

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

GUSTAVO RODRIGUES SCHMIDT

Relação Entre Microestrutura e Usinabilidade do Aço SAE 4140

São Paulo

2021

GUSTAVO RODRIGUES SCHMIDT

Relação entre microestrutura e usinabilidade do aço SAE 4140

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Goldenstein

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

Schmidt, Gustavo Rodrigues

Relação entre microestrutura e usinabilidade do aço SAE 4140 / G. R.
Schmidt -- São Paulo, 2021.

75 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Usinagem 2.Metalurgia 3.Torneamento I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiro à minha família por todo o apoio com a minha decisão de seguir carreira na engenharia e por dar toda a base que uso para construir minha vida. Obrigado a meus grandes amigos, alguns dos quais mantenho a amizade há duas décadas, por todo o apoio e pela parceria que continuamos mantendo mesmo após todo esse tempo.

Dentro da Escola Politécnica tive a oportunidade de conhecer pessoas e participar de projetos que contribuíram tanto para a minha formação acadêmica quanto a profissional. Gostaria de agradecer tanto a meus amigos e colegas de curso quanto à Equipe Poli Racing, que me permitiu desenvolver habilidades profissionais e conhecer novas pessoas que me ensinaram lições que carregarei para o resto da minha vida. Gostaria de agradecer também às pessoas que eu conheci durante meu tempo no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, com as quais tive a oportunidade de desenvolver habilidades e aprender sobre carreiras na área de pesquisa.

Quanto ao desenvolvimento deste trabalho, gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Hélio Goldenstein e ao Prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau, que me orientaram e ensinaram muitos conceitos novos. Agradeço também à minha colega e amiga Karina Bonami Vicente, que desenvolveu seu trabalho de conclusão junto comigo e me ensinou muito do que eu atualmente sei sobre usinagem. Quanto aos experimentos, agradeço a ajuda e parceira dos doutorandos do Prof. Hélio, mais especificamente o Luiz Felipe Bauri e o Henrique Boschetti Pereira, além de agradecer também ao Raphael Oliveira Ferreira do Laboratório de Fenômenos de Superfície.

RESUMO

SCHMIDT, Gustavo Rodrigues. **Relação entre microestrutura e usinabilidade do aço 4140.** 2021. 75 p. Trabalho de Formatura TCC (Graduação). Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

Este trabalho visa utilizar conceitos da metalurgia e da usinagem para descrever fenômenos observados na usinagem por torneamento do aço SAE 4140 em diferentes condições de microestrutura e de corte. Dessa maneira, foi feita uma ligação direta entre as duas áreas para melhor explicar como ocorrem as interações entre elas e como utilizar conceitos de metalurgia pode levar à melhor descrição ou previsão de fenômenos que ocorrem durante operações de usinagem. A avaliação da usinabilidade foi feita por três principais métodos: avaliação de esforços de corte, observação dos cavacos formados e análise microestrutural. Os três métodos foram usados em conjunto para descrever os fenômenos observados durante a usinagem do SAE 4140 em condições específicas. No desenvolvimento do trabalho, a camada descarbonetada do material foi um dos principais objetos de estudo, devido à sua grande importância para a descrição dos fenômenos observados e por fornecer um gradiente de microestrutura dentro de um mesmo material.

Palavras-chave: Usinabilidade. Usinagem. Metalurgia. Torneamento.

ABSTRACT

SCHMIDT, Gustavo Rodrigues. **Relationship between microstructure and machinability of 4140 steel.** 2021. 75 p. Trabalho de Formatura TCC (Graduação). Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

This project aims to utilize concepts from metallurgy and machining to describe phenomena observed in turning of SAE 4140 steel under different microstructure and cutting conditions. Thus, a direct connection was made between the two areas to better explain how the interactions between them occur and how using metallurgy concepts may lead to a better description or prediction of phenomena that occur during machining operations. The machinability evaluation was carried out by three main methods: evaluation of cutting forces, observation of formed chips and microstructural analysis. The three methods were used together to describe the phenomena observed when machining the SAE 4140 under specific conditions. In the development of the project, the decarburized layer of the material was one of the main objects of study, due to its great importance for the description of the observed phenomena and for providing a microstructure gradient within the same material.

Keywords: Machinability. Machining. Metallurgy. Turning.

SUMÁRIO

1	OBJETIVOS.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Aço SAE 4140.....	13
2.2	Usinagem.....	14
2.3	Usinabilidade.....	28
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
3.1	Material ensaiado.....	34
3.2	Método empregado	35
4	RESULTADOS.....	44
4.1	Análise metalográfica em microscópio óptico	44
4.2	Análise metalográfica em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	49
4.3	Medidas de microdureza	54
4.4	Ensaios de usinabilidade	56
5	DISCUSSÃO.....	67
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática dos movimentos envolvidos em usinagem (STOETERAU, 2020)	14
Figura 2: Esquematização das diferentes regiões do cavaco. Adaptado de (KLOCKE, 2011)	15
Figura 3: Tipos de cavaco e suas formações de acordo com Vieregge (VIEREGGE, 1970). Adaptado por (KLOCKE, 2011) e traduzido para português.	16
Figura 4: Superfícies e arestas de uma ferramenta de corte (DINIZ, 2005)	17
Figura 5: Esquematização da cunha de corte (DINIZ, 2005).....	18
Figura 6: Exemplo de um trono horizontal, com os componentes destacados (RLM Máquinas e Equipamentos, 2020)	21
Figura 7: Operações de torneamento cilíndrico (KLOCKE, 2011).....	22
Figura 8: Operações de faceamento (KLOCKE, 2011)	22
Figura 9: Furação em um torno (RICARDO, 2014)	23
Figura 10: Ilustração dos principais parâmetros de torneamento (YOUSSEF, 2008)	23
Figura 11: Ilustração das diferentes forças em um processo de usinagem (SILVA, 2014), adaptado de (DINIZ, 2005).....	26
Figura 12: Gráficos qualitativos da variação das forças com os parâmetros de corte, adaptado de (KLOCKE, 2011).....	27
Figura 13: Exemplo de gráfico gerado pela medição de forças de corte em torneamento (FOUNTAS, 2019).....	29
Figura 14: Diagrama esquemático do sistema de um dinamômetro medidor de forças de corte em torneamento (KUMAR, 2019)	30
Figura 15: Diagrama ilustrando como propriedades do material podem prejudicar a usinabilidade, adaptado de (YIN, 2020)	31
Figura 16: Resumo da adequação de geometrias de cavaco no processo de usinagem. Adaptado de (KLOCKE, 2011).....	33
Figura 17: Tarugos recebidos para os ensaios.	34

Figura 18: Amostra de 4140 na condição como recebida embutida. A partir da curvatura na parte esquerda da amostra é possível identificar a região da superfície do tarugo	36
Figura 19: Simulação feita para determinar fases presentes no material.....	37
Figura 20: <i>Setup da simulação no Ac3</i>	38
Figura 21: Resultados da simulação de microestrutura do Ac3.	38
Figura 22: Tarugos após retirados do forno.	39
Figura 23: Corpo de prova fabricado para ensaio de usinabilidade.	40
Figura 24: Sistema de aquisição de dados preparado para os ensaios.	41
Figura 25: Perfilômetro utilizado em operação.	43
Figura 26: Micrografia ampliada em 50X da região da borda do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.	45
Figura 27: Micrografia ampliada em 200X da região da borda do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.	45
Figura 28: Micrografia ampliada em 1000X da região da borda do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.	46
Figura 29: Micrografia ampliada em 200X da metade do raio do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.	47
Figura 30: Micrografia ampliada em 1000X da metade do raio do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.	47
Figura 31: Micrografia ampliada em 100X da região da borda do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.....	48
Figura 32: Micrografia ampliada em 200X da região da metade do raio do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.....	49
Figura 33: Imagem de MEV ampliada em 2.500X da região da borda do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.....	50
Figura 34: Imagem de MEV ampliada em 10.000X da região da borda do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.....	50

Figura 35: Imagem de MEV ampliada em 2.500X da região da metade do raio do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.....	51
Figura 36: Imagem de MEV ampliada em 10.000X da região da metade do raio do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.....	51
Figura 37: Imagem de MEV ampliada em 2.500X da região da borda do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.....	52
Figura 38: Imagem de MEV ampliada em 10.000X da região da borda do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.....	53
Figura 39: Imagem de MEV ampliada em 2.500X da região da metade do raio do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.....	53
Figura 40: Imagem de MEV ampliada em 10.000X da região da metade do raio do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.....	54
Figura 41: Ilustração gráfica das medidas de microdureza da Tabela 6.	55
Figura 42: Imagem do dinamômetro usado contendo os vetores de cada componente de força analisada.	57
Figura 43: Forças de corte no aço 4140 recebido registradas para 1,5 mm de profundidade de corte após retirada da camada externa.	58
Figura 44: Forças de corte no aço 4140 recebido registradas para 0,5 mm de profundidade de corte sem retirada da camada externa.	58
Figura 45: Forças de corte no aço 4140 normalizado registradas para 1 mm de profundidade de corte após retirada da camada externa.	59
Figura 46: Gráfico de valor médio das forças de avanço (F_f) observadas em diferentes condições.	60
Figura 47: Gráfico de valor médio das forças passivas (F_p) observadas em diferentes condições.	60
Figura 48: Gráfico de valor médio das forças de corte (F_c) observadas em diferentes condições.	61
Figura 49: Mapas bidimensionais de rugosidade na superfície do metal após usinagem na condição recebida (esquerda) e na condição normalizada (direita).	65

Figura 50: Mapas tridimensionais de rugosidade na superfície do metal após usinagem na condição recebida (esquerda) e na condição normalizada (direita).	65
Figura 51: Exemplos de perfis de rugosidade após usinagem observados no metal recebido (cima) e no normalizado (baixo).	66
Figura 52: Tarugo de aço SAE 4140 na condição recebida após cortes em diferentes profundidades de material. Da esquerda para a direita, as profundidades foram 1,5mm, 1mm e 0,5mm.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço SAE 4140 (ASM, ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, 2005).	13
Tabela 2: Exemplos de velocidade de corte para torneamento. Valores em m/min (ACJ Usinagem Ltda.)	24
Tabela 3: Propriedades mecânicas de microconstituintes metalográficos, adaptado de (VIEREGGE, 1970)	32
Tabela 4: Composição química das amostras recebidas.	35
Tabela 5: Principais parâmetros de corte usados	42
Tabela 6: Medidas de microdureza Vickers com 0,3 kgf de carga.	55
Tabela 7: Medidas de microdureza Vickers da borda dos tarugos com 0,3 kgf de carga.	56
Tabela 8: Conjunto de cavacos recolhidos para cortes de 0,5 mm de profundidade.	62
Tabela 9: Conjunto de cavacos recolhidos para cortes de 1 mm de profundidade.	63
Tabela 10: Conjunto de cavacos recolhidos para cortes de 1,5 mm de profundidade.	64
Tabela 11: Principais parâmetros de rugosidade observados.....	66

1 OBJETIVOS

Dada a importância da usinagem como um processo de manufatura com aplicações em quase todos os setores industriais e sua relação com os conceitos da metalurgia, o presente trabalho tem como objetivo usar a análise metalográfica para explicar fenômenos observados durante a usinagem de um aço para construção mecânica. Nesse sentido, o trabalho tem como principais objetivos:

- Conduzir uma revisão bibliográfica acerca de usinagem, usinabilidade e a relação dos temas com a metalurgia;
- Usinar corpos de prova por torneamento e analisar os resultados;
- Relacionar os resultados obtidos com conceitos da metalurgia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aço SAE 4140

O aço usado como foco deste trabalho pode ser classificado como um aço de médio carbono, isto é, possui teor de carbono entre 0,25% e 0,60%. De maneira geral, esses metais são comumente usados em aplicações ligadas à construção mecânica e estrutural devido a propriedades como sua resistência ao desgaste e seu limite de resistência específico. Porém, os aços de médio carbono sem a adição de elementos de liga possuem temperabilidade relativamente baixa, o que dificulta a aplicação de tratamentos térmicos em produtos com seções de diâmetros maiores. Muitas das principais aplicações desses aços, como em elementos estruturais, exigem seções resistivas de diâmetros elevados e a aplicação de tratamentos térmicos, o que leva à necessidade do uso de elementos de liga para aumentar a sua temperabilidade (CALLISTER, 2010).

Dentre os possíveis elementos de liga que poderiam ser usados para esse fim, os mais comumente usados são cromo e molibdênio. O uso desses dois principais elementos de liga em aços de médio carbono constitui o conjunto de ligas denominado pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) como 41xx. Ao se referir a uma liga específica desse conjunto os caracteres que se encontram no lugar do “xx” se referem à porcentagem em peso de carbono vezes 100, ou seja, a liga SAE 4140 é composta por aproximadamente 0,4% de carbono em peso.

Devido a seu custo relativamente baixo e à sua elevada resistência mecânica, a liga SAE 4140 é frequentemente usada como elemento de construção mecânica em várias aplicações, como automotivas, aeroespaciais e na área de agricultura. Embora ela seja frequentemente aplicada na forma de produtos forjados, suas propriedades também a tornam um aço com usinabilidade elevada na condição recocida. A composição química dessa liga pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço SAE 4140 (ASM, ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, 2005).

Porcentagem em massa								
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
0,38-0,43	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-

2.2 Usinagem

O termo usinagem se refere a um conjunto de processos mecânicos que dão forma a um objeto a partir de desgaste de uma matéria bruta, com o material desgastado sendo desprendido dela na forma de cavaco. Alguns dos processos de usinagem mais comumente encontrados na indústria incluem torneamento, furação, fresamento e retificação. Processos diferentes de usinagem possuem aplicações, limitações, velocidades de corte e graus de precisão distintos. Porém, de maneira geral a precisão tende a ser maior que em outros processos de manufatura. Por esse motivo, em muitos casos ela é uma das últimas etapas da fabricação de um componente.

Todo processo de usinagem é baseado em um movimento relativo entre a peça e a ferramenta. O movimento efetivo pode ser dividido em dois principais componentes: o movimento de avanço e o movimento de corte, conforme ilustrado na Figura 1. O movimento de corte descreve o movimento relativo causado pela rotação da peça, que resulta na retirada de material dela e a formação de cavaco. Já o movimento de avanço descreve o deslocamento relativo entre a peça e a ferramenta no sentido do eixo principal da peça, fornecendo a manutenção da força de corte e possibilitando a formação contínua de cavaco. Também pode ser considerado que há um terceiro movimento relativo perpendicular aos dois anteriores: o movimento de penetração, que regula a profundidade do corte que será feito na peça e a espessura do cavaco formado.

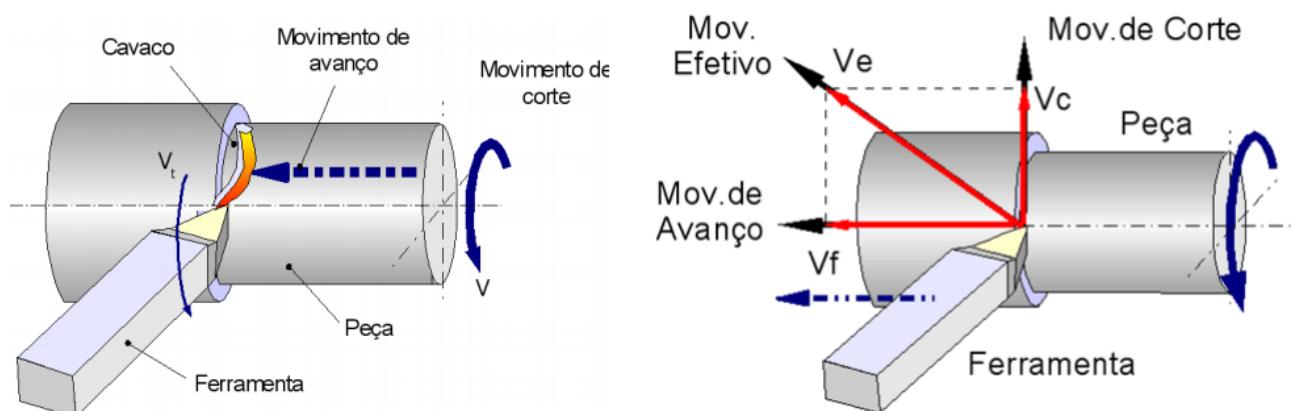


Figura 1: Representação esquemática dos movimentos envolvidos em usinagem (STOETERAU, 2020)

A formação do cavaco é um processo que ocorre em várias etapas. Inicialmente, há o contato entre a ferramenta e a peça, seguido pela deformação elástica e plástica na superfície de contato. A deformação plástica impõe aumentar gradualmente, levando a um início de ruptura da região afetada pela ferramenta e à formação de uma frente de cisalhamento, que é movida junto com o cavaco até o ponto de ruptura (KLOCKE, 2011). O cavaco também pode ser dividido em sub-regiões durante sua formação, como ilustrado na Figura 2.

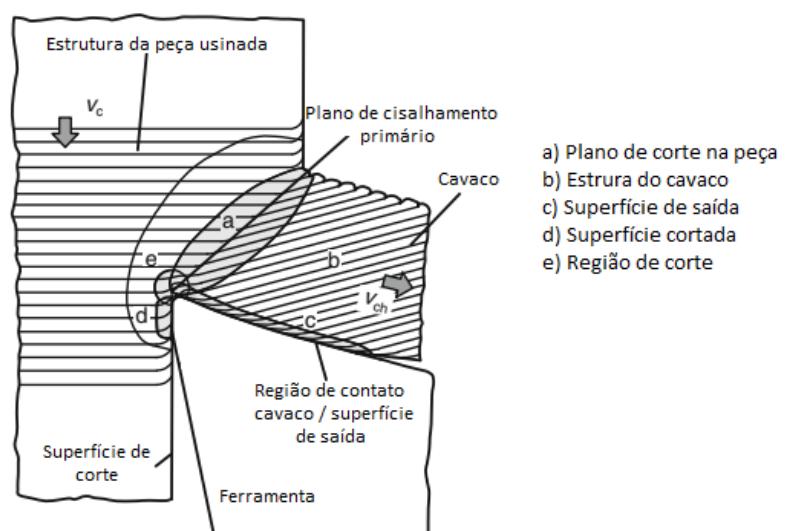


Figura 2: Esquematização das diferentes regiões do cavaco. Adaptado de (KLOCKE, 2011)

Também existem diferentes classificações para o tipo de cavaco formado. Em seu livro sobre usinagem de metais ferrosos, VIEREGGE propõe uma divisão dos possíveis cavacos formados em quatro tipos e explica o que leva à formação de cada um deles, conforme resumido a seguir e ilustrado na Figura 3.

1. Cavaco contínuo: É formado quando deformações baixas são aplicadas a um material usinado com dureza relativamente baixa. O resultado é um cavaco contínuo com microestrutura uniforme ao longo de sua área, sem haver fragilização.
2. Cavaco lamelar: Pode ser formado devido à aplicação de deformações intermediárias na peça, presença microestrutura heterogênea ou pela

presença de vibrações durante a usinagem. Outra possível causa da formação é a aplicação de velocidades de corte excessivas.

3. Cavacos segmentados: São segmentos de cavacos que foram retirados do plano de cisalhamento e em seguida foram soldados em conjunto. Eles tendem a formar em altas taxas de deformação, sendo mais comumente encontrados em materiais frágeis. Eles também podem ser formados ao aplicar velocidades de corte extremamente baixas.
4. Cavacos descontínuos: Ocorrem principalmente em materiais frágeis com microestrutura heterogênea. Uma diferença significativa desses cavacos é o mecanismo de retirada da peça, pois eles são rasgados ao invés de separados, fato que pode causar danos à superfície da peça (KLOCKE, 2011).

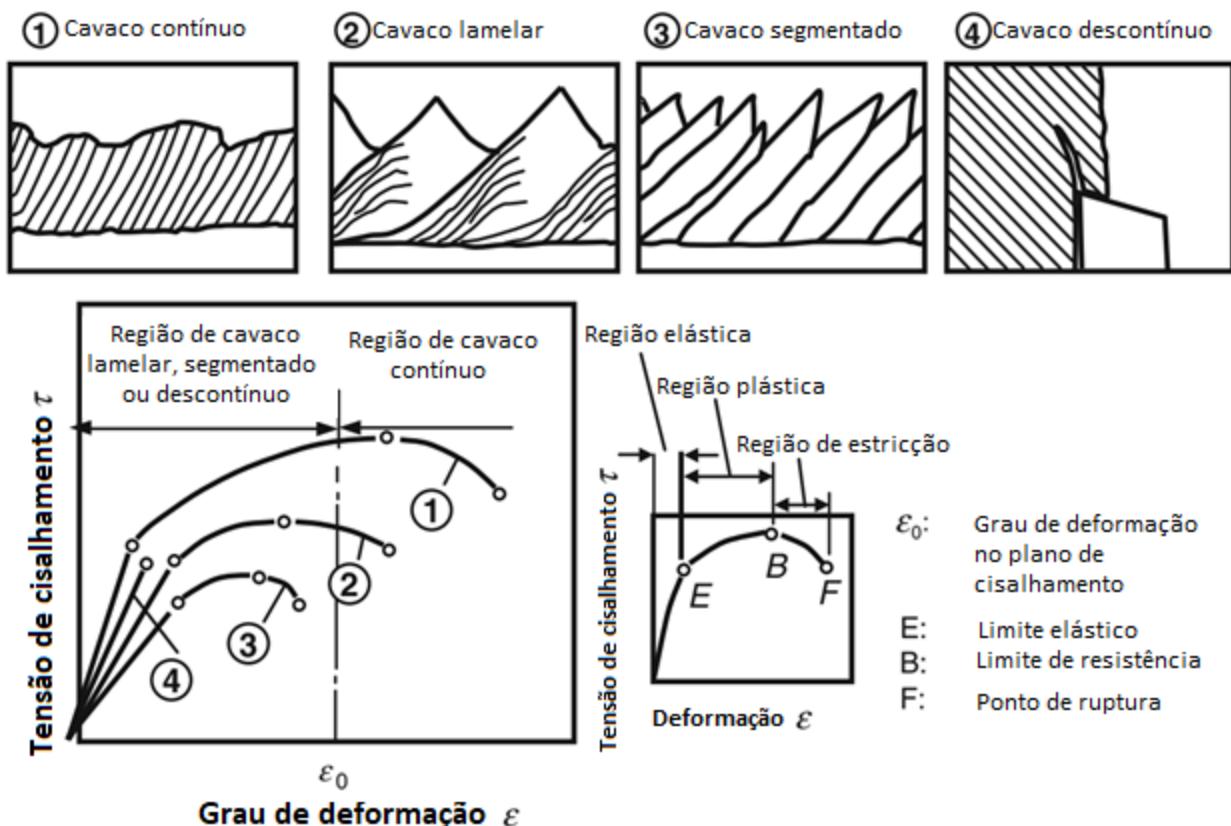


Figura 3: Tipos de cavaco e suas formações de acordo com Vieregge (VIEREGGE, 1970). Adaptado por (KLOCKE, 2011) e traduzido para português.

Outro aspecto fundamental da usinagem é o uso da ferramenta de corte, que é um componente bastante complexo. O primeiro aspecto que precisa ser compreendido sobre a ferramenta é sua geometria. Entre as maneiras que a geometria afeta a usinagem, os

principais são na qualidade da superfície final, desgaste da ferramenta, forças de corte aplicadas e na formação e saída de cavaco. As diferentes superfícies e arestas que compõem a ferramenta estão ilustradas na Figura 4.

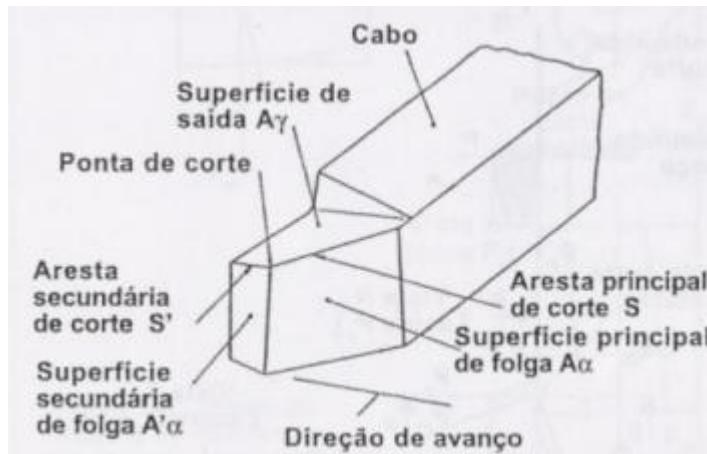


Figura 4: Superfícies e arestas de uma ferramenta de corte (DINIZ, 2005)

Fazendo uma análise mais direcionada das características que influenciam a usinagem de um material, pode ser analisada principalmente a geometria da cunha de corte, que é a região que efetivamente entra em contato com o material e resulta na formação de cavaco. Ao analisar a cunha, os principais fatores são os ângulos dela em relação à peça, pois eles ditam a facilidade de corte do material, da formação e da expulsão do cavaco. Um aumento do ângulo formado entre a superfície principal de folga e a peça tende a reduzir o atrito dessa superfície de contato, aumentando a estabilidade da usinagem (STOETERAU, 2020). Já no ângulo entre a superfície de saída e a peça há uma faixa ótima para a redução de força de corte, facilitando o escoamento do cavaco sobre a face. Essas superfícies citadas podem ser encontradas na ilustração da Figura 5.

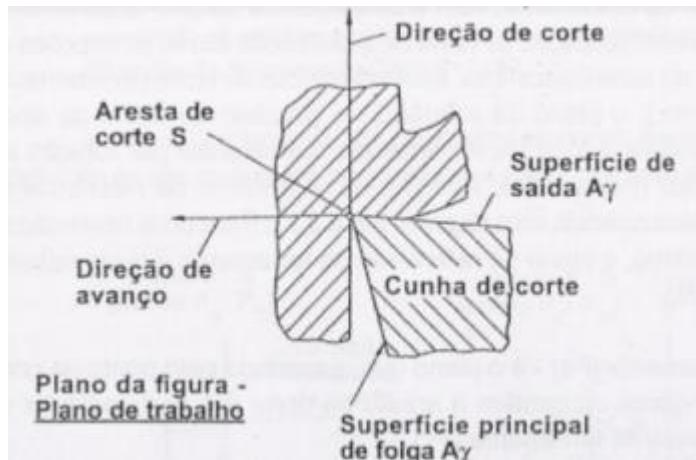


Figura 5: Esquematização da cunha de corte (DINIZ, 2005)

A ferramenta de corte pode ser feita de diversos materiais, sendo que cada um possui vantagens e desvantagens em situações específicas. Uma das principais classes de materiais usada é a dos aços ferramenta, que são aços com alta dureza e resistência à abrasão. Mais especificamente, como subconjunto dos aços ferramenta há os aços rápidos, que foram desenvolvidos para serem aplicados em cortes com altas velocidades. Esses aços contêm elementos de liga como tungstênio, vanádio, molibdênio e cobalto que fornecem alta dureza (na faixa de 60 HRC), em alguns casos mantendo esses valores elevados em temperaturas de até 600°C (BAYERM A. M, 2005).

Um outro material comumente usado na composição de ferramentas de corte é composto por carbonetos, principalmente carboneto de tungstênio sinterizado, usando como ligante pequenas quantidades de metal cobalto, comumente chamado de “metal duro”. Fazendo uma comparação com os aços rápidos, ferramentas de metal duro possuem maior resistência à abrasão, temperaturas de uso mais elevadas e, geralmente, seu uso resulta em melhor qualidade superficial. Contudo, elas tendem a ser significativamente mais caras que ferramentas de aço rápido, além de mais frágeis, o que pode resultar em quebra de ferramenta mais frequente em certas aplicações.

Em vários casos, ao usinar uma peça é necessário a aplicação de fluido de corte. O fluido tem várias funções, como evitar o acúmulo de calor na peça, redução de atrito entre a peça e a ferramenta e auxílio na remoção de cavaco (YOUSSEF, 2008). Além das vantagens do ponto de vista tecnológico, o uso de fluidos de corte também proporciona menores gastos com ferramentas e energia, reduzindo o custo total da usinagem. A maioria

dos fluidos disponíveis no mercado são compostos por emulsões de óleo em água, porém em alguns casos específicos podem ser usados óleos insolúveis em água, jatos de ar comprimido ou até nitrogênio líquido.

Há uma série de critérios que um fluido deve seguir para poder ser usado em usinagem. Um dos fatores mais importantes é que o fluido não pode apresentar propriedades corrosivas à peça, à ferramenta ou ao maquinário, motivo pelo qual muitas misturas de óleo usadas como fluido de corte contêm antioxidantes como aditivo. O fluido também não pode agredir a saúde do operador, o que implica no uso de fluidos atóxicos, não inflamáveis e que não evaporam quando aquecidos à temperatura esperada, além disso devem ser resistentes à se degradarem ou fermentar biologicamente. Atendidos esses dois critérios básicos, outros fatores que são avaliados na escolha para a operação incluem a ausência da geração de espuma, o custo e a facilidade de descarte. Como os fluidos de corte tendem a ser altamente especializados, contendo emulsificantes, antioxidantes e agentes tensoativos, o descarte deles deve ser feito da maneira correta para não agredir o meio ambiente. Os gastos relacionados a fluidos de corte, incluindo sua compra, uso e descarte, podem chegar a até 15% do custo total da usinagem em alguns casos (YOUSSEF, 2008).

O trabalho desenvolvido focará principalmente em operações de torneamento, mais especificamente em um torno horizontal, portanto é relevante fazer uma breve revisão bibliográfica sobre esse processo. De acordo com a norma DIN8589a, torneamento é definido como um processo de usinagem com uma aresta de corte geometricamente definida que contém um movimento de corte rotacional e um movimento de alimentação (ou avanço) transversal (KLOCKE, 2011). Primeiro, é necessário entender quais são os tipos diferentes de tornos e quais são suas aplicações. Entre os diferentes tornos alguns que se destacam são:

- Tornos horizontais universais: usados para trabalho na horizontal de diversos tipos de materiais com uma variedade ampla de ferramentas. Pode ser usado em uma ampla faixa de espessuras e comprimentos de peças.
- Tornos verticais: São tornos com árvore posicionada na vertical, sendo ideais para usinagem de componentes pesados ou com diâmetro elevado.

- Tornos revólver: São tornos que permitem a montagem de mais de um tipo de ferramenta de trabalho ao mesmo tempo, permitindo que a peça seja trabalhada sem longos intervalos para troca de ferramenta, o que garante maior produtividade.
- Tornos CNC: São tornos cujo funcionamento é feito por Comando Numérico Computadorizado (CNC). Por ser um processo automatizado, o uso desses tornos tende a garantir maior produtividade e melhor acabamento.

Para detalhar o funcionamento dos tornos horizontais, primeiro é necessário explicar quais são os principais componentes deles e como são operados. Alguns dos principais componentes de um torno horizontal estão ilustrados na Figura 6. Tipicamente, um torno é composto por uma placa giratória na qual a peça é fixada e uma base que contém um aparelho no qual é fixado uma ferramenta que pode se movimentar na direção do eixo principal da peça, podendo assim entrar em contato com a peça e remover material.

A placa giratória está localizada em um cabeçote fixo, que pode ser encontrado acima de uma caixa de engrenagens. Essa caixa contém um sistema de transformação de energia em movimento, que será transmitido para a placa. As configurações de como será feita essa transmissão são reguladas através de um sistema de controle localizado no cabeçote fixo, a partir do qual é possível ajustar parâmetros como a velocidade de rotação.

A ferramenta de corte é fixada em uma torre porta-ferramentas, que é localizada no carro principal. Esse carro principal, que é localizado no barramento do torno, possui um carro longitudinal e um transversal nele, sendo que todos eles são responsáveis pela alteração de aspectos do corte feito, como ângulo de contato e profundidade do corte. O carro principal controla a velocidade de avanço da ferramenta de corte, que pode ser feito de maneira manual ou automática dependendo do torno e das configurações de corte.

Um outro componente relevante do torno é o cabeçote móvel, localizado no fim do barramento. Em operações de furação ele é usado para fixação da ferramenta e pode ser movimentado ao longo do barramento, resultando no avanço da furação. Entre os outros acessórios que podem ser fixados no cabeçote móvel um que se destaca é a luneta, componente usado para prender peças e reduzir os efeitos de vibração e flexão no corte. Seu uso é recomendado em casos que a peça possui uma baixa razão de diâmetro/comprimento.

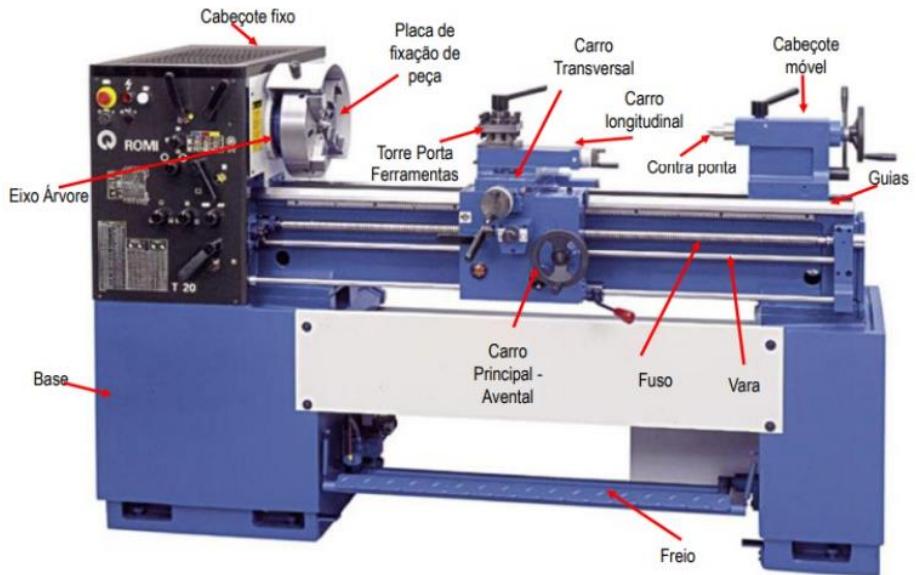


Figura 6: Exemplo de um trono horizontal, com os componentes destacados (RLM Máquinas e Equipamentos, 2020)

A partir de um torno universal podem ser feitas diversas operações de usinagem. Uma das possíveis maneiras de categorizar essas operações é com relação à forma da superfície produzida na peça após a usinagem. Os principais exemplos dessas categorias estão descritos a seguir, com imagens que as ilustram (KLOCKE, 2011).

- Torneamento cilíndrico: A peça produzida por essa operação terá uma superfície cilíndrica no mesmo eixo ao de rotação da peça, como ilustrado na Figura 7. Além de dar forma final a um componente, ela também pode ser usada para fazer acabamentos superficiais, como remoção de camadas de óxido e redução de rugosidade superficial.

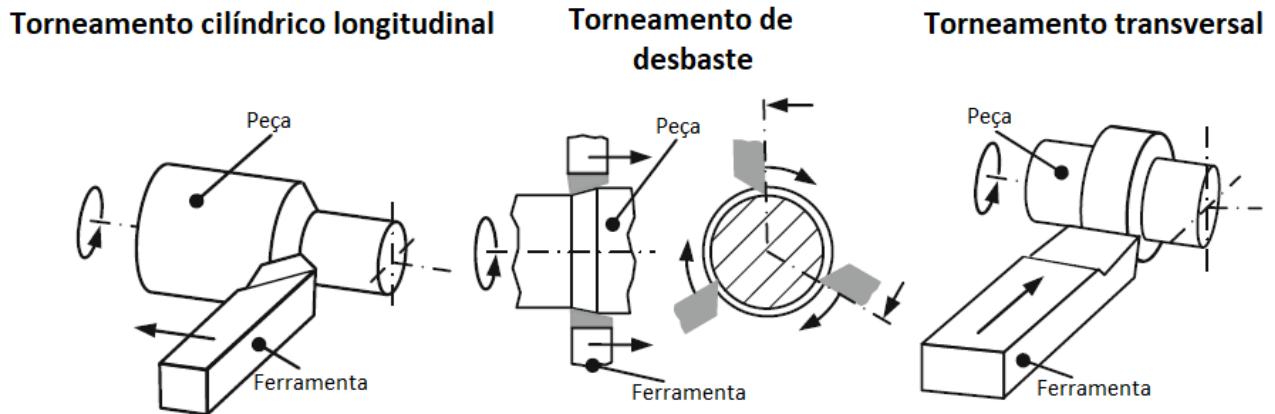


Figura 7: Operações de torneamento cilíndrico (KLOCKE, 2011).

- **Faceamento:** Através desse método, a peça produzida terá uma superfície uniforme perpendicular ao eixo de rotação. Essa superfície pode ser formada através de desgaste uniforme com a ferramenta movendo em direção ao centro de uma peça macia ou com movimento na direção do eixo principal em uma peça oca, conforme ilustrado na Figura 8.

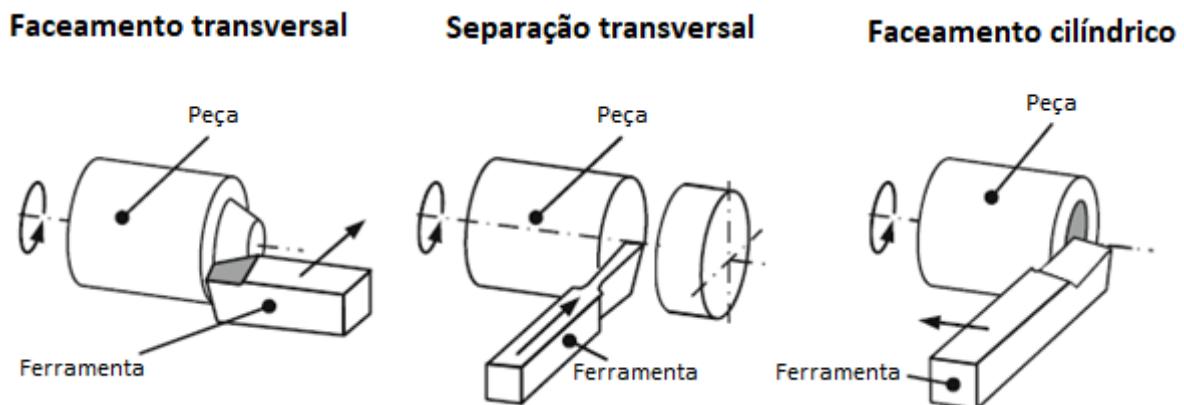


Figura 8: Operações de faceamento (KLOCKE, 2011)

- **Furação:** Esta técnica permite fazer furos de centro em uma peça, podendo ser passantes ou não. Para fazer furos, uma broca é fixada no cabeçote móvel e ele é movido ao longo do barramento até encontrar a peça, conforme ilustrado na Figura 9. Nessa operação pode ser necessário retirar a broca do furo formado em intervalos regulares para evitar o acúmulo de cavacos.

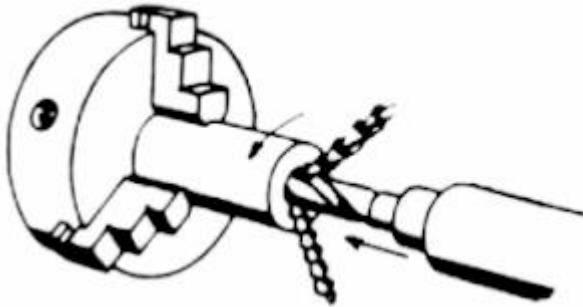


Figura 9: Furação em um torno (RICARDO, 2014)

Assim como qualquer processo, também há uma série de parâmetros associados ao torneamento, alguns dos quais podem ser aplicados a outras formas de usinagem. Dentre esses, o principal é a velocidade de corte, que descreve a velocidade rotacional na qual a ferramenta ataca a peça. A Equação 1 descreve como a velocidade de corte pode ser obtida a partir do diâmetro da peça e a velocidade rotacional imposta pelo torno. Já a Figura 10 permite visualizar alguns dos parâmetros básicos de um torneamento.

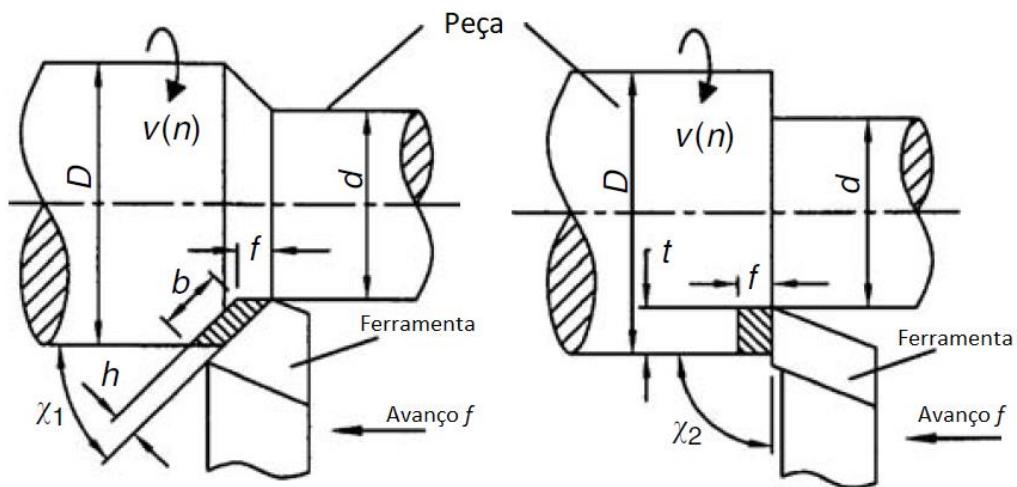


Figura 10: Ilustração dos principais parâmetros de torneamento (YOUSSEF, 2008)

$$v = \frac{\pi D n}{1000} \text{ m/min} \quad (1)$$

D = Diâmetro inicial da peça (mm)

n = Velocidade rotacional da peça (rpm)

Dependendo da ferramenta utilizada e do material usinado, há uma velocidade de corte ideal. Para novos materiais, essa velocidade precisa ser determinada através de uma série de experimentos, porém em materiais comumente utilizados na indústria esses valores podem ser encontrados em tabelas presentes em manuais técnicos ou guias. A Tabela 2, extraída de um informativo de uma empresa de usinagem, apresenta exemplos de velocidade de corte de materiais comumente usados em torneamento.

Tabela 2: Exemplos de velocidade de corte para torneamento. Valores em m/min (ACJ Usinagem Ltda.)

MATERIAIS	FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO			FERRAMENTAS DE METAL DURO	
	DESBASTE	ACABAMENTO	ROSCAR E RECARTILHAR	DESBASTE	ACABAMENTO
AÇO 1020	25	30	10	200	300
AÇO 1045	20	25	8	120	160
AÇO DURO (1060)	15	20	6	40	60
FERRO FUNDIDO MALEÁVEL	20	25	8	70	85
FERRO FUNDIDO GRIS	15	20	8	65	95
FERRO FUNDIDO DURO	10	15	6	30	50
BRONZE	30	40	10-25	300	380
LATÃO E COBRE	40	50	10-25	350	400
ALUMÍNIO	60	90	15-35	500	700

Como a velocidade de corte varia conforme o diâmetro da peça, a pessoa responsável pela usinagem deve regular a velocidade rotacional (comumente expressa em rpm) imposta pelo torno para se adequar ao material. Isso pode ser feito através de uma fórmula matemática simples ou do uso de tabelas de conversão.

Outros parâmetros relevantes à operação são o avanço e a profundidade de corte, que estão expressos na Figura 10 como f e t , respectivamente. O avanço é definido como distância que a ferramenta se movimenta no eixo principal da peça durante uma revolução, sendo assim relacionada diretamente ao movimento relativo de avanço descrito anteriormente. Já a profundidade de corte descreve a espessura da camada de material da peça que é retirada em cada passe de ferramenta. Além desses parâmetros, muitos autores consideram a área de um corte transversal do cavaco não deformado um parâmetro básico relevante e o escrevem como A_c (YOUSSEF, 2008). As equações 2 e 3 descrevem esses dois últimos parâmetros mencionados. Apesar de serem simples, todos esses parâmetros são relevantes para que um torneamento seja feito de maneira adequada.

$$t = \frac{D - d}{2} \text{ mm} \quad (2)$$

D = Diâmetro inicial da peça (mm)

d = Diâmetro final da peça (mm)

$$A_c = f \cdot t = h \cdot b \text{ mm}^2 \quad (3)$$

f = avanço por rotação (mm)

h = espessura do cavaco (mm), obtido pela expressão: $h = f \cdot \operatorname{sen}(\chi)$

b = comprimento do contato (mm)

χ = ângulo da cunha de corte

Em um caso industrial em que é necessário fazer a usinagem de várias peças, um valor relevante é o tempo médio de usinagem, escrito como T_c e geralmente expresso em min. Uma estimativa desse valor pode ser obtida usando parâmetros preestabelecidos e pode ser feita através da Equação 4. Lembrando que, para poder controlar uma operação em larga escala, é necessário considerar também o tempo de montagem da máquina para retirada da peça pronta e fixação de uma nova ainda não usinada (tempo de *setup*), porém esse valor varia conforme cada operação e não há uma expressão matemática para ele.

$$T_c = \frac{l_m}{f \cdot n} \text{ min} \quad (4)$$

l_m = Comprimento usinado (mm)

n = Velocidade angular da rotação (rpm)

Além dos parâmetros de corte mencionados, há um conjunto de forças e potências envolvidas na operação. O conhecimento e a avaliação desses valores são fundamentais para criar comparativos entre diferentes condições de torneamento por meio de estudos de usinabilidade, assunto que será discutido em detalhes no próximo tópico do trabalho. Primeiro é necessário explicar cada uma das forças, o que elas significam e quais alterações no processo podem resultar em variações de seus valores. Apesar da força de usinagem (escrita como F_u) descrever o conjunto de forças atuando no processo, geralmente ela é dividida em duas e são analisadas a componente dela que está projetada

sobre o plano de trabalho (força ativa, F_t) e a componente projetada perpendicular a esse plano (força passiva, F_p).

Por sua vez, a F_t é dividida em mais componentes, sendo cada uma delas a projeção da F_t em uma direção. A força de corte (F_c) define a projeção da força de usinagem F_u na direção do corte e é parcialmente determinada pela velocidade de corte. A força de avanço (F_f) é definida como a projeção de F_u na direção de avanço e a força de apoio (F_{ap}) é a projeção de F_u sobre a direção perpendicular à F_t , que está situada no plano de trabalho. Como em uma operação de torneamento o corte é feito na direção perpendicular à F_t situada no plano de trabalho (que é a definição de F_{ap}), pode-se afirmar que nesse caso há a relação $F_{ap} = F_c$ (DINIZ, 2005).

Por fim, há a força passiva (ou força de profundidade), escrita como F_p . Ela é descrita como a projeção de F_u sobre direção efetiva de corte, ou seja, na direção que percorre o comprimento da ferramenta de corte. Devido à sua natureza, ela não contribui para o valor da potência de corte. A Figura 11 contém uma ilustração que permite visualizar de maneira clara cada uma das componentes de força. As equações 5 a 7 mostram algumas das relações matemáticas que são usadas para obter algumas das forças.

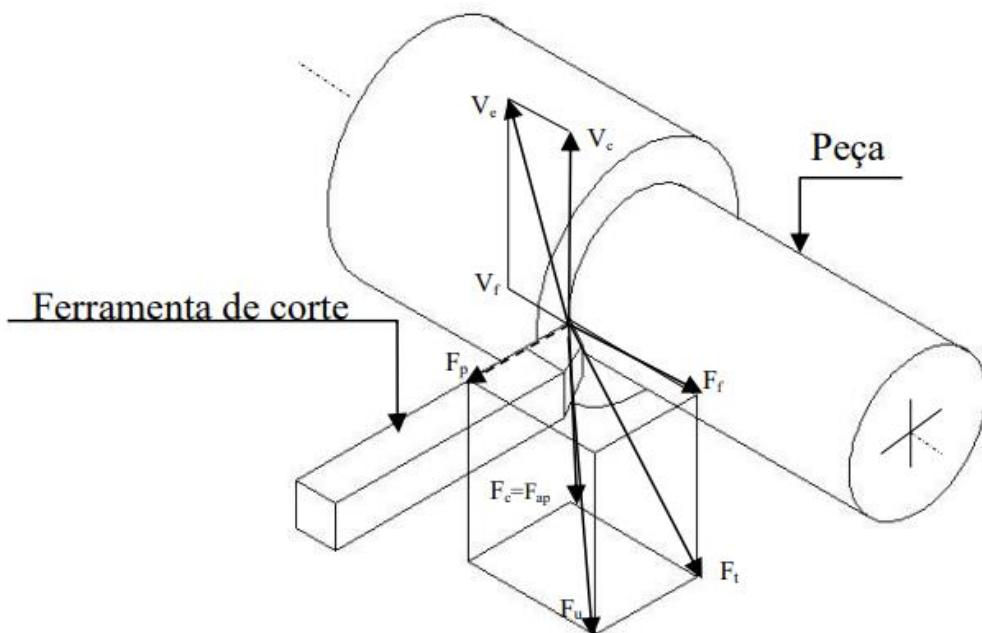


Figura 11: Ilustração das diferentes forças em um processo de usinagem (SILVA, 2014), adaptado de (DINIZ, 2005).

$$F_t = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2} \quad (5)$$

$$F_p = \sqrt{F_f^2 - F_t^2} \quad (6)$$

Substituindo o valor de F_t obtido na Equação 4 na Equação 6 e considerando que para torneamento, $F_{ap} = F_c$ pode ser encontrada a relação descrita na Equação (7).

$$F_p = \sqrt{F_u^2 - (F_c^2 + F_f^2)} \quad (7)$$

Os valores observados das forças de usinagem são afetados por diversos fatores. Entre eles, destacam-se o material da peça, a área da seção de corte, a ferramenta usada, a lubrificação e a velocidade de corte. A Figura 12 contém um conjunto de gráficos qualitativos ilustrando como alguns dos parâmetros de corte afetam as diferentes forças. Para obterem as medidas desses valores, são feitos ensaios de usinagem com um dinamômetro acoplado ao ferramental.

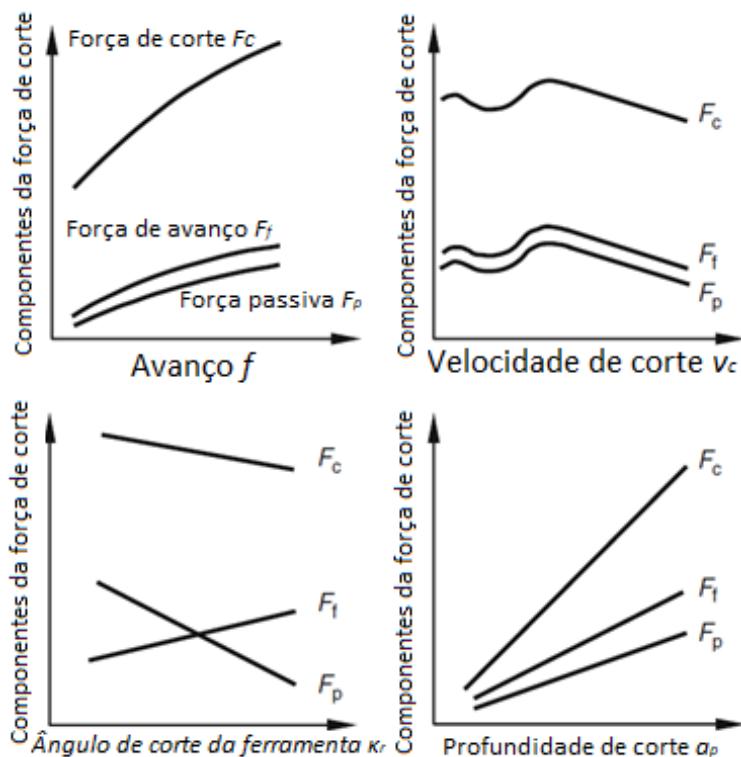


Figura 12: Gráficos qualitativos da variação das forças com os parâmetros de corte, adaptado de (KLOCKE, 2011).

2.3 Usinabilidade

O termo usinabilidade é usado para definir a facilidade que um material possui de ser processado por diferentes métodos de usinagem, como cortes, torneamento e fresamento. Porém, assim como os termos “estampabilidade” e “forjabilidade”, sua definição é extremamente ampla e pode se referir a vários aspectos diferentes do processo. Um fator que dificulta a definição de usinabilidade é o fato que ela pode ser avaliada através da análise de diferentes critérios, logo não há uma única medida que é amplamente aceita para fazer análises quantitativas de usinabilidade, embora algumas sejam mais utilizadas para fins comparativos. De todos os possíveis aspectos que podem ser usados para caracterizar a usinabilidade, os principais são:

- 1) Velocidade de corte recomendada.
- 2) Acabamento superficial atingível.
- 3) Força ou potência necessária para o corte.
- 4) Vida útil da ferramenta.

Uma parcela significativa dos estudos de usinabilidade feitos usam como referência a vida de ferramenta ou a análise das forças de corte em diferentes condições de usinagem. Na análise de forças, o apoio da ferramenta é acoplado a um dinamômetro e é analisada a variação das forças de corte ao longo do tempo em diferentes condições de usinagem, como em profundidades de corte diferentes ou uso de lubrificantes distintos. Existem várias maneiras de fazer ensaios de vida de ferramenta, porém um dos mais comuns consiste em analisar qual é o tipo de desgaste que está ocorrendo na ferramenta e fazer uma série de usinagens avaliando o avanço do desgaste em intervalos regulares. Nesse caso normalmente é estabelecido um critério de vida de ferramenta, que é um valor de desgaste acima do qual é recomendado fazer a troca da ferramenta. Nesses casos, o avanço do desgaste é normalmente escrito como V_b e expressado em μm .

O método de avaliação das forças ou esforços de corte é amplamente usado para fazer análises comparativas de usinabilidade. Nessas análises, as comparações costumam ser feitas com materiais semelhantes ou o mesmo material em diferentes condições, variando aspectos como tratamento térmico e parâmetros de corte. Os resultados gerados possuem

formas semelhantes ao gráfico ilustrado na Figura 13, que contém as principais forças avaliadas em uma operação de torneamento.

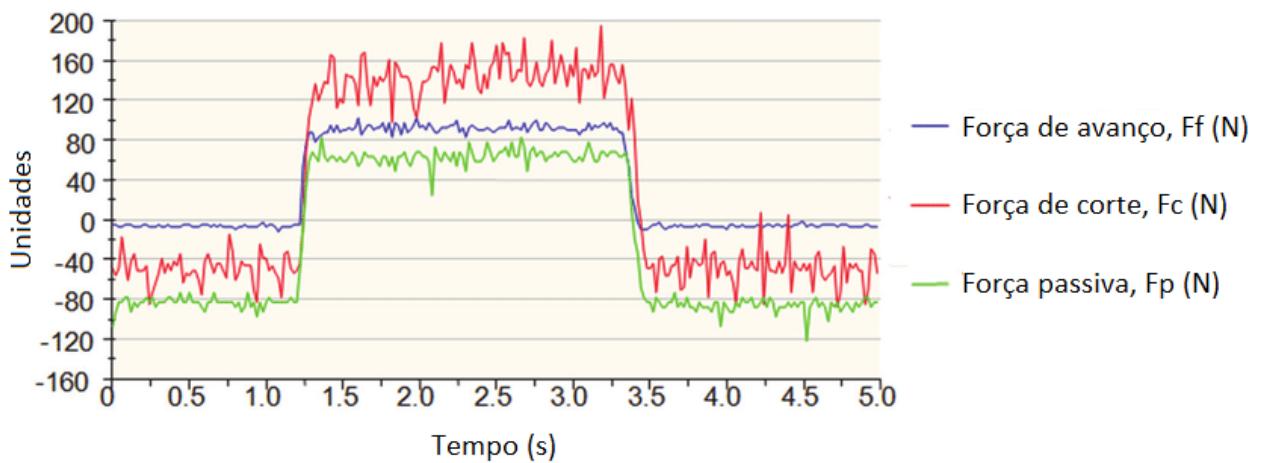


Figura 13: Exemplo de gráfico gerado pela medição de forças de corte em torneamento (FOUNTAS, 2019).

Análises de esforços de usinagem são feitas através do acoplamento da ferramenta de corte a um dinamômetro, que captura sinais eletrônicos durante o corte e os converte em leituras de esforços mecânicos, como forças e momentos. Os sinais capturados pelo dinamômetro são levados a um amplificador de sinais, que é ligado a um sistema de aquisição de dados. Com todo esse conjunto ligado a uma interface visual, como um computador com um software adequado, é possível gerar gráficos como o da Figura 13 em poucos segundos. A Figura 14 contém um diagrama ilustrando o conjunto de equipamentos usados para fazer leituras de esforços de usinagem em uma operação de torneamento.

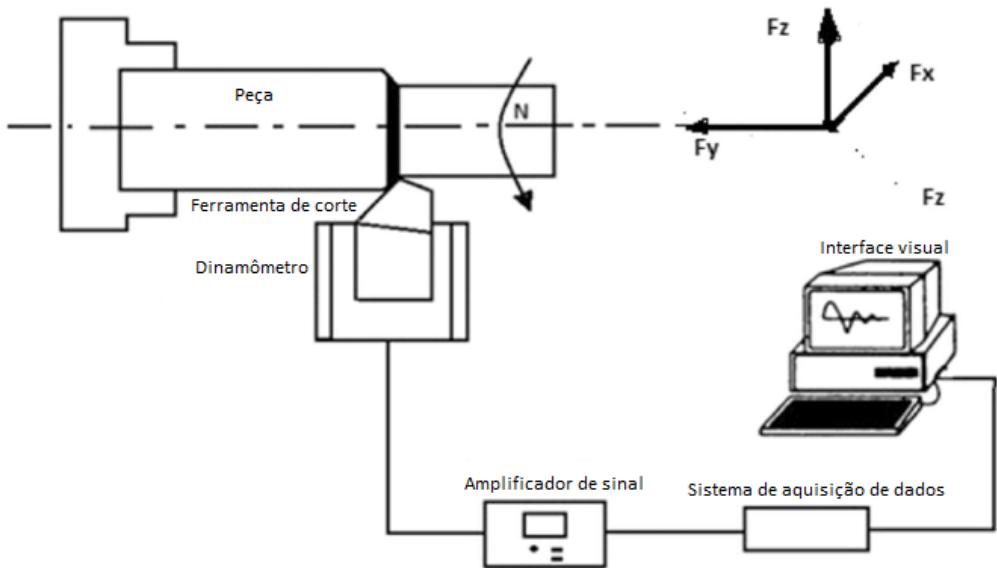


Figura 14: Diagrama esquemático do sistema de um dinamômetro medidor de forças de corte em torneamento (KUMAR, 2019)

Comumente pode ser encontrado na indústria o raciocínio equivocado que a usinabilidade está ligada apenas à resistência mecânica do material e à dureza. A Figura 15 contém um diagrama que permite visualizar como algumas propriedades do material podem prejudicar a sua usinabilidade. Além dos mostrados na figura, há uma série de outros fatores que influenciam essa medida, como:

- 1) **Composição química:** Além da composição química de materiais levar a diferenças em suas propriedades de maneira geral, a adição de elementos específicos na composição de certas ligas pode levar a alterações na usinabilidade. No caso de aços, alguns desses elementos são chumbo, enxofre e bismuto (Europa Patente N° EP1565587, 2002).
- 2) **Microestrutura:** Microestruturas diferentes tendem a possuir propriedades distintas, entre elas a dureza e ductilidade. Microestruturas dúcteis e de baixa dureza como ferrita tendem a aumentar a vida útil da ferramenta, porém com perdas na qualidade superficial. Já no caso de uma microestrutura com maior dureza como perlita o contrário pode ocorrer.
- 3) **Propriedades físicas:** Condutividade térmica e outras propriedades estão ligadas à dissipação de calor do material, algo que pode afetar a vida útil da ferramenta.
- 4) **Propriedades mecânicas:** Materiais duros e frágeis tendem a ter baixa usinabilidade, enquanto materiais dúcteis costumam ser mais fáceis de usinar, embora possam resultar em qualidade superficial pior. Já um material com alta resistência ao

cisalhamento possui maior resistência à formação de cavaco, o que implica em pior usinabilidade.

- 5) **Condições de usinagem:** Parâmetros da operação específica de usinagem como velocidade de corte, profundidade do corte e lubrificação afetam diretamente a facilidade com a qual o material é usinado. Por esse motivo, esses parâmetros precisam estar claramente especificados ao realizar ensaios de usinabilidade (JOSHI, 2007).

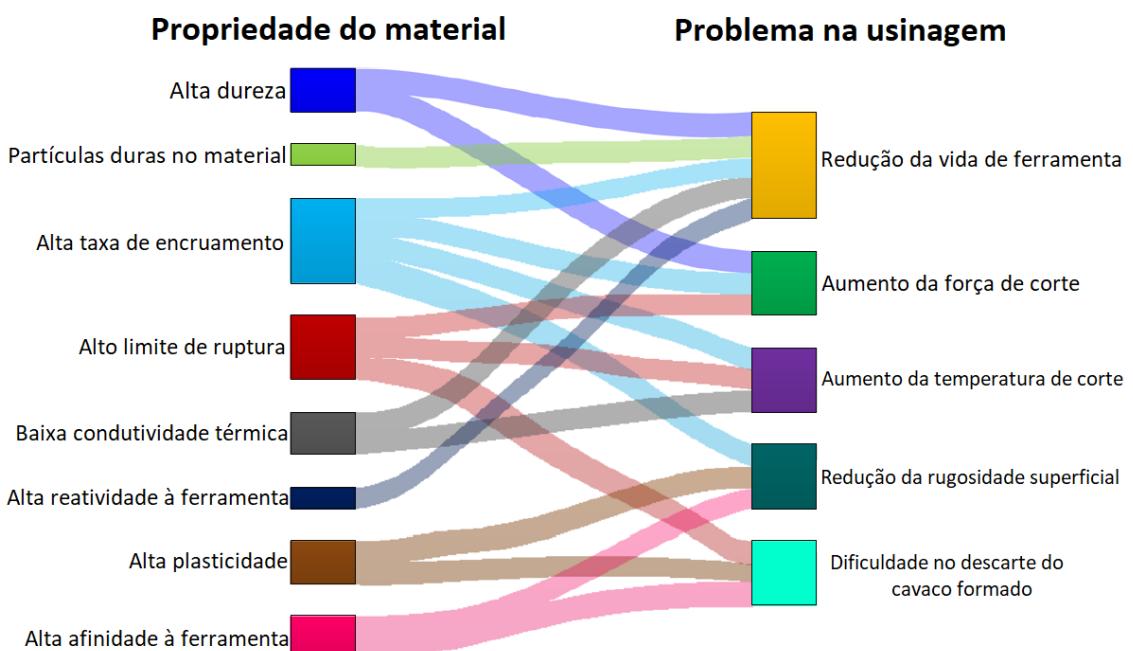


Figura 15: Diagrama ilustrando como propriedades do material podem prejudicar a usinabilidade, adaptado de (YIN, 2020)

Outro ponto importante a ser discutido é o fato que não pode ser definido um valor de usinabilidade para uma liga ou composição química específica. Há fatores relacionados ao processamento desse material que afetam a usinabilidade, como tratamentos térmicos e encruamento. Portanto, embora dois materiais tenham composições químicas iguais é possível que a usinabilidade deles seja diferente.

Uma estratégia amplamente usada na indústria para facilitar a fabricação de componentes que requerem alta resistência mecânica é a aplicação de tratamentos térmicos antes e depois da etapa da usinagem. Os tratamentos feitos antes da usinagem costumam ser aplicados após processos em que há deformação plástica significativa, como laminação e trefilação e possuem a função de diminuir a dureza do material e restaurar sua

ductilidade, facilitando a usinagem. Após a usinagem ser feita para dar a forma final desejada ao produto, pode-se fazer um tratamento térmico para aumentar a resistência ao desgaste e a resistência mecânica do material, como uma têmpera e revenimento. Isso permite a produção de um componente com as propriedades mecânicas adequadas para o projeto com menores gastos envolvidos com a etapa de usinagem.

Na avaliação da usinabilidade de aços, a questão da microestrutura tem um impacto significativo. Existem diversos estudos desenvolvidos para a maioria das possíveis microestruturas que buscam explicar como elas tendem a afetar a usinabilidade, porém uma dificuldade imposta na usinagem de aços é que raramente o material de interesse será constituído por apenas um tipo de microestrutura. Em muitas aplicações, a seleção dos materiais para a aplicação é feita de maneira a escolher um aço com um tipo de microestrutura prevalente devido às suas propriedades, porém a presença de fases secundárias costuma ser inevitável. A Tabela 3 contém um resumo das propriedades mecânicas dos principais componentes metalográficos encontrados em aços. De maneira geral, o teor de cada microconstituente da Tabela 3 tende a impactar a usinabilidade do metal conforme o diagrama da Figura 15.

Tabela 3: Propriedades mecânicas de microconstituíntes metalográficos, adaptado de (VIEREGGE, 1970)

	Dureza/HV 10	$R_m/(N/mm^2)$	$R_{p0,2}/(N/mm^2)$	Z/%
Ferrita	80–90	200–300	90–170	70–80
Cementita	>1100	–	–	–
Perlita	210	700	300–500	48
Austenita	180	530–750	300–400	50
Bainita	300–600	800–1100	–	–
Martensita	900	1380–3000	–	–

Uma empresa que realiza operações de usinagem em larga escala costuma ter parâmetros de operação bem definidos, que dependem do uso de metais em condições específicas. Alguns desses fatores preestabelecidos das ligas incluem composição química, frações de microconstituíntes e condições de tratamento térmico especificados. Como toda a infraestrutura da operação de usinagem foi desenvolvida baseada no uso de materiais nessas condições, a introdução de uma liga com microconstituíntes indesejados

pode impactar negativamente a usinagem, afetando toda a cadeia produtiva. Por exemplo, um lote de material com teor mais alto que o esperado de microconstituintes de elevada dureza pode reduzir o tempo de vida das ferramentas, tornando necessário paradas mais frequentes para manutenção.

Uma análise complementar que pode ser feita para avaliar a usinabilidade de metais está ligada à geometria dos cavacos formados, porque a partir dela podem ser inferidas algumas informações sobre a adequação dos parâmetros de usinagem. A geometrias dos cavacos é afetada por uma série de fatores, incluindo o atrito entre a ferramenta e o corpo, o ângulo da ferramenta, parâmetros de corte e propriedades do material. Cavacos compridos tendem a acumular em volta da ferramenta, dificultando sua remoção. Já cavacos helicoidais podem causar danos às ferramentas e ao torno, podendo levar a gastos excessivos com manutenção. Os cavacos descontínuos ou enrolados podem escapar do torno com maiores velocidades, representando um risco adicional aos operadores do torno (KLOCKE, 2011). A Figura 16 contém um breve resumo da adequação de cada geometria de cavaco.

Desfavorável	Favorável	Recomendado	Favorável
1	2	3	4
5	6	7	8
9	10		

Figura 16: Resumo da adequação de geometrias de cavaco no processo de usinagem.
Adaptado de (KLOCKE, 2011).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Material ensaiado

Para aquisição do material, foi necessário que ele fosse encomendado em dimensões que se adequariam tanto à etapa de tratamento térmico quanto aos ensaios de usinabilidade. Considerando que quanto menor for o diâmetro mais efetivo será o tratamento térmico, foram adquiridas 6 unidades de barras redondas laminadas de aço SAE 4140 com 2 polegadas (50,80 mm) de diâmetro e 200 mm de comprimento, como ilustrado na Figura 17.



Figura 17: Tarugos recebidos para os ensaios.

Como o material fornecido não possuía furo de centro, algo necessário para garantir melhor encaixe à máquina-ferramenta e ensaios mais precisos com menor efeito de vibrações, foi incluída uma etapa adicional de confecção dos furos. Para isso, foi necessário fazer uma operação de faceamento nos tarugos e produzir um furo cônico em uma de suas bases.

O material recebido incluiu um certificado de composição química fornecido pelo próprio fabricante, cujo conteúdo pode ser encontrado na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química das amostras recebidas.

Porcentagem em massa											
C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Mo	Al	Ni	Ti	N
0,400	0,800	0,023	0,040	0,250	0,210	1,00	0,170	0,011	0,100	0,002	0,008

3.2 Método empregado

Para fins comparativos, foram realizados tratamentos térmicos em parte dos tarugos recebidos a fim de gerar diferentes microestruturas e por consequência, diferentes propriedades mecânicas de modo a permitir verificar a influência da microestrutura e propriedades na usinabilidade dos aços através da comparação dos resultados obtidos. Porém, para definir os parâmetros do tratamento térmico, foi necessário primeiro saber qual era a microestrutura do material na condição como recebida. Além disso, uma dificuldade de trabalhar a usinabilidade da condição recebida do material é não conhecer qual é sua microestrutura, visto que os parâmetros de usinagem recomendados costumam ser fortemente ligados à condição de tratamento térmico. Para isso, foram cortadas amostras a partir dos tarugos, que seriam usadas para as medições de microdureza e determinação da microestrutura predominante.

As amostras de material foram embutidas, lixadas, polidas e atacadas com uma solução de Nital 2%. Elas foram extraídas do material de maneira que fosse possível identificar facilmente qual é a região correspondente à superfície do tarugo e qual representa seu centro, conforme ilustrado na Figura 18. Isso possibilita avaliar a microestrutura do material com o auxílio de um microscópio óptico, obtendo imagens ao longo do raio do material com diferentes aumentos. Também foram feitas análises em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para identificar mais precisamente os microconstituintes presentes nas amostras. Após a análise da microestrutura, foram feitas medidas de microdureza do material ao longo do diâmetro do tarugo para determinar um perfil de microdureza, começando pelo seu raio. Os ensaios de microdureza Vickers foram feitos com 0,3 kgf de carga (equivalente a 2,94 N) mantida por 15 segundos com um espaçamento de aproximadamente 500 µm entre as medidas.

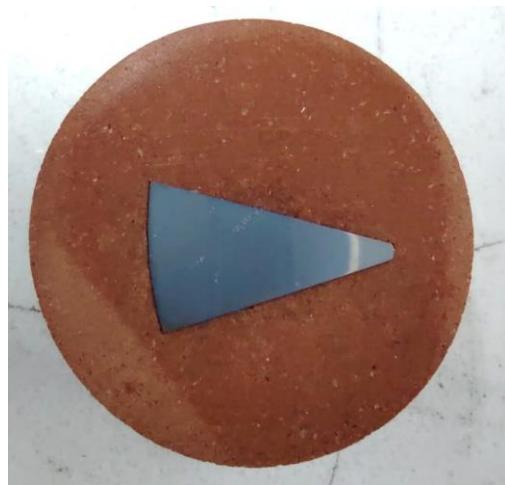


Figura 18: Amostra de 4140 na condição como recebida embutida. A partir da curvatura na parte esquerda da amostra é possível identificar a região da superfície do tarugo

Uma vez analisada a microestrutura e a microdureza do material na condição recebida, foi necessário escolher uma segunda condição de microestrutura a ser atingida com tratamentos térmicos de maneira que fosse possível desenvolver um estudo comparativo relevante. Buscando condições que levariam a um contraste significativo de resultados, foi estabelecido que seria feito um tratamento de normalização. Para obter os parâmetros necessários para o tratamento, foram consultadas diferentes fontes, incluindo fontes bibliográficas como o *ASM Handbook* e guias de tratamento térmico com teor prático. Dessa fonte, foi estabelecido que o tratamento pode ser feito através de uma austenitização a 870°C durante aproximadamente duas horas, seguido de resfriamento ao ar sem convecção forçada.

Para validar o valor da temperatura de austenitização encontrado, foi feita uma simulação usando o software Thermo-Calc para prever quais seriam as fases formadas no metal durante o aquecimento, usando como dados de entrada a composição química da Tabela 4. Pelo diagrama gerado, que está ilustrado na Figura 19, pode-se perceber que na temperatura de 870°C haverá transformação completa das fases para austenita, o que confirma que a temperatura encontrada na literatura está adequada.

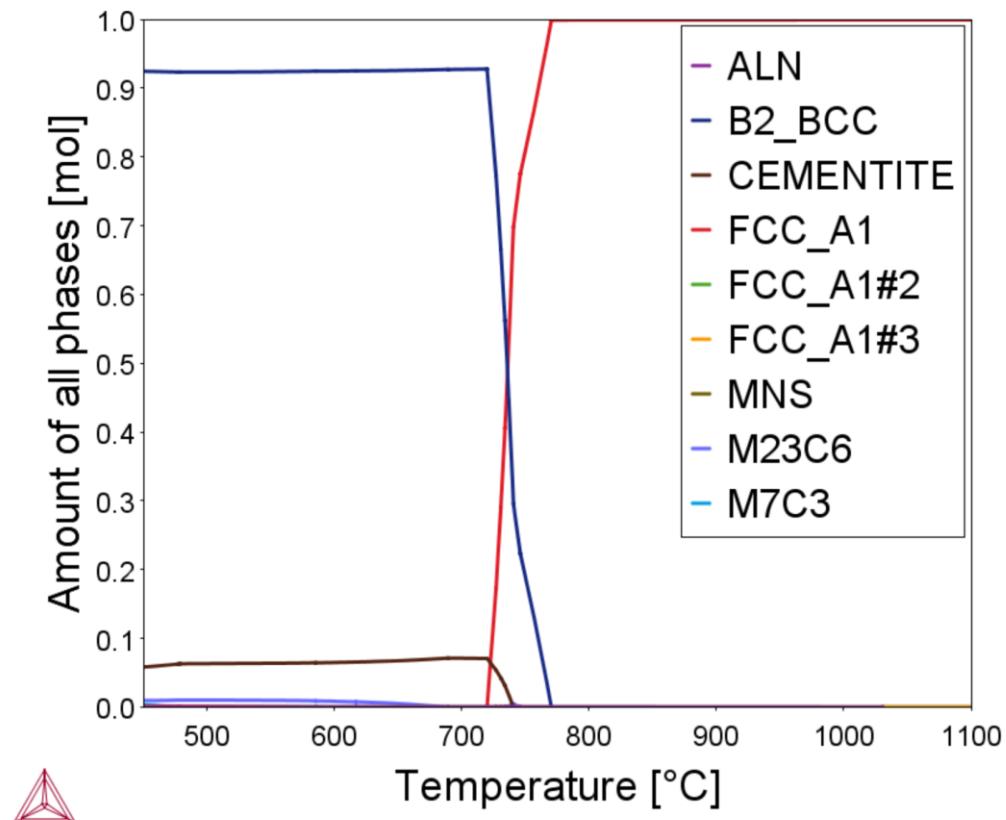


Figura 19: Simulação feita para determinar fases presentes no material.

Como tentativa de prever a microestrutura final dos tarugos após o tratamento, foi feita uma simulação usando o software Ac3. No *setup* das simulações, foi definida como composição química a presente na Tabela 4. O Ac3 é um software bastante limitado quanto à definição de parâmetros de tratamento térmico, tendo apenas a opção de simular têmpera e revenimento. Para simular o tratamento de normalização, foi definida uma “têmpera” com ar a 25°C após duas horas de austenitização a 870°C, seguindo de um “revenimento” a 25°C durante 6000 minutos. As imagens das telas de *setup* e dos resultados de microestrutura podem ser encontradas na Figura 20 e na Figura 21, respectivamente.

SELECT OPERATION										
HARD	STRUC	CCT	MATL	GEOM	AUST	QUENCH	TEMPER	PRES	DISK	EXIT
MATERIAL - CUSTOM									GEOMETRY	
BASE %C - 0.40									RULING SECTION (in) - 2.00	
%MN - 0.80									AUSTENITIZING	
%NI - 0.05									GRAIN SIZE - ASTM 7	
%CR - 1.00									TEMPERATURE - 870 C	
%MO - 0.20									TIME (MIN) - 120	
%SI - 0.25									QUENCH	
* %V - 0.05									QUENCHANT - AIR	
* %CU - 0.210									HT COEF. - 0.001	
* %AL - 0.011									TEMPERATURE - 25 C	
%P - 0.023									AGITATION (cm/s) - 0.00	
SURF %C - 0.40									FINAL AMBIENT - 25 C	
CASE (in) - 0.000									PRESENTATION	
HARD. TYPE - RC									TEMPER	
HARD. SCALE MAX - 70									TEMPERATURE - 25 C	
%C SCALE MAX - 1.50									TIME (MIN) - 6000	
TITLE - CARBURIZED CASE										

Figura 20: Setup da simulação no Ac3.

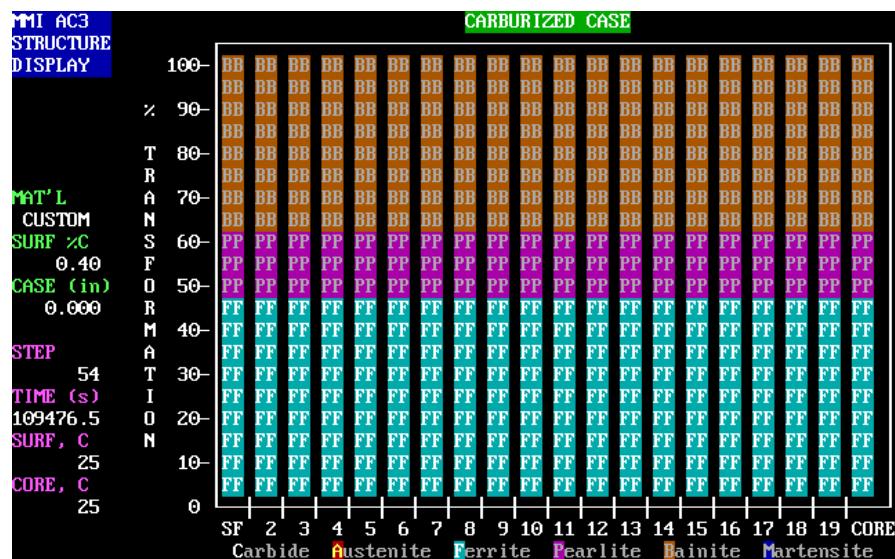


Figura 21: Resultados da simulação de microestrutura do Ac3.

Antes de inserir os tarugos no forno, eles foram enrolados em arame de aço zinkado, como pode ser visto na Figura 22. Isso foi feito para facilitar a retirada dos tarugos aquecidos e minimizar troca de calor com a pinça tenaz, o que poderia resultar em pequenas regiões com microestrutura diferentes e alterar os resultados dos ensaios de usinabilidade. Após serem retirados do forno, os tarugos foram apoiados em tijolos refratários para resfriarem ao ar. Para evitar eventuais efeitos de troca de calor diferenciada dos tijolos com os tarugos na leitura dos ensaios de usinabilidade, os corpos de prova foram

fabricados de uma maneira que a superfície que esteve em contato com os tijolos seria presa à placa do torno. Após o tratamento térmico foram retiradas novas amostras dos tarugos tratados e o mesmo procedimento de análise metalográfica e microdureza descrito anteriormente foi feito com elas.



Figura 22: Tarugos após retirados do forno.

Como o forno usado para os tratamentos não possui a opção de fazer os ensaios em vácuo ou atmosfera inerte, é esperado que seja formada uma camada descarbonetada próxima à superfície dos tarugos. Esse é um fator importante a ser considerado nos ensaios de usinabilidade do material, uma vez que a camada formada deverá ter propriedades mecânicas significativamente diferentes do resto do corpo de prova, possivelmente resultando em leituras de esforços de usinagem díspares durante os ensaios de usinabilidade. Como objeto de estudo, presença da camada descarbonetada é uma oportunidade de analisar o efeito de uma variação de microestrutura na usinabilidade de um material.

Sendo levantada a possibilidade de estudar o efeito da camada descarbonetada, foram fabricados dois tipos de corpos de prova: um com a camada externa do material presente e outro em que ela foi removida antes dos ensaios feitos em dinamômetro. Para os corpos sem a camada externa, eles foram fabricados a partir dos tarugos nas condições

recebida e tratada termicamente, de maneira a formar regiões de aproximadamente 19 mm separadas por vales com 5 mm de profundidade, algo que é feito para facilitar a análise dos dados obtidos nos ensaios. A Figura 23 contém a imagem de um dos corpos de prova fabricados. Além desses corpos de prova, também foram ensaiados tarugos apenas com uma base faceada e furada, possibilitando avaliar o efeito da camada descarbonetada nas forças de usinagem.

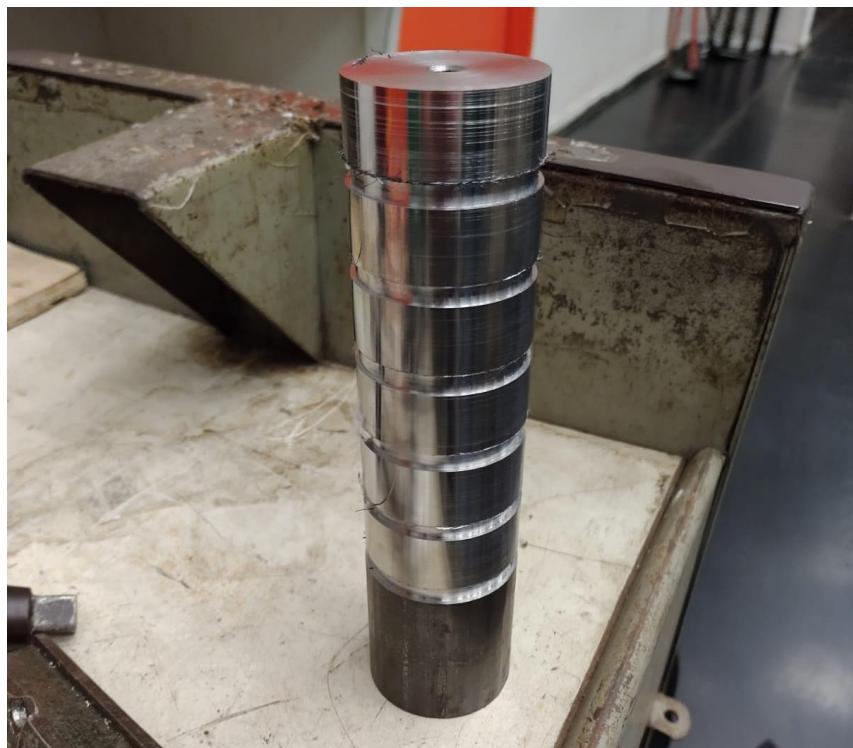


Figura 23: Corpo de prova fabricado para ensaio de usinabilidade.

No ensaio de usinabilidade, o tarugo foi encaixado em um torno universal cuja torre porta-ferramentas foi substituída por uma base fabricada para acoplamento no dinamômetro. A ferramenta de corte usada foi a Sandvik CNMG 12 04 08-PM 4025, fabricada em metal duro sem revestimento e com raio de corte igual a 0,4 mm. Ela foi posicionada em um suporte de ferramentas, que por sua vez foi fixado ao dinamômetro. O modelo de dinamômetro usado para avaliar os esforços de corte foi o Kistler Type 9441B, que é capaz de medir esforços de usinagem em três eixos com magnitude de até 15 kN. O amplificador de sinais usado foi o Kistler 5070, que foi conectado a um computador para gerar as curvas de forças. Uma imagem de todos os componentes montados pode ser encontrada na Figura 24. Para processar os dados e gerar os gráficos, foi usado o software

DynoWare da própria Kistler, que é adequado para medições de esforços de usinagem nos equipamentos usados.



Figura 24: Sistema de aquisição de dados preparado para os ensaios.

Quanto à definição dos parâmetros de corte, ela foi feita a partir das recomendações fornecidas pelo *ASM Handbook Volume 16: Machining* para o aço AISI 4140 na condição laminada e usando recomendações do fabricante da ferramenta de corte. Para avaliar diferentes condições, foram feitos ensaios em três profundidades de corte diferentes: 0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm, todos feitos na ausência de fluido de corte. O conjunto de parâmetros usados para os diferentes ensaios foi o mesmo, que pode ser encontrado na Tabela 5. Isso foi feito para possibilitar a comparação dos ensaios realizados em diferentes condições de microestrutura e profundidades de corte. Para obter certo nível de significância estatística, os ensaios nas amostras sem a camada descarbonetada foram feitos três vezes.

Tabela 5: Principais parâmetros de corte usados

	Valor	Unidade
Avanço	448	mm/min
Avanço por rotação	0,4	mm/rot
RPM	1120	rpm
Velocidade de corte	180	m/min

Uma vez feito cada ensaio em uma condição, o cavaco gerado por ele foi recolhido para análise e comparação posterior. A morfologia e cor dos cavacos podem trazer informações complementares aos gráficos de forças de usinagem gerados pelo dinamômetro, complementando a análise de usinabilidade. Em alguns casos específicos não foi possível recolher cavacos devido a seu tamanho ou seu modo de desprendimento.

Além das forças de corte e cavacos gerados, um outro critério para avaliação da usinabilidade de um material é o acabamento superficial após o processo. Buscando obter uma análise mais completa da usinabilidade, foi usado um perfilômetro óptico 3D, com o qual é possível obter uma análise da rugosidade de uma determinada área de superfície de uma peça. O ensaio do perfilômetro foi feito em um corpo de prova de cada condição de tratamento térmico após as operações de usinagem utilizando um perfilômetro Taylor-Hobson CCI, como mostrado na Figura 25. Como foram feitas várias operações de usinagem nos corpos de prova analisados, não foi possível fazer uma análise dos efeitos da camada descarbonetada na qualidade da superfície do produto, apenas foi possível comparar os aços nas duas condições de tratamento térmico após retirada significativa de material.

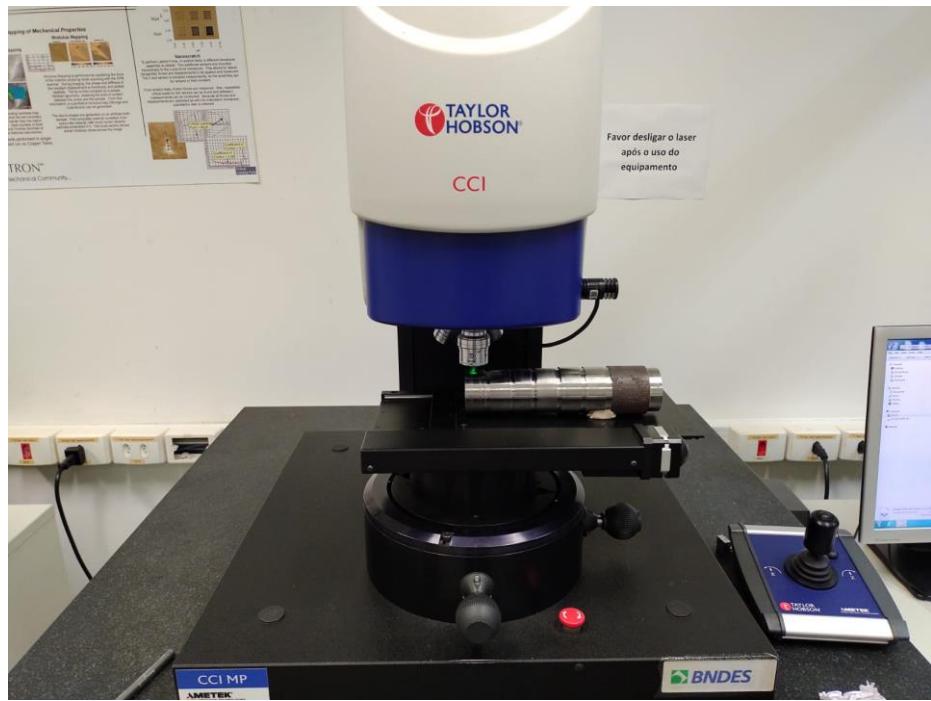


Figura 25: Perfilômetro utilizado em operação.

4 RESULTADOS

A partir dos ensaios descritos anteriormente, foram obtidos uma série de resultados que serão descritos a seguir. Eventuais hipóteses e discussões sobre os resultados serão discutidos no próximo item do Trabalho.

4.1 Análise metalográfica em microscópio óptico

Para avaliar a metalografia das amostras, foram capturadas imagens de microscópios ópticos em diferentes condições de aumento. Foram priorizadas imagens nas regiões correspondentes ao raio dos tarugos e à metade do raio, visto que é esperado que esta contenha uma microestrutura representativa da maior parte do material, enquanto aquela poderá ser diferente devido a efeitos como descarbonatação, possibilitando quantificar a espessura da camada descarbonetada.

4.1.1 Amostras na condição como recebida

A análise da microestrutura do material na condição como recebida revelou uma diferença significativa de microestrutura entre a superfície do tarugo e o resto de seu volume. Com a micrografia da Figura 26, que foi capturada da superfície do tarugo, é possível identificar nitidamente a camada de material que sofreu descarbonatação durante o processamento na condição como recebida, que pode ser vista como uma região com maior fração volumétrica de ferrita. Tal fato possibilita fazer estimativas da profundidade da camada descarbonetada. Pela micrografia, a região mais visivelmente descarbonetada aparenta ter cerca 300 µm, passando por uma região com teor menor de descarbonatação antes de passar para uma região com microestrutura igual à presente na metade do raio, como pode ser visto com maior clareza na Figura 27. É relevante notar o fato que na camada descarbonetada há essa região de transição, pois essa microestrutura variada ao longo da superfície possivelmente implicará em resultados diferentes durante a usinagem.

Contudo, com esse nível de aumento ainda não é possível fazer uma análise detalhada dos microconstituintes. Já com a Figura 28, pode-se concluir que a microestrutura da região próxima à superfície é predominantemente composta por ferrita, com o que aparenta ser alguns carbonetos esferoidizados nos contornos de grão.

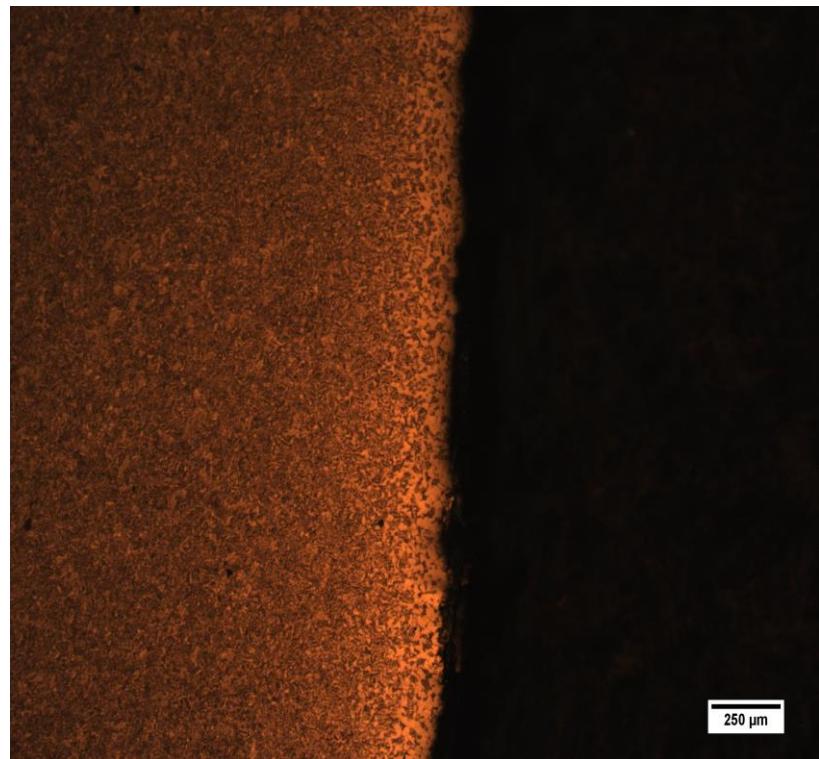


Figura 26: Micrografia ampliada em 50X da região da borda do aço 4140 como recebido.
Atacado com Nital 2%.

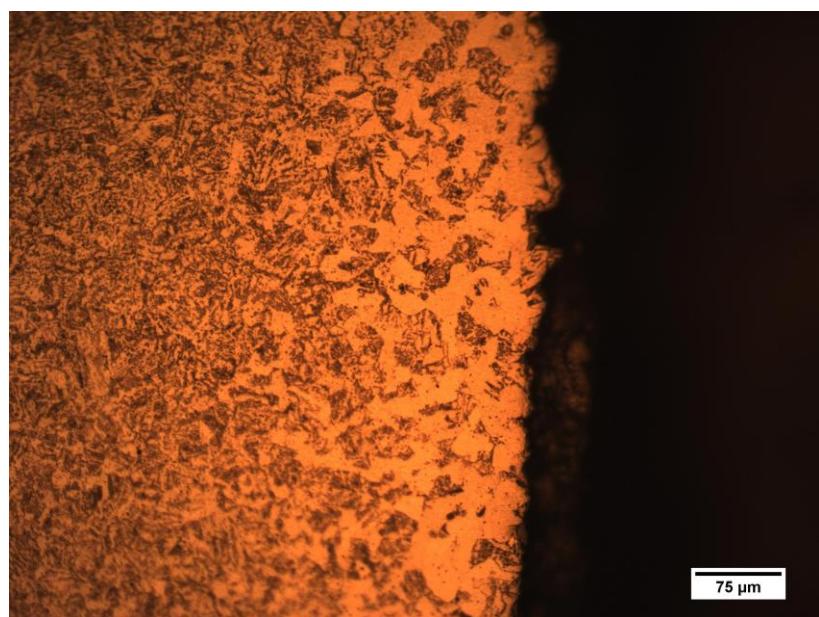


Figura 27: Micrografia ampliada em 200X da região da borda do aço 4140 como recebido.
Atacado com Nital 2%.

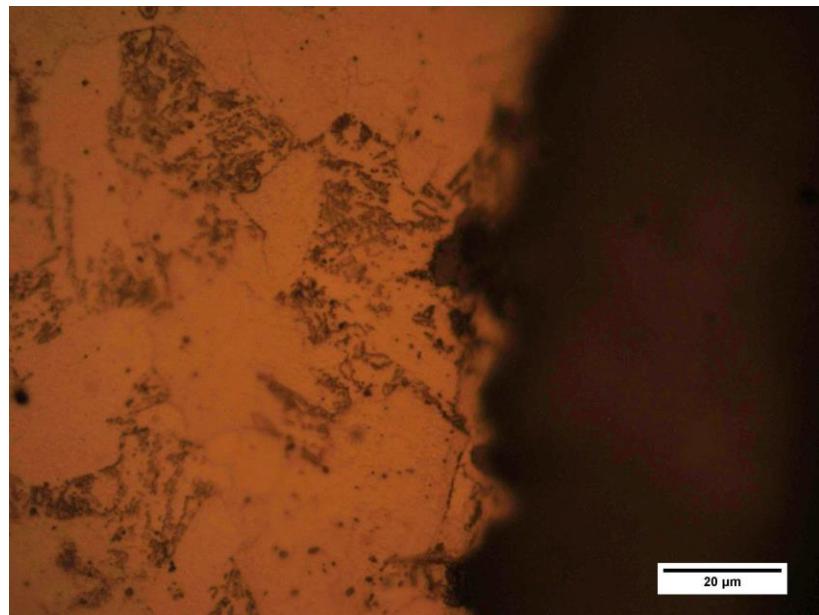


Figura 28: Micrografia ampliada em 1000X da região da borda do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.

Para fazer um comparativo com a microestrutura presente na superfície da amostra, foram capturadas imagens da região da amostra correspondente à metade do raio do tarugo. Com a Figura 30 é possível identificar quais são os principais microconstituintes presentes nesta região. Assim como na borda, percebe-se uma certa quantidade de carbonetos esferoidizados em uma matriz ferrítica. Também foi observado alta fração volumétrica de carbonetos nesta região da amostra, porém com esse aumento ainda não é possível identificar quais são esses microconstituintes.

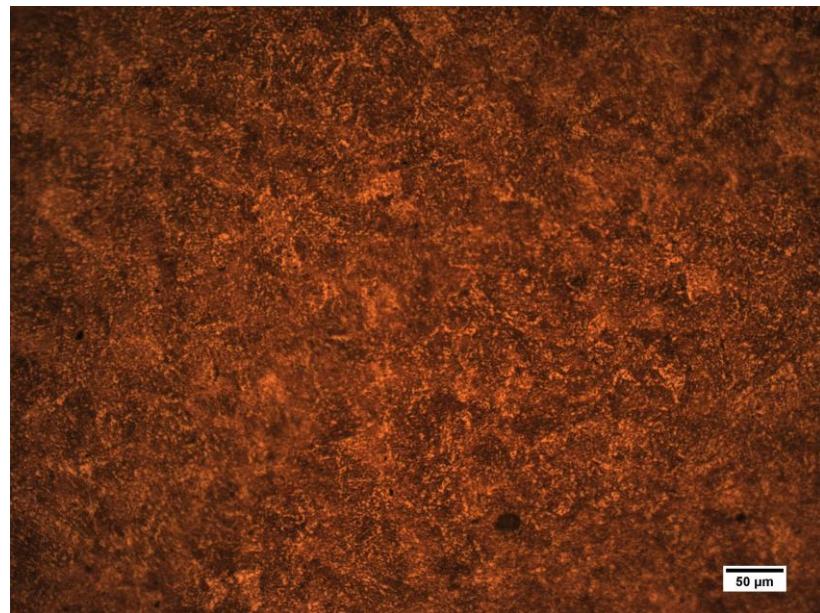


Figura 29: Micrografia ampliada em 200X da metade do raio do aço 4140 como recebido.
Atacado com Nital 2%.

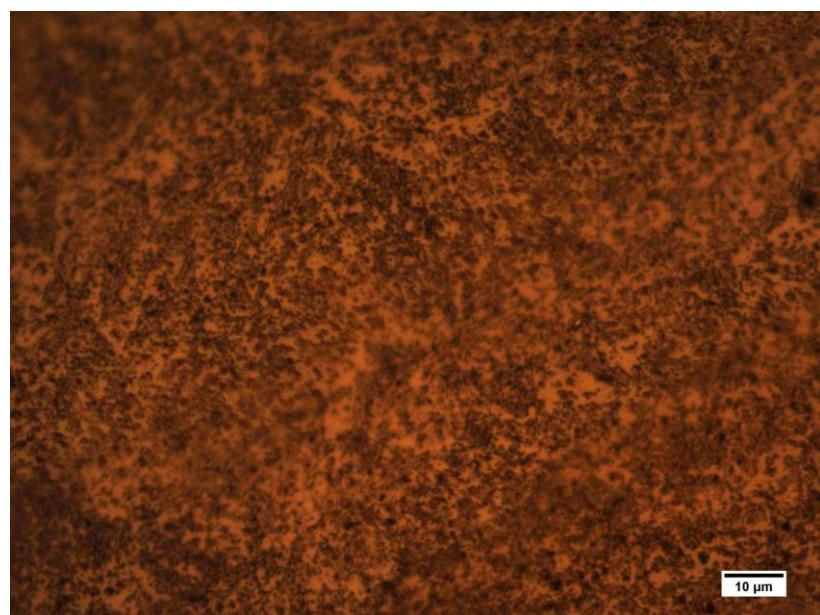


Figura 30: Micrografia ampliada em 1000X da metade do raio do aço 4140 como
recebido. Atacado com Nital 2%.

4.1.2 Amostras na condição normalizada

No material normalizado a identificação da camada descarbonetada na borda do tarugo foi menos evidente. Pela Figura 31, é possível concluir que a região mais notavelmente descarbonetada tem aproximadamente 400 µm, passando depois por uma região com teor menor de descarbonatação como no caso anterior. Apesar de ser possível identificar uma matriz ferrítica, com as micrografias obtidas com o microscópio óptico a identificação dos microconstituintes não foi possível, portanto eles serão confirmados posteriormente com a análise no MEV.

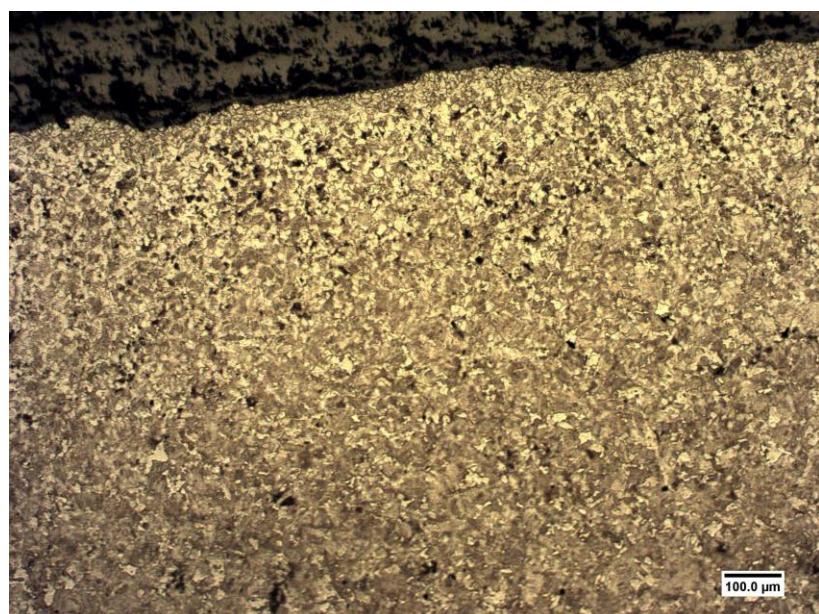


Figura 31: Micrografia ampliada em 100X da região da borda do aço 4140 normalizado.
Atacado com Nital 2%.

Assim como nas micrografias da borda, na metade do raio do tarugo também não foi possível fazer uma avaliação precisa de quais são os principais microconstituintes presentes, levando à necessidade de fazer a análise com o MEV.

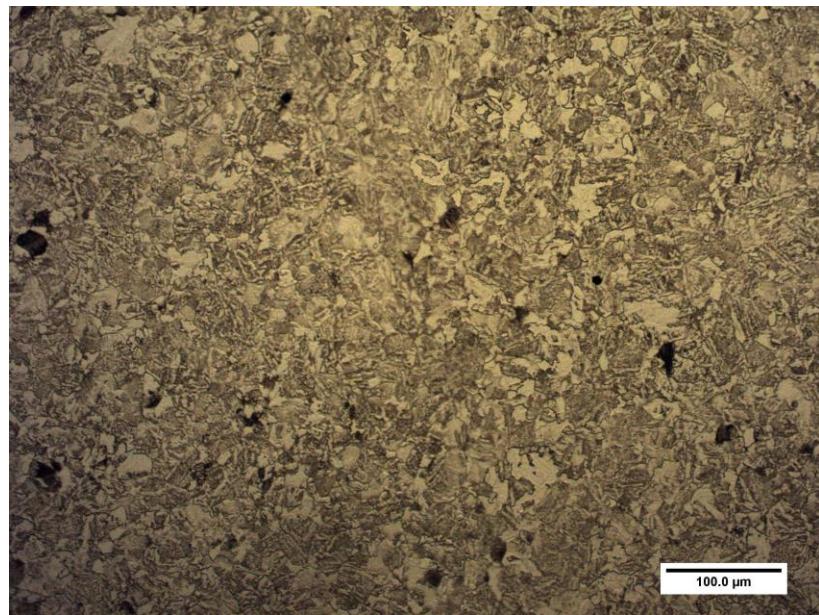


Figura 32: Micrografia ampliada em 200X da região da metade do raio do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.

4.2 Análise metalográfica em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Como citado anteriormente, a análise em MEV foi feita para identificar com maior clareza os microconstituintes presentes nas amostras, o que possibilitou relacionar a microestrutura do material com sua usinabilidade.

4.2.1 Amostras na condição como recebida

Com a análise no MEV, foi possível confirmar que a região da borda do tarugo contém algumas regiões com carboneto em uma matriz ferrítica, como pode ser observado na Figura 33. Na Figura 34 pode ser observada claramente uma versão ampliada de uma região contendo bainitas finas.

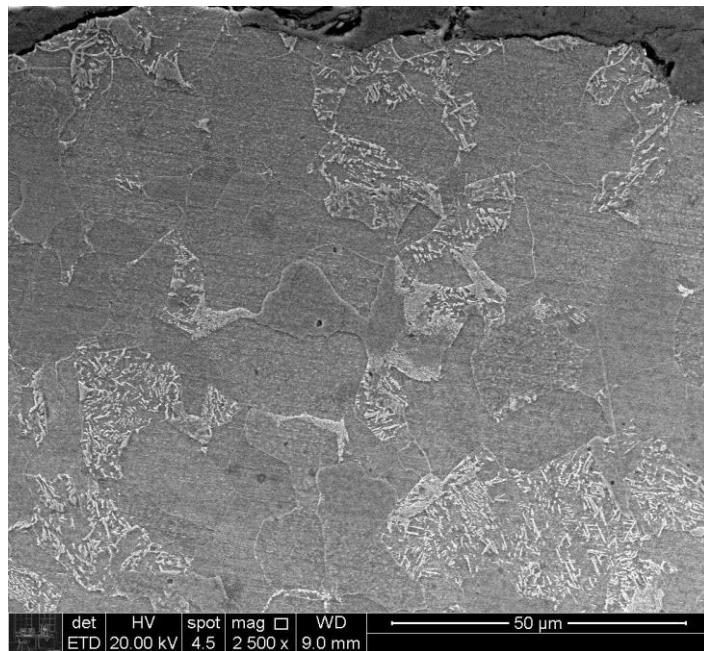


Figura 33: Imagem de MEV ampliada em 2.500X da região da borda do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.

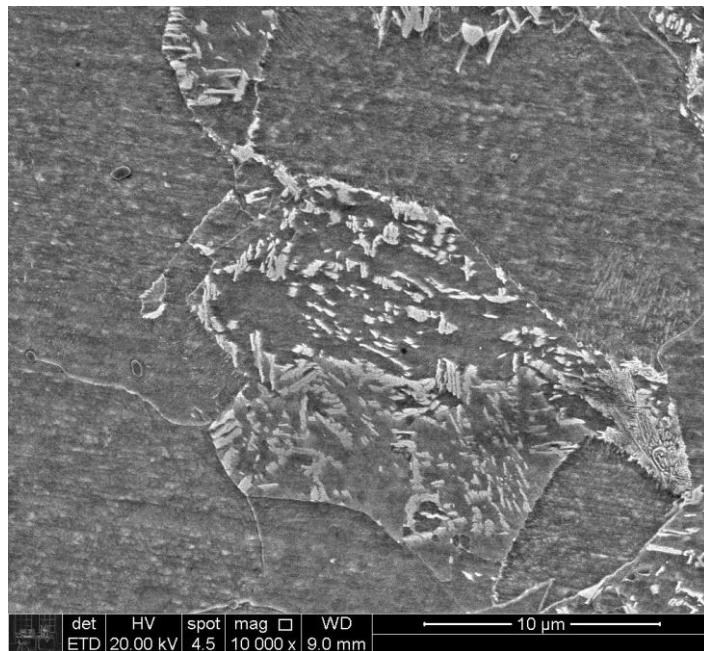


Figura 34: Imagem de MEV ampliada em 10.000X da região da borda do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.

Já na região da metade do raio, foi observada uma matriz ferrítica e uma concentração de carbonetos muito mais elevada que na região da borda. Uma análise da

Figura 36 leva à conclusão que os carbonetos presentes são principalmente formações de bainita, com algumas pequenas colônias de perlita.

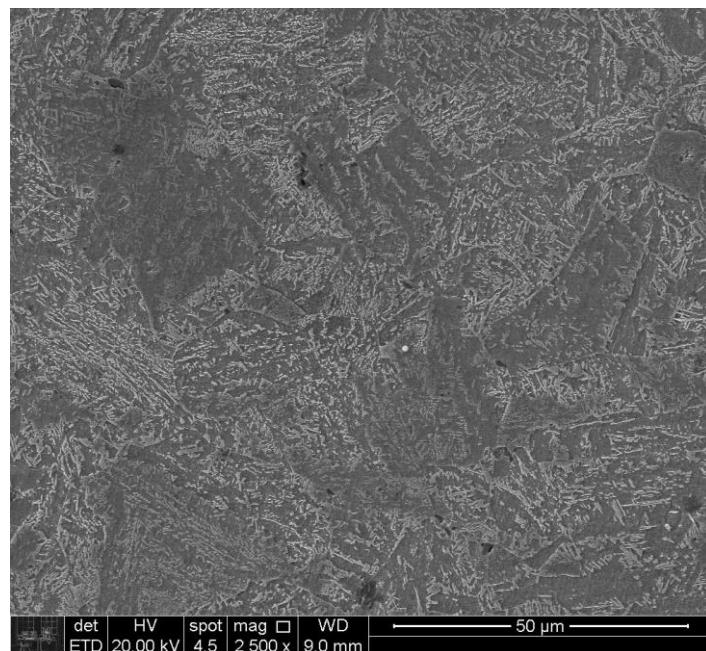


Figura 35: Imagem de MEV ampliada em 2.500X da região da metade do raio do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.

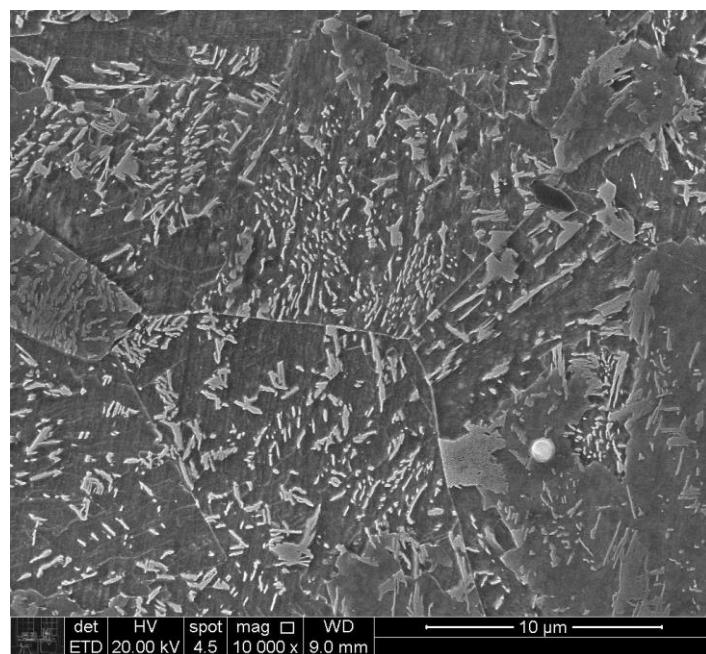


Figura 36: Imagem de MEV ampliada em 10.000X da região da metade do raio do aço 4140 como recebido. Atacado com Nital 2%.

4.2.2 Amostras na condição normalizada

Na região da borda das amostras normalizadas, foi observada uma microestrutura semelhante à da borda da amostra recebida, porém com um teor mais elevado de carbonetos, sendo eles uma mistura de bainita e perlita.

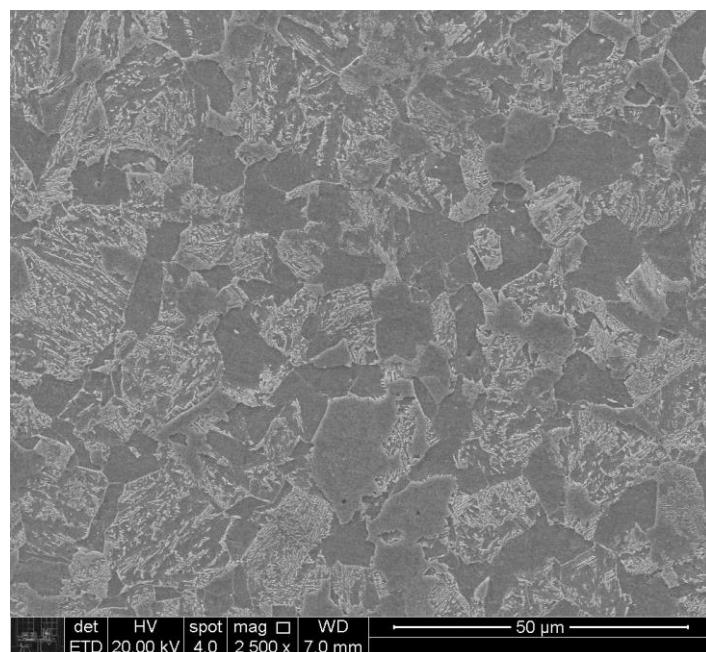


Figura 37: Imagem de MEV ampliada em 2.500X da região da borda do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.

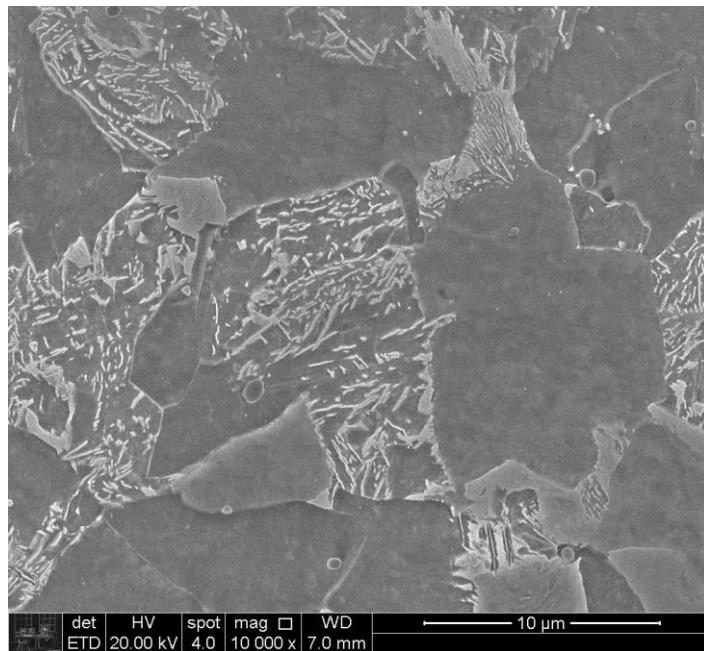


Figura 38: Imagem de MEV ampliada em 10.000X da região da borda do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.

Já na região da metade do raio, foi observado um teor ainda maior de perlita, como pode ser visto na Figura 39 e na Figura 40.

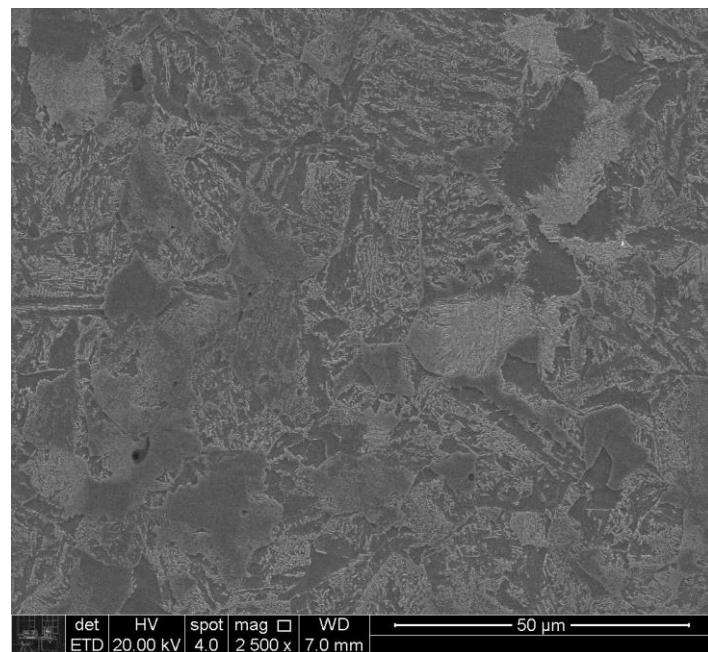


Figura 39: Imagem de MEV ampliada em 2.500X da região da metade do raio do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.

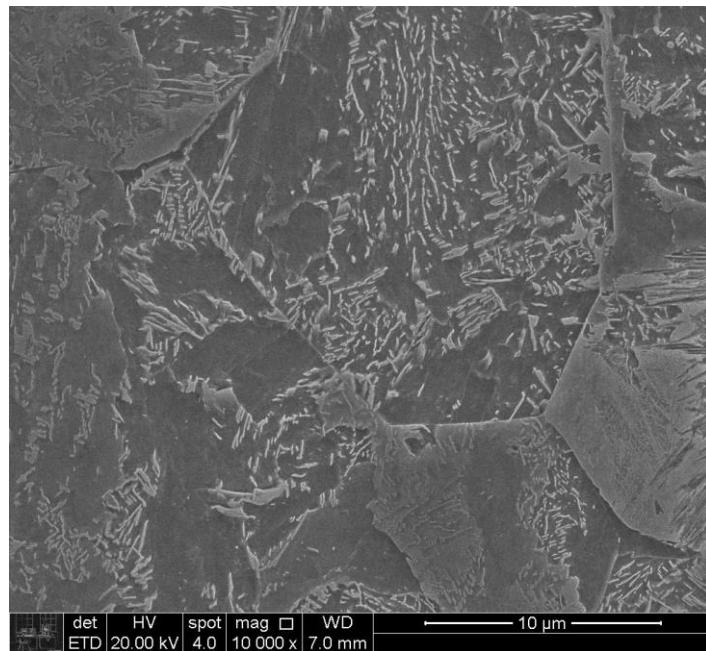


Figura 40: Imagem de MEV ampliada em 10.000X da região da metade do raio do aço 4140 normalizado. Atacado com Nital 2%.

4.3 Medidas de microdureza

Uma vez identificada a possibilidade de haver descarbonetação nas amostras, a importância da medida da microdureza se tornou mais evidente. A Tabela 6 contém as medidas obtidas, que foram feitas da superfície do tarugo em direção ao seu centro com um espaçamento de 500 μm entre as medidas. Para facilitar a interpretação dos dados da Tabela 6 foi plotado um gráfico com eles, que está disponível na Figura 41

Tabela 6: Medidas de microdureza Vickers com 0,3 kgf de carga.

Como recebido		Normalizado	
Nº ensaio	HV0,3	Nº ensaio	HV0,3
1	203	1	233
2	294	2	282
3	298	3	293
4	293	4	285
5	285	5	278
6	291	6	289
7	296	7	291
8	302	8	291
9	290	9	278
10	294	10	285
11	285	11	280
12	293	12	299
13	288	13	289
14	306	14	294
15	318	15	299
16	295	16	318
17	302	17	299
18	322	18	299
19	296	19	299
20	304	20	299
Média	292.75	Média	289
Desvio padrão	23.21	Desvio padrão	16.27

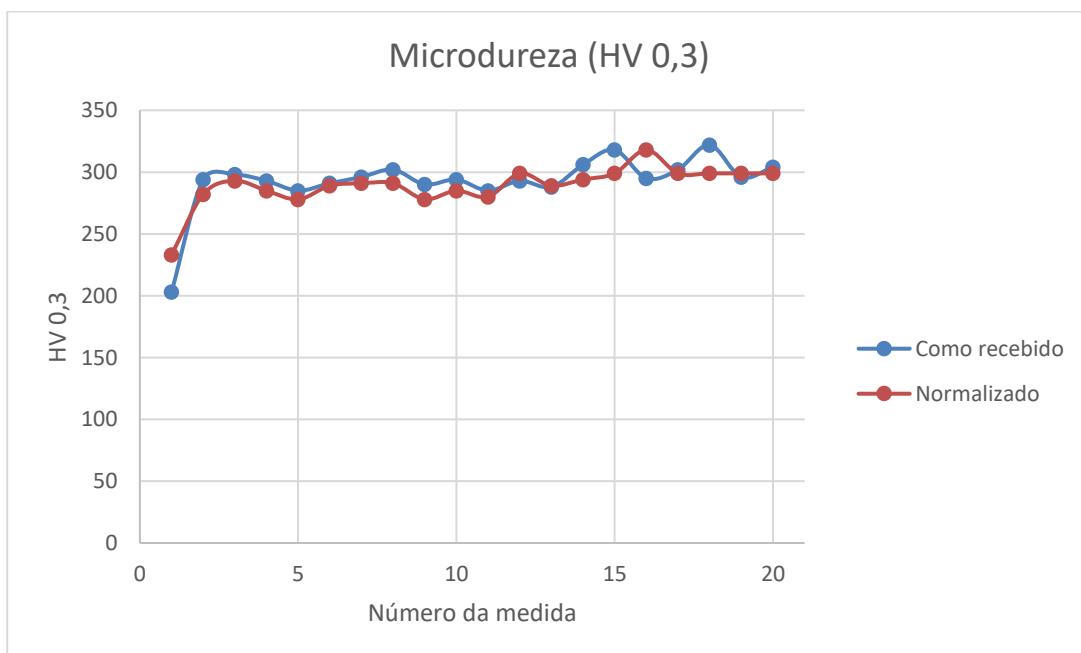


Figura 41: Ilustração gráfica das medidas de microdureza da Tabela 6.

O perfil de durezas da amostra recebida sugere que realmente há uma camada significativamente descarbonetada, porém sua extensão é bastante limitada, tendo profundidade menor que 500 µm nos dois casos de material analisado, fato que foi observado nas micrografias da região da borda. Para estabelecer que realmente houve diferença significativa da dureza da borda em relação ao resto do tarugo, foram feitas medidas de microdureza ao longo do comprimento na região da borda, cujos resultados foram disponibilizados na Tabela 7 e confirmam essa diferença.

Tabela 7: Medidas de microdureza Vickers da borda dos tarugos com 0,3 kgf de carga.

Somente borda Como recebido		Somente borda Normalizado	
Nº ensaio	HV0,3	Nº ensaio	HV0,3
1	254	1	246
2	213	2	234
3	205	3	241
4	205	4	241
5	201	5	240
Média	215.6	Média	240.4
Desv pad	21.90	Desv pad	4.28

4.4 Ensaios de usinabilidade

A partir dos ensaios de usinabilidade, foram gerados gráficos de três componentes de forças: X, Y e Z, que foram capturadas pelos canais 1, 3 e 5 respectivamente. De acordo com o diagrama da Figura 11 e os vetores ilustrados no próprio dinamômetro na Figura 42, as forças X, Y e Z correspondem a F_f , F_p e F_c , respectivamente. A partir dos gráficos gerados pelo DynoWare, é possível extrair dados estatísticos como valores máximo, mínimo e médio de cada esforço em intervalos definidos pelo usuário. Em todos os casos, nos intervalos definidos para análise a ferramenta de corte estava efetivamente em contato com a peça e realizando a usinagem. Uma observação que deve ser feita sobre os gráficos obtidos é o fato que, apesar dos resultados estarem escritos em Newtons, o dinamômetro estava configurado para mostrar resultados em $N \cdot 10^2$. Essa correção será feita no momento em que forem plotados os gráficos dos valores médios de forças observadas em cada caso.

As forças foram analisadas a três profundidades de corte diferentes (0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm), tanto em casos que havia sido retirada uma camada externa do material quanto

em casos que essa camada estava presente. Para estabelecer certa significância estatística, cada um dos ensaios com a camada removida foi feito três vezes. Isso não foi feito para os ensaios feitos na camada descarbonetada do material, visto que havia uma limitação na quantidade de material disponível para ensaio.



Figura 42: Imagem do dinamômetro usado contendo os vetores de cada componente de força analisada.

4.4.1 **Tendências observadas**

Nos gráficos gerados para as amostras na condição como recebida após retirada da camada descarbonetada os resultados obtidos se enquadram no que era esperado. As

forças foram bem definidas sem a presença de oscilações significativas em sua amplitude, como ilustrado na Figura 43.

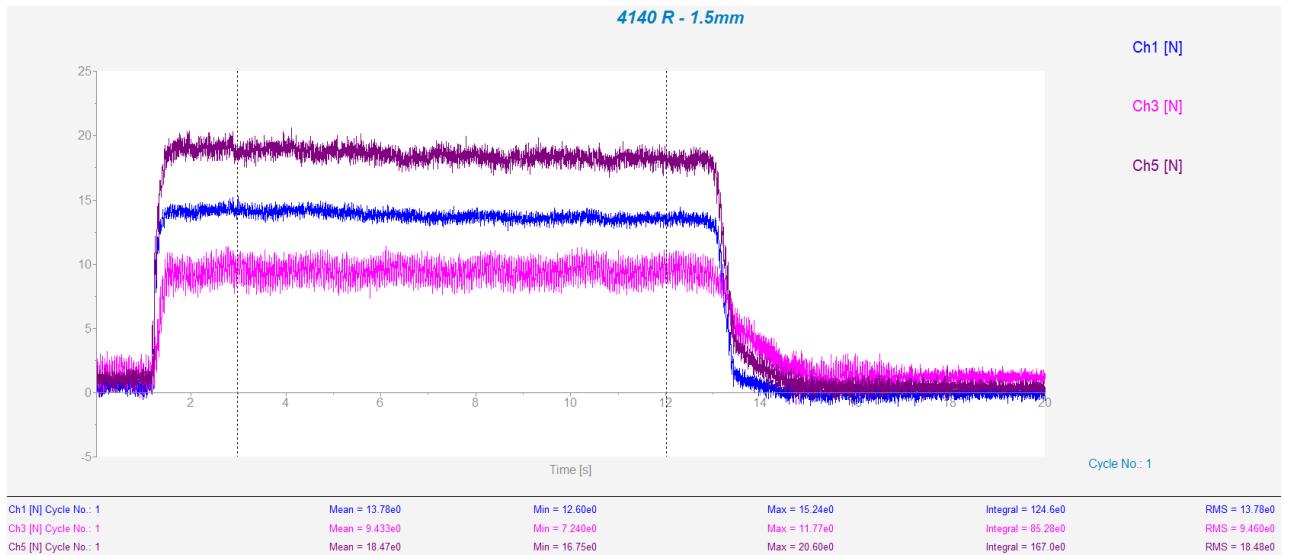


Figura 43: Forças de corte no aço 4140 recebido registradas para 1,5 mm de profundidade de corte após retirada da camada externa.

Já nos casos em que a camada descarbonetada foi analisada, percebeu-se amplitude significativa nas forças de corte, como mostrado na Figura 44. Tal efeito foi observado no material tanto na condição recebida quanto na condição normalizada.



Figura 44: Forças de corte no aço 4140 recebido registradas para 0,5 mm de profundidade de corte sem retirada da camada externa.

Outro padrão que se repetiu ao longo dos experimentos se refere aos ensaios feitos nos corpos de prova normalizados. Ao fazer as análises das forças de corte, foi observado que a força passiva (F_p , ilustrada nos gráficos como Ch3) exibia um valor significativamente elevado em comparação aos outros esforços estudados, como ilustrado na Figura 45. Esse fenômeno não foi observado nos ensaios feitos na condição como recebida.

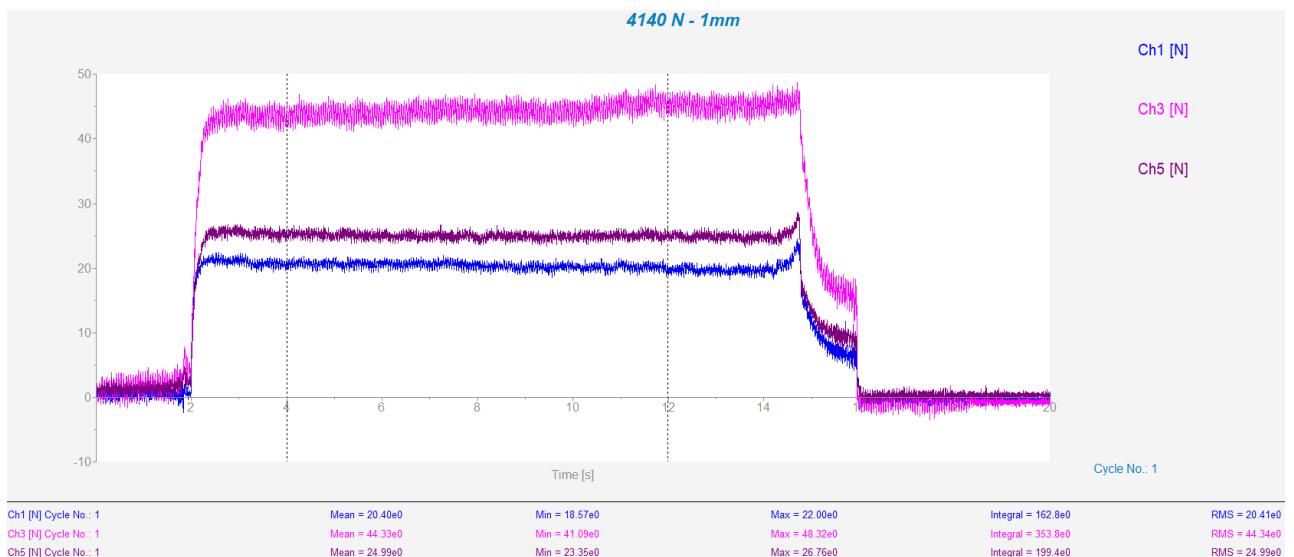


Figura 45: Forças de corte no aço 4140 normalizado registradas para 1 mm de profundidade de corte após retirada da camada externa.

4.4.2 Transcrição dos resultados

Os gráficos da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** abaixo contém os valores médios das três forças registradas durante os ensaios. No caso dos ensaios feitos após retirada da camada descarbonetada foi possível calcular um valor do desvio padrão das medidas, que foi incluída nos gráficos. Como os ensaios na camada descarbonetada foram feitos uma só vez para cada caso, não foi possível obter valor de desvio padrão para eles.

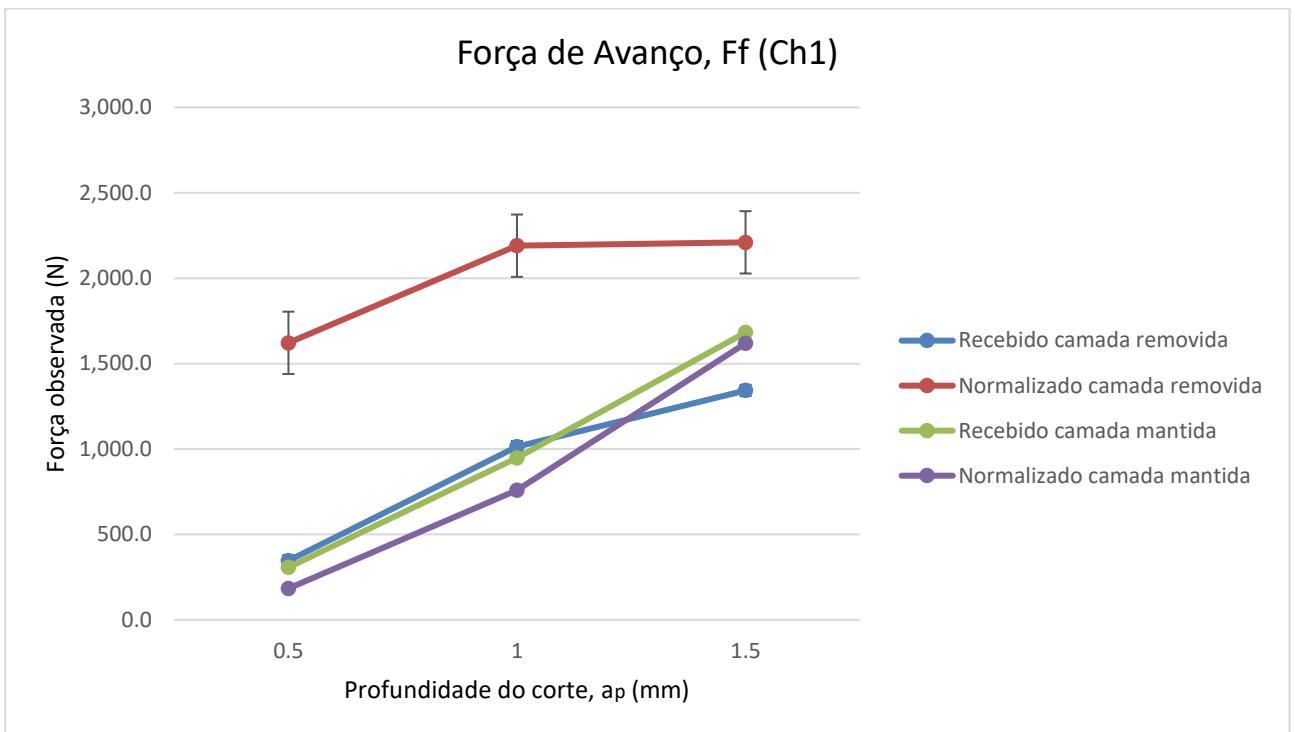


Figura 46: Gráfico de valor médio das forças de avanço (Ff) observadas em diferentes condições.

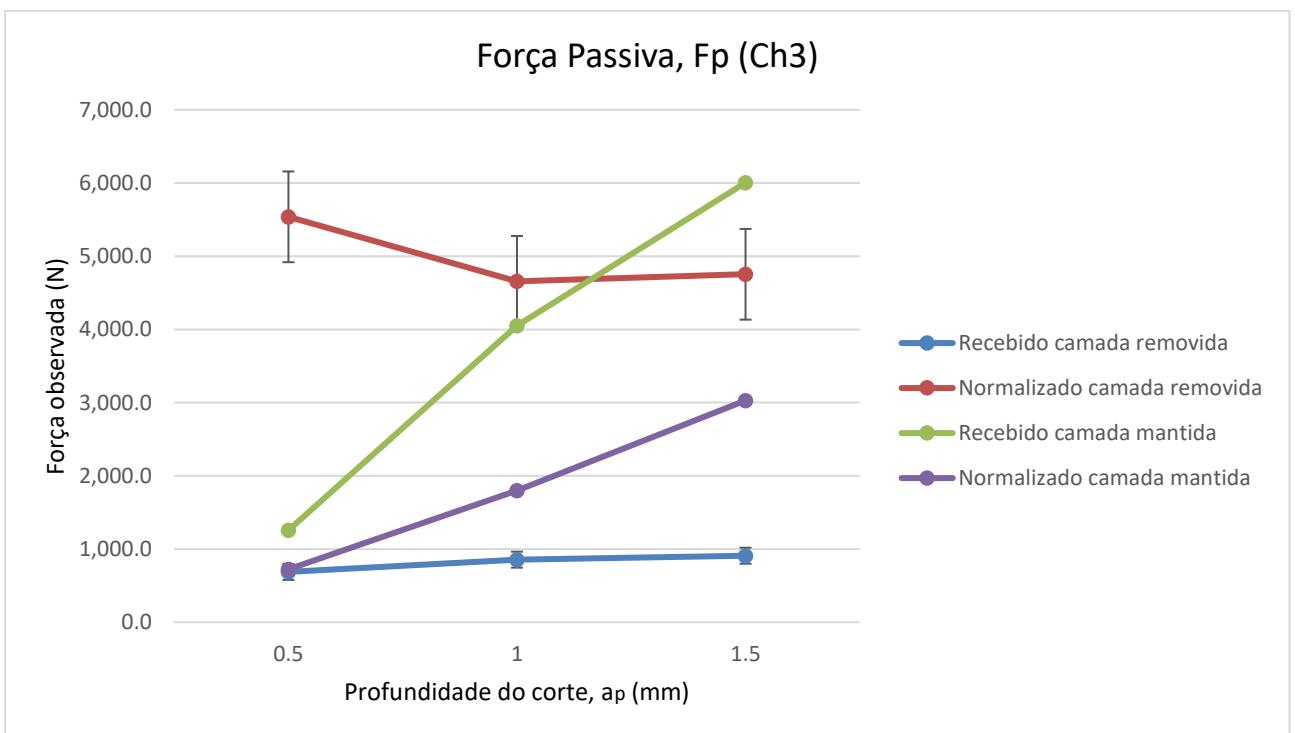


Figura 47: Gráfico de valor médio das forças passivas (Fp) observadas em diferentes condições.

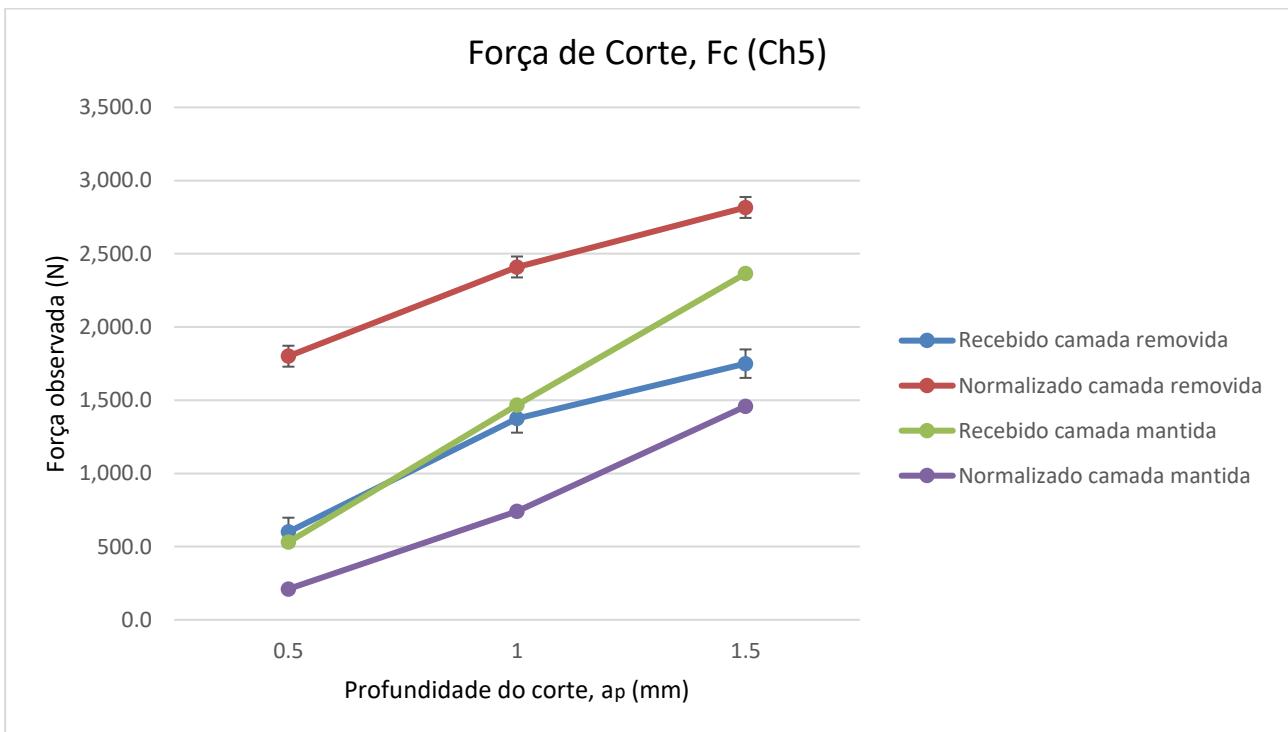


Figura 48: Gráfico de valor médio das forças de corte (F_c) observadas em diferentes condições.

4.4.3 Cavacos recolhidos dos ensaios

Além da análise das forças de corte, a morfologia dos cavacos formados durante o processo pode fornecer informações relevantes sobre a usinagem do aço AISI 4140 nessas condições de tratamento e parâmetros de corte. Especificamente nos cortes com 0,5 mm de profundidade sem remoção da camada externa não foi possível recolher cavacos.

Tabela 8: Conjunto de cavacos recolhidos para cortes de 0,5 mm de profundidade.

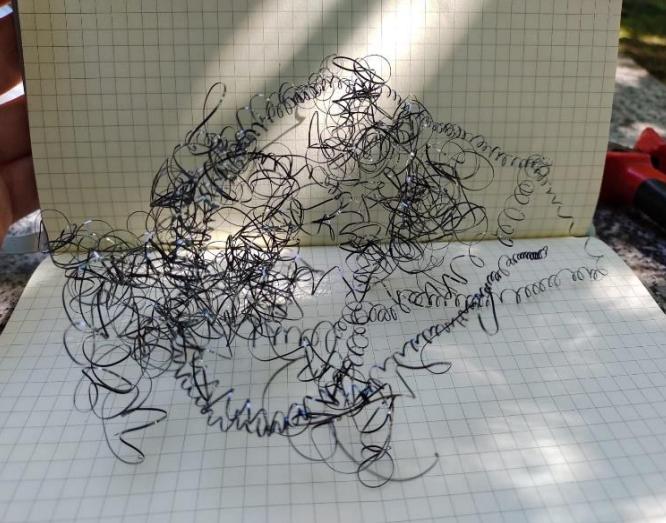
PROFUNDIDADE DE CORTE: 0,5 MM	
Recebido - Camada externa removida	Recebido - Camada externa não removida
	Cavaco não recolhido
Normalizado - Camada externa removida	Normalizado - Camada externa não removida
	Cavaco não recolhido

Tabela 9: Conjunto de cavacos recolhidos para cortes de 1 mm de profundidade.

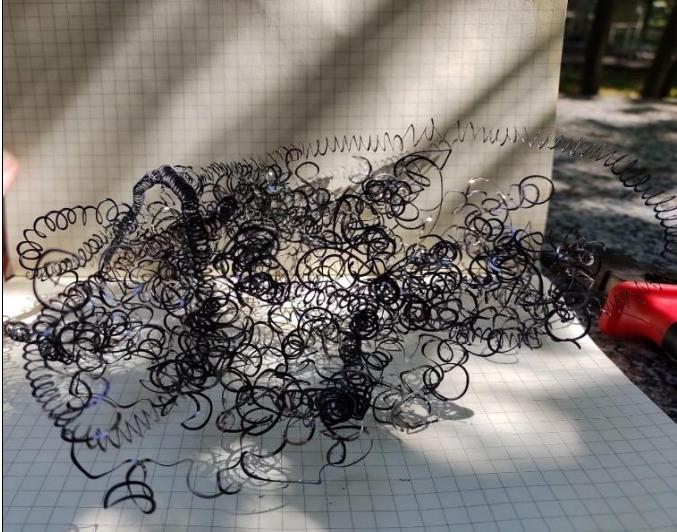
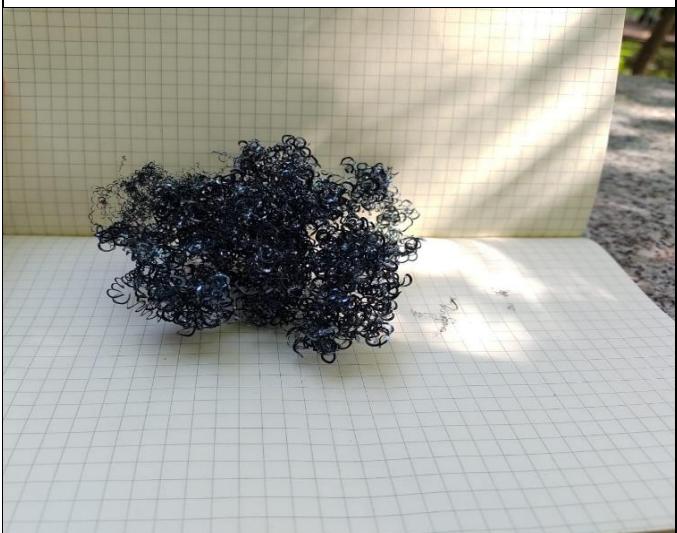
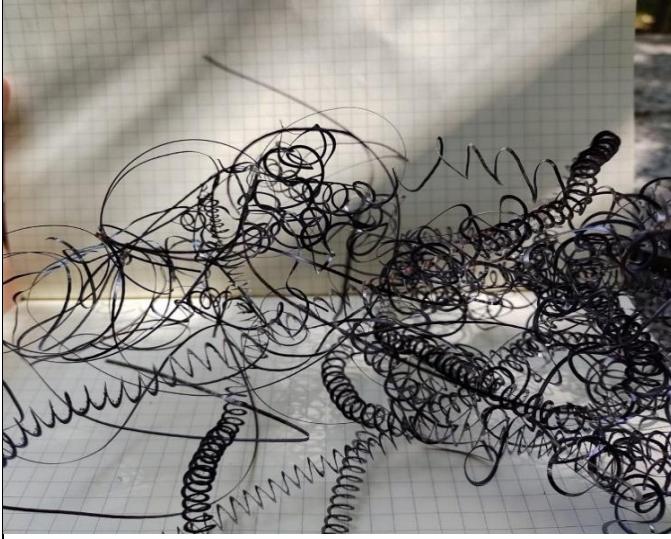
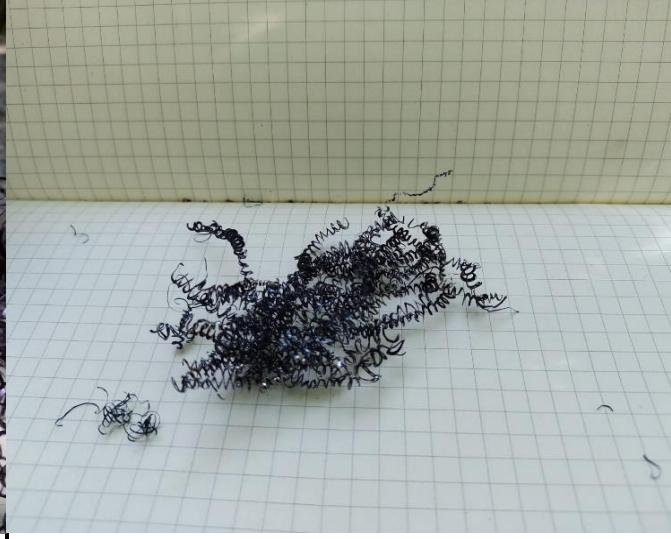
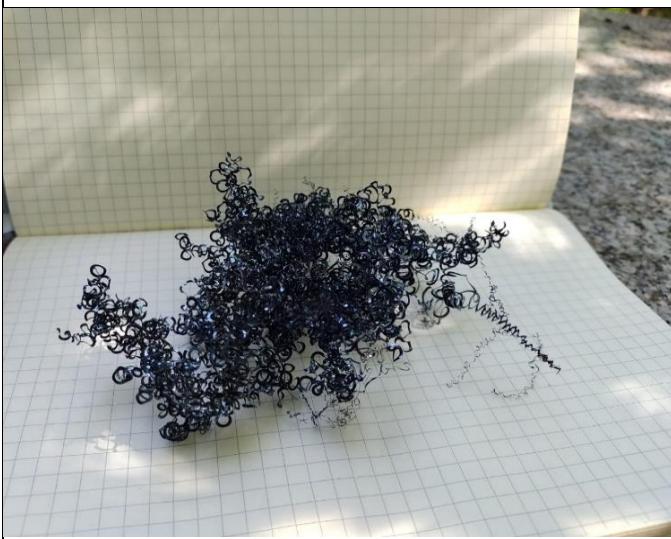
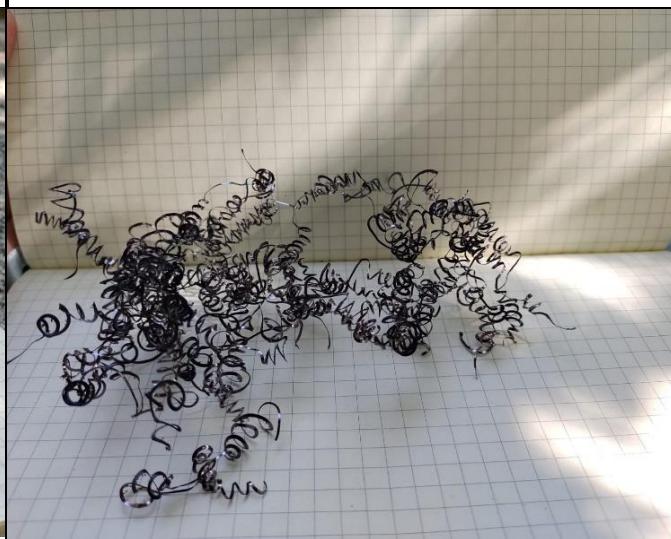
PROFUNDIDADE DE CORTE: 1 MM	
Recebido - Camada externa removida	Recebido - Camada externa não removida
Normalizado - Camada externa removida	Normalizado - Camada externa não removida
 A photograph showing a large pile of dark, curly metal shavings (cavacos) spread out on a white, grid-patterned surface. The shavings are tightly coiled and have a metallic sheen. In the background, a portion of a white cylindrical object and some outdoor foliage are visible.	 A photograph showing a smaller pile of dark, curly metal shavings on a white, grid-patterned surface. The shavings are more scattered and less dense than in the first image. A red object is partially visible in the background.
 A photograph showing a smaller pile of dark, curly metal shavings on a white, grid-patterned surface. The shavings are more compact and rounded compared to the 'Received' version. A portion of a white cylindrical object is visible in the background.	 A photograph showing a very small and sparse pile of dark, curly metal shavings on a white, grid-patterned surface. The shavings are widely spaced and appear more fragmented. A portion of a white cylindrical object is visible in the background.

Tabela 10: Conjunto de cavacos recolhidos para cortes de 1,5 mm de profundidade.

PROFUNDIDADE DE CORTE: 1,5 MM	
Recebido - Camada externa removida	Recebido - Camada externa não removida
	
Normalizado - Camada externa removida	Normalizado - Camada externa não removida
	

Comparando as diferentes geometrias de cavaco formadas em cada caso, pode-se concluir que, para os parâmetros de corte usados, o material na condição como recebida gerou os cavacos menos adequados. Essa conclusão é feita com base na extensão e perfis dos cavacos que, no caso da condição recebida, apresentou cavacos longos com perfil variando ao longo de sua extensão.

4.4.4 Análises de superfície

As análises no perfilômetro geraram quatro principais resultados, sendo eles uma série de medidas de rugosidade observadas na superfície, mapas de rugosidades e um perfil de

rugosidade observada ao longo de uma linha horizontal na superfície do corpo. Tendo em vista que as análises foram feitas tanto para o corpo de prova na condição normalizada quanto o como recebido, é possível fazer comparações entre a qualidade de superfície gerada nesses dois casos. Abaixo foram incluídas imagens comparativas de um caso representativo para cada condição do material ensaiado, além de uma tabela que contém os principais dados sobre os parâmetros de superfície das amostras (Tabela 11).

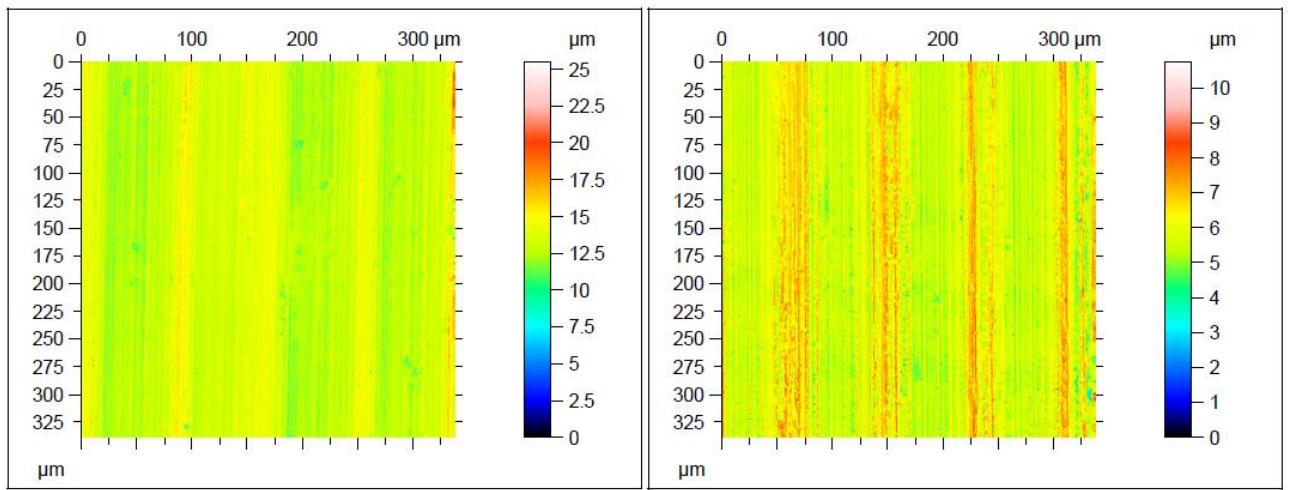


Figura 49: Mapas bidimensionais de rugosidade na superfície do metal após usinagem na condição recebida (esquerda) e na condição normalizada (direita).

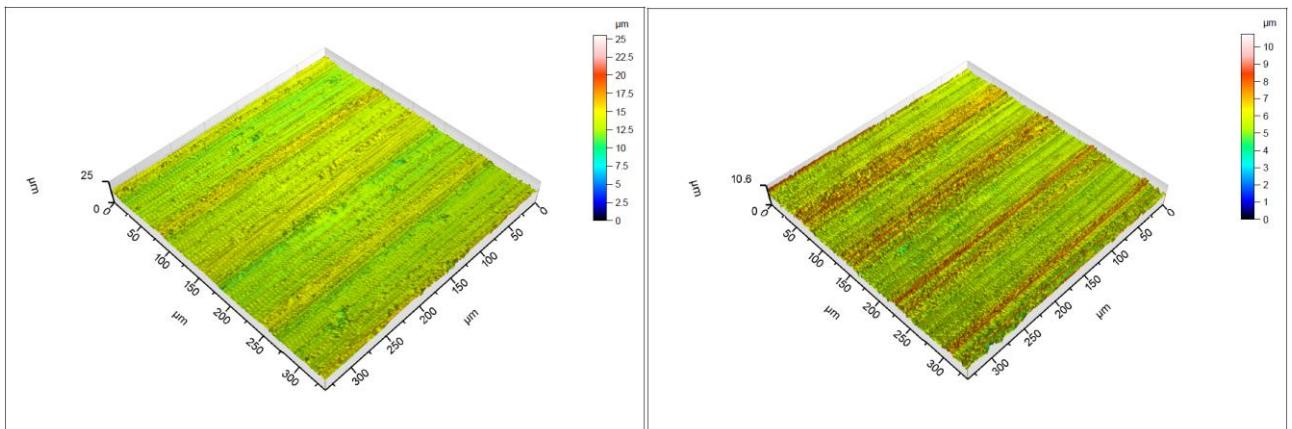


Figura 50: Mapas tridimensionais de rugosidade na superfície do metal após usinagem na condição recebida (esquerda) e na condição normalizada (direita).

No perfil de rugosidade das amostras da Figura 51 podem ser vistos dois tipos de oscilação no sinal. O primeiro, uma oscilação periódica na forma de onda com intervalo e amplitude regulares ao longo da medida, refere-se ao perfil causado pelo avanço da

ferramenta de corte na superfície do material. Já o segundo, que é visto como a formação de picos e vales pontuais na superfície do corpo, é de fato a rugosidade após o processo de usinagem e será o principal responsável pelo acabamento de superfície da peça.

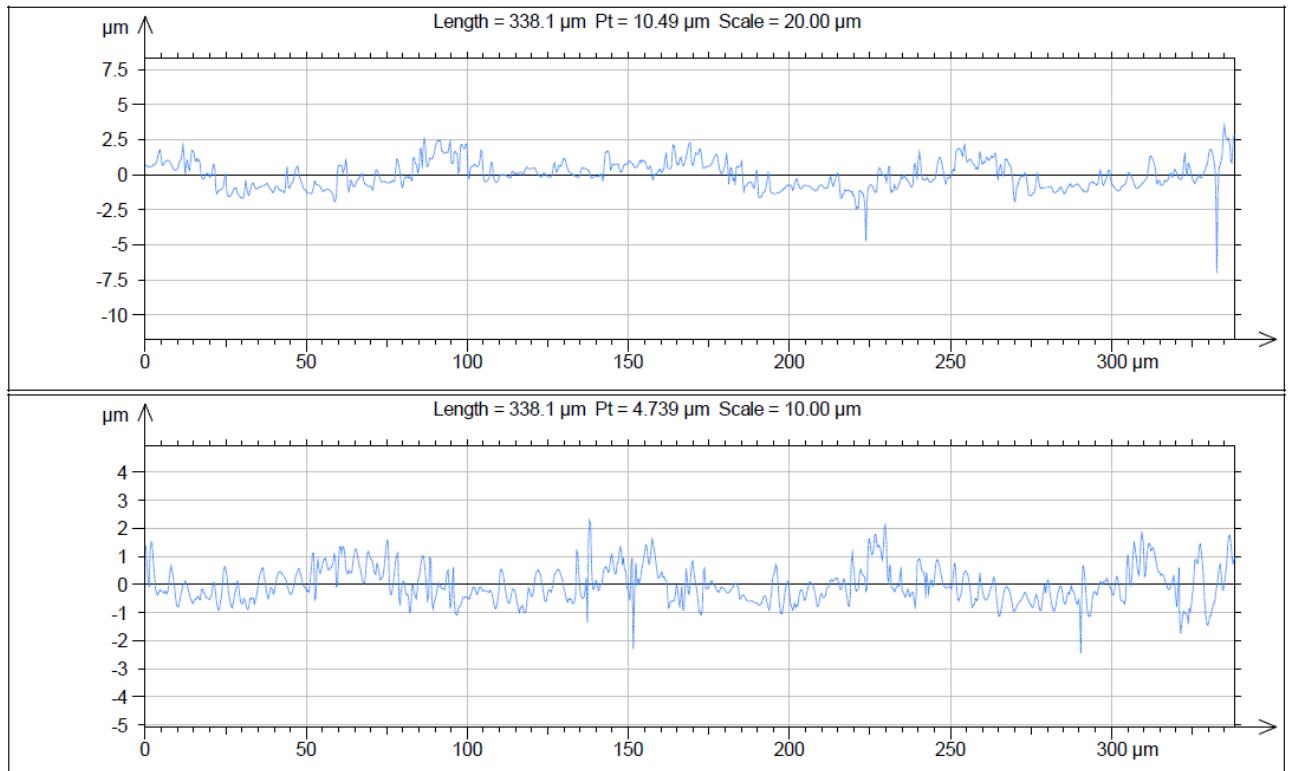


Figura 51: Exemplos de perfis de rugosidade após usinagem observados no metal recebido (cima) e no normalizado (baixo).

Tabela 11: Principais parâmetros de rugosidade observados.

4140 Recebido		4140 Normalizado		Definição da grandeza	
Média	Desv. Pad	Média	Desv. Pad		
Sq (μm)	0.9197	0.1119	1.993	2.171	Média quadrática da altura
Sp (μm)	10.70	3.792	28.89	25.97	Altura máxima de pico
Sv (μm)	23.10	11.71	36.88	35.24	Altura máxima de vale
Sz (μm)	33.80	9.840	65.79	61.21	Altura máxima
Sa (μm)	0.7295	0.08004	1.162	1.018	Média aritmética da altura

5 DISCUSSÃO

O primeiro comentário a ser feito é sobre a simulação microestrutural feita no *Ac3*. Apesar do fato que, como comentado, o *Ac3* não ter uma opção de simulação específica para tratamentos térmicos que não sejam têmpera e revenimento, o ajuste feito nos parâmetros de entrada possibilitou fazer uma simulação que obteve resultados próximos aos vistos na prática. Isso comprova a eficácia do *Ac3* e valida o seu uso para tratamentos térmicos alternativos.

Durante a fabricação dos corpos de prova na condição recebida, notou-se uma diferença significativa na resposta da máquina-ferramenta à usinagem do material. Inicialmente a retirada de material por corte com um bedame ocorreu sem complicações, porém ao aprofundar a ferramenta no corpo das amostras foi possível perceber queda significativa na usinabilidade do material. Essa conclusão foi feita com base no acúmulo de calor notavelmente maior e formação de faíscas durante a operação. Essa diferença na usinabilidade ao longo do diâmetro dos tarugos recebidos sugere que a microestrutura dele está heterogênea, fato que foi comprovado pela análise metalográfica das amostras.

Comparando os resultados do dinamômetro para os materiais nas duas condições após remoção da camada descarbonetada, percebe-se um aumento significativo em todos os esforços no caso do material normalizado. Tal fato provavelmente está ligado à análise metalográfica feita nos corpos, que mostraram que na amostra normalizada há um teor significativamente maior de perlita, em particular na região da metade do raio. O teor elevado de perlita, um microconstituinte com menor usinabilidade, nessa região do tarugo explicaria as maiores forças registradas.

As medidas de forças de usinagem na camada externa revelaram uma amplitude alta no sinal registrado, como pode ser visto na Figura 44, algo que não foi observada nos casos em que o material foi usinado após retirada da camada descarbonetada. De acordo com as micrografias, o material na condição recebida possui uma camada descarbonetada com aproximadamente 300 µm, passando depois por uma região em que há transição da microestrutura altamente descarbonetada para a encontrada no restante do material, como pode ser visto na Figura 27. Isso levanta a possibilidade de a amplitude elevada ser causada pela presença diferentes microconstituíntes atuando na ferramenta, o que implica

em solicitações mecânicas irregulares ao longo do corte. O mesmo raciocínio anterior relacionado à camada descarbonetada pode ser repetido para o caso do material normalizado. Apesar das micrografias sugerirem que a camada descarbonetada possui uma profundidade maior (aproximadamente 400 µm), o mesmo fenômeno foi observado, sendo que a presença da região de transição entre microestruturas provavelmente foi uma das causas desse efeito.

Outra possível explicação para a amplitude está no fato do corpo possivelmente estar com sua superfície irregular. Como não foi removida a camada externa dele, é esperado que haja alguma irregularidade em sua superfície, seja pela formação de óxidos ou por imperfeições no processo de conformação para obtenção dos tarugos. A presença dessa irregularidade pode ser um fator responsável pela instabilidade que foi observada na leitura dos esforços de usinagem. A Figura 52 contém a imagem de um tarugo na condição recebida após três cortes em profundidades diferentes, que foram feitos sem remoção da camada externa. Percebe-se que na região em que foi aplicada uma profundidade de 0,5mm a camada externa não foi completamente removida, o que implica em uma superfície externa altamente irregular no corpo. Logo, a alta amplitude no sinal capturado pelo dinamômetro pode ser explicado pela presença de uma superfície irregular na peça e agravado pelo gradiente do teor de perlita com o diâmetro.

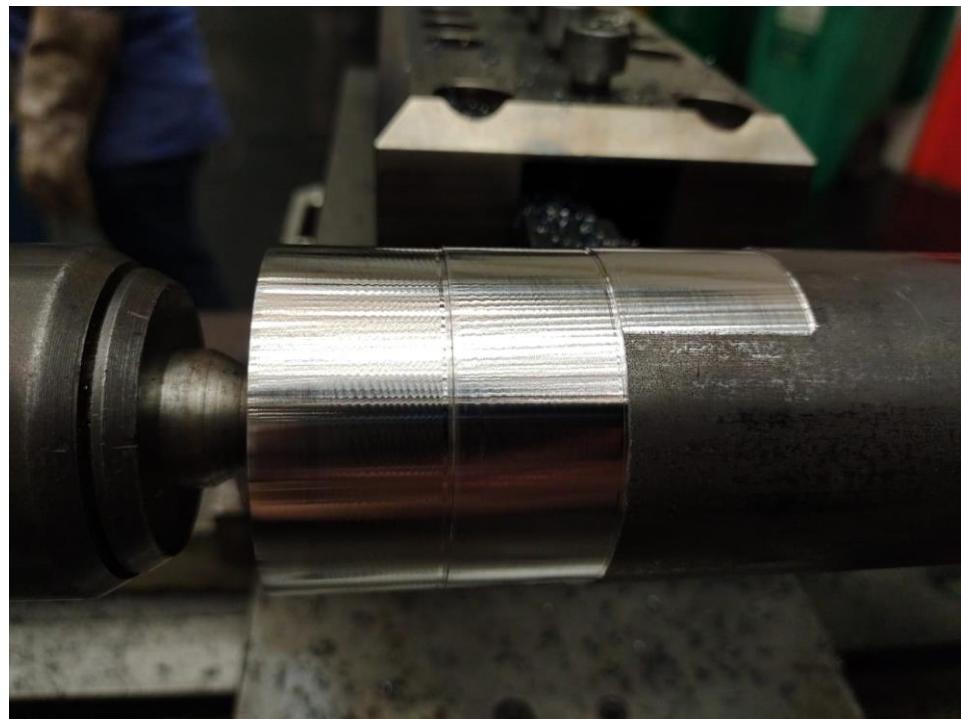


Figura 52: Tarugo de aço SAE 4140 na condição recebida após cortes em diferentes profundidades de material. Da esquerda para a direita, as profundidades foram 1,5mm, 1mm e 0,5mm.

Anteriormente foi observado que as curvas de esforços de usinagem na camada externa do aço normalizado apresentavam menores valores que suas equivalentes na condição como recebida, embora o contrário tenha sido observado nos casos em que a amostra foi usinada após remoção da camada externa. Tal fato pode ser explicado pela profundidade e intensidade de descarbonetação que ocorreu no caso em que o material foi normalizado. Como no caso do tarugo normalizado a descarbonetação foi mais profunda, é esperado que a microestrutura dessa região tenha menores forças necessárias para remoção de material, o que explicaria os menores valores dos esforços. Por ser formada por microconstituintes com propriedades mecânicas mais adequadas ao processo de usinagem, o fato da camada descarbonetada ter melhor usinabilidade está de acordo com o que era esperado.

Esse fato da camada descarbonetada do aço normalizado ter usinabilidade elevada em relação ao aço recebido pode ser reforçado pela análise dos cavacos formados. Na Tabela 9 e na Tabela 10 pode ser observado que os cavacos do aço recebido apresentam

formatos menos consistentes e mais quebradiços, enquanto os cavacos do aço normalizado apresentaram geometria mais favorável.

Foi observado uma particularidade nos resultados referente à força passiva (F_p) registrada pelo dinamômetro, cujos valores medidos estão ilustrados na **Figura 10. Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Para todas as profundidades testadas, a componente da força passiva no material normalizado foi notavelmente maior que as outras. Entre as possíveis explicações para isso, destaca-se o fato que o raio da ferramenta de corte é relativamente grande comparado às profundidades dos cortes. Em uma operação de torneamento, comumente a profundidade é definida como um valor superior a 3 vezes o valor do raio da ferramenta, ou seja, o valor mais apropriado para o corte em um caso real seria uma profundidade superior a 1,2 mm. Nos ensaios feitos somente a maior profundidade analisada (1,5 mm) se enquadra nesse critério.

Ainda sobre a força passiva (F_p), foi observada uma anomalia no caso em que o material usinado foi o aço normalizado após remoção da camada externa, que foi a queda nas forças com o aumento da profundidade. Como essas medidas foram feitas após vários passes consecutivos de usinagem, é possível que esse comportamento atípico seja explicado pelo aumento excessivo de temperatura durante as operações, levando a menores esforços de usinagem.

Nos dois casos em que o material foi ensaiado após a remoção da camada descarbonetada, percebe-se uma tendência à estabilização dos valores de força registrada. Essa tendência é mais visível no caso do metal na condição recebida após retirada da camada externa, pois de maneira geral as curvas das forças apresentaram menores variações de força com a profundidade, além do fato que esses valores foram mais consistentes entre as diferentes análises, que pode ser concluído pelo menor desvio padrão das medidas comparadas às do metal normalizado. Nas análises feitas com o perfilômetro foi possível concluir que a superfície do metal na condição recebida estava mais uniforme após o torneamento, fato evidenciado pelos menores valores de S_a e S_q registrado na Tabela 11. Esse fato somado à tendência observada à estabilização das forças de usinagem sugere que a profundidade de corte de 1,5 mm é próxima à ideal para esse material, considerando o conjunto de parâmetros de corte usados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise microestrutural foi possível estabelecer possíveis motivos pelos quais a usinagem ocorreu da maneira observada, estabelecendo uma ligação entre as áreas da metalurgia e manufatura por usinagem. Com o conhecimento da microestrutura e de usinagem, pode ser possível prever a resposta do material aos processos usados. Isso possibilita melhor planejamento da manufatura para que seja feita de maneira mais eficiente, podendo aumentar a capacidade produtiva ou diminuir os custos envolvidos.

A camada de material descarbonetado provou ser um excelente objeto de estudo para compreender os fenômenos envolvidos na resposta do material ao processo. Por ser formada por um gradiente de microestruturas, os esforços de usinagem observados tendem a oscilar em altas amplitudes, o que a longo prazo pode resultar em danos acelerados à ferramenta de corte. Isso implica na necessidade de preparo cuidadoso em operações que envolvem a retirada dessa camada, possivelmente analisando a microestrutura para saber sua extensão e adequando os parâmetros de corte para ela.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACJ Usinagem Ltda. (s.d.). *Tabela de velocidade de corte (v) para torneamento*. Fonte: ACJ Usinagem: http://www.acjusinagem.com.br/tabelas/vel_corte_torno.pdf. Acesso em 06 de maio de 2021.
- ASM. (1989). *ASM Handbook Volume 16: Machining*. ASM International.
- ASM. (1991). *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating*. ASM International.
- ASM. (1992). *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*. ASM International.
- ASM. (2005). *ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*. ASM International.
- ASM International. (1998). *Metals Handbook Desk Edition (2nd Edition)*. ASM International.
- ATKINS, T. (2009). *The Science and Engineering of Cutting*. Elsevier Ltd.
- BAYERM A. M, V. T. (2005). Wrought Tool Steels. Em *ASM Handbook, Volume 1* (pp. 1165-1202). ASM International.
- BHADESHIA, H. K., & HONEYCOMBE, R. (2006). *Steels Microstructure and Properties*. Elsevier Publishing.
- CALLISTER, W. D. (2010). *Materials Science and Engineering: An Introduction, Eighth Edition*. Wiley & Sons.
- DINIZ, A. E. (2005). *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber.
- DOSSET, J. L. (2006). *Practical Heat Treating, 2nd Edition*. ASM International.
- FOUNTAS, N. A. (2019). Multi-response optimization of CuZn39Pb3 brass alloy turning by implementing Grey Wolf algorithm. *Fattura ed Integrità Strutturale* 50, pp. 584-594.
- HADDAD, F. L. (2019). Metallurgical Analysis of Chip Forming Process when Machining High Strength Bainitic Steels. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*.
- JASINEVICIUS, R. G. (2017). *Página da Disciplina SEM 0534*. Fonte: Edisciplinas USP: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2036851/mod_resource/content/2/Aula%20

5%20For%C3%A7as%20e%20Pot%C3%A1ncia%20de%20corte.pdf. Acesso em 12 de maio de 2021.

JOSHI, P. H. (2007). *Machine Tools Handbook*. McGraw-Hill Osborne Media.

KEUL, C., & BLECK, W. (2011). New Microalloyed Steels for forgings. *Journal of Iron and Steel Research International*, 104-111.

Kistler Group. (06 de Novembro de 2021). *Brochure, Cutting Force, Cutting Force Measurement*. Fonte: Kistler: Measurement Systems and Sensors: <https://www.m3.tuc.gr/EQUIPMENT/MIKRODYNAMOMETRO/cutting%20force%20measurement.pdf>. Acesso em 18 de outubro de 2021.

KLOCKE, F. (2011). *Manufacturing Processes 1*. Springer.

KUMAR, R. P. (26 de Julho de 2019). Influence of cutting parameters on cutting forces and surface roughness in dry turning of Al using PCD and different coated tools. *Sadhana*, 44, pp. 186-203.

LALBONDRE, R. K. (2014). An Experimental Investigation on Machinability Studies of Steels by Face Turning. *Procedia Materials Science*, 1386-1395.

MATSUMOTO, H. M. (2005). Influência da Microestrutura na Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis AISI 630 com e sem Adição de Cálcio. *Revista Matéria*, 213-221.

PALANISAMY, D. S. (2018). A comparative study on machinability of cryo-treated and peak aged 15Cr-5Ni precipitation hardened stainless steel. *Measurement*, 162-169.

RESIAK, B. C. (2002). *Europa Patente Nº EP1565587*.

RICARDO, E. (12 de Abril de 2014). *Aula 02 Torno Mecânico*. Fonte: SlideShare: <https://pt.slideshare.net/EltonRicardo/aula-02-torno-mecnico>. Acesso em 12 de maio de 2021.

RLM Máquinas e Equipamentos. (19 de 11 de 2020). *Nomes das partes do torno mecânico e suas funcionalidades*. Fonte: Site da RLM Máquinas e Equipamentos: <https://www.rmlmaquinas.com.br/loja/noticia.php?loja=762235&id=85>. Acesso em 04 de maio de 2021.

SHAW, M. C. (1993). Chip Formation in the Machining of Hardened Steel. *CIRP Annals*, 29-33.

- SILVA, F. V. (Fevereiro de 2014). Forças de Corte Geradas por Torneamento - Um Estudo de Caso das Ligas Cu-Al-Be e Cu-Al-Be-Nb-Ni Passíveis do Efeito Memória de Formas. *Tese de doutorado*. João Pessoa, Paraíba.
- STOETERAU, R. L. (2020). *Planejamento da Fabricação; Usinagem; Metrologia*. Fonte: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5287595/mod_resource/content/1/Aula-5-Usinagem-2020-disponibilizado%20pelo%20prof.Rodrigo.pdf. Acesso em 10 de maio de 2021.
- TOLLEY, J. C. (Janeiro de 1976). Influence of microstructure on machinability of wrought steels. *Metals Technology Vol. 3*, pp. 248-253.
- TSCHIPTSCHIN, A. P. (s.d.). *Tratamento Térmico dos Aços*. Fonte: PMT2402: <http://www.pmt.usp.br/pmt2402/TRATAMENTO%20T%C3%89MICO%20DE%20A%C3%87OS.pdf>. Acesso em 02 de junho de 2021.
- VIEREGGE, G. (1970). *Zerspanung der Eisenwerkstoffe*. Düsseldorf.
- YIN, Q. L. (2020). Recent progress of machinability and surface integrity for mechanical machining Inconel 718: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 215-245.
- YOUSSEF, H. A.-H. (2008). *Machining Technology Machine Tools and Operations*. Taylor & Francis Group, LLC.