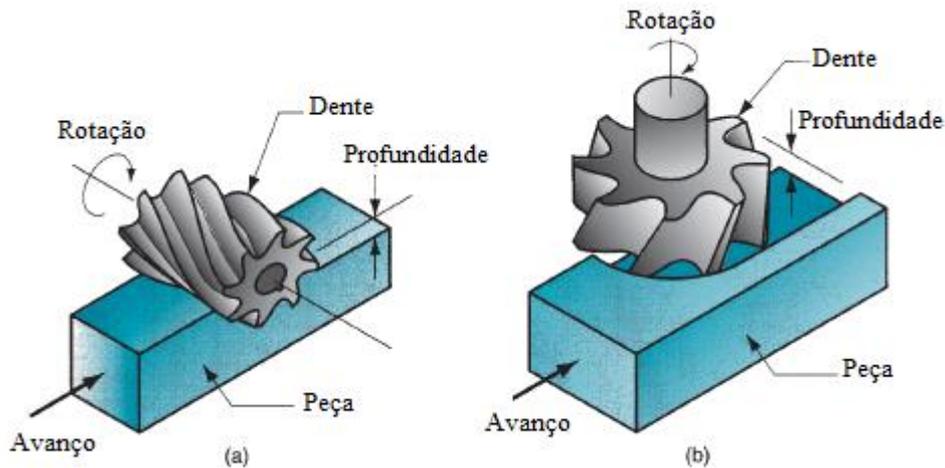


Figura 2. Fresa tangencial (a) e Fresas de topo (b) [2 modificado]

No fresamento de topo, o eixo da fresa fica perpendicular à superfície a ser usinada e a mesma é feita pelas arestas de corte tanto na periferia como no final da fresa [11]. O fresamento de topo proporciona a criação de superfícies complexas, repletas de rasgos e cortes em diferentes direções, profundidades e tamanhos. A grande utilidade das fresas de topo está ligada ao fato de suas arestas cortantes estenderem desde sua periferia (lateral) até o limite da ferramenta (topo). Nessa configuração temos as arestas laterais que podem ser retas ou cônicas, e as arestas no topo que podem ser retas, toroidais ou esféricas [7].

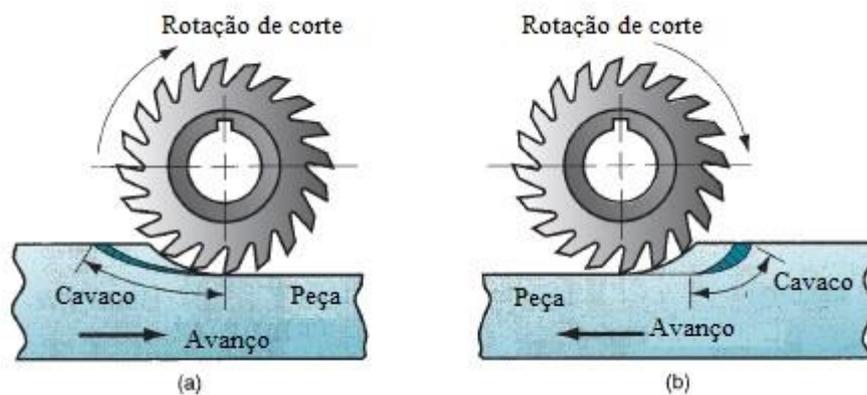


Figura 3. Corte concordante (a); Corte discortante (b) (2 modificado)

Segundo Diniz *et al.*, 2001 [8] os principais parâmetros de corte no fresamento são: velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_f), avanço por dente (f_z), profundidade, ou largura, de corte (a_p) e penetração de trabalho (a_e).

A velocidade de corte (V_c [m/min]) é determinada pela velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente. A Equação 1 descreve matematicamente como pode ser obtido o valor de velocidade de corte no fresamento.

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

d = diâmetro externo da fresa (mm)
 n = número de rotações por minuto (rpm)

A velocidade de avanço (f [m/min]) pode ser descrita como a velocidade instantânea de determinado ponto do gume em relação a peça. O mesmo é medido no plano de trabalho e pode ser determinado com base na Equação 2.

$$f = f_z * z \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

f_z = avanço por dente
 z = número de dentes da fresa

O chamado avanço por dente (f_z [mm/dente]) é o percurso de avanço por dente da fresa.

Profundidade/largura de corte (a_p [mm]) é a medida da altura que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No fresamento frontal, “ a_p ” é denominada profundidade de usinagem, porém no fresamento tangencial, “ a_p ” é denominada largura de usinagem. A penetração de trabalho (a_e [mm]) é simplesmente a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço. A Figura 4 mostra a diferença entre a_p e a_e , no caso do fresamento de topo.

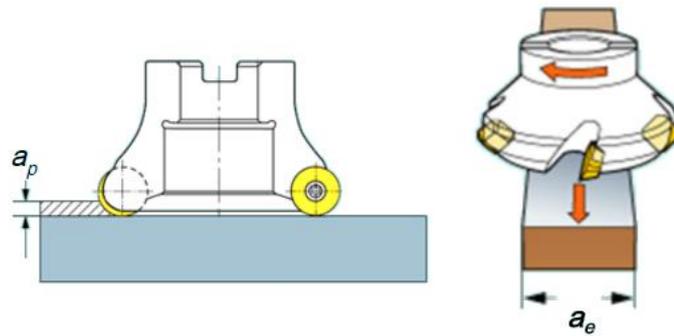


Figura 4.– a_p - profundidade de corte; a_e - penetração de trabalho (Fonte: [12])

Em meados dos anos 60, surgiu o termo Integridade Superficial para tratar dos aspectos da superfície da peça usinada, onde são incluídos acabamento superficial, danos metalúrgicos e tensões residuais [12]. Segundo Bordinassi (2006) [13] Integridade Superficial pode ser definida como um parâmetro de qualidade das superfícies usinadas em relação a elementos e fenômenos que expliquem a estrutura superficial do material das peças.

A integridade superficial impacta sobre o desempenho do produto, sendo este desempenho geralmente sensível à mudança, incluindo: resistência à fratura, resistência à fadiga, taxa de corrosão, comportamento tribológico, propriedades magnéticas e a estabilidade dimensional [14]. O surgimento de mudanças, em qualquer aspecto na Integridade Superficial da peça, podem ocasionar algumas particularidades, tais como, aceleração do processo de fadiga, resistência a abrasão e a corrosão e também, a propagação e surgimento de trincas [15].

2.2. Aço 4340

O aço 4340 é um aço para beneficiamento com elevada temperabilidade, ligado ao cromo-níquel-molibdênio, utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, inclusive com seções espessas, quando se deseja uma combinação de resistência mecânica e resistência à fratura. Esse material também possui elevada resistência à fadiga e, dependendo do teor de carbono, a dureza na condição temperada varia de 54 a 59 HRc [16]. A composição química desse material, segundo a norma ASMT A506 [17], é apresentada na Tabela 1. As propriedades mecânicas, no entanto, podem variar, segundo diz a mesma norma [17], de acordo com as diferentes composições químicas e condições apresentadas pelo material após tratamento térmico específico.

Tabela 1. Composição Química do Aço SAE 4340 [1]

SAE/AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P
4340	0,38 – 0,43	0,60 – 0,80	0,15 – 0,35	0,70 – 0,90	1,65 – 2,00	0,20 – 0,30	0,030máx

Esse aço é constituído por uma microestrutura predominantemente martensítica que, ao ser tratado termicamente, pode desenvolver diversas faixas de valores de dureza. Contudo, dependendo dos tratamentos térmicos aplicados há possibilidade de formação de outras fases como ferrita, bainita e austenita retida. Os valores finais de dureza, segundo Lee e Su, 1997 [18], no entanto, dependem também do percentual de carbono na composição da amostra tratada termicamente. Numa composição em que o percentual de carbono é baixo, surgem martensitas na forma de ripas, agrupadas em feixes maiores ou pacotes. No caso dos aços de alto carbono, a sua estrutura martensítica surge em formas de placas muito finas. No último caso, quando há composição de médio teor de carbono, há uma mistura de ripas e placas finas, se tornando uma estrutura mais complexa.

No trabalho realizado por Cardoso *et al.*, 2011 [19], o aço 4340 possui microestruturas constituída de perlita e ferrita, conforme apresenta Figura 5.

**Figura 5.** Análise microestrutural via MO do aço 4340. (Fonte: [19])

Lee e Su, 1997 [18] estudaram a microestrutura do aço 4340 após diferentes tratamentos térmicos. Para o caso da condição após revenimento, os resultados indicaram que a resistência e a dureza diminuem quando se aumenta tempo e temperatura do tratamento, sendo que esta última produz um efeito mais significativo. Ainda segundo Lee e Su, 1997

[18] a observação microestrutural revela que carbonetos precipitados têm uma estrutura do tipo placa a baixas temperaturas, mas têm forma esférica a altas temperaturas. Na Figura 6, a estrutura do aço 4340 como têmperado a 850° por 30 minutos é mostrada por microscopia ótica (MO).

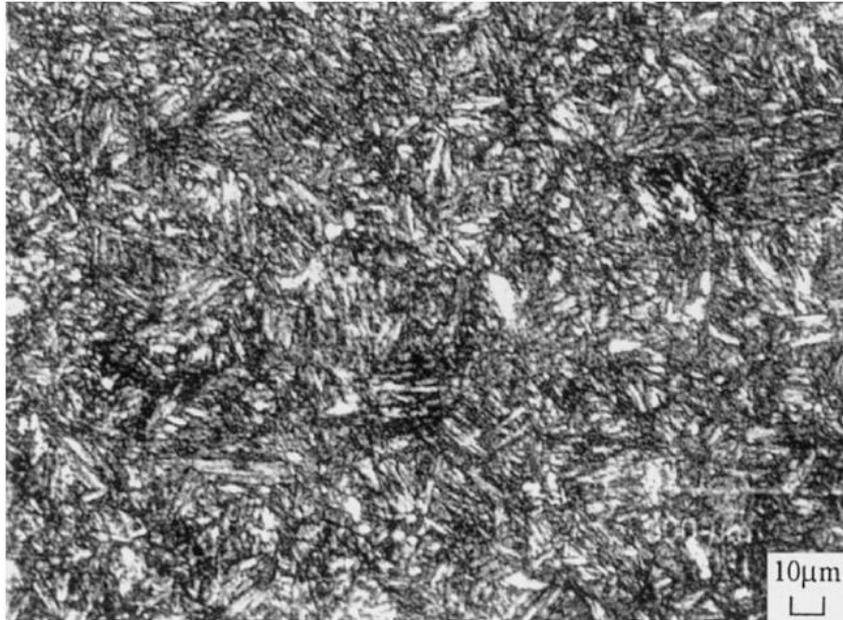


Figura 6. Microestrutura martensítica do aço 4340 após têmpera a 850 °C. (Fonte: [18])

2.2.1. Fresamento do aço 4340

Lima, 2008 [2] pretendeu identificar quais efeitos gerados pelos parâmetros de corte teriam impacto na integridade superficial de peças confeccionadas em aço ABNT 4340 por processos de retificação cilíndrica, torneamento, fresamento de topo e furação. Ao analisar o processo de fresamento, verificou quais parâmetros de usinagem promoveram maiores alterações à integridade superficial. Foram variados os parâmetros de velocidade de corte (V_c), avanço por dente (f_z) e profundidade de corte (a_p), conforme descrito na Tabela 2. Um total de 18 amostras foram usinadas com combinação dos valores descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de Corte do fresamento. (Fonte: [2])

V_c 1	80 m/min
V_c 2	100 m/min
V_c 3	120 m/min
f_z 1	0,100 mm/volta
f_z 2	0,083 mm/volta
f_z 3	0,050 mm/volta
a_p 1	0,75 mm
a_p 2	0,50 mm

Análises da rugosidade superficial, dureza e tensões residuais superficiais foram realizadas. Na Figura 7 é apresentado os valores de dureza superficial nas amostras fresadas separados em 3 velocidades de corte, cada gráfico com 3 avanços por dente e 2 profundidades de corte (Lima, 2008 [2]). Observa-se que na medida em que se aumentou a velocidade de corte menores valores de dureza superficial são obtidos. Também é possível verificar que a dureza sofre alterações inversamente proporcionais à profundidade de corte (Lima, 2008, [2]).

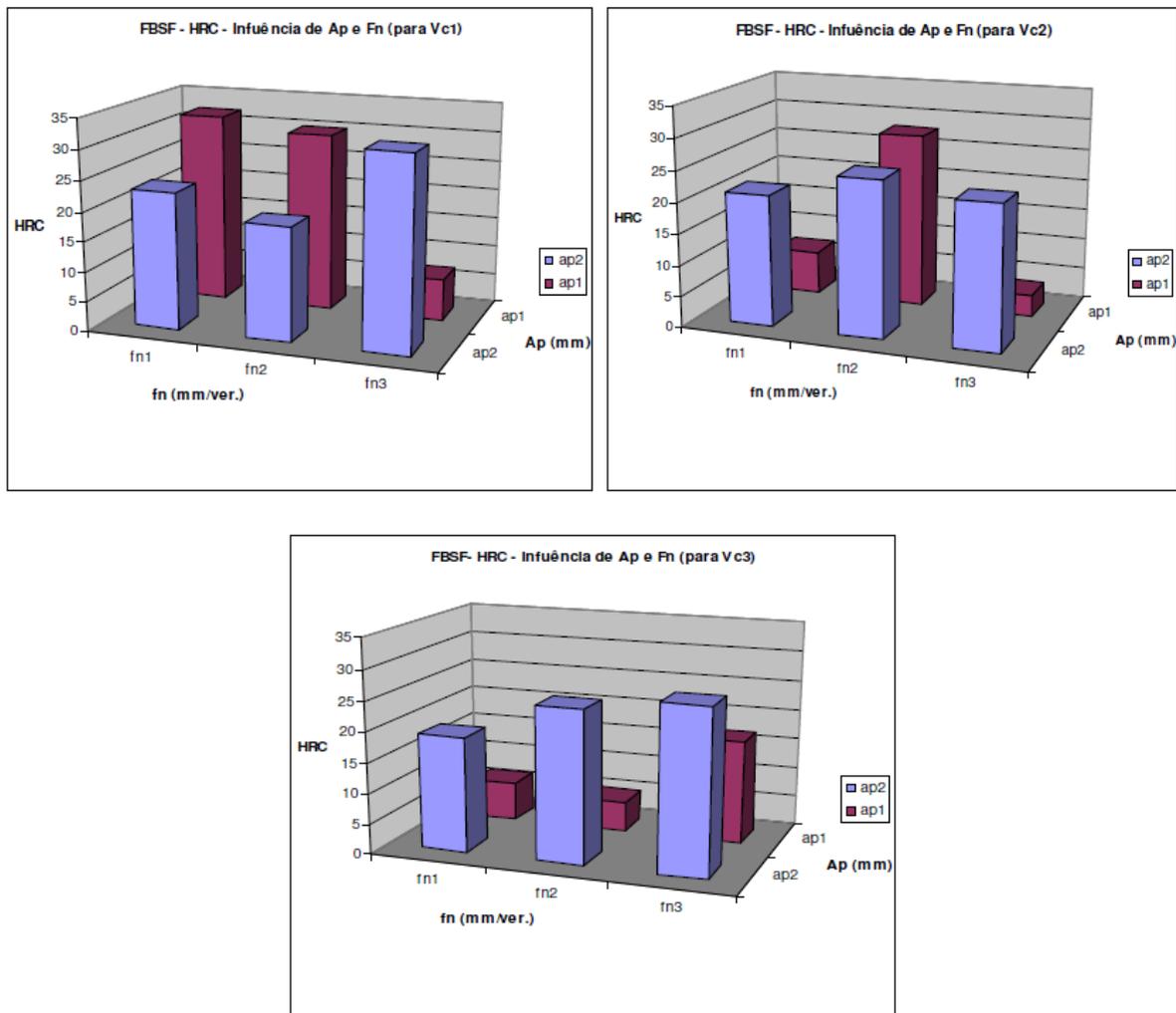


Figura 7. Resultados de dureza superficial (Fonte: [2])

Continuando analisando as características da superfície das amostras, os valores de rugosidade superficial são apresentados na Figura 8. Não sinalizando claramente nenhuma tendência no comportamento como um todo, existem algumas possíveis influências de f_z , V_c e a_p na variável analisada, conforme a seguir. O f_z propiciou significativas oscilações no comportamento da rugosidade, pois ao mesmo tempo em que para alguns casos, aumentar o valor dos parâmetros de avanço (f_z) melhorou a rugosidade superficial, em outras amostras, esta relação assumiu sentido contrário. Em relação à a_p , houve interferência no comportamento da variável analisada, de modo que se percebe que reduzindo o valor da a_p , reduzem-se os valores de Ra. A V_c também promoveu mudanças comportamentais nos valores da análise, ou seja, na maior parte das amostras, ao aumentar as velocidades de cortes foram obtidos menores valores de rugosidade superficial. (Lima, 2008, [2]).

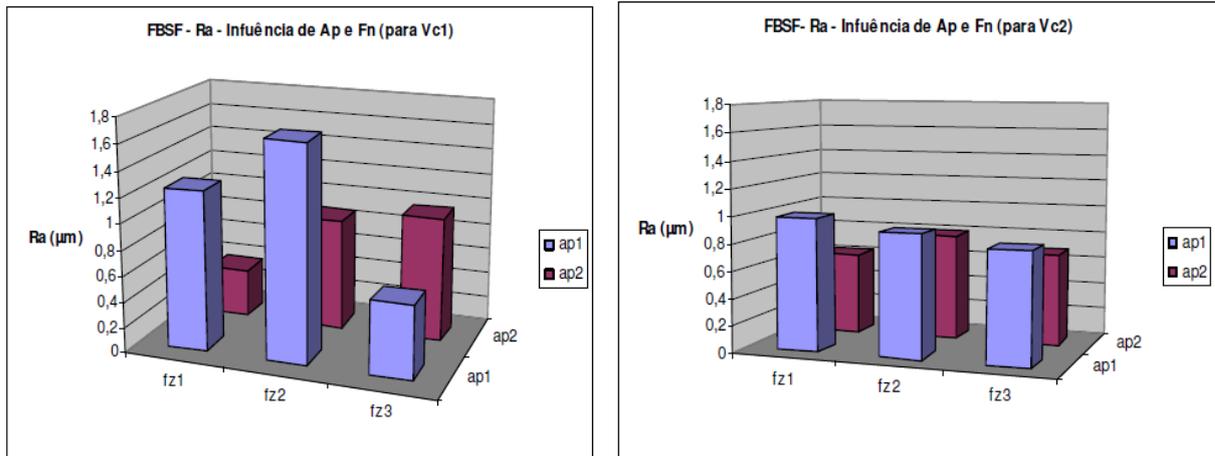


Figura 8. Resultados de rugosidade superficial (Fonte: [2])

2.3. Tensões Residuais

Tensões residuais são definidas, segundo Matsumoto *et al*, 1986 [20], como as tensões remanescentes no material da peça após ser retirada a solitação termomecânica à qual foi submetida. Esse campo de tensões residuais gerado no material pode ou não ser favorável, dependendo da sua natureza trativa ou compressiva, podendo ter magnitude alta ou baixa [21].

As tensões residuais são geradas no metal por processos mecânicos, térmicos, químicos ou uma combinação destes, resultando em uma mudança permanente na sua forma segundo Evans, 1971 [22]. Como exemplo têm-se os seguintes processos:

- a) Mecânico: usinagem, conformação mecânica ou montagem;
- b) Térmico: soldagem, fundição ou tratamento térmico;
- c) Químico: oxidação, corrosão ou eletrodeposição.

Segundo Whitehouse, 1994 [23], a separação das causas que geram as tensões mecânicas, térmicas e químicas é por vezes complexa, pois frequentemente, mais de uma delas ocorre simultaneamente. Essa combinação entre tensões é mais comum quando causadas por processos mecânicos e térmicos e, em processos que se dão exclusivamente por ação química, a resultante das tensões residuais é zero [24].

No estudo de Liu & Barash, 1982 [25], foram enumeradas as causas da geração de tensões residuais mecânicas, como sendo elas: o escoamento plástico não homogêneo por forças externas, por efeito de orientação cristalina, de contorno de grão, entre outras reações mecânicas.

Em geral, qualquer superfície de componentes usinados possui tensões residuais após o processo de retirada de material [26]; Segundo Brinksmeier *et al*, 1982 [21], essas tensões são limitadas à penetração na ordem de apenas algumas centenas de milímetros. Apesar disso, essas tensões residuais presentes podem muitas vezes ser prejudiciais [20].

2.3.1. Tensões residuais em usinagem

Qualquer processo de usinagem gera modificações no estado bruto do material que foi usinado. Esses processos têm grande impacto para o desenvolvimento de estados de superfície e distribuição de tensão residual nas peças usinadas. Para atender a diversas aplicações, é comum garantir um comportamento específico para a superfície de um componente, de acordo com a função à qual foi projetado. Em usinagem, as tensões residuais são resultantes, basicamente, das deformações plásticas, originadas das forças de corte que atuam sobre a peça, do aquecimento não uniforme da peça e de possíveis variações volumétricas devido às mudanças de fase do material. A natureza e magnitude dessas tensões estão diretamente relacionadas ao material da peça usinada, tipo e geometria da ferramenta e aos parâmetros de corte, tais como, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte [27].

No caso de uma superfície usinada ser produzida por uma sequência de operações, o resultado da tensão residual é diferente do resultado produzido por uma única operação [28]. Isto ocorre devido à superposição das tensões individuais dos processos. Por exemplo, se uma superfície retificada convencionalmente, que gera um tracionamento da camada superficial, for jateada com esferas pelo processo de *shot peening*, que gera compressão da camada superficial, o resultado da tensão final será a superposição de duas tensões individuais [24].

Em usinagens de passe único sob condições de corte leve, a refrigeração é mais eficiente e o atrito diminui por conta do uso de fluidos refrigerantes. Dessa forma a deformação é o principal agente gerador de tensões e as mesmas tendem a apresentar natureza compressiva. Em usinagens convencionais são produzidas tensões tão elevadas quanto às obtidas em condições moderadas, efeito causado pela tendência do evento ser predominantemente térmico [28]. Brinksmeier *et al*, 1982 [21], listou alguns efeitos resultantes da tensões residuais sobre peças para uso mecânico, sendo esses: deformação, resistência estática e dinâmica, entre outros.

No torneamento, por exemplo, Navas *et al*, 2012 [29] verificou que conforme a velocidade de avanço aumentou, as tensões residuais tendem a ser mais trativas, e, por meio de testes, foi possível deduzir que houve um aumento na microtensão. Já no caso do processo

de retificação pode-se perceber que tratamentos térmicos convencionais produzem tensões residuais de compressão devido à expansão de volume e que a sequência dos processos de usinagem pode influenciar as tensões residuais finais [28]. Pode-se também destacar, segundo Gorgulho & Lima, 2013 [14], que o momento crítico no ciclo de usinagem é o momento de corte, pois, devido às suas variações de temperatura e força atuantes podem ocorrer danos nas superfícies das peças.

2.3.2. Tensões residuais em fresamento

Quase todas as peças usinadas por fresamento tangencial têm tensões residuais de tração na superfície. No entanto, se for possível obter tensões compressão na superfície usinada unicamente por um processo de fresamento, espera-se que a resistência à fadiga e resistência à corrosão sob tensão dos componentes usinados aumente [3]. Contudo, esses campos de tensão compressiva normalmente são obtidos em baixas velocidades de corte de fresamento (valendo também para furação e torneamento), pois para maiores valores de velocidades de corte o efeito térmico se torna dominante [24].

Segundo Brinksmeier, *et al*, 1982 [21], no fresamento de topo, considerável deformação plástica é produzida por meio de operações padrão, assim as tensões residuais tende a ser compressivas. Neste caso as influências térmicas não alcançam profundidades significativas na peça e, por isso, essas são menos importantes que as influências mecânicas no resultante de tensão na superfície. Assim, podem-se obter valores positivos ou negativos na superfície de uma peça usinada pro fresamento. A Figura 9 apresenta o perfil em profundidade típico de tensões residuais (eixo vertical) coletados por Brinksmeier, *et al*, 1982 [21], com velocidade de corte (V_c) 168 m/min, avanço por dente (f_z) 0,15 mm com fluido de corte. Neste estudo foram verificado o comportamentos das tensões residuais utilizando ferramentas com diferentes graus de desgaste (0, 200 e 400 μm) . Analisando a Figura 9 é possível observar que o desgaste da fresa tem um papel importante no resultado da tensão da superfície fresada; quanto mais desgastada, mais profunda é a camada de tensão compressiva na peça [21].

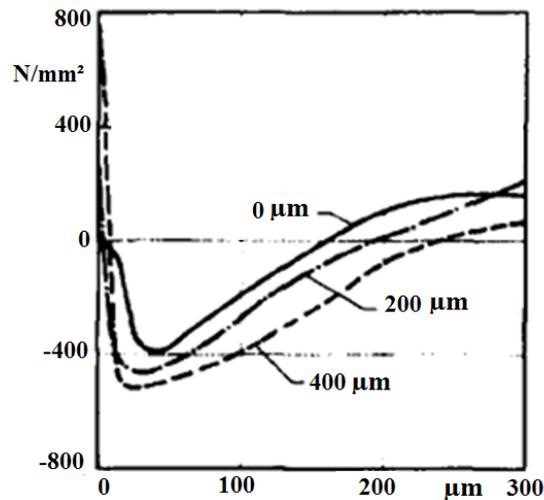


Figura 9. Tensões residuais em fresamento de topo. (Fonte: [21])

Esses resultados, portanto, podem variar conforme os parâmetros de corte utilizados. Altas velocidades de corte e avanço tendem a levar um aumento nas tensões residuais compressivas e sua profundidade, enquanto que alta dissipação térmica pode gerar tensões trativas.

O objetivo de um estudo feito por Segawa *et al*, 2004 [3] foi desenvolver uma nova ferramenta (Figura 10) para gerar tensões residuais de compressão na superfície usinada unicamente por fresamento de topo do alumínio 7075. Esta ferramenta tem arestas de corte para remoção de material e um pino de projecção para um processo de polimento. Foi, então, demonstrado que a fresa proposta poderia gerar tensões residuais de compressão eficaz na superfície usinada pelo processo de fresamento.

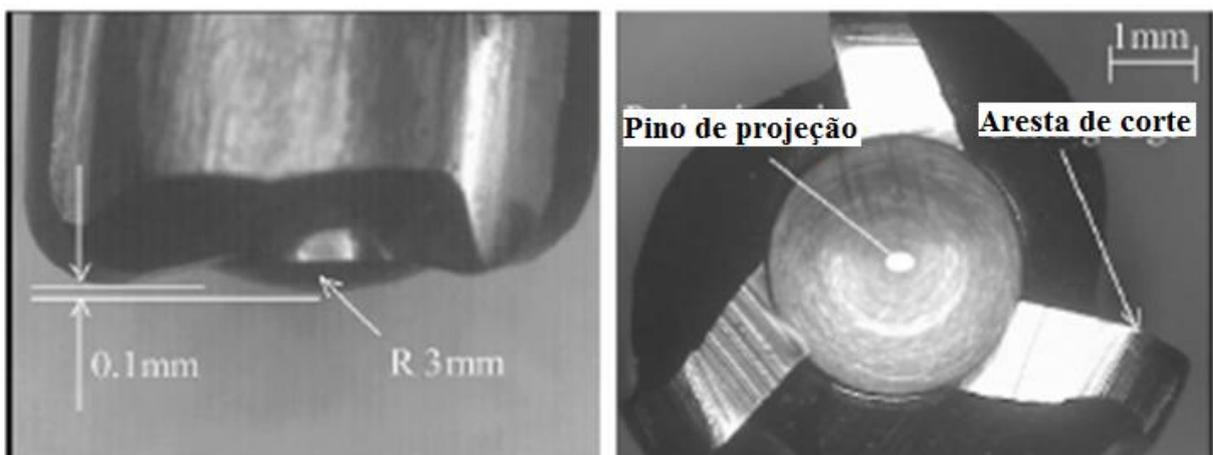


Figura 10. Fotografia da fresa proposta por Segawa et al, 2004. (Fonte:[3 – modificado])

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de corte utilizados no fresamento das amostras desse estudo. Na Figura 11 observa-se os resultados de tensões residuais em profundidade nas condições de lubrificação seca e com fluido de corte.

Tabela 3. Condições de fresamento por Segawa et al, 2004 [3]

Velocidade de corte (l/min)	10.000
Avanço por dente (mm/dente)	0,1
Profundidade de corte (mm)	0,3
Avanço (mm)	0,3

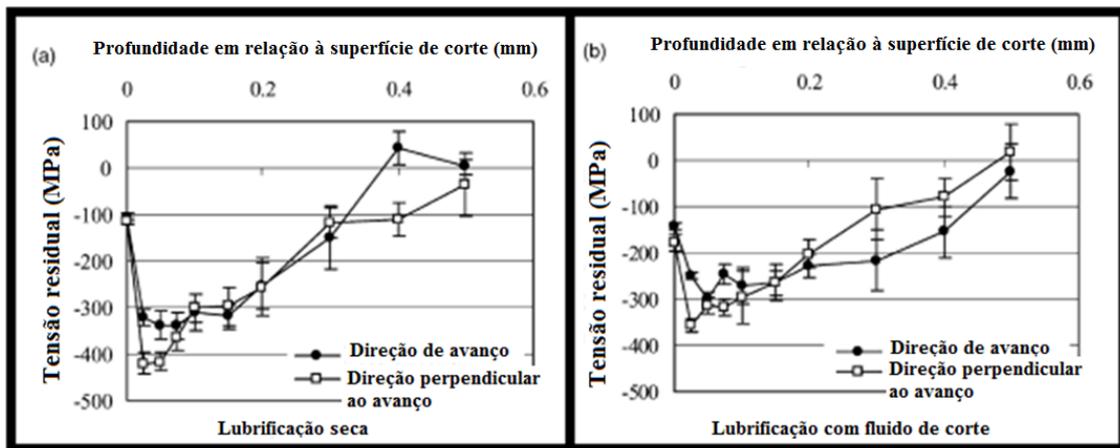


Figura 11. Perfil de tensões residuais em profundidade em a) lubrificação seca; b) fluido de corte. (Fonte: [30 – modificado])

2.3.3. Tensões residuais no fresamento de aço 4340

No estudo feito por Lima, 2008 [2], apresentado no item 2.2.1., as tensões residuais da superfície dos 18 corpos de prova foram analisadas e na Figura 12 é apresentado o comportamento das tensões residuais observado nas amostras fresadas para 3 velocidades de corte, para um avanço por dente específico.

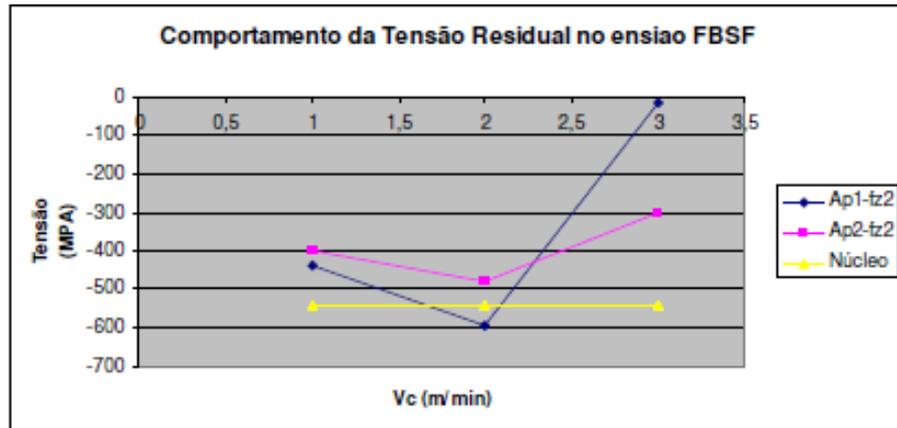


Figura 12. Corpos de prova confeccionados por Lima, 2008. (Fonte: [18])

Segundo Lima, 2008 [2] os valores de tensão residuais encontrados na superfície analisadas mostraram uma tendencia trativa com o aumento de velocidade de corte, que apresentou-se como a maior responsável pelas alterações na integridade superficial ligadas ao estado de tensão residual das amostras. Por outro lado, o avanço por dente demonstrou-se consideravelmente influente no comportamento da variável dos valores de microdureza analisados, sendo mais evidenciados quando combinados a valores de Vc de maior intensidade.

2.4. Tensometria por Difração de Raios-X

É possível mensurar os valores de tensão residual em uma amostra usinada utilizando-se de diversos métodos. A técnica de medição ideal para um determinado caso deve ser selecionada partindo de uma série de parâmetros relevantes que influenciam nas características da peça e no resultado do tipo de análise que se pretende fazer [24]. As técnicas de medição de tensões residuais dividem-se em destrutivas, semidestruativas e não destrutivas, de acordo com o nível de dano introduzido na amostra no momento de sua medição [30]. São alguns exemplos de técnica não-destrutivas:

- Difração de Raio-X
- Ruído Magnético Barkhausen
- Técnica de Ultrassom

A tensometria por difração de raios-X tem como princípio a medição do espaçamento entre planos da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes estreitos de raios-X. Ao ser irradiado com comprimento de onda λ , qualquer material metálico, produz nesse feixe um espalhamento específico, dependendo da organização dos átomos no material, conforme

esquema da Figura 13. [31] Esta técnica é utilizada na determinação de campos de tensões em camadas com espessuras em torno de 5 a 10 μm [24], [30], [31].

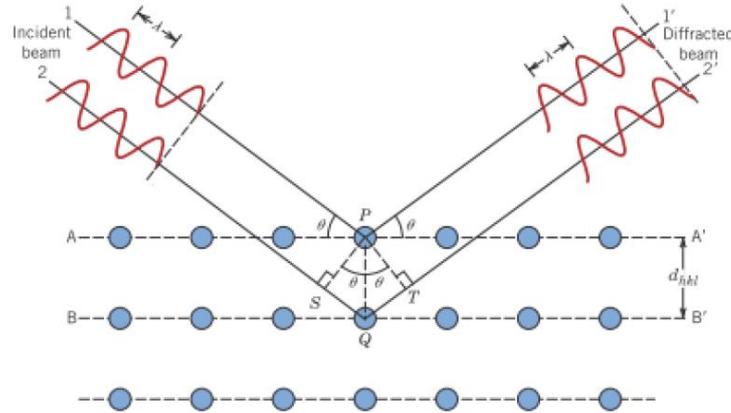


Figura 13. Representação dos Raios-X difratados (Fonte: [33])

O método de medição e de cálculo dos valores de tensão residual mais conhecido é chamado de método do $\sin^2\psi$ [30]. Esse método consiste na medição da posição do pico de difração em relação ao ângulo de inclinação do feixe incidente em relação à superfície do material analisado [32]. A equação geral para a determinação de tensões residuais a partir de medidas de difração é [33]:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\varphi\psi} = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{11} \cos^2\varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2\varphi - \sigma_{33}) \sin^2\psi + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} - \\ \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{13} \cos\varphi + \sigma_{23} \sin\varphi) \sin 2\psi \end{aligned} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$\epsilon_{\varphi\psi}$ = deformação na direção polar φ , ψ

$d_{\varphi\psi}$ = espaçamento interplanar medido na amostra na direção de φ , ψ

d_0 = deformação no espaçamento interplanar livre de tensões

σ_{ij} = tensor de tensões

ν = coeficiente de Poisson

E = módulo de Young

As componentes do tensor de tensão, σ_{ij} , podem ser obtidas pelo método $\sin^2\psi$ que consiste em representar $d_{\varphi\psi}$ para diferentes valores de φ . O espaçamento da malha, $d_{\varphi\psi}$, é

obtido medindo experimentalmente a posição do pico em 2θ e utilizando a Lei de Bragg $\lambda = 2d \sin \theta$. [33]

Para medirmos as tensões em apenas duas direções, isto é, considerando o tensor descrito acima apenas como uma matriz, catemos a seguinte fundamentação desse método conforme a equação da teoria da elasticidade para uma deformação $\mathcal{E}_{\varphi\psi}$ em uma direção qualquer [34]:

$$\mathcal{E}_{\varphi\psi} = \frac{1-\nu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

σ_{φ} = componente da tensão medida

σ_1 e σ_2 = tensões principais obtidas pelo Círculo de Mohr

Utilizando a Lei de Braggs, a deformação em função da difração é:

$$\mathcal{E}_{\varphi\psi} = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0} = \text{ctg}\theta * \Delta\theta \quad \text{Equação 5}$$

Ao igualar as Equação 4 e Equação 5 podemos obter a representação da variação do ângulo de difração em relação ao $\sin^2\psi$, conforme abaixo:

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{E}{1+\nu} \text{ctg}\theta \frac{d\theta}{\sin^2\psi} = -\frac{E}{1+\nu} \text{ctg}\theta (\theta_{\psi=90} - \theta_{\psi=0}) \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$(\theta_{\psi=90} - \theta_{\psi=0})$ = inclinação da linha reta da função $\theta_{\varphi\psi} \times \sin^2\psi$

Essa variação ou inclinação de $(\theta_{\psi=90} - \theta_{\psi=0})$ é determinada pela regressão linear da função $\theta_{\psi=90} = f(\sin^2\psi)$ que está incluída no software do aparelho de raio-X, o qual traduz automaticamente para as medidas de tensões [34].

As desvantagens tensometria por difração de raios-X são dadas principalmente pela existência de parâmetros metalúrgicos inerentes aos materiais, como as impurezas, o tamanho de grão e vazios que são muitas vezes imperceptíveis de serem encontrados para que correções possam ser feitas. É importante para a confiabilidade dos resultados que o material medido tenha uma granulometria refinada e homogênea, comportamento linear elástico e propriedades isotrópicas [30].

Capítulo 3

Materiais e métodos

3.1. Materiais

O aço utilizado para a realização para realização deste trabalho foi o aço SAE 4340 com tratamento térmico de alívio de tensão, com dureza de 28 HRc, de acordo com o fabricante. A composição química do material, dada pelo fabricante, está descrita na Tabela 4.

Tabela 4. Composição química do aço SAE 4340, dado pelo fabricante (em % de peso).

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe (em balanço)
0,39	0,72	0,25	0,75	1,72	0,24	
Co	Al	Cu	P	V	S	
0,01	0,050	0,04	0,010	0,01	0,025	

3.2. Fresamento das amostras

Para a obtenção das amostras foi utilizada uma barra de 500 mm de comprimento e diâmetro de 50,8mm. Foram produzidos 4 peças com altura de 30mm, conforme Figura 14. Em cada peça foram usinadas as duas faces, totalizando 8 amostras. Cada peça recebeu uma numeração de 1 a 4 e cada face, uma denominação, A ou B.

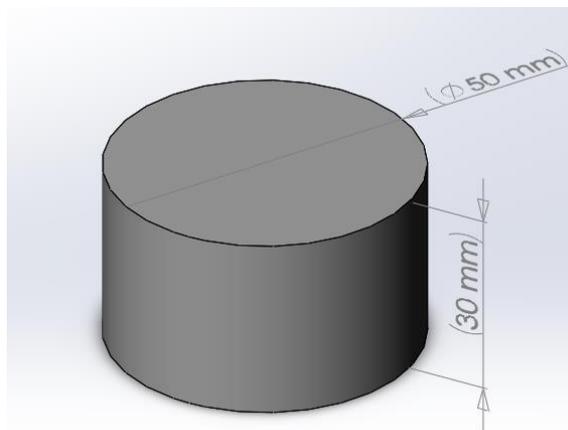


Figura 14. Disco em Aço SAE 4340 (Ø 50 x 30 mm)

Após o corte, as amostras foram tratadas termicamente para alívio de tensões (TTAT) a 600°C durante 2h. O gráfico da curva de temperatura mostrado na Figura 15 mostra a taxa com a qual o forno foi aquecido até estabilizar à temperatura de 600°C. Decorridas 2h após a estabilização da temperatura, o forno foi desligado e as amostras arrefeceram dentro do forno por 2 dias.

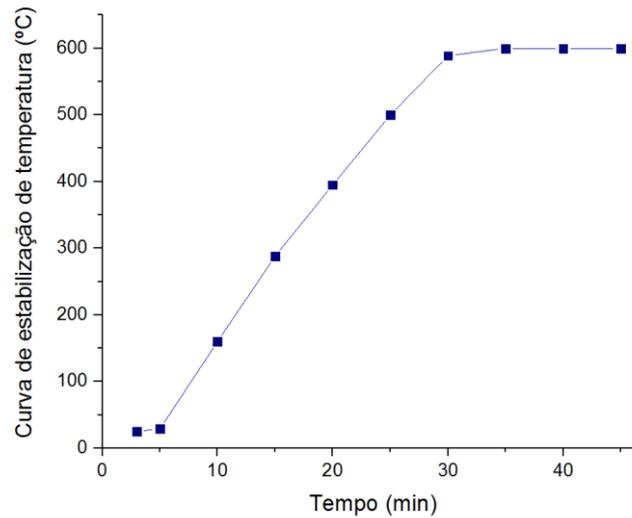


Figura 15. Estabilização da temperatura do forno

O fresamento foi realizado a seco na máquina fresadora Diplomat 3001, modelo FVF 2000 do Laboratório de Usinagem (LABUS) no CEFET/RJ. Foram estudados dois parâmetros de corte: velocidade de corte e profundidade de corte, totalizando 4 condições, conforme apresenta a Tabela 5. Desta forma, o fresamento das amostras foi baseado em um experimento fatorial de 4 combinações (Tabela 6), onde o símbolo mais (+) significa o maior valor do parâmetro e (–) o menor valor. Foram usadas 2 amostras para cada combinação.

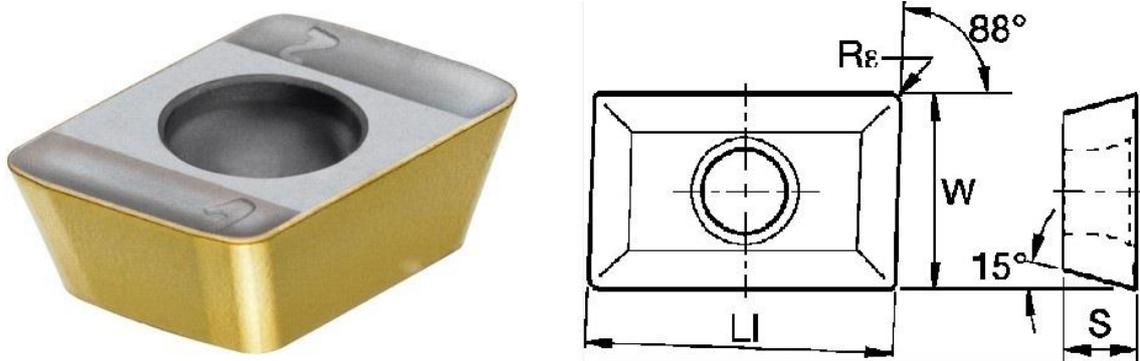
Tabela 5. Condições de corte das amostras usinadas

Condição	V_c [m/min]	a_p [mm]
1	40	0,4
2	40	0,6
3	50	0,4
4	50	0,6

Tabela 6. Amostras x condições de cortes

Condição	V_c	a_p
Amostra 1A	-	-
Amostra 1B	-	-
Amostra 2A	-	+
Amostra 2B	-	+
Amostra 3A	+	-
Amostra 3B	+	-
Amostra 4A	+	+
Amostra 4B	+	+

A usinagem foi realizada com uma fresa intercambiável de 20 mm de diâmetro com duas arestas de corte, avanço por dente de 0.278 mm/dente e utilizando pastilhas de metal duro XDMT090308HX PA120, conforme mostrado na Figura 16.

**Figura 16.** Pastilhas intercambiáveis utilizadas no fresamento

A Figura 16 indica a geometria da ferramenta segundo suas principais dimensões, sendo o comprimento ($L1$) = 9 mm, largura (W) = 6 mm, espessura (S) = 3 mm e o raio da ponta (R_ϵ) = 0,8 mm.

Cada condição de corte utilizou a pastilha nova. Após usinagem de cada face (A e B) as medidas de rugosidade e as tensões residuais foram realizadas nos rasgos, como mostra a Figura 17, que tem a área fresada destacada em azul em ambas as faces.

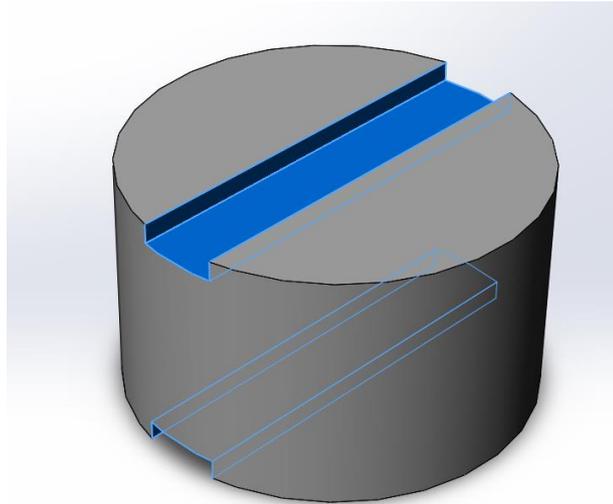


Figura 17. Imagem esquemática da peça após usinagem de duas amostras

3.3. Medição das tensões residuais

As medições de tensões residuais foram realizadas no no Laboratório de Análise de Tensões (LAT), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense (UFF) através da técnica de tensometria por difração de raios-X. Foi usado um analisador de tensões da *Stressrad* (Figura 18).

Cada amostra foi medida uma vez com os seguintes parâmetros adotados:

- $\text{Cr}\alpha$ com $\lambda=2,2809\text{\AA}$, difratando o plano cristalográfico (211) da ferrita
- Ângulo de difração de ferrita (2θ): $156,2^\circ$
- Ângulos Ψ : $0^\circ, 21^\circ, 30^\circ, 38^\circ, 45^\circ$
- Tempo de exposição ao Raio-X: 35 s para cada ângulo Ψ

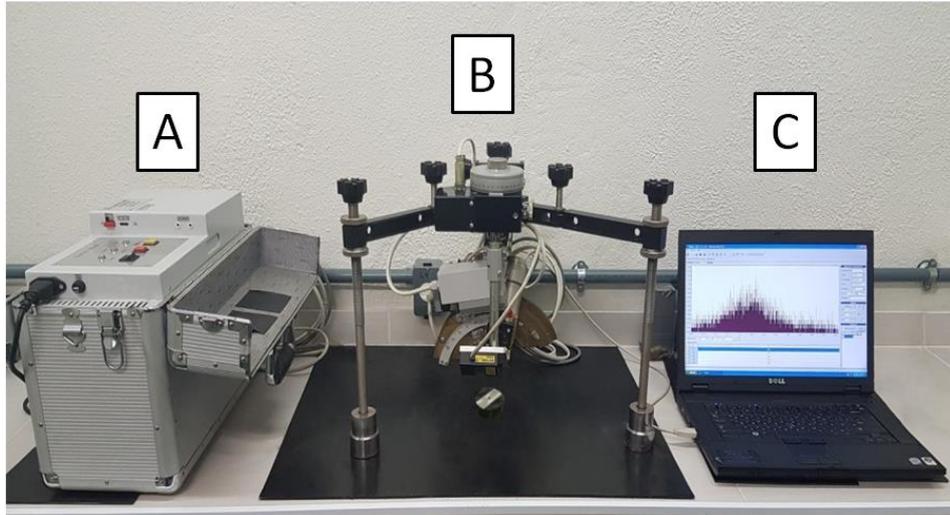


Figura 18. Analisador de tensões da *Stressrad* (A - Unidade de controle; B - Sistema de medição; C - Sistema de aquisição e tratamento de dados)

A Figura 19 mostra os dois sentidos em que foram medidas as tensões residuais de cada amostra: sentido longitudinal (L) e transversal (T) ao avanço.

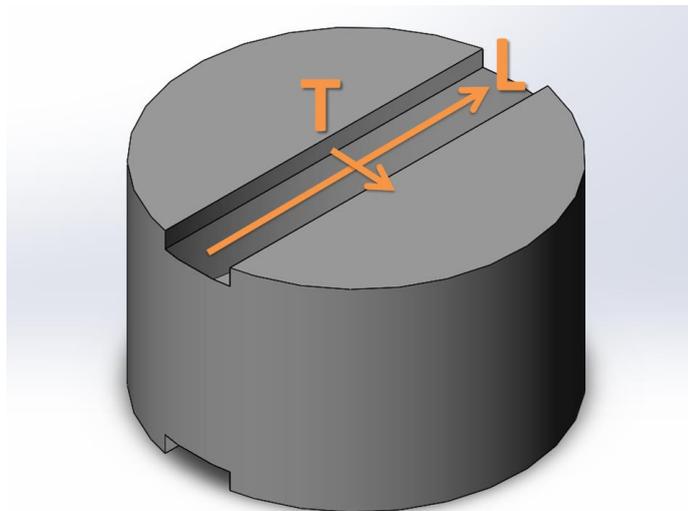


Figura 19. Sentido de análise das tensões residuais nas amostras

3.4. Medidas de rugosidade

As medições de rugosidade foram realizadas na Universidade Federal Fluminense (UFF) utilizando o rugosímetro *Taylor Hubson*. As medidas foram realizadas próximas à metade do comprimento usinado de cada amostra, conforme ilustra Figura 20. A medida realizada foi a rugosidade média (R_a), com os seguintes parâmetros: comprimento de medição de $L = 4,00$ e comprimento de amostragem de $L_a = 0,8\text{mm}$. A ponta do apalpador tem raio de

aproximadamente $5\mu\text{m}$, possibilitando a obtenção de uma resolução de $0,01\mu\text{m}$, com precisão de 2% do valor medido.

A rugosidade superficial (R_a) foi medida 5 vezes em cada amostra próximo ao mesmo ponto na metade do comprimento de usinado e desses valores foram calculadas a média e um desvio padrão.

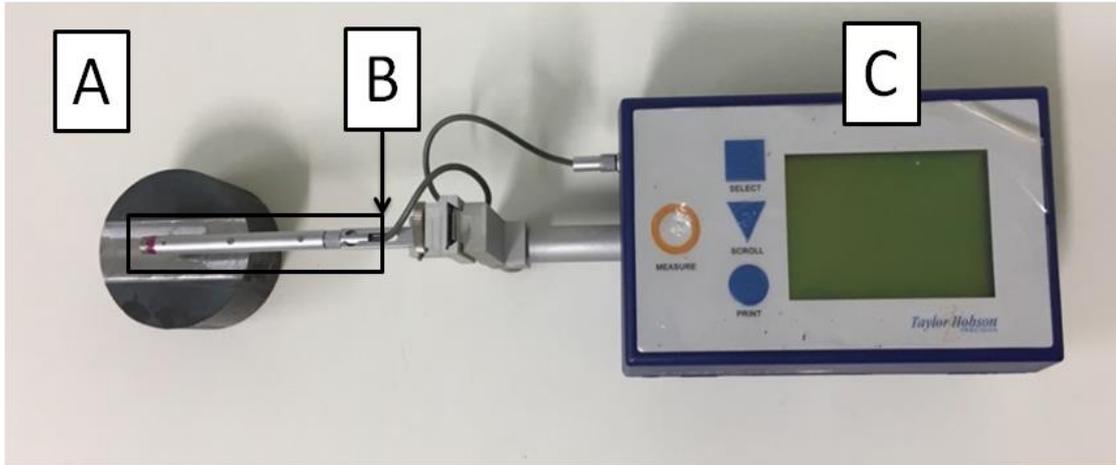


Figura 20. Rugosímetro Taylor Hobson (A - Amostra; B- Apalpador; C - Controlador)

Capítulo 4

Resultados e discussão

4.1. Resultados

No presente capítulo, os resultados são apresentados iniciando pelos valores de tensões residuais, seguidos da rugosidade superficial média (Ra). Finalizando, são apresentados dados gráficos comparativos entre tensões residuais e rugosidade.

4.1.1. Análise das tensões residuais

As tensões residuais (TR) superficiais foram analisadas, primeiramente, nas peças após seu corte e tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), obtendo um valor médio de -21 MPa para a tensão longitudinal e -53 MPa para a tensão transversal, com erro de aproximadamente 15 MPa. Após a usinagem das amostras, as tensões residuais foram medidas na longitudinal (L), sentido do avanço, e na transversal (T), conforme descrito na Tabela 7.

Tabela 7. Valores de tensões residuais das amostras

Condição	Amostra	Tensão Residual [MPa]	
		Longitudinal (L)	Transversal (T)
1	1A	63 ± 23	-190 ± 18
	1B	-29 ± 33	-150 ± 36
2	2A	352 ± 130	244 ± 5
	2B	49 ± 10	-176 ± 26
3	3A	302 ± 42	150 ± 36
	3B	265 ± 4	258 ± 9
4	4A	263 ± 1	146 ± 16
	4B	472 ± 29	244 ± 11

A Figura 21 apresenta os resultados de tensão residual obtidos na direção longitudinal. Com base no gráfico é possível observar que para maiores valores de velocidade de corte as tensões residuais tendem a ter valores maiores em tração. Uma amostra na condição 1

apresenta ainda tensões compressivas. Neste caso, o valor de profundidade de corte pode ter sido determinante.

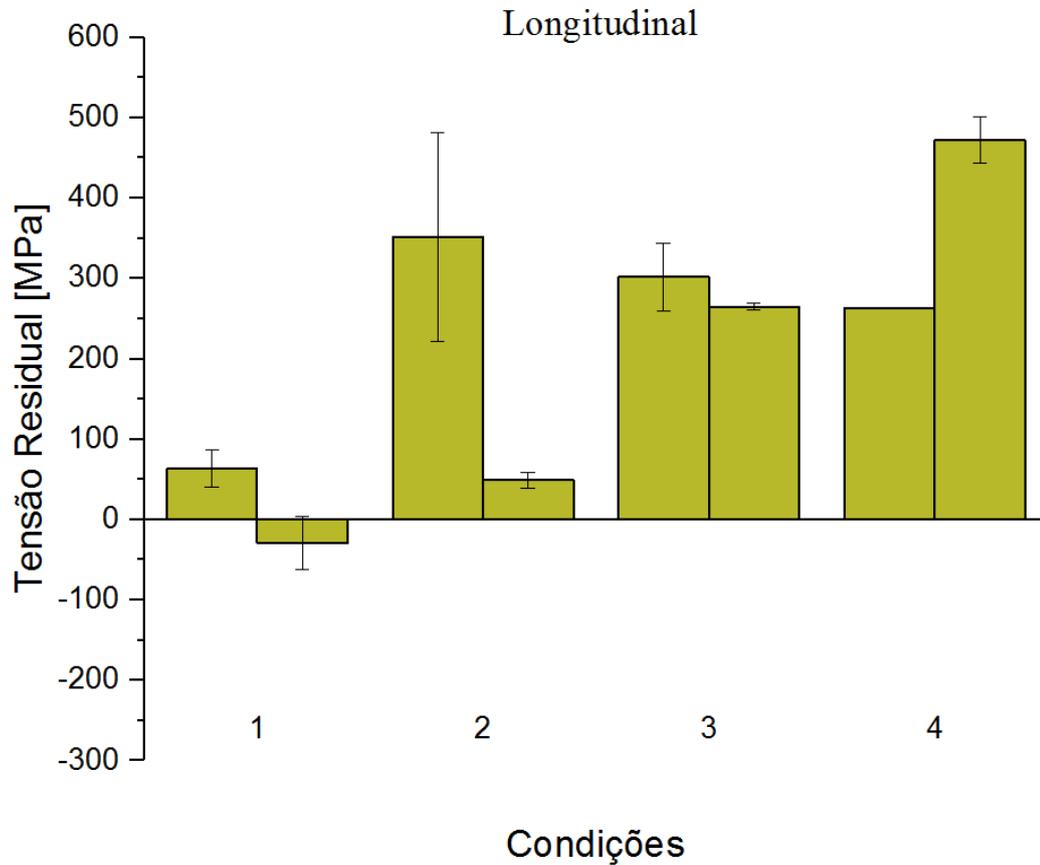


Figura 21. Tensões residuais medidas na direção longitudinal

Analisando a Figura 22, que apresenta os dados de tensões residuais na direção transversal ao avanço da ferramenta de corte, é novamente mostrado que a velocidade de corte é um dos principais fatores na geração de tensões residuais. Nota-se que para valores menores de velocidade (40 m/min) a tendência é para natureza compressiva.

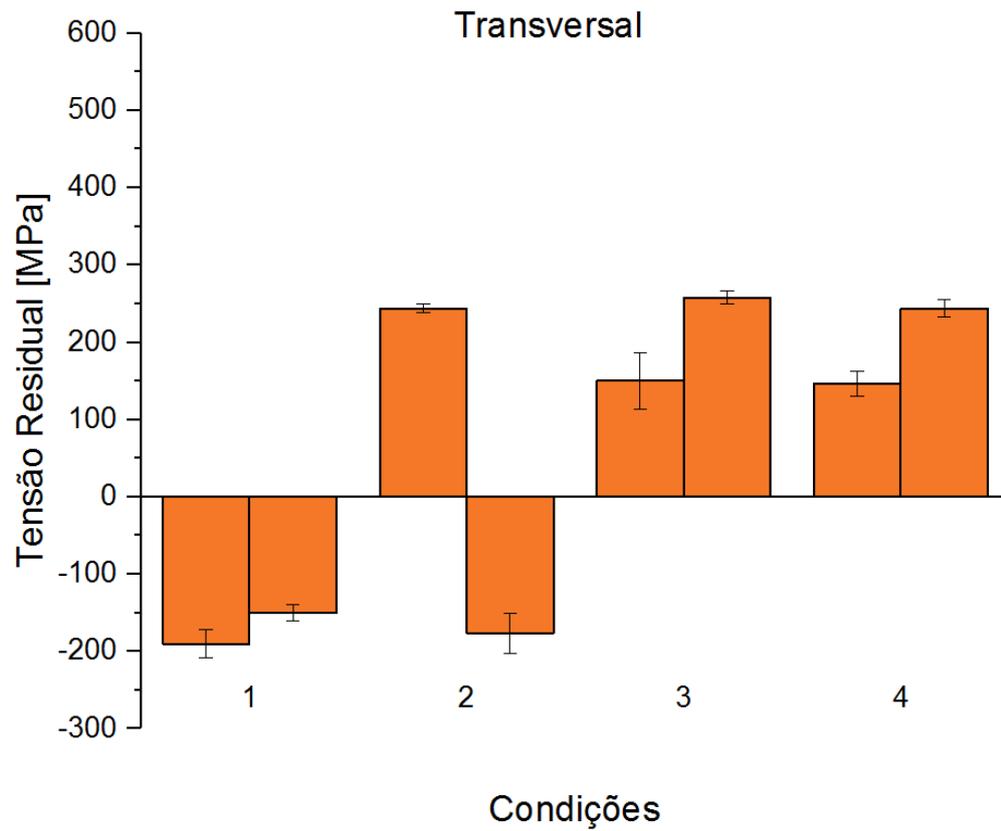


Figura 22. Tensões residuais medidas na direção transversal

Com os valores das tensões obtidas nas medições, foi calculada a média das tensões para cada condição, tanto na direção longitudinal quanto na transversal. Os valores médios alcançados estão esquematizados nas Figuras 23 e Figura 24.

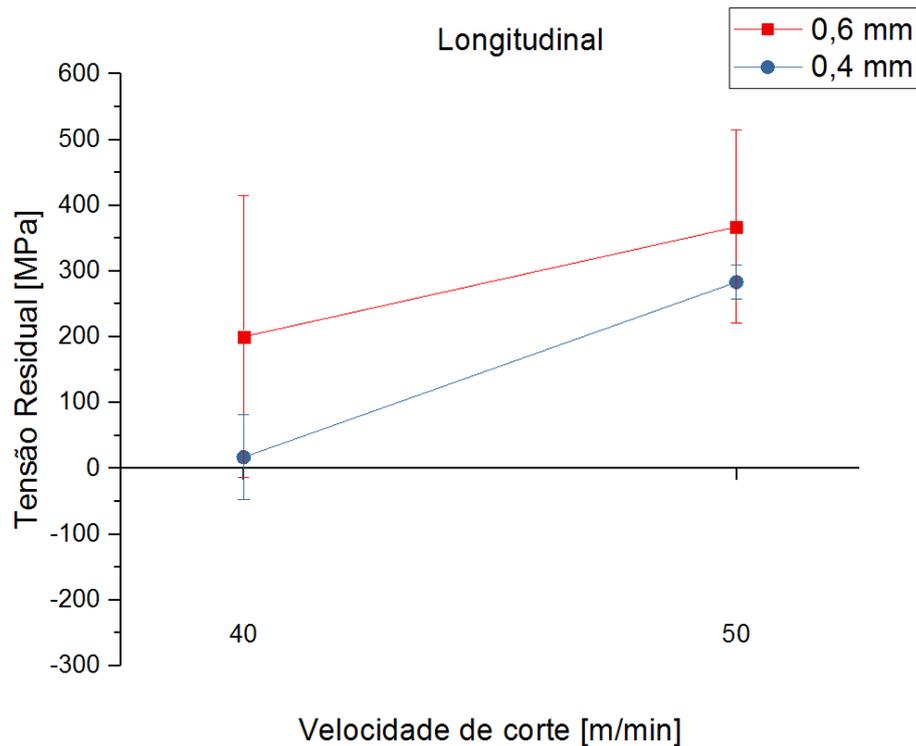


Figura 23. Valores médios das tensões residuais medidas na Longitudinal

Na Figura 23, onde estão marcados os valores de tensões medidos no sentido longitudinal, fica evidente que a taxa de variação de tensões é mais influenciada pela velocidade de corte do que pela profundidade, pois há certo paralelismo entre as retas. Percebe-se também que, ao reduzirmos a velocidade de corte de 50 m/min para 40 m/min existe menor tendência trativa na superfície das amostras. Neste caso, a velocidade de 40 m/min pode ter favorecido menores valores de TR por ser menos agressiva quanto ao arrancamento de material na geração do cavaco, resultando em menores gradientes térmicos, ou seja, minimizando o efeito trativo que a parte térmica induz nos processos de usinagem, conforme apresentado por Lima, 2008 [2].

Dando atenção ainda na Figura 23, os valores de TR obtidos com profundidades de cortes maiores geraram tensões residuais trativas de maior magnitude. Analisando especificamente a condição de corte 1, com velocidade de corte e profundidade de corte menores, o valor médio obtido foi de praticamente zero, o que está coerente, pois quanto menos agressivo é o processo, menores são os efeitos térmico e há uma predominância dos efeitos mecânicos, que tendem a gerar tensões compressivas. Pode-se considerar, no entanto, esse valor nulo como sendo uma boa aproximação, em virtude das magnitudes absolutas obtidas nas amostras 1A e 1B serem pequenas.

A Figura 24 mostra os valores obtidos com as medições de tensões residuais na direção transversal ao avanço de corte realizado pela mesa de usinagem. Analisando o gráfico é possível notar que a velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia no processo, quanto à geração de tensões residuais.

Buscando isoladamente as médias dos valores das tensões com velocidade de corte em 50 m/min, verifica-se que estes são praticamente iguais e trativos, independentemente de qual profundidade de corte foi utilizada. Fixando a velocidade de corte em 40 m/min, foram obtidos valores de considerável magnitude e natureza compressiva para a menor profundidade de corte e, sem que se observasse um padrão, valores de baixa magnitude e natureza trativa em condição de maior profundidade de corte. Esse comportamento mostra que a profundidade de corte é mais determinante quanto maiores forem as velocidades de corte, ou seja, quanto mais severo for o processo, maiores profundidade de corte tendem a gerar tensões residuais trativas.

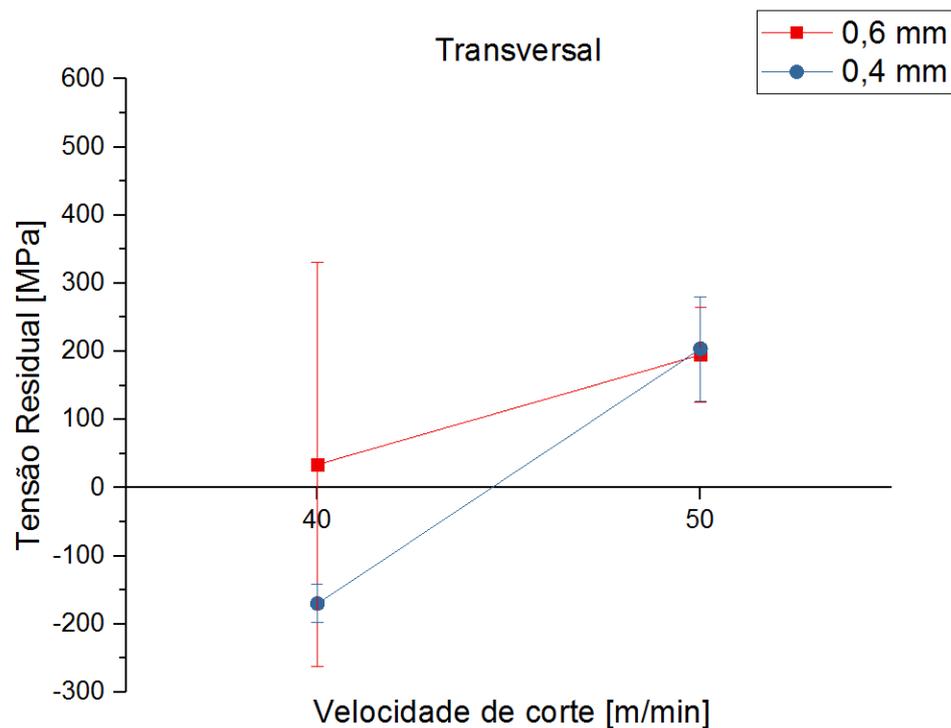


Figura 24. Valores médios das tensões residuais medidas na Transversal

4.1.2. Rugosidade superficial média (Ra)

A média dos valores de rugosidade Ra obtidos após a usinagem das amostras estão apresentados na Tabela 8 e na Figura 25. Com base nos resultados obtidos é possível observar

que maiores velocidades de corte resultaram em melhor acabamento superficial das amostras, ou seja, menor o valor médio da rugosidade. Contudo, há uma dispersão considerável entre as amostras na mesma condição. Para resultados mais consistentes seria necessário ter um maior número de amostras fresadas para cada condição.

Tabela 8. Média dos valores de rugosidade (Ra) das amostras

Amostra	Rugosidade Ra (μm)
1A	$2,27 \pm 0,59$
1B	$2,93 \pm 0,46$
2A	$1,81 \pm 0,17$
2B	$3,04 \pm 0,32$
3A	$2,74 \pm 0,38$
3B	$1,92 \pm 0,76$
4A	$1,96 \pm 0,10$
4B	$1,61 \pm 0,12$

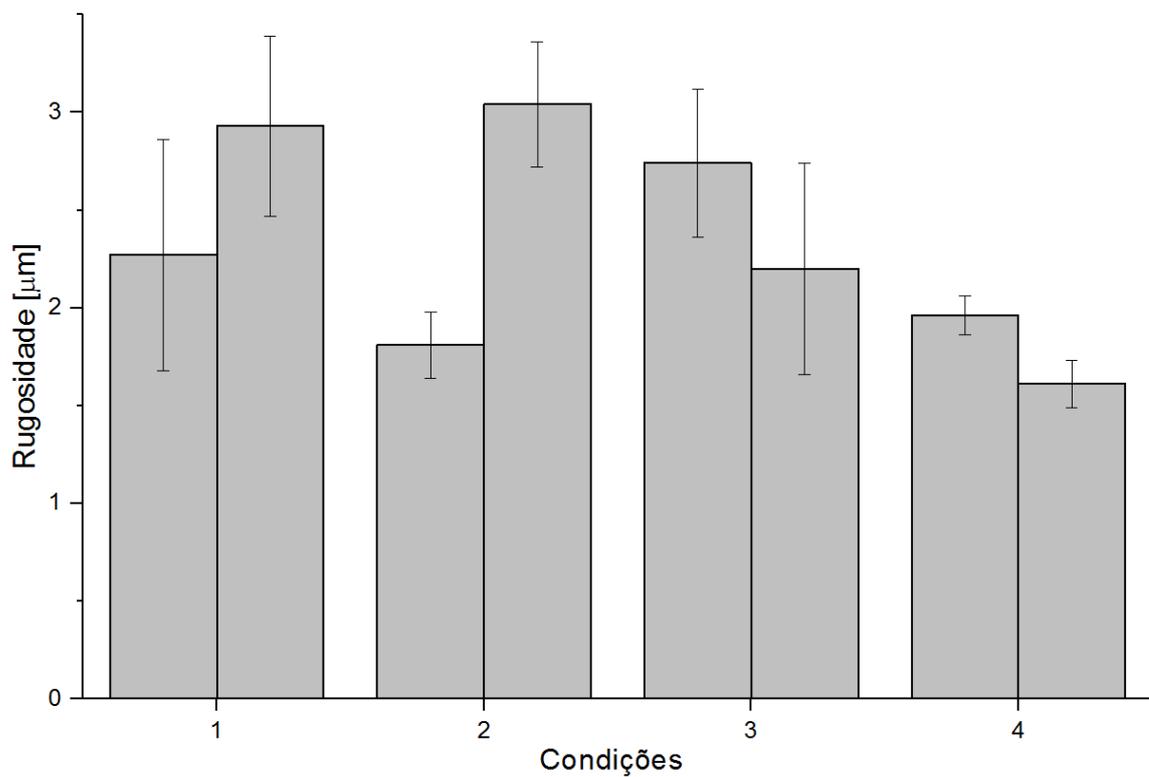


Figura 25. Valores médios de rugosidade

A partir dos valores de rugosidade superficial de cada duas amostras na mesma condição de corte foi calculada a média para aquela condição. Isto é, foram gerados 4 valores que representam o resultado isolando cada parâmetro de corte estudado. A Figura 26 mostra os valores obtidos e a relação entre os parâmetros de corte e a rugosidade superficial.

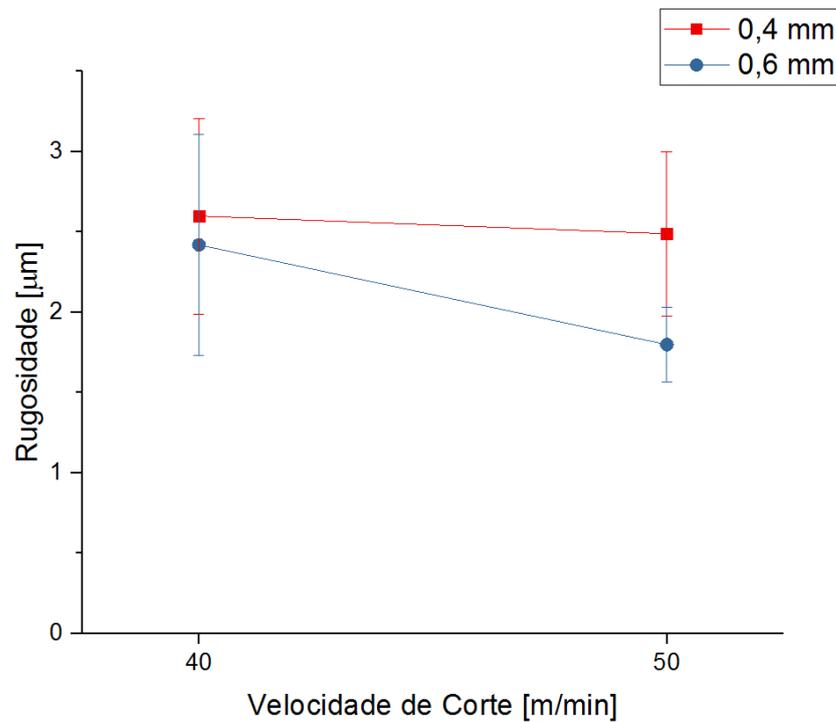


Figura 26. Valores médios de rugosidade para cada condição de corte

Pode-se observar que o valor da rugosidade superficial tem aumento significativo com a diminuição da velocidade de corte de 50 m/min para 40 m/min para ambas as profundidades de corte analisadas. Esse resultado pode ser considerado como esperado, pois a literatura [2] indica que maiores velocidades de corte produzem menores rugosidades superficiais, sendo normalmente empregadas em passes de usinagem para acabamento. Ao analisar a variável profundidade de corte, verifica-se que os valores de rugosidade são menores nas amostras com maiores profundidades. Esse padrão não é previsto pela literatura, uma vez que se espera que menores profundidades de corte gerem menores valores de rugosidade. Contudo, nota-se um desvio padrão muito alto, o que caracteriza que os valores são estatisticamente iguais. Assim, conforme descrito na literatura [18], pode-se dizer que as variações na profundidade de corte apresentam pequenas influências nas características das superfícies, como a rugosidade.

4.1.3. Relação entre tensões residuais e rugosidade

A Figura 27 mostra a relação entre as tensões residuais obtidas na direção longitudinal e a rugosidade superficial medida. Com base nas curvas apresentadas nos gráficos fica evidente que o valor das médias das tensões residuais no sentido longitudinal aumenta gradativamente conforme aumentam os valores dos parâmetros de corte estudados.

É possível observar que maior parte das condições de corte obedeceu a uma diminuição nos valores da rugosidade conforme aumentaram as magnitudes dos parâmetros de corte estudados. Nas condições 2 e 3, no entanto, considerando os desvio-padrão, os valores apresentados não se diferem significativamente. Apesar disso, é possível se descrever a relação entre o comportamento das TR médias e da rugosidade superficial média como sendo inversamente proporcional.

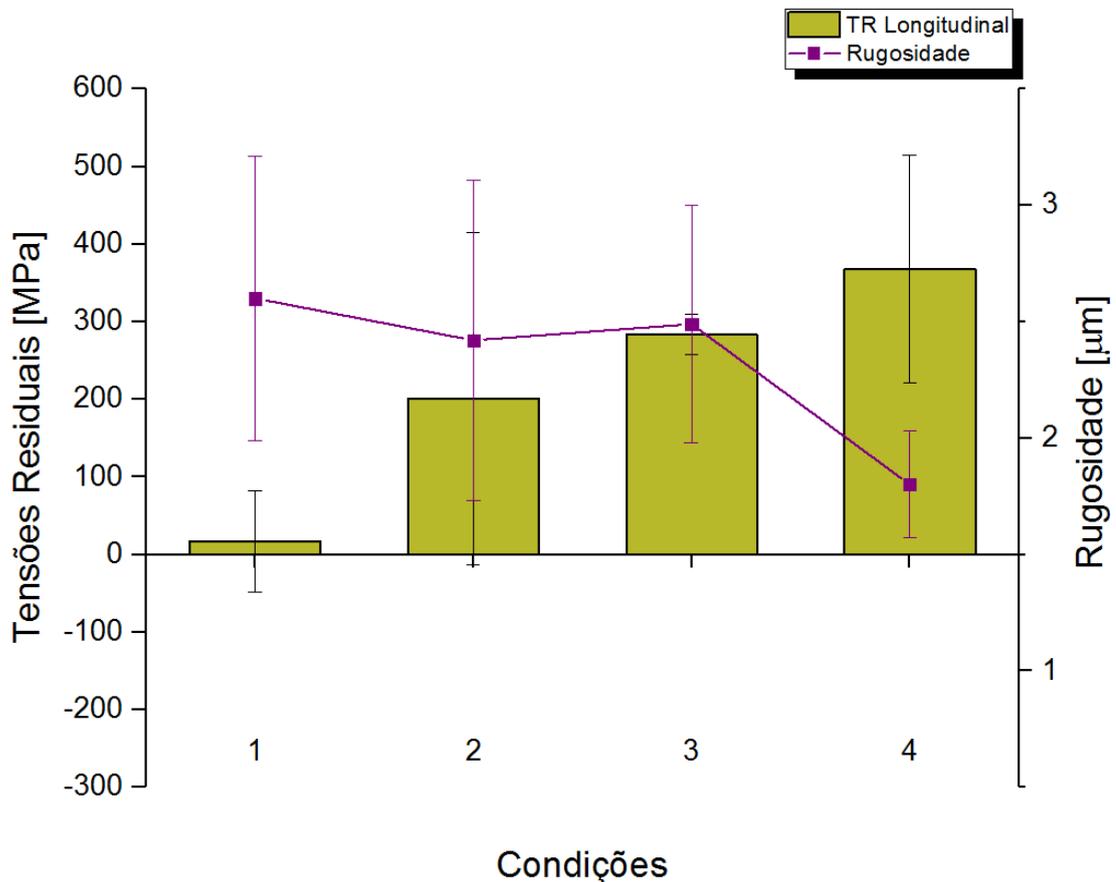


Figura 27. Valores das médias de TR e Rugosidade

Capítulo 5

Conclusão

O presente trabalho, que teve como objetivo a análise das influências dos parâmetros de corte nas tensões residuais geradas no fresamento do aço 4340, permite as seguintes conclusões:

1. O processo de fresamento a seco gera gradientes térmicos que podem resultar em tensões residuais trativas. Contudo, a determinação correta dos parâmetros de corte pode minimizar esse efeito, podemos gerar tensões compressivas nas peças fresadas, o que seria benéfico para as mesmas.
2. A velocidade de corte é um dos principais parâmetros de corte que influencia nos valores de tensões residuais gerados na usinagem. Maiores valores da velocidade de corte tendem a gerar tensões residuais maiores e de natureza trativa.
3. A profundidade de corte não tem efeito impactante na geração de tensões residuais. Entretanto, quando combinada com os demais parâmetros, pode ser importante para a minimização dos gradientes térmicos, que resultam na geração de tensões residuais trativa, como foi observado na direção transversal das amostras.
4. A rugosidade é diretamente influenciada pelos parâmetros de corte, sendo a velocidade de corte, novamente, a que teve maior impacto nos resultados obtidos. Para maiores velocidades de corte têm-se menores valores de rugosidade.
5. A interação analisada entre os valores médios de tensões residuais medidas no sentido longitudinal ao avanço e as médias dos valores de rugosidade das amostras para uma dada condição pôde evidenciar a relação inversamente proporcional entre as magnitudes de ambas, uma vez que as TR se elevaram, os valores de rugosidade reduziram.

Sugestões para trabalhos futuros

1. Realizar testes em número maior de amostras para minimizar a dispersão dos dados.
2. Fazer ensaios de microdureza Vickers para tentar estabelecer uma correlação com as tensões residuais.
3. Medir as tensões residuais em profundidade para avaliar seu comportamento em camadas subsuperficiais.
4. Analisar outros valores para os mesmos parâmetros de corte analisadas.
5. Variar outros parâmetros de corte, como o avanço e a geometria da ferramenta, para estudar a influência desses parâmetros.

Referência Bibliográfica

- [1] V. Chiaverini, *Aço e Ferros Fundidos*, 7ª ed.ampl e rev. ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.
- [2] A. LIMA, *Análise dos Efeitos gerados pelos Parâmetros de Corte em Processos de Usinagem sobre a Integridade Superficial das Peças em Aço ABNT 4340*, Santa Bárbara d'Oeste: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da UNIMEP, 2008.
- [3] T. SEGAWA, H. SASAHARA e M. TSUTSUMI, "Development of a new tool to generate compressive residual stress," *Manufacturing Engineering Section, Manufacturing Department; Graduate School of Bio-Applications and Systems Engineering*, 2004.
- [4] D. FERRARESI, "Fundamentos da usinagem dos metais," 1977.
- [5] G. POULACHON, B. P. BANDYOPADHYAY, I. S. JAWAHIR, S. PHEULPIN e E. SEGUIN, "The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43, pp. 139 - 144, 2003.
- [6] X. WU, Y. KITA e K. IKOKU, "New polishing technology of free form surface by GC," *Journal of Materials Processing Tech.*, 2007.
- [7] SANDIVIK COROMANT, *Catálogo principal*, São Paulo, 2006.
- [8] A. E. M. F. C. DINIZ e N. L. COPPINI, *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, 3ª ed. ed., São Paulo: Artliber Editora, 2001.
- [9] C. Felhő, B. Karpuschewski e K. J., "Surface Roughness Modelling in Face Milling," *15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations*, 2015.
- [10] L. C. ROSA e C. SIQUEIRA, *Fresadora e processo de fresamento*, Sorocaba: UNESP, 2001.
- [11] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª ED. ed.
- [12] M. C. SHAW, "Heat-Afected Zones in Grinding Steel.," *Anais: of the CIRP*, vol. 43, pp. 279 - 282, 1994.
- [13] E. C. BORDINASSI, *Contribuição da Integridade Superficial de um aço inoxidável Super-Duplex Após Usinagem*, São Paulo, 2006.
- [14] G. GORGULHO e A. LIMA, "Avaliação do Comportamento da Integridade Superficial em Peças submetidas a Processos de Usinagem em Condições Otimizadas," *7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 20 - 24 Maio 2013.
- [15] M. VIEIRA, A. LIMA, R. LIBARDI e H. A. CANCELIERI, "Análise da Camada Afetada pelo Calor na Superfície de Peças Retificadas," *IV Seminário do Desgaste . Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, 1998.
- [16] G. METALS, "AÇO CONSTRUÇÃO MECÂNICA – SAE 4340," GGD Metals, [Online]. Available: <http://www.ggdmetals.com.br/cat/4340.pdf>.
- [17] U. D. o. Defense, *ASMT A506 - Standard Specification for Alloy and Structural Alloy Steel, Sheet and Strip, Hot-Rolled and Cold-Rolled*, 2016.
- [18] W. S. LEE e S. T. T., "Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under queched and tempered conditions," *Materials Processing Technology*, 1999.
- [19] A. S. M. CARDOSO, *Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma*, Lorena -

- SP: Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia Lorena, 2011.
- [20] Y. MATSUMOTO, M. M. BARASH e C. R. LIU, "Effect of hardness on the surface integrity of AISI 4340 steel," *Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry*, vol. 108, pp. 169 - 175, 1986.
- [21] E. BRINKSMEIER, HANNOVER, J. T. CAMMETT, CINCINNATI e W. KONIG, "Residual Stresses - Measurement and Causes in Machining Processes," 1982.
- [22] E. B. EVANS, Residual stress measurement by x-ray diffraction - SAE J784a, 2 ed., Universidade Cornell: Society of Automotive Engineers, 1971.
- [23] D. J. WHITEHOUSE, "Handbook of Surface Metrology," *Department of Engineering University of Warwick, UK*, 1994.
- [24] A. FARIAS, *Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço abnt 8620 cementado*, São Paulo, 2009.
- [25] C. R. LIU e M. M. BARASH, "Variables governing patterns of mechanical residuals stress," *Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry*, pp. 257-264, 1982.
- [26] M. M. EI-KHABEERY e M. FATTOUH, "Residual stress distribution caused by milling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 29, pp. 391 - 401, 1989.
- [27] E. Capello, "Residual stresses in turning Part I: Influence of process parameters," *Journal of Materials Processing Technology*, 2005.
- [28] M. FIELD e J. F. KAHLES, "Review of Surface Integrity of Machined Components," *Metcut Research Associates Inc. Cincinnati, Ohio. Annals of the CIRP.*, vol. 20, pp. 153 - 163, 1971.
- [29] V. G. NAVAS, G. O. e B. I., "Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel," *Fundación TEKNIKER*, 2012.
- [30] "Técnicas de Medição de Tensões Residual," PUC - Rio , [Online]. Available: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4411/4411_3.PDF. [Acesso em 2016].
- [31] R. C. COFIÑO, "Análise das Tensões Residuais em uma junta soldada em condição Overmatch," São Bernardo do Campo, 2010.
- [32] "TENSOMETRIA POR TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X APLICADA NA ANALISE DE SOLDAGENS," Campos do Jordão, SP, 2010.
- [33] J. LU, Handbook of Measurement of Residual Stresses, The Fairmont Press, Inc., 1996.
- [34] N. S. TURIBUS, F. C. M. CALDAS, D. M. MIRANDA, V. I. MONINE e J. T. ASSIS, "Tensometria por Técnica de Difração de Raios X aplicada na Análise de Soldagens," Campos do Jordão, SP, 2010.
- [35] Y. MATSUMOTO, D. MAGDA, D. W. HOEPPNER e T. Y. KIM, "Effect of Machining Processes on the Fatigue Strength of Hardened AISI 4340 Steel," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 108, pp. 154-159, 1991.
- [36] E. C. & V. J. A. REED, "The Influence of Surface Residual Stress on Fatigue Limit of Titanium," *ASME J. Eng. Ind.*, vol. 82, pp. 76 - 78, 1960.