

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a indústria metal-mecânica vem evoluindo exponencialmente o que torna a produtividade um fator determinante para a competitividade das empresas. Aquelas que não conseguem acompanhar os avanços tecnológicos estão fadadas ao desaparecimento ou eventualmente a serem absorvidas por outras mais avançadas. As linhas de produção das empresas convivem com a necessidade de inovar tecnologicamente, e satisfazer a demanda do mercado. Na indústria metal-mecânica, satisfazer esta demanda significa produzir peças com alta qualidade e em grandes quantidades por unidade de tempo.

Nos processos de usinagem uma das maneiras de se conseguir sucesso no aumento da produção é alterando as condições de corte, mais especificamente a velocidade, o avanço e a profundidade de corte. O uso de parâmetros mais severos exige pesquisa e desenvolvimento de novas máquinas-ferramentas, fluidos de corte e ferramental.

Muitos materiais de ferramentas tem surgido no mercado. Segundo Trent e Wright (2000) os materiais que sobrevivem, são aqueles que apresentam ótimas condições no desempenho, avaliados em itens como: vida da ferramenta, taxa de material removido, acabamento da superfície produzida, energia consumida na remoção do cavaco e, não menos importante, custo reduzido.

Considerando este último item o custo não é calculado somente pelo preço da ferramenta, mas envolve também a produtividade da mesma, isto é, o número de peças que esta ferramenta pode produzir dentro das especificações de projeto. Assim, qualquer pesquisa que tenha por objetivo um incremento na vida da ferramenta estará contribuindo, conseqüentemente, para redução do seu custo. Uma das técnicas mais destacadas e

efetivas no incremento desta vida é o uso de revestimentos na superfície da ferramenta. Diferentes materiais de alta dureza, normalmente cerâmicos, ou combinações de camadas com diferentes propriedades mecânicas, tribológicas e térmicas, facilitam o corte e protegem a ferramenta de maneira eficiente, possibilitando o uso de velocidades de corte cada vez maiores (YUHARA, 2000). Mas, o que acontece quando essa (ou essas) fina(s) camada(s) é (são) destruída(s)? Segundo Lima et al. (2005) a destruição prematura do revestimento acelera o desgaste do substrato da ferramenta. Sabe-se que este desgaste é consequência da combinação de altas pressões, elevadas temperaturas, afinidade química entre o material do cavaco e o revestimento, entre outros fatores. Eles promovem diferentes mecanismos de desgaste (abrasão, atrition, difusão, etc) nas ferramentas de corte.

Desta forma, medidas que garantam uma diminuição nos esforços necessários para cisalhar o material da peça ou que melhorem as propriedades mecânicas da ferramenta podem ser responsáveis pela melhoria do processo de corte. Uma dessas medidas positivas comprovadas é o uso de fluidos de corte, aplicados diretamente na zona de corte com a finalidade de refrigerar e/ou lubrificar esta região. O primeiro pesquisador que constatou e mediu a influência de um fluido de corte durante o processo de usinagem, foi o americano F. W. Taylor em 1894 (FERRARESI, 1981). Ele aplicou grandes quantidades de água na zona de corte, com a finalidade de diminuir a temperatura na região peça– cavaco–ferramenta, conseguindo assim 33% de aumento na velocidade de corte, sem prejuízo para a vida da ferramenta.

Existem lubrificantes sólidos, líquidos e gasosos. O grupo dos fluidos de corte líquidos é o mais importante e mais amplamente empregado, ocupando lugar de destaque por apresentar boas propriedades refrigerantes e lubrificantes. Entre os gasosos, os mais comuns são o oxigênio e o vapor de água encontrado na atmosfera (SHAW, 1968). Eles praticamente só refrigeram, ao contrario dos sólidos (grafite, bissulfeto de mobilidênio, chumbo, etc.) que praticamente só lubrificam.

Com relação aos lubrificantes líquidos, existem combinações de água e óleo (emulsões e soluções) ou fluidos integrais de óleo. Em altas velocidades de corte os refrigerantes (todos aqueles a base de água, incluindo os fluidos sintéticos e semi-sintéticos) oferecem ótimos resultados para a vida da ferramenta, onde a necessidade de reduzir temperatura é maior. Em baixas velocidades de corte, há uma maior necessidade de lubrificação, onde a aplicação de fluidos integrais ou emulsões com aditivos específicos chamados de EP, ou extrema pressão, apresentam um maior poder de ação na zona de contato, entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco.

Técnicas como, os revestimentos e os fluidos de corte anteriormente citados, trazem vantagens para a usinagem graças à mudança do fenômeno tribológico envolvido no

contato entre o cavaco e a ferramenta. Na literatura, este contato cavaco-ferramenta está dividido em duas zonas. A primeira é a zona de aderência (seizure zone ou sticking zone, da literatura inglesa) que Trent e Wright (2000) descrevem como “intimo contato”, presente ao longo de uma grande proporção da zona de contato cavaco-ferramenta. Nesta condição acontecem altíssimas deformações no material do cavaco, numa região denominada de “zona de fluxo”. A segunda é a zona de escorregamento (sliding zone da literatura inglesa) que se apresenta mais distante da aresta de corte, na periferia da zona de aderência, onde o contato passa a ser menos intenso devido a uma diminuição nas forças de ligações entre o cavaco e a ferramenta, menores tensões de compressão atuam nesta região, permitindo assim o deslizamento do cavaco exatamente na interface (MACHADO et al., 2011).

Pesquisas defendem que existe a possibilidade de modificar este contato entre o cavaco e a ferramenta alterando a textura desta última, através de técnicas específicas. Ao mudar a topografia da superfície que estará em contato na interface cavaco-ferramenta há a possibilidade de alterar o fenômeno tribológico, permitindo alterações nas forças que atuam na interface de contato e nas dimensões desta região (KAWASEGI et al., 2009). O uso de laser para texturização de superfícies vem se tornando cada vez mais atrativo graças à flexibilidade desta ferramenta, que pode ser aplicada para cementação ou nitretação de superfícies e nas últimas duas décadas tem se aprimorado o estudo da texturização de superfícies (Ready, 2001).

Um dos precursores na técnica de texturização a laser de ferramentas de corte no Brasil é o professor Milton Lima, do IEAv/CTA/ITA e um dos seus trabalhos mais relevantes na aplicação desta técnica foi a texturização de brocas e posterior revestimento (LIMA, 2005), esta pesquisa revelou grandes benefícios para a vida da ferramenta. Arroyo (2009) estudou os parâmetros de texturização a laser da superfície da ferramenta para um posterior recobrimento e análises de vida da ferramenta no torneamento de aços com estas ferramentas mostraram resultados similares aos encontrados com ferramentas microjateadas. Em trabalho com o mesmo objetivo mas aplicado ao corte descontínuo, Viana (2009) apresentou vantagens no uso da texturização a laser na ferramenta, no processo de fresamento de ferros fundidos vermiculares. Este pesquisador comparou as ferramentas texturizadas a laser e revestidas com as pastilhas de metal duro convencionais. Testes de endentação e esclerometria com carga progressiva revelaram resultados positivos para este tipo de tratamento superficial na ferramenta, onde, de maneira geral, a texturização promove uma melhor aderência ao substrato e diminui a propagação de trincas quando há uma quebra do revestimento.

Dentro deste contexto a texturização a laser é uma técnica atualmente difundida. Nos últimos anos, o laser tem se apresentado como uma opção competitiva para a produção de furos e ou alteração da textura da superfície de componentes mecânicos (LOW et al., 2001). Exemplos estão na indústria aeronáutica, que tem empregado essa técnica em componentes de turbina (palhetas) e na câmara de combustão (CORFE, 1983), e em microtecnologia, onde os problemas de lubrificação permanente de componentes miniaturizados, devido à mínima quantidade de lubrificante e à dificuldade de confiná-lo nas superfícies em contato, constituem um desafio (BLATTER et al., 1999; WATANABE et al., 2000).

Este trabalho propõe investigar o efeito da texturização a laser sobre uma ferramenta que já foi revestida previamente, a hipótese é que o processamento laser da superfície do revestimento, além de remover parcialmente os revestimentos irá produzir pequenas poças fundidas e resolidificadas criando uma integração entre o substrato e o revestimento e produzindo uma rugosidade que melhore o inter-bloqueio mecânico entre a superfície da ferramenta e a raiz do cavaco. Desta forma a presença da textura pode provocar uma maior adesividade entre o cavaco/peça e a ferramenta de corte e, eventualmente, favorecer o processo de deformação na zona de fluxo, melhorando as condições de corte. Se aplicado um fluido de corte é ainda provável observar fenômenos hidrodinâmicos na zona de escorregamento gerados pelo formato da textura, podendo diminuir o atrito na interface cavaco-ferramenta-peça.

Uma das possibilidades é a redução das forças envolvidas no contato cavaco-ferramenta e/ou peça-ferramenta, devido à possibilidade de uma maior molhabilidade de um fluido de corte aplicado na zona de corte. O estudo vai permitir determinar se esta alteração da superfície tem efeito positivo ou negativo para o sistema. A principal desvantagem desta alternativa radica no fato de atacar o revestimento, diminuindo sua espessura de maneira discreta, podendo ocasionar pontos de concentração de tensões ou pontos críticos de trincamento do revestimento. Estas hipóteses podem não se confirmar, entretanto, o trabalho vai permitir responder a estas importantes questões.

Desse modo a principal justificativa para realização deste trabalho é contribuir com novas investigações e fornecer dados que darão suporte técnico na viabilização ou não da utilização desta nova tecnologia. A princípio a contribuição deste trabalho tem o intuito de avaliar o desempenho de insertos de metal duro, revestidos por multicamada TiCN-Al₂O₃-TiN e texturizados a laser. Pretende-se variar os tipos e dimensões das texturas, que serão aplicadas nas ferramentas. Para avaliar o efeito da texturização serão realizados ensaios de usinagem no torneamento cilíndrico de um aço carbono 1050, primeiramente considerando as forças de usinagem e o acabamento da peça. Serão feitas análises químicas das regiões

atingidas pelo laser somadas a análises topográficas das ferramentas. No fim deste trabalho serão realizados testes de vida de ferramenta e testes de desgaste microabrasivo.

O trabalho é dividido em sete capítulos descritos a seguir:

Capítulo 1 - Introdução ao tema principal. (este capítulo).

Capítulo 2 - Apresenta a revisão bibliográfica.

Capítulo 3 - Descreve a metodologia dos ensaios, mostrando os equipamentos usados e apresenta os planejamentos executados em cada bateria de testes.

Capítulo 4 - Apresenta, analisa e discute os resultados.

Capítulo 5 - Apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema.

Capítulo 6 - Lista as referências bibliográficas consultadas na tese.

Capítulo 7 - ANEXOS.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Torneamento

O torneamento é um processo de usinagem com remoção contínua de cavaco onde a peça gira sobre o eixo principal da máquina e uma ferramenta mono ou multi-cortante retira cavaco de sua periferia, deslocando-se no mesmo plano do eixo, com a finalidade de obter uma superfície de revolução definida. A Figura 2.1 mostra uma ferramenta em trabalho com o sentido de deslocamento da ferramenta para as diferentes modalidades de torneamento.

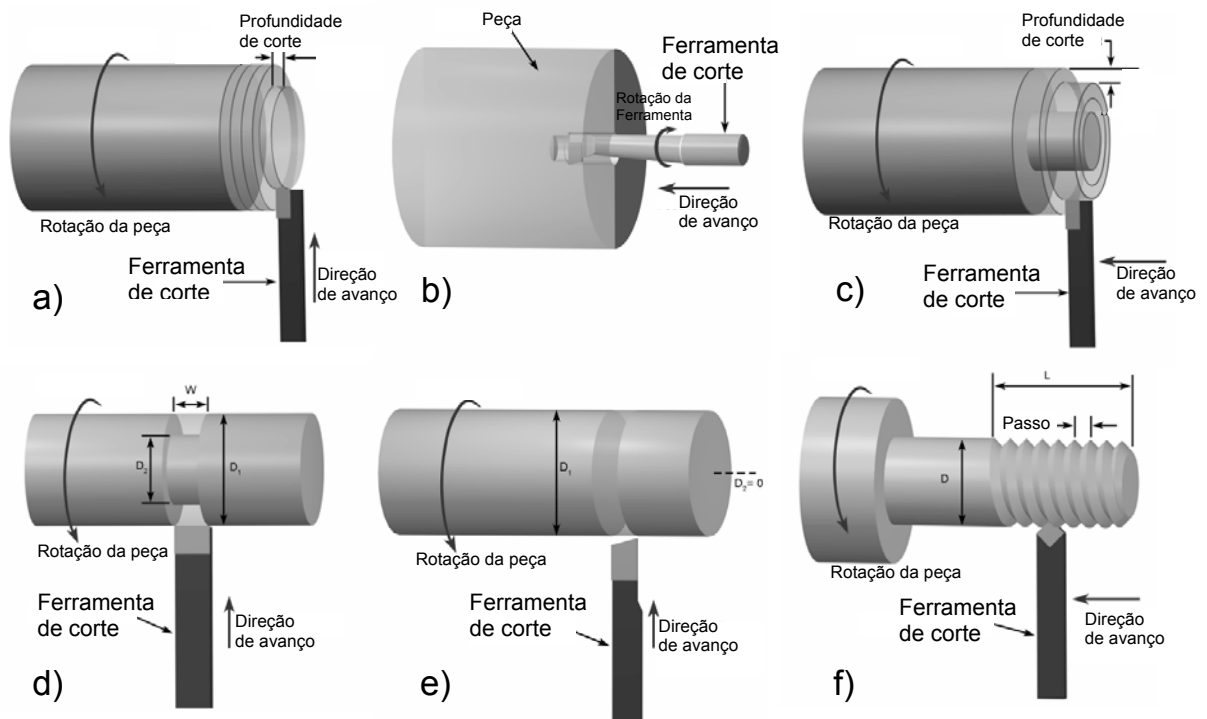


Figura 2.1 - Diferentes superfícies obtidas por torneamento: a) faceamento; b) torneamento interno; c) torneamento externo; d) sangramento; e) corte com bedame; f) rosqueamento externo (CUSTOMPART.NET, 2007).

2.2 – Formação do Cavaco.

Um dos fenômenos mais interessantes na usinagem dos metais é a formação do cavaco. Quando dois corpos com grande diferença de dureza, no caso a ferramenta e a peça, encontram-se em contato e deslocam-se em movimento relativo, o material de menor dureza experimenta em maior proporção, uma série de fenômenos mecânicos, que o levam a se deformar, até um ponto de máxima tensão, onde na presença excessiva de defeitos promove ruptura, dando origem ao cavaco.

Encontra-se na literatura uma descrição mais precisa do fenômeno de formação do cavaco no corte de um material com ferramenta de geometria definida que divide o fenômeno em várias etapas bem delimitadas. A variação das tensões na região de deformação constitui o caráter cíclico da formação do cavaco (ASTAKHOV; SHVETS, 1998)

2.2.1 – Etapas do processo de formação do cavaco

Analisando minuciosamente o processo de formação do cavaco, é possível entender as grandezas que influenciam na energia gasta no corte. Segundo TRENT e WRIGHT (2000), “grandes quantidades de energia são necessárias para deformar plasticamente o material a ser removido da peça, nos planos de cisalhamento primário e secundário”. Ferraresi (1981) também realça esta importância, afirmando: ...“para uma explicação científica das diferentes grandezas relacionadas com a usinagem dos metais, tais como desgaste da ferramenta e suas causas, força de corte, aresta postiça de corte, etc., é necessário um estudo minucioso do processo de formação do cavaco”. O corte ortogonal (veja Fig. 2.2) facilita este estudo.

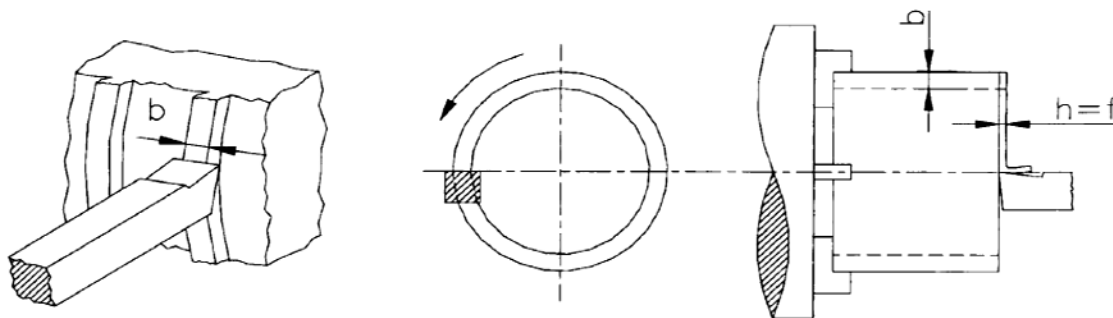


Figura 2.2 - Exemplos de corte ortogonal (MACHADO et al., 2011).

A forma mais simples de estudar a formação do cavaco durante a usinagem de um material é fazer simplificações em relação ao processo de fabricação. Uma delas é o uso do corte ortogonal.

O corte ortogonal assume as seguintes simplificações e considerações:

- A aresta cortante é reta.
- A espessura de corte h (igual ao avanço) é pequena em relação à largura de corte b .
- A aresta de corte é maior que a largura de corte b .
- A aresta cortante é normal à direção de corte e de avanço.
- A formação do cavaco pode se considerar como um fenômeno bidimensional.
- A formação de cavaco é considerada no plano de trabalho.
- O tipo de cavaco formado é contínuo, sem formação de aresta postiça de corte (APC).
- Não existe contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça usinada.
- A largura de corte b e a largura do cavaco b' são idênticas.

Considere o volume de material representado pelo volume “ $klnm$ ”, da Fig. 2.3, se movendo em direção à cunha cortante.

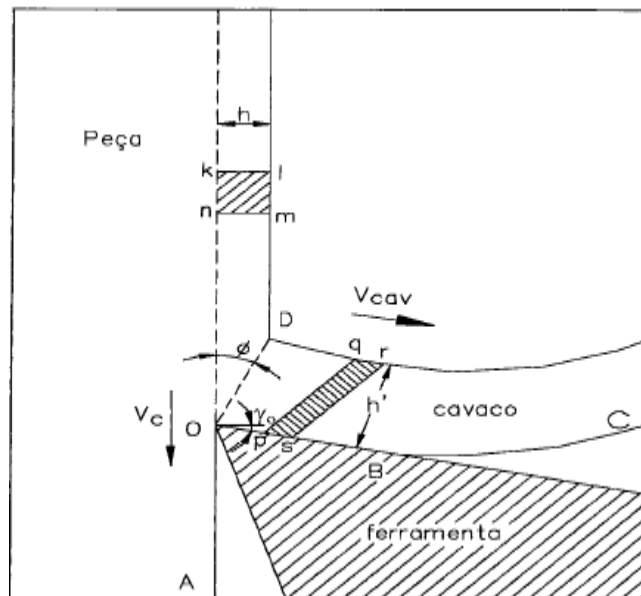


Figura 2.3 - Diagrama da cunha cortante (TRENT; WRIGHT, 2000).

Quando o volume limitado por “klm”, no desenho esquemático aproxima-se à cunha cortante, deformações elásticas acontecem. Com o prosseguimento do processo o limite de escoamento do material da peça é vencido e o material passa a se deformar plasticamente. Esta deformação plástica continua aumentando até que as tensões de cisalhamento são suficientes para deslizar o material (sem que haja perda de coesão) entre a porção de material recalcada e a peça. Assim fica definida uma zona de cisalhamento primária (Fig. 2.4), que para facilitar o estudo é representada pelo plano que define a linha “OD” da Fig. 2.3.

Após o material entrar no regime plástico, o avanço da ferramenta faz com que as tensões ultrapassem o limite de resistência do material, ainda na zona de cisalhamento primária, promovendo a ruptura, que inicia com a trinca aberta no ponto “O” (Fig. 2.3). Esta trinca pode se estender até o ponto “D”, dependendo das propriedades mecânicas do material da peça (MACHADO et al., 2011).

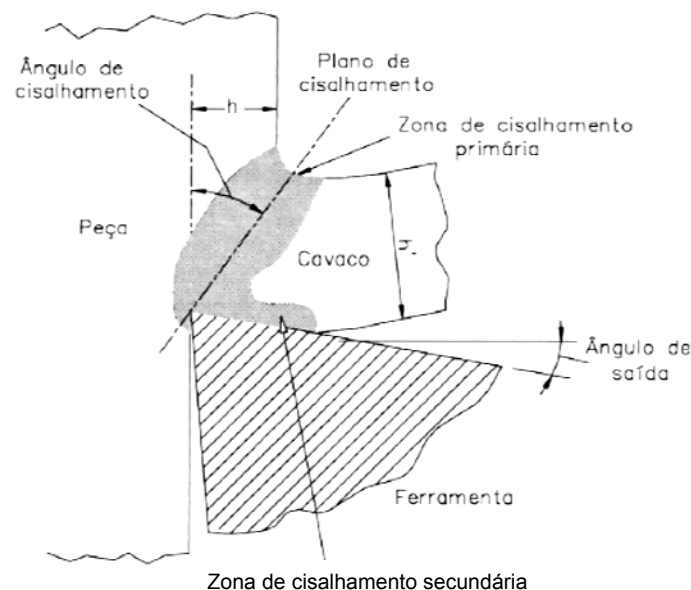


Figura 2.4 - Esquema mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária (MACHADO et al., 2011).

Após passar pela zona de cisalhamento primária, o volume de material “klm” é deformado para o volume “pqrs”, que percorre a superfície de saída da ferramenta, sofrendo ainda altíssimas deformações plásticas cisalhantes, numa pequena região junto à interface com a ferramenta, denominada zona de cisalhamento secundária, desenvolvendo ali altíssimas temperaturas, comprometendo a resistência da ferramenta. Esta região representada pelo plano definido pela linha OB da Fig. 2.3 pode ser observada na Fig. 2.4.

Quanto maior a deformação do cavaco sendo formado, menor o ângulo de cisalhamento e maiores são os esforços de corte. Esta influência é marcante na usinagem de materiais dúcteis, muito suscetíveis à deformação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Portanto, o processo de formação do cavaco é um processo cíclico, com cada ciclo dividido em 4 (quatro) etapas que já foram discutidas anteriormente, a saber:

1. Recalque (deformação elástica)
2. Deformação plástica
3. Ruptura.
4. Movimento sobre a superfície de saída da ferramenta.

Dessa maneira cada volume, “ $klnm$ ”, que passar por um ciclo, formará uma lamela de cavaco.

2.2.2. Classificação dos cavacos

Diversas classificações têm sido propostas pelos pesquisadores. Uma das mais comuns, citadas tanto na literatura alemã quanto na americana, divide os tipos de cavacos em três grupos (FERRARESI, 1981): tipos **a**, **b** e **c**. Outros autores (TRENT; WRIGHT, 2000 e MACHADO et al., 2011) preferem a classificação com quatro tipos, com a inclusão do tipo **d**, assim:

- a. Cavaco contínuo.
- b. Cavaco parcialmente contínuo.
- c. Cavaco descontínuo.
- d. Cavaco segmentado.

a. Cavacos contínuos

Formados na usinagem de materiais dúcteis, como aços de baixa liga, alumínio e cobre. O metal cisalha na zona de cisalhamento primário com grandes deformações (da ordem de 2 a 5 mm/mm), permanecendo em uma forma homogênea, sem se fragmentar. Apesar da forma de fita desses cavacos não apresentar, normalmente, nenhuma evidência de fratura ou trinca, uma nova superfície está sendo gerada na peça e isto tem que envolver fratura. Cook et al (1954) citado por Machado et al (2011) explica a formação do cavaco contínuo da seguinte maneira: um campo de tensão de tração se desenvolve na ponta da ferramenta, separando o material (cavaco da peça). Depois desse campo de tensão de tração, no plano de cisalhamento primário, o material está sujeito a elevada tensão de compressão e a

propagação da trinca será interrompida nesta região, garantindo assim a formação do cavaco contínuo.

b. Cavacos parcialmente contínuos

É um tipo intermediário entre os cavacos contínuos e os descontínuos, onde a trinca se propaga só até uma parte do plano de cisalhamento primário. Ferraresi (1981) chama este tipo de cavaco de “cavaco de cisalhamento”. Sugere-se que dois fatores são importantes (COOK, 1954): (i) a energia elástica acumulada na ferramenta pode não ser suficiente para continuar a propagação da trinca. O cavaco perderá contato com a ferramenta, interrompendo assim, o crescimento (propagação) da trinca; (ii) a presença de grandes tensões de compressão no plano de cisalhamento primário, um pouco além da ponta da ferramenta, que supressa a propagação da trinca.

c. Cavacos descontínuos

São os cavacos presentes na usinagem de materiais frágeis, tais como o ferro fundido cinzento e o bronze, materiais que não são capazes de suportarem grandes quantidades de deformação sem fratura (MACHADO et al., 2011). A trinca neste caso se propaga por toda a extensão do plano de cisalhamento primário, promovendo a fragmentação do cavaco. Mesmo não sendo frágeis, alguns aços carbono, ligas de cobre, ligas de alumínio e titânio, foram usinadas em condições de corte especiais, principalmente em velocidades de corte consideravelmente baixas e grandes avanços, e profundidades, produzindo assim cavacos descontínuos. Isto mostra a relação direta existente entre os parâmetros de corte e o tipo do cavaco.

d. Cavacos segmentados

O cisalhamento para formar o cavaco começa num plano particular, quando as tensões impostas pelo movimento da ferramenta contra a peça excedem o limite de escoamento do material da peça. A energia associada com esta deformação é convertida imediatamente em calor. Se o material apresenta baixa condutividade térmica, este calor fica retido nessa região de deformação, diminuindo sua resistência ao cisalhamento localmente. Com isto, as deformações continuam no mesmo plano, ao invés de mudarem para o plano adjacente, menos aquecido. Com o prosseguimento da deformação, existe uma rotação no plano de cisalhamento, que começa a se afastar da ponta da ferramenta e se movimenta sobre a superfície de saída. Esta rotação continua acontecendo até que o aumento da força, devido a esta rotação, excede a força necessária para deformar plasticamente o material mais frio em outro plano mais favorável. Como resultado, ocorre um processo chamado de

“cisalhamento termoplástico catastrófico” ou “cisalhamento adiabático”, levando à formação de um processo cíclico de produção de segmentos de cavacos, caracterizando, assim uma forma de serra dentada.

Os cavados também podem ser classificados quanto a forma, encontrando-se na literatura 4 (quatro) formas principais:

- Cavaco em fita
- Cavaco helicoidal
- Cavaco espiral
- Cavaco em lascas ou pedaços

Entretanto, a ISO 3685 (1993) faz uma classificação mais detalhada da forma dos cavacos, de acordo com a Fig. 2.5.




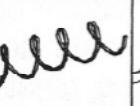





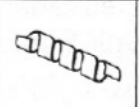


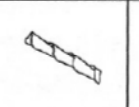
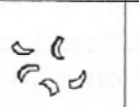

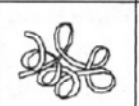
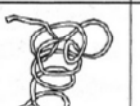
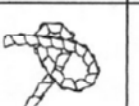
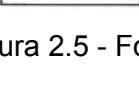
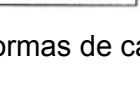
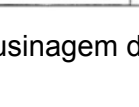
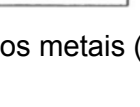
1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Salto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			
							

Figura 2.5 - Formas de cavacos na usinagem dos metais (ISO 3685, 1993).

Cavacos muito longos podem causar severos problemas, principalmente na segurança do operador (EDWARDS, 1993). Já cavacos de tamanho muito reduzido podem produzir pós ou lama quando aplicado fluido de corte, poluindo a área de trabalho e danificando a vida do fluido de corte pela impossibilidade de filtragem.

Além do material da peça, que é o principal fator influente na forma do cavaco, os parâmetros de corte e a geometria da ferramenta mudam as forças envolvidas no corte, alterando o formato do cavaco.

Ângulos de saída negativos promovem a quebra do cavaco, mas ao mesmo tempo, demandam maior consumo de energia para o corte do material. A mudança nos ângulos de

posição e inclinação, também altera as forças do corte e redirecionam a saída do cavaco, possibilitando o controle do mesmo.

Algumas técnicas têm sido utilizadas com sucesso para controlar o cavaco, por exemplo: a desaceleração intermitente do avanço através de uma máquina de controle numérico (TAKATSUTO, 1988), ou a incidência de um jato em alta pressão entre a superfície de saída e o cavaco (MACHADO, 1990). Mas, sem dúvida, o método mais utilizado é a alteração do formato da superfície de saída da ferramenta, com a finalidade de dobrar o cavaco ou fragilizá-lo, e fazer com que este, ao se impactar contra a peça, suporte da ferramenta ou alguma parte da máquina, quebre.

Os fabricantes de ferramentas, particularmente de metal duro desenvolvem insertos com variadas formas de quebra-cavacos. É usado um desing diferente para operações de acabamento, cortes médios e operações de desbaste, levando-se em consideração que estes quebra-cavacos são efetivos apenas para uma faixa determinada de parâmetros de corte.

2.3 - Interface cavaco-ferramenta

A formação do cavaco através de cisalhamento do material, em zonas perfeitamente identificadas, é o aspecto que mais atrai a atenção de pesquisadores da área de usinagem. Isto se torna ainda mais importante quando se considera que uma das zonas de cisalhamento, a “zona de cisalhamento secundária”, é uma região que compromete diretamente o comportamento do desgaste da ferramenta de corte.

2.3.1 - Atrito em usinagem

O processo de corte de um material envolve etapas bem definidas, citadas anteriormente. Após iniciado a deformação elástica, entrado na deformação plástica e uma trinca ter se iniciada no material da peça, na zona de cisalhamento primário, o cavaco continua seu caminho para longe desta zona, atravessando a superfície de saída da ferramenta, em íntimo contato com esta.

Este contato entre a ferramenta e o cavaco muitas vezes têm sido analisado como uma situação clássica de atrito de Amontons (1699). Estes efeitos foram estendidos para situações da dinâmica em (1781) por Coulomb, onde as “forças de atrito” atuam quando se movimenta o cavaco ao longo da superfície de saída da ferramenta e são determinadas em termos do coeficiente de atrito (μ) entre o material da ferramenta e da peça (KIKUCHI; ODEN, 1988).

O fato é que, enquanto o atrito depende intimamente da forma da região de contato, nenhum dos fenômenos observados por estes cientistas foi formulado dentro da teoria de corpos deformáveis (NACCARATO, 2006).

Trent e Wright (2000), após um grande número de pesquisas, demonstraram que na usinagem dos metais este contato tem que ser analisado de maneira diferente, pois, as altas pressões envolvidas no corte aproximam a área de contato real com a aparente. É por isto que, a força necessária para movimentar o cavaco para fora da zona de corte, sobre a superfície da ferramenta, é proporcional à força necessária para cisalhar o material da peça, que está em contato íntimo com a ferramenta. Assim, a área de contato cavaco-ferramenta é uma variável diretamente proporcional à energia gasta para deslizar um corpo contra o outro.

Para corroborar esta teoria Trent e Wright basearam-se no uso de microscopia eletrônica de transmissão, para analisar a interface de contato entre um aço e uma ferramenta de aço-rápido. No contato não verificaram presença de vazios, mostrando assim que as superfícies estavam inter-travadas sem possibilidade de ter havido deslizamento.

Citando pesquisas mais recentes (ORABY; ALASKARI, 2011), existem teorias derivadas da modelagem matemática que relacionam a variação dos parâmetros de corte com o atrito, destacando ao avanço por revolução como a variável que mais influência no coeficiente de atrito na interface de contato.

São poucas as conclusões que podem ser tiradas de observações direitas durante o corte, argumenta Machado et al. (2011), pois a área da interface cavaco-ferramenta é compreendida apenas por uns poucos milímetros quadrados, além da velocidade de saída do cavaco ser muito elevada, dificultando o monitoramento em tempo real.

A maioria das teorias modernas disponíveis da interface cavaco-ferramenta foram derivadas de análises após a interrupção do corte (utilizando-se a técnica de quick-stop) e de medições das deformações e monitoramento das temperaturas naquela região.

Estes resultados ainda são pouco conclusivos já que a superfície da ferramenta está em constante mudança fazendo que a presença de microsulcos e defeitos topográficos alterem, em grande parte, o fenômeno de formação do cavaco (ORABY; ALASKARI, 2011).

Na usinagem dos metais pelo menos três condições de interface cavaco-ferramenta podem ser encontradas (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO et al., 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

1. Aderência + Escorregamento
2. Escorregamento
3. Aresta postiça de corte – APC

Quem mais difundiu a teoria das condições da interface cavaco-ferramenta nos meios científicos foi Trent, que desde 1963 identificou e definiu com muita competência a “ZONA DE ADERÊNCIA” (seizure ou stiking zone, da literatura inglesa) e a “ZONA DE ESCORREGAMENTO” (sliding zone, da literatura inglesa).

A condição de aderência se estende desde a aresta de corte da ferramenta, para dentro da superfície de saída da ferramenta, tendo a zona de escorregamento se desenvolvendo ao longo da sua periferia (MACHADO et al., 2011). A Figura 2.6 identifica estas duas zonas. Linha BC = aderência, Linha CD = escorregamento.

Em determinadas situações, onde se encontram presentes alguns elementos de corte-fácil no material da peça (como o chumbo, o selênio, o telúrio e o bismuto), eles atuam como lubrificantes sólidos, se depositando na superfície de saída da ferramenta e sofrem o cisalhamento no lugar do material da matriz. É como se prevalecesse assim, somente uma situação de escorregamento.

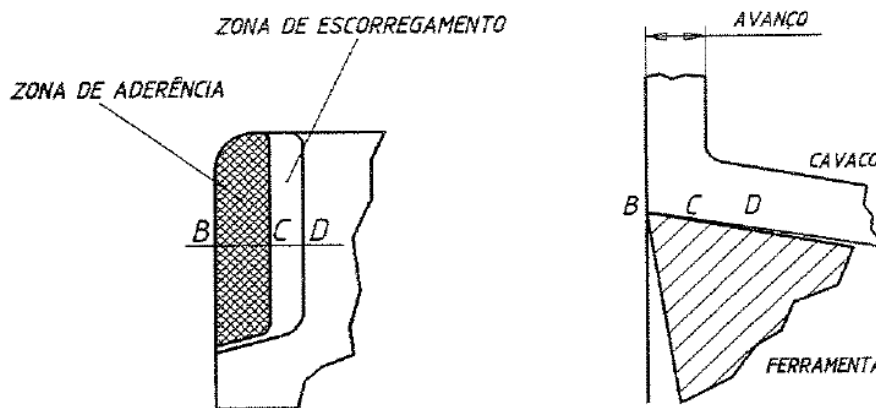


Figura 2.6 - Zonas de escorregamento e aderência na interface cavaco-ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000).

2.3.2 – Condição de aderência

Na ponta da ferramenta, altas pressões são geradas numa pequena zona, que promovem um “intimo contato” entre o cavaco e a ferramenta e as áreas de contato aparente e real são idênticas. Esta região foi denominada de zona de aderência (seizure ou stiking zone, da literatura inglesa). Sob esta condição o movimento na interface ocorre por cisalhamento dentro do material do cavaco, e não por deslizamento. Uma zona de cisalhamento intenso é formada bem próxima, mas não necessariamente na interface, que foi denominada “zona de fluxo” ou flow zone da literatura inglesa (TRENT; WRIGHT, 2000).

Nesta zona existe um gradiente de velocidade. Uma camada de material em contato com a ferramenta é estacionaria, mas a uma distância que geralmente oscila entre 0,01 e 0,10 mm (espessura da zona de fluxo) a velocidade assume o valor da velocidade de saída

do cavaco, v_{cav} . Com este conceito a tensão requerida para cisalhar o material a altas temperaturas e altas taxas de deformação é um fator muito importante em usinagem. Trent e Wright (2000) sugerem que o mecanismo de deformação plástica na interface cavaco-ferramenta ocorre por dois modos diferentes: (i) a baixas velocidades de corte e de avanço, com formação de Aresta Postiça de Corte, APC, ela ocorre por movimento de discordâncias, ocorrendo, portanto, encruamentos; (ii) a altas taxas de remoção de material na zona de aderência, as deformações cisalhantes estão confinadas a estreitas bandas de cisalhamento termoplástico (zona de fluxo). Neste mecanismo, as tensões de escoamento são reduzidas por um processo de recuperação dinâmica, que ocorre com o aumento da temperatura.

A deformação plástica provavelmente envolve escorregamento dos contornos de grãos e o material se comporta praticamente como um “fluido viscoso”. A Figura 2.7 apresenta uma micrografia da interface de contato cavaco-ferramenta, publicada pela primeira vez por Trent e Wright (2000). Pode-se observar na Fig. 2.7 que as deformações no cavaco vão aumentando à medida que se aproxima da interface com a ferramenta, atingindo valores muito altos de deformações, ao ponto de não mais se distinguir os micro constituintes (ferrita e perlita), por falta de resolução, com a ampliação usada nessa micrografia.

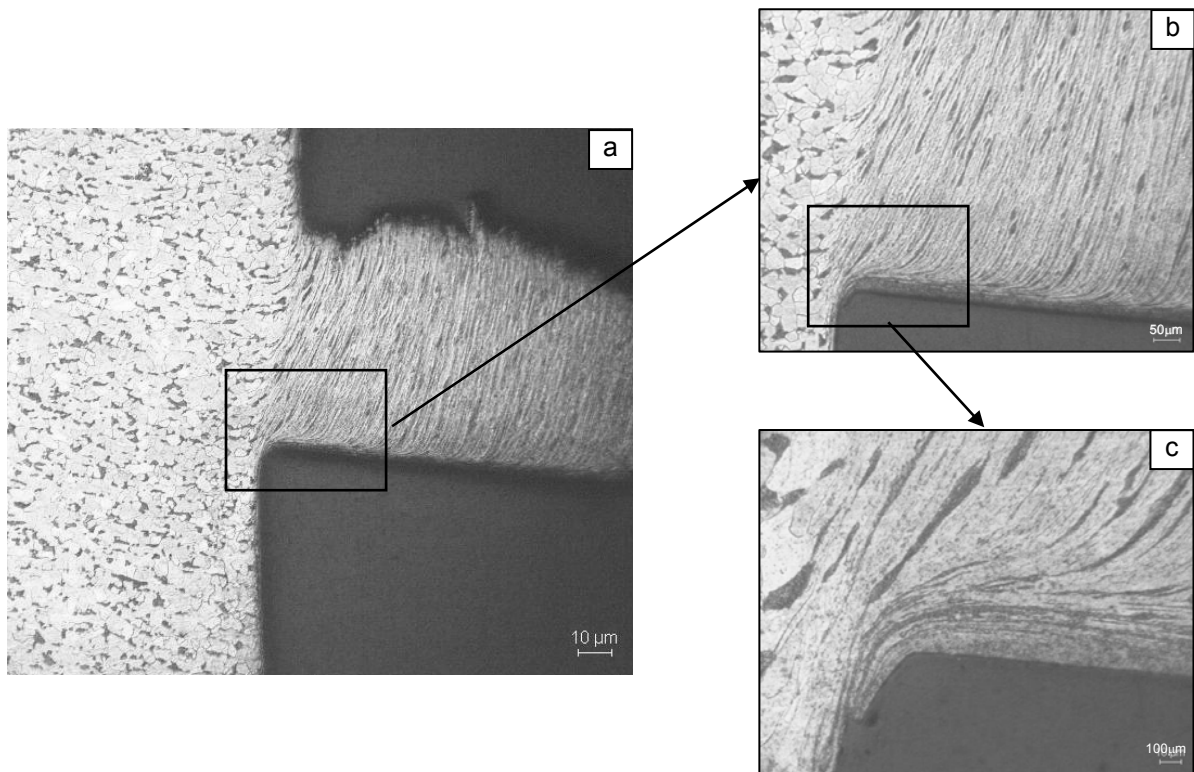


Figura 2.7 - a) Micrografia da raiz de um cavaco de aço ABTN 1010; b) Ampliação da região indicada em a; c) – Ampliação da região indicada em b. (TRENT; WRIGHT, 2000).

2.3.3 – Condições de escorregamento

À medida que se afasta da aresta principal de corte, a tensão normal vai diminuindo e o contato entre o cavaco e a ferramenta deixa de ser tão intenso, a área real é muito menor que a área aparente, as ligações que se formam são mais fracas que as ligações internas dos materiais da peça e da ferramenta, e o movimento relativo acontece justamente na interface. O deslizamento acontece por um processo conhecido como stick-slip, onde há a união nos picos das irregularidades das duas superfícies envolvidas, e logo em seguida ocorre escorregamento exatamente na interface (MACHADO et al., 2011).

Nestas condições, onde o contato entre o cavaco e a ferramenta é menos intenso, a presença de oxigênio é possível, formando óxidos que dificultam as ligações metálicas fortes entre os dois materiais.

Alguns lubrificantes sólidos como Pb, Se, Bi, Te, MnS e MoS₂ podem melhorar a usinabilidade dos material graças às suas baixas resistências ao cisalhamento, e a maioria com baixo ponto de fusão. Eles atuam na interface cavaco-ferramenta e substituem a zona de aderência, caracterizando as condições especiais em que prevalece apenas uma zona de escorregamento.

2.3.4 – Condições de APC

A aresta postiça de corte ou APC é um fenômeno particular que ocorre na usinagem em baixas velocidades, onde a baixa temperatura facilita a existência de um material encruado na ponta da ferramenta.

Para que este fenômeno tenha lugar, o material da peça deve possuir uma segunda fase. Milovic e Wallbank (1983), citados por Machado et al.,(2011), explicaram teoricamente como as diferentes deformações entre as duas fases do material, permitem a formação de microtrincas que facilitam a formação da APC.

Trent e Wright (2000) explicam o fenômeno de formação da APC como a superposição de uma serie de camadas que formam uma cunha cortante postiça a qual possui uma dureza superior ao material da peça.

O processo de formação da APC inicia com fortes ligações atômicas de uma primeira camada do material que se une à ferramenta e que, graças às deformações plásticas, é encruada, aumentando seu limite de escoamento.

As tensões de cisalhamento tornam-se insuficientes para quebrar estas ligações, transferindo o cisalhamento para uma nova camada sobre a primeira já encruada. Esta nova camada, pelo mesmo motivo, também, encruará.

A repetição deste processo aumenta a altura destas camadas superpostas até um nível onde esta aresta postiça é vencida pelas tensões cisalhantes, liberando fragmentos junto à superfície inferior do cavaco e às superfícies principal e secundária da peça.

Este processo é repetitivo, cada pedaço cisalhado da APC é o que Hutchings (1992) chama de debri ou partícula dura, que pode promover o desgaste abrasivo, além de piorar o acabamento da superfície.

As dimensões da APC crescem até atingir um valor máximo, a partir do qual começa a diminuir até o valor de velocidade de corte crítica, $v_{critica}$, onde a APC desaparece completamente. Isto acontece devido ao aumento proporcional da temperatura na interface de contato cavaco-ferramenta com o aumento da velocidade de corte, amolecendo o material, impedindo que o encruamento prevaleça e, conseqüentemente, eliminando o crescimento de camadas para formar a APC.

2.4 – Forças e potência de usinagem.

A análise das forças de usinagem é uma fonte de informação valiosa para os processos de corte. O conhecimento do comportamento de suas componentes auxilia no desenvolvimento de projetos de ferramentas e de técnicas de corte mais adequadas. A força de usinagem no processo de corte é diretamente proporcional à potência utilizada, assim esta relação facilita o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta. Outro ponto importante, ao falar das forças e potências de corte é sua estreita relação com a temperatura de corte, o desgaste da ferramenta e a capacidade de precisão numa peça usinada.

Existem pelo menos duas abordagens no estudo dos esforços de corte. A primeira é a teórica, partindo da fenomenologia de formação do cavaco e, através de algumas simplificações, como a consideração de que as forças atuam num ponto e a suposição de que o corte é ortogonal (corte com componentes de força somente em duas direções), permite prever os diversos esforços que atuam nos planos de cisalhamento primário e secundário (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). A segunda abordagem é empírica, onde os esforços de corte são determinados e estudados utilizando-se instrumentos (dinamômetros) adequados para medições das componentes de forças.

2.4.1 – Forças no corte ortogonal

A componente da força de usinagem num plano ou numa direção qualquer é obtida mediante a projeção da força de usinagem F_u sobre esse plano ou direção, isto é, mediante

uma decomposição ortogonal. Uma maneira de facilitar o entendimento das forças de usinagem atuantes na cunha cortante é o uso do corte ortogonal, onde são consideradas as componentes da força de usinagem em duas direções, em cada plano de cisalhamento (Figura 2.8a). A simplificação do sistema é obtida utilizando o conhecido “círculo de Merchant”. A Figura 2.8b esquematiza o uso desta técnica. Nele a força de usinagem é deslocada para a aresta principal de corte da ferramenta e faz-se de seu módulo o diâmetro de um círculo. Assim a força de usinagem pode ser sempre decomposta em dois pares de componentes complementares, nas direções de interesse, para estudo. Neste sistema, a medição das componentes de força de corte e de avanço, por exemplo, permite determinar todas as demais componentes em função destas.

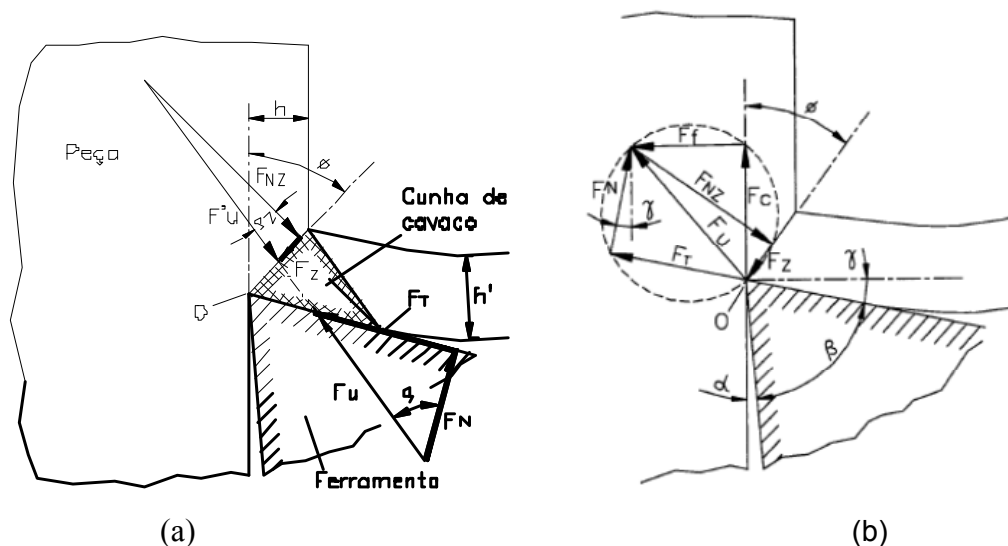


Figura 2.8 - a)- Representação da força de usinagem no corte ortogonal e b)- sua representação no Círculo de Merchant (FERRARESI, 1981).

Observando a movimentação da ferramenta em relação à peça, dois grandes grupos de forças distintas são evidenciados:

- Forças provenientes da ação da ferramenta sobre a superfície inferior da cunha do cavaco, cuja resultante é F_u .
- Forças provenientes da ação da peça sobre o plano de cisalhamento primário, cuja resultante é F_u' .

Admitindo-se que a cunha do cavaco é indeformável, ou para manter o equilíbrio mecânico:

$$\vec{F_u} + \vec{F_u'} = 0 \quad (2.1)$$

A resultante F_U pode ser decomposta em duas componentes ortogonais: F_T , a força de atrito, responsável pela energia consumida no plano de cisalhamento secundário, e F_N , força normal, perpendicular F_T , (Fig. 2.8). Da mesma maneira, a resultante F_U' pode ser decomposta em F_Z , a força de cisalhamento, no plano de cisalhamento primário, responsável pela energia consumida para cisalhar o material naquele plano, e em F_{NZ} , a força que exerce esforço de compressão no plano de cisalhamento primário, e é perpendicular a F_Z . A resultante F_U pode ser ainda decomposta em F_C , a força de corte, na direção de corte, responsável pelo trabalho total realizado no corte, e em F_f , a força de avanço, na direção de avanço e perpendicular a F_C no caso do torneamento. Portanto, neste caso:

$$\vec{F}_U = \vec{F}_C + \vec{F}_f \quad (2.2)$$

Dessa maneira gera-se o círculo de Merchant (Fig. 2.8), trasladando a força resultante F_U para a ponta da ferramenta, fazendo o seu módulo igual ao diâmetro do círculo. Este processo permite evidenciar geometricamente as diversas componentes da força F_U .

2.4.2 - Forças no corte tridimensional

De forma similar ao corte ortogonal, mas com a inclusão da força passiva F_p (projeção de F_u sobre a perpendicular ao plano de trabalho), terceira componente de F_U , o corte tridimensional é representado pela Fig. 2.9.

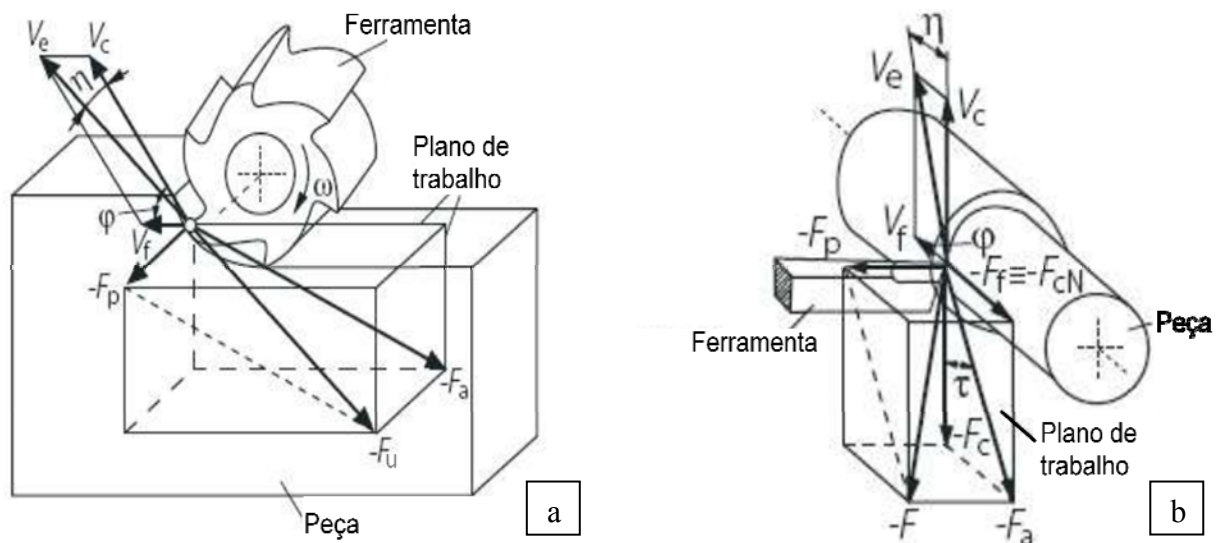


Figura 2.9 - Componentes da força de usinagem no corte tridimensional: a) no fresamento e b) no torneamento (FERRARESI, 1981).

Analisando a Fig. 2.9, observa-se agora, uma análise espacial onde, o vetor da força F_u possui três componentes. Matematicamente temos, para o torneamento (Fig. 2.9 a):

$$\vec{F}_u = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (2.3)$$

Alem das componentes F_c e F_f , aparecem também as componentes F_t (Força ativa = projeção de F_u sobre o plano de trabalho) e F_{ap} (Força de apoio = projeção de F_u sobre a perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho). No caso do torneamento o ângulo da direção de avanço, $\varphi = 90^\circ$ e a força F_{ap} confundem-se com F_c . No fresamento a Eq. (2.2), fica modificada para:

$$\vec{F}_u = \vec{F}_{ap} + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (2.4)$$

Estas três componentes de F_u , podem ser determinadas, através do uso de um dinamômetro, pois suas direções são claramente conhecidas (MACHADO et al., 2011).

2.4.3 – Comportamento da força de usinagem

O comportamento das forças de usinagem é relacionado às condições do processo de corte, as quais influenciam em maior ou menor proporção as componentes desta força.

De maneira geral os principais fatores que tendem aumentar a força de usinagem são:

- Materiais que apresentam grande resistência ao cisalhamento;
- Grandes áreas de contato entre o cavaco e a ferramenta;
- Materiais com altos pontos de fusão.
- Baixas temperaturas de corte;
- Afições negativas na ferramenta;
- Profundidades e avanços de corte elevados.

Trabalhos experimentais mostram a influência dos principais parâmetros envolvidos no corte nas componentes da força de usinagem: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, estado de afiação da ferramenta e utilização de fluido de corte, (BOHES et al., 1987) (MACHADO et al., 1987).

De maneira mais pontual Machado et al (2011), argumentam o comportamento das forças de corte devido à dependência da força de usinagem com a maneira com que o cavaco se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta.

A força de usinagem depende das dimensões e resistência dos planos de cisalhamento primário e secundário, portanto, a força de usinagem depende fortemente das condições da interface cavaco-ferramenta. Assim, todos os fatores que contribuem para facilitar a movimentação do cavaco por sobre a superfície de saída da ferramenta atuam no sentido de diminuir a força de usinagem F_u e vice-versa.

Apesar de a análise teórica ser de grande utilidade, as predominâncias nos fatores devem ser comprovadas experimentalmente. Um grande número de pesquisas corrobora o efeito da mudança nos parâmetros de corte como listado a seguir:

a) Velocidade de corte

A variação da força com a velocidade de corte pode ser dividida em dois casos particulares, com comportamentos diferenciados: os materiais que possuem segunda fase e aqueles que não a têm.

No primeiro caso (materiais com segunda fase), ocorrerá a formação da APC nas baixas velocidades de corte. Este fenômeno produz uma afiação mais aguda na ponta da ferramenta, facilitando o cisalhamento do cavaco e reduzindo assim a força de usinagem. Trent e Wright (2000) atribuem às baixas forças de usinagem na presença da APC, devido à diminuição da área de contato, que neste caso ocorre entre o cavaco e a APC. Esta cunha postiça desaparece com o aumento da temperatura, devido a uma velocidade de corte maior. No momento que a APC é diminuída, conseqüentemente as forças de corte aumentam até um ponto máximo, no qual a força começa cair novamente pelo efeito do aumento da temperatura, que atua como facilitador do corte.

No segundo caso (materiais sem segunda fase) não existe APC e a queda na força de corte com o aumento na velocidade de corte é evidente, tendendo a ficar constante após certo ponto, para velocidades de corte maiores.

b) Avanço e profundidade de corte

O aumento destes dois fatores, por aumentar diretamente às áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, causa um aumento da força de usinagem, numa proporção quase linear. Em testes experimentais Suarez (2008), mostrou maior influência na força de usinagem por parte do avanço, quando comparado com o efeito da profundidade de corte. Testes realizados no LEPU/FEMEC/UFU, entretanto, indicaram resultados contrários, isto é, o maior efeito é da profundidade de corte.

c) Material da peça

Como mencionado anteriormente, a maior resistência ao cisalhamento do material da peça implica em maior força de usinagem, mas existem casos particulares onde o material com menor resistência mecânica apresenta maiores forças de corte, isto devido às maiores áreas de contato incentivadas pela natureza dúctil do material.

d) Material da ferramenta

A afinidade química do material da ferramenta com o material da peça atua principalmente na área de contato cavaco-ferramenta. Se a tendência for promover uma zona de aderência estável e forte, a força de usinagem será elevada. Pelo contrário, se há tendência de diminuir o atrito na interface, como por exemplo, no caso das ferramentas revestidas, a área da seção de corte poderá ser reduzida, diminuindo a força de usinagem.

e) Geometria da ferramenta

O ângulo mais influente na variação da força de corte é o ângulo de saída da ferramenta. A redução deste ângulo tende a aumentar a área de contato cavaco-ferramenta e consequentemente a força de usinagem. Pequenas influências dos ângulos de posição e de folga são observadas, onde só em casos extremos pode haver pequenos incrementos na força de usinagem.

f) Estado de afiação da ferramenta

O desgaste da ferramenta de corte além de prejudicar o acabamento e as tolerâncias dimensionais da peça, pode alterar a geometria da ferramenta de maneira a aumentar a área de contato cavaco-ferramenta. Desgastes de cratera e de flanco aumentam o contato entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça respectivamente, aumentando assim a força de usinagem.

g) Uso de fluidos de corte

O uso de fluidos de corte é benéfico para a diminuição das forças de atrito quando sua ação principal é lubrificante. Já no caso de uma maior ação refrigerante, possíveis aumentos na força de corte podem estar presentes, devido ao aumento da resistência ao cisalhamento do material, pela redução de temperatura.

2.4.4 - Potência de usinagem

A potência de usinagem é uma consequência da energia necessária para cisalhar o material da peça. Esta energia consumida está diretamente ligada aos parâmetros de corte

usados, sendo que uma maior remoção de volume e o incremento da velocidade com a qual este volume é retirado são as principais causas de aumento do consumo de energia ou potência.

As potências necessárias para a usinagem resultam como produtos das componentes de força de usinagem pelas respectivas componentes da velocidade de corte, sendo então divididas em:

a) Potência de corte N_c

A potência de corte N_c é o produto da força de corte, F_c , com a velocidade de corte v_c . Para P_c em Kg e v_c em m/min. tem-se

$$N_c = \frac{F_c * v_c}{60 * 75} (CV) \quad (2.5)$$

b) Potência de avanço N_f

A potência de avanço, N_f , é o produto da força de avanço F_f com a velocidade de avanço v_f . Para F_f em kg e v_f em mm/min. tem-se

$$N_f = \frac{F_f * v_f}{1000 * 60 * 75} (CV) \quad (2.6)$$

c) Potência efetiva de corte

A potência efetiva de corte N_e é o produto da força efetiva de corte F_e pela velocidade efetiva de corte v_e . É portanto igual à soma das potências de corte e avanço.

$$N_e = N_c + N_a \quad (2.7)$$

Para F_e em kg e v_e em m/min. tem-se

$$N_e = \frac{F_e * v_e}{60 * 75} (CV) \quad (2.8)$$

A maior parcela da potência efetiva de corte, N_e , é dada pela potência de corte, N_c , sendo que a potência de avanço, N_f , é praticamente desprezível (MACHADO et al., 2011).

Assim, pode-se escrever com uma boa aproximação que:

$$N_e \approx N_c \quad (2.9)$$

Por esta razão a força de corte F_c , constituinte da maior parcela de potência de usinagem, é chamada “força principal de corte” (FERRARESI, 1981).

Diniz, Marcondes e Coppini (2006) citam um exemplo do torneamento cilíndrico de uma peça com 10 mm de diâmetro e $f = 1$ mm/volta, consideradas pelos autores como limites extremos para esta análise, i.e., d muito pequeno e f muito grande, a fim de tornar a relação N_c/N_f a menor possível. Nesta abordagem foi encontrado $N_c/N_f = 140$, considerando que a relação de F_c/F_f é de aproximadamente 4,5. Ou seja, a potência de avanço, em uma condição extrema, é 140 vezes menor que a potência de corte.

Esta diferença entre potência de corte e potência de avanço permite desprezar a potência de avanço no dimensionamento do motor da máquina, onde somente um motor é responsável tanto pelo movimento de avanço, quanto pelo movimento de corte. Quando a máquina possui motor independente para o movimento de avanço, verifica-se que esse motor é sempre muito menor que o motor responsável pelo movimento de corte.

d) Potência de corte fornecida pelo motor N_m

Nas máquinas operatrizes que apresentam um único motor para movimento de corte e de avanço, como N_c é muito maior que N_f despreza-se N_f e faz-se

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (2.10)$$

Onde

η = rendimento da máquina operatriz – 60 a 80% em máquinas convencionais, que possuem caixa de engrenagens para transmissão do movimento e maior que 90% em máquinas CNC, onde o motor tem variação contínua de rotação e a transmissão de movimentos do motor é realizada com poucos (ou nenhum) elementos de transmissão.

Há que se considerar porém que a maioria das máquinas CNC tem motor principal de corrente alternada com variação contínua de rotação através da variação da frequência do sinal de entrada. Estes motores tem relativamente baixo rendimento em baixas rotações. Em geral, em rotações menores que 1000 RPM, este rendimento é menor que 90% (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

2.5 – Fluidos de corte

Os fluidos de corte têm sido incorporados ao processo de usinagem com o propósito de melhorar as características tribológicas inerentes ao mesmo, as quais estão presentes entre a superfície de contato da ferramenta com o cavaco e com a peça (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001).

2.5.1 - Funções dos fluidos de corte

De forma geral usam-se os fluidos de corte a fim de obter um custo total por partes usinadas menor, ou um aumento na taxa de produção. Isto é possível devido aos benefícios que eles podem proporcionar, como por exemplo:

- Aumento da vida útil da ferramenta pela lubrificação e refrigeração (diminuição da temperatura);
- Redução das forças de corte devido à lubrificação e, conseqüentemente, redução de potência;
- Melhora do acabamento superficial;
- Fácil remoção do cavaco da zona de corte;
- Menor distorção da peça pela ação da ferramenta (controle dimensional da peça).

Segundo Machado et al (2011), quando um fluido de corte é a base de água, a dissipação de calor (refrigeração) é mais efetiva que a redução do atrito (lubrificação). A eficiência do fluido de corte em reduzir a temperatura diminui com aumentos da velocidade de corte e da profundidade de corte.

Como lubrificante, o fluido de corte tende a formar um filme (película) entre a ferramenta e o cavaco, apenas na zona de escorregamento (Fig. 2.6), impedindo o contato direto entre os mesmos nesta região. Segundo Trent e Wright (2000) o lubrificante não tem acesso na zona de aderência devido ao íntimo contato do cavaco com a ferramenta nessa região. Esta teoria refutou o postulado de Postnikov (1967) que acreditava que o fluido de corte conseguia penetrar até chegar à ponta da ferramenta graças a uma ação capilar, assumindo que o contato na interface não era completo, existindo unicamente condição de escorregamento. Anos depois, pesquisas desenvolvidas com ferramentas transparentes de safira demonstraram como o fluido penetra pelos lados ao invés de se movimentar contra o fluxo de saída do cavaco (HORNE; DOYLE; TABOR, 1978).

Com a penetração do fluido de corte pode-se também restringir o caldeamento (micro soldagem) de cavacos e peça na superfície de saída e de folga da ferramenta, respectivamente e evitar ou diminuir as dimensões da aresta postiça de corte (APC), isso quando são incorporados ao fluido aditivos apropriados (MACHADO et al., 2011).

A baixas velocidades de corte, a refrigeração é relativamente sem importância, enquanto que a lubrificação é importante para reduzir o atrito e evitar o aparecimento de APC (aresta postiça de corte). Um fluido de corte à base de óleo seria o mais indicado.

A altas velocidades de corte, as condições não são favoráveis para a penetração do fluido de corte na interface cavaco-ferramenta para que ele exerça o papel lubrificante. Isto acontece pelas altas tensões que se apresentam na interface cavaco-ferramenta e o fluxo de cavaco maior, contra a direção do fluido, impedindo a penetração do mesmo.

2.5.2 - Classificação dos fluidos de corte

Existem lubrificantes sólidos, líquidos e gasosos. O grupo dos fluidos de corte líquidos é o mais importante e mais amplamente empregado e ocupa lugar de destaque por apresentar boas propriedades refrigerantes e lubrificantes. Entre os gasosos, os mais comuns são o oxigênio e o vapor de água encontrado na atmosfera (SHAW, 1968). Eles praticamente só refrigeram, ao contrario dos sólidos (grafite, bissulfeto de mobilidênio, etc.) que só lubrificam.

Podemos ainda subdividir o grupo dos fluidos de corte em três grandes Subgrupos:

1. Óleos de corte integrais (puros): óleos minerais (derivados de petróleo), óleos graxos (de origem animal ou vegetal), óleos sulfurados (enxofre) e clorados (cloro) que são agentes EP.
2. Óleos emulsionáveis: são fluidos de corte em forma de emulsão, composto por uma mistura de óleo e água na proporção de 1:10 a 1:100. Sua composição é a base de óleos minerais, óleos graxos, emulgadores, agentes EP (enxofre, cloro, fósforo ou cálcio) e água.
3. Fluidos químicos ou sintéticos: não contêm óleo mineral em sua composição e formam soluções transparentes (boa visibilidade no processo de corte). Composto por misturas de água e agentes químicos (amina, nitritos, fosfatos, boratos, sabões, agentes umectantes, glicóis e germicidas).

2.5.3 - Métodos de aplicação dos fluidos de corte

Existem quatro direções de aplicação dos fluidos de corte, como mostra a Figura 2.10.

O primeiro sistema é o mais utilizado pela sua simplicidade. O segundo método pode oferecer vantagens sobre o primeiro, devido ao maior poder de penetração e velocidade. O terceiro método é mais engenhoso, mas bons resultados foram obtidos com o seu emprego.

Machado e Wallbank (1994) desenvolveram vários experimentos analisando a influência das altas pressões na injeção do fluido de corte (14,5 MPa) direcionado à superfície de saída da ferramenta (direção 2 da Fig. 2.10) no torneamento do Ti6Al4V e do Inconel 901, obtendo maiores tempos de vida da ferramenta quando comparados com a aplicação em baixa pressão.

Além da direção de aplicação, podem se mudar também as formas de aplicar o fluido:

- Jorro de fluido à baixa pressão (torneira à pressão normal);
- Pulverização;
- Sistema à alta pressão.



Figura 2.10 - Direções de aplicação do fluido de corte (adaptado de DA SILVA, 2006).

Quando o objetivo é a diminuição de temperatura na peça, como no caso do alumínio, bons resultados foram obtidos na furação com a aplicação de jorro em baixa pressão, na direção sob-cabeça (Fig. 2.11).

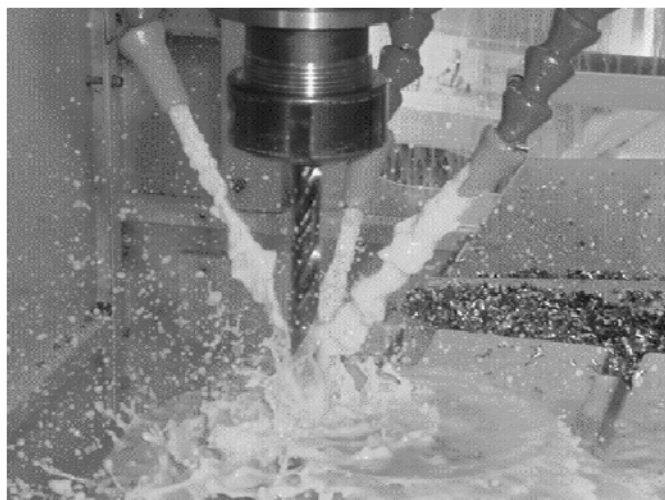


Figura 2.11 - Aplicação por jorro em 3 bicos do fluido de corte semi-sintético, vazão total de 1230 l/h (SUAREZ, 2008).

2.5.4 - Implicação da utilização dos fluidos de corte no processo de usinagem

Nelson e Schaible (1988), citados por Machado et al (2011), afirmam que um dos principais fatores que influi no aumento da qualidade dos fluidos de corte dos dias de hoje é a pressão exercida por Agências de Proteção de Saúde, para que os produtos sejam comercializados com mais segurança e que causem menos mal ao meio ambiente.

Nos últimos anos, na tentativa de reduzir custos e atender as normas ambientais, tem-se observado uma necessidade de reduzir o consumo de fluido de corte. A técnica de aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte (MQF) tem sido objeto de muitas pesquisas. Alguns autores usam MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante), ao invés de MQF.

Nesta técnica o fluido é aplicado em volumes muito baixos chegando a 10 ml/h. Normalmente, eles são aplicados juntamente com um fluxo de ar (método da pulverização) e direcionados contra a saída do cavaco, ou entre a superfície de folga da ferramenta e a peça.

Estudos na usinagem em HSM de aços endurecidos realizados por Liao e Lin (2007) mostraram o comportamento da vida da ferramenta no processo de fresamento com MQF comparando com a usinagem a seco. A Figura 2.12 apresenta esta comparação.

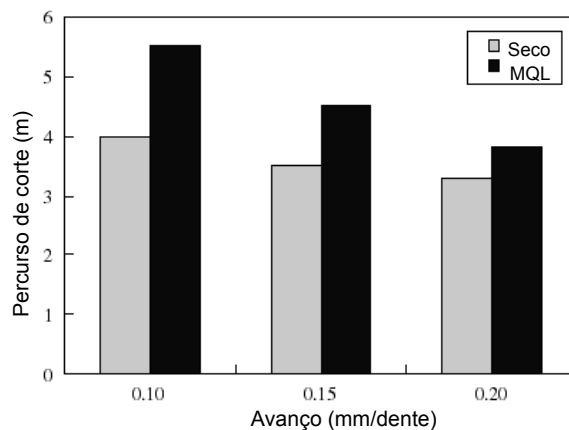


Figura 2.12 - Vida da ferramenta no fresamento de aço AISI P21 com MQL e a seco ($a_p = 0,3$ mm e $v_c = 500$ m/min) (LIAO; LIN, 2007).

Certas propriedades especiais são conferidas aos fluidos de corte por meio de aditivos, que são produtos químicos ou orgânicos. Os aditivos mais usados são:

- Antiespumantes: evitam a formação de espuma que poderia impedir a boa visão da região de corte e comprometer o efeito de refrigeração do fluido;
- Anticorrosivos: protegem a peça, a ferramenta e a máquina-ferramenta da corrosão (são produtos à base de nitrito de sódio);
- Antioxidantes: têm a função de impedir que o óleo se deteriore quando em contato com o oxigênio do ar;
- Detergentes: reduzem a deposição de lodo, lamas e borras (composto de magnésio, bário, cálcio, etc);
- Emulgadores: são responsáveis pela formação de emulsões de óleo na água;
- Biocidas: substâncias ou misturas químicas que inibem o crescimento de microorganismos;
- Agentes EP (extrema pressão): para operações mais severas de corte, eles conferem aos fluidos de corte uma lubricidade melhorada para suportarem elevadas temperaturas e pressões de corte, reduzindo o contato da ferramenta com o material. Os principais agentes EP são à base de enxofre, cloro e fósforo.

Não existe um fluido universal já que a escolha do fluido com determinada composição depende do material a ser usinado, do tipo de operação e da ferramenta usada. Os fluidos de corte emulsionáveis e sintéticos são indicados quando a refrigeração for mais importante.

Os óleos minerais e graxos usados juntos ou separados, puros ou contendo aditivos especiais, são usados quando a lubrificação for o fator mais determinante.

Costa (2004) cita algumas dicas do uso de fluidos de corte, dependendo do material usinado.

- Para algumas ligas de alumínio é necessário o fluido de corte, que pode ser uma emulsão com mistura de óleo mineral e graxo ou a maioria das emulsões. O uso de fluidos de origem vegetal apresenta boa adesividade do fluido à superfície de saída da ferramenta devido à ionização do mesmo. Na usinagem de alumínio não se requer aditivos EP e o enxofre ataca o metal instantaneamente;
- Os Ferros Fundidos cinzentos são normalmente usinados a seco, porém um óleo emulsionável pode ser útil na furação para ajudar a remover o cavaco, que é descontínuo;
- O magnésio e suas ligas normalmente são usinados a seco e a altíssimas velocidades de corte, entretanto, um refrigerante pode ser usado. Emulsões são proibidas, pois a água reage com o cavaco para liberar hidrogênio, que apresenta riscos de ignição. O enxofre ataca o metal;
- O cobre e suas ligas geralmente usam óleos emulsionáveis. O enxofre causa descoloração das peças;
- Devido a altas fragilidades das ferramentas cerâmicas, deve-se tomar cuidado ao aplicar um refrigerante, porque os choques térmicos podem causar trincas superficiais.

2.6 - Superfícies texturizadas

O limite entre a mudança de um meio para outro é denominado como superfície. De maneira generalizada uma superfície é definida como toda área de um sólido líquido ou gasoso que pode ser tocada. A ANSI/ASME (2002) define a textura como a composição de desvios típicos de uma superfície real, que incluem a rugosidade e as ondulações.

No contato com a superfície de um sólido diferentes fenômenos atuam, incluindo reações químicas e físicas. Estas reações podem ser mudadas pela modificação da superfície, com o uso da texturização. Uma textura pode ser criada por meios mecânicos, químicos ou físicos. As superfícies texturizadas têm sua origem na necessidade de alterar as características de interação entre um corpo ou peça com o meio ambiente ou com um contra-corpo. Uma maneira simples de visualizar este contexto é observar a diferença que existe entre a textura da pele dos dedos da sua mão e a textura da pele do seu rosto, estas texturas determinam finalidades diferenciadas e definidas. Com este mesmo princípio é

possível projetar superfícies que tragam benefícios para uma ferramenta de corte, a qual entra em íntimo contato com o material do cavaco e da peça de trabalho. O item 2.6.1 mostra as definições usadas na texturização de superfícies e suas aplicações.

2.6.1 – Definições

Para abordar o tema da texturização é necessário entender o termo “engenharia de superfície” que segundo Burakouzki e Wierzchon (1999), envolve todos os problemas técnicos e científicos relacionados com a modificação das superfícies ou a fabricação de camadas superficiais. A Figura 2.13 ilustra a atividade científica e técnica envolvida na criação da engenharia de superfície.

Para modificar uma superfície é preciso considerar os itens citados de maneira gráfica na Fig. 2.13. Cada atividade científica encontra-se inter-relacionada para definir previamente a capacidade da superfície de reagir corretamente sobre condições diferenciadas.

A criação de uma superfície ideal envolve a participação conjunta de várias áreas do conhecimento, sendo que individualmente esta atribui propriedades específicas a superfície que será produzida.

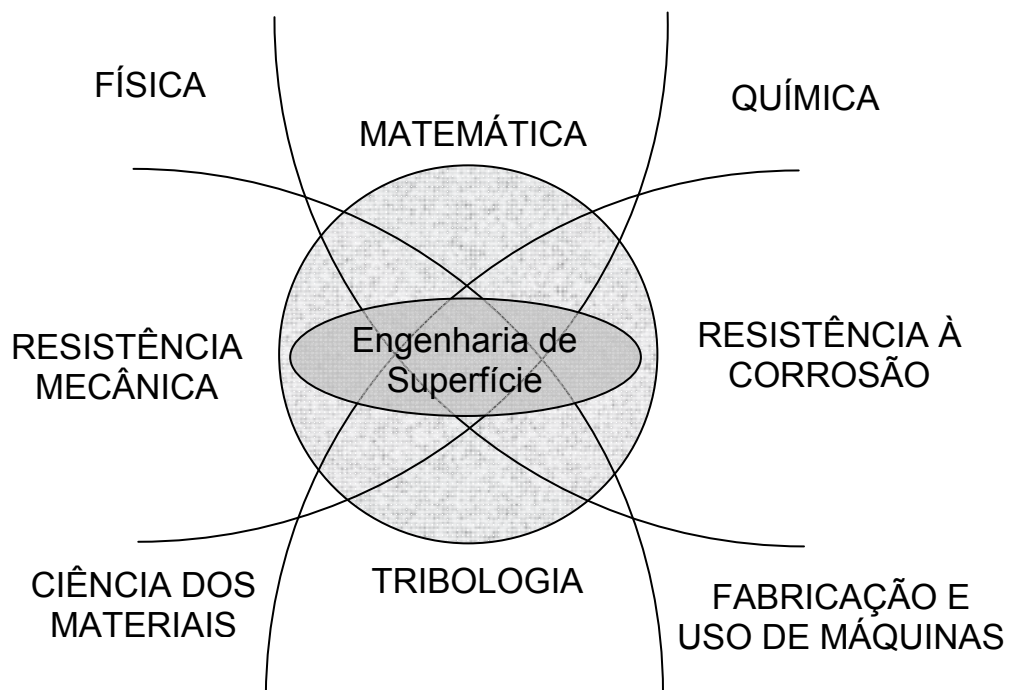


Figura 2.13 – Atividade científica e técnica envolvida na criação da engenharia da superfície (BURAKOUZKI; WIERZCHON, 1999).

Por outro lado, na engenharia de superfície as técnicas que produzem camadas superficiais tecnológicas podem ser divididas em:

- **Decrementais** – Compreendem uma diminuição nas dimensões do substrato quando modificada a superfície. Por exemplo, os diferentes processos de usinagem os quais, através de deformações plásticas, elásticas e altas temperaturas, mudam as características da superfície da peça.
- **Não decrementais** – Como seu nome diz esta técnica não diminui as dimensões do substrato. Por exemplo, a implantação de íons que, através de altas quantidades de energia, deposita a nível atômico inclusões no material do substrato até certa profundidade, produzindo uma camada na superfície com propriedades diferentes às do substrato.
- **Incrementais** – Envolvem como seu nome indica um aumento das dimensões do substrato. Por exemplo, eletrodeposição ou algum tratamento termo-químico como CVD (deposição química por vapor) ou PVD (Deposição física por vapor), baseados na deposição de diferentes elementos sobre a superfície os quais se aderem ao substrato por efeitos químicos ou por ligações atômicas dependendo da técnica. Normalmente esta é a técnica aplicada nas ferramentas de corte.

Depois de criada uma superfície de engenharia podem ser usadas técnicas de metrologia para definir geometricamente a mesma, usando os parâmetros de rugosidade. Existem diferentes equipamentos com a finalidade de acompanhar o perfil da superfície e quantificar e qualificar os desvios de um perfil ou plano ideal.

Em processos de fabricação normalmente os parâmetros de rugosidade mais utilizados são Ra (Roughness Average) - rugosidade média e Rz (ten-point mean roughness) - rugosidade média de dez pontos. Existem outras técnicas de caracterização de uma superfície, normalmente utilizadas quando a textura é definida ou pelo menos desenhada com uma finalidade, isto é, confinamento de fluido, poder de carregamento da superfície, taxas de desgaste da superfície, etc. Nestas situações parâmetros que mensuram a homogeneidade da superfície são utilizados, entre eles os parâmetros skewness, kurtosis, curva de Abbot Firestone, técnicas de fractais, etc.

2.6.2 – *Objetivos da texturização*

A texturização de superfícies surgiu como uma maneira de copiar o comportamento das diferentes topografias presentes na natureza como plantas, animais, minerais. Citando alguns exemplos, temos: Superfícies que possuem grande índice de molhabilidade (hidrofilicas) ou vice-versa (hidrofóbicas), derivadas da textura da flor de Lotto, planta que

possui folhas que evitam a molhabilidade da água nas suas pétalas. A textura na pele de um tubarão melhora a performance hidrodinâmica do animal no fluido, característica copiada no formato de uma bola de golfe, para melhorar a fluidez no ar. A capacidade de aderência copiada das patas de uma lagartixa, etc. Segundo Costa (2005) a taxionomia da física das superfícies pode ser classificada em fenômenos de contato e não contato. O primeiro caso abrange as situações onde a superfície entra em contato com outro meio, que pode ser líquido, sólido ou gasoso. Os fenômenos de não contato são principalmente relacionados com as propriedades de radiação e reflexão das superfícies.

A Tabela 2.1 apresenta a classificação das propriedades funcionais das superfícies de engenharia.

Tabela 2.1 – Classificação das propriedades funcionais das superfícies de engenharia (COSTA, 2005).

Físico	Energia da superfície	Capilaridade
		Molhabilidade
		Adesividade
	Óptico	Refletividade
		Absorção da luz
		Difração
Térmico	Dissipador	
Biológico	Adsorção	
Tecnológico	Mecânico	Resistência a fadiga
	Hidrodinâmico	
	Tribológico	Atrito
		Desgaste
		Aderência

Explicando sucintamente como uma mudança na topografia da superfície pode afetar as propriedades funcionais (COSTA, 2005), afirmam:

- **A modificação da energia superficial.** Ao mudar a topografia da superfície é possível alterar as tensões envolvidas numa interface gás-líquido-sólido e construir superfícies hidrofóbicas ou hidrofílicas, dependendo da aplicação. Esta técnica é

amplamente utilizada pelas construtoras de turbinas, motores de combustão interna e peças em geral que vivem em contato severo com outras superfícies, onde a lubrificação é um fator muito importante. Da mesma forma, a mudança na energia da superfície pode alterar as reações químicas, conformando uma grande aplicação da engenharia biomédica.

- **A modificação das propriedades ópticas da superfície.** Os ângulos de incidência e refração variam dependendo da inclinação da topografia da superfície no material. É assim que uma superfície espelhada pode refletir a luz em quase sua totalidade, enquanto uma superfície tratada topograficamente pode difratar um ou vários comprimentos de onda, permitindo a reflexão de um comprimento de onda específico, ou em outras palavras uma cor específica.

- **A modificação das propriedades térmicas.** Um fator primordial na dissipação ou absorção de calor é o volume ou área de material envolvido na troca de calor, é assim que uma mudança da topografia da superfície pode variar a área de contato com a fonte de calor resultando em propriedades termodinâmicas diferentes.

- **A modificação das propriedades mecânicas.** É bem sabido que a fratura dos corpos ocorre por concentração de tensões no material, sendo que as tensões mais altas apresentam-se na superfície do corpo, tornando a topografia da mesma relevante na resistência do material. Uma mudança na topografia do material altera as deformações plásticas e elásticas que a superfície sofre quando submetida a uma carga, sendo claro que o primeiro contato entre duas superfícies acontece entre os picos das irregularidades das mesmas.

- **A modificação das propriedades hidrodinâmicas.** A primeira premissa para obter um efeito hidrodinâmico é o movimento relativo entre as superfícies envolvidas. Estas propriedades são baseadas na mudança do comportamento de um fluido quando altera-se sua velocidade e/ou a geometria do terreno pelo qual flui, produzindo diferentes espessuras na camada de fluido presa entre dois corpos em contato.

- **A modificação das propriedades tribológicas.** Como citado na introdução da tese, a mudança do aspecto tribológico com o uso de diferentes geometrias superficiais é uma técnica muito interessante para ser aplicado em usinagem. Combinações das aplicações anteriormente citadas (térmica, energética, hidrodinâmica, etc) podem mudar drasticamente o comportamento do contato e desgaste entre dois corpos.

2.6.3 – Tipos de texturas

Como citado anteriormente, é possível criar texturas que incrementam a área de contato com o meio ambiente, obtendo uma maior troca de calor ou uma maior aderência com um revestimento, dependendo da profundidade e geometria das texturas. As protuberâncias e

as cavidades podem ser benéficas ou prejudiciais, no contato com um contra-corpo, onde se faz necessário um estudo dinâmico do fenômeno de contato. Protuberâncias muito elevadas ou picos na topografia podem gerar pontos de concentração de tensões e desgaste prematuro acelerado, pelo destacamento dos mesmos. Grandes espaçamentos ou cavidades com geometria e orientação inadequadas podem acelerar o desgaste da superfície. Para estas duas variáveis existem pontos de ótimo. Por este motivo é necessário conhecer corretamente aplicação da textura. Como o interesse deste trabalho é recriar uma textura adequada para usinagem, vamos focalizar os tipos de textura naqueles que podem trazer um benefício a este processo, omitindo, por exemplo, texturas dedicadas a benefícios óticos. Um dos fatores mais importantes na interação de dois corpos é a área de apoio, de um corpo com um contra-corpo, ou área real de contato, como representado por Stout e Blunt (2000), na fig. 2.14.

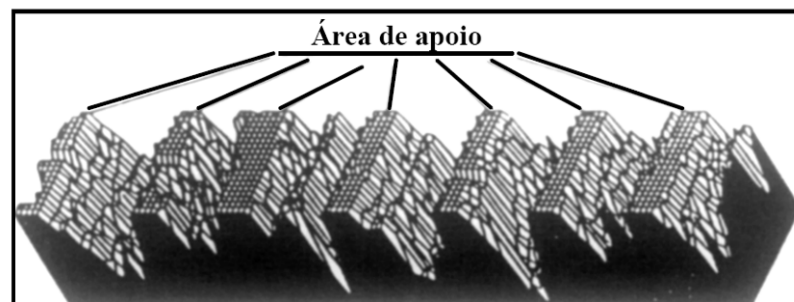


Figura 2.14 – Representação da área de apoio de uma superfície (STOUT; BLUNT, 2000).

Diferentes texturas representam diferentes áreas de contato e consequentemente diferentes pressões sobre a superfície. Uma textura desenhada deve possuir uma área de contato suficientemente grande para suportar as cargas às quais será submetida.

Em relação à geometria da textura, estudos recentes apresentam a texturização como uma maneira de gerar pontos de ancoragem para um posterior revestimento (LIMA, 2005; VIANA, 2009; ARROYO, 2009, NEVES 2010, KOSHY; TOVEY, 2011). Através da tecnologia laser, eletroerosão ou métodos de remoção fotoquímica é possível gerar texturas de cavidades de forma definida e equidistantes com grande precisão, de maneira continua ou pulsada, com marcas lineares ou por pontos, textura pode ser mudada através de mascaras com a finalidade de imprimir diferentes geometrias sobre a peça tratada (LIMA, 2006).

Os tipos de textura com formato básico, conforme Szymański, H., et al. (1990), podem ser classificados como:

Ponto: É o mínimo diâmetro possível, focalizado pelo feixe, conhecido popularmente como spot, este pode ser gerado de maneira contínua ou pulsada.

Linha: É a largura mínima possível gerada com o feixe laser quando descrito um movimento contínuo.

Anel: O diâmetro e espessura do anel dependem dos parâmetros do laser, normalmente é gerado de maneira pulsada.

A Figura 2.15 apresenta esquematicamente os diferentes tipos de textura realizados com estas três geometrias básicas. A Figura 2.16. e Fig. 2.17, apresentam o seguimento de trajetórias em forma livre.

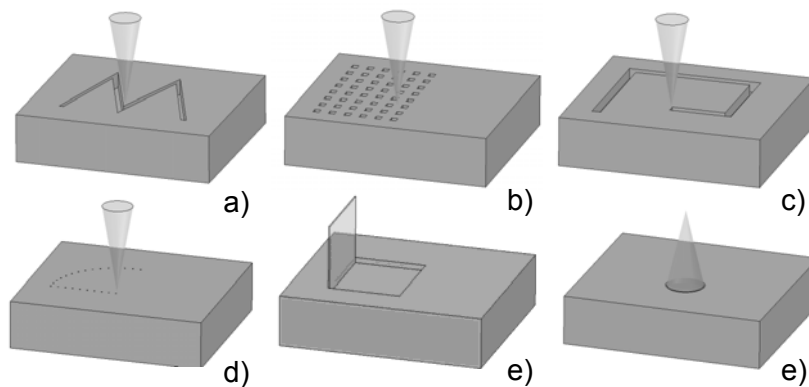


Figura 2.15 – Tipos de textura: a) seqüencial, b) ponto, c) forma livre linha, d) forma livre ponto, e) tira, f) ilha. Adaptado de (SZYMAŃSKI, H., et al., 1990 Apud BURAKOUSKI; WIERZCHON, 1999).

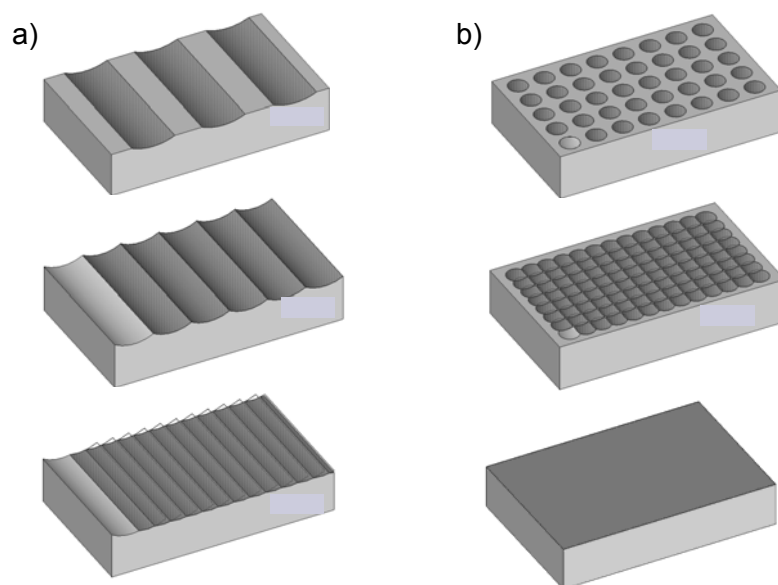


Figura 2.16 – Texturas por sobreposição "Overlapping" a) tira, b) ilha. (Adaptado de: BURAKOUSKI; WIERZCHON, 1999).

Na texturização de peças com o uso de laser, uma cabeça galvanométrica facilita a fabricação de texturas mais complexas, graças a um movimento relativo de dois espelhos acoplados a motores de passo que refletem o feixe laser permitindo uma total varredura da superfície tratada. Através deste dispositivo também é possível a sobreposição gradativa das texturas, como apresentado nas Fig. 2.15 e 2.16.

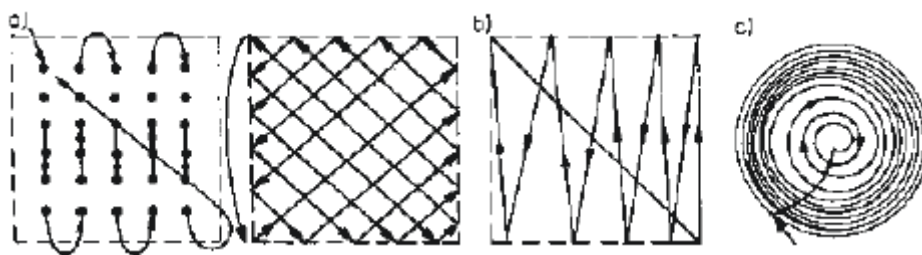


Figura 2.17 – Textura tipo forma livre a) quadrado ou retângulo em superfícies planas, b) densidade de energia superficial variável em superfícies cilíndricas ou planas, c) espiral em superfícies cilíndricas (Burakowski; Wierzchon, 1999).

2.6.4 – Fundamentos do LASER

A palavra laser é o acrônimo de “Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation”, ou seja, amplificação da luz por emissão estimulada, que não é mais que uma maneira de incrementar em grandes quantias a energia, fornecidas pela passagem de elétrons de um nível de energia para outro, através da luz. Esta técnica nasceu em 1917, quando Albert Einstein propôs a teoria da emissão estimulada, 43 anos depois foi construído o primeiro laser. Atualmente existem diferentes tipos de laser dependendo da aplicação. Zhang e Yao (2004), afirmam que a aplicação bem sucedida deste processo implica a escolha apropriada do sistema laser assim como uma adequada compreensão da física atrás do processo.

Todos os elementos ao nosso redor possuem sistemas atômicos que normalmente se encontram em estado de equilíbrio, caracterizado por valores determinados de energia, em outras palavras, caracterizado por níveis de energia. Na presença de uma energia externa ao sistema é promovida uma mudança deste estado de energia na forma de um salto transitório de um elétron de um átomo do estado básico para um estado excitado ou vice-versa. Niels Bohr utilizou as idéias básicas de outro físico, Planck e fez proposições conhecidas como seus postulados, fornecidas a seguir:

- Os elétrons giram ao redor do núcleo em trajetórias circulares bem definidas e nesse movimento de rotação não há emissão de energia pelos elétrons.
- Quando, de alguma maneira, o elétron passa de uma órbita para outra, ocorre emissão ou absorção de certa quantidade de energia pelo elétron, denominada “fóton”.

A menor porção de energia com a qual um elétron pode mudar de nível de energia é chamada de quantum (do Latim quantum, que significa: quanto). De acordo com a correlação básica de quantum, estabelecida em 1913 pelo Niels, a transição radiante obedece à regra da Eq. 2.11.

$$h\nu = E_2 - E_1 = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.11)$$

Onde,

“ $h\nu$ ” é o valor de um quantum de radiação (infra-vermelho, visível, ultravioleta, raios-X, gama); ($E_2 - E_1$) é a diferença entre os níveis de energia, na qual ocorre a transição; (h) é a constante de Planck ($h = 6,62517 \cdot 10^{-34}$ Js); “ ν ” é a frequência de emissão ou absorção de radiação em Hz; “ λ ” é o comprimento de onda da radiação em μm ; “ c ” é a taxa de propagação de luz em vácuo (velocidade da luz) “ c ” = $2,998 \times 10^8$ m/s. A Figura 2.18 representa graficamente o diagrama de emissão espontânea e absorção de energia, a) em um átomo b) em uma série de átomos (OCZOOE, 1988).

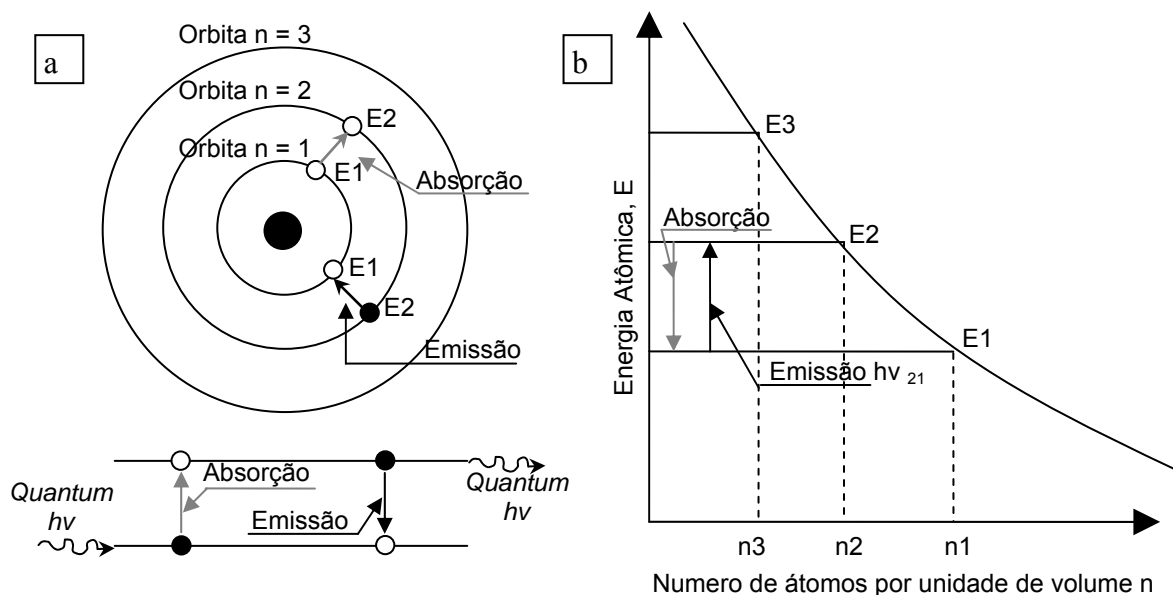


Figura 2.18 – Diagrama de emissão espontânea e absorção de energia a) em um átomo b) em uma série de átomos (OCZOOE, 1988).

As transições não radiantes são as que acontecem na troca de energia entre partículas de gases, líquidos ou sólidos e são acompanhadas por mudanças na temperatura.

A transição de um sistema de um nível baixo de energia E_1 (estado de estabilidade) para um de alta energia E_2 (estado excitado) acontece após uma descarga de uma fonte externa igual a um quantum. Quando um elétron encontra-se em um estado excitado ou em outras palavras em um nível de energia maior ao nível básico, ocorre uma tendência natural a uma transição espontânea para o nível básico que é seu estado estável. Naturalmente as transições espontâneas são acompanhadas pela emissão do excesso de energia na forma de fótons, recebendo o nome de emissão espontânea.

Na tecnologia laser a emissão que é utilizada não é espontânea, mas sim estimulada, no entanto todos os efeitos de emissão espontânea possuem um papel significativo. A emissão estimulada sempre é acompanhada de absorção e emissão espontânea, se não fosse assim seria impossível atingir um estado de equilíbrio termodinâmico, onde muitas partículas estão emitindo e absorvendo energia radiante.

A emissão estimulada acontece da seguinte maneira: suponha um elétron que esteja em um estado que não é aquele no qual ele tem menor energia (estando então em um estado excitado). Esse elétron excitado apresenta uma forte tendência em ir para o nível de mais baixa energia. Porém, sozinho, esse processo é relativamente demorado para acontecer, podendo, no entanto, ser acelerado por um agente externo. Com um elétron no seu estado excitado ocorre o mesmo e o agente externo que causa seu salto para um nível energético menor é justamente outro fóton. A Figura 2.19 ilustra os três processos até agora descritos.

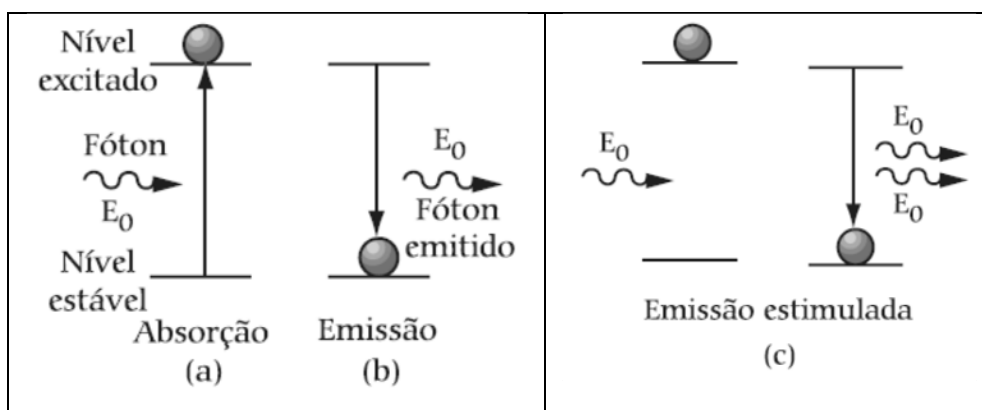


Figura 2.19 – Representação gráfica de a) absorção, b) Emissão e c) Emissão estimulada. (Adaptado de: Oczooe, K., 1988).

Desta maneira, um fóton externo estimula o decaimento do elétron excitado e este, ao passar para o estado de mais baixa energia, emite um fóton que emerge do sistema juntamente com aquele que causou a transição. Desse modo, na emissão estimulada, o causador do efeito sai intacto e o fóton gerado é o seu irmão gêmeo.

Nesse caso, os dois fótons emergem do sistema juntos, com a mesma energia, propagando-se na mesma direção. Dizemos que eles estão em fase e são fótons praticamente indistinguíveis.

Este processo de estimulação e absorção estimulada pode ser ampliado inúmeras vezes, ou seja, centos de fótons com a mesma frequência estarão sendo gerados. Para produzir este incremento é necessário que o nível E_2 , possua mais elétrons do que o nível E_1 , este fenômeno é conhecido como inversão de população. A amplificação da radiação chega a níveis tais que a energia propagada por este fenômeno é usada como uma ferramenta com capacidade de agitar, na escala atômica, qualquer elemento que absorva luz, desta maneira gerar fenômenos tais como fundição, evaporação ou ablação, dependendo da energia utilizada, com uma exatidão e precisão muito elevadas. Para a obtenção de um laser são necessários os seguintes elementos:

- Um meio ativo onde a luz possa ser amplificada por emissão estimulada de radiação;
- Uma fonte de excitação ou bombeamento para manter a inversão de população (grande número de elétrons passa do estado estável para o estado excitado);
- Um meio para promover o ganho do laser (cavidade óptica);
- Um mecanismo para permitir que uma quantidade de energia do feixe deixe o meio para ser usada em aplicações (superfície semi-espelhada).

Adicionalmente, um laser necessita de sistemas de potência e controle e, frequentemente, de um sistema de refrigeração (LIMA et al., 2006 Apud ARROYO, 2009). Os meios ativos podem ser sólidos, gasosos ou líquidos.

A Figura 2.20 representa esquematicamente os componentes básicos de um laser (ARROYO, 2009).

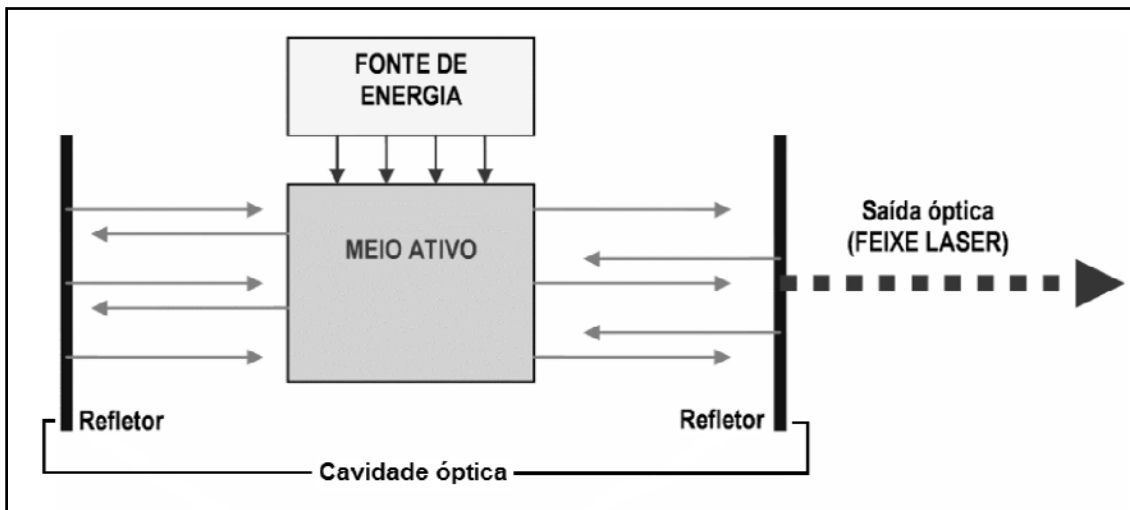


Figura 2.20 – Constituição básica de um laser (ARROYO, 2009).

2.6.5 – Interação Laser-materia

A concentração de energia na forma de luz, quando focalizada sobre uma superfície, divide-se em três parcelas, uma parte é refletida, uma é absorvida e a terceira quantia é transmitida através da matéria. A quantidade de calor absorvida pelo material no ponto de incidência do feixe é chamado de “spot”, e depende basicamente de (READY, 1997 apud OLIVEIRA, 2006):

- Capacidade de absorção do material: A reação do material à absorção da energia do laser depende do fluxo de calor no material, sendo este dependente das propriedades do material, como a condutividade térmica (K), calor específico (c), densidade (ρ) e difusividade térmica (k), o incremento da temperatura no material que incrementa a absorvidade do mesmo (BURAKOWSKI et al., 1992);
- Refletividade da superfície: É a quantidade de energia refletida pelo material, que depende da composição, acabamento e estado de oxidação da superfície.
- O comprimento de onda e o ângulo de incidência do feixe de laser também influenciam na refletividade do material;
- Propriedades termodinâmicas do material: como resultado da absorção da energia do laser, o material pode sofrer alterações em seu estado físico com o aumento da temperatura, causando mudanças de fase, como, fusão (calor latente de fusão do material L_f) e vaporização (calor latente de vaporização do material L_v).

Para um laser pulsado, caso do laser utilizado neste trabalho, os principais parâmetros de influência no processamento do material são (OLIVEIRA, 2006):

- Potência média do laser [P]: É relativamente baixa comparada com outras fontes de energia. O laser pulsado tem normalmente uma potência média menor que 100 W. Um laser pulsado com mais de 1 kW é considerado de alta potência;
- Energia do pulso [E]: É a razão entre a potência média do laser [W] e a frequência de pulsação do laser [Hz]. Pode variar desde 10^{-9} J até mais de 1 J;
- Tempo do pulso [τ]: A duração do pulso pode ser de vários femto segundos [fs] [10^{-12} s] até mais de 1[s];
- Diâmetro do feixe de laser: Pode ser menor do que 1 [μm] até mais de 10 [mm];
- Intensidade, densidade de potência ou irradiância do laser [I_0]: É dada por $E/(\tau \cdot \pi \cdot r^2)$, onde, E é a energia do pulso, τ é o tempo do pulso e r é o raio do feixe de laser. Geralmente, a intensidade do laser é indicada em W/cm^2 .

Quanto maior a intensidade do laser maior será a temperatura atingida pelo material, podendo ser suficiente para induzir mudanças de fase no mesmo (DUMITRU et al., 2005). A Tabela 2.2 mostra alguns valores de intensidade do laser que podem provocar alteração física no material (DULEY, 1976 e READY, 1997 apud VIANA, 2009).

Tabela 2.2 - Mudanças de fase no material conforme intensidade do laser (DULEY, 1976 e READY, 1997 apud VIANA, 2009).

Mudança de fase/estado	Intensidade do laser
Fusão	$\sim 10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$
Vaporização	$> 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$
Formação do plasma	$\geq 10^8 \text{ W}/\text{cm}^2$

O controle da intensidade do laser pode provocar desde mudanças superficiais no material (endurecimento superficial, revenimento), remoção precisa de material (micro modelagem, gravação) ou até mesmo a remoção substancial de material (corte, furação) (DUMITRU et al., 2005).

Resumindo, a texturização de superfícies com laser envolve um feixe focado que transfere uma parte de sua energia para a peça. A energia absorvida por esta conduz ao aumento local de temperatura, seguido possivelmente por mudanças de fase (fusão, vaporização) da superfície, que conseqüentemente, provoca o deslocamento e desprendimento de material (ablação) (ALLMEN, 1987). Uma grande vantagem da utilização do laser na texturização de superfícies é que a sua aplicação pode ser localizada, atingindo exatamente a área selecionada do elemento a ser tratado, com uma distribuição uniforme da textura.

Dependendo do método utilizado há a possibilidade de criar vales e picos contínuos de material graças à ablação pontual da superfície da peça aplicada em uma rotina pré-estabelecida do feixe de laser. Geralmente, esses vales e picos são interconectados e são uniformemente distribuídos sobre a superfície (FU et al., 2001).

Quando o coeficiente de absorção “A” da superfície aquecida é constante, é possível obter efeitos similares aplicando baixos valores densidade de energia e grandes valores de tempo de interação ou vise-versa (BURAKOWSKI et al., 1992).

Metais claros e especialmente aqueles com superfícies alisadas e brilhantes, por exemplo, ouro, prata, bronze, cobre, apresentam uma absorção muito fraca da radiação laser, se comparados com materiais mais escuros, tais como, titânio, tungstênio, molibdênio, cromo, zircônio, ferro, níquel, etc.

2.6.6 – Variáveis do processo de texturização a laser

As variáveis do processo de texturização a laser dividem-se entre, aquelas que podem ser controladas na ferramenta laser e aquelas oriundas da interação laser-materia, estas últimas estão fortemente ligadas às propriedades do material que está sendo texturizado. Entre as propriedades do material, que alteram a interação laser-materia estão: a condutividade térmica, a densidade de massa, o calor específico e o coeficiente de absorvibilidade do material, este último é associado, no início da interação, à qualidade da superfície do material e à cor. Materiais mais escuros tendem a absorver maior quantidade de luz e materiais mais claros tendem a refletir a luz em maior proporção.

Depois do início da interação do pulso laser com a superfície do material o incremento na temperatura local induzi a uma mudança de estado do sólido para líquido alterando o coeficiente de absorvibilidade da área irradiada.

As variáveis ou parâmetros que podem ser ajustadas no laser são a potência do laser, a frequência de pulso (no caso de laser pulsado), o tempo de pulso, a velocidade de varredura, o deslocamento transversal e o spot ou diâmetro do foco incidente na peça. A mudança destes parâmetros resulta no controle de:

Profundidade de penetração térmica do feixe laser: Representa a distância exposta a transferência de calor durante um pulso laser (DUMITRU et al., 2005). A profundidade de penetração térmica l depende da duração do pulso τ , da condutividade térmica k , da densidade de massa ρ e do calor específico c do material irradiado.

$$l = 2\sqrt{\frac{k}{\rho c}}\tau \quad (2.12)$$

Para pulsos com duração na ordem dos fs, mais curtos do que o “tempo de termalização”, a transferência de energia ocorre, primeiramente em condições instáveis e numa camada superficial na qual são gerados elétrons “quentes” enquanto os átomos da rede cristalina ainda não têm perturbações de energia. Nesta etapa ocorre remoção do material por diferentes mecanismos não térmicos, por exemplo, elevados esforços locais induzidos ou explosões de Coulomb (pelas fortes colisões entre os elétrons do sólido as moléculas são subitamente transformadas em cachos de componentes atômicos, que, então se separam violentamente sob a influência de sua mutua repulsão de Coulomb). Se ainda há energia nos elétrons quentes depois do pulso laser, esta energia será transferida a rede cristalina durante o tempo de termalização. Quando a fluência incidente é elevada, uma grande parte da energia permanece nos elétrons quentes e é transferida à rede cristalina depois da incidência do feixe, prevalecendo desta forma o processo térmico (DUMITRU et al., 2005)

A Figura 2.21 representa os modos eletromagnéticos TEM_{lm} .

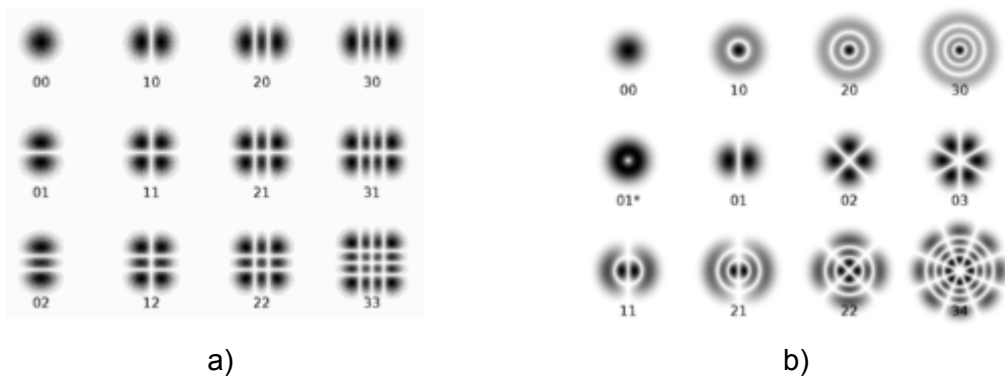


Figura 2.21 – Modos transversais eletromagnéticos da cavidade estável, a) simetria retangular Hermite Gauss, b) simetria circular Laguerre-Gauss (Adaptado de ARROYO, 2009).

Modo transversal eletromagnético do feixe laser: Na sua propagação o feixe laser pode ter um ou vários modos transversais eletromagnéticos representados normalmente pelas letras TEM_{lmn} onde os índices l , m e n especificam o número de nós do campo eletromagnético nos eixos X , Y e Z , respectivamente. O sub-índice n normalmente é descartado porque o número de eixos longitudinais é relativamente grande quando comparado com os outros dois eixos. No processamento de materiais o modo mais utilizado é o TEM_{00} devido a sua intensidade mais elevada (CHEUNG, 2003 Apud ARROYO, 2009).

Matematicamente, para um feixe gaussiano TEM_{00} a distribuição espacial da intensidade laser absorvida na superfície do alvo é descrita pela equação 2.13.

$$I(x, y, t) = (1 - R)I_o(t)e^{-\frac{x^2+y^2}{r^2}} \quad (2.13)$$

A energia transmitida à profundidade “z” é descrita pela equação 2.14.

$$I(x, y, z, t) = AI_o(t)e^{-az}SP(x, y) \quad (2.14)$$

Onde,

r = raio do feixe;

A = (R-1) = absorção do material irradiado;

R = refletividade;

z = Profundidade de transmissão da energia;

$I_o(t)$ = Distribuição temporal da intensidade laser;

SP = Intensidade espacial da intensidade do laser.

(x,y,z) = Indices do modo

t = tempo

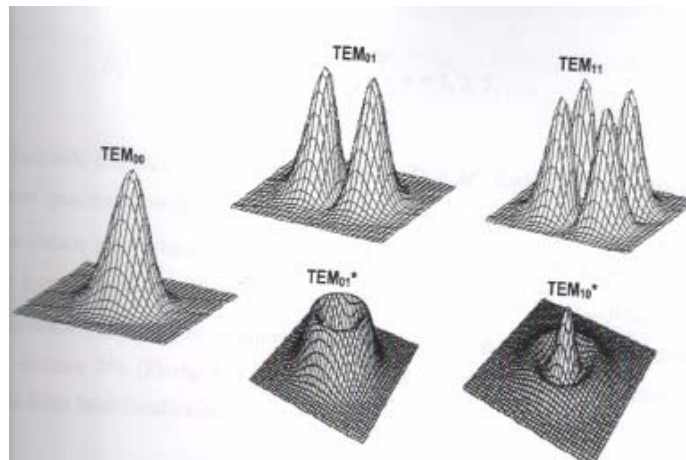


Figura 2.22 – Distribuição de intensidade em feixes gaussianos (LIMA, 2006; RIVA, 2007).

Na Figura 2.22 Lima, (2006) e Riva, (2007) revelam a relação entre um modo Gaussiano e a distribuição de intensidade sobre o alvo em um instante t. Este dado se torna interessante na medida em que através da óptica pode ser mudada a distribuição espacial do feixe (ZHANG; YAO, 2004 Apud ARROYO, 2009). A Figura 2.23 apresenta uma representação esquemática das características geométricas de um feixe laser

Comprimento de onda da radiação: O comprimento de onda λ é equivalente à frequência de oscilação eletromagnética e obedece à relação $c = \lambda * \nu$. A frequência ν , característica da radiação laser, é importante porque os diferentes materiais respondem de maneira distinta, dependendo da frequência do campo energético. Por exemplo, um material pode sofrer ablação foto-térmica usando laser visível e foto-química com laser UV.

Ângulo de divergência do feixe laser: Devido à difração, o diâmetro do feixe varia na sua propagação dentro e fora da cavidade. O menor tamanho no qual o feixe pode ser focalizado é o limite de difração λ/π , que corresponde ao mínimo diâmetro gaussiano TEM_{00} .

$$\theta = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{D_0} \quad (2.15)$$

Parâmetro de qualidade do feixe laser: A maneira mais popular de medir o desvio relativo do limite de difração λ/π , é com o índice M^2 . Os benefícios de um feixe de alta qualidade (M^2 pequeno) em processamento de materiais são:

- um diâmetro focal menor melhora a eficiência do processo;
- baixo aporte térmico para o material;
- soldas e cortes com kerf mínimo (largura do corte).

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \frac{D_0}{4} \quad (2.16)$$

Focalização do feixe laser: Para conhecer a variação do diâmetro do feixe entre a lente de enfoque e o alvo, podem ser realizadas experiências, furando materiais apropriados, mas a magnitude desta grandeza é na casa das dezenas de micrometros. Matematicamente usam-se as Eq. (2.17).

$$f - Number = \frac{f}{\phi}; d_f = 2.44 \frac{\lambda f}{\phi} M^2; z_f = 2(f - Number)d_f \quad (2.17)$$

Onde,

f = distância focal;

ϕ = diâmetro do feixe ou da abertura do feixe

z_f = Profundidade do foco (distância até 5% de desfocalização)

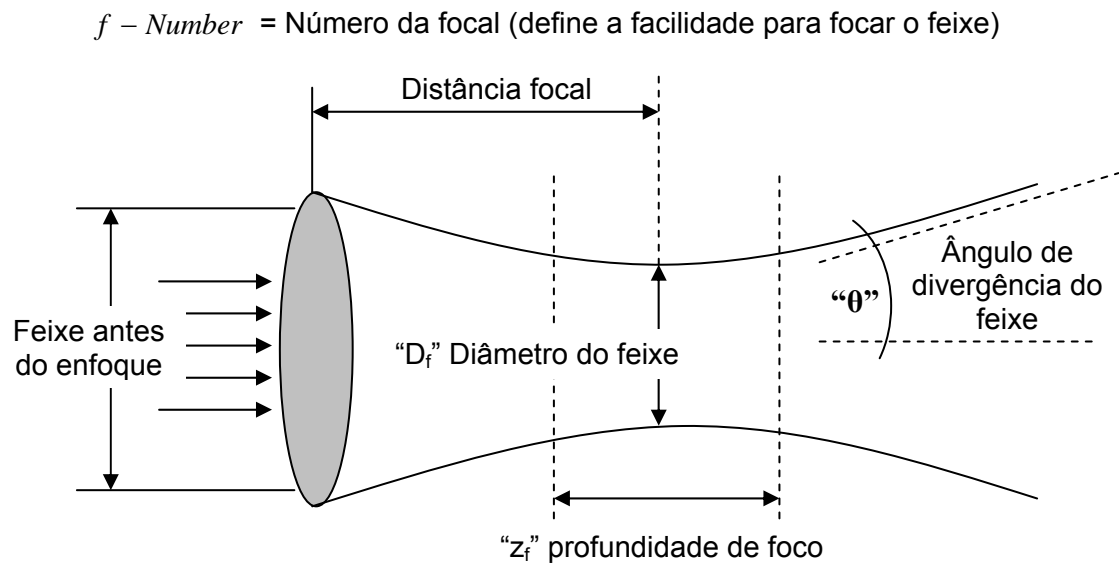


Figura 2.23 - Representação esquemática das características geométricas do feixe laser (Adaptado de ZHANG et al., 2011).

Conhecendo as propriedades do material a ser irradiado e através do planejamento das variáveis do laser, citadas anteriormente, somado a uma técnica adequada de varredura do feixe, é possível uma texturização da amostra com um alto índice de repetitividade e reprodutibilidade da textura, facilitando a automação deste procedimento.

2.7 - Influências da textura em usinagem

Em usinagem a topografia da superfície da ferramenta altera os fenômenos sofridos na interface cavaco-ferramenta e vários autores se interessaram em analisar este fenômeno, com abordagens de vários aspectos:

- Aderência do revestimento
 - Lee (1998); Cappelli et al. (1999); Li et al. (2002); Tiejun et al.(2002); (Arroyo, 2009), (Viana, 2009)
- Vida da ferramenta
 - (Kononenko et al, 2000), (Neves et al, 2006), (Lima et al, 2006), (Aurich et al, 2010)(preparação da aresta de corte)
- Força e potência de usinagem
 - (Diniz, et al, 2007), (Koshy; Tovey, 2011)
- Resistência de uma superfície após texturização (tratamento térmico).

- (Lima et al, 2005)
- Lubricidade melhorada da superfície devido à presença de uma textura
 - (Dumitru et al, 2005), (Shuting et al, 2008), (Enomoto; Sugihara, 2010).
- Áreas de contato entre cavaco e ferramenta
 - (Obikawa et al, 2011), (Kawasegui et al, 2009)

A texturização de ferramentas é aplicável a processos de corte contínuos ou discretos, sem representar risco para a vida da ferramenta. Nenhuma das pesquisas citadas anteriormente adjudicou uma diminuição na vida das ferramentas que passaram por um processo de texturização.

2.7.1 – Tipos de texturas aplicadas em ferramentas de corte

Na manufatura de ferramentas de corte a estrutura da ferramenta é alterada para obter melhoras na dureza da superfície e na tenacidade da ferramenta, através de técnicas como a adição de compostos característicos, tratamentos térmicos, metalurgia do pó, materiais compósitos em multicamadas, entre outros. Na texturização da ferramenta, todas estas técnicas podem ser afetadas se aplicada uma fonte de calor externa, além daquela para a qual a ferramenta foi projetada. É neste ponto que surge a necessidade de usar métodos de texturização com as menores zonas afetadas pelo calor. Entre as técnicas mais destacadas encontram-se as texturas criadas química ou fotoquimicamente e as texturas a laser pulsado.

Como discutido no item (interação laser-materia), existem os lasers pulsados e os contínuos, cada um com características próprias. Os lasers pulsados são os mais recomendados na texturização de ferramentas, já que a superfície pode ser atingida com grandes densidades de energia, porém com uma zona afetada pelo calor reduzida, graças a sua origem interrupta (em função do tempo de pulso e as variáveis discutidas anteriormente).

Assumindo o uso de laser pulsado na texturização de ferramentas, a característica de forma da geometria corresponde à relação entre a velocidade de varredura do laser e a frequência do pulso. Para visualizar este fenômeno, o esquema na Fig. 2.24 representa uma situação hipotética de texturização. Neste esquema um feixe com diâmetro = d , e frequência de pulsação = 1Hz promove a texturização em um sentido de varredura para diferentes velocidades de varredura.

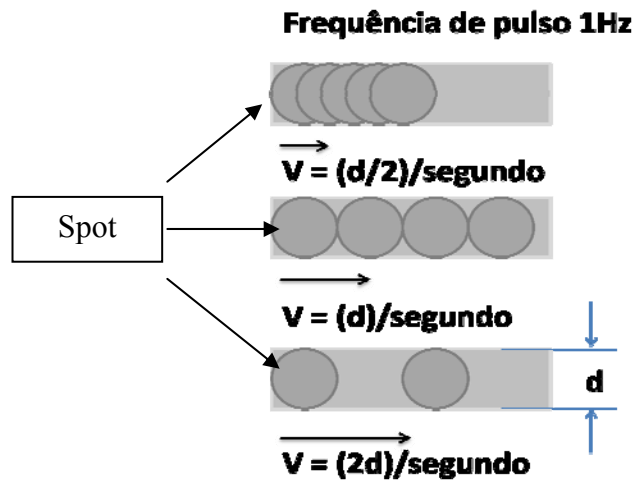


Figura 2.24 - Textura com diferentes velocidades de varredura do feixe.

Seguindo a lógica do esquema da Fig. 2.24, entende-se que estes dois parâmetros controlam também a densidade de marcas por unidade de área.

De forma geral, uma maior profundidade das marcas é consequência de maiores densidades de energia, esta última é proporcional à potência aplicada e inversamente proporcional ao diâmetro do spot (área atingida na superfície).

Parte da potência utilizada no feixe, é perdida com espalhamento, filtragem e óptica. A potência restante vai para a amostra, gerando um pico de energia durante o tempo de pulso (10^{-9} a 10^{-15} [s], dependendo do laser). Esta potência do pico dividida pela área do feixe que atinge a superfície é a densidade de energia.

Entre os diferentes tipos de texturas aplicadas a ferramentas de corte destacam-se:

Padrões lineares - Quando as velocidades de varredura são ajustadas para sobrepor os pulsos do feixe em um dos sentidos.

Padrões circulares - Quando o objetivo é criar crateras isoladas, a velocidade de varredura é incrementada em ambos os sentidos de movimento do feixe.

Tratamento total da superfície - Utilizará sobreposição dos pulsos em ambos os sentidos de movimento do feixe.

Limpeza ou polimento da superfície - Neste tipo de situação são aplicadas baixas densidades de energia com tratamento total da superfície. Aqui o calor do feixe evapora graxas e sujeiras e funde os picos da superfície tornando-a mais lisa.

No controle da varredura do feixe, são utilizados cabeçotes galvanométricos que refletem o feixe sobre a peça através da rotação de espelhos, obtendo assim uma varredura total da superfície.

2.7.2 – Influência na força e na potência de usinagem.

Usando um senso lógico, e tendo como base uma ferramenta sem textura, provavelmente a primeira hipótese ao se pensar em uma mudança da topografia na superfície da ferramenta, seria um acréscimo no intertravamento entre a raiz do cavaco e a superfície, elevando assim os esforços de corte.

Contrário às expectativas, a abordagem realizada por (Neves et al., 2006) mostra resultados positivos quando analisada a força de avanço e o momento torçor, em um processo de furação, com brocas helicoidais de aço rápido, texturizadas a laser e posteriormente revestidas com nitreto de titânio.

Embora os autores não relacionem diretamente o efeito da textura sobre a força de corte, estes afirmam que a melhor aderência do revestimento diminuiu a taxa de desgaste da ferramenta, mantendo a integridade da mesma e gerando esforços menores aos encontrados com ferramentas sem texturização.

As ferramentas sem textura apresentaram destacamento do revestimento e desgaste prematuro, levando-as a incrementos proporcionais nos esforços de usinagem devido à perda de afiação da ferramenta. A Figura 2.25 apresenta a evolução dos esforços de usinagem em função do número de furos usinados por estes pesquisadores.

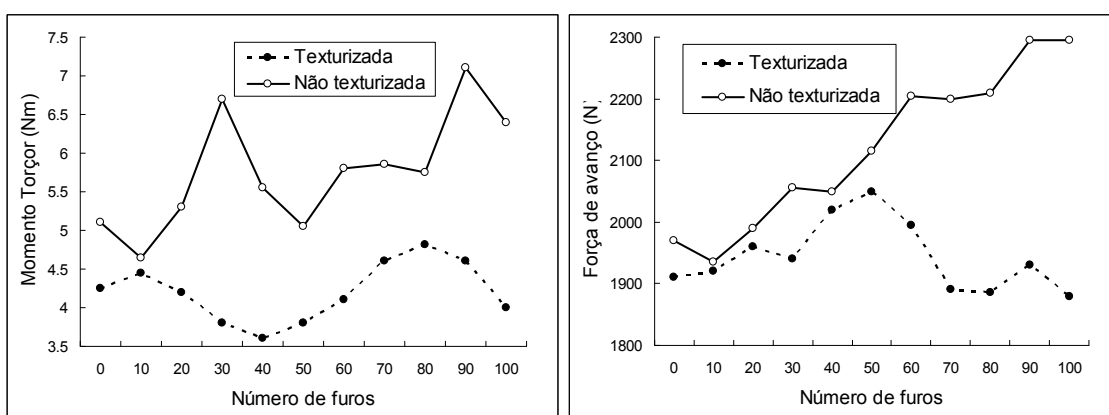


Figura 2.25 – Momento torçor e força de avanço na furação usando brocas texturizadas a laser (NEVES et al., 2006).

Considerando as baixas velocidades de corte utilizadas no processo de furação com ferramentas de aço rápido, é provável que a emulsão de base vegetal, ajudada pela textura,

melhorasse o efeito lubrificante, devido à retenção de fluido nas micro-crateras da superfície da broca o que levaria a uma redução nas forças de usinagem.

A Figura 2.26 apresenta imagens de MEV mostrando a grandeza das marcas impressas na superfície de saída das ferramentas não revestidas. A Figura 2.27 apresenta gráficos de barras da força de corte na presença de micro e nano texturização. Também é apresentado o efeito da posição da textura em relação ao fluxo de cavaco para uma ferramenta nano texturizada.

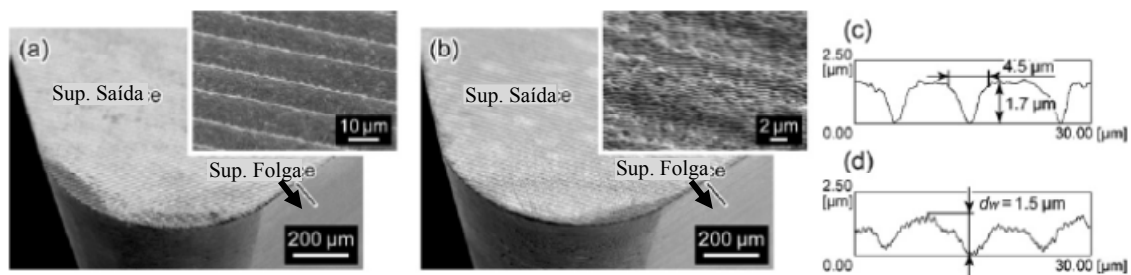


Figura 2.26 - MEV Imagens de uma ferramenta com (a) microtextura (espaçamento = 10 μm) e (b) nanotextura (espaçamento = 800 nm) usando um laser de pulsos de femtosegundos. Seção transversal de (c) microtextura e (d) nanotextura medida usando um microscópio de força atômica (KAWASEGUI et al., 2009).

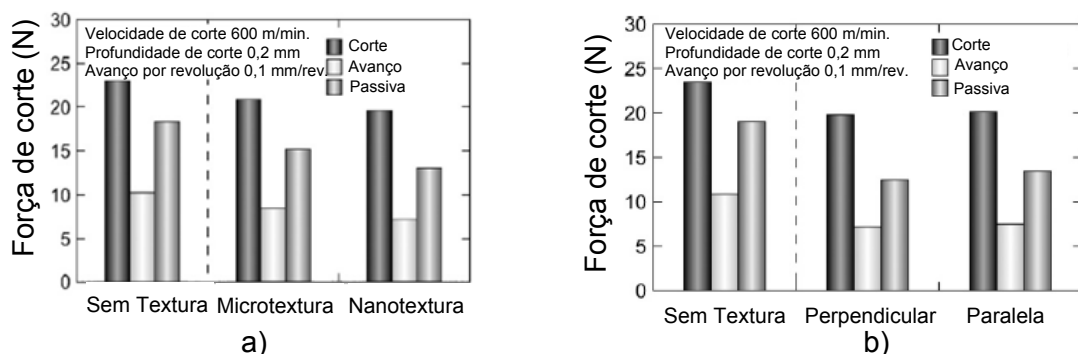


Figura 2.27 - Força de corte em a) ferramentas não texturizadas, Micro e nanotexturizadas e b) ferramentas nanotexturizadas com marcas: paralelas e perpendiculares ao fluxo de saída do cavaco. KAWASEGUI et al., (2009).

Esta pesquisa prova que uma ferramenta texturizada a laser obtém resultados positivos de força e vida da mesma, colocando como primeiro motivo à melhora da aderência do revestimento. Estudos realizados por Kawasegui et al. (2009), mostram experiências

realizadas com ferramentas sem revestimento, e os resultados apontam novamente a benefícios no uso da texturização a laser. Para os testes de usinagem foram usadas altas velocidades de corte, na casa dos 600 m/min (velocidade na qual a textura se mostrou benéfica) e pequenas áreas de contato, $f = 0,1$ mm/rev. e $a_p = 0,2$ mm, com ferramentas de metal duro sem revestimento, no torneamento da liga de alumínio A5052.

A pesquisa de Kawasegui et al. (2009), apresenta também resultados da influencia da profundidade das cavidades da textura aplicando um fluido de corte na forma de MQF (Fig. 2.28).

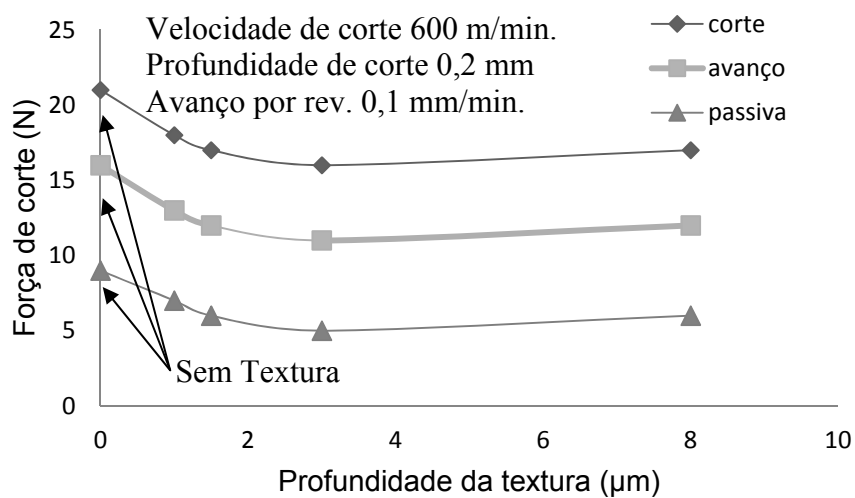


Figura 2.28 - Influência da profundidade da nanotextura na força de corte com em usinagem com MQF. (Adaptado de KAWASEGUI et al., 2009).

Aqui pode ser verificado que existe um ponto de ótimo para a profundidade das cavidades, de pouco menos que dois micrômetros. Esta afirmação aponta na mesma direção do fenômeno que acontece em tribologia onde a variação de pressão do fluido em movimento passando por uma micro-cavidade varia, dependendo do tamanho e formato da cratera (ETSION, 2009).

Pesquisa mais recente corrobora os resultados de Diniz e Kawasegui e apontam a características favoráveis para a texturização de ferramentas e posterior revestimento. Koshy e Tovey (2011) relacionaram os resultados de força com a porcentagem de área texturizada na superfície da ferramenta e encontraram que o incremento da área texturizada foi proporcional à redução da força, veja Fig 2.29.

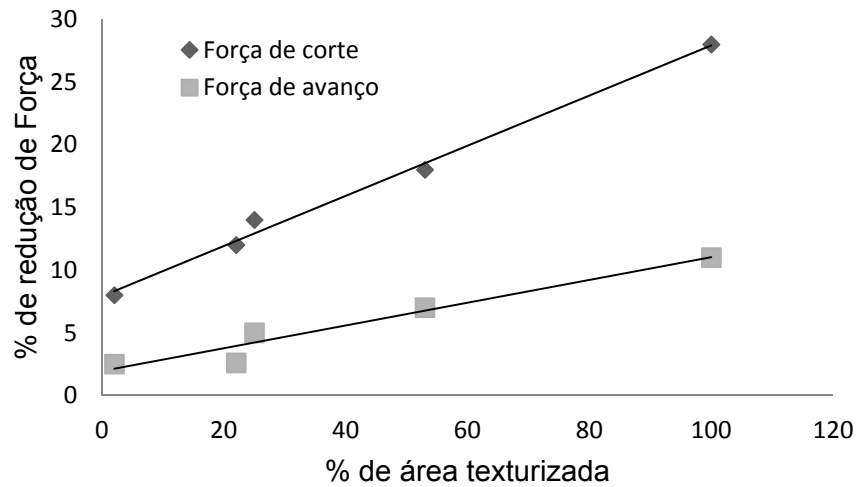


Figura 2.29 - influência da área texturizada nas forças de usinagem (Adaptado de: KOSHY; TOVEY, 2011).

Estes autores ainda destacaram que a textura deve ser efetuada apenas na região onde há deslizamento do cavaco (zona de deslizamento), como apresentado na fotografia da Fig. 2.30.

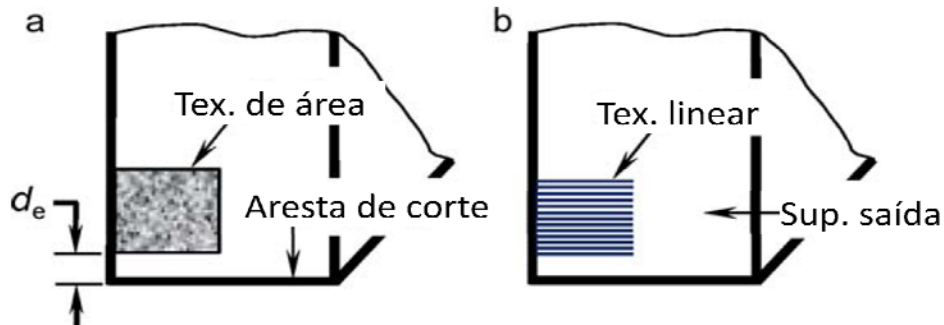


Figura 2.30 - Posição da textura e configurações. (Adaptado de: KOSHY; TOVEY, 2011).

A região sem textura designada como d_e , está disposta para conformar a zona de aderência, onde não há movimento relativo entre o cavaco e a superfície da ferramenta, área na qual não seria necessária uma textura. A textura começa a partir do ponto onde há movimento relativo das superfícies, tornando lógica esta afirmação.

Outro resultado importante encontrado por estes científicos foi a relação entre os parâmetros de skewness e kurtosis da superfície da ferramenta, contrastados com a força de corte e de avanço. A Figura 2.31. apresenta esta relação. Valores de skewness próximos de 0,3 representam uma superfície com menos picos e mais vales, trazendo um ganho com a redução das forças, no caso da kurtosis próxima de 3, indica uma superfície com arestas

arredondadas, representando uma superfície mais resistente que também foi relacionada com uma redução das forças.

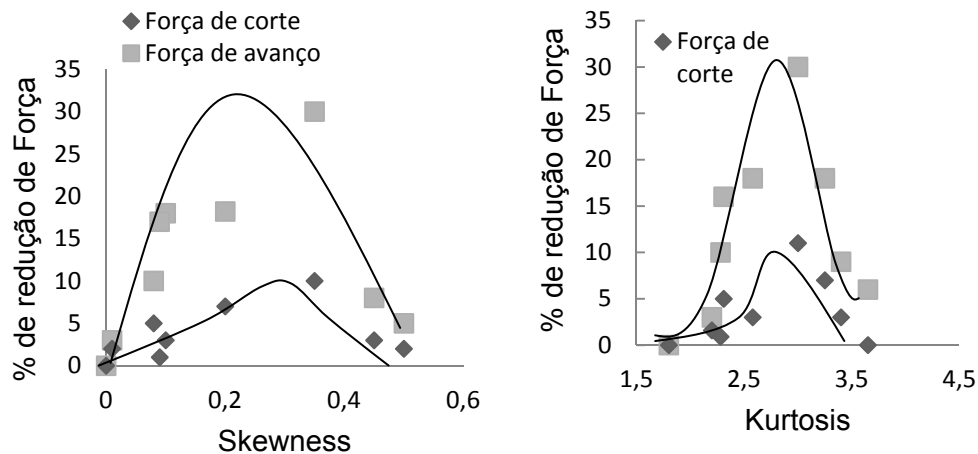


Figura 2.31 - Influência do Skewness e Kurtosis na redução de forças (KOSHY; TOVEY, 2011).

Analisando o gráfico da Fig. 2.31 a e b, a força de corte apresentou uma redução de até 10%, em quanto que a redução apresentada pela força de avanço atingiu valores de até 30%. Esta relação é importante, considerando que as forças de corte chegam a superar em três ou quatro vezes às forças de avanço, dependendo dos parâmetros de corte.

2.7.3 – Na temperatura de usinagem

A temperatura de corte é um fenômeno fortemente ligado à deformação plástica de um material, ao atrito entre o material e a ferramenta e à atmosfera que envolve a região de corte. Na teoria afirma-se que toda a energia gasta para formação do cavaco é transformada em calor. Dentre as técnicas para reduzir este calor estão, o uso de fluidos de maneira convencional (SUAREZ, 2008), jatos de alta pressão (MACHADO; WALLBANK, 1994), ou aplicação de fluidos com altíssimo poder de troca de calor ou refrigeração criogênica (HONG et al., 2002).

O uso de uma textura tem o intuito de diminuir o calor que vai ser gerado, diminuindo a energia de formação do cavaco através da redução das áreas dos atritos e de melhorias na lubricidade da ferramenta. Qualquer mudança nestas variáveis, consequentemente agirá na direção de alterar as temperaturas de corte.

Para Shuting et al, (2009), o uso de laser na texturização de superfícies é um método útil para criação de micro cavidades, de tal forma que atuem como reservatórios de lubrificante sólido, o qual agirá diretamente na zona de contato entre o cavaco e a

ferramenta. A Figura 2.32 apresenta as forças de corte e coeficientes de atrito de ferramentas de aço rápido texturizadas e estudadas em diferentes atmosferas lubrificantes.

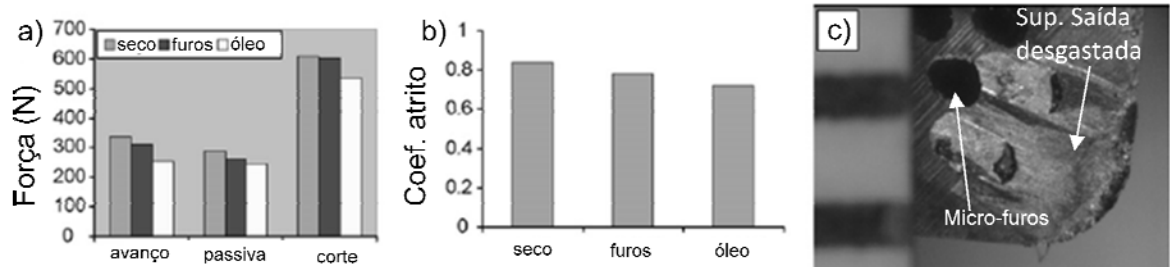


Figura 2.32 - Gráficos a) comparativos das forças de corte, b) comparação dos coeficientes de atrito e c) fotografia da ferramenta texturizada após usinagem (SHUTING et al., 2009).

Segundo Shuting et al., (2009), o uso da textura, mesmo sem lubrificante diminuiu as áreas de contato, diminuindo assim a energia para cisalhar o cavaco e consequentemente a temperatura de corte. Os autores chegaram a esta conclusão pela observação de o que eles chamaram de cavacos mais frios e no formato de hélice (Fig. 2.33) quando aplicada a técnica de texturização com lubrificação sólida ou com óleo em uma ferramenta texturizada.

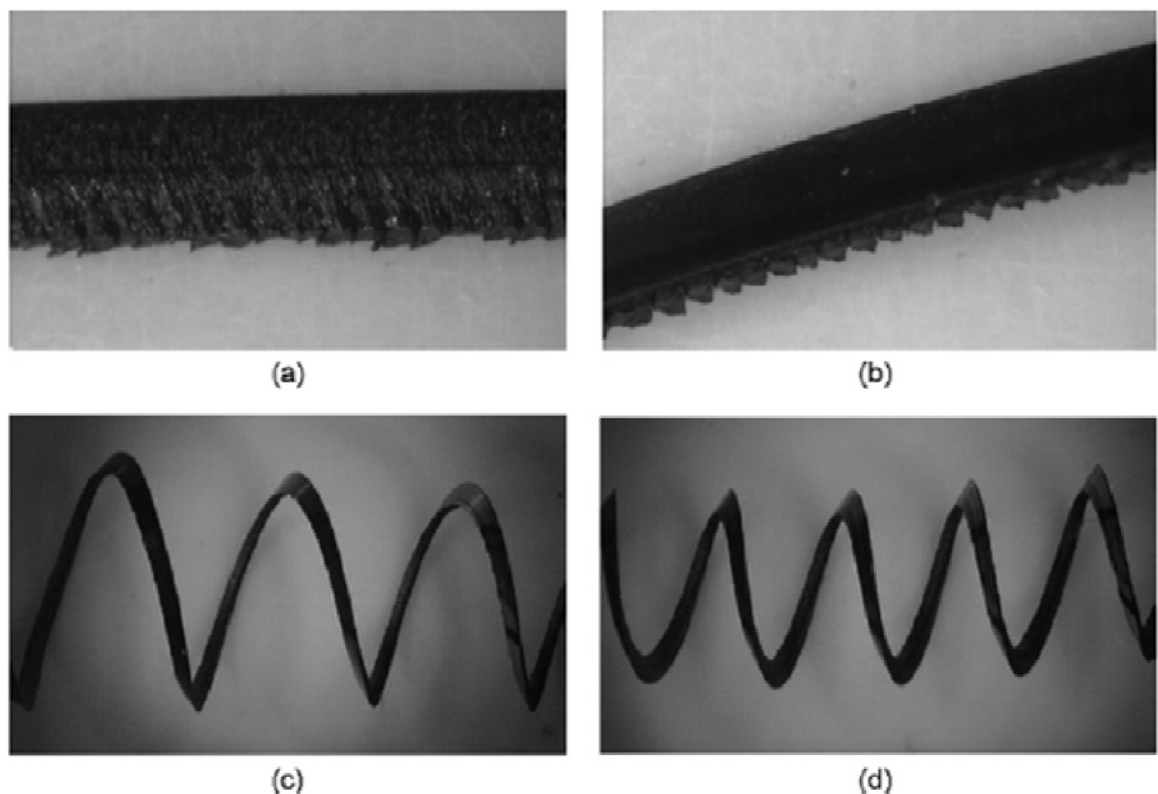


Figura 2.33 - Imagem dos cavacos usando a) corte a seco, b) jorro, c) lubrificação com óleo, d) lubrificação sólida. (SHUTING et al., 2009).

Os autores afirmam que os cavacos mais longos e sem curvatura, característicos de maiores áreas de contato com a ferramenta, estão presentes na usinagem com jorro devido à impossibilidade de penetração do fluido até a interface de contato. Esta pesquisa defende o uso de lubrificação usando mínimas quantidades de lubrificante as quais são suficientes para esta técnica de usinagem.

2.7.4 – No acabamento da peça usinada

O acabamento da peça usinada é uma consequência de fatores tais como: desgaste da ferramenta; esforços de corte; temperatura na interface cavaco-ferramenta-peça, presença da APC, em materiais com 2^{da} fase, entre outros. Quando estes fatores são reduzidos, devido ao efeito da texturização da ferramenta, um dos principais beneficiados é o acabamento da peça.

Uma ferramenta que mantém o revestimento e consequentemente a afiação por maior tempo, poderá produzir peças de melhor qualidade por um tempo maior. O fato de realizar um esforço menor na retirada de material diminui os erros geométricos na peça, devido a menores flambagens ou recuperações elásticas do material usinado. Segundo Lima et al., (2005), a texturização da ferramenta de corte pode gerar micro rugosidades que interrompem a soldagem do metal retirado sobre o revestimento devido à interrupção da formação da APC, isto por causa de uma melhor distribuição das tensões de deformação, esta afirmação foi derivada da aparente força constante na usinagem de aço INOX 306 com ferramentas de aço rápido texturizadas e revestidas (Fig. 2.34) com nitreto de titânio.

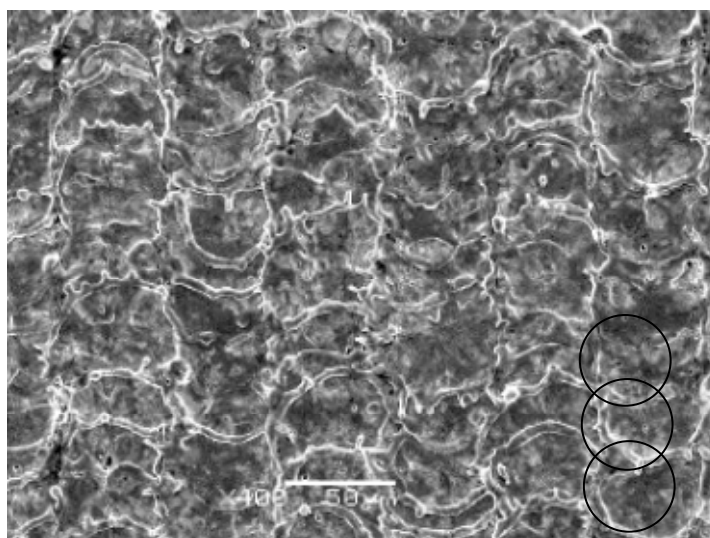


Figura 2.34 – Aspecto da superfície de saída tratada a laser (LIMA et al., 2005).

Estas ferramentas foram analisadas em velocidades de formação de APC. A restrição na formação da APC evita pobres rugosidades, oriundas dos fragmentos de material encruados, desprendidos da APC e posteriormente ancorados na superfície principal de usinagem. A Figura 2.34 apresenta a micrografia da superfície da ferramenta tratada com feixe laser, utilizada nos experimentos desta tese. A micrografia revela a superposição de crateras de aproximadamente 50 μm de diâmetro.

2.7.5 – Na vida da ferramenta de corte

Recentemente estudos mostram a texturização a laser como uma maneira de gerar pontos de ancoragem para um posterior revestimento (LIMA, 2005; VIANA, 2009; ARROYO, 2009, NEVES 2010). A Figura 2.35 apresenta os resultados encontrados por Neves et al,(2006), mostrando a delaminação em ferramentas com e sem textura.

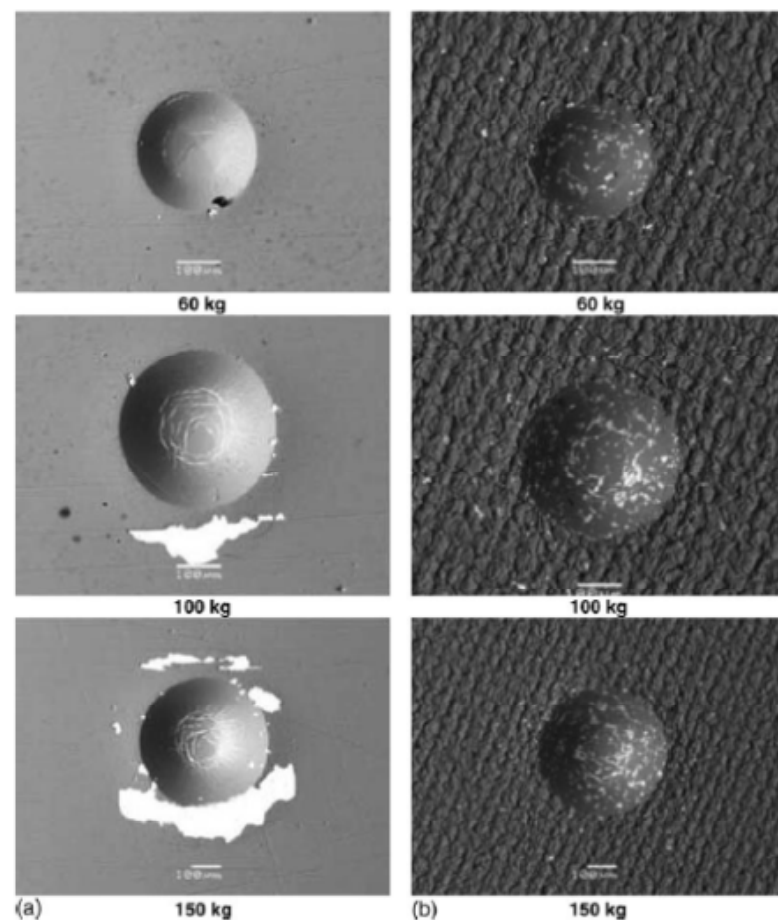


Figura 2.35 - Aspecto da indentação Rockwell C em ferramentas a) sem textura, b) texturizada e revestida. Para diferentes revestimentos (NEVES et al., 2006).

Todos os estudos realizados na análise da influência da texturização a laser prognosticam uma vida da ferramenta texturizada a laser como sendo no mínimo igual às ferramentas convencionais tratadas com jato de areia e posteriormente revestidas.

O aprimoramento da aderência do revestimento é comprovado a través de testes de endentação da ferramenta revestida. Evidentemente o uso da texturização melhora a aderência do revestimento, pois cada marca da textura trabalha como uma barreira que limita a formação de uma eventual trinca, resultando em uma aderência beneficiada.

Este resultado é coerente com os resultados de vida de ferramenta apresentados por estes autores. A Tabela. 2.3 apresenta os valores de desgaste de brocas de aço rápido texturizadas e revestidas e as mesmas ferramentas no formato convencional (sem alterações da superfície).

Tabela 2.3 - Valores comparativos de desgaste em brocas de aço rápido revestidas (comerciais) e brocas modificadas a laser (NEVES et al., 2006).

v_c [m/min]	Superfície da broca	Número de furos	Condição da broca ao fim do ensaio
22	Sem texturização	100	Desgaste de flanco = 0,21 mm
	Texturizada	100	Desgaste de flanco = 0,11 mm
27,5	Sem texturização	14-17	quebra
	Texturizada	100	Desgaste de flanco = 0,12 mm
33	Sem texturização	7-8	quebra
	Texturizada	70-80	Desgaste de flanco = 0,09 mm

Analisando as propostas apresentadas pelos pesquisadores citados neste capítulo, não há indícios de pesquisas focadas ao uso da texturização a laser posterior ao revestimento. Na maioria dos casos a textura foi sugerida como uma alternativa prévia ao recobrimento da ferramenta, com a finalidade de melhorar a aderência do revestimento. Nos casos onde foram estudadas ferramentas sem revestimento, os materiais usinados foram de menor resistência mecânica (ligas de alumínio), possibilitando o uso de aços rápidos ou metal duro sem revestimento.

O presente estudo usa texturas pós-revestimento na usinagem de aço ABNT 1050, com de 220 HB de dureza, usando parâmetros de corte que levam a esforços superiores aos 1600 N. Na sequência é apresentada a metodologia empregada neste trabalho.

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1 - Aspectos Gerais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais, equipamentos e planejamentos utilizados nas etapas de estudo experimental de ferramentas de corte revestidas por CVD (Chemical Vapor Deposition) e posteriormente texturizadas com laser pulsado de NdYAG, no torneamento de aço ABNT 1050.

3.2 - Materiais

- Peça de Trabalho

O material utilizado nos testes é um aço conformado ABNT 1050, a Fig. 3.1 - a mostra uma fotografia das 5 toneladas em barras de 5 m de comprimento e 54 mm de diâmetro, generosamente doadas pela Gerdau S.A. Numa primeira instância criou-se um estoque, confeccionando e marcando tarugos no comprimento de 500 mm como apresentado na Fig. 3.1.

A Tabela 3.1 apresenta a composição do aço ABNT 1050 modificado.

Tabela 3.1 - Composição aço ABNT 1050 (Gerdau S.A.).

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Al
0,52	0,75	0,13	0,022	0,24	0,11	0,15	0,03	0,08	0,008	0,016

V	Nb	Ti	B	Ca	As	O	N
0,002	0,001	0,0009	0,0004	0,0006	0,003	12 ppm	83 ppm

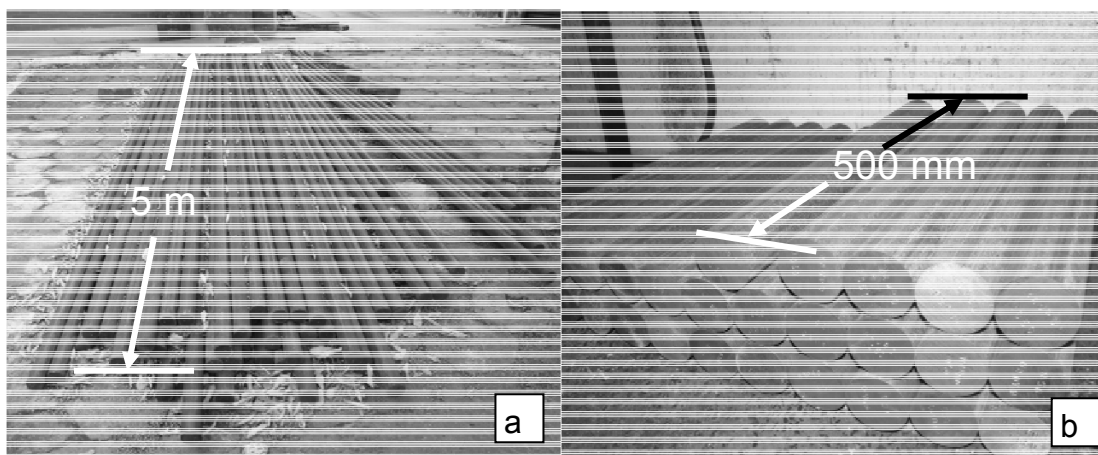


Figura 3.1 – Aço ABTN 1050 (Doação Gerdau S.A.).

- Ferramenta de Corte

As ferramentas utilizadas nas três etapas de estudo são insertos com revestimento multicamadas ($\text{TiN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiCN}$), depositados pelo processo CVD, de geometria com quebra cavaco e referência SPMR120308, da classe 4025 P25/K20 fabricados pela Sandvik do Brasil S.A. A Figura 3.2 apresenta uma ilustração da ferramenta de corte convencional estudada nesta tese.

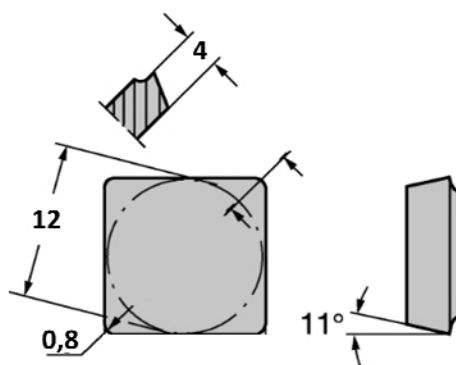


Figura 3.2 - Ferramenta Sandvik SPMR120308, da classe 4025 P25/K20.

No item de pré-testes da etapa 1, também foram utilizadas mais dois tipos de ferramentas, insertos lisos com revestimento multicamadas depositados pelo processo CVD, referência SPUN 12 03 08, da classe 3005 P25/K20 e insertos sem revestimento, de geometria com quebra cavaco referência SPMR120308, da classe

4025 P25/K20. Estas ferramentas foram utilizadas apenas uma vez para fins comparativos com a ferramenta convencional.

- Fluidos de Corte

A velocidade de corte foi variada (de 10 a 350 m/min) usando três sistemas de lubri-refrigeração (seco, MQF 60 ml/h, jorro 360 L/h). O fluido utilizado para a atmosfera com MQF (mínima quantidade de fluido) foi o BL2000 fabricado pela ITW Chemical Products. Este produto é do tipo integral, biodegradável e atóxico, com composição química de óleos vegetais (soja, milho e canola) e aditivos anticorrosivos. A emulsão aplicada na forma abundante (jorro) usou o fluido de óleo mineral Carecut, fabricado pela Castrol. Esta emulsão foi preparada a uma concentração de 6% (94% água).

3.3 - Equipamentos

- Torno Romi Multiplic 35D

A usinagem da primeira e segunda etapas foram realizadas no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem LEPU usando um torno Multiplic 35D (Fig. 3.3), fabricado pela Industrias Romi S.A., o qual possui uma rotação máxima de 3000 RPM e 15 cv de potência.

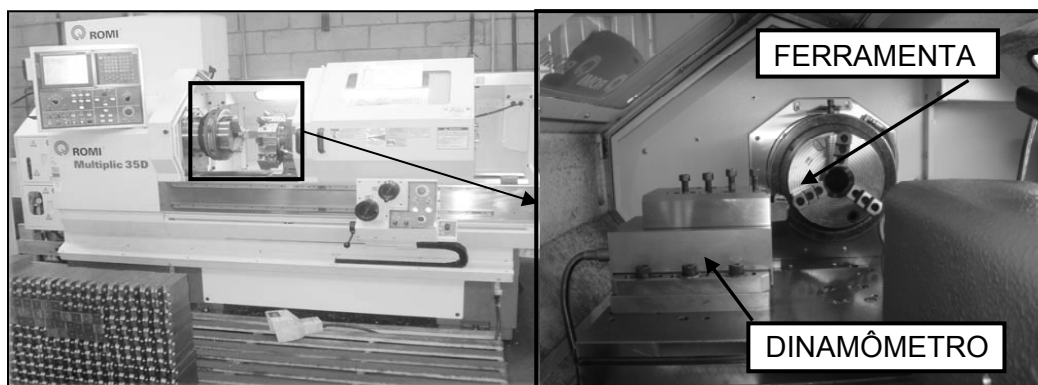


Figura 3.3 - Torno ROMI Multiplic 35D.

- Torno Romi Centur 35D

A terceira etapa de testes foi realizada no laboratório de tecnologia mecânica LABTECMEC da Universidade Federal de Espírito Santo, usando um torno CNC Centur 35D (Fig. 3.4 a), fabricado pela Industrias Romi S.A., o qual possui uma rotação máxima de 3000 rpm e 15 cv de potência. A Figura 3.4-b apresenta uma fotografia do material sendo usinado, com um detalhe da posição do bico aplicador do fluido na forma de jorro.

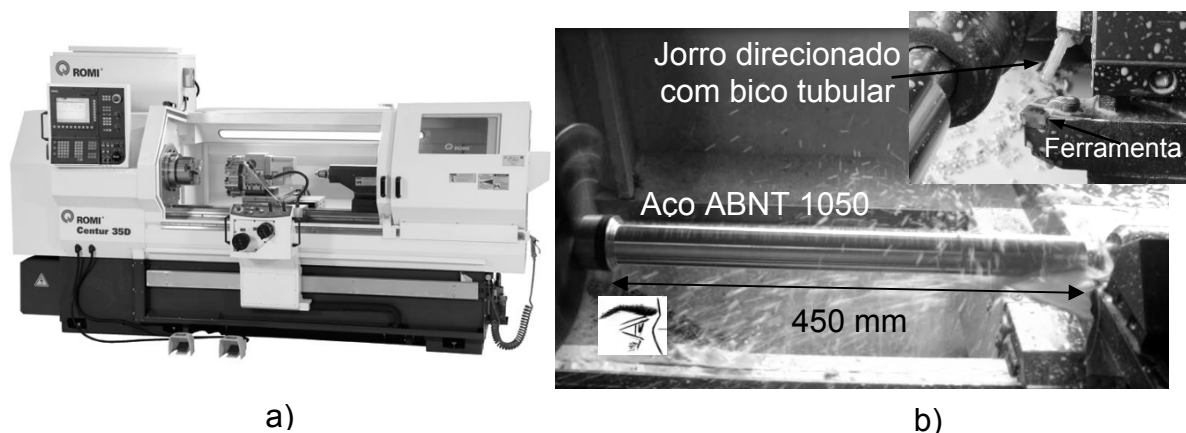


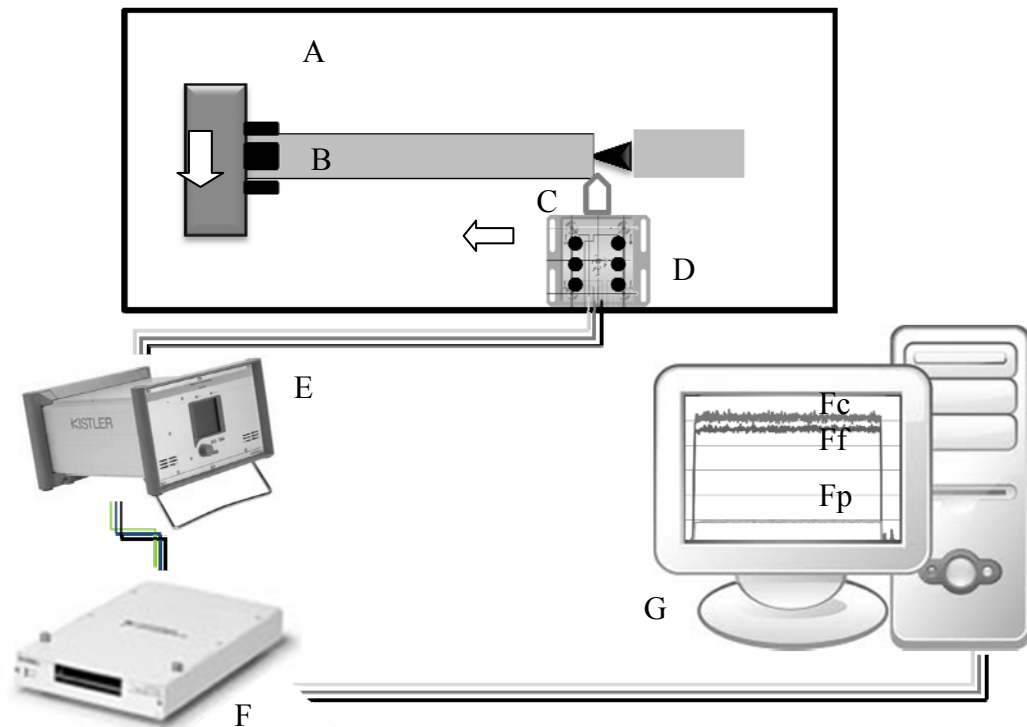
Figura 3.4 - LABTECMEC UFES a) Torno ROMI Centur 35D, b) foto detalhada do torneamento.

- Dinamômetro Kistler

Para a caracterização das forças de usinagem, variável adquirida nas duas primeiras etapas, usou-se um dinamômetro da marca Kistler, modelo 9265-B. Este instrumento mede os esforços aplicados sobre a ferramenta usando um circuito composto por anéis piezo-elétricos ligado a um amplificador da marca Kistler, os valores dos ganhos utilizados no amplificador foram de 250 N/V para o canal da força de corte e 100 N/V para os canais das forças de avanço e passiva. O dinamômetro foi fixado na mesa principal do torno.

Os sinais foram adquiridos usando uma taxa de aquisição de 1kHz. Os sinais amplificados eram enviados a uma placa de conversão análogo-digital da PowerDAQ, modelo National Instruments USB DAQPad-6251 Pinout 1.25 MS/s. O sinal adquirido é gerenciado por um computador com o software LabView 6.0 do mesmo fabricante. O porta-ferramenta com geometria CSBPR 2525 M12 de fixação por grampo, fabricado pela Sandvik do Brasil S.A., foi fixado na plataforma

piezelétrica com um comprimento em balanço de 50 mm, por recomendações do fabricante do dinamômetro. O esquema de montagem da instrumentação é representado na Fig. 3.5.



A - Torno, B - Peça, C - Ferramenta, D - Dinamômetro - Amplificador, F - Placa A/D, G - Computador

Figura 3.5 - Desenho esquemático do sistema de aquisição de força.

- Perfilometria 3D

Com a utilização de um perfilômetro 3D foi possível obter os parâmetros de amplitude das rugosidades das ferramentas texturizadas a laser (S_q , S_a , S_z e S_t), os parâmetros de distribuição de amplitude ou estatísticos (S_{sk} e S_{ku}).

Para a obtenção dos parâmetros foram varridas duas áreas nas superfícies de saída das ferramentas pelo método indutivo com apalpador, com resolução de 40 nm. Tais parâmetros e a geração de imagens das superfícies foram realizados por meio de um software dedicado, Mountains Map versão 3.1.9[®]. Os parâmetros topográficos adquiridos da superfície podem ser descritos da seguinte maneira, conforme Griffiths (2001):

- Sa - desvio aritmético médio da superfície;
- Sq - desvio quadrático médio da superfície (RMS);
- Sz - altura média das dez maiores distâncias pico-vale;
- Sp - altura máxima dos picos
- Sv - profundidade máxima dos vales
- St - altura total da superfície;
- Ssk - “Skewness” da distribuição de amplitudes da topografia da superfície (assimetria da distribuição de amplitudes da superfície);
- Sku - Curtose da distribuição de amplitudes da topografia da superfície;

A análise perfilométrica das superfícies foi realizada utilizando-se um perfilômetro 3D de alta resolução, modelo Talysurf CLI 1000, com capacidade para medição de amostras de até 1000 mm³ e medição de linearidade de 0,34 microns/50 mm, pertencente ao Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais da Universidade Federal do Espírito Santo (LCSM-UFES), Fig. 3.6.

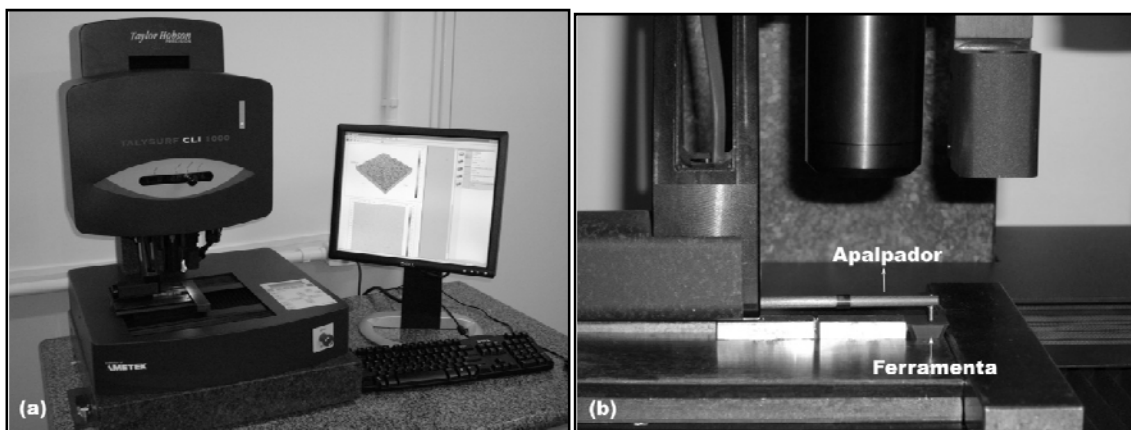


Figura 3.6 - Em (a) Perfilômetro 3D utilizado na análise topográfica, e em (b) detalhe da varredura da superfície de saída de uma ferramenta (VIANA, 2009).

- Rugosímetro Digital Mitutoyo

Para a medição de rugosidade foi utilizado o rugosímetro modelo SJ-201P da marca Mitutoyo (veja Fig. 3.7). O valor de cut-off escolhido foi de 0,8 mm, conforme norma ABNT NBR ISO 4287 [2002].

- Oferece resultados em 19 parâmetros (R_a , R_q , R_z , R_y , R_p , R_t , R_{3z} , R_k , R_{pk} , R_{vk} , P_c , M_r , S_m , S , M_{r1} , A_1 , A_2 , V_o) de acordo com as normas DIN ou JIS/ISO, DNSI.
- Curso: $x=12,5\text{mm}$ $Z=0,35\text{mm}$

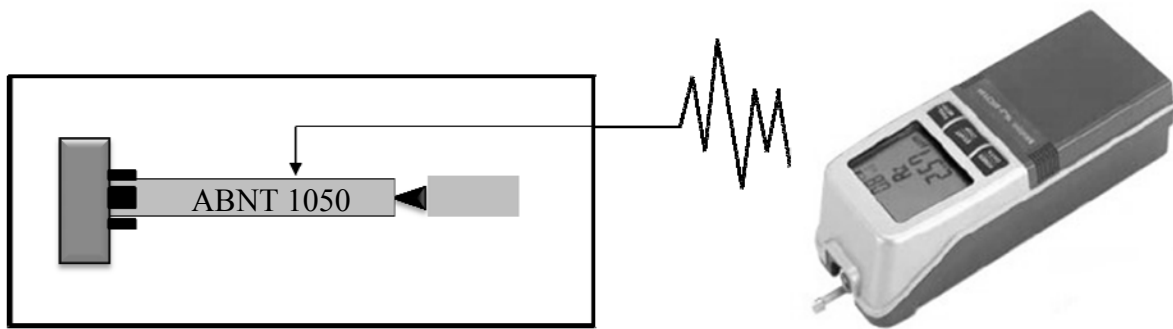


Figura 3.7 - Rugosímetro Mitutoyo SJ 201P.

- Microscópio Eletrônico de Varredura

A parte das análises de microscopia eletrônica de varredura que não precisavam de análise química, foram realizadas no laboratório de ensino e pesquisa em usinagem LEPU, usando um microscópio eletrônico de bancada, referência TM3000 do fabricante Hitachi. A Figura 3.8 apresenta uma foto do equipamento.



- Ampliação de 25 - 30,000 X
- Aceleração de 5 kV e 15 kV
- Tamanho de amostra máximo $\varnothing 70\text{ mm}$ X 50 mm (altura)
- Capacidade de movimento (X, Y) 35 mm
- Resolução de Deslocamento $\pm 50\mu\text{m}$

Figura 3.8 - Microscópio eletrônico de varredura Hitachi.

As análises de composição química das superfícies foram feitas em laboratórios da Universidade Federal de Espírito Santo. A Figura 3.9. apresenta uma fotografia do microscópio Zeiss AG - EVO® 40 Series, com EDS - IXRF SYSTEM e um detalhe da camara interna do mesmo.



Figura 3.9 - Microscópio eletrônico de varredura com EDX acoplado da UFES.

- Microscópio Ótico

As fotografias usadas para medição do desgaste de flanco e visualização da superfície de saída das ferramentas desgastadas foram capturadas em laboratórios da Universidade Federal de Espírito Santo usando uma lupa ZEISS Stereo Discovery 12, com capacidade de ampliação de 5 a 150 X. A Figura 3.10 apresenta uma fotografia do equipamento.



Figura 3.10 - Lupa ZEISS Stereo Discovery 12.

- Tribometro (*Calowear*)

Após de verificar nas ferramentas desgastadas evidências de desgaste abrasivo, realizou-se um ensaio de microabrasão nas ferramentas com e sem textura. O princípio de funcionamento do equipamento de microabrasão do tipo esfera livre é mostrado na Fig. 3.11.

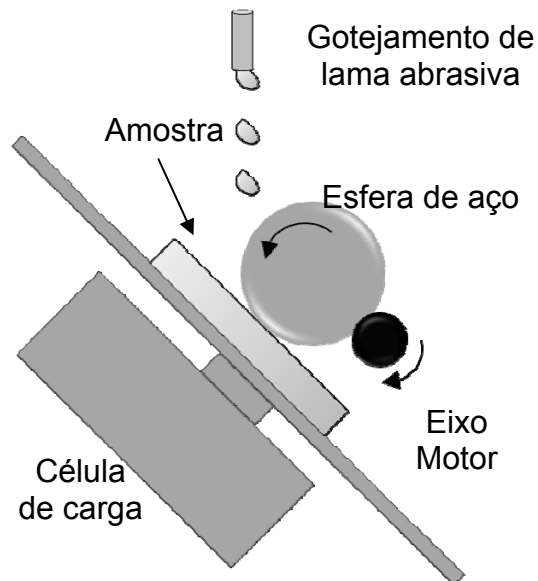


Figura 3.11 - Princípio de funcionamento do equipamento de microabrasão do tipo esfera livre, *Calowear*.

O ensaio foi realizado no laboratório de tribologia e materiais LTM da Universidade Federal de Uberlândia, usando um equipamento de microabrasão do tipo esfera livre, *calowear*. Neste equipamento uma esfera de aço gira livremente sobre a superfície de saída da ferramenta impulsionada por um eixo motor. A ferramenta foi fixada em um porta-amostra acoplado a uma célula de carga que mede continuamente a força normal durante o ensaio. Uma lama abrasiva em duas concentrações foi gotejada sobre a esfera de aço, de modo a promover o desgaste na superfície de saída da ferramenta.

No equipamento de microabrasão do tipo esfera livre foi utilizada uma esfera de aço AISI 52100 com diâmetro de 25,4 mm, lama abrasiva contendo 100 ml de água destilada e duas concentrações 50 e 5 g de SiC (sílica classe F1200 com tamanho médio das partículas em torno de 4 μm) resultando numa concentração de 0,05 e

0,5 g/cm³, rotação do eixo motor de 83 RPM (velocidade de deslizamento de $\sim 0,11 \text{ m.s}^{-1}$) e carga normal de $0.38 \pm 0.01 \text{ N}$. A lama abrasiva foi agitada continuamente por um agitador magnético para evitar a decantação do abrasivo e bombeada por uma bomba peristáltica sobre a esfera, numa vazão de 1 gota a cada 5 segundos. A Figura 3.12 mostra o equipamento similar ao utilizado nos ensaios e o detalhe da montagem do experimento.

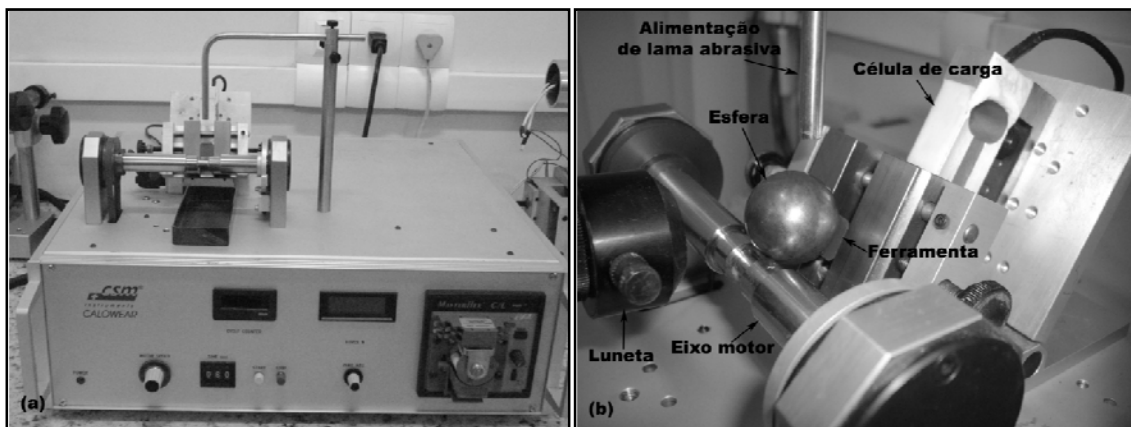


Figura 3.12 - Em (a) equipamento utilizado no ensaio, e em (b) detalhe de montagem do experimento (SANTOS, 2004 Apud VIANA, 2009).

A interação entre a esfera e a superfície de saída da ferramenta dá origem a uma calota de desgaste (ilustração Fig. 3.13), que foi medida em intervalos interrompidos de 1 minuto, ao longo de 10 minutos.

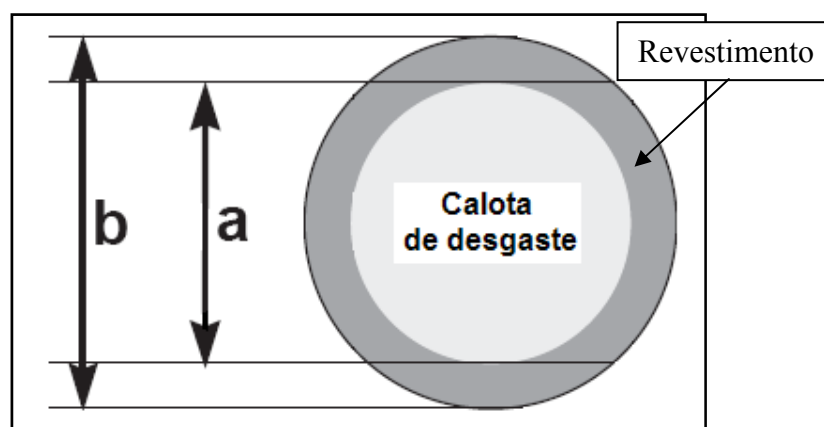


Figura 3.13 - Ilustração mostrando a definição dos diâmetros externo (b) e interno (a) da calota de desgaste formada (VIANA, 2009).

A cada parada do ensaio foram medidos os diâmetros externo (b) e interno (a) da calota de desgaste, considerando as três camadas de revestimento como uma espessura única por meio de uma luneta óptica calibrada. Foram realizados três ensaios para cada conjugado revestimento/substrato.

3.4 - Procedimentos Experimentais

Para estudar a influência da texturização a laser em ferramentas de metal duro revestidas, este trabalho consta de uma metodologia dividida em três etapas. Para cada etapa foi texturizado um lote de ferramentas. A primeira etapa estuda diferentes parâmetros no laser para produzir uma única geometria na textura da ferramenta. Nesta etapa testes medindo a força de corte foram utilizados para discriminar os parâmetros no laser que não são adequados para texturização. A segunda etapa estuda diferentes geometrias da textura aplicada na ferramenta e usa a força de corte para discriminar as geometrias menos adequadas para reduzir os esforços de usinagem. A terceira e última etapa usa a ferramenta classificada pelas etapas precedentes (um e dois), para o estudo e comparação da vida de ferramenta com uma ferramenta convencional (sem texturização).

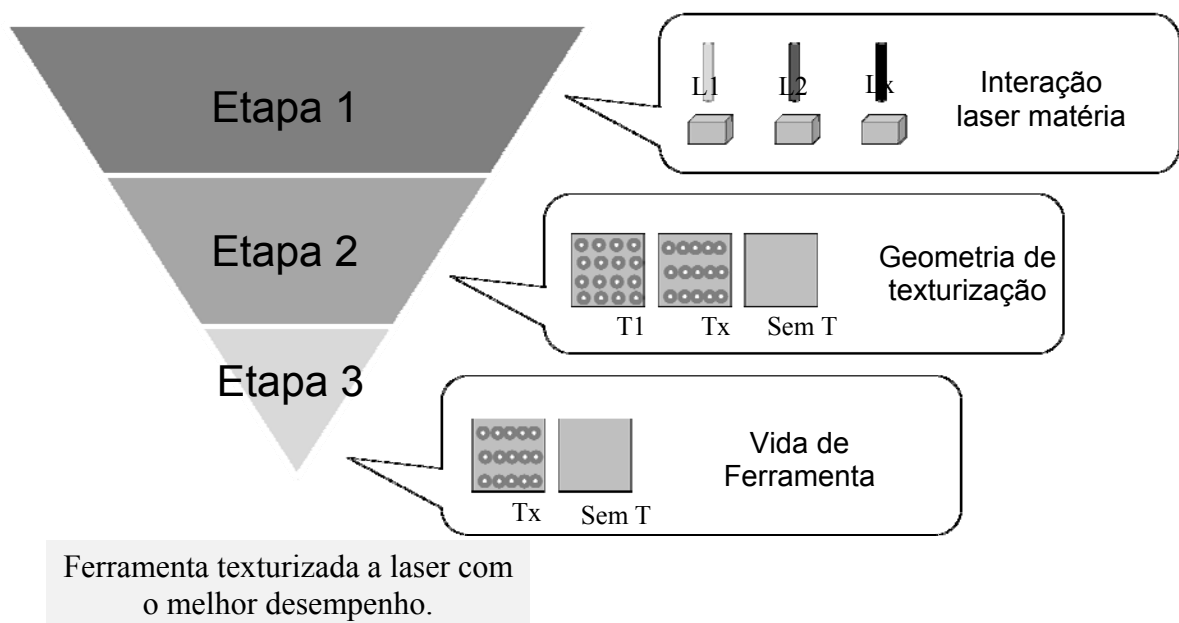


Figura 3.14 - Desenho esquemático de etapas do trabalho.

A escrita deste capítulo está dividida em três itens, metodologia, materiais e equipamentos. A Figura 3.14 apresenta um desenho ilustrativo da metodologia aplicada em este trabalho.

3.5 - Metodologia de texturização.

Todas as etapas de texturização a laser foram processadas no IEAv-CTA usando um feixe de laser do tipo NdYAG, com energia por pulso (I) da ordem de 10^7 a 10^8 W/cm², tempo de pulso (t_p) entre 80 e 100 ns, com operação na faixa de frequência (f) de 10 kHz, diâmetro focal (\emptyset) variando entre 50 e 250 μ m e deslocamento lateral (dy) variando entre 30 e 250 μ m.

A texturização dos insertos foi feita na superfície de saída, em uma área de 12x12 mm² (toda a superfície da ferramenta). O tipo de textura, ou a rede de microcrateras criadas na superfície dos insertos foi obtida conforme rotina pré-definida, utilizando uma cabeça galvanométrica de alta resolução para garantir a reprodutibilidade desejada. Todas as ferramentas texturizadas foram caracterizadas por interferometria e no microscópio eletrônico de Varredura - MEV.

Os parâmetros utilizados no feixe, para cada uma das etapas, são apresentados nas tabelas Tab. 3.2, Tab. 3.4 e Tab. 3.5 respectivamente. Para cada etapa de testes foi texturizado um lote de ferramentas, isto é, lote 1, 2, 3, para as etapas 1, 2, 3 respectivamente.

3.5.1 - Texturização lote 1

A primeira etapa estuda a interação laser-matéria (efeito do laser na ferramenta), para isto, foram variados os parâmetros do laser segundo os valores apresentados na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros do laser na primeira etapa.

Laser = NdYAG	Textura	Num. De passes	P _{laser} (W)	I (W/cm ²)
	T1	1	40	2,37 X10 ⁸

dy = 30 μm	T2	1	20	$1,19 \times 10^8$
$V_{\text{laser}} = 50 \text{ mm/s}$	T3	1	10	$5,93 \times 10^7$
f = 10 kHz	T4	1	5	$3,05 \times 10^7$
$t_p = 82 \text{ ns}$	T5	3	5	$3,05 \times 10^7$
$\varnothing \text{ feixe} = 93 \mu\text{m}$	T6	10	5	$3,05 \times 10^7$
	T7	Ferramenta Convencional		

Esta tabela mostra o planejamento de texturização variando a potência do feixe em quatro níveis, 40, 20, 10 e 5 W. Posteriormente fixou-se a potência do feixe em 5 W e variou-se o número de passes do feixe sobre a superfície da ferramenta em três níveis 1, 3 e 10 passes, considerando a textura 4 nas duas situações.

Observando a coluna da direita, ($I[W/\text{cm}^2]$), verifica-se que o número de passes sobre a superfície não afeta a densidade de energia que atinge a superfície da ferramenta. Com esta afirmação espera-se esclarecer para o leitor que o objetivo de dar múltiplos passes, com o uso de energias menores, visa encontrar um resultado similar ao esperado com o uso de maiores energias, porém com uma zona afetada pelo calor menor sobre a amostra.

A geometria da textura impressa nas ferramentas obedece a um padrão de crateras superpostas em ambas as direções de movimento do feixe. A Figura 3.15 apresenta um desenho esquemático da texturização do primeiro lote de ferramentas.

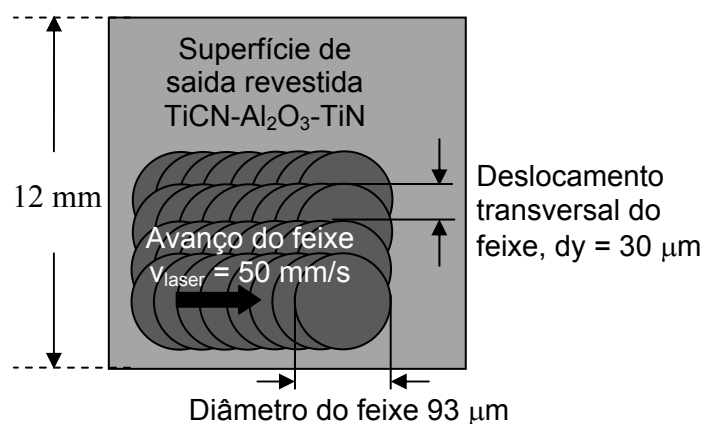


Figura 3.15 - Estratégia de texturização das ferramentas da etapa 1.

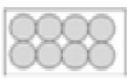



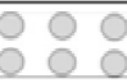
3.5.2 - Texturização lote 2

O segundo lote de ferramentas texturizadas usou o laser NdYAG para promover cavidades com os centros localizados a diferentes distâncias, para três valores de potência 5, 11 e 17 W. As cavidades foram dispostas de cinco maneiras diferentes, considerando a distância entre os centros:

1. Pulsos equidistantes de 200 μm em ambos os sentidos de movimento do feixe (Tab. 3.4, linha 1).
2. Pulsos equidistantes de 200 μm no sentido de varredura e distância entre centros de 250 μm ($dy = 250 \mu\text{m}$) num sentido normal à varredura (Tab. 3.4, linha 2).
3. Pulsos equidistantes de 100 μm no sentido de varredura e distância entre centros de 250 μm ($dy = 250 \mu\text{m}$) num sentido normal à varredura (Tab. 3.4, linha 3).
4. Pulsos equidistantes de 250 μm no sentido de varredura e distância entre centros de 250 μm ($dy = 250 \mu\text{m}$) num sentido normal à varredura (Tab. 3.4, linha 4).
5. Pulsos equidistantes de 300 μm no sentido de varredura e distância entre centros de 250 μm ($dy = 250 \mu\text{m}$) num sentido normal à varredura (Tab. 3.4, linha 5).

A Tab. 3.3 ilustra graficamente a distribuição espacial das marcas e a nomenclatura das texturas elaboradas nesta etapa.

Tabela 3.3 - Esquema de estratégia de texturização das ferramentas da etapa 2.

	T2 T3	T22 T23	T20 T21	Textura ----- Repetição
	T4 T5	T24 T25	T18 T19	
	T6 T7	T26 T27	T16 T17	
	T10 T11	T30 T31	T12 T13	
	T8 T9	T28 T29	T14 T15	
PADRÃO DE TEXTURA	17W	11W	5W	POTÊNCIA DO FEIXE

Todos os padrões de texturização tiveram uma repetição. Os parâmetros utilizados no laser, para texturizar o segundo lote de ferramentas, são apresentados na Tab. 3.4, deve-se observar cuidadosamente que cada lote de ferramentas texturizado representa uma nova nomenclatura, com condições de texturização diferentes, ou seja as ferramentas de T1 a T6 da primeira etapa foram texturizadas com parâmetros diferentes às ferramentas T2 a T6 da segunda etapa.

O uso de uma mesma aresta para mais de uma condição de corte foi possível graças à curta duração do teste de força (aproximadamente 10 segundos por cada condição de corte diferente). Este tempo foi calculado para a correta aquisição do sinal de força

Tabela 3.4 - Parâmetros do laser da segunda etapa.

f = 10 kHz tp = 100 ns Ø feixe = 200 µm Num. de passes = 1	Textura	P _{laser} (W)	v _{laser} (mm/s)	Dy (µm)	I (W/cm ²)
	T2-T3	17	200	200	5,41 X10 ⁷
	T4-T5	17	200	250	5,41 X10 ⁷
	T6-T7	17	100	250	5,41 X10 ⁷
	T10-T11	17	250	250	5,41 X10 ⁷
	T8-T9	17	300	250	5,41 X10 ⁷
	T28-T29	11	300	250	3,50 X 10 ⁷
	T30-T31	11	250	250	3,50 X 10 ⁷
	T26-T27	11	100	250	3,50 X 10 ⁷
	T24-T25	11	200	250	3,50 X 10 ⁷
	T22-T23	11	200	200	3,50 X 10 ⁷
	T20-T21	5	200	200	1,59 X 10 ⁷
	T18-T19	5	200	250	1,59 X 10 ⁷
	T16-T17	5	100	250	1,59 X 10 ⁷
	T12-T13	5	250	250	1,59 X 10 ⁷
	T14-T15	5	300	250	1,59 X 10 ⁷

3.5.3 - Texturização lote 3

Para o terceiro lote de ferramentas texturizadas usou-se um feixe de diâmetro 250 μm e selecionada a geometria de cavidades superpostas 50% no sentido de varredura e distância entre centros de 250 μm ($dy = 250 \mu\text{m}$) num sentido normal à varredura. A Figura 3.16 ilustra graficamente a estratégia de texturização adotada nesta etapa e o resultado da textura produzida na superfície de saída da ferramenta.

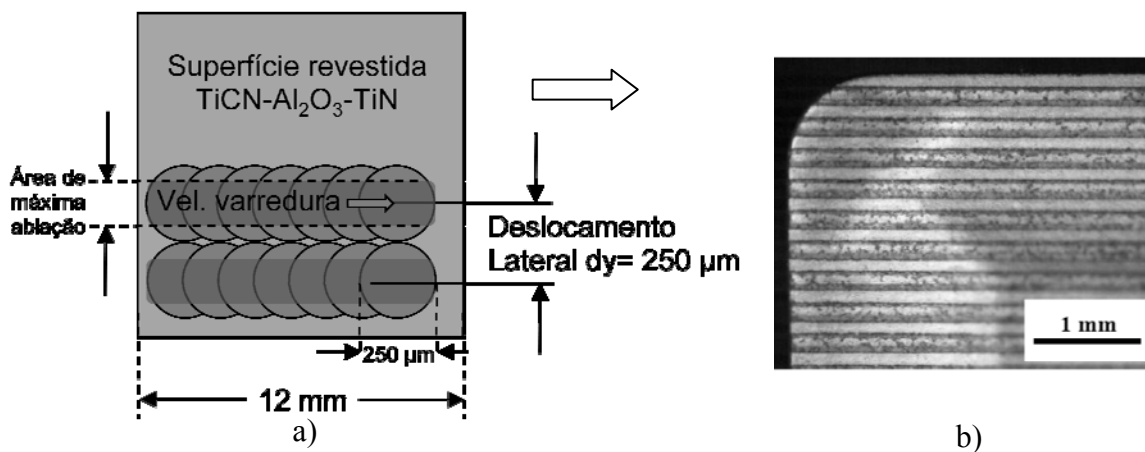


Figura 3.16 - Ferramenta texturizada na terceira etapa, a) Esquema de texturização b) fotografia da superfície texturizada.

Os parâmetros aplicados no feixe laser para a texturização das ferramentas da terceira etapa seguem os valores apresentados na Tab. 3.5

Tabela 3.5 - Parâmetros do laser da terceira etapa.

$f = 10 \text{ kHz}$ $t_p = 100 \text{ ns}$ $\varnothing \text{ feixe} = 250 \text{ mm}$ Num. De passes = 1 $dy = 250$ $V_{\text{laser}} = 125 \text{ mm/min}$	Textura	$P_{\text{laser}} \text{ (W)}$	$I \text{ (W/cm}^2\text{)}$
	T26 T27	17	$3,46 \times 10^7$
	Convencional	0	0

Observar que a densidade de energia aplicada para texturizar em esta etapa ($3,46 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$), usa um valor de energia próximo àqueles valores encontrados na etapa 1, para a ferramenta T4 ($3,05 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$) e na etapa 2 para a ferramenta T26 ($3,50 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$)

Antes de estudar a influência da texturização das ferramentas nas forças de usinagem foram realizados pré-testes verificando a influência na força de usinagem avaliando as condições das etapas A, B e C, descritas no seguinte item.

3.6 - Pré-testes de Usinagem

- A.** Revestimento da ferramenta (estudo com ferramentas sem revestimento).
- B.** Geometria da ferramenta (estudo com ferramentas lisas usando a textura T1, (veja parâmetros do laser na Tab. 3.2).
- C.** Heterogeneidade do material da peça (estudo da usinabilidade do aço conformado ABNT 1050 ao longo da seção transversal).

O planejamento das condições de corte para os pré-testes segue a ordem apresentada na Tab. 3.6. Esta tabela apresenta diferentes valores de avanço, velocidade de corte e condições lubri-refrigerantes. As letras A, B ou C indicam as etapas estudadas em cada pré-teste.

As situações nas quais foi variada a velocidade de corte, o valor do avanço foi fixado em 0,2 [mm/rev.] No caso da variação do avanço a velocidade de corte foi fixada em 200 [m/min].

Tabela 3.6 - Planejamento dos pré-testes.

Pré-teste	v_c [m/min]			f [mm/rev.]			seco			Jorro [360L/h]		
1	10	A		C	0,05		B		A			
2	20	A		C	0,10		B		A			
3	30	A	B	C	0,15				A	B	C	A
4	40	A		C	0,20		B		A		C	A
5	50	A	B	C	0,25				A	B	C	A
6	60	A		C	0,30		B		A		C	A
7	70	A	B	C	0,35				A	B	C	A

8	80	A		C	0,40		B		A		C	A		
9	90	A		C	0,45		B		A		C	A		
10	100	A	B	C					A	B	C	A		
11	150	A							A			A		
12	200	A	B	C					A	B	C	A		
13	250	A	B	C					A	B	C	A		
14	300	A	B	C					A	B	C	A		
15	350	A	B	C					A	B	C	A		
Condição de Avanço Fixo									0,2 [mm/rev.]					
Condição de velocidade de corte Fixa									200 [m/min.]					

Após realizados os pré-testes, procedeu-se à avaliação das 6 texturas geradas no primeiro lote de ferramentas e comparadas à ferramenta convencional. Esta primeira etapa usou a força de usinagem como índice de usinabilidade.

As condições de corte estudadas nas três etapas de testes do trabalho seguem o planejamento apresentado na Tab. 3.7.

Tabela 3.7 - Planejamento das condições de corte aplicadas nas três etapas.

v_c [m/min]				f [mm/rev.]				seco			MQF [60 ml/h]			Jorro [360L/h]		
10	1			0,05	1	2		1	2		1	2		1	2	
20	1			0,10	1	2		1	2		1	2		1	2	
30	1	2		0,15	1			1	2		1	2		1	2	
40	1			0,20	1	2		1	2		1	2		1	2	
50	1	2		0,25	1			1	2		1	2		1	2	
60	1			0,30	1	2		1	2		1	2		1	2	
70	1	2		0,35	1			1	2		1	2		1	2	
80	1			0,40	1	2		1	2		1			1	2	
90	1	2		0,45	1	2		1	2		1			1	2	
100	1							1			1			1		
150													3			3
200	1	2						1	2		1			1	2	

250	1	2			1	2		1			1	2	
300	1	2			1	2		1			1	2	
350	1	2			1	2		1		3	1	2	3
Condição de Avanço Fixo Etapas 1 e 2								0,2 [mm/rev.]					
Condição de velocidade de corte Fixa								200 [m/min.]					
Condição de avanço Fixo 3ª Etapa								0,25 [mm/rev.]					

Nas etapas 1 e 2, onde foi medida a força de corte, usou o sistema de aquisição descrito no item (equipamentos - dinamômetro). O percurso de avanço programado no torneamento garante um tempo de aquisição de 5 segundos para cada condição de corte, para um valor médio de força calculado com 5000 pontos.

Para os testes de vida da terceira e última etapa, o planejamento segue as condições de corte apresentadas na Tab. 3.8, Para avaliar estas condições de corte usou-se um critério de fim de vida composto, isto é, um critério para a velocidade de 150 m/min., medindo o desgaste de flanco para um volume de material removido fixo de 1644 cm³, e um segundo critério, para a velocidade de 350 m/min, com fim de vida $VB_{Bmáx} = 0,6$ mm, conforme Norma ISO 3685 (1993).

Foram aplicados dois critérios de fim de vida, devido à baixa taxa de desgaste da ferramenta na menor velocidade de corte o que promoveria tempo de teste excessivamente longo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização dos testes foram realizados ensaios para caracterizar o material da peça e da ferramenta como apresentado no seguinte item.

4.1 - Ensaios de caracterização peça e ferramenta

As barras do material da peça foram fabricadas pelo processo de fundição e posterior conformação, induzindo um gradiente de dureza no material, oriundo da técnica de resfriamento das barras, assim, a vizinhança da superfície do material possui uma dureza ligeiramente superior à encontrada no centro do mesmo. A Fig.4.1 representa esquematicamente a metodologia de medição de dureza Vickers no material da peça. Para medir a dureza da peça utilizou-se um durômetro Universal Wolpert, do Laboratório de Tribologia e Materiais - LTM.

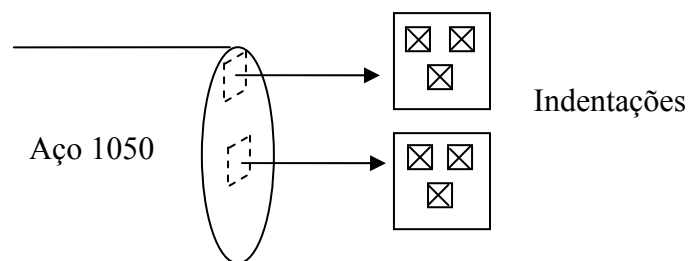


Figura 4.1 - Ilustração de pontos de medição de dureza Vickers.

Foram realizadas três indentações em pontos diferentes da periferia e do centro das amostras e calculada a dureza média. A Figura 4.2 apresenta uma micrografia revelando a

variação no tamanho de grão da barra comparando regiões próximas ao centro da barra e regiões próximas da periferia da barra.

Amostras do centro e borda das barras foram retiradas para realizar micrografias, que revelaram um menor tamanho do grão nas proximidades da superfície (Fig. 4.2 - a), quando comparadas com a microestrutura do centro das barras (Fig. 4.2 - b). Esta diferença no tamanho de grão gera uma variação na dureza. Uma média das leituras de dureza na borda e o centro da barra mostraram resultados de 221 e 212 Vickers respectivamente.

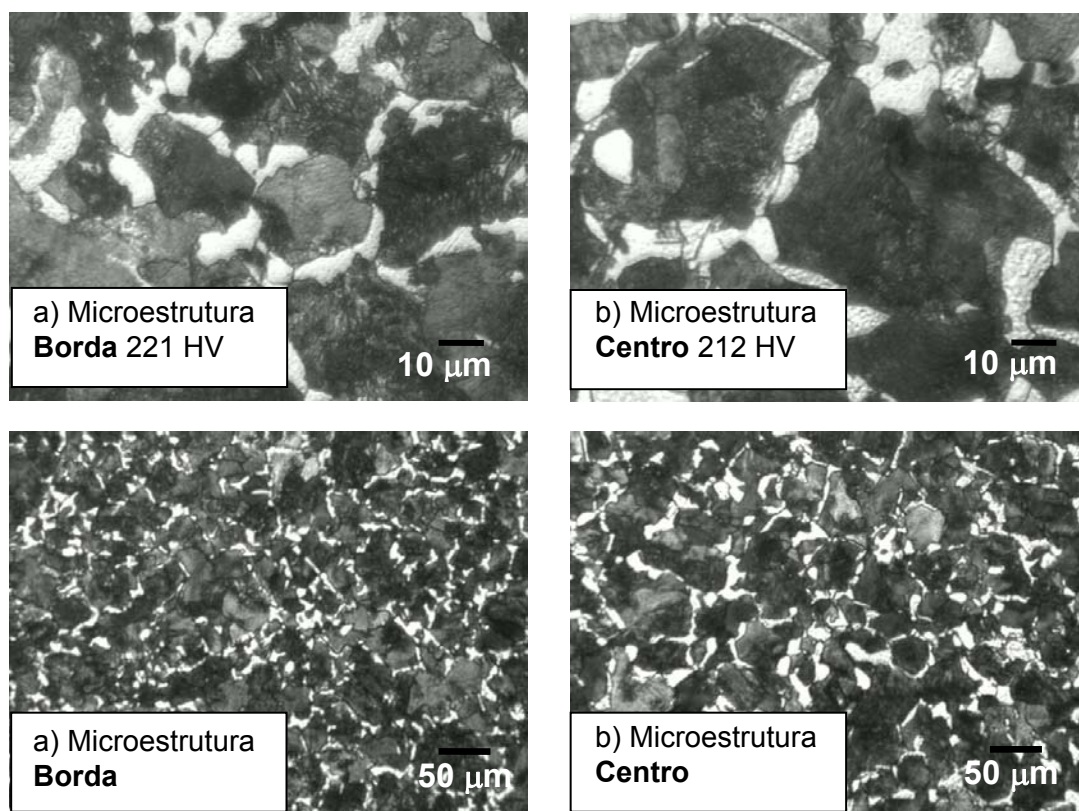


Figura 4.2 - Micrografia do aço ABNT 1050 a) borda e b) centro da barra.

Foram também realizados ensaios de tração no Instituto Federal do Maranhão, Laboratório de Ensaios Mecânicos, usando três corpos de prova cilíndricos de aço ABNT 1050, segundo a norma ABNT 6152 (2002). A Tab. 4.1 apresenta as informações adquiridas neste teste.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 1050 (Gerdau S.A.).

CP	Seção [mm ²]	Escoamento [MPa]	Tensão máxima [Mpa]	Alongamento na ruptura (%)
1	78,54	501,50	757,73	19,20

2	78,54	514,61	758,13	18,20
2	78,54	527,84	781,57	15,60
Média	78,54	515	766	17
DP	0,00	10,75	11,15	1,52

Considerando que estas ferramentas sofrerão um processo de remoção parcial do revestimento (texturização a laser), se torna de interesse apresentar uma fotografia de um corte transversal e uma vista da superfície de saída antes da texturização (Fig. 4.3).

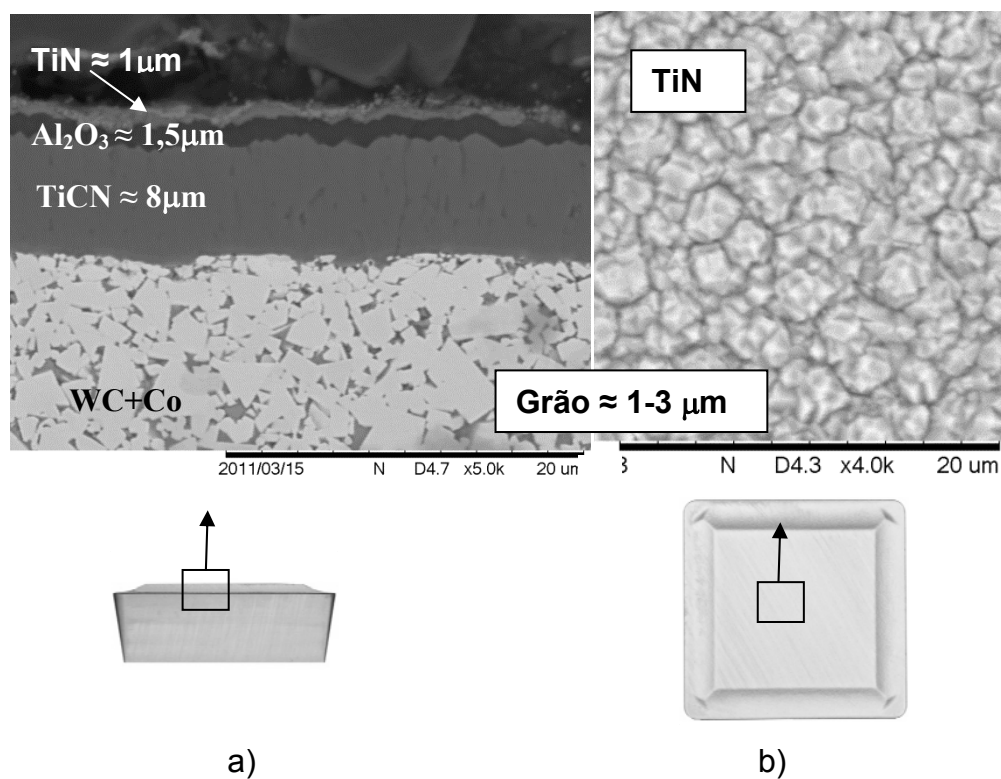


Figura 4.3 - Ferramenta convencional SPMR120308, a) corte transversal, b) superfície de saída.

As imagens capturadas de MEV (microscopia eletrônica de varredura) possuem ampliação suficiente para ver em detalhe a espessura dos revestimentos e a característica da superfície de saída das ferramentas.

Para realizar o corte transversal da ferramenta sem afetar em grande proporção a integridade dos revestimentos, foi utilizada a técnica de eletroerosão a fio no Laboratório de Pesquisa em Usinagem da PUCPR.

Os resultados obtidos nos ensaios de usinagem foram discutidos em três etapas. A primeira etapa analisou superfícies texturizadas usando diferentes parâmetros no laser.

As ferramentas foram comparadas com base nos resultados das componentes das forças de usinagem. Foram realizados pré-testes, verificando a influência do revestimento, da geometria da ferramenta e do material da peça, na força de usinagem.

A segunda etapa estudou a influência da geometria e orientação da textura produzida na ferramenta, onde a comparação das texturas foi realizada através das forças de usinagem. A terceira e última etapa avaliou uma textura indicada pelas etapas anteriores em testes de vida de ferramenta e comparou com os resultados apresentados com ferramentas convencionais. Em todas as etapas, a análise das superfícies das ferramentas foi através de microscopia ótica, topografia em 3D, microscopia eletrônica de varredura e EDS, para dar uma caracterização mais abrangente da superfície.

Os resultados são discutidos a seguir:

Influência de parâmetros externos à texturização

Antes de realizar as medições de força usando as ferramentas texturizadas para esta etapa, foram realizadas análises prévias em uma tentativa de delimitar a influência da textura na força de usinagem do par ferramenta peça. Os testes prévios são descritos a seguir:

Influência da texturização em ferramentas lisas

Os testes usando ferramentas lisas foram propostos com a finalidade de simplificar a geometria da ferramenta e verificar o efeito da texturização nas forças de corte e na rugosidade da peça. Para este objetivo foram propostas velocidades de corte entre 10 a 350 m/min. Para os testes foram usadas duas atmosferas de usinagem, a seco e jorro respectivamente. Os gráficos das Fig. 4.4 e 4.5 apresentam os resultados a seco e com jorro, respectivamente.

Em estas figuras visualiza-se claramente o fenômeno da aresta postiça de corte. Para este material, conforme a literatura, em velocidades abaixo de 100 m/min aproximadamente (MACHADO et al., 2011). Sabendo que a APC é um fenômeno fortemente relacionado com a temperatura e o encruamento do material, a aplicação de fluido de corte na forma de jorro deslocou para a direita (maiores velocidades de corte) a formação da mesma, em ambos os casos, ferramenta convencional e a texturizada, indicando uma remoção de calor efetiva por parte do fluido.

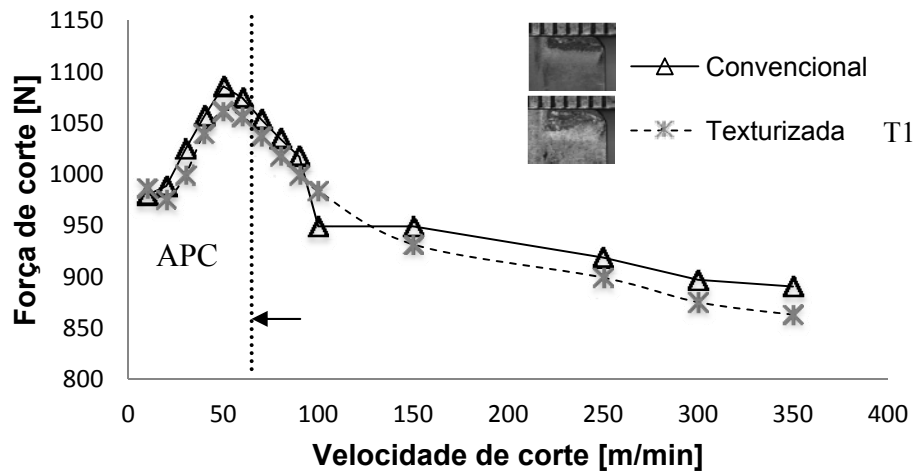


Figura 4.4 – Força de corte em ferramenta sem quebra cavaco, convencional e texturizada, em atmosfera a seco. $a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,2 \text{ mm/rev}$.

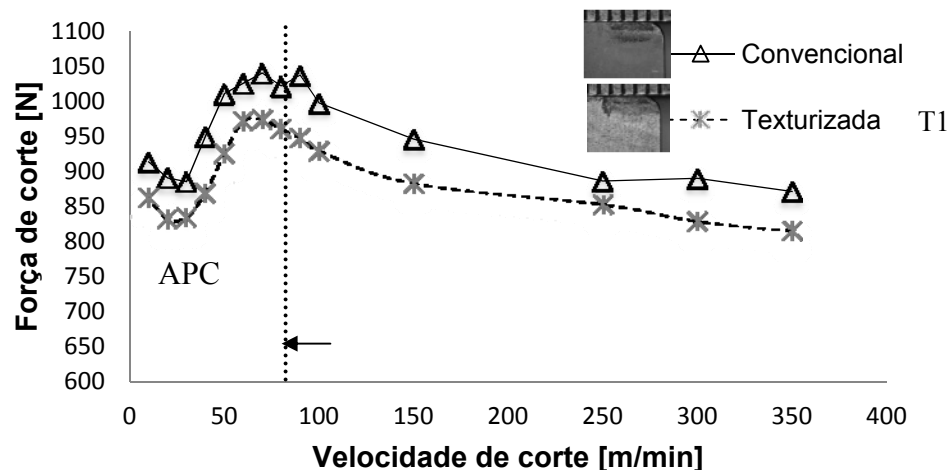


Figura 4.5 – Força de corte em ferramenta sem quebra cavaco, convencional e texturizada, em atmosfera a jorro. $a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,2 \text{ mm/rev}$.

Comparando os resultados das ferramentas com e sem textura na usinagem a seco, não foi observado nenhum efeito significativo por parte da textura. Na usinagem com jorro a ferramenta com textura apresentou uma diminuição considerável na força de corte, quando comparada com a ferramenta convencional. A mudança na topografia da superfície, promovida pelo laser, trouxe benefício na redução da energia gasta no corte. Provavelmente lubrificidade da ferramenta foi beneficiada por uma topografia que deu maior molhabilidade à superfície. Analisando o efeito da textura no acabamento da peça, as Fig 4.6 e 4.7 mostram

os valores de rugosidade R_a e R_z observados nos testes de usinagem a seco e jorro, respectivamente.

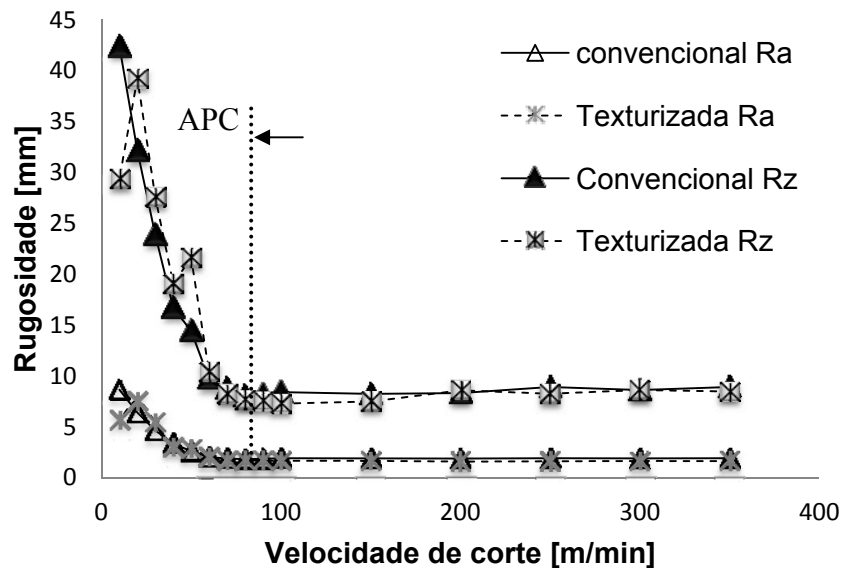


Figura 4.6 – Rugosidade de corte com ferramenta sem quebra cavaco, convencional e texturizada, em atmosfera a seco. $a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm/rev.

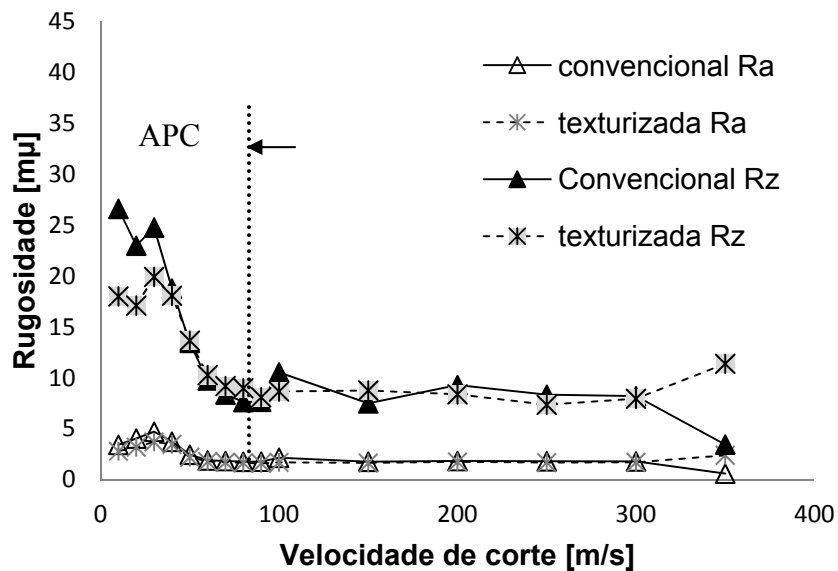


Figura 4.7 – Rugosidade de corte com ferramenta sem quebra cavaco, convencional e texturizada, em atmosfera a jorro. $a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm/rev.

Os gráficos de das Figuras 4.6 e 4.7, evidenciam a presença da APC com grandes valores de rugosidade em velocidades inferiores a 100 m/min. Observa-se também que o uso de fluido na forma de jorro reduz significativamente a rugosidade nas velocidades onde

há presença da aresta postiça de corte, isto devido à ação lubrificante do mesmo, que diminui a APC e consequentemente reduz o tamanho dos pedaços da mesma, que ficam incrustados na superfície da peça.

O efeito da texturização das ferramentas é nulo quando avaliada a rugosidade da peça, quer atmosfera a seco quer atmosfera com jorro. Para estes dois tipos de atmosferas a rugosidade assume um valor estável em velocidades superiores a 75 m/min.

Influência do revestimento na força de usinagem

O uso do feixe laser para gravar uma textura na superfície da ferramenta revestida remove o revestimento de maneira parcial. Baseado nesta afirmação propôs-se o estudo de ferramentas com e sem revestimento. O comportamento das forças de usinagem foi avaliado variando primeiro a velocidade de corte (veja Fig. 4.8) e posteriormente o avanço por revolução (veja Fig. 4.9).

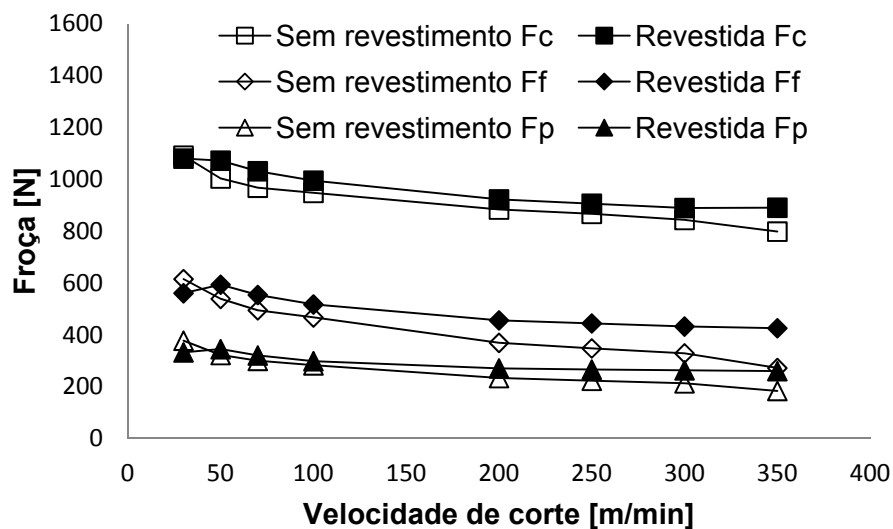


Figura 4.8 – Influência do revestimento da ferramenta nas forças de usinagem. $a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,2 \text{ mm/rev}$.

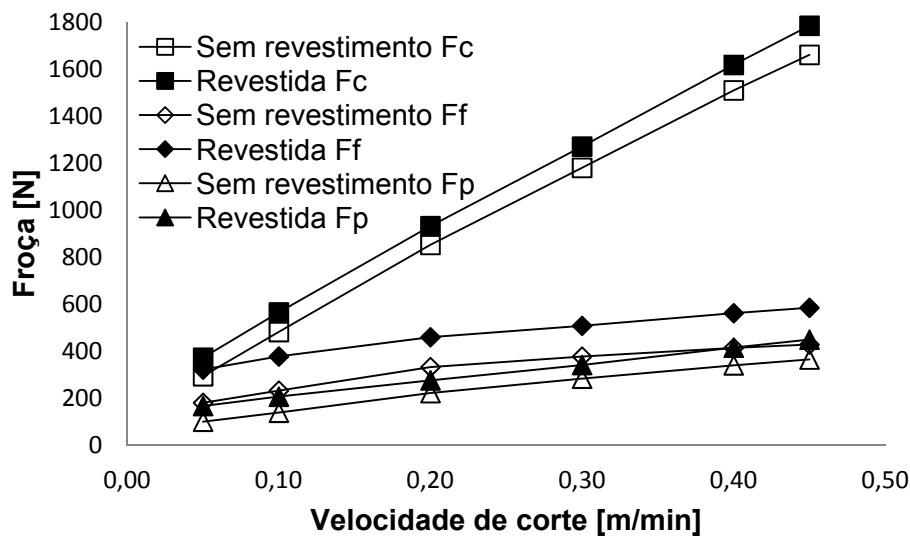


Figura 4.9 – Influência do revestimento da ferramenta nas forças de usinagem. $a_p = 2 \text{ mm}$, $v_c = 200 \text{ m/min}$.

Analisando os gráficos das Fig. 4.8 e 4.9 aparentemente não há influência muito significativa do revestimento nas forças de usinagem, apenas uma leve tendência de redução das componentes da força na ferramenta sem revestimento, principalmente na força de avanço. Este resultado é de certa forma contraditório com a literatura, já que a camada mais externa da ferramenta (TiN) é colocada justamente para diminuir o atrito entre o cavaco e a ferramenta. Uma possível explicação para estes resultados está no fato da ferramenta sem revestimento estar gerando mais calor na interface e assim, reduzindo a resistência ao cisalhamento e, portanto, reduzindo força.

A Figura 4.8 revelou o comportamento esperado das componentes de força de usinagem com a variação de velocidade de corte. Com o aumento deste parâmetro houve uma ligeira tendência de redução das forças. Isto é devido ao aumento da taxa de deformação e consequentemente da geração de calor, que acarreta em redução da resistência ao cisalhamento do material (MACHADO et al., 2011). O aumento da velocidade de corte também tende a reduzir a área de contato cavaco-ferramenta (TRENT: WRIGHT, 2000) que é outro fator para contribuir com a redução da força de usinagem. Com relação à influência do avanço (Fig. 4.9) o aumento evidente das componentes de força de usinagem se deve ao aumento da área da seção de corte, fator forte para contribuir com estes resultados (MACHADO et al., 2011).

Variação da microestrutura do material da peça ao longo da seção transversal.

A análise microestrutural do material da peça, apresentada na Fig. 4.2 revelou uma leve variação do tamanho de grão ao longo da seção transversal (veja item caracterização do material da peça) do mesmo. Esta variação é derivada do processo de fabricação, no qual as diferentes taxas de resfriamento somadas à conformação do material tornaram menores os grãos na vizinhança da periferia do material, quando comparados com aqueles na parte mais interna da barra. Adicionalmente, testes de dureza ao longo da seção transversal confirmaram uma dureza superior em regiões próximas da periferia da peça.

Esta variação de dureza, mesmo que leve pode influenciar os resultados encontrados na usinagem com ferramenta com diferentes texturas. Para verificar esta influência foram realizados testes nos diâmetros indicados na Fig. 4.10, nas mesmas condições de corte.

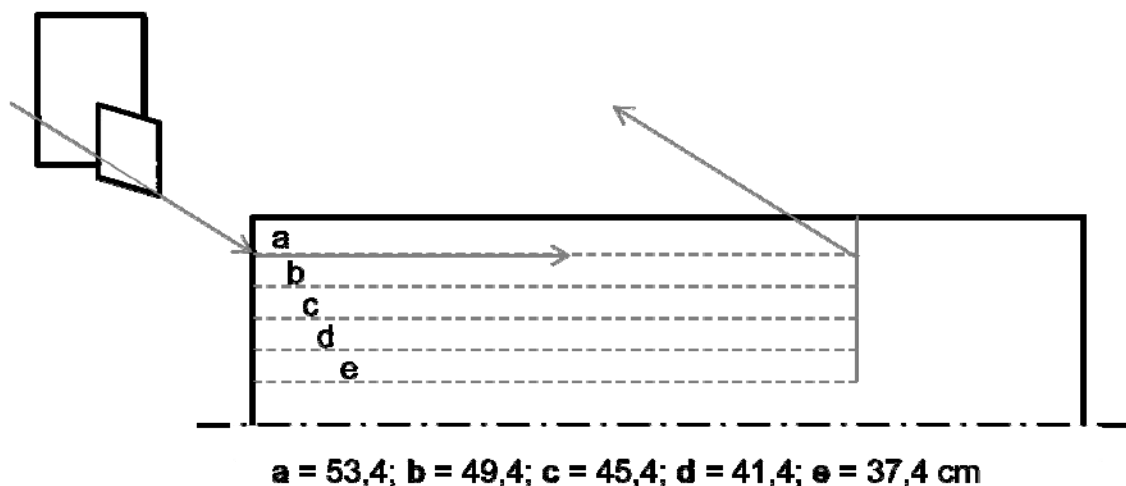


Figura 4.10 – Desenho esquemático explicativo da usinagem em diferentes diâmetros.

Analisando os resultados de força de corte, apresentados na Fig. 4.11 a, b e c, é evidente a presença da aresta postiça de corte em velocidades inferiores a 50 m/min, a partir deste valor a força de corte cai gradativamente devido ao aumento da temperatura como consequência das altas taxas de deformação.

Este teste permitiu verificar que praticamente não há influência do diâmetro da peça, ou em outras palavras, não há influência da variação no tamanho de grão sobre as forças de usinagem. Embora tenha sido verificada uma leve variação da dureza do material ao longo da seção transversal, isto não foi suficiente para promover alteração significativa na força de

usinagem, na faixa de velocidades estudada. O valor dos diâmetros variou desde o diâmetro máximo da peça de trabalho (53,4 mm) até um diâmetro final de 33,4 mm.

Os resultados de força de corte podem ser vistos na Fig. 4.11 a, b e c.

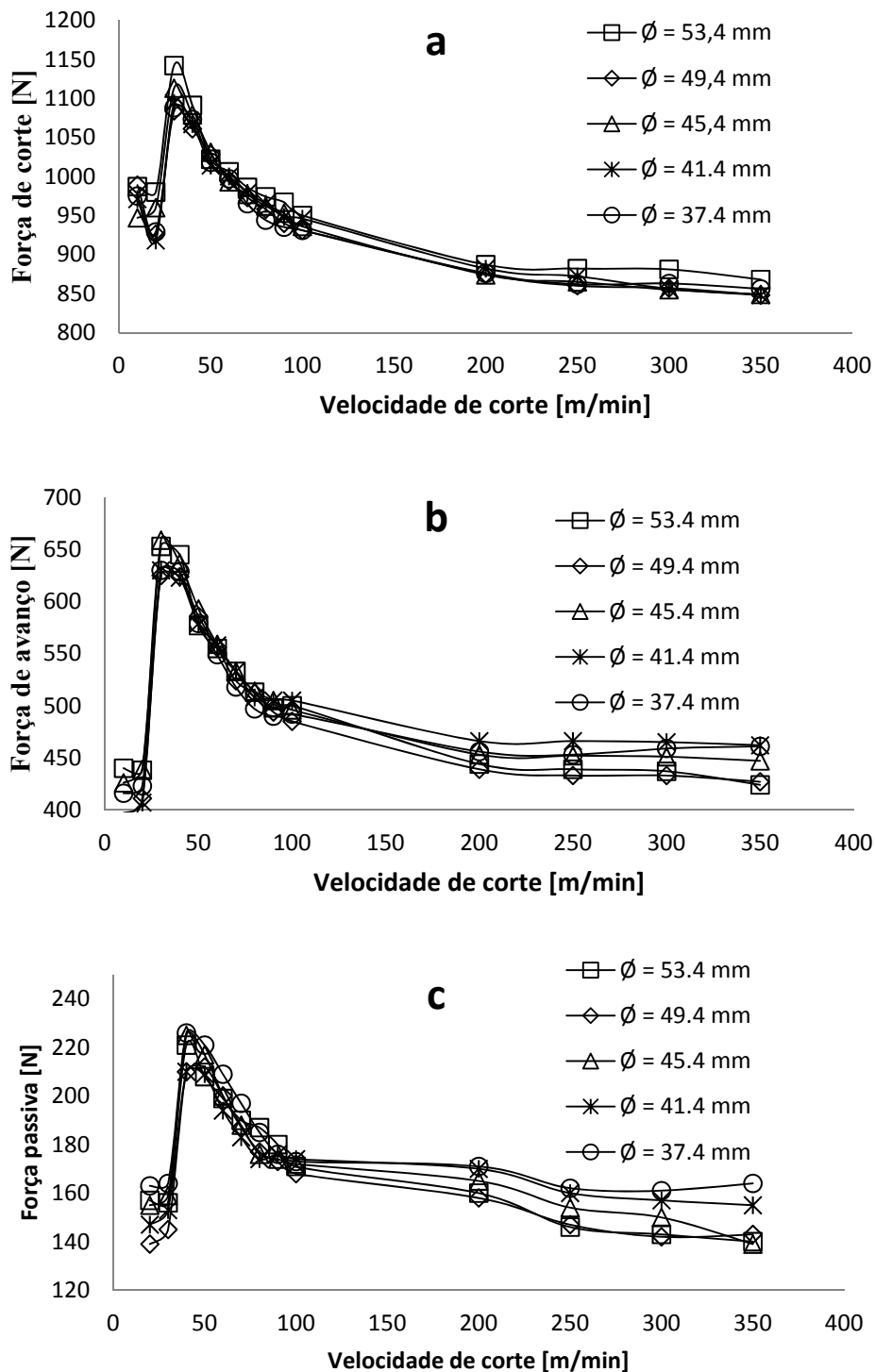


Figura 4.11 – Influência do diâmetro da peça de trabalho na força de: a) corte, b) avanço e c) passiva. $a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm/rev.