

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**OTÁVIO ZEM LOPES PONCE**

**Efeitos da usinagem na integridade superficial de aços baixo carbono  
com grãos ultrafinos**

São Carlos

2015



OTÁVIO ZEM LOPES PONCE

Efeitos da usinagem na integridade superficial de aços baixo carbono com  
grãos ultrafinos

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de  
Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, como  
parte dos requisitos para obter o  
grau de Engenheiro de Materiais e  
Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Renato  
Goulart Jazinevicius

São Carlos

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P792e Ponce, Otávio Zem Lopes  
Efeitos da usinagem na integridade superficial de  
aços baixo carbono com grãos ultrafinos / Otávio Zem  
Lopes Ponce; orientador Renato Goulart Jasinevicius.  
São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e  
Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, 2015.

1. Integridade superficial. 2. Fresamento de topo.  
3. Material com grãos ultrafinos. I. Título.

## RESUMO

PONCE, O. Z. L. Efeitos da usinagem na integridade superficial de aços baixo carbono com grãos ultrafinos. 69f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

No contexto de miniaturização de componentes, são necessárias tecnologias de fabricação que permitam atingir tolerâncias de ordem igual ou inferior a um micrometro e acabamentos de ordem submicrométrica. O trabalho propõe a avaliação dos efeitos da usinagem na integridade superficial de um aço baixo carbono. As amostras usinadas apresentam duas configurações, sendo uma delas na configuração metalúrgica original e a outra submetida a processo de refino de grãos. O objetivo é investigar a influência da operação de usinagem na dureza, acabamento e microestrutura do material, relacionando-a com a variação do tamanho de grão dos corpos de prova. Os ensaios de usinagem foram realizados em um centro de usinagem CNC e a operação escolhida foi o fresamento de topo. Foram feitas operações de macro e microusinagem. No caso das operações de microusinagem, as amostras foram analisadas apenas quanto ao seu acabamento. A profundidade da camada afetada pela macrousinagem e o aumento de dureza da superfície é maior para o aço com maior tamanho de grão, devido ao mecanismo de remoção de material verificado. Maiores valores de avanço, na macrousinagem, provocaram um menor aumento de dureza da superfície. Na microusinagem, maiores valores de avanço provocaram menor formação de rebarba por conta de efeitos de mínima espessura de corte.

Palavras-chave: Integridade superficial. Fresamento de topo. Materiais com grãos ultrafinos.

## ABSTRACT

PONCE, O. Z. L. Machining effects on surface integrity of ultrafine grained low carbon steel. 69f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Considering the miniaturization of components, manufacturing technologies are needed in order to achieve tolerances equal to or less than one micron and submicron finish. The present work aims the evaluation of effects of machining processes on the surface integrity of a low carbon steel. The machined samples have two configurations, one corresponding to the original metallurgical state and the other subjected to a grain refining process. The objective is to investigate the influence of the machining operation on hardness, surface and microstructure of the material, relating it to the variation of the grain size of the materials. Machining tests were performed on a CNC machining center and the selected operation was end-milling. Macro and micro milling machining operations were performed and the micro-milled samples were analysed only with regard to its surface. The depth of the affected layer and the increase of the surface's hardness is greater for the steel with larger grain size due to the verified material removal mechanism. Higher feed values imply on lower surface's hardness increase on macro machining. As to micro machining, higher feed caused smaller burrs due to minimum depth of cut effects.

Keywords: Surface Integrity. End-milling. Ultrafine grained materials.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVOS .....	13
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	MICROUSINAGEM .....	14
2.1.1	Definições .....	14
2.1.2	Fenomenologia .....	15
2.1.3	Aplicações .....	20
2.2	INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	22
2.2.1	Classificações .....	22
2.2.2	Alterações Superficiais .....	24
2.2.3	Alterações subsuperficiais .....	26
2.2.4	Variáveis que influenciam a integridade superficial .....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
3.1	MACROFRESAMENTO .....	30
3.1.1	Preparação dos ensaios .....	30
3.1.2	Equipamentos e máquinas .....	32
3.1.3	Corpos de prova .....	32
3.1.4	Procedimento experimental .....	35
3.2	MICROFRESAMENTO.....	38
3.2.1	Preparação dos ensaios .....	38
3.2.2	Equipamentos e máquinas .....	40
3.2.3	Corpos de prova .....	41
3.2.4	Procedimento experimental .....	42

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	44
4.1	ENSAIOS DE MACROFRESAMENTO .....	44
4.1.1	Acabamento após usinagem.....	44
4.1.2	Microdureza da superfície usinada .....	48
4.1.3	Microestrutura da borda usinada .....	51
4.1.4	Perfil de microdureza da borda usinada .....	56
4.2	ENSAIOS DE MICROFRESAMENTO.....	59
4.2.1	Acabamento após microfresamento .....	59
5	CONCLUSÕES.....	64
	REFERÊNCIAS.....	65

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias de fabricação de componentes que demandam processos que atinjam tolerâncias da ordem igual ou inferior a um micrometro e acabamentos da ordem submicrométrica abrange várias áreas, incluindo telecomunicações, eletroeletrônicos portáteis, defesa e biomedicina. Nesse contexto, a fabricação em grandes volumes de peças com escala reduzida tem encontrado no processo de moldagem por injeção muitas dessas aplicações (TANIGUCHI, 1983; KIM, MAYOR e NI, 2004).

Processos de micro/nano-usinagem (MNU), usados para dar acabamentos a estes componentes, podem ser divididos em duas categorias: processos avançados de microusinagem (PAMU), usados para obtenção de forma e tamanho de um componente; e *advanced micro/nano-finishing*, usados para obtenção de acabamentos finos de um componente de acordo com a tolerância exigida (JAIN, 2009).

De acordo com Brinksmeier (2012), enquanto os processos de remoção de material com princípios físicos ou químicos restringem-se a uma gama específica de aplicações, a usinagem por mecanismo de remoção mecânica de material é considerada quase que universal para aplicação em diversos tipos de materiais. Os processos de usinagem por remoção de material podem ser uma boa maneira de obtenção de protótipos, têm pequena influência sobre as propriedades metalúrgicas de peças metálicas e podem gerar superfícies de formas diversas com textura e tolerâncias dentro de limites muito reduzidos (EZUGWO, 2005).

Todavia, o processo de usinagem em escalas muito reduzidas tem se mostrado bastante diferente daqueles em escala normal. Um dos mais importantes aspectos está na relação entre a espessura de corte e o raio da aresta de corte.

A aresta de corte é de grande importância na usinagem de alta precisão. Além disso, sua influência na intensidade das forças de corte também é conhecida (TAMINIAU e DAUTZENBERG, 1991). Em processos de microfresamento, por exemplo, a espessura de corte e o raio de aresta podem chegar à mesma ordem de grandeza, levando a uma maior energia específica.

Embora algumas vezes o termo microusinagem seja confundido com nanousinagem, uma característica importante é a dimensão nominal em termos de espessura de cavaco. Por exemplo, a mínima razão entre a espessura de corte em relação ao raio de aresta em microusinagem pode atingir valores da ordem de 0,293, enquanto que na nanousinagem esse valor passa para a ordem 0,1 (LIU et al, 2004). Além disso, outras diferenças significativas foram destacadas por Brinksmeier e estão relacionadas na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1 - Diferenças entre processos macro, micro e nanousinagem**

	<b>Macrousinagem</b>	<b>Microusinagem</b>	<b>Nanousinagem</b>
<b>Tamanho da área usinada</b>	$1 - 10^5 \text{ cm}^2$	$1 - 10^5 \text{ mm}^2$	$1 - 10^5 \text{ }\mu\text{m}^2$
<b>Volume Removido em um passo</b>	$10^{-3} \text{ a } 10^2 \text{ cm}^3$	$10^2 \text{ mm}^3$	$10^2 \text{ }\mu\text{m}^3$
<b>Rugosidade (<math>R_a</math>)</b>	Até $10 \text{ }\mu\text{m}$	Até $0,1 \text{ }\mu\text{m}$	$0,1 - 10 \text{ nm}$

**Fonte:** Adaptado de Brinksmeier e Preuss (2012).

Apesar dos avanços no processo de microfresamento, poucas pesquisas têm sido realizadas para obter uma compreensão fundamental dos mecanismos do processo de microfresamento. Em microescala, existem diferenças fenomenológicas no processo que não podem ser explicadas apenas a partir de fenômenos em escala convencional. As diferenças críticas em microescala surgem a partir da quebra dos pressupostos de homogeneidade na microestrutura da peça e dos efeitos negligenciados do raio de aresta.

A melhoria das operações de usinagem é atualmente conduzida de várias formas, incluindo o projeto das ferramentas de corte e suas implicações, como composição química, propriedades mecânicas e físico-químicas do substrato e revestimentos, além da macrogeometria da ferramenta e microgeometria da aresta. Também podem ser mencionados o fresamento de materiais endurecidos, a utilização de usinagem em alta velocidade, a usinagem sem fluidos, a usinagem de alto desempenho. Todos esses itens conduzem a uma produtividade muito maior e a um processo mais econômico, com redução do custo global de usinagem por peça.

Dado que as propriedades de uma peça podem variar ao longo de seu volume, torna-se importante escolher a escala adequada de usinagem para o estudo da usinabilidade. Pode-se afirmar que existem duas razões essenciais que justificam o estudo da usinabilidade de aços com grãos ultrafinos, usando processos de remoção de material em escala micro. A primeira delas é a provável aplicação desse tipo de material na área de tecnologias de miniaturização, devido a propriedades como resistência mecânica e tenacidade. A segunda razão é que, para compreender as implicações da interação entre a ferramenta e o material sobre a usinabilidade de aços com grãos ultrafinos, é interessante que seja realizado um processo numa escala semelhante ao tamanho de grão do material. Assim, a influência de parâmetros como força de corte, desgaste da ferramenta e qualidade da superfície usinada sobre a dureza e a microestrutura do material usinado pode ser melhor entendida.

Em todos os processos de fabricação que empregam usinagem, as peças podem apresentar alterações ou danos em sua integridade superficial, provocados pela maneira como a remoção de material ocorre, isto é, envolvendo ruptura e altas taxas de cisalhamento. A questão da qualidade de componentes usinados sempre foi fortemente discutida e cada vez mais se exigem componentes com alta eficiência, não só pelo aspecto funcional, mas também pelos requisitos de segurança (MACHADO et al, 2009). Trata-se, por exemplo, da indústria aeronáutica e automobilística, onde as peças devem apresentar altíssima confiabilidade. Nesse sentido, a integridade superficial pode ser decisiva no desempenho do componente usinado (EZUGWU e TANG, 1995).

A integridade superficial de peças usinadas pode ser influenciada, basicamente, por efeitos mecânicos e térmicos. O trabalho mecânico efetivo empregado para a usinagem é transformado, em sua maior parte, em energia térmica, sendo que as principais fontes de calor estão nas zonas de cisalhamento primário e secundário de corte. Em usinagens de precisão, aumentos em velocidade de corte e avanço para usinagem com alta produtividade são geralmente restritos, pois o aquecimento causa um rápido desgaste da ferramenta e variações dimensionais da peça (KÖNIG e KLOCKE, 1997). Os efeitos dos processos de usinagem na integridade superficial podem ser ainda mais graves, quando se trata de microcomponentes, uma área ainda pouco estudada.

Apesar da promissora expectativa que circunda a usinagem com alto desempenho e precisão e de sua ascendente difusão no meio industrial, entende-se que ainda há necessidade de se buscar respostas para aspectos mais voltados ao material usinado, tais como possíveis alterações na integridade superficial e na usinabilidade da peça, sobretudo em materiais com grãos ultrafinos, que representam um novo nicho de pesquisa e que vem ganhando espaço no mercado graças à capacidade de prover alta resistência mecânica aliada à boa tenacidade, partindo-se de composições químicas simples. Devido a esse fato, a produtividade, muitas vezes, é sacrificada para preservar a qualidade da superfície usinada, como também em favor das tolerâncias dimensionais e geométricas do produto. Além disso, antes da realização dos processos de usinagem, existe o aspecto da concepção do material bruto por meio de seu projeto metalúrgico. Em geral, os materiais são concebidos por arranjo de elementos de liga e processos termomecânicos, como laminação, forjamento e extrusão para compor, não apenas a forma do material bruto, mas também para obter uma microestrutura e propriedades mecânicas adequadas à sua aplicação.

Essas duas frentes de pesquisa (processamento metalúrgico e usinagem) nem sempre têm sido exploradas de forma conjunta, embora estejam intimamente ligadas. A seguinte questão sintetiza o exposto acima: tendo sido projetados metalurgicamente os materiais, com o monitoramento de suas evoluções microestruturais para atingir as propriedades mecânicas e microestruturais desejadas, como fica a integridade superficial desses produtos submetidos à usinagem de alta precisão, onde altas taxas de deformação são aplicadas?

Saber a resposta para esta questão é pertinente, pois a qualidade do produto usinado, quanto ao seu desempenho funcional e à segurança que proporciona durante sua aplicação, depende, também, da forma como a peça foi usinada. O processo de cisalhamento, ao qual a peça é submetida em uma operação de usinagem, pode representar uma interferência significativa em sua estrutura e afetar decisivamente suas propriedades, como resistência à fadiga e dureza, bem como causar tensões residuais indesejáveis, transformações de fase e alterações microestruturais. Desta forma, o projeto metalúrgico inicial pode ter sido alterado após a usinagem.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse estudo é caracterizar a integridade superficial de materiais com grãos ultrafinos sujeitos à usinagem de alta precisão, em função dos parâmetros de corte e das escalas de usinagem macro e micro. Pode-se citar como objetivos específicos:

- Compreender o efeito da mudança do processo de usinagem de macro para microfresamento na microdureza e na microestrutura (deformação plástica dos grãos e/ou mudanças de fase), tanto na superfície fresada como nas camadas subsequentes;
- Compreender a influência do tamanho de grão sobre a microusinagem de componentes, partindo-se do estudo de um material de mesma composição química, mas com dois diferentes tamanhos de grão.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste item, serão apresentados os principais aspectos sobre microusinagem e integridade superficial, abordando definições e características dos temas de acordo com os principais autores da área.

### 2.1 MICROUSINAGEM

A usinagem em menores escalas é motivada, atualmente, pela grande utilização de peças miniaturizadas. Conforme a dimensão das peças a serem produzidas diminui, a escala da usinagem que será empregada para a sua fabricação também deve ser reduzida na mesma proporção. Nesse contexto, a microusinagem desempenha um importante papel, na medida em que permite a fabricação adequada dessas peças.

#### 2.1.1 Definições

Masuzawa (2000) explica que, no sentido literal, microusinagem envolve o processamento do material na escala dos micrometros, isto é, entre 1  $\mu\text{m}$  e 999  $\mu\text{m}$ . Entretanto, o termo micro, nesse contexto, também pode ser interpretado como “muito pequeno”, conceito que dependerá das condições de corte, dos materiais, das ferramentas e dos operadores envolvidos no processo de usinagem. Dessa forma, o autor considera que a microusinagem se trata da usinagem que é realizada de modo não convencional, com maior dificuldade, por conta das menores dimensões envolvidas na peça a ser fabricada.

Já Vogler, DeVor e Kapoor (2004) definem que as fresas para microfresamento possuem diâmetro que varia de 100 a 500  $\mu\text{m}$  e raio de aresta de corte que varia de 1 a 10  $\mu\text{m}$ . Os autores também estabelecem parâmetros de usinagem que diferenciam o microfresamento do fresamento convencional. Enquanto que no fresamento

convencional são utilizados avanços em torno de 100  $\mu\text{m}$ /dente e profundidade de usinagem de 1 mm, no microfresamento são esperados avanços por volta de 1  $\mu\text{m}$ /dente e profundidade de usinagem de 100  $\mu\text{m}$ . Dessa forma, os fenômenos envolvidos no microfresamento serão diferentes dos que acontecem no macrofresamento.

Mais recentemente, Altintas e Jin (2011) descrevem, para o processo de microfresamento, que o diâmetro de microfresas varia de 25  $\mu\text{m}$  a 1 mm, com arredondamento da aresta de corte de 5 a 20  $\mu\text{m}$ . Os autores ainda explicam que a geometria da ferramenta, a velocidade de corte, a profundidade de usinagem e o avanço por dente devem ser controlados para evitar desgaste prematuro da ferramenta e a fratura da microfresa, assim como permitir a obtenção de uma superfície de bom acabamento e precisão para a peça miniaturizada.

Dessa forma, é possível verificar que alguns autores diferem quanto à definição de microusinagem. O que fica claro é que o conceito de microusinagem varia de acordo com a aplicação e com o contexto em que o processo é utilizado. Isso explica a diferença entre as dimensões de ferramentas e parâmetros de usinagem que os autores consideram como sendo a microusinagem propriamente dita.

### **2.1.2 Fenomenologia**

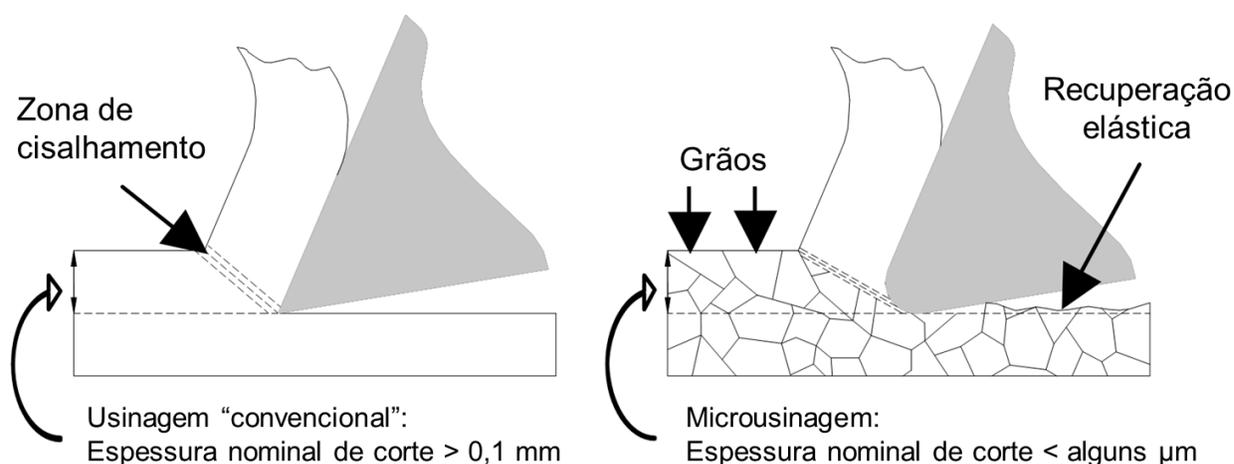
Os princípios da microusinagem são semelhantes aos da usinagem convencional. A superfície da peça é usinada e o material removido, mecanicamente, com o uso de microferramentas. No entanto, a microusinagem apresenta algumas características distintas das observadas na macrousinagem, por conta das menores dimensões envolvidas no processo de microcorte (CHAE, PARK E FREIHEIT, 2006).

Dornfeld, Min e Takeuchi (2006) explicam que diversos problemas que ocorrem na microusinagem são problemas já existentes na macrousinagem, que são ressaltados por conta do efeito de escala do processo. Os autores deixam claro que, em geral, a redução de escala do processo não muda suas características. Apesar disso, devido às dimensões envolvidas na peça ou na sua microestrutura serem relativamente pequenas em comparação às ferramentas de corte usadas na microusinagem, o efeito de

tamanho pode alterar os aspectos da usinagem.

Efeitos de escala comumente observados na microusinagem ocorrem quando a espessura de corte é da mesma ordem que o raio de aresta da ferramenta ou, ainda, quando a microestrutura do material da peça possui grande influência sobre o mecanismo de corte. De modo mais específico, conforme a quantidade de material removido diminui, a geometria da ferramenta, o tamanho e a orientação dos grãos do material da peça passam a influenciar a precisão, o acabamento da peça e a integridade superficial do componente usinado. (DORNFELD, MIN e TAKEUCHI, 2006).

A Figura 2.1 mostra a relação da escala dimensional entre a ferramenta e o tamanho de grão do material, de modo que na microusinagem o acabamento da peça e o mecanismo de formação do cavaco serão mais afetados pelas propriedades do material usinado. Dessa forma, ao cortar materiais policristalinos com pequena espessura nominal de corte, o mecanismo de remoção de material será influenciado pelos grãos do material e sua respectiva orientação cristalográfica (Valente, 2003).

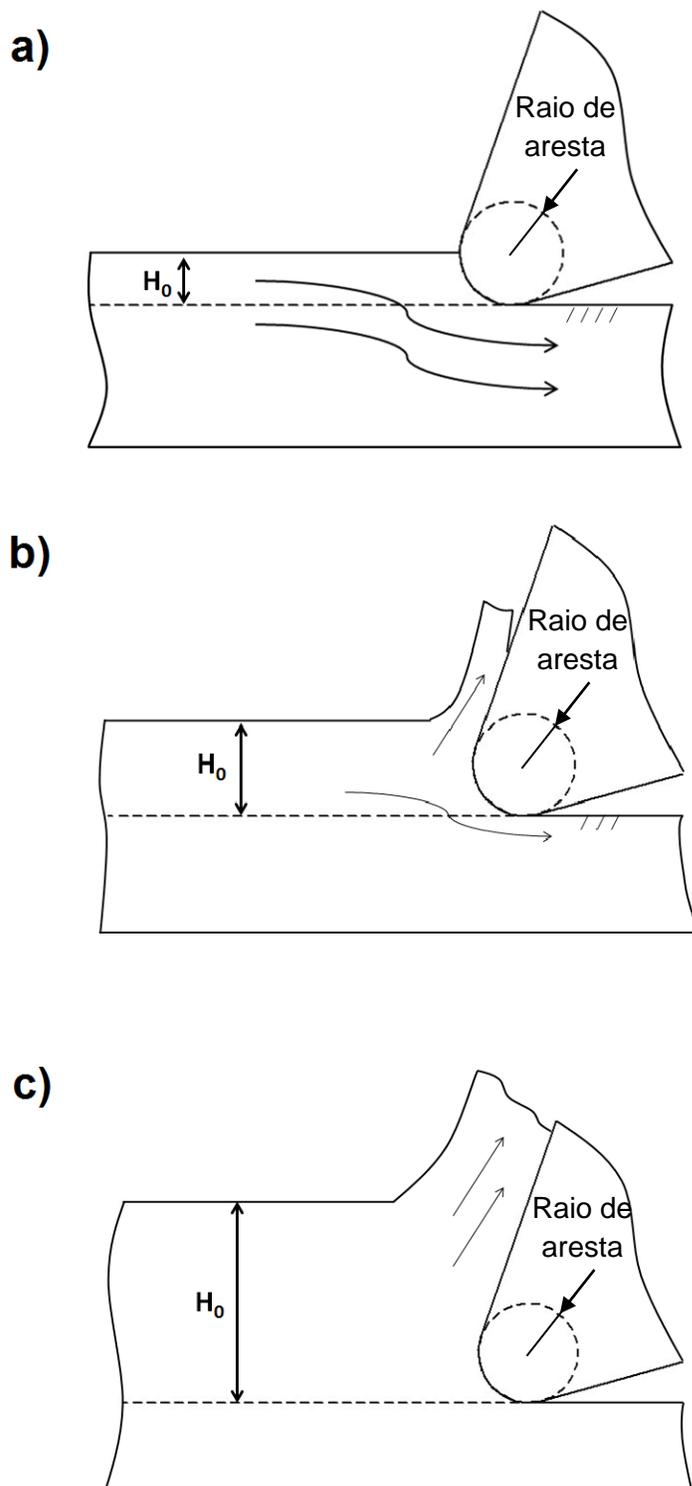


**Figura 2.1 - Comparação da escala entre os grãos e a ferramenta, considerando a usinagem com parâmetros convencionais e microusinagem**  
 Fonte: Adaptado de Valente (2003).

Cuba Ramos et al. (2012) acrescentam que, na usinagem convencional, a espessura de corte é muito superior ao raio de aresta da ferramenta. Na microusinagem, no entanto, o valor de raio de aresta não pode mais ser desconsiderado, na medida em que passa a influenciar o comportamento do processo de corte. Nesse caso, haverá uma mínima espessura de cavaco para que ele seja formado.

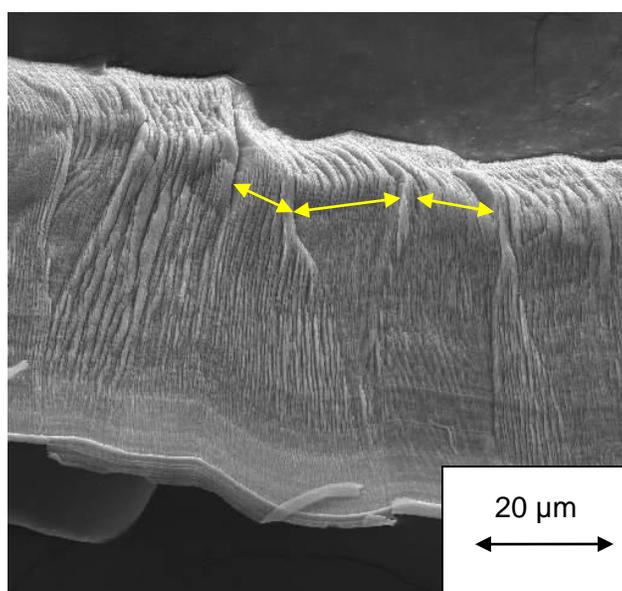
A formação de cavaco é um processo dinâmico e não linear. A compreensão do mecanismo de formação de microcavacos é importante na medida em que permite a previsão precisa das forças de corte. Nesse contexto, é importante encontrar a mínima espessura de cavaco, já que o cavaco não irá se formar enquanto a espessura de corte for menor que o raio de aresta (CHAE, PARK e FREIHEIT, 2006).

Os autores ainda explicam que, quando a espessura nominal de corte é menor que o valor crítico de mínima espessura de corte, ocorre apenas deformação elástica e não há remoção de material, fenômeno chamado de *ploughing*. Conforme a espessura nominal de corte se aproxima do valor crítico, começa a formação de cavaco por cisalhamento, ao mesmo tempo em que continua a ocorrer deformação. Como consequência, o volume de material removido ainda é menor do que o planejado. Para a espessura nominal de corte acima do valor crítico, o fenômeno de deformação diminui drasticamente e o principal mecanismo passa a ser o de cisalhamento. Neste caso, praticamente toda a profundidade de usinagem é removida em forma de cavaco (CHAE, PARK e FREIHEIT, 2006). A figura 2.2 ilustra essa situação esquematicamente.



**Figura 2.2 – Esquema da interação da ferramenta de corte com a peça durante a usinagem, mostrando a relação entre a espessura nominal de corte ( $H_0$ ) e o mecanismo de remoção de material abaixo do valor crítico de mínima espessura de corte (a), próximo ao valor crítico (b) e muito acima do valor crítico (c)**

Alterações na microestrutura do material da peça usinada podem modificar as características do cavaco. Por exemplo, conforme o corte da peça acontece, o ângulo de cisalhamento muda a cada grão do material, o que pode causar modificações nas propriedades do material, como o módulo de elasticidade (POPOV et al., 2006). Isso se reflete na espessura das lamelas do cavaco, que serão mais espessas se o grão for menos resistente e mais finas se for mais resistente. A figura 2.3 exemplifica essa variação da espessura das lamelas de um cavaco durante o torneamento de uma liga Al-Mg.

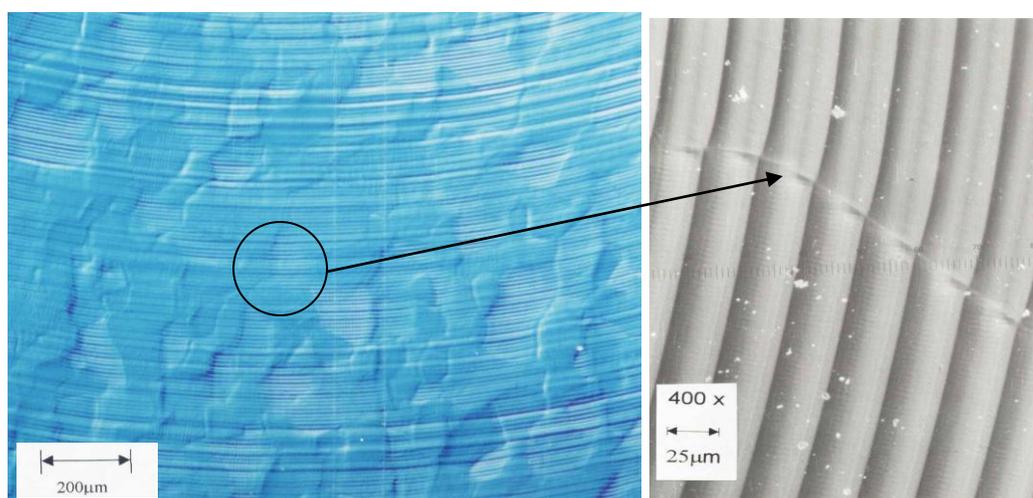


**Figura 2.3 - Variação da espessura das lamelas de um cavaco, durante a usinagem de uma liga Al-Mg**

**Fonte:** próprio autor

Em relação ao microfresamento, o autor explica que, ao longo do processo de corte, são formadas microtrincas no contorno de grão do material da peça e ocorre o movimento de discordâncias, o que aumenta a densidade de discordâncias na estrutura cristalográfica do metal. Conforme a resistência mecânica de um metal aumenta, a mobilidade das discordâncias diminui. Dado que a energia específica de corte para iniciar a formação de um cavaco depende da movimentação das discordâncias, conforme a resistência mecânica do metal aumenta, serão necessárias maiores forças de corte.

Popov et al. (2006) ainda acrescentam que o refino de grãos de metais pode beneficiar a sua microusinagem. É possível diminuir vibrações na ponta da ferramenta causadas por mudanças na orientação cristalográfica do metal, já que uma maior quantidade de grãos, com diversas orientações, é cortada ao mesmo tempo. O refino da microestrutura do material proporciona melhores propriedades mecânicas na medida em que os contornos de grão impedem a movimentação de discordâncias. A Figura 2.4 mostra distorções que ocorrem na superfície de um material usinado conforme a ferramenta atravessa diferentes contornos de grão.



**Figura 2.4 – Distorções na superfície de material usinado na transição entre diferentes grãos**

**Fonte:** próprio autor

### 2.1.3 Aplicações

A motivação para o estudo da microusinagem é o aumento da utilização de microcomponentes na indústria. Na medida em que as dimensões de peças obtidas por usinagem diminuem, os processos envolvidos na sua fabricação também devem acompanhar essa mudança.

Bicos de injeção, na indústria automobilística, são exemplos de peças de pequeno tamanho que demandam processos diferenciados na sua fabricação. Masuzawa (2000) explica que, de forma a atingir maior eficiência em relação ao consumo de combustível nos motores, o projeto de bicos de injeção deve buscar a

diminuição de seu tamanho. O autor ainda ressalta a importância de microcomponentes no campo da biotecnologia, já que a área envolve o estudo de genes e células. Produtos microusinados também são importantes para a medicina, na medida em que permitem exames e cirurgias menos invasivos e menos dolorosos. Nesse contexto, a microusinagem é um importante meio de se conseguir fabricar microprodutos (MAZUSAWA, 2000).

Dornfeld, Min e Takeuchi (2006) acrescentam que a força motriz para a miniaturização de produtos é a busca por peças mais leves, com melhor acabamento e maior precisão, simultaneamente com a redução do custo do componente. Os autores afirmam que essa situação abrange desde instrumentos eletromecânicos até dispositivos médicos e pode ser atingida através da microusinagem.

Somados às aplicações descritas, componentes mecânicos reduzidos à escala de micrômetros também são utilizados na indústria óptica, de comunicação e de aviônica. Alguns exemplos específicos de produtos miniaturizados que exigem a manufatura adequada incluem células de combustível, microbocais para jatos de alta temperatura, micromoldes e microfuros para fibra óptica (LIU, DEVOR e KAPOOR, 2004).

A operação de microfresamento, especificamente, se destaca também na produção de peças para a indústria de eletrônicos, sensores e de moldes e matrizes. Comparada a processos químicos de manufatura, a microusinagem tem a vantagem de permitir a produção de peças pequenas com formas complexas em três dimensões. De modo mais específico, o microfresamento possui ampla utilização para a produção de ferramental para microinjeção e estampagem a quente. Outras aplicações que dependem da manufatura de micropeças são relógios, carcaças para micromotores, insertos de ferramentas para fabricação de microfiltros e as próprias microfresas que podem chegar a escalas micrométricas (ALTINTAS e JIN, 2011; POPOV et al., 2006).

A qualidade da peça a ser obtida por microusinagem é fortemente afetada pela microestrutura do material. O mecanismo de refino de grão, por exemplo, permite uma melhora na integridade superficial do componente a ser usinado. A redução do tamanho do grão do material a ser microusinado possui influência direta na rugosidade da peça, isto é, é possível atingir um acabamento melhor (POPOV et al., 2006).

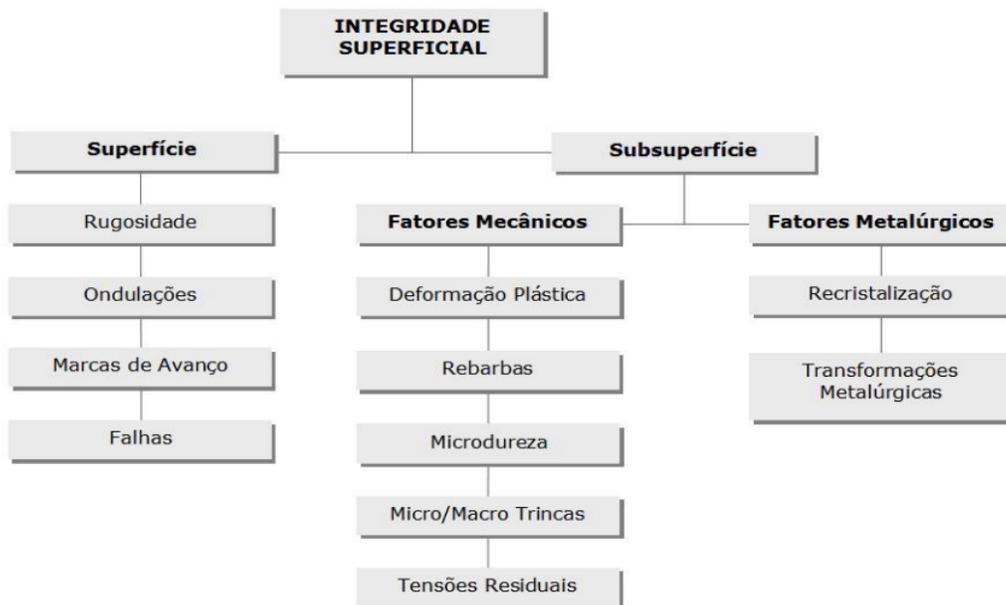
## 2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Em 1964 os pesquisadores Field e Kahles citaram, pela primeira vez, o termo "integridade superficial", definindo-o como o conjunto de alterações na superfície da peça, causado pela ação natural do processo de fabricação. O conceito de integridade superficial de uma peça envolve o estudo da qualidade da sua superfície, de modo a analisar as alterações que a peça sofre na sua superfície e nas camadas abaixo desta. A superfície submetida ao processo de usinagem resulta de mecanismos que envolvem deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais e reações químicas. Todos esses fatores afetam a qualidade de uma superfície. Dessa forma, utiliza-se o termo integridade superficial para descrever e caracterizar essas alterações (MACHADO et al., 2009).

### 2.2.1 Classificações

Davim (2010) explica que a usinagem gera uma superfície que pode ser caracterizada em relação à sua forma (acabamento), características metalúrgicas e propriedades mecânicas. Para o estudo de formação da superfície, o autor ainda propõe três classificações: alterações químicas, alterações mecânicas e alterações térmicas. As alterações químicas envolvem mudanças químicas nas camadas próximas à superfície. Entre as alterações mecânicas, destacam-se deposições de material, deformações plásticas e rebarbas. Quanto às alterações térmicas, podem ocorrer transformações de fase, trincas e têmperas. A combinação entre alterações mecânicas e térmicas também podem provocar tensões residuais.

Machado et al. (2009) estabelecem uma classificação que distingue as alterações envolvidas na integridade superficial entre a superfície da peça (acabamento) e sua subsuperfície. Entre as alterações superficiais, os autores definem as alterações geométricas da peça, como ondulações, falhas e rugosidade. Em relação às alterações subsuperficiais, eles subdividem entre fatores mecânicos e metalúrgicos. A Figura 2.1 ilustra essa classificação.



**Figura 1 - Classificação da integridade superficial**

**Fonte:** Adaptado de Machado et al. (2009)

Field et al (1972) determinaram um conjunto mínimo de alterações para caracterizar a integridade superficial de uma peça. Os autores explicam que primeiramente deve ser analisada a textura superficial da peça, seguida do estudo de sua macroestrutura para a observação de macrotrincas. Também deve ser analisada a microestrutura do material, de modo a observar a ocorrência de microtrincas, deformações plásticas, transformações de fase, ataques intergranulares e outros defeitos menos comuns. O conjunto mínimo de dados para integridade superficial é completado pela análise da microdureza do material.

Para uma análise mais detalhada sobre a integridade superficial, podem ser realizados testes de fadiga, testes de corrosão sob tensão, estudos sobre tensões residuais e outros ensaios para a determinação das propriedades mecânicas do material, como fluência, tensão de escoamento e tenacidade (FIELD et al., 1972).

Dessa forma, o estudo da integridade superficial de uma peça usinada permite caracterizá-la quanto às alterações que podem ocorrer durante o processo de corte. A medida de um conjunto mínimo de informações a respeito da integridade superficial é importante, já que influencia o comportamento funcional da superfície, a precisão da

usinagem e colabora com o entendimento do mecanismo de remoção do material. Seguindo a classificação proposta na Figura 2.1, cabe uma explicação mais detalhada sobre as alterações na superfície e subsuperfície da peça.

### **2.2.2 Alterações Superficiais**

Segundo Davim (2010), a superfície de uma peça pode ser definida de duas formas, através de seu perfil nominal e o perfil real. O perfil nominal se trata daquele especificado no desenho da peça, que não leva em conta as irregularidades superficiais. Já o perfil real é o perfil da superfície obtido através de instrumentos de medição mecânicos ou ópticos. O autor ainda divide os desvios geométricos existentes no perfil real entre desvios macrogeométricos, como erros de forma e ondulações, e desvios microgeométricos, como a rugosidade.

A rugosidade de uma superfície é um modo importante de indicar a qualidade do produto e pode, em muitos casos, ser uma especificação do projeto do componente. É de grande importância atingir a rugosidade adequada para garantir o comportamento funcional da peça (BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003). Por exemplo, um baixo valor de rugosidade é importante para superfícies de mancais, enquanto a superfície de discos de freio exige um valor bem mais alto. Já as superfícies que trabalham sob lubrificação, como paredes dos cilindros internos, devem apresentar valores de rugosidade característicos (MACHADO et al., 2009).

Os autores ainda explicam que a rugosidade é composta por irregularidades finas ou erros microgeométricos causados pelo próprio processo de corte e depende de diversos parâmetros do processo, como o material da peça, a geometria e o material da ferramenta, a máquina e a operação de usinagem realizada. O espaçamento entre cada irregularidade que compõe a rugosidade é inferior ao tipo de erro que é considerado uma ondulação.

É importante ressaltar que a rugosidade se refere a alterações na superfície da peça que são inerentes ao processo de usinagem, ou seja, não podem ser evitadas. As ondulações, por outro lado, são irregularidades causadas por vibrações e flexões da ferramenta ou da peça, relacionadas à força de usinagem, temperatura de corte ou a

problemas com a fixação da peça e ferramenta. As marcas de avanço indicam a relação de movimento relativo entre a peça e a ferramenta, durante o processo de usinagem. Quanto às falhas, trata-se de interrupções não-intencionais, inesperadas e indesejadas na topografia da superfície da peça. Geralmente, surgem a partir de defeitos no material da peça, como inclusões, vazios, bolhas ou trincas (MACHADO et al., 2009).

A análise do acabamento e da textura superficial de uma peça pode ser realizada de diversas maneiras, e abrange, desde a caracterização visual ou pelo tato, até o uso de microscopia eletrônica de varredura. Griffiths (2001) diferencia as técnicas de medição do acabamento em duas classes, 2D e 3D. As técnicas bidimensionais são mais convenientes e rápidas, como o perfilômetro de contato, enquanto técnicas tridimensionais, como a microscopia eletrônica de varredura, são mais lentas e caras. Embora cada técnica de análise tenha suas vantagens e desvantagens específicas, a perfilometria é a técnica mais utilizada para verificação do acabamento de peças usinadas.

A medida mais utilizada da rugosidade, adotada pela ABNT, é o sistema da linha média. A partir do perfil medido pelo perfilômetro, é traçada uma linha média paralelamente ao comprimento de amostragem, de modo que a soma das áreas do perfil acima e abaixo dela sejam as mesmas. Os parâmetros de rugosidade, como  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_t$ , são então determinados a partir dessa linha (OLIVEIRA, 2006).

No entanto, na maioria dos casos, não é suficiente a representação bidimensional da superfície acabada, como é feito em perfilômetros 2D de contato. Nesses casos, além da opção de uma análise qualitativa do acabamento através de técnicas de microscopia, pode-se verificar a rugosidade por perfilometria 3D. Dessa forma, os parâmetros de rugosidade são calculados tridimensionalmente (MACHADO et al., 2009).

### 2.2.3 Alterações subsuperficiais

As alterações subsuperficiais são aquelas que ocorrem nas camadas logo abaixo da superfície da peça. Em geral, as transformações na subsuperfície do material acontecem de modo gradual e não existe uma linha que divide com precisão as camadas subsuperficiais, que sofreram alterações, das camadas não alteradas do material. Existem formas variadas de alterações subsuperficiais que podem melhorar ou piorar o desempenho da peça (GRIFFITHS, 2001).

As alterações subsuperficiais podem ser divididas entre alterações mecânicas e alterações metalúrgicas. Entre as alterações mecânicas, destacam-se a deformação plástica, as alterações de microdureza, a formação de macro e microtrincas e a tensão residual. Quanto às alterações metalúrgicas, podem ocorrer alterações no tamanho dos grãos do material e mudanças de fase.

A deformação plástica ocorre quando a tensão de escoamento do material é excedida, de forma a deformar a sua estrutura. A análise da microestrutura do material que sofreu deformação plástica revela um alongamento dos grãos na direção paralela à superfície, em direção ao fluxo de deformação gerado pelo cisalhamento. A deformação plástica leva à formação de rebarbas na borda da superfície usinada. A formação de rebarbas também pode estar ligada à formação de aresta postiça de corte durante o processo de usinagem.

As alterações na microdureza de uma peça usinada podem estar relacionadas a deformações plásticas sofridas ao longo do processo ou a alterações metalúrgicas na peça. Durante a deformação plástica, as discordâncias do material se movimentam, multiplicam-se e interagem entre si, adquirindo degraus e formando emaranhados, de modo que a sua movimentação exige tensões crescentes. Esse fenômeno, conhecido como encruamento ou endurecimento por deformação plástica, leva ao aumento da microdureza do material (PADILHA, 2000). Quanto às alterações metalúrgicas, as altas temperaturas envolvidas no processo de corte podem provocar mudanças de fase do material. Como exemplo, a alta temperatura, associada a um resfriamento rápido, pode provocar a formação de martensita não revenida ou, ainda, causar o revenimento da martensita já existente na peça. O primeiro caso aumenta a microdureza da peça,

enquanto o segundo diminui (MACHADO et al., 2009).

É comum a ocorrência de trincas nos processos convencionais e não convencionais de usinagem. Seu surgimento é ainda mais frequente na usinagem de materiais frágeis. A deformação plástica excessiva numa superfície também pode levar à nucleação e propagação de trincas. A sua ocorrência pode inutilizar uma peça, na medida em que diminui o desempenho e a vida do componente. Trata-se de defeitos permanentes na peça, diretamente ligados à fluência, fadiga e fratura (GRIFFITHS, 2001).

Tensões residuais são as tensões estáticas que permanecem em estado de equilíbrio triaxial quando as forças e momentos externos à peça deixam de atuar sobre ela. Elas ocorrem sempre que uma área de um componente é submetida à deformação plástica devido a forças externas e internas. A causa dessas forças pode estar relacionada a carregamentos mecânicos, processos de difusão ou transformações de fase, na medida em que provocam a deformação da peça. Em geral, tensões residuais podem provocar contração, formação de trincas e fratura da peça e podem alterar as propriedades mecânicas do material (DAVIM, 2010).

Existem dois tipos de tensões residuais: as de tração e as de compressão. Geralmente as tensões residuais de compressão são preferíveis, já que podem diminuir as tensões aplicadas na peça e também podem diminuir o tamanho das trincas superficiais. Dessa forma, a vida em fadiga de uma peça que apresenta tensões residuais de compressão será maior do que a da peça que apresenta tensões residuais de tração. Ou seja, tensões residuais de compressão são benéficas ao desempenho da peça, enquanto as de tração são prejudiciais, embora existam exceções (GRIFFITHS, 2001).

#### **2.2.4 Variáveis que influenciam a integridade superficial**

Existem diferenças em relação à influência de alguns fatores no acabamento de uma peça, de acordo com a faixa dos parâmetros de usinagem utilizados e com a combinação máquina-ferramenta (RISBOOD, DIXIT e SAHASRADUHE, 2003). Mas é possível estabelecer algumas relações gerais sobre a forma como algumas operações

e parâmetros de usinagem alteram a integridade superficial de uma peça.

O acabamento de uma peça é influenciado por diversos parâmetros, como a rigidez da máquina-ferramenta, as condições de corte e a geometria e material da peça e da ferramenta. Machado et al. (2009) explicam que os seguintes fatores melhoram o acabamento de uma peça usinada, isto é, diminuem sua rugosidade: menores flexões geradas pelos esforços de usinagem, menores vibrações da máquina-ferramenta, ponta da ferramenta com raio de arredondamento, posicionamento adequado da peça e da ferramenta, material de peça sem defeitos, correto alinhamento da máquina-ferramenta e ferramenta de corte livre de defeitos ou aresta postiça de corte (APC).

Segundo Machado et al (2009), o avanço influencia a rugosidade de uma peça, na medida em que as alturas dos picos e vales das marcas de avanço levam ao aumento da rugosidade. Quanto à velocidade de corte, em geral, o seu aumento leva a um melhor acabamento, desde que as vibrações da máquina não aumentem a ponto de prejudicar o desempenho da operação de usinagem. A temperatura se eleva conforme maiores velocidades de corte são utilizadas, o que causa uma diminuição das forças de usinagem e colaboram com a melhora no acabamento. Baixas velocidades de corte podem levar à formação de aresta postiça de corte (APC), a qual, ao longo do processo de corte, cisalha e permanece aderida à superfície em usinagem. Dessa forma, há uma piora no acabamento, principalmente se forem combinadas baixas velocidades de corte com altos valores de avanço. A profundidade de usinagem também possui um efeito negativo na rugosidade e pode provocar maiores ondulações, na medida em que leva ao aumento das forças e, conseqüentemente, à possibilidade de flexões (MACHADO et al., 2009).

As tensões residuais provocadas nas peças variam conforme a operação de usinagem. Embora o processo dependa de outros fatores, como as condições em que a condição de usinagem é realizada, Jawahir et al. (2011) conduziram experimentos que permitiram relacionar algumas operações de usinagem com seus efeitos na integridade superficial e no desempenho do componente. Os resultados revelaram que as operações de retificação provocaram tensões residuais de compressão na superfície, enquanto operações de eletroerosão (EDM) induziram tensões residuais trativas no material. As operações de fresamento, embora dependam dos parâmetros de usinagem

utilizados, geraram tensões de compressão mais altas.

Dessa forma, fica clara a importância do estudo da integridade superficial da peça em relação ao processamento a que ela foi submetida. É importante, também, avaliar a influência de cada variável na integridade superficial para se obter uma peça com as características desejadas.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

As informações das etapas experimentais foram divididas entre os ensaios de macrousinagem e microusinagem. Cada ensaio foi dividido entre seu planejamento, os equipamentos utilizados, os corpos de prova pré-usinados e os procedimentos experimentais detalhados.

#### **3.1 MACROFRESAMENTO**

A etapa experimental de macrofresamento envolveu a análise inicial da microestrutura dos corpos de prova. Em seguida, foram executados os ensaios de macrousinagem e as amostras usinadas foram analisadas quanto ao acabamento, dureza superficial, microestrutura e microdureza da borda usinada.

##### **3.1.1 Preparação dos ensaios**

Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação (OPF), parte do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA), que se encontra na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC – USP).

A preparação dos ensaios envolveu o preparo de corpos de prova, definindo-se a geometria e as dimensões adequadas aos ensaios de macrofresamento, assim como a especificação das ferramentas de corte e das condições de usinagem. Para os ensaios de usinagem, foi proposto o fresamento de topo em centro de usinagem CNC.

As condições de usinagem foram determinadas de acordo com os conceitos de usinagem de alto desempenho e com os dados das ferramentas de corte fornecidos pelo fabricante. Os ensaios foram realizados sem o uso de fluido de corte e com uma largura de usinagem ( $a_e$ ) constante de 2 mm. O pequeno valor de  $a_e$  foi escolhido para garantir a obtenção de uma integridade superficial homogênea.

Para o estudo dos efeitos da relação entre o avanço por dente ( $f_z$ ) e do tamanho médio de grão do material na integridade superficial da peça, os ensaios de usinagem foram repetidos com dois valores de avanço para dois tipos de material. O menor valor de avanço por dente determinado foi de 25  $\mu\text{m}$ , igual ao valor de raio de aresta das ferramentas de corte utilizadas. Os dois tipos de aço utilizados possuem a mesma composição química, embora um deles tenha sido submetido a um processo de refino de grão, de modo a ensaiar dois materiais com tamanhos médios de grãos distintos.

Dessa forma, os ensaios de macrofresamento foram realizados de acordo com as condições da Tabela 3.1. De modo a facilitar a identificação dos corpos de prova, foram utilizadas algumas nomenclaturas. A condição de usinagem C1 se trata do material como recebido (CR), isto é, não submetido ao processo de refino de grão, e com o menor valor de avanço por dente. A condição C2 também se trata do material CR, mas com o maior valor de avanço por dente. A condição C3 foi realizada com o material com tamanho de grãos ultrafino (GUF, isto é, grãos ultrafinos) e com o menor valor de avanço por dente. Por fim, a condição C4 designa o ensaio realizado com o material GUF e com o maior valor de avanço por dente. Para cada uma das condições apresentadas, foi feita uma réplica do ensaio para outra peça, utilizando-se o outro lado da mesma ferramenta de corte.

**Tabela 3.1 – Condições de usinagem usadas no ensaio de macrofresamento**

<b>Parâmetros de usinagem</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
Velocidade de corte [m/min]	800			
Profundidade de usinagem [mm]	0,5			
Avanço por dente [ $\mu\text{m}/z$ ]	25	300	25	300
Largura de usinagem [mm]	2			
Raio de aresta [ $\mu\text{m}$ ]	25			
Tamanho médio de grão [ $\mu\text{m}$ ]	11		0,7	

### 3.1.2 Equipamentos e máquinas

Os ensaios de macrofresamento foram realizados num centro de usinagem CNC Hermle C800U, de três eixos e rotação máxima de 24000 rpm. As ferramentas de corte utilizadas foram especificadas com ajuda da Sandvik Coromant, fabricante de ferramentas. De modo a determinar os valores de avanço dos ensaios, foi necessário o conhecimento do raio de aresta dessas ferramentas. Foram utilizadas pastilhas de metal duro revestidas com PVD-TiN (código R390-11 T3 08M-PL 1025), de modo a suportar as altas rotações do eixo-árvore e gerar uma superfície com vários passes de  $a_e$  para a posterior análise da integridade superficial.

A análise do acabamento foi feita com um perfilômetro ótico Veeco, modelo Wyko NT1100 e com um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philips, modelo XL30-TMP.

A análise da microestrutura da borda usinada foi realizada no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC – USP). As amostras foram cortadas transversalmente à direção do corte usando uma cortadeira metalográfica de precisão da marca Arotec, modelo Arocor 60. As amostras cortadas foram então embutidas e polidas para fazer o ataque químico para revelação da microestrutura da borda usinada, para serem fotografadas usando um microscópio óptico da marca Zeiss, modelo LabA1.

Foram feitas medidas de microdureza das amostras, tanto na superfície usinada como ao longo da profundidade dos corpos de prova. Para isso, foi utilizado um microdurômetro Leica VMHT MOT, que se encontra no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC – USP).

### 3.1.3 Corpos de prova

O material utilizado nos ensaios, denominado comercialmente como COS AR60, foi fornecido pela Usiminas-Cubatão S/A na forma de chapas grossas. A fabricação de corpos de prova com o aço especificado foi possível através de uma parceria entre o Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação (OPF) e o Departamento de

Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Para a obtenção de amostras de material com grãos ultrafinos, corpos de prova de dimensões de 25x25x100 mm, extraídos da chapa grossa, foram submetidos a um processamento termomecânico de laminação a morno.

A Tabela 3.2 mostra a composição química do material utilizado nos corpos de prova para os ensaios de usinagem.

**Tabela 3.2 – Composição química do material utilizado (% em peso)**

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	V	Ti	Ceq
0,15	1,49	0,027	0,009	0,27	0,046	0,005	0,276	0,008	0,048	0,044	0,016	0,40

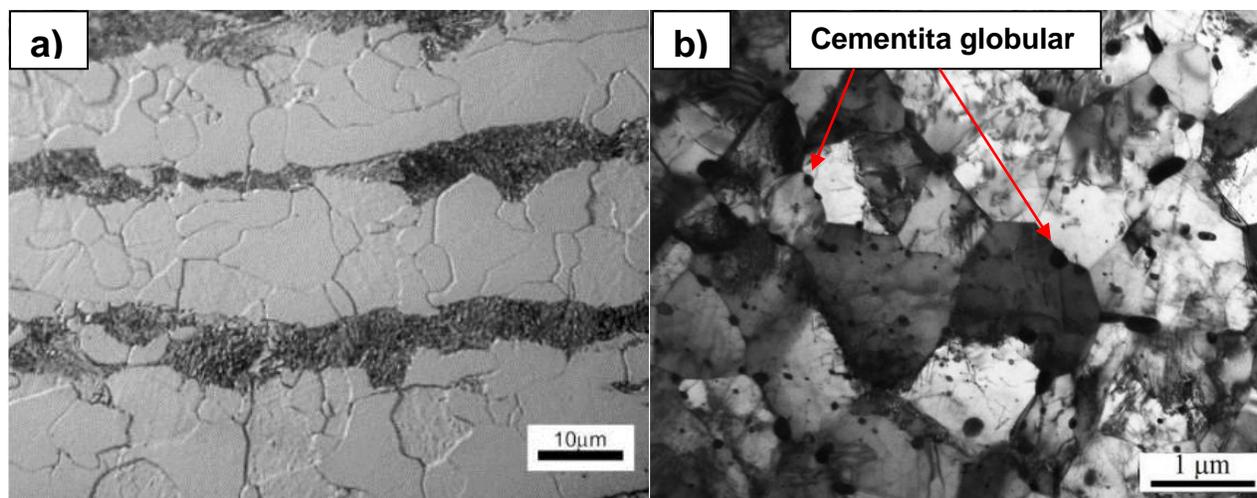
As principais características metalúrgicas e propriedades mecânicas do material podem ser visualizadas na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Características metalúrgicas e mecânicas dos corpos de prova**

Condição Metalúrgica	TG* [ $\mu\text{m}$ ]	Dureza [HV]	Limite de escoamento [GPa]	Energia Charpy [J]
Como recebido [CR]	11	192	474	176
Grãos ultrafinos [GUF]	0,7	216	510	285

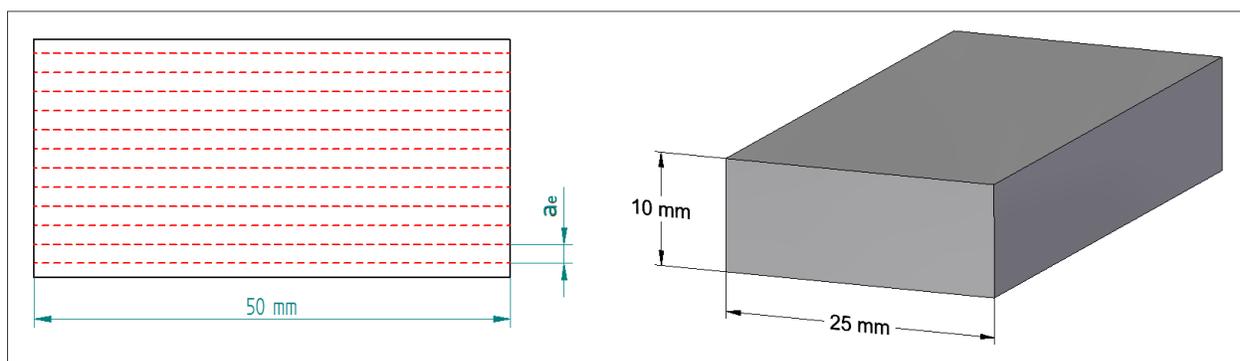
\* Tamanho médio de grão medido de acordo com a norma ASTM E112-96

A Figuras 3.1 mostra a microestrutura, respectivamente, do material CR (a) e GUF (b), antes da usinagem. Observa-se pela Figura 3.1(a), obtida por microscopia eletrônica de varredura, que o material CR apresenta microestrutura predominantemente ferrítica, com colônias esparsas de perlita. A Figura 3.1 (b), obtida por microscopia eletrônica de transmissão, revela que o material GUF apresenta microestrutura equiaxial dos constituintes, com cementita globular nos contornos de grão. Deve-se ressaltar a escala das figuras, que mostra que o material GUF possui grãos muito menores que o material CR.



**Figura 3.1 – Micrografia do material (a) CR e (b) GUF**

A forma dos corpos de prova para os ensaios de usinagem foi definida de modo a permitir a análise da microestrutura e microdureza da borda usinada, assim como do acabamento e da dureza da superfície. Dessa forma, foram fabricados corpos de prova prismáticos com uma área superficial adequada para o estudo da integridade superficial. A Figura 3.2 apresenta a geometria dos corpos de prova.



**Figura 3.2 – Geometria dos corpos de prova para o ensaio de macrofresamento**

### 3.1.4 Procedimento experimental

Após os ensaios de usinagem e a análise do acabamento das amostras, foram feitas medidas de dureza na sua superfície. Em seguida, as amostras foram cortadas e embutidas em resina, de modo a verificar as alterações na microestrutura decorrentes da usinagem. Medidas de microdureza foram realizadas ao longo da borda usinada, de modo a verificar a variação de dureza ao longo da profundidade das amostras.

#### 3.1.4.1 Ensaio de macrofresamento

Antes de iniciar os ensaios, foram realizados alguns testes de usinagem empregando-se velocidade de corte de 700 m/min para verificar a ocorrência de problemas como vibração da máquina ou instabilidade do porta insertos, que prejudicariam a integridade superficial da peça. Como tais defeitos não ocorreram, foi possível utilizar velocidades de corte maiores nos ensaios de usinagem, de valor de 800 m/min.

Para cada corpo de prova usinado, foi elaborada uma rotina CNC que atendesse aos requisitos geométricos do corpo de prova e às condições de usinagem definidas. Dessa forma, a ferramenta usinou uma superfície plana com um total de 10 passes ao longo da superfície, paralelamente ao comprimento de 50 mm do corpo de prova. Na extremidade dos corpos de prova, foram usinados dois passes adicionais, na entrada e saída da ferramenta, que foram desprezados da análise da integridade superficial por não representarem um  $a_e$  completo.

A usinagem do material foi realizada em corte concordante, de modo a obter uma superfície com melhor acabamento e diminuir o desgaste das ferramentas. No fresamento concordante, os sentidos dos vetores velocidade de corte e de avanço são os mesmos, o que faz com que os cavacos apresentem espessura máxima na entrada da ferramenta e mínima na saída.

A usinagem de 10 passes da ferramenta durante a usinagem buscou permitir a análise da superfície da peça, a caracterização da borda usinada e a medição da microdureza superficial. Ao longo do ensaio, foram monitorados possíveis problemas

com a fixação do corpo de prova, vibrações da máquina-ferramenta e com a formação de cavaco, de modo a garantir a eficácia do processo de usinagem realizado.

#### 3.1.4.2 Rugosidade

O acabamento das peças usinadas foi avaliado pelo perfilômetro ótico 3D, por conta de sua capacidade de representar toda uma região da superfície de cada amostra. O estudo da rugosidade por um perfilômetro de contato, por exemplo, ficaria limitado à análise de uma linha de um perfil da amostra, que não permite a observação da forma da superfície usinada.

As amostras foram posicionadas e alinhadas de modo que as superfícies usinadas ficassem perpendiculares ao feixe de luz. Dessa forma, foram geradas imagens planas e tridimensionais de regiões representativas, com uma escala de cores indicando a profundidade de defeitos e marcas de avanço sobre a superfície do material.

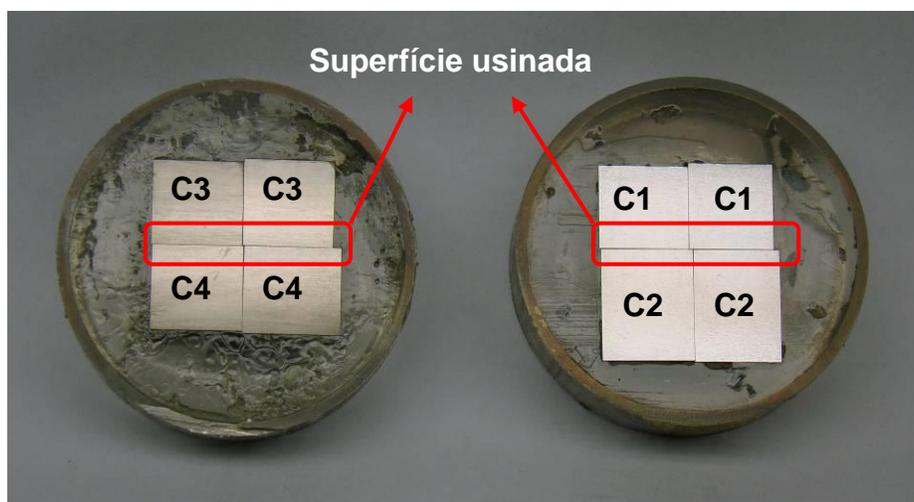
#### 3.1.4.3 Microdureza superficial

Foram realizadas medidas de microdureza da superfície dos corpos de prova, tanto antes como depois da usinagem. As medidas foram feitas com base nas especificações técnicas da fabricante do microdurômetro utilizado. Tanto para os corpos de prova CR como para os GUF, foram realizadas 10 medidas aleatórias sobre a superfície. O procedimento foi realizado de forma a permitir a comparação da superfície antes e depois da usinagem, quanto à sua microdureza.

O valor de carga utilizado foi de 100 gf, que foi o menor valor de carga que produziu endentações definidas sobre a superfície dos corpos de prova. Buscou-se utilizar o menor valor de carga possível para que a profundidade da endentação não ultrapassasse a espessura do material sujeita a alterações provocadas pela usinagem.

### 3.1.4.4 Microestrutura da borda usinada

Após a usinagem dos corpos de prova, foi analisada a sua microestrutura. Dessa forma, podem ser observadas as alterações que a usinagem provoca na microestrutura do material. Para tanto, foi realizado, novamente, um procedimento metalográfico para as amostras. Pequenas amostras dos corpos de prova usinados foram cortadas e embutidas em resina epóxi. O processo de corte deve ser efetuado suavemente, para que não provoque mudanças na microestrutura. As amostras usinadas nas condições C1 e C2, assim como suas réplicas de ensaio, foram embutidas em um único embutimento. O mesmo foi feito para as amostras usinadas nas condições C3 e C4. A Figura 3.3 ilustra como foram montadas as amostras embutidas, ressaltando a superfície que foi usinada (perpendicular ao plano da figura).



**Figura 3.3 – Amostras C1, C2, C3 e C4 embutidas junto de suas réplicas**

As amostras foram lixadas manualmente com granulometria de 120, 220, 320, 400, 600 e 1000, em sequência. Foi feito o polimento com alumina 1  $\mu\text{m}$  e pasta de diamante  $\frac{1}{4}$   $\mu\text{m}$ , seguido de sucessivos ataques químicos com Nital 2%, até os contornos de grão do material serem revelados.

As amostras foram então observadas por microscopia óptica e foram fotografadas no mesmo microscópio, com diferentes ampliações. Para fotografar com ampliações de 500 vezes, foi necessário fotografar a mesma região várias vezes,

variando a distância focal do microscópio. Essas fotografias foram unidas e editadas utilizando-se o software Adobe Photoshop CS5, de modo a obter figuras de melhor qualidade.

#### 3.1.4.5 Microdureza da borda usinada

As amostras embutidas, após serem fotografadas, foram submetidas a um novo ensaio de dureza, de modo a investigar a dureza ao longo da profundidade dos corpos de prova. Foram realizados três conjuntos de medidas de microdureza a partir a superfície usinada. Cada conjunto de medidas envolveu seis medidas em profundidades distintas. A primeira medida foi a 10  $\mu\text{m}$  da superfície usinada, aumentando a profundidade sucessivamente em 10  $\mu\text{m}$  até a profundidade de 50  $\mu\text{m}$ . Uma última medida na profundidade de 110  $\mu\text{m}$  buscou investigar a dureza numa profundidade mais distante da camada que poderia ter sido afetada pela usinagem. O procedimento foi realizado para todas as condições do ensaio de macro usinagem, isto é, nas condições C1, C2, C3 e C4.

## 3.2 MICROFRESAMENTO

Os ensaios de microusinagem foram preparados e realizados. As amostras foram analisadas quanto ao acabamento, através de técnicas de perfilometria óptica e microscopia eletrônica de varredura.

### 3.2.1 **Preparação dos ensaios**

A realização dos ensaios de microfresamento envolveu o preparo de corpos de prova, definindo-se a geometria e as dimensões adequadas aos ensaios, assim como a especificação das ferramentas de corte e das condições de usinagem. Para esses ensaios, foi proposto o fresamento de topo em centro de usinagem CNC.

As condições de usinagem foram fixadas de acordo com o conceito de microusinagem e com os dados das ferramentas de corte utilizadas. Os ensaios foram realizados sem emprego de fluido de corte, na condição de corte concordante, com largura de usinagem ( $a_e$ ) constante e igual a 130  $\mu\text{m}$ . O pequeno valor de  $a_e$  foi escolhido para garantir a obtenção de uma integridade superficial homogênea.

Para o estudo dos efeitos da relação entre o avanço por dente ( $f_z$ ) e o tamanho médio de grão do material na integridade superficial da peça, agora numa escala de usinagem micro, os ensaios de usinagem foram repetidos com dois valores de avanço para dois tipos de material. Foi proposto adotar como avanço mínimo o valor de 5  $\mu\text{m}$ , equivalente ao valor de raio de aresta das ferramentas de corte utilizadas. Os dois tipos de aço utilizados possuem a mesma composição química, embora um deles tenha sido submetido a um processo de refino de grão, de modo a ensaiar dois materiais com tamanho médio de grãos distintos.

Dessa forma, os ensaios de microfresamento foram realizados de acordo com as condições do Tabela 3.4. De modo a facilitar a identificação dos corpos de prova, foram utilizadas algumas nomenclaturas. A condição de usinagem C5 se trata do material como recebido (CR), isto é, não submetido ao processo de refino de grão, e com o menor valor de avanço por dente. A condição C6 também se trata do material CR, mas com o maior valor de avanço por dente. A condição C7 foi realizada com o material com tamanho de grão ultrafino (GUF) e com o menor valor de avanço por dente. Por fim, a condição C8 designa o ensaio realizado com o material GUF e com o maior valor de avanço por dente.

**Tabela 3.4 – Condições de usinagem usadas no ensaio de microfresamento**

<b>Parâmetros de usinagem</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>	<b>C8</b>
Velocidade de corte [m/min]	135			
Profundidade de usinagem [μm]	32			
Avanço por dente [μm/z]	5	18	5	18
Largura de usinagem [μm]	130			
Raio de aresta [μm]	5			
Tamanho médio de grão [μm]	11		0,7	

### 3.2.2 Equipamentos e máquinas

A preparação dos corpos de prova, assim como os ensaios de usinagem, foram conduzidos em um centro de usinagem CNC Mikrotools, modelo MPM4020L, 3 eixos. O fuso de alta velocidade para processos de usinagem possui faixa de velocidade de 10000-60000 rpm com sistema de mudança de ferramenta pneumático e potência de 1,3 kW à 60000 rpm.

Microfresas revestidas pela técnica de PVD (*Physical vapor deposition*) apresentam valores de raio de aresta constantes e em torno de 3 e 5 μm, valores importantes para a determinação dos valores de avanço nos ensaios de microfresamento. As microfresas e porta-fresa empregados nos ensaios de microfresamento foram especificados com auxílio da OSG Sulamericana, fabricante de ferramentas. As microfresas cilíndricas apresentam diâmetro de trabalho para o corte de 0,8 mm, diâmetro de haste de 6 mm. Para fixação das ferramentas no fuso foram utilizados cones de fixação modelo ATC 2.10.6 e pinças modelo SRP de 4 e 6 mm, fornecidos pelo fabricante da máquina-ferramenta. Uma microfresa nova foi utilizada para cada ensaio.

Os equipamentos para coleta e análise dos resultados seguem os mesmos adotados nos estudos de macrofresamento, isto é, os mesmos modelos de microscópio eletrônico de varredura (Phillips, modelo XL-30-TPM) e perfilômetro óptico (Veeco, modelo Wyko NT1100).

### 3.2.3 Corpos de prova

Os corpos de prova dos ensaios de microfresamento utilizaram o mesmo material dos ensaios de macrofresamento. Isto é, foi utilizado aço comercialmente denominado como Cos Ar 60. O material CR são aqueles com o material conforme recebido da empresa que fabrica o material, enquanto o GUF foi submetido a um processo termomecânico de refino de grãos.

Foram preparados corpos de prova com a geometria mostrada na Figura 3.4, de modo a facilitar o estudo do acabamento da superfície usinada.

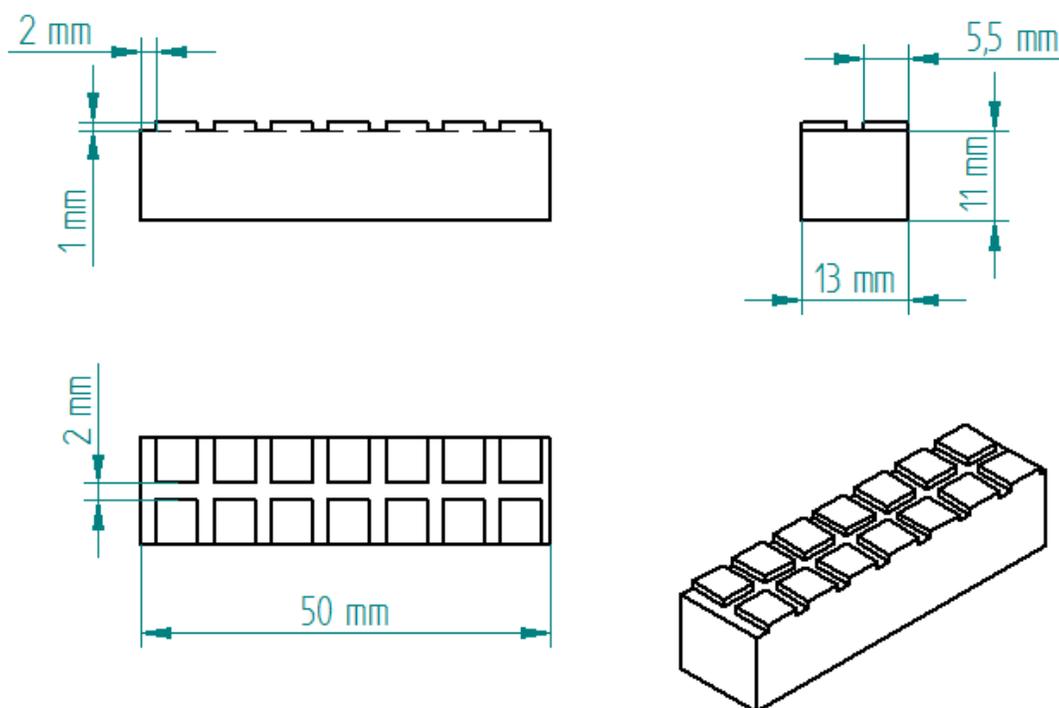


Figura 3.4 – Geometria dos corpos de prova para o ensaio de microfresamento

### 3.2.4 Procedimento experimental

São mostrados, a seguir, os procedimentos relativos aos ensaios de microfresamento e às análises do acabamento das amostras microusinadas.

#### 3.2.4.1 Ensaio de microfresamento

Para os ensaios de microusinagem realizados foi aplicada a velocidade do fuso de 54000 rpm, correspondendo a uma velocidade de corte de 135 m/min. Uma rotina CNC foi elaborada para usinar cada corpo de prova em sua respectiva configuração geométrica.

Os ensaios de usinagem foram realizados nas regiões mais altas dos corpos de prova, de modo a realizar uma condição de usinagem em cada região ressaltada. A Figura 3.5 mostra, em detalhes, uma das regiões retangulares. O tamanho e forma dessas regiões foram projetados de modo a facilitar a análise da superfície usinada com um valor de avanço constante, assim como permitir a posterior verificação da microdureza superficial e de sua microestrutura. A ferramenta realizou a usinagem de uma superfície plana, com um total de 30 passes de 5 mm de comprimento ao longo da área de um dos retângulos. Foram tomados os devidos cuidados com a fixação da ferramenta, com o comportamento da peça e da ferramenta e com a formação de cavaco, através de seu constante monitoramento durante os ensaios de usinagem.

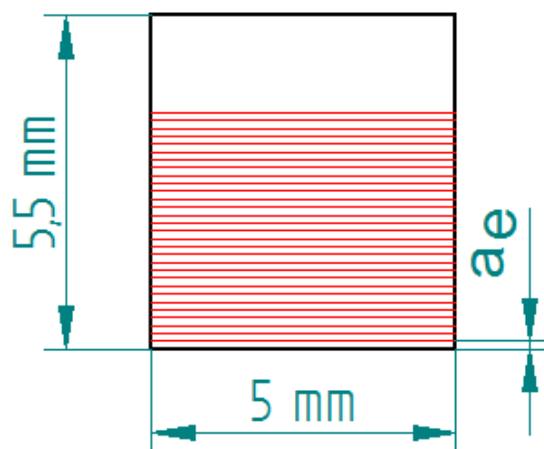


Figura 3.5 – Trajetória de usinagem de uma das regiões microfresadas

Os ensaios de microfresamento foram realizados em corte concordante por favorecer a preservação da ferramenta, na medida em que as direções dos vetores velocidade de corte e de avanço coincidem na tangente à penetração de trabalho. Para cada ensaio uma microfresa foi utilizada. A usinagem foi feita sem emprego de fluido de corte.

#### 3.2.4.2 Acabamento

O acabamento das peças microusinadas foi avaliado por um perfilômetro óptico 3D, segundo a mesma metodologia utilizada nos ensaios de macrousinagem.

Foram usados parâmetros de superfície como  $S_a$  e  $S_z$  como indicadores da rugosidade das superfícies, que correspondem à rugosidade média e pico a vale respectivamente, medida em toda a imagem 3D da superfície da amostra. Este parâmetro indica desvios significativos nas características de textura, sendo aplicado na análise de superfícies usinadas. A superfície das amostras foi fotografada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), de modo a complementar as imagens geradas pelo perfilômetro óptico.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Assim como os Materiais e Métodos, os resultados apresentados estão divididos entre os ensaios de macrofresamento e microfresamento. As nomenclaturas CR e GUF foram utilizadas, assim como a mesma nomenclatura de condições de usinagem mostradas anteriormente, de C1 a C8.

### 4.1 ENSAIOS DE MACROFRESAMENTO

Serão apresentados os resultados dos ensaios de macrofresamento em relação ao acabamento, microdureza da superfície e subsuperfície e microestrutura das amostras usinadas.

#### 4.1.1 Acabamento após usinagem

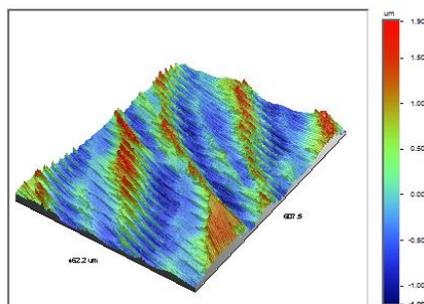
A Figura 4.1 mostra as superfícies usinadas sob as condições C1 a C4, isto é, material CR ou GUF com avanços por dente de 25  $\mu\text{m}$  ou 300  $\mu\text{m}$ . As figuras da coluna da esquerda mostram as vistas tridimensionais das superfícies com os respectivos valores de rugosidade da superfície, enquanto as da coluna da direita mostram as vistas superiores de cada condição com os parâmetros de rugosidade da superfície, especificamente  $S_a$  e  $S_z$ , utilizados neste trabalho como indicativo do estado de rugosidade da superfície usinada.

**C1 - Material CR e menor avanço****Surface Stats:**

Ra: 457.59 nm  
Rq: 570.26 nm  
Rt: 3.11 um

**Measurement Info:**

Magnification: 10.18  
Measurement Mode: VSI  
Sampling: 825.36 nm  
Array Size: 736 X 480



Mag: 10.2 X  
Mode: VSI

**S-Parameters: Amplitude**

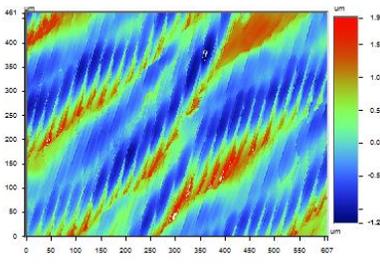
Amplitude	
Sa	457.78 nm
Sq	570.53 nm
Ssk	0.74
Sku	2.97
Sz	3.11 um
Sp	1.90 um
Sv	-1.20 um

Setup Parameters	
Size	736 X 480
Spacing	825.36 nm

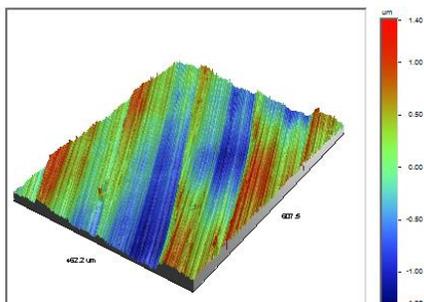
Processed Options	
Terms	Tilt
Filtering	None

**C2 - Material CR e maior avanço****Surface Stats:**

Ra: 435.96 nm  
Rq: 524.91 nm  
Rt: 2.70 um

**Measurement Info:**

Magnification: 10.18  
Measurement Mode: VSI  
Sampling: 825.36 nm  
Array Size: 736 X 480



Mag: 10.2 X  
Mode: VSI

**S-Parameters: Amplitude**

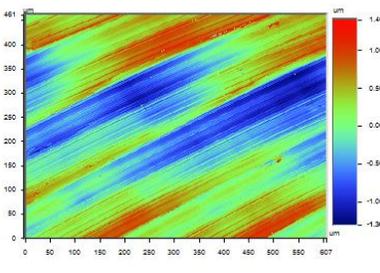
Amplitude	
Sa	435.85 nm
Sq	524.79 nm
Ssk	-0.10
Sku	2.29
Sz	2.70 um
Sp	1.40 um
Sv	-1.30 um

Setup Parameters	
Size	736 X 480
Spacing	825.36 nm

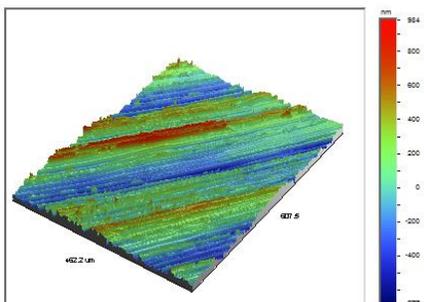
Processed Options	
Terms	Tilt
Filtering	None

**C3 - Material GUF e menor avanço****Surface Stats:**

Ra: 192.34 nm  
Rq: 247.00 nm  
Rt: 1.66 um

**Measurement Info:**

Magnification: 10.18  
Measurement Mode: VSI  
Sampling: 825.36 nm  
Array Size: 736 X 480



Mag: 10.2 X  
Mode: VSI

**S-Parameters: Amplitude**

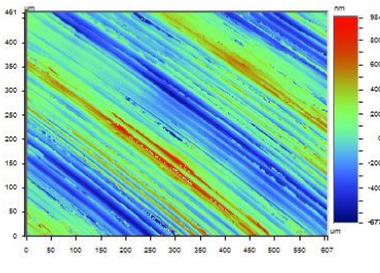
Amplitude	
Sa	192.27 nm
Sq	246.93 nm
Ssk	0.36
Sku	3.34
Sz	1.66 um
Sp	984.10 nm
Sv	-676.98 nm

Setup Parameters	
Size	736 X 480
Spacing	825.36 nm

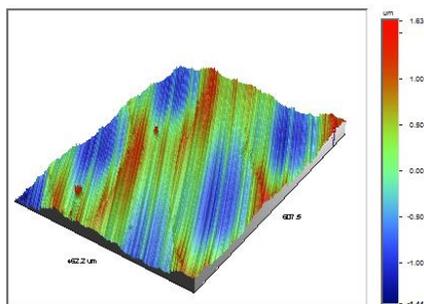
Processed Options	
Terms	Tilt
Filtering	None

**C4 - Material GUF e maior avanço****Surface Stats:**

Ra: 468.63 nm  
Rq: 558.87 nm  
Rt: 3.08 um

**Measurement Info:**

Magnification: 10.18  
Measurement Mode: VSI  
Sampling: 825.36 nm  
Array Size: 736 X 480



Mag: 10.2 X  
Mode: VSI

**S-Parameters: Amplitude**

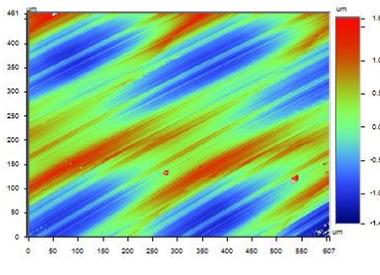
Amplitude	
Sa	468.58 nm
Sq	558.78 nm
Ssk	0.10
Sku	2.24
Sz	3.08 um
Sp	1.63 um
Sv	-1.44 um

Setup Parameters	
Size	736 X 480
Spacing	825.36 nm

Processed Options	
Terms	Tilt
Filtering	None



**Figura 4.1 – Imagens tridimensionais das superfícies usinadas sob as condições C1 a C4, obtidas por perfilômetro óptico 3D (lado esquerdo) e vista superior das superfícies usinadas, obtidas por perfilômetro óptico 3D. Os valores de Sa e Sz encontram-se na tabela correspondente a cada condição de usinagem**

Como pode ser verificado na Figura 4.1, a imagem da superfície gerada na condição C1 indica que a superfície usinada com o menor avanço por dente ( $f_z = 25 \mu\text{m}$ ) apresentou o fenômeno de fluxo lateral de material. Machado et al. (2009) explicam que no fluxo lateral uma porção do material que é comprimido pela superfície de folga da ferramenta se recupera elasticamente, enquanto outra porção sofre deformação plástica sem ser separada da peça. Dessa forma, uma parte do material permanece na superfície da peça e adere à superfície usinada, o que prejudica o acabamento. Esse efeito deriva do conceito de mínima espessura de corte, já que a espessura nominal equivale ao valor de raio de aresta da ferramenta. A remoção de material se dá por *ploughing*, deformando a superfície em vez de promover o seu cisalhamento, já que o baixo valor de avanço faz com que a espessura nominal de usinagem fique abaixo ou próximo do valor crítico. A superfície apresenta  $S_a = 457,78 \text{ nm}$  e  $S_z = 3,11 \mu\text{m}$ .

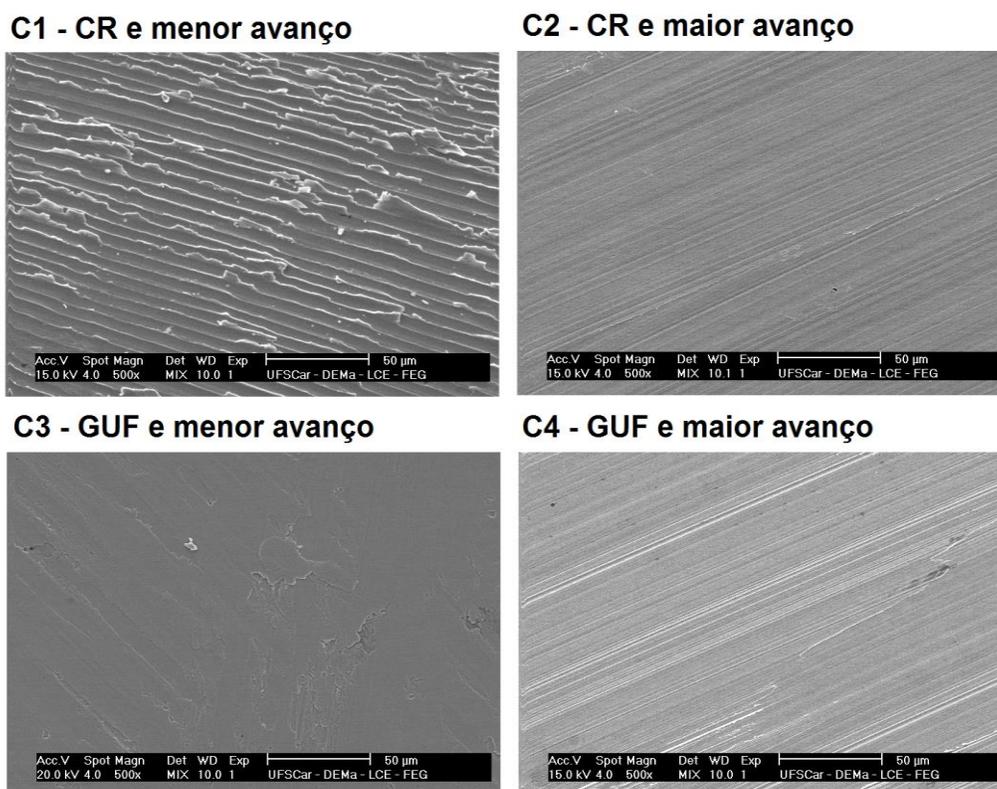
Tais efeitos são menos evidentes para a superfície do corpo de prova usinado na condição C2, com maior avanço por dente ( $f_z = 300 \mu\text{m}$ ). Conforme a Figura 4.2, a superfície é formada principalmente por marcas de avanço. Por conta dos maiores valores de avanço envolvidos, seria esperado um maior valor de rugosidade, embora os valores medidos ( $S_a = 435,85 \text{ nm}$  e  $S_z = 2,70 \mu\text{m}$ ) indiquem uma condição muito próxima da condição C1. Isso pode ser atribuído ao fato de que o fenômeno de fluxo lateral está muito mais presente para a condição com menor avanço por dente, o que provoca uma elevação da altura das cúspides, retratado pelo valor de  $S_p$ , que é maior na condição C1 do que na C2.

A condição de usinagem com C3, por sua vez, apresentou uma superfície com menor rugosidade, com acabamento composto basicamente pelas marcas de avanço. O fenômeno de fluxo lateral se mostra menos presente do que na condição C1. Segundo Jardret et al (1998), quando um material apresenta uma relação entre o módulo elástico e dureza ( $E/H$ ) menor, como no caso do material com GUF, há menor tendência a ocorrer *ploughing*, de modo que a superfície usinada na condição C3 apresenta menores rugosidades do que as outras condições ( $S_a = 192,27 \text{ nm}$  e  $S_z = 1,66 \mu\text{m}$ ).

Por fim, a condição C4, embora também se trate da usinagem do material com

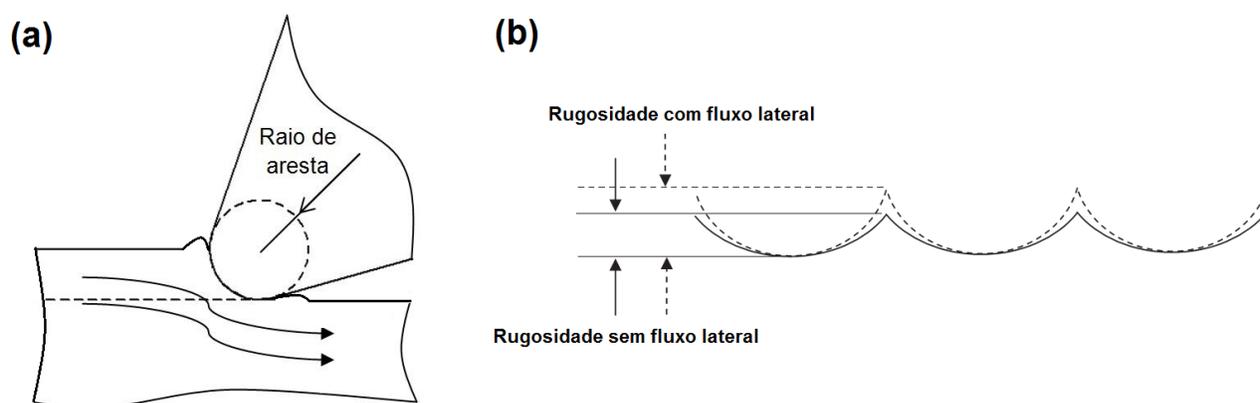
GUF, apresenta um acabamento com maior rugosidade do que a condição com menor avanço, com valores semelhantes aos da condição C2, devido ao próprio aumento do valor do avanço, que prejudica o acabamento durante a usinagem. A superfície apresenta  $Sa = 468,58 \text{ nm}$  e  $Sz = 3,08 \text{ }\mu\text{m}$ .

A Figura 4.2 mostra imagens das superfícies geradas nas condições C1 a C4, feitas com microscópio eletrônico de varredura (MEV). Na figura referente à condição C1, é evidenciada a ocorrência de fluxo lateral de material, fenômeno muito menos evidente na condição C2, que apresenta uma superfície basicamente formada por marcas de avanço. A condição C3 mostra que, embora as imagens obtidas por perfilômetro óptico indiquem menor rugosidade e melhor acabamento do que as outras condições de usinagem, o fenômeno de *ploughing* ainda está presente, embora em menor intensidade em relação à condição C1, provavelmente por conta da menor relação E/H do material GUF. Por fim, a condição C4 mostra o já verificado na perfilometria óptica, isto é, uma superfície composta por marcas de avanço, muito semelhante à condição C2.



**Figura 4.2 - Imagens das superfícies usinadas nas condições C1 a C4, obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV)**

A Figura 4.3, adaptada de Liu e Melkote (2006), ilustra como o fenômeno de fluxo lateral eleva o valor da rugosidade. O esquema mostrado em (a) ilustra o fluxo de lateral de material, resultando na superfície pontilhada em (b), que apresenta maior altura pico a vale ( $S_z$ ). Observando-se o valor  $S_p$ , que equivale aos valores de altura das cúspides acima da linha média no perfil de rugosidade da peça, nota-se que o valor é sempre maior para as superfícies usinadas do material CR (condições C1 e C2), por conta da maior ocorrência de fluxo lateral de material. Para a superfície do material GUF usinada, o valor de  $S_p$  é aproximadamente metade do encontrado para CR.

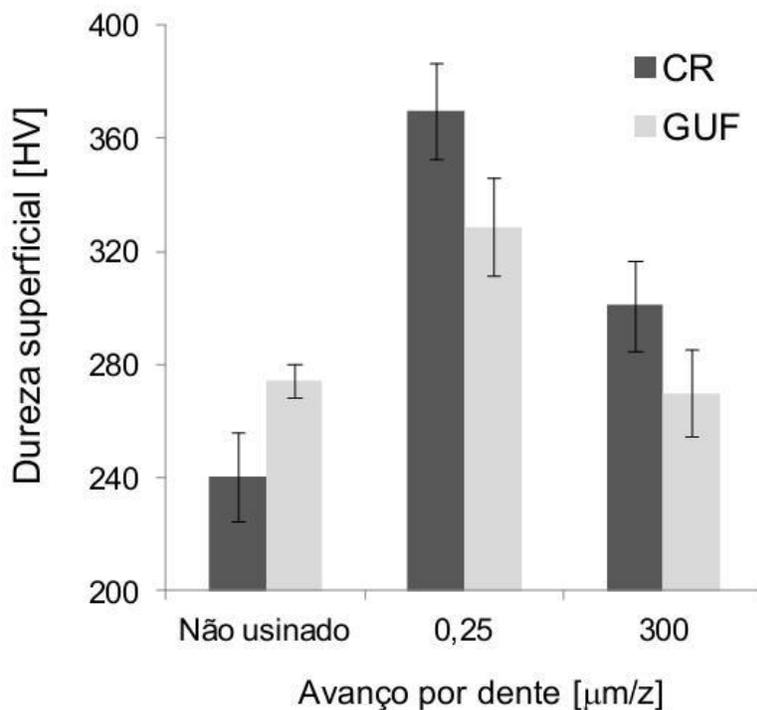


**Figura 4.3 – Fenômeno do fluxo lateral de material, ilustrando a interação da ferramenta com a superfície usinada em (a) e a superfície resultante da usinagem, comparando a rugosidade pico a vale ( $S_z$ ) com e sem fluxo lateral**

Fonte: Adaptado de Liu e Melkote (2006)

#### 4.1.2 Microdureza da superfície usinada

As medidas de microdureza da superfície usinada foram agrupadas em gráficos, de modo a facilitar a comparação dos valores obtidos entre as diferentes condições de usinagem. A Figura 4.4 mostra os valores de dureza superficial antes da usinagem e depois da usinagem, tanto para o material CR como para o GUF, nas condições de usinagem com o menor e com o maior valor de avanço.



**Figura 4.4 – Valores de dureza superficial dos corpos de prova submetidos a macro usinagem**

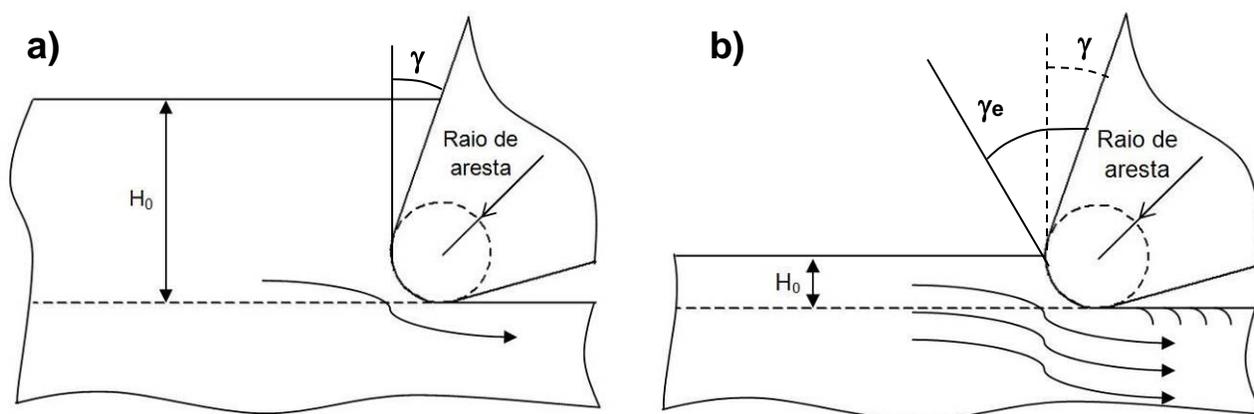
Antes de ser usinado, pode ser notado que o material GUF, por possuir uma microestrutura mais refinada, apresenta maior dureza que o material CR. Isso ocorre porque a microestrutura com grãos ultrafinos possui uma maior área total de contornos de grãos para dificultar o movimento das discordâncias, resultando num material mais duro e resistente (CALLISTER, 2008).

Entretanto, ao usinar os corpos de prova com o avanço por dente de 25  $\mu\text{m}$ , equivalente ao raio de aresta, foi observado que o material CR apresentou um aumento de dureza maior que o material GUF. O aumento da dureza do material CR foi cerca de 50%, enquanto que para o material GUF foi de 20%. Para o maior valor de avanço por dente (300  $\mu\text{m}$ ), o aumento de dureza superficial foi menor para o material CR (25%), enquanto que o material GUF não apresentou alteração significativa de dureza.

A explicação para o aumento da dureza superficial é o fenômeno de encruamento das camadas mais próximas da superfície usinada. O material CR, por

possuir menor resistência à deformação (maior tenacidade) em comparação ao material com grãos ultrafinos, está mais sujeito a esse efeito. O encruamento é mais notável nas condições de usinagem em que o avanço equivale ao raio de aresta da ferramenta, devido a efeitos de mínima espessura de corte.

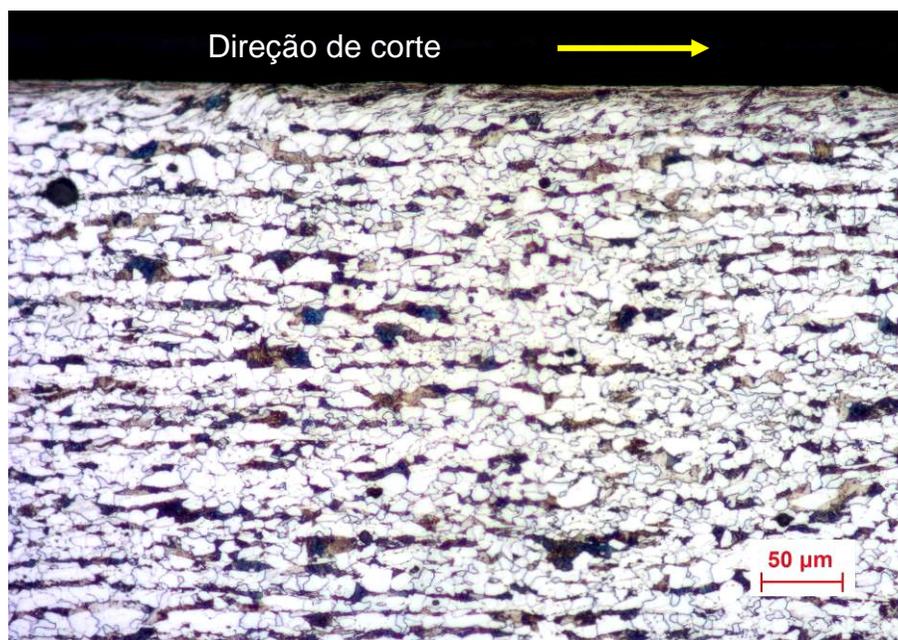
A Figura 4.5 ilustra o fenômeno descrito. A Figura 4.5 (a) mostra a situação onde a espessura nominal de corte ( $H_0$ ) é muito maior que o raio de aresta da ferramenta. Neste caso, a maior parte do material à frente da ferramenta se transforma em cavaco e o fluxo lateral de material que passa por baixo da aresta é reduzido – apenas a porção abaixo do raio de aresta é comprimida pela aresta da ferramenta. A Figura 4.5 (b), por sua vez, mostra o caso em que a espessura nominal de corte ( $H_0$ ) é da mesma ordem de grandeza que o raio de aresta da ferramenta. Neste caso, a maior parte do material à frente da aresta de corte deverá escoar lateralmente, passando por baixo da aresta de corte – fazendo uma analogia, poderíamos imaginar que raio de aresta funcionaria como um pequeno laminador, deformando o material à sua frente. Em função disso, a profundidade da camada mecanicamente afetada (encruada) deveria ser maior para o segundo caso.



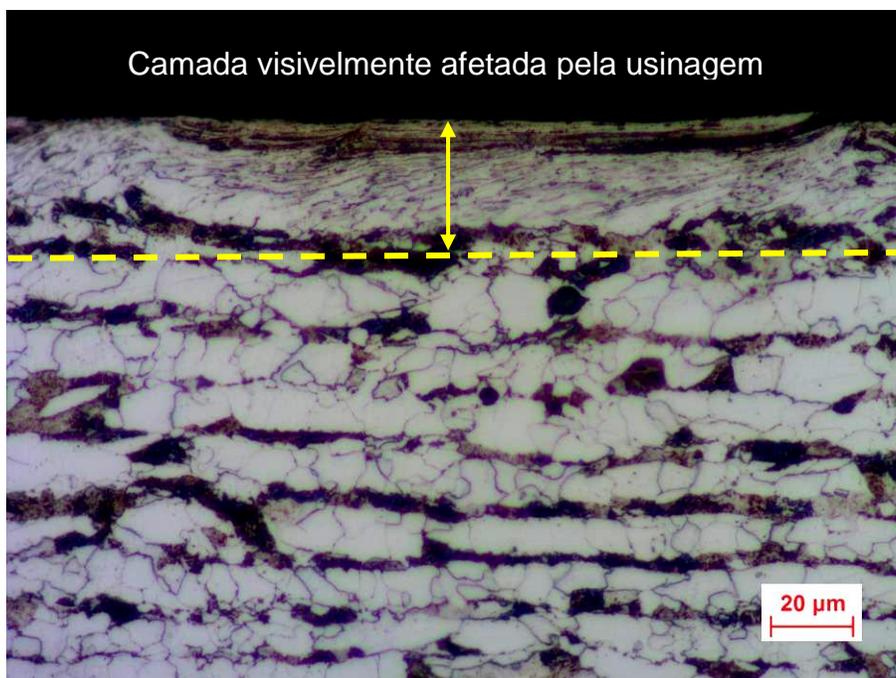
**Figura 4.5 – Interação entre a aresta de corte da ferramenta durante a usinagem; a) mecanismo de remoção com espessura nominal de corte maior que o raio de aresta e; b) com espessura nominal de corte equivalente ao raio de aresta: nesse caso a porção da ferramenta envolvida na interação ferramenta peça possui uma microgeometria diferente – ângulo de saída efetivo mais negativo  $\gamma_e$  – aumentando a deformação do material à frente da aresta**

### 4.1.3 Microestrutura da borda usinada

As imagens da microestrutura das amostras usinadas confirmaram as medidas de dureza superficial, descritas no item 4.1.2. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram a microestrutura do material como recebido (CR) usinado com avanço por dente de 25  $\mu\text{m}$ , com ampliação de 200 e 500 vezes, respectivamente. A Figura 4.6 mostra o sentido da direção de corte da ferramenta, em relação à microestrutura observada. Na Figura 4.7, a microestrutura pode ser observada com maior nível de detalhes. Na camada logo abaixo da superfície usinada, observa-se uma região claramente deformada plasticamente (encruada). Essa camada estende-se por aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  (visivelmente) e confirma o efeito de aumento de dureza da superfície das amostras usinadas com avanço equivalente ao raio de aresta da ferramenta.

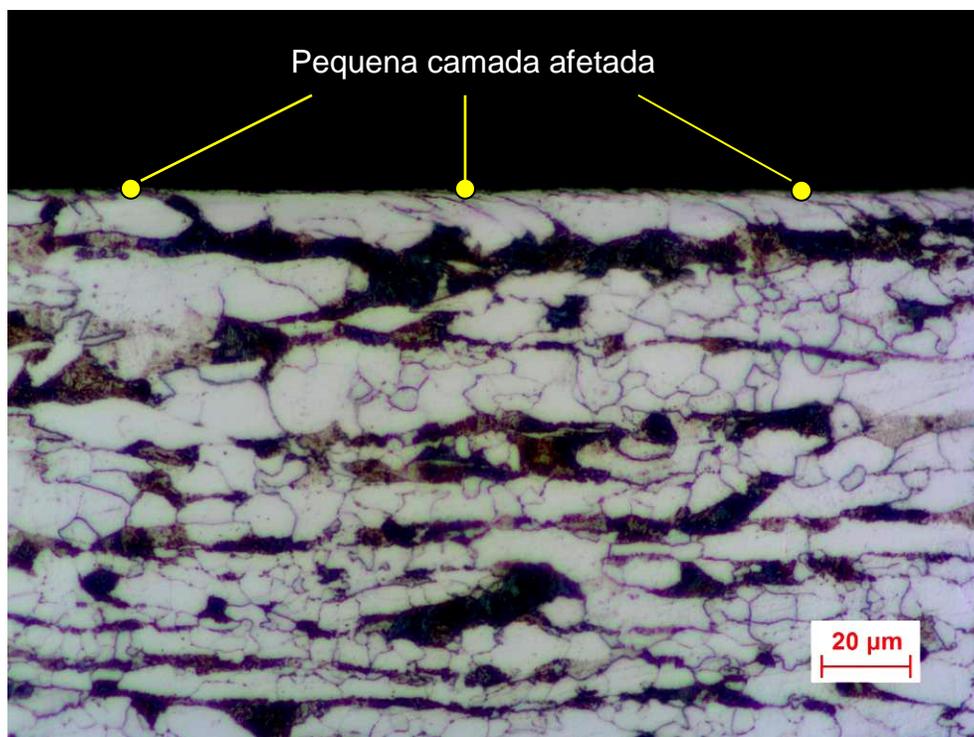


**Figura 4.6 – Condição C1 (CR), ampliação de 200 vezes, mostrando o sentido de corte em relação à microestrutura**



**Figura 4.7 – Condição C1 (CR), ampliação de 500 vezes, ressaltando a camada de material visivelmente afetada pela usinagem**

A microestrutura do material CR usinado com avanço por dente de  $300\ \mu\text{m}$  (Condição C2), por sua vez, mostrou uma camada deformada muito menor do que quando usinado com o menor valor de avanço (Condição C1). A Figura 4.8 mostra a micrografia da amostra usinada na condição C2, ressaltando que a camada encruada é muito menos profunda que na condição C1. O fato de a camada visivelmente encruada ser menor, quando utilizado o maior avanço, está de acordo com os valores de dureza superficial medidos no item 4.1.2.



**Figura 4.8 – Condição C2 (CR), ampliação de 500 vezes, mostrando a fina camada afetada pela usinagem**

A microestrutura do material com grãos ultrafinos (GUF) não apresentou alterações suficientes que pudessem ser observadas em um microscópio óptico. A dificuldade em distinguir os seus grãos, por serem muito pequenos, impede que, com ampliação de até 500 vezes, se verifique o fenômeno de encruamento. Os resultados da microdureza da superfície das amostras GUF usinadas com avanço por dente de 25 μm e de 300 μm indicam que apenas a condição com menor valor de avanço apresentou algum nível de encruamento, embora isso não possa ser visto com um microscópio óptico. As Figuras 4.9 e 4.10 mostram a microestrutura das amostras GUF usinadas na condição C3 ( $f_z = 25 \mu\text{m}/\text{dente}$ ) e C4 ( $f_z = 300 \mu\text{m}/\text{dente}$ ), respectivamente.

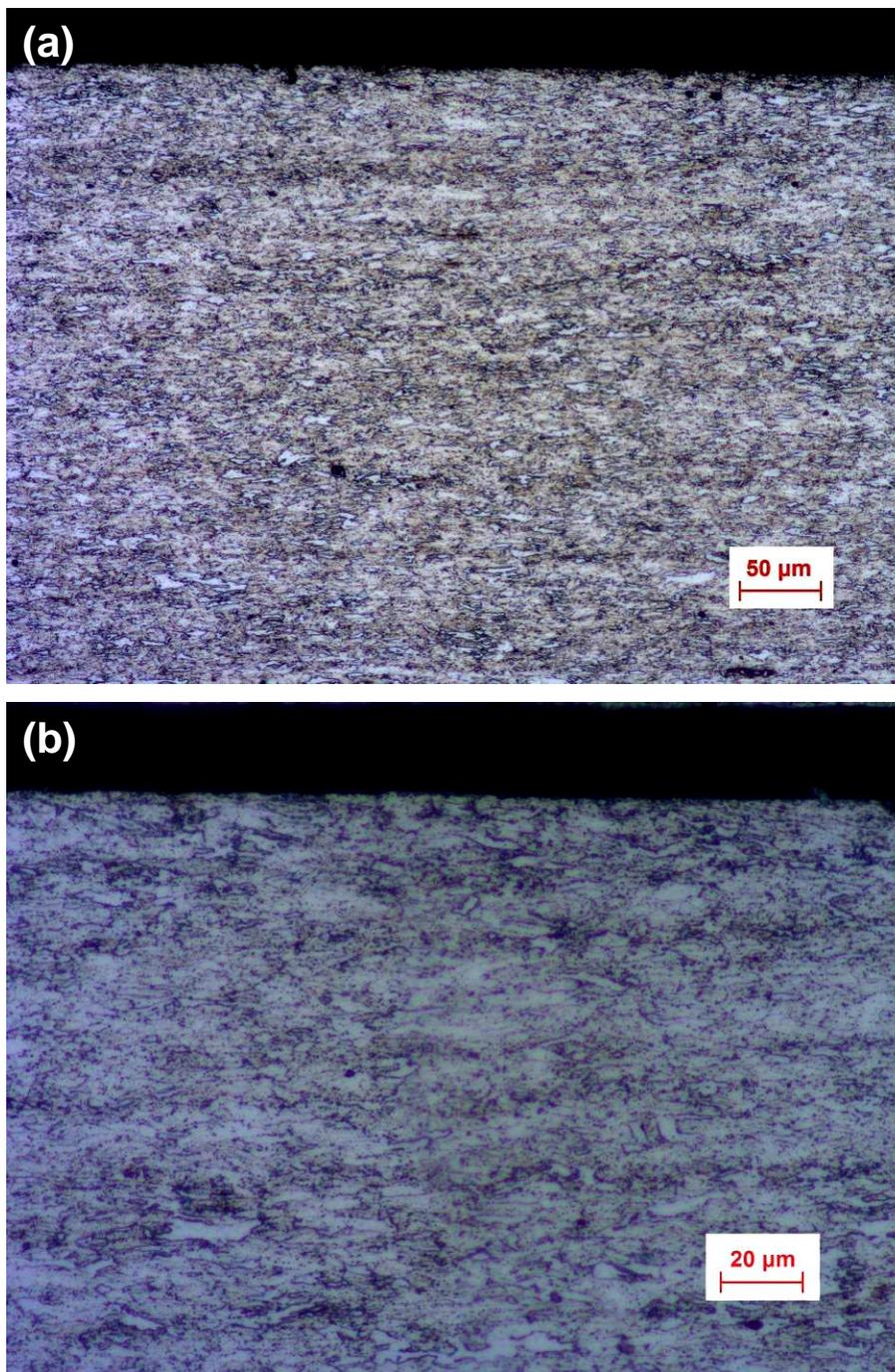


Figura 4.9 – Condição C3 (GUF), ampliação de 200 vezes (a) e 500 vezes (b)

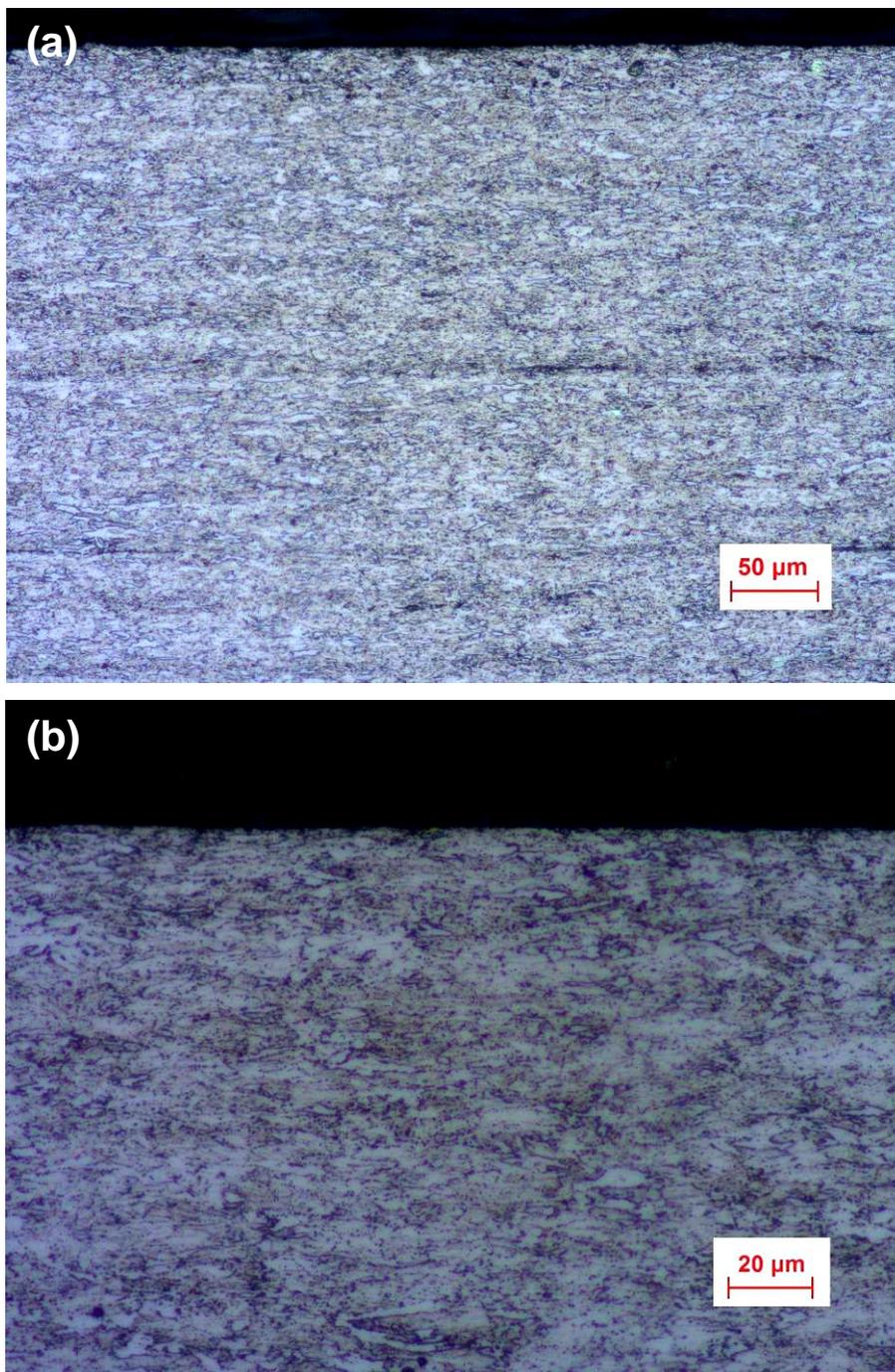


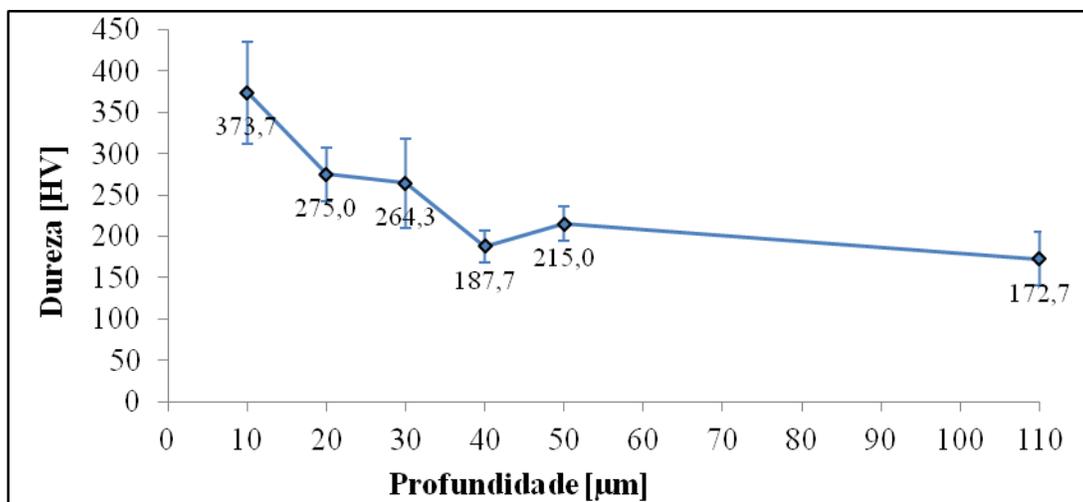
Figura 4.10 – Condição C4 (GUF), ampliação de 200 vezes (a) e 500 vezes (b)

#### 4.1.4 Perfil de microdureza da borda usinada

Foram feitas medidas de microdureza ao longo da profundidade dos corpos de prova para relacioná-las às medidas de microdureza da superfície usinada, assim como quantificar o que foi observado nas imagens de microestrutura. Dessa forma, foi possível investigar qual a profundidade da camada afetada pela usinagem em cada amostra, de modo a complementar as micrografias.

Os valores de microdureza medidos ao longo da profundidade de cada amostra foram agrupados em gráficos, de modo que um perfil de microdureza da borda usinada pudesse ser obtido. As Figuras 4.11 a 4.14 mostram os gráficos com os perfis de microdureza medidos para os corpos de prova usinados nas condições C1, C2, C3 e C4.

A amostra C1 (Figura 4.11) apresenta valores de microdureza maiores até uma camada medida a 30  $\mu\text{m}$  da superfície usinada, valores que confirmam o que foi observado em sua microestrutura. O que ocorreu é que, como o avanço por dente usado na sua usinagem equivale ao raio de aresta da ferramenta, a usinagem fica sujeita a efeitos de mínima espessura de corte, ocorrendo fenômeno de *ploughing* ao invés de remoção de material. Dessa forma, as camadas mais próximas à superfície usinada se deformam plasticamente como uma resposta ao alto valor de energia envolvido no processo de usinagem com pequeno avanço.



**Figura 4.11 – Perfil de microdureza da borda usinada na condição C1 (CR,  $f_z = 25 \mu\text{m/z}$ )**

O gráfico da amostra C2 (Figura 4.12), por sua vez, não apresenta variação de dureza significativa ao longo das camadas analisadas. No entanto, a análise da microestrutura desta amostra havia mostrado uma camada encruada, ainda que fosse pequena. A explicação é que a primeira medida de microdureza realizada foi a  $10 \mu\text{m}$  da superfície usinada e, para a condição C2, a camada deformada plasticamente é menor que  $10 \mu\text{m}$ . Dessa forma, embora tenha ocorrido um aumento da dureza superficial da amostra usinada na condição C2, o perfil de microdureza mostra que a camada afetada é menor do que  $10 \mu\text{m}$ . Isso indica que o maior valor de avanço por dente da ferramenta ( $300 \mu\text{m} / \text{dente}$ ) fez com que a microestrutura do material CR fosse deformada em menor escala que a amostra C1, isto é, houve predominância do cisalhamento.

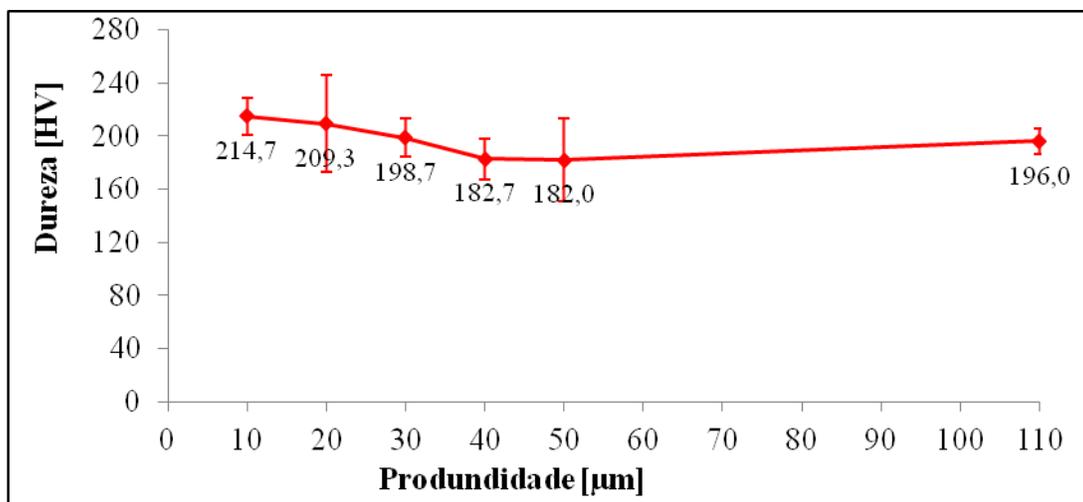


Figura 4.12 – Perfil de microdureza da borda usinada na condição C2 (CR,  $f_z = 300 \mu\text{m/z}$ )

As amostras C3 e C4 (Figuras 4.13 e 4.14) não apresentaram uma variação de dureza significativa. Assim como a dureza superficial das amostras GUF não foi significativamente alterada pelo macrofresamento, a subsuperfície permaneceu inalterada. Dessa forma, o material com grãos ultrafinos não foi alterado pela usinagem da mesma forma como o material como recebido, na medida em que a sua superfície não foi significativamente deformada.

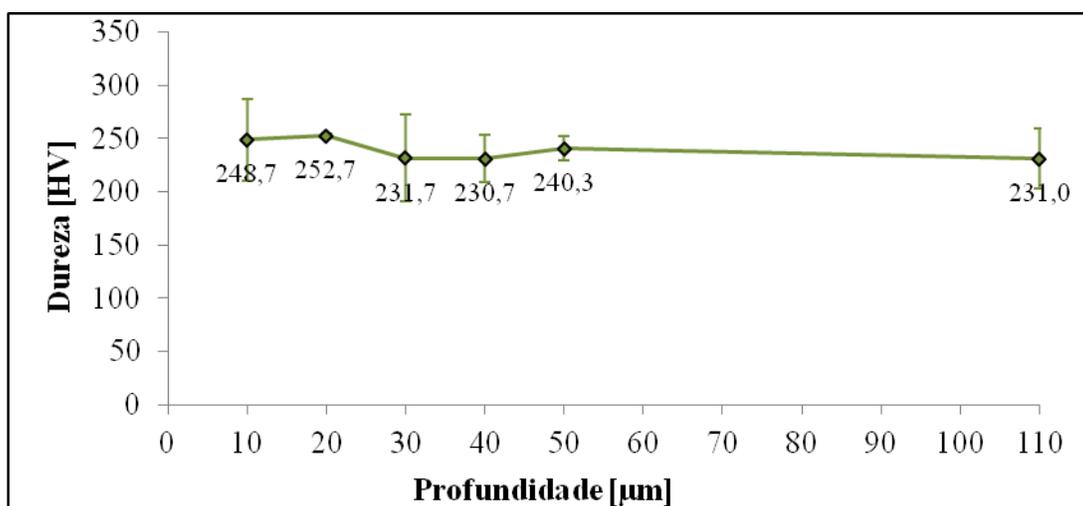
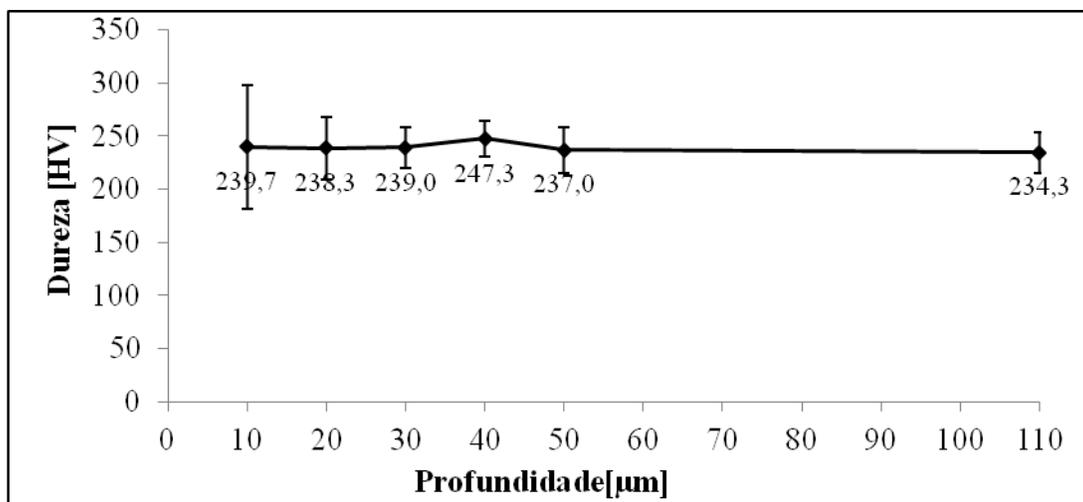


Figura 4.13 – Perfil de microdureza da borda usinada na condição C3 (GUF,  $f_z = 25 \mu\text{m/z}$ )



**Figura 4.14 – Perfil de microdureza da borda usinada na condição C3 (GUF,  $f_z = 300 \mu\text{m/z}$ )**

## 4.2 ENSAIOS DE MICROFRESAMENTO

Os resultados dos ensaios de microusinagem envolvem a análise do acabamento das amostras, através de um perfilômetro óptico e um microscópio eletrônico de varredura.

### 4.2.1 Acabamento após microfresamento

A Figura 4.15 mostra as superfícies usinadas sob as condições C5 a C8, isto é, material CR ou GUF com avanços de  $5 \mu\text{m/dente}$  ou  $18 \mu\text{m/dente}$ . As figuras da coluna da esquerda mostram as vistas tridimensionais das superfícies com os respectivos valores de rugosidade da superfície, enquanto as figuras da coluna direita mostram as vistas superiores de cada condição com os parâmetros de rugosidade da superfície, especificamente  $S_a$  e  $S_z$ , utilizados neste trabalho como indicativo do estado de rugosidade da superfície usinada.

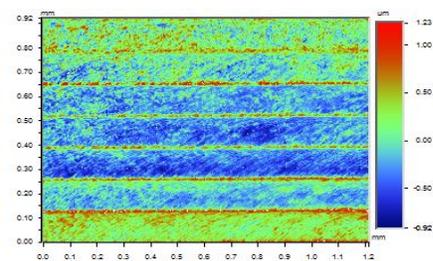
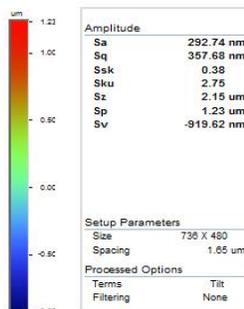
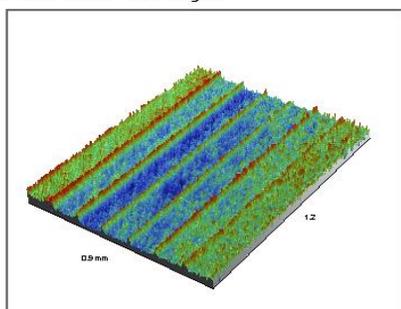
### C5 - Material CR e menor avanço

#### Surface Stats:

Ra: 292.76 nm  
Rq: 357.70 nm  
Rt: 2.15  $\mu\text{m}$

#### Measurement Info:

Magnification: 5.09  
Measurement Mode: VSI  
Sampling: 1.65  $\mu\text{m}$   
Array Size: 736 X 480



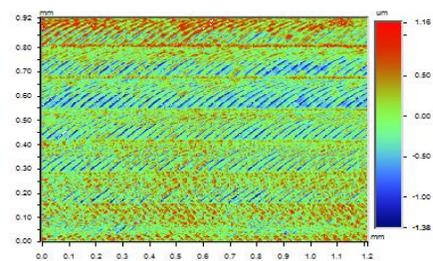
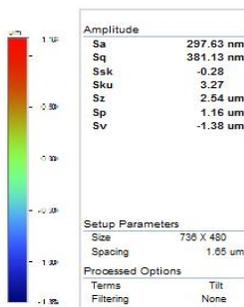
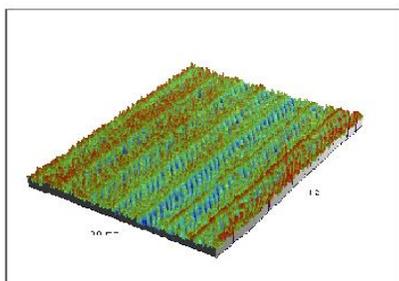
### C6 - Material CR e maior avanço

#### Surface Stats:

Ra: 297.58 nm  
Rq: 381.08 nm  
Rt: 2.54  $\mu\text{m}$

#### Measurement Info:

Magnification: 5.09  
Measurement Mode: VSI  
Sampling: 1.65  $\mu\text{m}$   
Array Size: 736 X 480



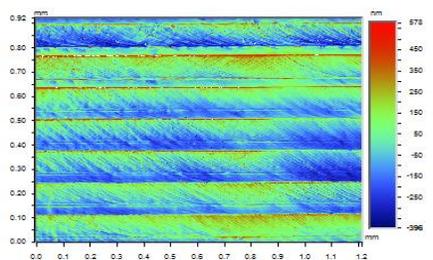
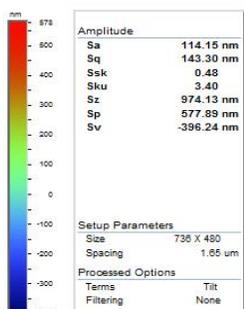
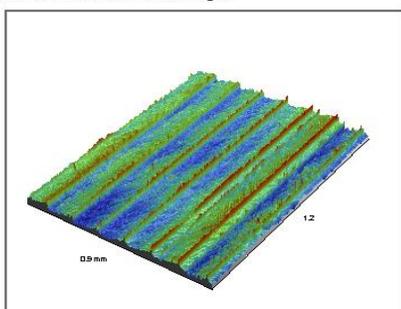
### C7 - Material GUF e menor avanço

#### Surface Stats:

Ra: 114.18 nm  
Rq: 143.33 nm  
Rt: 974.13 nm

#### Measurement Info:

Magnification: 5.09  
Measurement Mode: VSI  
Sampling: 1.65  $\mu\text{m}$   
Array Size: 736 X 480



### C8 - Material GUF e maior avanço

#### Surface Stats:

Ra: 208.09 nm  
Rq: 260.86 nm  
Rt: 1.67  $\mu\text{m}$

#### Measurement Info:

Magnification: 5.09  
Measurement Mode: VSI  
Sampling: 1.65  $\mu\text{m}$   
Array Size: 736 X 480

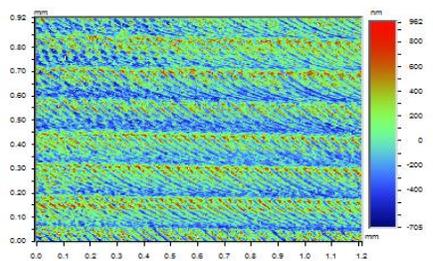
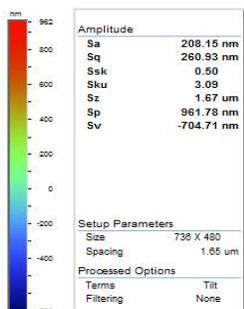
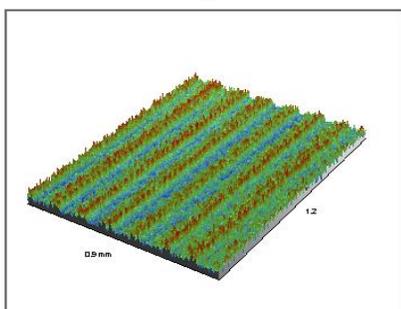


Figura 4.15 – Imagens tridimensionais das superfícies usinadas sob as condições C5 a C8, obtidas por perfilômetro óptico 3D (esquerda) e vista superior das superfícies usinadas, obtidas por perfilômetro óptico 3D (direita). Os valores de Sa e Sz encontram-se na tabela respectiva a cada condição de usinagem

.A superfície referente à condição C5 apresenta o resultado obtido por perfilometria óptica no microfresamento do material CR com avanço por dente de 5  $\mu\text{m}$  (Condição C5). A imagem mostra de forma bem definida o passo da ferramenta com marcas paralelas no interior de cada ranhura, correspondente a fz. A superfície referente à condição C6 apresenta características muito semelhantes às da condição C5, o que é evidenciado pelos valores de Sa e Sz muito próximos.

As superfícies usinadas nas condições C7 e C8, por sua vez, apresentaram melhor acabamento em relação às condições C5 e C6, o que indica que o material GUF apresentou melhor acabamento do que o CR. Embora o aspecto geral das superfícies seja semelhante, os valores de Sa e Sz confirmam que a rugosidade do material GUF, após a usinagem, é menor que do material CR. Comparando a condição de usinagem com menor avanço por dente (C7) com a com maior avanço por dente (C8), verifica-se que, conforme o esperado, a rugosidade é maior para maiores avanços.

Os valores de Sp para as superfícies indicam que o fluxo lateral de material observado nas condições de macrousinagem C1 e C2 se repete de forma semelhante para os ensaios de microusinagem, especificamente nas condições C5 e C6 (material CR), que apresentam valores de Sp maiores do que os encontrados nas condições C7 e C8 (material GUF).

A Figura 4.16 mostra as imagens das condições de usinagem C5 a C8 feitas por microscópio eletrônico de varredura (MEV), mostrando tanto as superfícies usinadas (coluna da esquerda) como a rebarba que fica na peça usinada ao final da última largura de corte (coluna da direita).

As imagens das condições C5 e C6, marcadas pelas cúspides mais altas, indicam uma maior ocorrência de fluxo lateral. Também pode ser observado que as condições de menor avanço (C5 e C7) apresentam uma rebarba muito maior do que as condições com maior avanço (C6 e C8). Tal efeito pode ser atribuído à maior ocorrência de *ploughing* para as condições de menor avanço, já que a menor espessura nominal de corte faz com que maior quantidade de material seja deformado ao invés de ser cisalhado, o que faz com que uma maior quantidade de material não cisalhado permaneça junto da peça em forma de rebarba no final da usinagem.

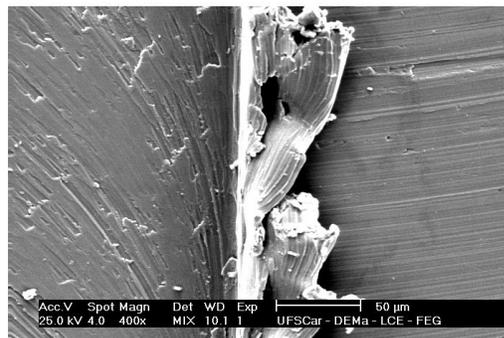
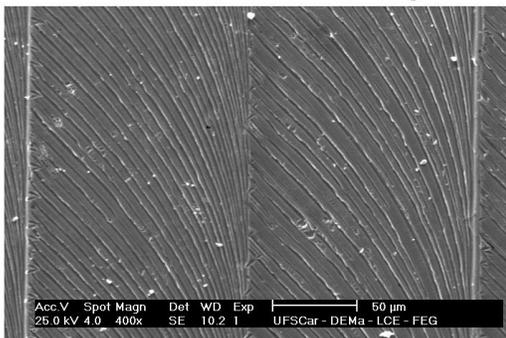
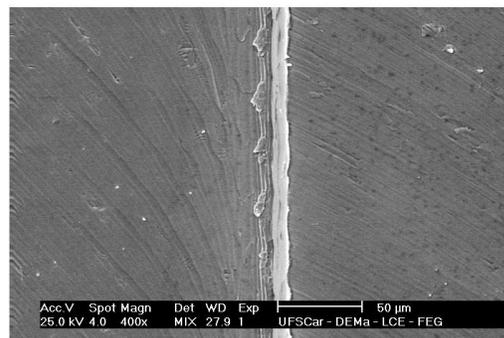
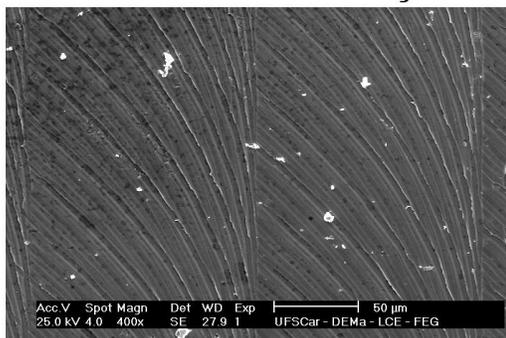
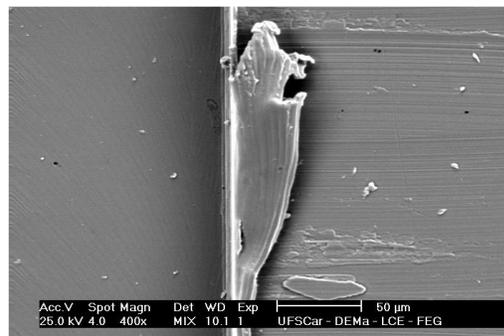
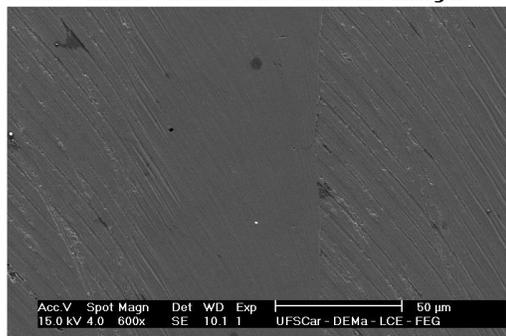
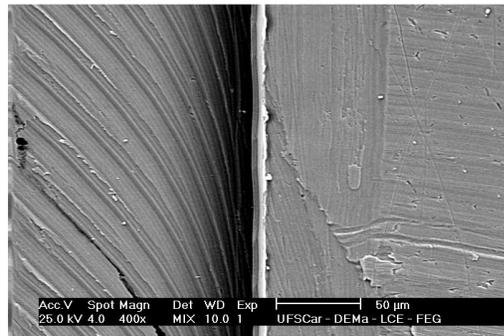
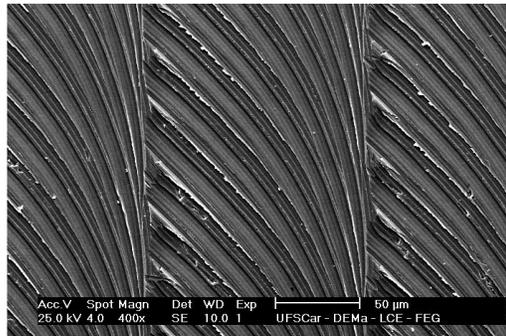
**C5 - CR com menor avanço****C6 - CR com maior avanço****C7 - GUF com menor avanço****C8 - GUF com maior avanço**

Figura 4.16 – MEV das superfícies C5 a C8, mostrando as superfícies usinadas (esquerda) e as rebarbas resultantes (direita)

Uma forma para verificar e confirmar a ocorrência de *ploughing*, embora não tenha sido abordada neste trabalho, seria estimar a quantidade de material que deveria ter sido removido pelas condições específicas de usinagem e comparar esse valor com a quantidade de material removida na prática, através da pesagem da peça após a usinagem. Dessa forma, a ocorrência de *ploughing* poderia ser analisada através de parâmetros quantitativos.

A microestrutura e dureza das amostras microusinadas também poderia ser analisada, assim como realizado para os ensaios de macrousinagem. Tal análise ficou para trabalhos futuros, dada a necessidade de um nanodurômetro para realizar as medições.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados de micro e macrousinagem obtidos permitiram a elaboração das seguintes conclusões:

- Tanto nos ensaios de macrousinagem como nos de microusinagem, os valores de rugosidade e o aspecto da superfície indicam uma maior ocorrência de escoamento lateral para o material CR, principalmente nas condições de menor avanço. O mecanismo de remoção por *ploughing* é verificado tanto no material CR como no GUF, mas mais predominantemente nas condições de menor avanço. Nas condições de maior avanço, o mecanismo de remoção predominante é o de cisalhamento e o acabamento resultante, em geral, é pior do que com menores avanços.
- Na macrousinagem, o material CR apresentou maior encruamento revelado através de medidas de microdureza tanto na camada superficial como na subsuperfície quando comparado ao material com GUF. O avanço por dente de 25 µm provocou um aumento de dureza maior do que o avanço por dente de 300 µm para ambos os materiais usinados, o que pode ser atribuído ao maior fluxo lateral de material sob a aresta de corte.
- O encruamento das camadas mais próximas da superfície macrousinada é visível ao microscópio óptico para o material CR. Para o material GUF, por apresentar tamanho médio de grão muito pequeno e menor capacidade de sofrer deformação plástica, tornou-se mais difícil obter uma boa visualização da camada afetada por deformações plásticas.
- A profundidade da camada afetada pelo macrofresamento foi maior para o material CR com valor de avanço equivalente ao raio de aresta da ferramenta. Para maiores valores de avanço, a profundidade da camada afetada pela usinagem foi menor. A profundidade da camada afetada pela usinagem, no material GUF, foi menor para ambas as condições de usinagem.
- Condições de microusinagem com maior valor de avanço resultam em um processo com menor formação de rebarba, provavelmente pela menor ocorrência de *ploughing*.

## REFERÊNCIAS

ALTINTAS, Y.; JIN, X. **Mechanics of micro-milling with round edge tools**, CIRP Annals -Manufacturing Technology; v. 60, p.77-80, 2011.

BAILEY, J. A. **Surface damage during machining of annealed 18% Nickel steel, Part I – Unlubricated Conditions**, Wear, 42; p. 277-296, 1977.

BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. **Predicting surface roughness in machining: a review**, International Journal of Machine Tools & Manufacture; v. 43, p. 833-844, 2003.

BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; CHIFFRE, L. DE. **Size effects on surface generation in micromilling of hardened tool steel**, Technical University of Denmark, 2006.

BRINKSMEIER, E.; Preuss, W. **Micromachining**, Philos. Trans. A: Math. Phys. Eng. Sci;V. 370(1973), p. 3973-92, 2012.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 705 p.

CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, H. **Investigation of micro-cutting operations**. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**; v. 46, n. 3-4, p. 313-332, 2006.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. 412 p.

CUBA RAMOS et al. **Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut**, Journal of Materials Processing Technology; v. 212, p. 594-600, 2012.

DAVIM, J. P. **Surface Integrity in Machining**. Springer, 2010.

DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. **Recent advances in mechanical micromachining**, CIRP Annals - Manufacturing Technology; v. 55, n. 2, p. 745-768, 2006.

EZUGWU, E. O. **Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace super alloys**, Int. J. Mach. Tools Manuf., 45 (12-13), p.1353-1367, 2005.

EZUGWU, E. O., TANG, S. H. **Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with Ceramic Tools**, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 55, No. 2, pp. 63-69, 1995.

FIELD, M. et al. **A review of measuring methods for surface integrity**. Metcut Associates Inc., Ohio, USA, 1972.

GRIFFITHS, B. J. **Manufacturing surface technology: surface integrity & functional performance**. London: Penton Press, 2001.

JAIN, V. K., **Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing**. J Mater. Process. Technol; 209 (20), p.6002-6038, 2009.

JARDRET, V. et al. **Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test**. Wear 218, 8-14, 1998.

JAWAHIR, I. S. et al. **Surface integrity in material removal processes: recent advances**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, (doi: 10.1016/j.cirp.2011.05.002).

KIM, C. J.; MAYOR, J. R.; NI, J. A **Static model of chip formation in microscale milling**, Journal of Manufacturing Science and Engineering; v.126, n. 4, p. 710-719, 2004.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren**. 5. ed. Berlin: Springer-Verlag, 471p., 1997.

LIU, K.; MELKOTE, S. N. **Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process**, International Journal of Machine Tools & Manufature, V. 46, p. 1778-1785, 2006.

LIU, X.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G. **The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science**, Journal of Manufacturing Science and Engineering; v. 126, 2004.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 384 p. 2009.

MASUZAWA, T. **State of the art of micromachining**. CIRP Annals - Manufacturing Technology; v. 49, p. 473-488, 2000.

MASUZAWA, T.; TÖNSHOFF, H. K. **Three-dimensional micromachining by machine tools**, CIRP Annals - Manufacturing Technology; v. 46, n. 2, p. 221-228, 1997.

OLIVEIRA, J. M. (2006). **Caracterização de superfícies usinadas para produção de moldes e matrizes**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul-RS, 2006.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia – microestrutura e propriedades**, Hemus Livraria Distribuidora e Editora S.A., 2000.

POPOV, K. B. et al. **Micromilling: material microstructure effects**, Journal of Engineering Manufacture; v. 220, p. 1807-1813, 2006.

RISBOOD, K. A.; DIXIT, U. S.; SAHASRADUHE, A. D. **Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process**. Journal of Materials Processing Technology; v.132, p. 203-214, 2003.

SILVA, L. R., (2002). **Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de níquel com alta velocidade de corte**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 211p.

SIMONEAU, A.; ELBESTAWI, M. A. **Surface defects during microcutting**, International Journal of Machine & Manufacture; v. 46, p. 1378-1387, 2006.

TAMINIAU, D. A.; DAUTZENBERG, J. H. **Bluntness of the tool and process forces in high-precision cutting**, Annals of the CIRP, v. 40, n. 1, 1991.

TANIGUCHI, N. **Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing**, Annals of the CIRP; v. 32, n. 2, 1983.

VALENTE, C. M. O. et al. **Analysis of Tool and Workpiece Interaction in Diamond Turning Using Graphical Analysis of Acoustic Emission**, CIRP Annals, 52, 1, pp. 479-482, 2003.

VOGLER, M. P.; DEVOUR, R. E.; KAPOOR, S.G. **On the modeling and analysis of machining performace in micro-endmilling, Part I: surface generation**, Journal of Manufacturing Science and Engineering; v. 126, p. 685-694, 2004.