

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMec

Guilherme Caselato Gandia

**Investigação experimental da influência de
parâmetros de usinagem sobre a resistência
mecânica de um aço ferramenta endurecido**

São Carlos - SP

2020

Guilherme Caselato Gandia

Investigação experimental da influência de parâmetros de usinagem sobre a resistência mecânica de um aço ferramenta endurecido

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientação Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli

São Carlos - SP

2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, agradeço-os por todo carinho e apoio durante esta caminhada.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe Lúcia, a meu pai Júlio Antônio e minha irmã Vitória pelo apoio nos momentos difíceis, conselhos nas decisões e paciência durante as fases de tensão. Amo vocês.

Aos grupos de amigos e amigas, que se tornaram irmãos e irmãs que fiz durante essa longa jornada. Ao Pedro Cerântola, Maria Carolina (Mama) e Elisa, obrigado pelos momentos compartilhados, ensinamentos nas adversidades, amizade incomparável e evolução como ser humano.

Ao Luiz Gustavo (Dracena), Guilherme Grassi, Sidnei, Matheus de Paulo, Guilherme Braga, Marcos Pereira e Gustavo (Torta) pela oportunidade e acolhimento nos tempos de Engrenar Jr. e a forte amizade até hoje, seguimos "PRACIMADELES".

Ao Luís Eduardo, Paulo Victor (PV), José Victor (Boleto), Lúcio e Renato, pelos ensinamentos, pelas noites ao *video-game*, pelo companheirismo durante os dias difíceis e pelo meu amadurecimento.

A todos que dividiram comigo a experiência do intercâmbio, em especial ao Thiago, Fabiano, Murilo e João Alex, pela irmandade, excelentes memórias, por acreditarem em meu potencial e me fazerem perceber que só o mínimo não é o bastante.

Aos colegas das turmas "013" e "015" que dividiram a maior parte das disciplinas comigo. Aos membros do CAAMEC pela representatividade durante estes anos.

A toda equipe da MRW Máquinas que abriram as portas para que eu pudesse realizar o estágio obrigatório e contribuíram enormemente para este trabalho. Aos servidores-técnicos José Luiz, Djalma e Leonildo pela disponibilidade e suporte para a realização dos experimentos.

Ao Prof. Dr. Armando Antonialli por todo apoio desde a primeira aula da graduação, cartas de recomendação até a orientação deste trabalho. Estendo este agradecimento a todos os professores, técnicos e funcionários da UFSCar que me possibilitaram graduar.

Se você quer ser bem sucedido,
precisa ter dedicação total,
buscar seu último limite e dar o
melhor de si.

Ayrton Senna da Silva

Resumo

O processo de usinagem, a usinabilidade de um material, as propriedades mecânicas deste e os fins de aplicação são objetos de estudos recorrentes. Porém, nem sempre são levadas em conta as influências dos parâmetros de usinagem na resistência mecânica, podendo afetar a eficiência e o ciclo de vida dos produtos. Neste contexto, surgem oportunidades de estudos para a Engenharia de Superfícies, investigando a fundo os efeitos do processo de fabricação na integridade superficial. O presente trabalho investiga a influência de parâmetros de usinagem sobre a resistência mecânica em um aço ferramenta tipo O1 endurecido. A investigação baseou-se em: produzir corpos de prova a partir de barras do aço recozido, tratá-los termicamente, realizar o acabamento superficial dos corpos de prova com configurações diferentes de parâmetros de usinagem, variando-se avanço e velocidade de corte em um planejamento fatorial 2^2 completo, medir a rugosidade superficial e realizar ensaios de tração. Verificou-se que os parâmetros Ra e Rz exibem a tendência de diminuição (35% em média para o menor avanço e 5,4% para o maior) com o aumento da velocidade de corte e de aumento (18,8% em média para a menor velocidade de corte e 72% para a maior) com o incremento do avanço, embora isso só se confirme estatisticamente para a influência da velocidade de corte e do avanço sobre Rz . Do mesmo modo, o limite de resistência à tração e a porcentagem de alongamento expressam a mesma tendência de ampliar-se ao aumento da velocidade de corte (18% em média para o menor avanço e 10% para o maior) e redução com o aumento do avanço (18,5% em média para a menor velocidade de corte e 24% para a maior), apesar de isto só se confirmar estatisticamente para o efeito do avanço sobre o limite de resistência à tração. Além disto, foi possível estabelecer uma correlação entre o parâmetro Rz de rugosidade e o limite de resistência à tração através de uma regressão logarítmica ($R^2=0,7074$), indicando que valores reduzidos de rugosidade conduzem a elevados valores de resistência mecânica.

Palavras-chave: Torneamento, Velocidade de Corte, Avanço, Ensaio de Tração, Rugosidade.

Abstract

The manufacturing process, the machinability of a material, its mechanical properties and application purposes are recurrent subject of analysis. However, not always the machining parameters influences are taken into account, might effect the product efficiency and life-cycle. In this context, study opportunities emerge to the Surface Engineering, going deeper on the manufacturing process effects over the surface integrity. This present work delves into the influence of the turning parameters on the mechanical properties of the hardened O1 tool-steel. The investigation was based on: manufacture specimens from annealed tool-steel bars, heat-treat it and do the finishing with different settings of turning parameters, varying the feed rate and cutting speed in a complete 2^2 factorial design, measure the surface roughness and perform tensile tests. It was found that the Ra and Rz parameters showed the decrease tendency with the increase of the cutting speed (35% in average for the lowest feed rate and 5,4% for the highest) and aggravate (in average, 18,8% for the lowest cut speed and 72% fot the highest) with the feed rate increasing, although this was only statistically attested for the influence of the feed rate and cutting speed over the Rz . Moreover, the ultimate tensile strenght and the elongation percentage exhibit the same tendency of amplify with the increase of cutting speed (in average, 18% for the lowest feed rate and 10% for the highest) and decrease with the feed rate increasing (18,5% in average for the lowest cut speed and 10% for the highest), nonetheless this was statistically evidenced only for the feed rate affect over the ultimate tensile strenght. Furthermore, it was possible to establish a correlation between the Rz roughness parameter and the ultimate tensile strenght through a logarithmic regression ($R^2=0,7074$), indicating that lower roughness values would lead to higher mechanical strenght values.

Keywords: Turning, Cutting Speed, Feed Rate, Tensile Testing, Surface Roughness.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Correlação de áreas para a geração da Engenharia de Superfícies.	11
Figura 2 – Esquemático das características do estado de superfícies usinadas.	14
Figura 3 – Aço fundido sujeito a diversos processos de acabamento.	16
Figura 4 – Tensão de escoamento em função da velocidade de corte para o aço 1045.	17
Figura 5 – Fluxograma do Trabalho.	19
Figura 6 – Diagrama de transformação isotérmico para o aço-ferramenta O1.	21
Figura 7 – Efeito da temperatura de austenitização na microestrutura do aço O1. Temperaturas de austenitização: (a) 800°C (b) 870°C (c) 980°C (d) 1100°C.	21
Figura 8 – Diagrama de resfriamento contínuo para o aço-ferramenta O1.	22
Figura 9 – Relação entre temperatura de revenimento e dureza para o aço O1.	23
Figura 10 – Influência da temperatura de revenimento na microestrutura do aço O1. Temperaturas de revenimento e durezas respectivas: (a) 200°C e 60 HRC, (b) 315°C e 55 HRC, (c) 425°C e 49 HRC, (d) 540°C e 43 HRC	23
Figura 11 – (a) Diagrama das medições realizadas. (b) Média das medições da microdureza Vickers (HV) ao longo de raios.	24
Figura 12 – Vários tipos de Corpos de Prova com seção circular para ensaio de tração.	25
Figura 13 – Altura dos elementos do perfil (exemplo). R_a é dado pela média destes.	26
Figura 14 – Alturas máximas dos picos e profundidade máxima dos vales do perfil (exemplo).	26
Figura 15 – Curva típica de um ensaio de tração e representações da geometria do corpo de prova ao longo do ensaio.	28
Figura 16 – Curvas típicas de tensão-deformação.	28
Figura 17 – Curva tensão-deformação até a fratura para aços-ferramenta "O1" e "D2".	29
Figura 18 – Rugosidade Média (R_a) e Altura máxima do perfil de rugosidade (R_z) para os corpos de prova.	33
Figura 19 – Rugosidade média (a) Efeitos principais de f e v_c . (b) Diagrama de Pareto de f , v_c e $v_c \times f$	34
Figura 20 – Altura máxima do perfil de rugosidades (a) Efeitos principais de f e v_c . (b) Diagrama de Pareto de f , v_c e $v_c \times f$	35
Figura 21 – Gráfico da Tensão pela Deformação para os corpos de prova.	36
Figura 22 – Gráfico da Tensão pela Deformação para os corpos de prova. Enfatizando os pontos após 0,75% de deformação.	36
Figura 23 – Limite de resistência à tração (LRT) e Porcentagem de Alongamento (%) médios para os corpos de prova.	37

Figura 24 – Limite de Resistência à Tração (LRT) (a) Efeitos principais de f e v_c . (b) Diagrama de Pareto de f , v_c e $v_c \times f$	38
Figura 25 – Porcentagem de Deformação ou Alongamento (a) Efeitos principais de f e v_c . (b) Diagrama de Pareto de f , v_c e $v_c \times f$	39
Figura 26 – Limite de Resistência à Tração (LRT) em função da Altura Máxima do Perfil de Rugosidades (Rz).	40

Lista de tabelas

Tabela 1 – Composição química do aço ASTM A681-O1.	20
Tabela 2 – Dimensões do corpo de prova.	25
Tabela 3 – Organização de dados para um planejamento experimental de fatorial 2 ² completo.	29
Tabela 4 – Configurações de usinagem de acabamento.	31

Sumário

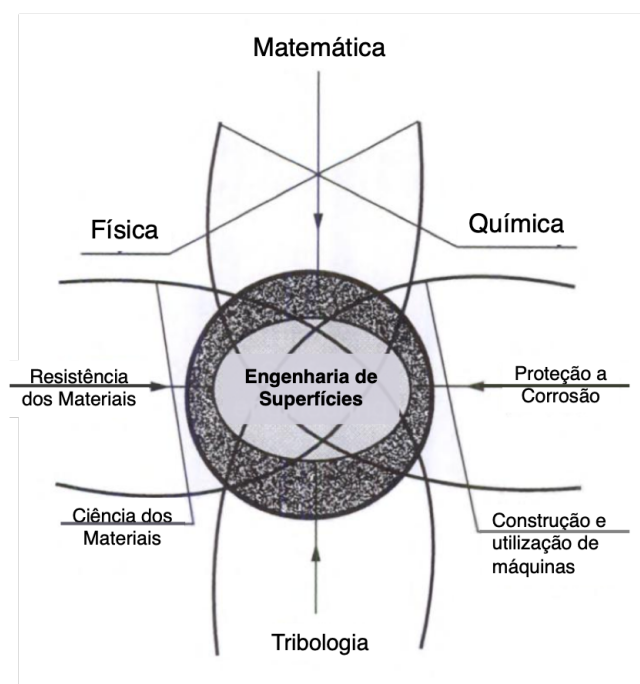
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Influência das condições de usinagem sobre o estado de superfície de produtos manufaturados	13
2.2	Influência do estado de superfície sobre o comportamento de componentes mecânicos	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	Equipamentos	19
3.2	Materiais	20
3.3	Procedimentos Experimentais	24
3.4	Planejamento Experimental	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	Parâmetros de Rugosidade	33
4.2	Resistência Mecânica	35
4.3	Correlação entre Rugosidade Superficial e Resistência Mecânica	39
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	41
	REFERÊNCIAS	43

1 Introdução

A definição e o papel da Engenharia na sociedade passaram por transformações ao longo do tempo. Nos séculos XVIII e XIX o termo foi utilizado para designar projetos de fortificações e outros elementos de defesa, e em seguida diferenciou fins militares e civis. Na Segunda Guerra mundial chegou-se ao conceito de Engenharia Social, possibilitando o surgimento de novas áreas como a Engenharia Biológica, Engenharia de Alimentos e a Engenharia de Superfícies. (BACHELOR; LAM; CHANDRASEKARAN, 2011)

Durante todo este período a Engenharia de Superfícies foi utilizada sem a definição do escopo, e em meados dos anos de 1990 chegou-se ao conceito atual partindo-se da ideia de que essa área envolveria o domínio da manufatura da superfície em prol de um uso específico. Este conceito aborda a multidisciplinaridade do tema e é o ponto convergente de ciências puras (como a Matemática, Física e Química) e ciências aplicadas (como Resistência e Ciência dos Materiais, Tribologia, Elementos de Máquinas e Tratamentos Térmicos/Superficiais), conforme a figura 1 a seguir. É uma ciência que agrega os desafios técnicos e científicos de se produzir uma superfície e subsuperfície para determinada aplicação, além do revestimento aplicado e suas interações. Dentro da Engenharia Mecânica, pode-se localizar o tema de maneira isolada na Engenharia de Manufatura e em Ciências dos Materiais, e estudar os efeitos combinados de cada área representa os desafios da Engenharia de Superfícies. (BACHELOR; LAM; CHANDRASEKARAN, 2011)

Figura 1 – Correlação de áreas para a geração da Engenharia de Superfícies.



Fonte: Adaptado de Bachelor, Lam e Chandrasekaran (2011).

1.1 Justificativa

O presente trabalho tem sua justificativa em dois pontos principais: o primeiro é a oportunidade de produzir conteúdo científico em um campo tão abrangente e crescente; o segundo reside no epicentro da definição de Engenharia de Superfícies, que é desenvolver em função da aplicação. Há uma lacuna entre a fabricação e o fim do material ou equipamento e este trabalho guia-se na direção de preencher a lacuna quanto a aplicação do aço O1. Com isto, há possibilidade de gerenciar de maneira mais adequada o ciclo de vida dos produtos, ferramentas e equipamentos utilizados em sua manufatura, orientada pelo tripé da sustentabilidade: compromisso social, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é investigar experimentalmente a influência dos parâmetros de usinagem sobre a resistência mecânica do aço ferramenta para trabalho a frio O1, temperado e revenido (ASTM, 2015). Deste modo, pode-se planejar o processo de fabricação em concordância com a aplicação que será dada para o componente, saindo da esfera da economia de tempo ou de recursos e indo ao encontro da Engenharia de Superfícies.

O objetivo geral conecta-se a uma série de objetivos específicos, listados a seguir:

- Produzir oito corpos de prova do aço ferramenta ASTM A681 - O1 com sobremetal de 0,25 mm, realizar a têmpera e revenimento e, por fim, usinar variando velocidade de corte e avanço em um planejamento fatorial 2^2 completo, visando o acabamento superficial;
- Investigar o efeito dos referidos fatores de influência sobre diferentes parâmetros de rugosidade;
- Submeter os corpos de prova a um ensaio de tração e buscar estabelecer correlações entre os resultados e a rugosidade superficial.

2 Revisão Bibliográfica

A Engenharia de Superfícies é responsável por controlar e melhorar as propriedades superficiais dos materiais, através da construção de camadas (subsuperficiais ou superficiais). O domínio do modo de produzir estas e as consequências de suas propriedades para a peça ou o equipamento têm origem na Engenharia de Manufatura (processos de fabricação) e na Ciência dos Materiais (resistência dos materiais), conforme explicitado por [Batchelor, Lam e Chandrasekaran \(2011\)](#). Por conta desta dupla influência, divide-se esta seção em dois tópicos, sendo o primeiro relativo à influência da usinagem sobre o estado de superfície, e o segundo sobre como este estado de superfície afeta o comportamento mecânico.

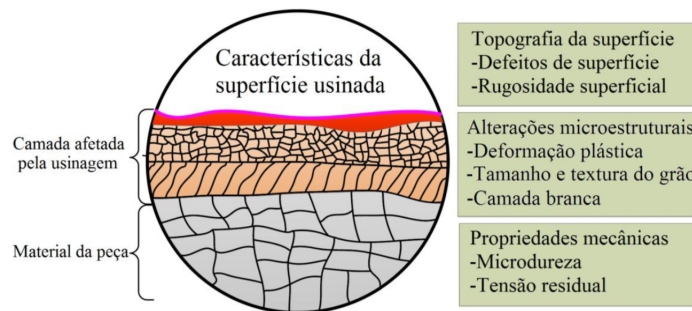
2.1 Influência das condições de usinagem sobre o estado de superfície de produtos manufaturados

Entende-se como usinagem a operação que através da remoção de material por uma ferramenta, conferem à peça forma, dimensão ou acabamento. Dentre estas operações, o torneamento é utilizado para obter peças de revolução, utilizando-se uma ferramenta monocortante. Mais especificamente, o torneamento cilíndrico ocorre quando a ferramenta desloca-se em paralelo ao eixo de rotação da máquina. ([FERRARESI, 2018](#))

A operação de torneamento convencional apresenta-se como uma das fundamentais nos processos de fabricação, especialmente para acabamento dos produtos manufaturados ([SARAVANAN et al., 2005](#)). As condições - ou parâmetros - de usinagem como o avanço, velocidade de corte e raio de ponta da ferramenta apresentam grande influência no estado de superfície das partes usinadas ([JAVIDI; RIEGER; EICHLSEDER, 2008](#)).

O estado de superfície pode ser dividido em dois aspectos: o primeiro leva em conta a geometria da superfície, enquanto o segundo refere-se às alterações metalúrgicas. A integridade superficial pode ser definida como a relação entre estes dois pontos, de modo que, em geral, representa-se respectivamente o primeiro através da rugosidade superficial e o segundo através da tensão residual, dureza e microestrutura. ([JAVIDI; RIEGER; EICHLSEDER, 2008](#)) A figura 2 a seguir, evidencia os dois aspectos do estado de superfícies.

Figura 2 – Esquemático das características do estado de superfícies usinadas.



Fonte: Adaptado de [Liang, Liu e Wang \(2019\)](#).

A rugosidade superficial, segundo [Knight e Boothroyd \(2005\)](#), define-se como irregularidades na superfície provenientes do processo de fabricação. Estas formam-se a partir da junção de dois fatores sendo o primeiro resultado da geometria da ferramenta e do avanço, denominada rugosidade cinemática. O segundo nasce das imperfeições do processo como vibrações na máquina, defeitos metalúrgicos do material usinado, cavaco descontínuo, entre outros.

[Davim, Gaitonde e Karnik \(2008\)](#) investigaram os efeitos da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte em processo de acabamento no torno, através de redes neurais artificiais, utilizando um aço de corte livre DIN-9SMnPb28 (um aço de médio carbono, cerca de 0,14% C) e inserto de metal duro. Os testes foram realizados com três níveis para cada fator de influência, concluindo-se que a profundidade de corte não gera efeitos significativos para a rugosidade superficial, e a melhor combinação é encontrada com velocidade de corte elevada e avanço reduzido. Em outros materiais, este tipo de estudo também foi realizado e alcançaram a mesma conclusão.

Em sua investigação experimental [Bashir et al. \(2018\)](#) analisou o estado de superfícies do aço AISI O1 (2015) após o torneamento duro e sem fluido refrigerante, utilizando-se insertos *wiper* de CBN (nitreto cúbico de boro). Dentre outras conclusões, esta análise mostrou que o aumento da velocidade de corte torna a rugosidade superficial (R_a - rugosidade média) menor, em contrapartida há uma ampliação desta medida com o aumento do avanço. A microdureza também foi investigada e constatou-se que há uma alta desse parâmetro em relação à peça sem acabamento, causado pelo tamanho pequeno de grão e grande concentração de defeitos cristalinos. O mesmo resultado foi alcançado no estudo de [Sivaraman e Prakash \(2020\)](#), utilizando-se o AISI O1 (2015), torneando-o com um inserto de metal-duro recoberto com TiAlN (Nitreto de Titânio e Alumínio) via PVD (do inglês, deposição física a vapor). Avaliou-se, também, a influência do fluido de corte, constatando-se que com a mínima quantidade de fluido (MQF) atinge-se uma melhor rugosidade superficial. Além disto, este mostrou-se ser o parâmetro de maior influência, seguido pelo avanço e, por último, pela velocidade de corte.

Sarikaya e Güllü (2014) obtiveram resultados semelhantes em seus experimentos torneando AISI 1050 (0,43% C) com insertos de metal-duro recobertos com TiAlN via PVD. Mas, além do Ra , avaliou-se o Rz (altura máxima do perfil de rugosidades) e o comportamento observado foi o mesmo. E, assim como no trabalho de Bashir et al. (2018), o fluido de corte foi o fator de maior influência, com bons resultados para o MQF, seguido pelo avanço e velocidade de corte, respectivamente.

Javidi, Rieger e Eichseder (2008) estudaram os efeitos da usinagem sobre a integridade superficial, através do torneamento duro de aço-carbono 34CrNiMo6 temperado e revenido, utilizando fluido refrigerante e com um inserto de metal-duro recoberto com CVD (deposição química a vapor). Focou-se nos efeitos do avanço e do raio de ponta da ferramenta, e não foi observada variação significativa na dureza abaixo da camada usinada. Ademais, foi identificado um aumento da rugosidade superficial com a diminuição do raio de ponta da ferramenta, além do fato de que com o aumento do avanço as tensões residuais se tornaram mais compressivas, ao mesmo tempo que o aumento do raio de ponta leva à tensões mais trativas.

Wu e Matsumoto (1990) explicitam que as tensões residuais são geradas pelo mecanismo de corte da peça, seja através das forças de corte, da deformação plástica da camada mais externa, ou do gradiente de temperatura durante o processo. Em seus experimentos envolvendo o torneamento ortogonal de aço AISI 4340, concluíram que o fator que mais influencia a formação das tensões residuais é o ângulo de cisalhamento (entre a direção de corte e o plano de cisalhamento primário na formação do cavaco), levando a tensões residuais compressivas com o seu aumento. Para aços-ferramenta, que exigem maiores forças de corte, Suresh et al. (2013) estabelecem que através da diminuição do raio de ponta, da velocidade de corte e do avanço podem-se atingir tensões residuais compressivas.

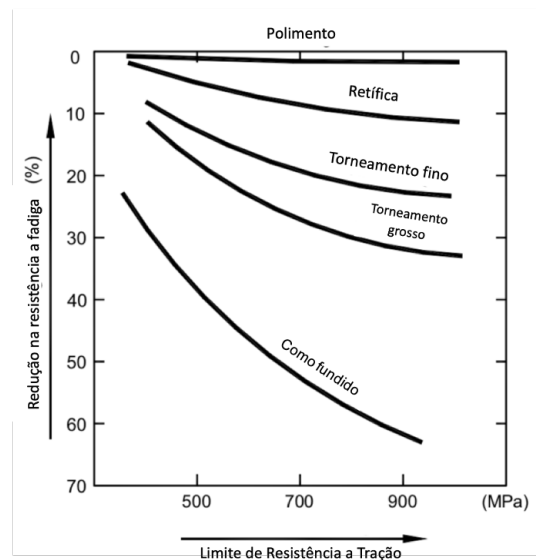
Outra maneira de se analisar os efeitos das condições de usinagem sobre o estado de superfícies é ao longo da vida da ferramenta. Foi o que Tamayo et al. (2016) avaliou em seu trabalho, variando a velocidade de corte e o avanço para dois tipos de inserto de metal-duro (recobertos com PVD de alta dureza e CVD) no torneamento do aço inoxidável AISI 316L. Em todas as configurações experimentadas verificou-se um aumento da rugosidade superficial ao longo da vida da ferramenta.

2.2 Influência do estado de superfície sobre o comportamento de componentes mecânicos

Davim et al. (2010) em seu livro elucidam que a integridade superficial ou estado de superfície de um componente não se limita a influenciar apenas a geometria ou as tolerâncias dimensionais. O objetivo é garantir que o componente cumpra com as funções

as quais ele foi idealmente desenvolvido. Para isto, deve-se escolher o processo de fabricação mais adequado, como pode ser visto na figura 3 para o Aço Fundido. Pode-se notar que partindo do material como recebido (estado de maior rugosidade) e indo em direção ao polimento (estado de menor rugosidade), há uma menor perda na resistência à fadiga. E, com a mudança para materiais que suportam maiores limites de resistência à tração, agrava-se a diferença entre os tipos de processo, levando a maiores reduções de resistência à fadiga quanto mais rugosa a superfície estiver.

Figura 3 – Aço fundido sujeito a diversos processos de acabamento.



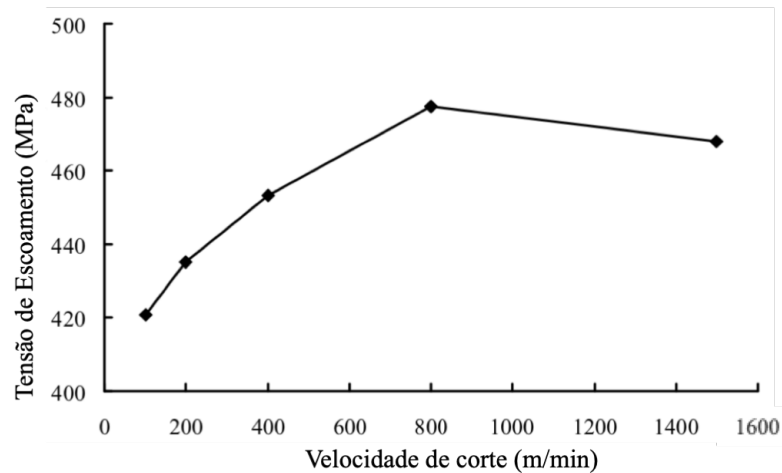
Fonte: Adaptado de Davim et al. (2010).

Ainda segundo Davim et al. (2010), o processo de remoção de material introduz alterações estruturais na superfície do componente, através de uma deformação plástica. Esta leva ao encruamento da superfície, que gera um aumento da dureza e resistência à tração e diminuição da ductilidade e resistência ao impacto.

A relação estabelecida por Davim et al. (2010), quanto mais rugosa a superfície menor a resistência mecânica, é confirmada por Gómez-Parra et al. (2014). Estudando a influência dos parâmetros de corte sobre o limite de resistência à tração (LRT) em um aço UNS A92024 (liga alumínio-cobre), torneou-se os corpos de prova com profundidade de corte constante e variou-se avanço e velocidade de corte. Notou-se que com o aumento do avanço, obteve-se uma rugosidade superficial mais elevada e uma diminuição no LRT. O contrário ocorreu com o aumento da velocidade de corte. Entretanto, o autor sinalizou que pelos resultados obtidos não havia relação clara entre Ra e o LRT.

Wang, Liu e Yang (2013) investigaram a tensão de escoamento em aço AISI 1045 (aço de médio carbono), utilizando-se a técnica de *high speed machining* (usinagem de alta velocidade) em torneamento cilíndrico. E obtiveram os resultados apresentados na figura 4.

Figura 4 – Tensão de escoamento em função da velocidade de corte para o aço 1045.



Fonte: Adaptado de Wang, Liu e Yang (2013).

A investigação de Wang, Liu e Yang (2013) vai ao encontro do que foi estabelecido por Davim et al. (2010). O aumento da velocidade de corte, gera um aumento da tensão de escoamento, através do aumento do encruamento. Entretanto, para a velocidade de corte mais elevada (1600 m/min), as condições provenientes da temperatura de trabalho levaram a uma atenuação do encruamento e, por isso, a queda no valor encontrado da tensão de escoamento. (WANG; LIU; YANG, 2013)

Rababa e Al-mahasne (2011) utilizaram o polimento de rolos para avaliar o comportamento mecânico do aço AISI O1, variando-se a força feita com a ferramenta contra a peça. Concluiu-se que com o aumento da força, foi gerada uma superfície com melhor acabamento e, assim como nos trabalhos previamente citados, houve um aumento do LRT em aproximadamente 22,1% em comparação com a amostra sem polimento.

Porém, o estado de superfícies não se restringe a rugosidade superficial, bem como o comportamento mecânico não se restringe a resistência à tração. Canale, Totten e Mesquita (2008) discute em seu trabalho, que os aços-ferramenta por possuir alto teor de carbono através da associação a elementos de liga (especialmente o cromo, formando grandes carbonetos) experimentam um aumento na dureza, elevando a resistência ao desgaste e reduzindo a tenacidade da liga em questão.

Para investigar esta relação entre microestrutura, dureza, resistência ao desgaste e tenacidade Zambrano et al. (2019) realizaram ensaios com três aços (AISI 5160, AISI O1 e AISI 1045) que passaram por tratamentos térmicos para apresentar a mesma dureza. O aço AISI 5160 apresentava apenas perlita, o aço AISI O1 cementita esferoidizada em uma matriz de ferrita e o aço AISI 1045 ferrita e perlita. Nota-se que mesmo apresentando a mesma dureza, as microestruturas apresentavam diferenças nas composições. Após submetê-los a ensaios de desgaste, tração e dureza pode-se concluir que para a tração ser composto por uma fração maior de perlita aumenta a resistência, enquanto a estrutura da

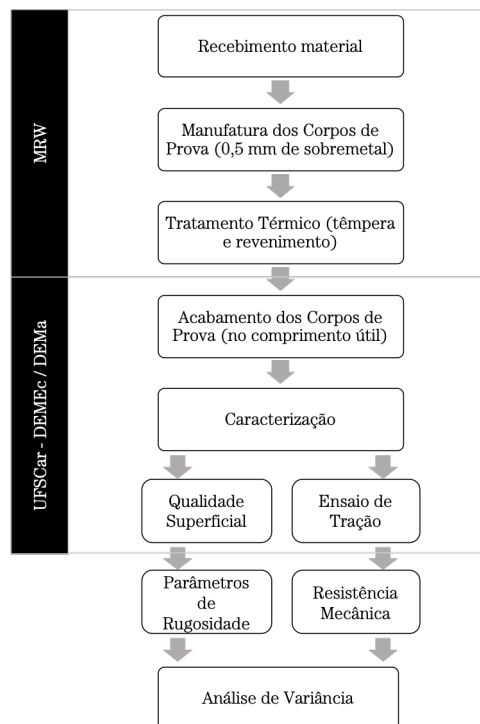
ferrita permite mais facilmente o deslocamento das discordâncias, e por isso o AISI 5160 obteve a maior tensão de escoamento, seguido pelo AISI 1045 e, por fim, o AISI O1. Para a resistência ao desgaste, como explicado por [Canale, Totten e Mesquita \(2008\)](#), aqueles que apresentaram as maiores tensões de escoamento no ensaio de tração mostraram a menor resistência ao desgaste. Do mesmo modo, devido à maior presença de ferrita (a fase necessária para haver encruamento), o aço AISI O1 apresentou um aumento considerável na dureza após o ensaio de desgaste.

Outra parcela do estado de superfícies é dada pela tensão residual. Os trabalhos de [Wu e Matsumoto \(1990\)](#) e [Suresh et al. \(2013\)](#) concordam ao apontar que as forças de corte elevadas necessárias para usinar aços endurecidos, associados a altas temperaturas localizadas, geram tensões residuais trativas. [Suresh et al. \(2013\)](#) estende a análise ao efeito à resistência à fadiga, explicando que as tensões residuais trativas afetam negativamente este fator.

3 Materiais e Métodos

Nesta seção serão abordados os equipamentos, materiais, procedimentos e planejamento experimentais. Destacam-se na Figura 5 o fluxograma tanto de manufatura dos corpos de prova quanto dos experimentos realizados, realizou-se a parte inicial do trabalho na *MRW - Máquinas* e a parte final na UFSCar.

Figura 5 – Fluxograma do Trabalho.



Fonte: Próprio autor.

3.1 Equipamentos

O aço ferramenta foi recebido pela *MRW - Máquinas* em barras. Primeiramente, cortou-se o material (em uma serra de fita) em 9 segmentos. Posteriormente, para o desbaste do corpo de prova, utilizou-se um torno horizontal universal da marca *Nardini*, modelo *Mascote MS205*. Com potência máxima de 6,75 Hp, rotação máxima de 2500 rpm e barramento de 1000 mm. Em seguida, para o todo o tratamento térmico, utilizou-se o forno *Jung TB3012*, com capacidade de 30 litros, dimensões úteis 250 x 300 x 400 [mm] e potência de 6 kW.

Em seguida, no DEMec-UFSCar, realizou-se o acabamento dos corpos de prova em um torno horizontal universal da marca *IMOR*, modelo *PRN-320*, potência máxima de 2,50 cv e rotação máxima de 1500 rpm. Para caracterização da superfície acabada foi

utilizado o microscópio para análise de imagens tridimensionais *Alicona Infinite Focus SL*, equipado com lente de aproximação de 10 vezes. Já para inferir a influência da operação de acabamento sobre o comportamento mecânico do material, utilizou-se a máquina de ensaio universal *Instron* modelo 5500R, operando com célula de carga 50 kN localizada no DEMa-UFSCar.

Após os ensaios, aferiu-se a qualidade do tratamento térmico realizado através da medição de dureza (em Rockwell C) e microdureza (em *Vickers*), ambas no DEMa-UFSCar. Foi utilizado o microdurômetro *FM – 800* da marca *Future – Tech*, com uma carga de 0,5 kgf e tempo de aplicação de 15 segundos. Para a medição da dureza, utilizou-se o durômetro analógico de bancada *SussenWolpert*, com indentador cônico de diamante, 10 kgf de pré-carga e 150 kgf de carga total.

3.2 Materiais

A série de aços-ferramenta *O*, segundo [Silva e Mei \(2006\)](#), é largamente utilizada em matrizes e punções, moldes para plásticos, trefilas e etc. Utilizou-se o aço ASTM A681-O1 (2015), recebido no estado recozido com dureza até 230 HB. A composição química do aço encontra-se na Tabela 1 a seguir, na primeira linha destaca-se a composição do aço fornecido e, na segunda, a composição requisitada pela norma. Vale, também, ressaltar que a composição foi certificada pelo fornecedor, atendendo inteiramente os requisitos da norma.

Tabela 1 – Composição química do aço ASTM A681-O1.

Composição em peso %	C	Mn	Cr	W	Si
GGD METALS (2020)	0,95	1,2	0,5	0,5	0,30-0,35*
ASTM International (2015)	0,85 - 1,00	1,00 - 1,40	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60	0,10 - 0,50

Fonte: [GGD METALS \(2020\)](#) e [ASTM International \(2015\)](#).

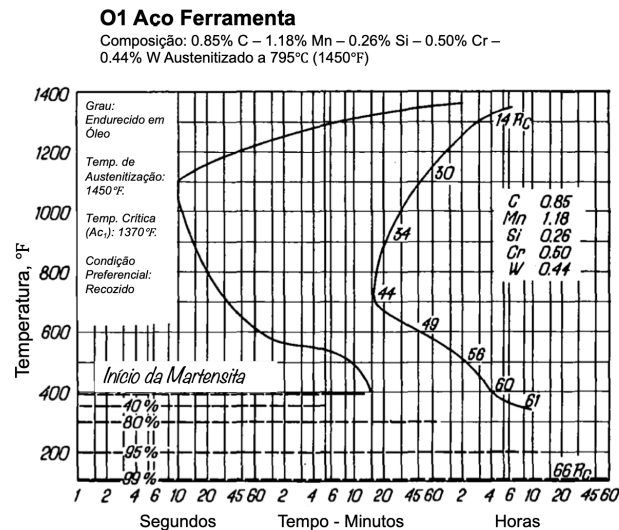
* após consulta ao fabricante

Ainda segundo [Silva e Mei \(2006\)](#), o alto teor de carbono combinado com elementos de liga suficiente (principalmente o teor de manganês), possibilita a têmpera completa em óleo, enquanto a presença do cromo e tungstênio reduz a tendência do crescimento de grão. Os diagramas de transformação encontram-se nas figuras 6 e 8 a seguir. No diagrama de transformação isotérmico pode-se inferir que para evitar difusão de perlita e garantir a formação da martensita, é preciso que a têmpera reduza a temperatura do aço abaixo de 1000°F (538°C) em no máximo 10 segundos, e que a temperatura atinja 400°F (204°C) em menos de 15 minutos, garantindo dureza da ordem de 60 HRC.

A figura 7 apresenta como a temperatura de austenitização altera a microestrutura do aço em estudo. Indica-se como temperatura ótima de austenitização 800°C, na imagem (a) seguiu-se o procedimento, obtendo-se martensita (manchas claras) e perlita (manchas

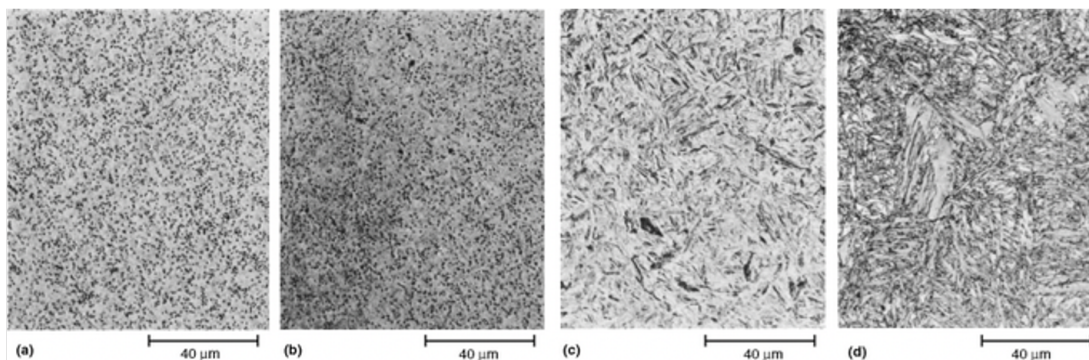
escuras). Com o aumento da temperatura de austenitização 870°C, 980°C e 1100°C, respectivamente, nota-se o aumento de austenita retida, que pode ser explicado pela maior quantidade de carbono presente na austenita e, a conseqüente, redução da temperatura inicial da formação de martensita.

Figura 6 – Diagrama de transformação isotérmico para o aço-ferramenta O1.



Fonte: Adaptado de Voort (1991).

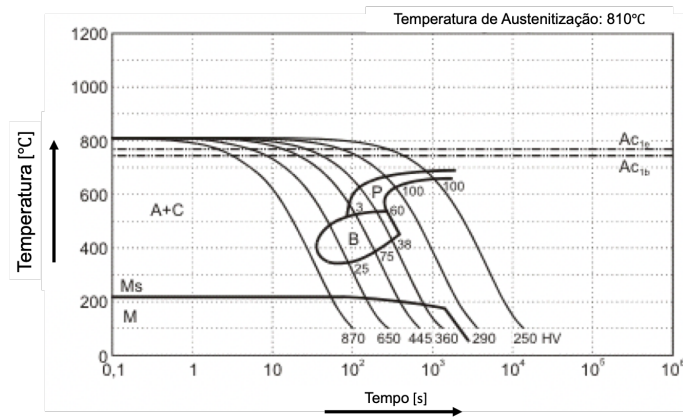
Figura 7 – Efeito da temperatura de austenitização na microestrutura do aço O1. Temperaturas de austenitização: (a) 800°C (b) 870°C (c) 980°C (d) 1100°C.



Fonte: George (2004).

Já, para o diagrama de resfriamento contínuo apresentado na figura 8, pode-se dizer que é necessário que a temperatura seja reduzida abaixo de 100°C em até 100 s, de maneira a garantir estrutura 100% martensítica, com dureza da ordem de 870 HV.

Figura 8 – Diagrama de resfriamento contínuo para o aço-ferramenta O1.

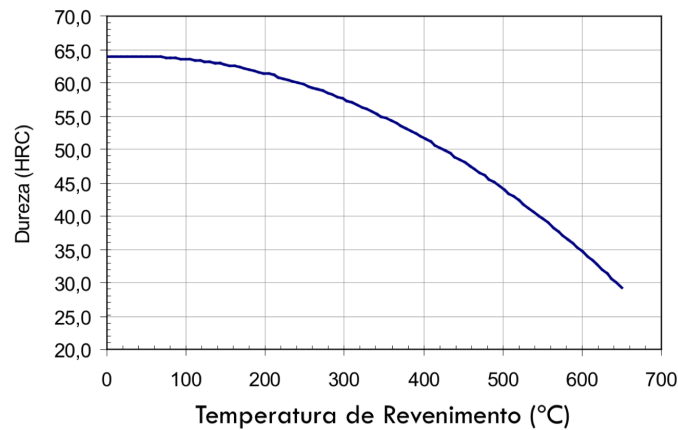


Fonte: Adaptado de [Interlloy-Engineering Steels and Alloys \(2020\)](#).

Além dos diagramas apresentados nas figuras 6 e 8, ressalta-se a relação entre dureza e temperatura de revenimento na figura 9. Pode-se observar que para garantir uma dureza superior a 60 HRC (dureza Rockwell), faz-se necessário uma temperatura de revenimento máxima de 200°C. Nesta temperatura, há a perda parcial da tetragonalidade da martensita, além da perda do teor de carbono por conta da precipitação do carboneto hexagonal de corpo centrado. Esta precipitação que condiciona o aço a uma dureza superior, através do mecanismo de endurecimento por precipitação.

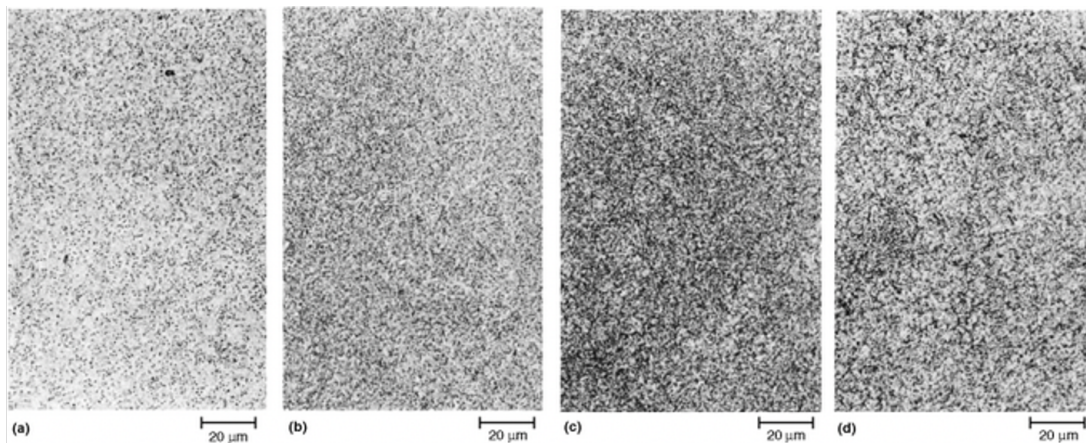
A figura 10 apresenta a microestrutura para diferentes temperaturas de revenimento, entretanto todas austenitizadas a 800°C, segue: (a) 200°C e 60 HRC, (b) 315°C e 55 HRC, (c) 425°C e 49 HRC, (d) 540°C e 43 HRC. Com o aumento da temperatura de revenimento, a martensita perde sua tetragonalidade e transforma-se em ferrita, e gradualmente ao aumento das partículas de cementita, o carboneto hexagonal desaparece. A partir de 350°C reduz-se a capacidade de recuperação (densidade de discordância), ou seja, não há a regeneração da martensita, restando a ferrita formada com os mesmos contornos das findadas ripas martensíticas. Esta é a diferença principal apresentada pelas imagens, em (a) há a presença de martensita e perlita, já em (d) a martensita é substituída pela ferrita. E, deste modo, garante-se a dureza superior através do mecanismo descrito no parágrafo anterior e evidenciado pelos experimentos de [George \(2004\)](#).

Figura 9 – Relação entre temperatura de revenimento e dureza para o aço O1.



Fonte: GGD METALS (2020).

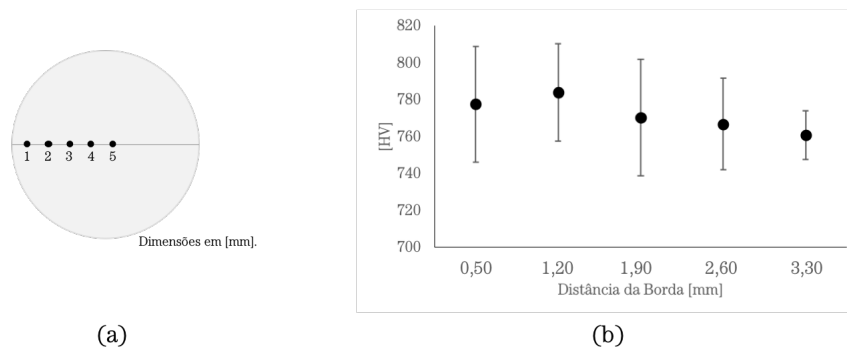
Figura 10 – Influência da temperatura de revenimento na microestrutura do aço O1. Temperaturas de revenimento e durezas respectivas: (a) 200°C e 60 HRC, (b) 315°C e 55 HRC, (c) 425°C e 49 HRC, (d) 540°C e 43 HRC



Fonte: George (2004).

A fim de atestar a eficácia do tratamento térmico, realizou-se a medição da microdureza. O ponto 1 localiza-se mais próximo a borda, enquanto o ponto 5 mais próximo ao centro, com uma distância de 0,7 mm entre cada ponto, conforme o esquema na figura 11(a). Determina-se, assim, o espectro de microdureza para o aço em 5 raios distintos, com o microdurômetro descrito na seção anterior. O gráfico da figura 11(b) a seguir apresenta os dados obtidos.

Figura 11 – (a) Diagrama das medições realizadas. (b) Média das medições da microdureza Vickers (HV) ao longo de raios.



Fonte: Próprio autor.

Fez-se uma análise de variância para os dados obtidos e rejeitou-se H_0 , indicando que não há diferença significativa de dureza ao longo do raio, evidenciando o correto tratamento térmico. A média entre todas as medições foi de 771,9 HV (dureza Vickers) ou 62,9 HRC. Para as medições feitas através do durômetro analógico, foram realizadas 7 aferições apresentando uma média de $61,57 \pm 1,5$ HRC. Assim, mostra-se que o tratamento térmico realizado está em concordância com o previsto através do gráfico apresentado pelo fabricante na figura 9.

Durante as etapas de usinagem em desbaste e acabamento, foram empregados os seguintes materiais:

- Desbaste: Inseto *TNMG160408-M3*, classe TC, um metal duro com cobertura CVD (*Chemical Vapor Deposition* ou Deposição Química em Fase Vapor) da marca *Seco Tools*. Porta-ferramentas sem marca definida, designado para pastilhas do tipo TNMG.
- Acabamento: Inseto *SNMG 12 04 04-PM*, classe GC 4225 (ISO HC P25), um metal duro com cobertura CVD. Porta-ferramentas DSSNL 2020K 12 ambos da marca *Sandvik*.

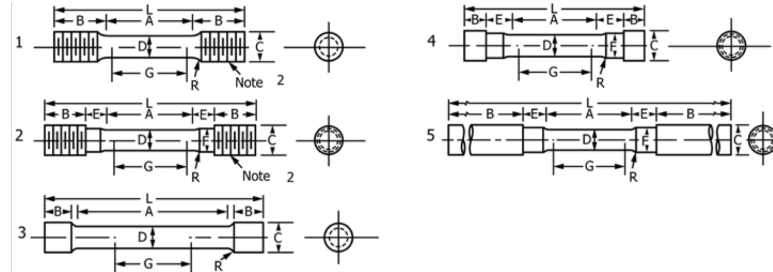
3.3 Procedimentos Experimentais

Os procedimentos experimentais subdividiram-se em três fases: preparação dos corpos de prova, caracterização da superfície e comportamento mecânico.

A primeira consiste em três etapas: usinagem em desbaste, tratamento térmico e usinagem em acabamento. No desbaste foram utilizados os equipamentos supracitados (serra-fita e torno horizontal universal), o segundo equipado com o porta-ferramenta e inserto respectivos. A operação de manufatura dos corpos de prova foi feita em conformidade

com os padrões da norma para o ensaio de tração ([ASTM International \(2011\)](#)). Escolheu-se o tipo 4 da Figura 12 e as dimensões encontram-se explicitadas na Tabela 2.

Figura 12 – Vários tipos de Corpos de Prova com seção circular para ensaio de tração.



Fonte: [ASTM International \(2011\)](#).

[H]

Tabela 2 – Dimensões do corpo de prova.

Item	Medida [mm]
G	30,0
D	6,0
R	4,0
A	42,0
L	92,0
B	11,0
C	12,0
E	14,0
F	8,0

Fonte: Próprio Autor.

Executou-se o tratamento térmico no forno previamente mencionado, seguindo o procedimento (conforme instruções do fornecedor, disponível em: [GGD METALS \(2020\)](#)):

- Têmpera: Forno pré-aquecido a 820°C, austenitizado entre 790-820°C e resfriado em óleo até 78°C. Em seguida, aquecido por 1 hora para cada 25 mm de espessura e mais 1 hora para cada 25 mm adicional, resfriado em ar calmo até a temperatura para revenimento.
- Revenimento: Realizado imediatamente após a têmpera, iniciado quando o material atingiu 70°C. A fim de se obter uma dureza de 59 HRC, o material foi revenido a 200°C.

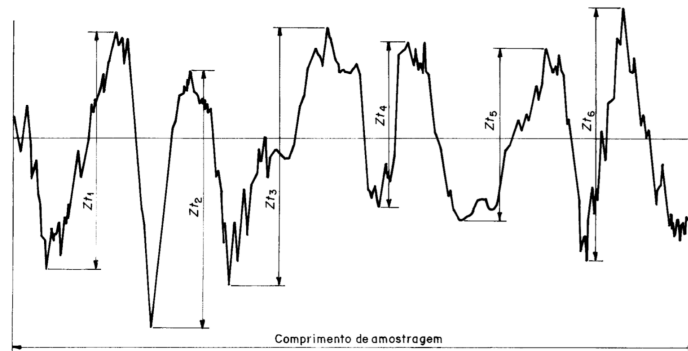
O acabamento foi realizado no torno universal horizontal citado na seção "Equipamentos", com o inserto e porta-ferramentas citados em "Materiais" e toda a operação foi realizada sem fluido de corte, com profundidade de corte fixada em 0,25 mm, variando avanço e velocidade de corte (cujos valores serão explicitados no Planejamento Experimental).

Em seguida ao acabamento, foi realizada a caracterização dos corpos de prova, utilizando-se o microscópio para análise de imagens tridimensionais. Nesta análise, avaliou-se a rugosidade do corpo de prova, através de dois parâmetros: rugosidade média (R_a) e altura máxima do perfil de rugosidade (R_z).

A equação 3.1 e a figura 13 a seguir, mostram que R_a corresponde a média aritmética da altura dos elementos do perfil ($Z(x)$) em um comprimento de amostragem l . (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002)

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx \quad (3.1)$$

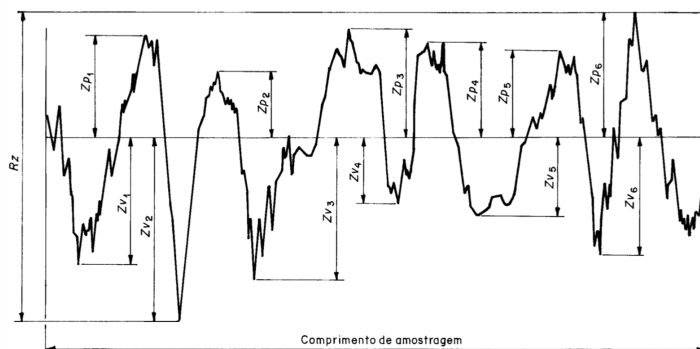
Figura 13 – Altura dos elementos do perfil (exemplo). R_a é dado pela média destes.



Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002).

Enquanto R_z , corresponde a soma da altura máxima dos picos com a maior das profundidades dos vales do perfil, no comprimento l , conforme a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002). A figura 14 a seguir, exemplifica a medição dos picos e vales e do parâmetro em questão e a equação 3.2 exemplifica o cálculo do R_z correspondente.

Figura 14 – Alturas máximas dos picos e profundidade máxima dos vales do perfil (exemplo).



Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002).

$$R_z = Z_{p6} + Z_{v2} \quad (3.2)$$

Como o corpo de prova provém de um torneamento, escolheu-se o Ra pela facilidade de obtenção e pelo uso amplo na indústria e literatura. O Rz foi escolhido para representar possíveis erros durante a fabricação, como por exemplo desbalanço da máquina operatriz ou desgaste da ferramenta, que são atenuados pelo cálculo da média aritmética no Ra. Ambos foram obtidos utilizando-se um *cutoff* (ou comprimento de amostragem, l) de 800 μm conforme recomendação do fabricante do microscópio.

Por último, para inferir a influência da operação de acabamento sobre o comportamento mecânico do material, realizou-se um ensaio de tração no equipamento mencionado, seguindo a norma ASTM E8/E8M - 16a (ASTM International (2011)). Aplicando-se uma deformação trativa uniaxial ao longo do eixo de simetria dos corpos de prova, deformando até a ruptura. Durante o teste são adquiridos valores de carga aplicada (F) e, através de um extensômetro óptico, do comprimento útil (l) do corpo de prova. Assim, pode-se calcular a Tensão de Engenharia e a Deformação, destacados nas equações 3.3 e 3.4 respectivamente. Como trata-se de um material linear-elástico, pode-se relacionar tensão e deformação através da Lei de Hooke, descrita na equação 3.5. E, portanto, construir o gráfico da figura 15.

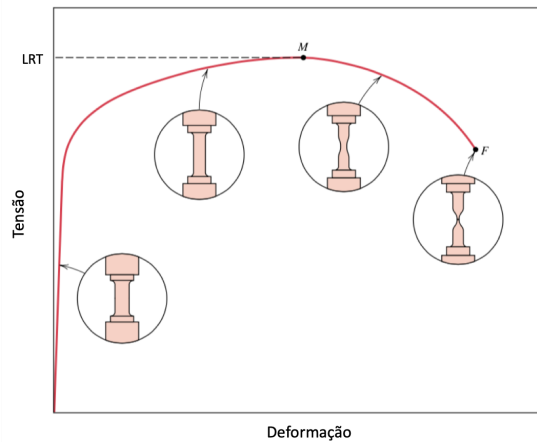
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.3)$$

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} * 100 = \%AL \quad (3.4)$$

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.5)$$

Em que A_0 é a área da seção transversal do corpo de prova no comprimento útil antes do ensaio, l_i é o comprimento final do corpo e l_0 é o inicial. E a variável E representa o módulo de elasticidade longitudinal do material, constante constitutiva para um material linear elástico.

Figura 15 – Curva típica de um ensaio de tração e representações da geometria do corpo de prova ao longo do ensaio.

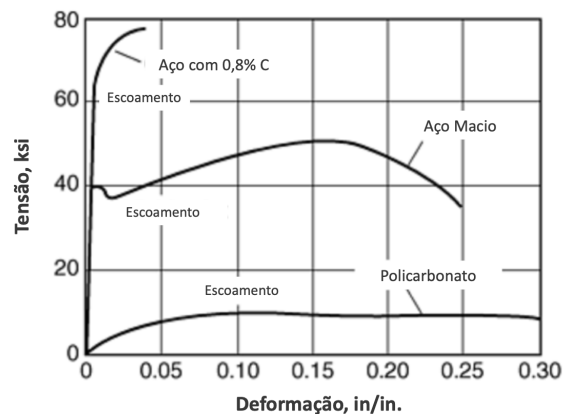


Fonte: Adaptado de [William e Callister \(2001\)](#).

A sigla *LRT* indicada no eixo e apontada pela letra *M* na curva, representa o Limite de Resistência à Tração, ponto em que o corpo de prova suporta a maior tensão e inicia-se o processo de *necking* (estragulamento do corpo de prova). Já o ponto *F*, representa a fratura e fim do ensaio.

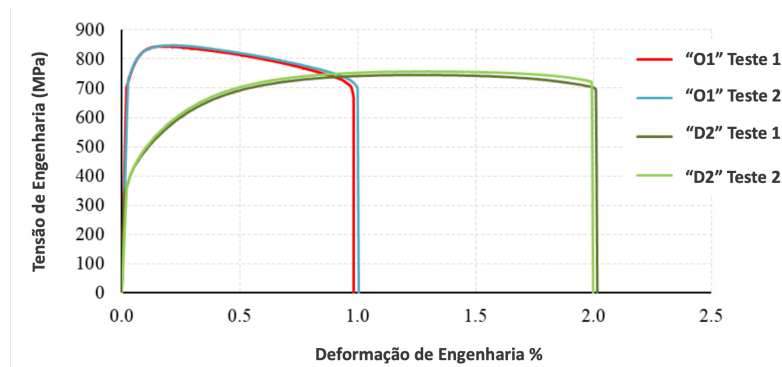
A figura 16 apresenta o comportamento típico para três tipos de materiais. O aço utilizado possui teor de carbono maior que 0,8%, somado a elevada dureza, o comportamento esperado até a fratura deve ser similar ao linear elástico. Pela figura 17, nota-se que o aço segue o padrão previsto com limite de resistência à tração médio de 846 MPa.

Figura 16 – Curvas típicas de tensão-deformação.



Fonte: Adaptado de [ASM International \(2000\)](#).

Figura 17 – Curva tensão-deformação até a fratura para aços-ferramenta "O1" e "D2".



Fonte: Adaptado de [Algarni \(2019\)](#).

No presente trabalho, o ensaio foi realizado aplicando ao travessão da máquina uma velocidade de 0,1 mm/min no regime elástico e 10 mm/min no regime plástico.

3.4 Planejamento Experimental

Determinou-se como fatores de influência a velocidade de corte (v_c) e avanço (f) em dois níveis na etapa de acabamento, configurando assim um planejamento experimental de fatorial 2^2 completo.

Neste tipo de planejamento experimental, analisam-se as influências dos fatores e da combinação entre eles sobre as variáveis de resposta. Segundo [Montgomery e Runger \(2018\)](#), os dados dos experimentos devem ser organizados como na tabela 3.

Tabela 3 – Organização de dados para um planejamento experimental de fatorial 2^2 completo.

	Fator B			Somos	Médias	
	1	2	...			b
Fator A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$	$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$	$y_{1..}$	$\bar{y}_{1..}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$	$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$	$y_{2..}$	$\bar{y}_{2..}$
	.					
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$	$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$	$y_{a..}$	$\bar{y}_{a..}$
Somas	$y_{.1.}$	$y_{.2.}$		$y_{.b.}$	$y_{...}$	
Médias	$\bar{y}_{.1.}$	$\bar{y}_{.2.}$		$\bar{y}_{.b.}$		$\bar{y}_{...}$

Fonte: Adaptado de [Montgomery e Runger \(2018\)](#)

A e B são os fatores de influência do experimento, a e b representam a quantidade de níveis que estes fatores serão experimentados e n é o número de réplicas testadas. Desta forma, y representa os resultados do experimento e através da notação indicial (y_{abn}) o resultado respectivo para cada configuração e réplica. Por fim, realiza-se a soma

($y_{1..}$, por exemplo) e média (\bar{y}) para cada linha e coluna, além da média global ($\bar{y}_{...}$) dos experimentos.

A partir destes dados, é possível aplicar a análise de variância. Que consiste em testar a hipótese através da decomposição da variabilidade total nas partes de cada fator e, então, comparar os vários elementos dessa decomposição. Calcula-se a variabilidade total através da soma dos quadrados (SS) dos dados, ou através da identidade das somas dos quadrados, respectivamente as equações 3.6 e 3.7. (MONTGOMERY; RUNGER, 2018)

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 &= bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 + \\ &n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \quad (3.7) \end{aligned}$$

Vale ressaltar que a representa o número de observações para o *Fator A*, b representa o mesmo para o *Fator B* e n é o número de réplicas para cada observação. A equação 3.7 pode ser reescrita simbolicamente, conforme equação 3.8 a seguir. (MONTGOMERY; RUNGER, 2018)

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (3.8)$$

Em que A representa o *Fator A*, B o *Fator B*, AB a interação entre os dois fatores e E um fator de erro. Pode-se equacionar, também, uma igualdade para a decomposição dos graus de liberdade de acordo com a equação 3.9. (MONTGOMERY; RUNGER, 2018)

$$(abn - 1) = (a - 1) + (b - 1) + [(a - 1)(b - 1)] + [ab(n - 1)] \quad (3.9)$$

Cada parcela corresponde a um fator, por exemplo: $abn - 1$ é o total de graus de liberdade, $a - 1$ é para o *Fator A* e assim por diante. E dividindo cada soma de quadrados pelo grau de liberdade correspondente, consegue-se o quadrado médio (do inglês *Mean Square*, notado por MS), vide subsequentes equações 3.10. (MONTGOMERY; RUNGER, 2018)

$$MS_A = \frac{SS_A}{a-1} \quad (3.10a)$$

$$MS_B = \frac{SS_B}{b-1} \quad (3.10b)$$

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)} \quad (3.10c)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)} \quad (3.10d)$$

A fim de se testar que os efeitos de A , B e AB são nulos, realiza-se um teste- F e calcula-se o valor respectivo de F , através das equações 3.11 a seguir. A distribuição F representa a razão de duas variâncias, neste caso, a variação entre médias das amostras pela variação dentro das amostras; para cada par de grau de liberdade e grau de confiança estatística (α). (MONTGOMERY; RUNGER, 2018)

$$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (3.11a)$$

$$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (3.11b)$$

$$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E} \quad (3.11c)$$

A hipótese nula (H_0) é rejeitada se o valor calculado de F_0 no fator for maior que o valor calculado ao se considerar o grau de confiança (F_α), com os mesmos graus de liberdade.

Fabricaram-se oito corpos de prova (duas réplicas para cada configuração) conforme especificado na seção anterior, a fim de se obter uma maior confiança estatística. A Tabela 4 apresenta as condições de usinagem durante o acabamento de cada réplica.

Tabela 4 – Configurações de usinagem de acabamento.

	$f_1 = 0,079 \text{ mm/rot}$	$f_2 = 0,159 \text{ mm/rot}$
$v_{c1} = 12,25 \text{ m/min}$	D1,D2	C1,C2
$v_{c2} = 15,32 \text{ m/min}$	B1,B2	A1,A2

Fonte: Próprio Autor.

Estes parâmetros de usinagem foram escolhidos de acordo com especificações do fabricante do inserto e considerando as limitações da máquina-operatriz.

As variáveis de resposta deste experimento provém de duas fontes, caracterização da superfície e ensaio de tração. Da primeira, através da medição da rugosidade do corpo de prova, obtém-se: rugosidade média (R_a) e altura máxima do perfil de rugosidade (R_z). Da segunda, a resistência mecânica é representada através do limite de resistência à tração (LRT) e da porcentagem de alongamento ($\%AL$).

Analisou-se o grau de influência dos fatores sobre as respostas através de uma análise de variância, com a, b e n iguais a 2 e um grau de confiança estatística igual a 95%, ou seja, nível de significância (α) igual a 0,05.

4 Resultados e Discussão

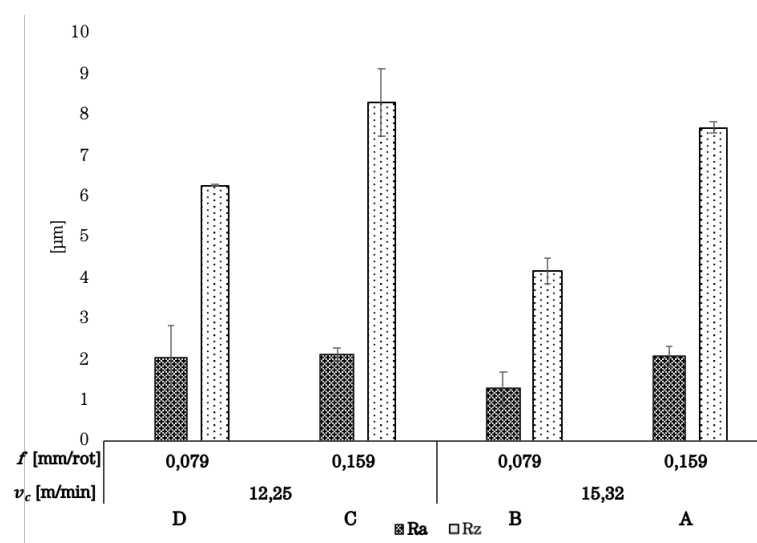
Abaixo são apresentados os resultados separados para cada variável de resposta. São apresentados, primeiramente, os dados obtidos nos experimentos e, em seguida, os resultados da análise de variância. Por fim, apresenta-se a relação obtida entre rugosidade superficial e resistência mecânica.

4.1 Parâmetros de Rugosidade

A Figura 18 a seguir, traz os resultados dos parâmetros de rugosidade para cada par de corpo de prova. Segundo Davim, Gaitonde e Karnik (2008), Bashir et al. (2018) e Sivaraman e Prakash (2020), aumentando-se a velocidade de corte tende-se a obtenção de rugosidades médias (Ra) menores, enquanto para o avanço deve-se diminuir seu valor para obter o mesmo efeito. Sarikaya e Güllü (2014) observou o mesmo para a altura máxima do perfil de rugosidades (Rz).

Foi possível verificar no experimento que o par B , fabricado com o menor avanço e maior velocidade de corte, logo, deveria apresentar os menores valores de Ra e Rz e, de fato, apresentou. Por outro lado, o par C deveria apresentar os maiores e, na média, isto se concretizou.

Figura 18 – Rugosidade Média (Ra) e Altura máxima do perfil de rugosidade (Rz) para os corpos de prova.



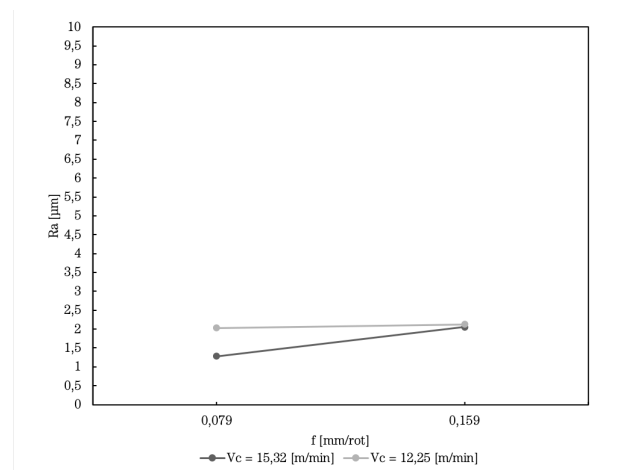
Fonte: Próprio autor.

A análise através da ANOVA produz dois gráficos, efeitos principais e Diagrama de Pareto, os gráficos correspondentes para Ra e Rz estão nas figuras 19 e 20, respectivamente.

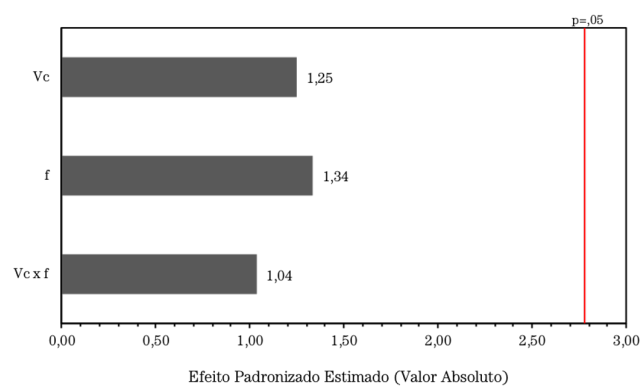
Na figura 19 o gráfico (a) expõe aquilo que já havia sido constatado na figura 18, menor avanço combinado com maior velocidade de corte geram uma superfície com menor rugosidade média. E através do Diagrama de Pareto fica nítida a maior influência do avanço na rugosidade superficial, conforme Sivaraman e Prakash (2020). Entretanto para este estudo, tanto v_c , quanto f ou a interação entre eles não apresenta influência estatisticamente significativa para a rugosidade média. Isto deve ter ocorrido pela notável presença dos fatores naturais, o torno apresentava uma vibração pronunciada e não foi utilizado fluido de corte, reduzindo a parcela da rugosidade cinemática (que é composta pelo avanço e raio de ponta da ferramenta).

Para Rz , na figura 20, o diagrama de efeitos principais confirma o que foi descrito por Sarıkaya e Güllü (2014), o aumento do avanço e a redução na velocidade de corte resultam em um aumento nos níveis do parâmetro. Ao contrário do observado para Ra , pode-se afirmar (com 95% de confiança) que v_c e f estatisticamente afetam Rz , com f em maior intensidade. Mas, da mesma forma, a interação entre v_c e f não se mostrou estatisticamente relevante.

Figura 19 – Rugosidade média (a) Efeitos principais de f e v_c . (b) Diagrama de Pareto de f , v_c e $v_c \times f$.



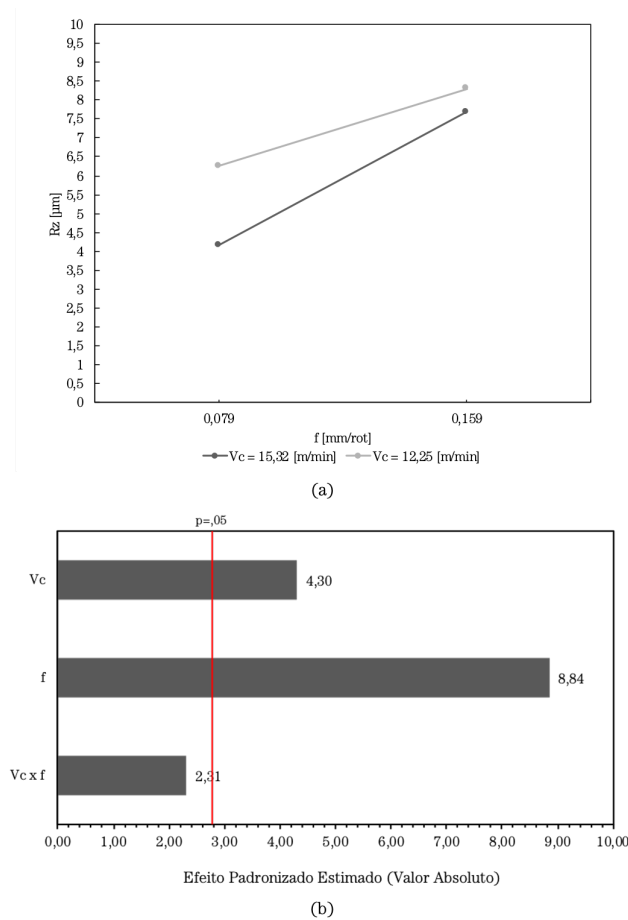
(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Altura máxima do perfil de rugosidades (a) Efeitos principais de f e v_c . (b) Diagrama de Pareto de f , v_c e $v_c \times f$.



Fonte: Próprio autor.

Analisando quantitativamente ambos os parâmetros, nota-se a mesma tendência de diminuição dos valores com o aumento da velocidade de corte: em média 35% para o avanço igual a 0,079 mm/rot e 5,4% para o avanço de 0,159 mm/rot. Enquanto para o incremento do avanço, aumentaram-se os valores em 18,8% para a velocidade de corte de 12,25 m/min e 72% para a configuração que operava em 15,32 m/min.

4.2 Resistência Mecânica

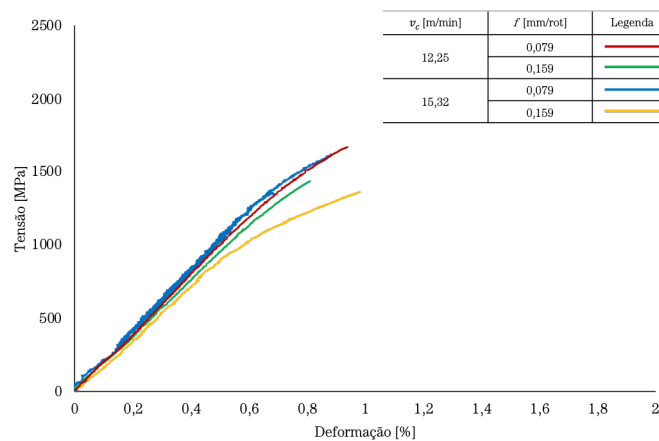
As figuras 21, 22 e 23 apresentam os resultados obtidos através dos ensaios de tração. A primeira é a curva de Tensão pela Deformação de uma réplica de cada uma das configurações de usinagem em acabamento, a segunda apresenta a curva de Tensão pela Deformação enfatizada após os 0,75% de deformação e a terceira apresenta em barras o LRT e a $\%AL$ em média para cada par de corpos de prova.

O comportamento para a curva da figura 21, com uma porção de deformação plástica ínfima e uma ruptura praticamente frágil, já era esperada por conta da composição química

do aço, somando-se a elevada dureza obtida através do tratamento térmico por têmpera e revenimento, acentuando o comportamento frágil do material conforme explicitado por Canale, Totten e Mesquita (2008).

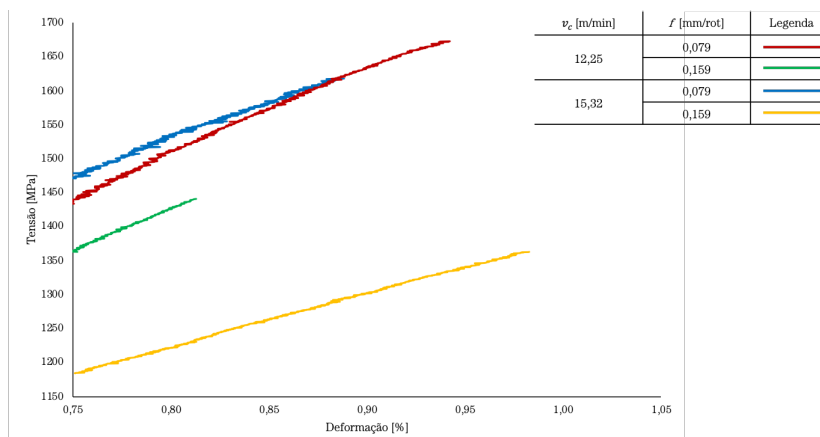
Outro ponto interessante é o aumento do *LRT* quando comparado àquele obtido por Algarni (2019), pelo menos 1400 MPa contra 846 MPa. Isto pode ter se originado na escolha de realizar o processo de acabamento após o tratamento térmico. Conforme explicitado por George (2004) e por Zambrano et al. (2019), o aço AISI O1 temperado e revenido apresenta uma matriz de ferrita. E, segundo Canale, Totten e Mesquita (2008), ferrita é a fase necessária para haver encruamento. Portanto, assim como nos ensaios de resistência ao desgaste no trabalho de Zambrano et al. (2019), realizar a fase de acabamento após o tratamento térmico acabou gerando encruamento à superfície do aço, aumentando a dureza e, conseqüentemente, aumentando o *LRT*, como pode ser notado na 23 o valor mínimo próximo a 1400 MPa.

Figura 21 – Gráfico da Tensão pela Deformação para os corpos de prova.



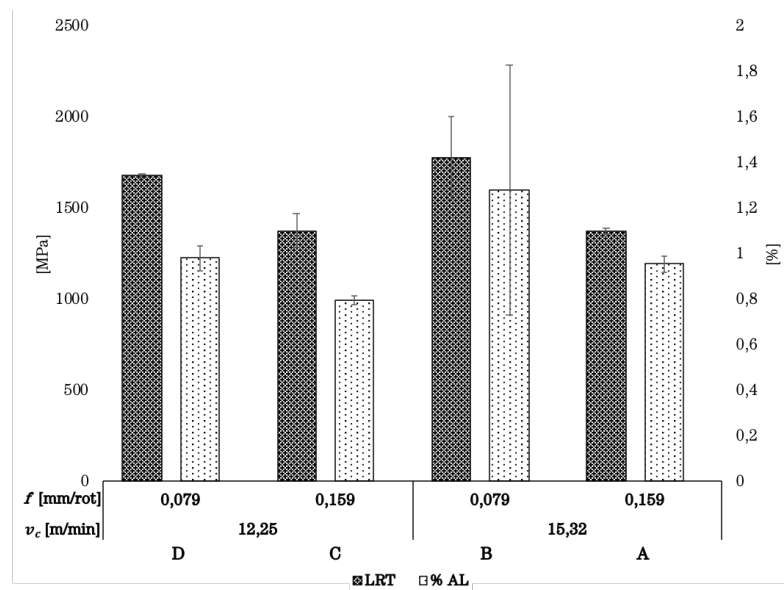
Fonte: Próprio autor.

Figura 22 – Gráfico da Tensão pela Deformação para os corpos de prova. Enfatizando os pontos após 0,75% de deformação.



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Limite de resistência à tração (LRT) e Porcentagem de Alongamento (%) médios para os corpos de prova.

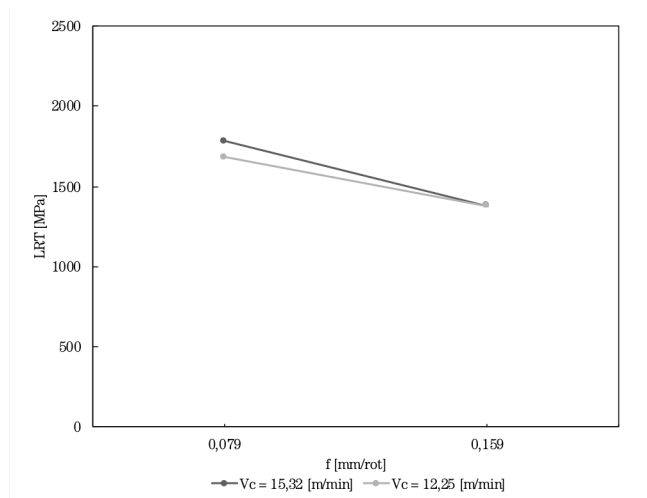


Fonte: Próprio autor.

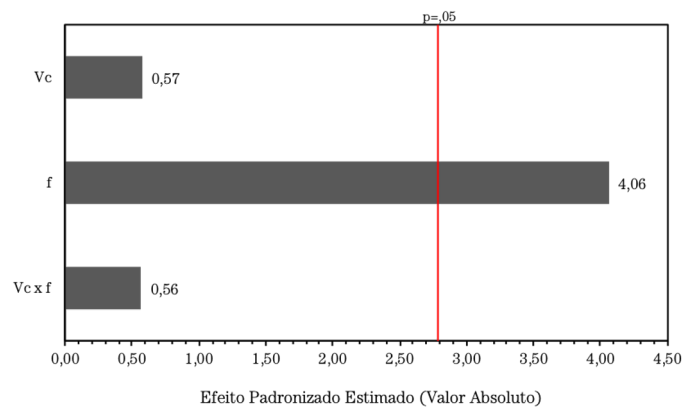
Da mesma forma que na subseção anterior, as figuras 24 e 25 apresentam os resultados obtidos via ANOVA.

Na figura 24 a análise dos efeitos principais torna evidente que ao migrar para uma condição de usinagem que gera superfícies mais rugosas (maior avanço) há uma diminuição significativa do *LRT*. O gráfico (b) atesta o que foi evidenciado em (a) mostrando que podemos afirmar (com 95% de confiança) que o avanço estatisticamente influencia o limite de resistência à tração, enquanto v_c e a interação entre os fatores não são estatisticamente significativos.

Figura 24 – Limite de Resistência à Tração (LRT) (a) Efeitos principais de f e v_c . (b) Diagrama de Pareto de f , v_c e $v_c \times f$



(a)

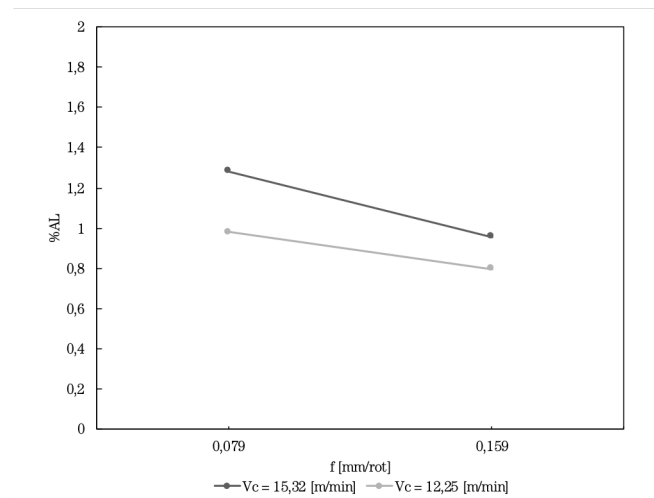


(b)

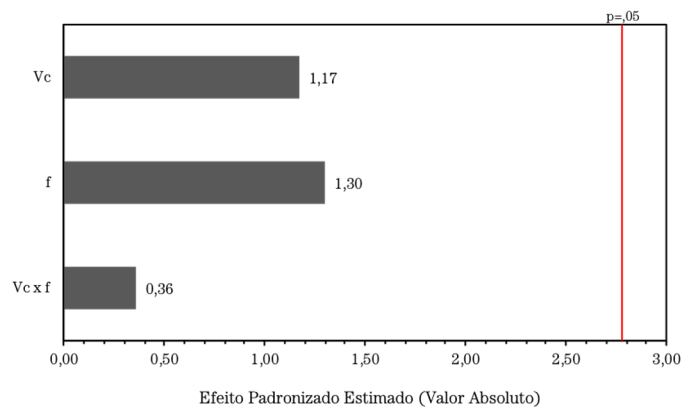
Fonte: Próprio autor.

A figura 25 mostra que embora haja uma tendência aparente de redução do alongamento com o aumento do avanço, ou com a redução da velocidade, nenhum destes fatores ou a sua interação mostram-se estatisticamente significativos.

Figura 25 – Porcentagem de Deformação ou Alongamento (a) Efeitos principais de f e v_c .
 (b) Diagrama de Pareto de f , v_c e $v_c \times f$



(a)



(b)

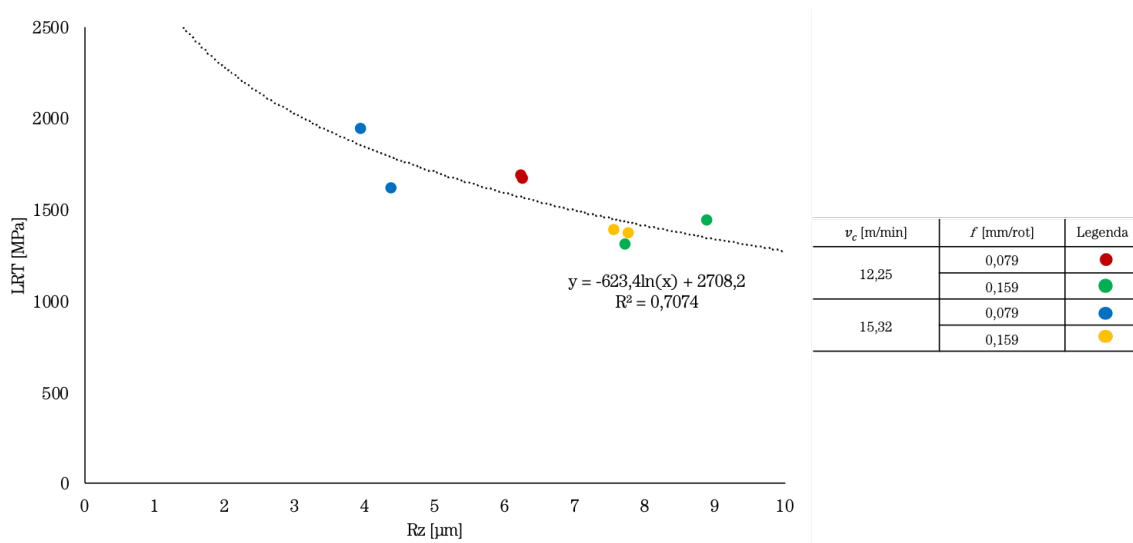
Fonte: Próprio autor.

Analisando os parâmetros, destaca-se a mesma tendência de ampliação dos valores com o aumento da velocidade de corte: em média 18% para o avanço igual a 0,079 mm/rot e 10% para o avanço de 0,159 mm/rot. Mas, mostram uma tendência de redução ao aumento do avanço, para a velocidade de corte de 12,25 m/min houve uma queda de 18,5% na média, já para a configuração de 15,32 m/min esta tendência agravou-se para 24%.

4.3 Correlação entre Rugosidade Superficial e Resistência Mecânica

Para estabelecer uma correlação entre a rugosidade superficial e a resistência mecânica, construiu-se o gráfico da figura 26.

Figura 26 – Limite de Resistência à Tração (LRT) em função da Altura Máxima do Perfil de Rugosidades (Rz).



Fonte: Próprio autor.

O gráfico apresenta a correlação entre o parâmetro de rugosidade Rz nas abcissas e o LRT nas ordenadas. A dispersão dos pontos pôde ser relacionada através de uma equação logarítmica, com coeficiente de determinação 0,7074.

A correlação aponta para um aumento do LRT em função da diminuição do Rz , o que pode ser explicado pelo fato do avanço ser aquele que estatisticamente mais influencia ambos parâmetros.

Davim et al. (2010), Gómez-Parra et al. (2014), Wang, Liu e Yang (2013) e Rababa e Al-mahasne (2011) explicitaram em seus estudos que através de uma rugosidade superficial menor, ou seja, um acabamento mais fino pode elevar a resistência mecânica. Sivaraman e Prakash (2020), elucidam que o fluido de corte é o parâmetro mais influente na rugosidade superficial, seguido pelo avanço e pela velocidade de corte. Nota-se que o par B (pontos azuis), portador da menor rugosidade superficial, apresentou os maiores valores de LRT . Seguido pelo par D (pontos vermelhos), conforme previsto, pois compartilhava o mesmo avanço.

5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Posteriores

Tendo em vista os resultados obtidos, para as variáveis rugosidade média (Ra), altura máxima de perfil de rugosidades (Rz), limite de resistência à tração (LRT) e porcentagem de alongamento ($\%AL$), podem ser destacadas as seguintes conclusões:

- Ra e Rz apresentam tendências de comportamento similar. Porém, apenas para Rz pode-se afirmar que f e v_c afetam de maneira estatisticamente significativa;
- LRT e $\%AL$ apresentam tendências de comportamento similar. Mas, somente para LRT pode-se afirmar que o f afeta de maneira estatisticamente significativa;
- Ao confrontar-se os dados de rugosidade e limite de resistência à tração, foi possível estabelecer uma correlação entre eles. A regressão logarítmica realizada indica que o aumento da rugosidade implica em redução da resistência mecânica.

Como sugestões para trabalhos posteriores pode-se avaliar a influência do fluido de corte. Realizando testes sem fluido, com fluido corrente e seguindo o método MQF, aumentando o nível de complexidade da análise de variância. Também, é possível elucidar a análise vibracional durante o torneamento (no presente trabalho foi realizado o monitoramento através de um *hardware* de baixo custo), sendo mais uma variável de resposta e enriquecendo o modelo de análise.

Outra possível abordagem seria alterar o processo de fabricação, partindo para o fresamento. Neste processo, pode-se investigar de duas maneiras: a primeira analogamente ao presente trabalho, mantendo-se constante a penetração de trabalho, sendo os fatores de influência o avanço por dente e a velocidade de corte. Na segunda, a penetração de trabalho se tornaria um fator de influência. Além dos ensaios com microscopia óptica, tração e microdureza, pode-se incrementar a análise estudando a tensão residual gerada pelo processo de fabricação e analisar a microestrutura do aço.

Referências

- ALGARNI, M. Mechanical properties and microstructure characterization of aisi “d2” and “o1” cold work tool steels. *Metals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 11, p. 1169, 2019.
- ASM International. *ASM Handbook: Mechanical testing and evaluation*. [S.l.]: ASM International, 2000. v. 8.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO ABNT 4287**. Especificações geométricas do produto (GPS)-Rugosidade: Método do perfil-Termos, definições e parâmetros da rugosidade. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2002.
- ASTM International. **ASTM E8/E8M - 16a**. *Standard test methods for tension testing of metallic materials*, v. 3, p. 66, 2011.
- ASTM International. **ASTM A681-08 (2015)**. *Standard Specification for Tool Steels Alloy*, p. 14, 2015.
- BASHIR, K. et al. Experimental investigation into effect of cutting parameters on surface integrity of hardened tool steel. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.], 2018. v. 344, n. 1, p. 012020.
- BATCHELOR, A. W.; LAM, L. N.; CHANDRASEKARAN, M. *Materials degradation and its control by surface engineering*. [S.l.]: World Scientific, 2011.
- CANALE, L. d. C. F.; TOTTEN, G. E.; MESQUITA, R. A. *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*. [S.l.]: ASM international, 2008.
- DAVIM, J. P.; GAITONDE, V.; KARNIK, S. Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ann models. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 205, n. 1-3, p. 16–23, 2008.
- DAVIM, J. P. et al. *Surface integrity in machining*. [S.l.]: Springer, 2010. v. 1848828742.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. [S.l.]: Editora blucher, 2018.
- GEORGE, F. *ASM handbook: Volume 9: Metallography and microstructures*. [S.l.]: ASM Internationa, 2004.
- GGD METALS. **GGD O1**. 2020. <<https://ggdmetals.com.br/produto/aisi-o1/>>. Acesso em: 11/02/2020.
- GÓMEZ-PARRA, Á. et al. Influence of the dry turning parameters on the ultimate tensile strength (uts) of uns a92024 samples. In: TRANS TECH PUBL. *Materials Science Forum*. [S.l.], 2014. v. 797, p. 65–70.
- Interlloy-Engineering Steels and Alloys. **O1 Tool Steel (100MnCrW4)**. 2020. <<http://www.interlloy.com.au/our-products/tool-steel/o1-tool-steel-100mncrw4/>>. Acesso em: 12/02/2020.

JAVIDI, A.; RIEGER, U.; EICHLSEDER, W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of fatigue*, Elsevier, v. 30, n. 10-11, p. 2050–2055, 2008.

KNIGHT, W. A.; BOOTHROYD, G. *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*. [S.l.]: CRC Press, 2005. v. 198.

LIANG, X.; LIU, Z.; WANG, B. State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review. *Measurement*, Elsevier, v. 132, p. 150–181, 2019.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for Engineers*. 7. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 2018.

RABABA, K. S.; AL-MAHASNE, M. M. Effect of roller burnishing on the mechanical behavior and surface quality of o1 alloy steel. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Maxwell Science Publishing, v. 3, n. 3, p. 227–233, 2011.

SARAVANAN, R. et al. Optimization of cutting conditions during continuous finished profile machining using non-traditional techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 26, n. 1-2, p. 30–40, 2005.

SARIKAYA, M.; GÜLLÜ, A. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in cnc turning under mql. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 65, p. 604–616, 2014.

SILVA, A. L. d. C. E.; MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. [S.l.]: Edgard Blücher, 2006.

SIVARAMAN, V.; PRAKASH, S. Optimization of cutting parameters in hard turning of aisi o1 steel using pvd tialn coated carbide insert. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, TJPRC Pvt. Ltd., v. 10, 2020.

SURESH, R. et al. State-of-the-art research in machinability of hardened steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 227, n. 2, p. 191–209, 2013.

TAMAYO, Y. M. et al. Investigación da influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial usando regressão múltipla. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, Universidad Nacional de Educacion a Distancia (UNED), v. 20, n. 2, p. 25, 2016.

VOORT, G. F. V. *Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels*. [S.l.]: ASM international, 1991.

WANG, B.; LIU, Z.; YANG, Q. Investigations of yield stress, fracture toughness, and energy distribution in high speed orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 73, p. 1–8, 2013.

WILLIAM, D.; CALLISTER, J. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 136.

WU, D.; MATSUMOTO, Y. The effect of hardness on residual stresses in orthogonal machining of aisi 4340 steel. 1990.

ZAMBRANO, O. et al. The sliding wear behaviour of steels with the same hardness. ***Wear***, Elsevier, v. 418, p. 201–207, 2019.