

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA

PRÁTICAS EM PROCESSOS DE FABRICAÇÃO MECÂNICA

PRÁTICA 2 – TORNO CNC

Prof. Dr. REGINALDO T. COELHO
Prof. Dr. JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA
Prof. Dr. ERALDO JANONNE DA SILVA

Fevereiro 2013

ÍNDICE

2.1 - A MÁQUINA	3
2.2 – FIXAÇÃO DAS PEÇAS EM TORNO CNC.....	8
2.3 – FERRAMENTAS.....	11
2.4 – OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO	14
2.5 – INTRODUÇÃO À PROGRAMAÇÃO CNC	17
2.5.1 – Segurança na Operação de Máquinas CNC	17
2.5.2 – Estrutura de um Programa CNC	18
2.5.3 – Cabeçalho de um programa CNC	19
2.5.4 – Funções preparatórias	19
2.5.5 – Recuo para posição segura (no início do programa)	19
2.5.6 - Movimentação de Trabalho e Execução de Todo o Serviço	19
2.5.7 - Recuo para Posição Segura (no final do programa)	20
2.5.8 - Fim do programa	20
2.5.9 - Blocos de Programa.....	20
2.5.10 - Introdução aos Comandos CNC	21
2.5.11 - Comandos Modais	23
2.5.12 - Comandos Não Modais	24
2.5.13 - Classificação dos comandos	24
2.6 – RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM TORNEAMENTO.	31
2.6.1 - Parâmetros para quantificação da rugosidade	32
2.6.2 – Cálculo teórico da Rugosidade no processo de torneamento	36
2.6.3 - Medição da rugosidade	37
2.6.4- Efeitos de alguns parâmetros de usinagem na rugosidade	39
2.7 - PRÁTICA: OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE TORNEAMENTO E DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL:.....	41

2.1 - A Máquina

O torno CNC – Comando Numérico Computadorizado, é assim chamado por ter seus movimentos e ações comandadas por um computador. O termo CNC vem da sua origem pela qual os comandos eram numericamente arranjados em uma sequência, muitas vezes simples e bastante rígidas (de difícil alteração). A máquina é, basicamente, um torno com as mesmas partes fundamentais de um torno universal e, ainda hoje se encontram máquinas universais convencionais às quais se adaptam CNCs. No entanto, a estrutura e o arranjo físico do torno sofreram atualizações e adaptações para desempenhar melhor suas funções com a adição do CNC. Atualmente, um torno CNC tem características básicas ainda similares às de um torno convencional, entretanto seu projeto é pensado de forma que possa operar automaticamente. Assim, as principais características desse tipo de máquina são:

- a) Os eixos de deslocamento da ferramenta, bem como seu eixo-árvore, são acionados por servo motores,
- b) A estrutura é desenhada de forma a permitir que os cavacos deixem facilmente a área de corte,
- c) Os sistemas de fixação de peças tem acionamentos automáticos,
- d) O sistema de fluido de usinagem dispõe de dispositivos especiais de forma a garantir, para cada sub-operação, que a ponta ativa da ferramenta seja atingida,
- e) As ferramentas são montadas em um sistema que permite a troca rápida e
- f) A operação é realizada por meio de programa elaborados em linguagem especialmente criada para isso e normalizada.

A Figura 2.1 mostra um exemplo típico de um torno CNC com algumas partes principais.



Figura 1 – Exemplo de um torno CNC com algumas partes fundamentais. Cortesia de Indústrias ROMI S.A..

Como o torno CNC pode trabalhar em velocidades mais altas que os convencionais e evoluíram para uma maior produtividade, a área de trabalho foi confinada minimizando riscos ao operador e ao meio ambiente. Contém, em geral, uma torre porta-ferramentas com capacidade para armazenar várias ferramentas, assim como um transportador de cavacos que os remove da área de corte para um depósito externo à carenagem da máquina. Frontalmente também se mostra o painel frontal do CNC que faz a interface home-máquina. Outro aspecto evolutivo dos tornos CNC é a sua estrutura que contém todos os itens de um torno convencionais, porém com arranjos físicos diferentes. A Figura 2.2 mostra um exemplo de estrutura de torno CNC.

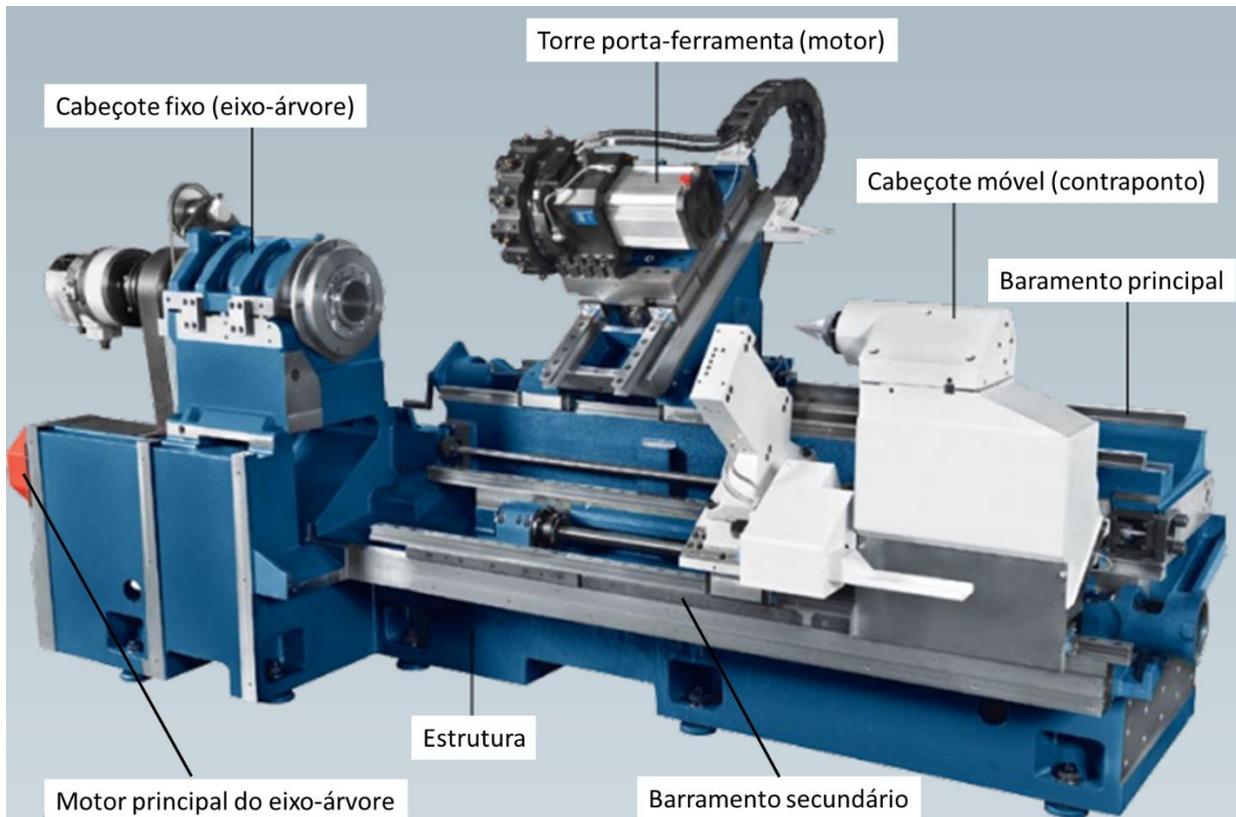


Figura 2.2 – Exemplo de Estrutura de um torno CNC com partes importantes. Cortesia de Indústrias ROMI S.A..

Nota-se, em comparação com um torno convencional que a estrutura sofreu atualizações significativas, como a disposição do barramento principal em relação ao eixo-árvore, a separação dos barramentos e a inclinação do carro transversal. No torno convencional há um alinhamento entre o eixo-árvore e os barramentos, o que é diferente na máquina CNC. Na máquina convencional o movimento do carro superior tem a mesma direção do carro principal, o que foi eliminado na máquina CNC havendo apenas o carro principal. Com essas e outras modificações o torno CNC pode trabalhar com maior rapidez e, portanto, maior produtividade, sem a necessidade da atuação do operador sobre os movimentos da máquina. A Figura 2.3 mostra alguns outros exemplos de arranjos físicos em estruturas de tornos CNC.

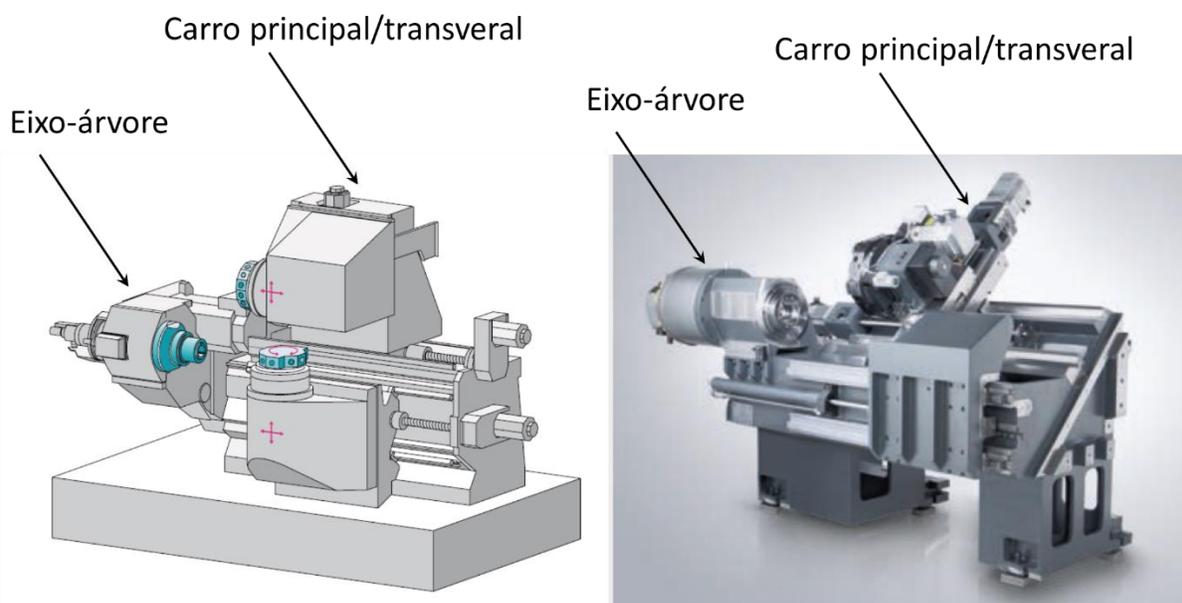


Figura 2.3 – Exemplos de outras estruturas de tornos CNC. Cortesia de Index Tornos Automáticos e Mori Seiki Co.

Atualmente são inúmeras as configurações de tornos CNC existentes no mercado. Configuram-se a estrutura, assim como a disposição dos carros e dos cabeçotes fixos e móveis. Há máquinas que ainda podem ser fornecidas com dois eixos-árvore que trabalham independentemente, ou sincronizados. Mesmo alguns fabricantes oferecem torno dotado de capacidade de fresamento com ferramentas acionadas na posição axial ou transversal. Tais máquinas são denominadas de centros de torno-fresamento, por exemplo. A Figura 2.4 mostra um exemplo de um torno com dois eixos-árvore e capacidade para fresamento.

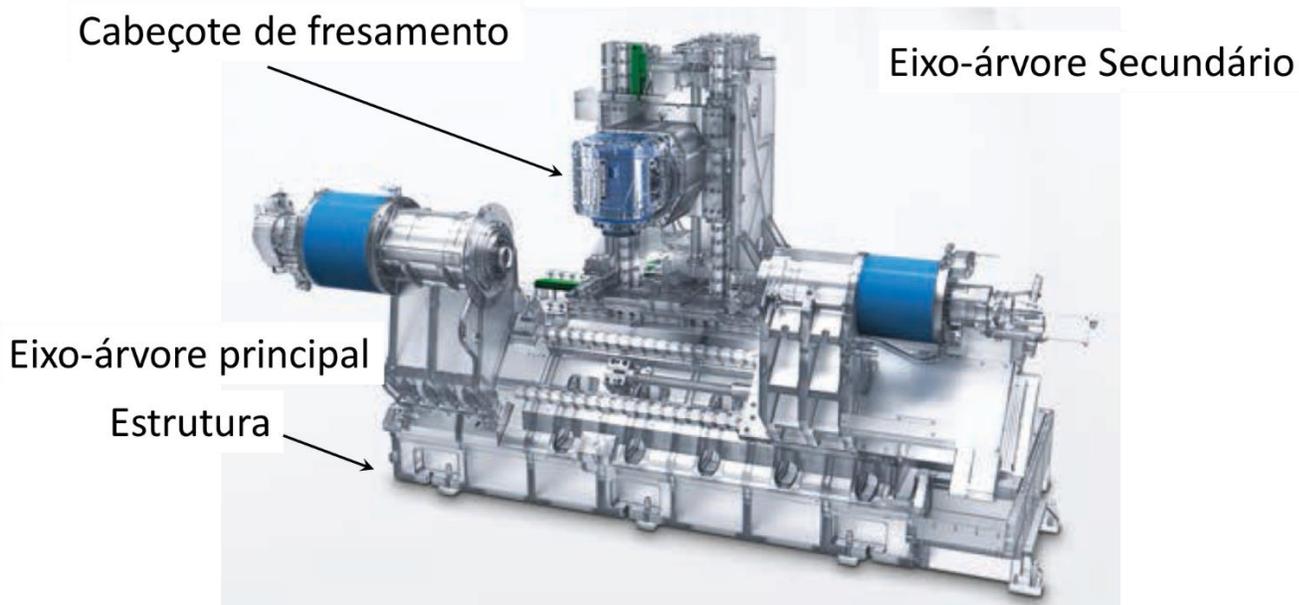


Figura 2.4 – Exemplo de um torno com dois eixos-árvore e capacidade de fresamento. Cortesia Mori Seiki Co.

Os tornos CNC também sofreram evolução nas guias, antes de deslizamento. Atualmente são dotadas de sapatas com elementos rolantes em todas as direções de movimento. Essas guias proporcionam menor atrito, contendo esferas ou rolos, o que possibilita movimentos em velocidades de avanço mais altas. A Figura 2.5 mostra exemplos dessas guias.

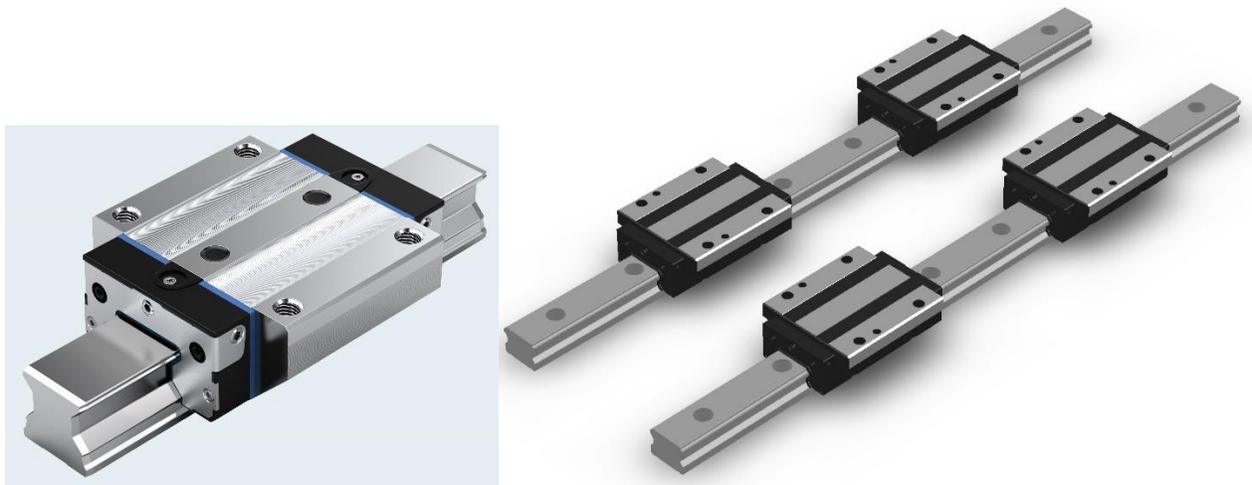


Figura 2.5 – Exemplos de guias de rolamento aplicadas em máquinas CNC.

Os acionamentos dos carros do torno, que em máquinas convencionais eram por meio de um parafuso com rosca perfil trapezoidal em uma porca de bronze, sem máquinas CNC contêm fusos com esferas recirculantes, contribuindo também para a redução do atrito e possibilitando maiores velocidades de acionamento. Máquinas CNC avançam com velocidade de até 80 m/min devido ao uso de guias e acionamentos com reduzido atrito, elevando a produtividade desses equipamentos a níveis nunca antes imaginados. A Figura 2.6 mostra exemplos desses fusos de esfera recirculantes.

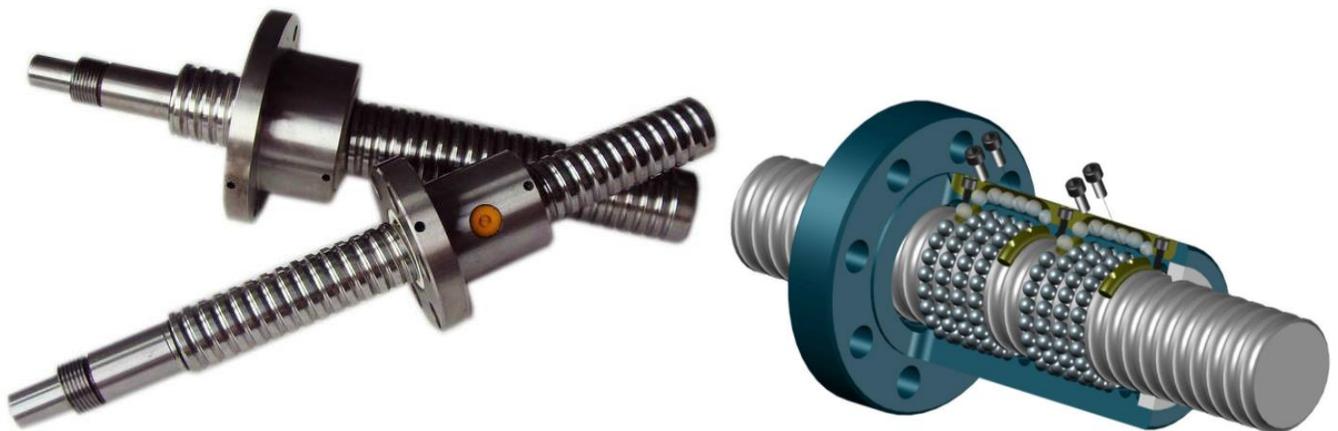


Figura 2.5 – Exemplo de fusos com esferas recirculantes para máquinas CNC.

2.2 – Fixação das peças em torno CNC

As peças em um torno CNC são fixadas de maneira muito semelhante à máquina convencional. Na sua maioria os tornos CNC usam placas de 3 castanhas com fechamento simultâneo, com a diferença que são placas com fechamento hidráulico automático. Raramente se usam placas de 4 castanhas uma vez que os tornos CNC objetivam o trabalho com peças em grandes lotes e não trabalhos individuais, os quais ainda são executados em tornos universais. As placas 3 castanhas hidráulicas, ou mesmo pneumáticas, são de operação automatizadas por um comando externo á carenagem da máquina, ou mesmo interligadas a um sistema automatizado de carga/descarga da máquina. Tal sistema proporciona oportunidade para maior produtividade e menores tempo de carga/descarga de tornos. A figura 2.6 mostra um exemplo desse tipo de placa.

Sistema de acionamento hidráulico

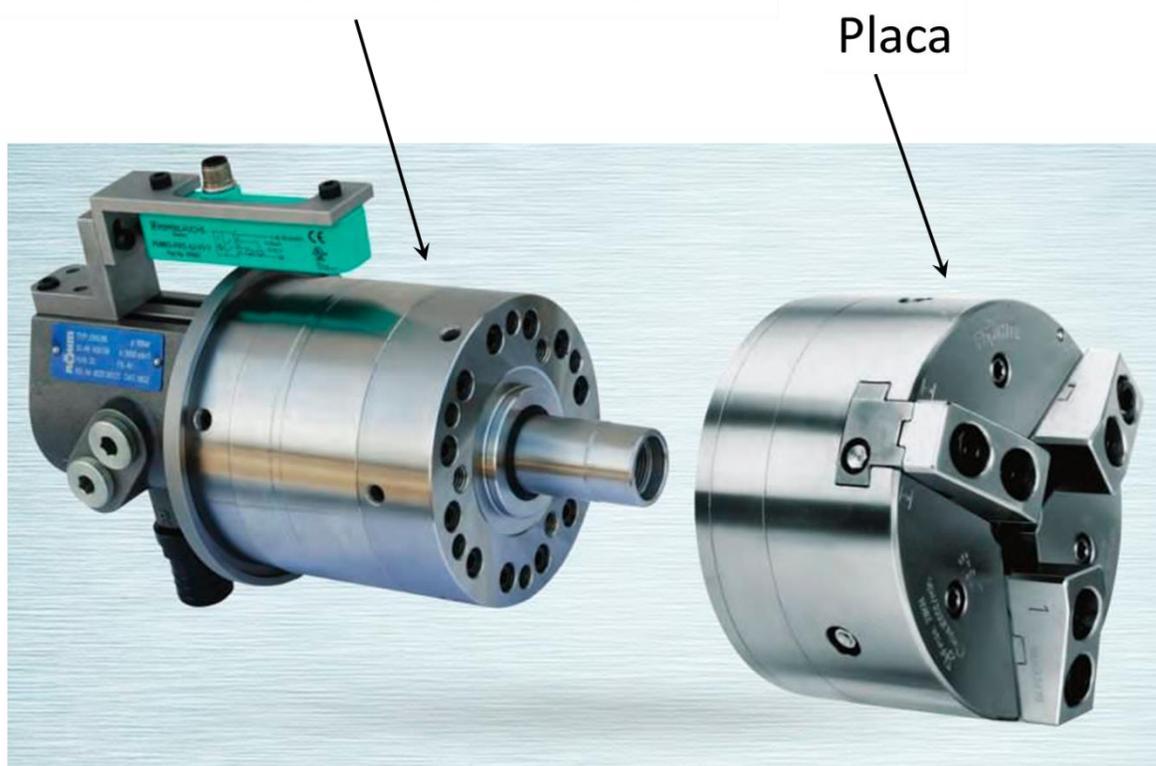


Figura 2.6 – Exemplo de placa de 3 castanhas acionamento hidráulico. Cortesia Rohm.

Peças mais esbeltas, ou que necessitam fixação mais rígida são também suportadas pelo contraponto, da mesma forma que em máquinas convencionais, com a diferença de que em tornos CNC o avanço do

contraponto é hidráulico, ou pneumático de forma automatizada. De maneira similar ao acionamento da placa, o contraponto também pode ser avançado/recuado por comando externo, ou por sistema automatizado de carga/descarga.

O acionamento hidráulico da placa não proporciona um curso muito longo de fechamento/abertura, assim quando se modifica muito o diâmetro das peças a serem fixadas, deve-se reposicionar manualmente as castanhas para que possam ser usadas. Isso facilita o torneamento de lotes grandes de peças com diâmetro de fixação muito próximos, mas dificulta a usinagem de peças diferentes. Assim, todas as vezes que se modificam as peças a serem torneadas e há a necessidade de modificação manual das castanhas, estas devem ser usinadas após a mudança, para reduzir o erro de batida nas peças.

Além das placas de 3 castanhas, o sistema de fixação de peças por pinça também é muito utilizado em tornos CNC. Este sistema limita mais ainda o diâmetro de fixação das peças a serem torneadas, pois o curso de fechamento/abertura de uma pinça é da ordem de 1 mm. No entanto, este sistema proporciona um erro de batida mínimo nas peças torneadas sendo o preferido em operações de acabamento. A Figura 2.7 ilustra um sistema de fixação por pinças para tornos CNC.



Figura 2.7 – Exemplos de sistemas de fixação por pinças para tornos CNC.

Além desses, outros sistemas de fixação podem ser encontrados, mas em geral todos têm em comum o fato de serem automatizados, uma vez que o torno CNC é direcionado a grandes lotes de peças, onde se busca uma alta produtividade.

Para sistemas produtivos onde os lotes de peças são volumosos e as peças podem ser fabricadas a partir de matéria-prima em barras, os tornos podem conter um sistema de alimentação automática chamado

“alimentador de barras”. O alimentador de barras é constituído de um sistema que mantém a barra apta a girar e tem capacidade de empurrá-la através do eixo-árvore passando por dentro do sistema de fixação (placa ou pinças, por exemplo). Normalmente o alimentador de barras é montado do lado externo do cabeçote fixo, no mesmo alinhamento do eixo árvore da máquina. Com este sistema inteiramente automatizado o operador carrega o alimentador com várias barras e o sistema trabalha por longo tempo sem interferência humana, torneando peças. A Figura 2.8 mostra exemplos de alimentadores de barras.



Figura 2.8 – Alimentador de barras acoplado a um torno CNC

Quando a alimentação não pode ser realizada a partir de barras, mas deve ser com partes discretas, pode-se automatizar o sistema com alimentadores mecânicos, ou mesmo braços robóticos, como ilustrado na Figura 2.9.



Figura 2.9 – Sistemas de alimentação de peças usando braço robótico

2.3 – Ferramentas

As ferramentas de torno CNC devem ser sempre do tipo insertos indexáveis montadas em suportes próprios para cada modelo de torno. Há normas que padronizam os suportes, assim como o tipo de fixação na torre dos tornos. A Figura 2.10 mostra diversos exemplos de insertos para torneamento.

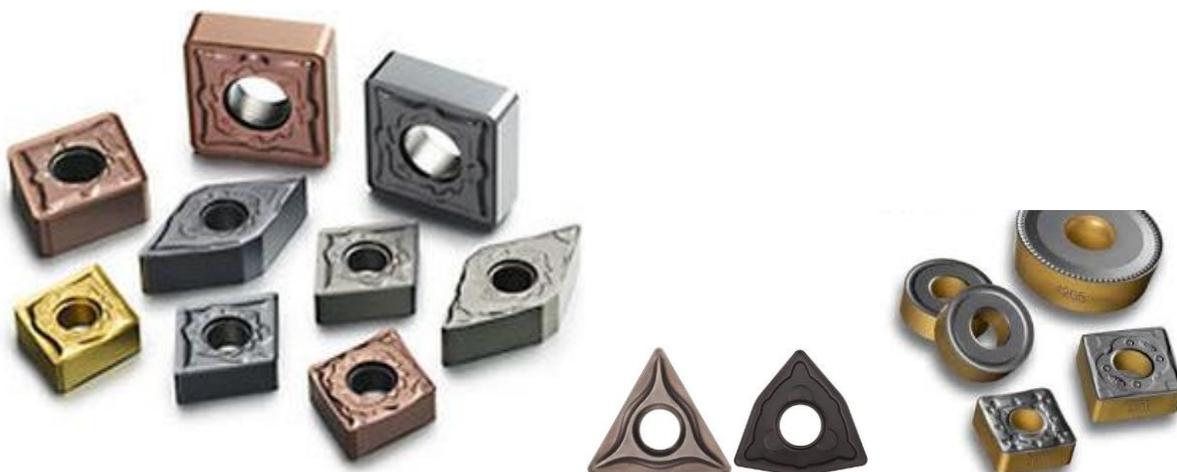


Figura 2.10 – Exemplos de insertos em diversos formatos para torneamento. Cortesia Sandvik Coromant Brasil.

Os insertos são comercializados em diversos formatos sendo os mais comuns mostrados na Figura 2,8, quadrados, triangulares, losangulares e redondos, além formatos específicos para aplicações particulares. Cada formato tem aplicações específicas em termos de acessibilidade e resistência mecânica. As arestas de

Os cortes desses inserts têm geometrias especiais destinadas a controlar o formato dos cavacos produzidos, minimizar os esforços de corte e a rugosidade superficial, prolongando a vida das ferramentas ao máximo. Os inserts são montados em porta-ferramentas os quais são também padronizados. A Figura 2.11 mostra alguns exemplos de suportes para ferramentas de torneamento.



Figura 2.11 – Exemplos de diversos porta-ferramentas para torno CNC.

Cada formato de inserto tem o modelo de porta-ferramentas adequado e dentre esses haverá aquele com os ângulos mais adequados para as operações a serem executadas. Por exemplo, para o inserto triangular há porta-ferramentas com o ângulo de posição 90° para torneamento cilíndrico externo e 90° para torneamento de faceamento, como mostrado na Figura 2.12.



Figura 2.12 – Porta-ferramentas para inserto triangular com diferentes disposições.

O sistema de fixação dos insertos nos porta-ferramentas também pode variar, conforme as exigências de esforço e de precisão dimensional. Em geral, usa-se um calço sob o inserto, também fabricado em metal duro (Figura 2.13), porém com dureza e especificações menos exigentes do que os insertos. A fixação deve ser capaz de prender o inserto firmemente contra o porta-ferramentas de forma a mantê-lo sempre localizado na mesma posição, uma vez que na sua substituição a mesma dimensão deve ser usinada, a fim de não perder a precisão do processo. A Figura 2.13 mostra alguns exemplos de sistemas de fixação para os insertos no porta-ferramentas.

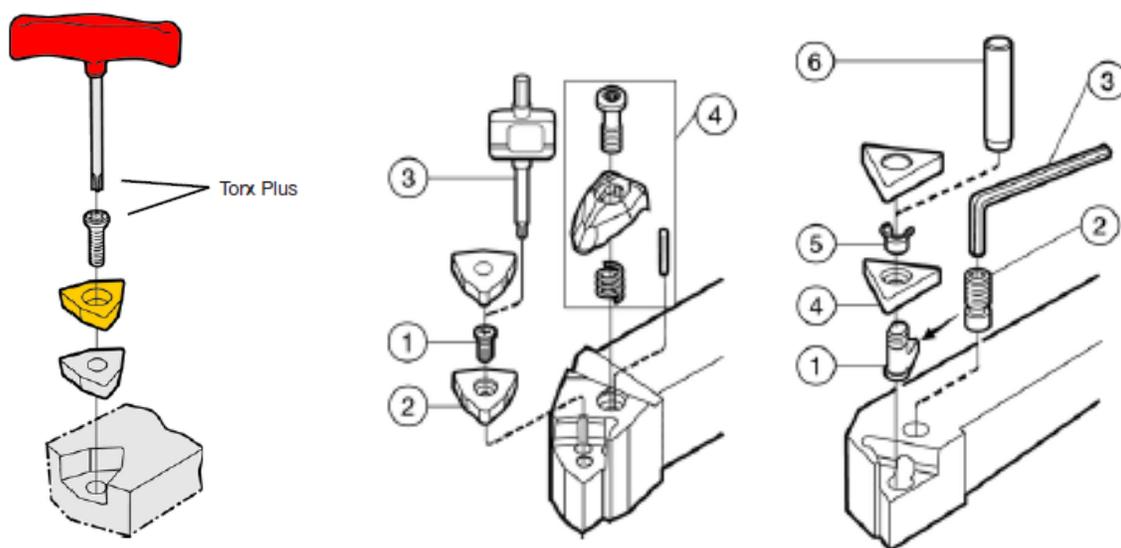


Figura 2.13 – Exemplos de sistemas de fixação para os insertos no porta-ferramentas.

Assim, nota-se que os insertos devem ser corretamente fixados aos porta-ferramentas para garantir o correto posicionamento e firmeza necessários para manter a precisão dimensional esperada de um torno CNC.

Após a fixação do inserto ao porta-ferramentas este ainda se instala em um suporte que se fixa à torre de ferramentas do torno CNC. Esses suportes também obedecem padrões segundo o tipo e origem da máquina-ferramenta. Dentre esses os mais comuns são o VDI e Capto™, mostrados na Figura 2.14.



Figura 2.14 - Sistemas de fixação dos porta-ferramentas na torre do torno CNC.

2.4 – Operações de torneamento

As operações realizadas em um torno CNC não se diferem muito daquelas executadas em um torno convencional, já mencionadas na parte I desse texto. No entanto, reservam-se aos tornos CNC as operações com perfis complexos, ou repetitivas, no intuito de conferir maior produtividade. Por exemplo, um perfil esférico demandaria grande habilidade de um operador e um longo tempo de ciclo em um torno convencional. Pelo contrário em um torno CNC somente poucas linhas de comando seriam necessárias e o resultado seria muito melhor em termos de qualidade e precisão dimensional. Ainda ressalta-se que o tempo de preparação dessa mesma operação em um torno convencional seria muito menor do que em um torno CNC, o que indica que para usinar apenas uma peça, o tempo total, incluindo a preparação seria maior em um torno CNC, portanto o custo pode ser maior.

De modo geral, pode-se afirmar que o torno CNC e o convencional podem, em tese, realizar as mesmas operações, porém deve-se levar em conta o tempo de preparação para a máquina CNC e a habilidade do operador em uma máquina convencional, como limitantes no uso de cada uma dessas modalidades de torno. Também pode-se executar operações de fresamento e furação fora de centro em torno CNC, o que não se recomenda tentar em tornos convencionais. A Figura 2.15 ilustra, de modo geral, as operações mais comuns em um torno CNC.

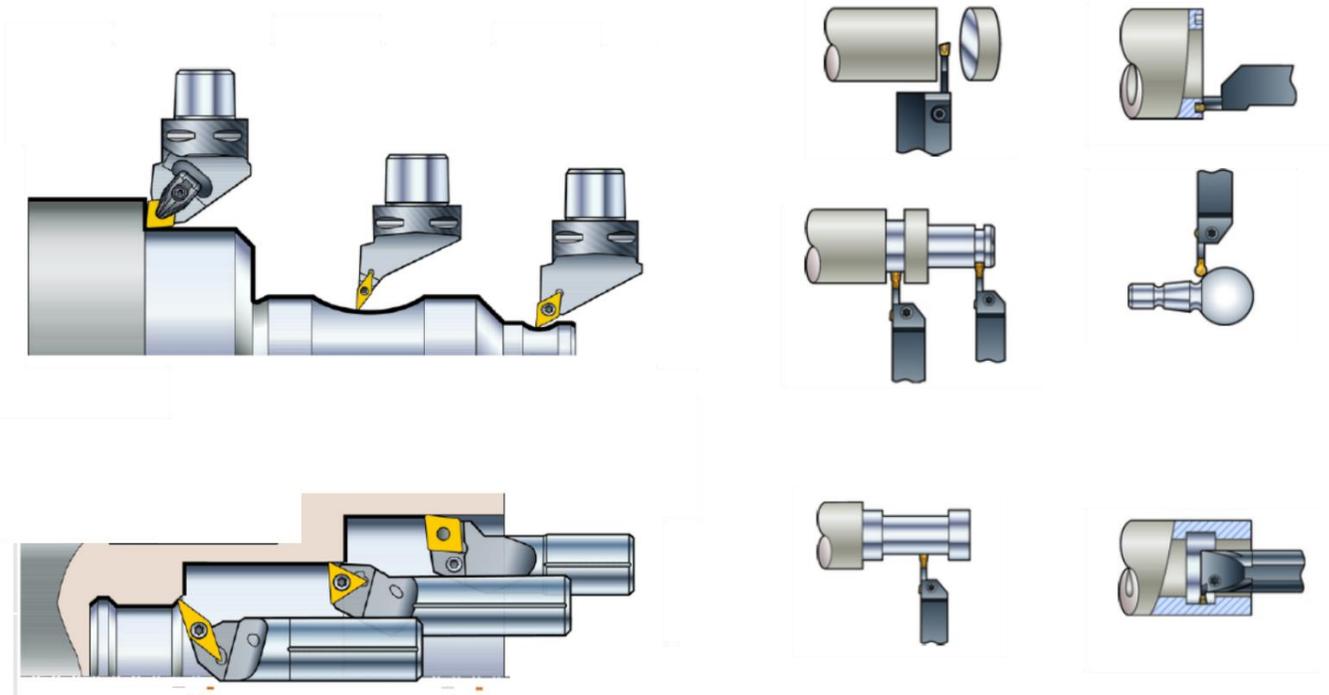


Figura 2.15 – Alguns exemplos de operações mais comuns em tornos CNC. Cortesia Sandvik.

O uso de fluidos de corte em máquinas CNC também tem sido muito comum embora as demandas por adequação ambiental dos processos de usinagem criem uma tendência à limitação desse recurso. Pelo fato dos tornos CNC confinarem a área de trabalho o uso de fluido é facilitado e a abundância desse insumo na área de trabalho facilita a operação de torneamento de desbaste principalmente, na qual a geração de calor é intensa. Porta-ferramentas contendo canais internos oferecem a melhor oportunidade de aplicação de fluido em abundância na região de formação de cavacos, conforme mostrado na Figura 2.16.

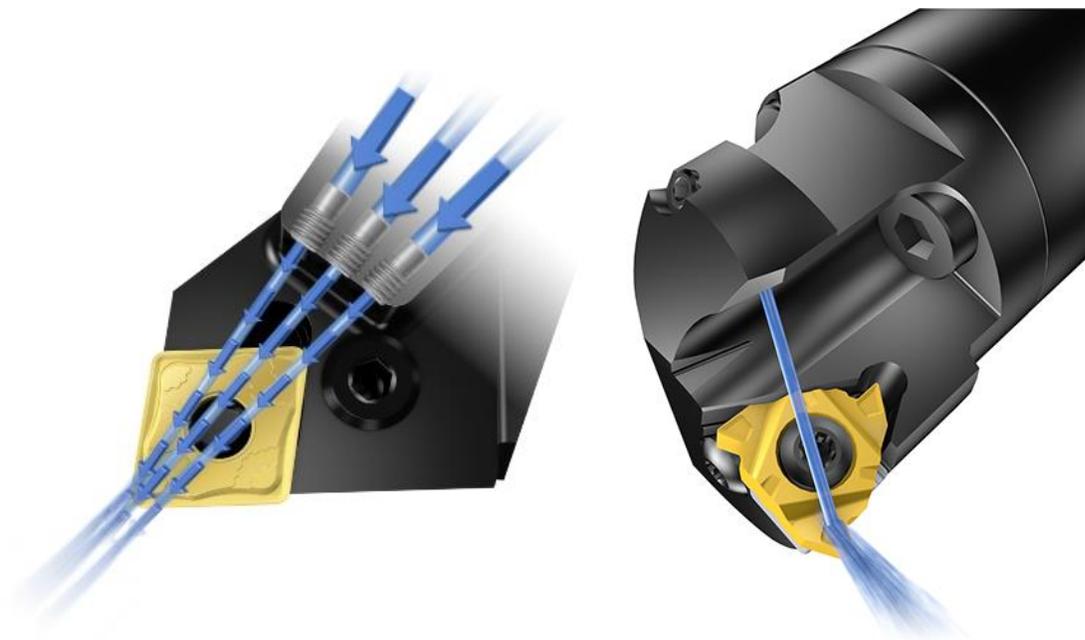


Figura 2.16 – Aplicação de fluidos de corte em abundância na região de formação de cavacos.

Para minimizar o uso de fluidos de corte sistemas do tipo MQF – Mínima quantidade de Fluido, tem sido empregados. Nestes sistemas um fluxo de ar comprimido, o qual arrasta pequenas quantidades de óleo, é direcionado à região de formação de cavacos. Em geral, os sistemas MQF utilizam carga de 20-60 ml de fluido por hora, enquanto os sistemas de fluido em abundância, gastem cerca de 20-50 l por minuto. A Figura 2.17 ilustra um sistema desse em ação.



Figura 2.17 – Exemplo de um sistema MQF- mínima quantidade de fluido para torneamento.

2.5 – Introdução à Programação CNC

Este trecho do texto pretende iniciar o leitor na programação CNC, com conceitos muito básicos e gerais para a programação de uma máquina. A elaboração de um programa CNC é uma tarefa complexa que envolve conceitos de programação, geometria, conhecimentos básicos de matemática, além um significativo conhecimento da teoria de usinagem dos metais. Antes de lançar comandos em uma máquina, usando a interface homem-máquina, deve-se planejar previamente as operações de usinagem, estipulando as ferramentas e conhecer as particularidades de cada conjunto máquina-ferramenta e CNC. Os CNCs são fabricados por diferentes empresas, as quais oferecem ligeiras diferenciações entre si, requerendo do programador conhecimentos específicos de cada fabricante, além dos conhecimentos comuns a todos equipamentos. Na elaboração do programa o programador deve sempre ter em mente a segurança do operador, do equipamento e do meio ambiente.

Outro ponto a ser lembrado é que esse trecho de texto se destina à programação direta do CNC “ao pé da máquina” e não a programação por meio de programas CAM (Computer Aided Machining). Nestes casos, definem as estratégias de usinagem e o programa CAM gera o programa CNC com os blocos e a maioria das instruções. Quando a sequência de usinagem demanda movimentos de geometria complexa somente um programa CAM é capaz de produzir o programa CNC. Nos casos de operações simples a programação manual ainda é insubstituível.

2.5.1 – Segurança na Operação de Máquinas CNC

Máquinas CNC estão atualmente presentes em todas indústrias modernas e são o principal meio de produção. São máquinas rápidas, com movimentos de cerca de 25-80 m/min (equivalente a 500 mm/s), potências da ordem de 20 a 30 kW no eixo-árvore. Desta forma, a operação deste tipo de equipamento oferece alto risco de acidentes e, em geral com consequências muito graves ao operador e ao próprio equipamento, cujo custo é elevado. A operação segura de máquinas CNC passa por diversas precauções que começam com o programador. Já na elaboração de um programa CNC, o programador deve se preocupar com a segurança, adotando uma sequência de programa que leve em conta este aspecto. Algumas precauções estão listadas abaixo e devem ser seguidas, como forma de minimizar as possibilidades de acidente:

1 –ESTABELEECER A SEQÜÊNCIA DE USINAGEM ANTES DE INICIAR A ELABORAÇÃO DO PROGRAMA;

- 2 – ESTABELECEM QUAS SERÃO AS FUNÇÕES PREPARATÓRIAS ANTES DE INICIAR OS BLOCOS DE MOVIMENTAÇÃO DOS EIXOS**
- 3 – O PRIMEIRO MOVIMENTO DEVE RECUAR A FERRAMENTA PARA UMA POSIÇÃO SEGURA, LONGE DA PLACA, OU DA PEÇA.**
- 4 – TER O PROGRAMA REVISADO ANTES DE IMPLANTAR-LO NA MÁQUINA;**
- 5 – SEMPRE TESTAR O PROGRAMA PELA PRIMEIRA VEZ EM AVANÇOS LENTOS (SEM MOVIMENTAÇÃO RÁPIDA AUTOMÁTICA)**
- 6 – A CADA NOVA MODIFICAÇÃO QUE ENVOLVA MUDANÇA DE TRAJETÓRIA, VELOCIDADE OU AVANÇO, O PROGRAMA DEVE SER NOVAMENTE TESTADO EM VELOCIDADE REDUZIDA E MODO DE SEGURANÇA.**
- 7 – OTIMIZAR O PROGRAMA SOMENTE DEPOIS DE TESTADO E NÃO MODIFICAR NOVAMENTE LINHAS DE MUDANÇA DE TRAJETÓRIA, VELOCIDADE OU AVANÇO.**

2.5.2 – Estrutura de um Programa CNC

Uma programação segura e eficiente deve seguir sempre um método padrão que, de maneira geral, compreende a seguinte estrutura:

Cabeçalho

Funções preparatórias

Reco para posição segura (no início do programa)

Posicionamento para trabalho

Movimentação de trabalho e execução de todo o serviço

Reco para posição segura (no final do programa)

Fim do programa

Esta sequência abrange a grande maioria dos programas a serem executados e cada item será detalhado abaixo. O programa é composto de linhas de programação, comumente chamado de bloco de programa. Em um bloco estão contidos os comandos, que são instruções a serem interpretadas pelo CNC. Estas instruções podem ser um comando para ligar, ou desligar, o eixo-árvore, ligar, ou desligar, o fluido refrigerante, executar um movimento rápido em vazio para posicionamento, executar um movimento de corte, segundo uma trajetória linear ou curva, desviar o fluxo de programa para uma subrotina, etc. Dentro do CNC há uma unidade que “interpreta” os comandos, que são instruções, como que traduzindo a linguagem CNC para comandos elétricos que vão acionar as partes mecânicas da máquina. Este interpretador só é capaz de entender determinadas palavras, e são estas que devem ser dominadas pelo programador.

2.5.3 – Cabeçalho de um programa CNC

No cabeçalho de um programa CNC devem estar as informações gerais que possibilitem ao leitor, no futuro, saber qual a finalidade do programa, quais os pontos principais da sequência de usinagem adotada, quais as possíveis variáveis usadas e os seus valores iniciais, etc. O cabeçalho será o elo de ligação entre o autor do programa e outro profissional que venha a usá-lo no futuro e, o próprio autor em um futuro mais distante. O cabeçalho, desta forma é a documentação resumida do programa CNC, que também deve contar com outros documentos que descrevam a sequência e a estratégia de usinagem com mais detalhes. Esta parte do programa não será executada e cada linha deve iniciar-se com um caractere próprio para evitar a interpretação do bloco pelo CNC.

2.5.4 – Funções preparatórias

Este trecho do programa deve conter as funções gerais que serão usadas por todo o decorrer do programa, ou na primeira parte do mesmo. É composto de funções modais tais como: definir sistema de medição (se é métrico ou inglês), unidade de medida do avanço (se mm/rev ou mm/min), definir sistema de coordenadas (se absoluto ou incremental), etc.. Neste trecho do programa o programador deve preocupar-se em visualizar o programa e a sequência de usinagem como um todo.

2.5.5 – Recuo para posição segura (no início do programa)

Este trecho do programa já compreende a movimentação dos eixos da máquina e requer, portanto a máxima atenção. Recomenda-se que nessa primeira instrução de movimentação, cada eixo seja movimentado individualmente. No caso de tornos, por exemplo, o eixo X deve ser o primeiro a ser movimentado como forma de afastar a ferramenta evitando uma possível colisão. Isso, no entanto, por si só, não garante a total segurança se a ferramenta estava executando um torneamento interno ou uma furação. Dessa forma, muita atenção deve ser empregada. De forma geral, recomenda-se que em tornos e retificadoras cilíndricas o primeiro movimento seja de recuo do eixo X e em centros de usinagem o recuo do eixo Z.

2.5.6 - Movimentação de Trabalho e Execução de Todo o Serviço

Essa parte do programa compreende toda movimentação necessária à execução de um serviço com a máquina. Nesse trecho a máquina estará totalmente sob o comando das instruções contidas nos blocos de programa. Nessa parte são chamadas subrotinas, subprogramas, instruções de medição e de segurança contra, por exemplo, sobrecarga, mudanças de ferramentas de trabalho, etc. Há casos em que um lote de peças deve ser fabricado usando-se chamadas consecutivas de subprogramas para contagem de peças e nesse caso a execução do programa só termina após a fabricação de um determinado número de peças. O estudo de programação CNC compreende, basicamente, a elaboração dessa parte do programa, que será o objeto central desse trecho do texto.

2.5.7 - Recuo para Posição Segura (no final do programa)

Assim como o recuo inicial da ferramenta para uma posição segura, após terminada a usinagem e as operações de serviço a ferramenta deve ser recuada para uma posição segura, para descarga da peça, quer seja manual ou através de manipulador ou robô. Essa posição segura é muito relativa pois em produções seriadas, onde os tempos de ciclo devem ser os menores possíveis, a posição de recuo pode não ser muito longe da área de trabalho. Isso é perfeitamente compreensível, desde que o programador e operadores sejam experientes e a segurança pessoal e da máquina não sejam comprometidas.

2.5.8 - Fim do programa

Após todas as etapas acima o fim do programa deve ser informado à máquina para que todas as variáveis sejam novamente iniciadas. Isso é primordial em máquinas que possuem variáveis em memória durante toda a execução do programa. Há casos em que se a instrução de fim de programa não é informada, programas futuros podem ter comportamentos inesperados, devido ao fato de certas variáveis ainda guardarem valores assumidos em programas anteriores não finalizados devidamente. Isso pode ser a causa de acidentes devido ao comportamento "estranho" da máquina.

2.5.9 - Blocos de Programa

Um bloco de programa é um conjunto de instruções que podem ser processadas, aparentemente, simultaneamente pela máquina. Podem ser instruções de movimentação, comandos de ligação de refrigerante, velocidade de corte ou rotação de eixo-árvore, etc. Há comandos que não podem ser colocados na mesma linha (mesmo bloco), devido a conflitos do tipo multiplicidade de comando. Isso se dá, por

exemplo, se dois comandos de movimentação são colocados na mesma linha. O início de um bloco é marcado pelo número da linha, em geral um "N" seguido de um número sequencial. Exemplo:

N10 G....

N20 G.... M...

O bloco de comando só termina com a entrada de uma determinada tecla, "ENTER", "FIM", "INPUT" etc. Com essa tecla a linha é automaticamente inserida na memória do CNC e passa a fazer parte do programa, assim que ele for executado. Na maioria dos CNCs a edição ou modificação de um programa é feita diretamente no programa armazenado na memória e qualquer modificação será imediatamente executada. Dessa forma, recomenda-se a máxima atenção para a modificação de algum programa ou mesmo parâmetros de corte, durante o ciclo de trabalho. Alguns CNCs são muito rigorosos quanto à posição do ponto decimal e, a falta de atenção ou inexperiência de alguns programadores e operadores, pode levar a acidentes graves devido à modificação de programas já testados. Por exemplo, um comando:

N100 G0 X30 F100

Pode ser interpretado como um deslocamento para a posição $X = 0.030$ mm quando na realidade o comando correto seria:

N100 G0 X30.0 F100

que levaria a ferramenta para a posição $X = 30.00$ mm.

2.5.10 - Introdução aos Comandos CNC

Um programa CNC é formado por um conjunto de instruções, ou códigos, que em geral tem o seguinte aspecto:

Peça23

N10 G71 G90 G94

N20 G01 G53 X300 Z360 F1000

N30

N40

N50 M4 S1000

N60 TRANS Z303.0

N70 LIMS=3000 G96 S120

N80 T1 D1

N90 G00 X42.0 Z1.0

N100 G01 X38.0 F1.0

N110 Z-44.0 F0.5

N120 X40.0

N130 G00 Z1.0

N140 G01 X36.5 F1.0

N150 Z-44.0 F0.5

N160 X38

N170 G00 Z1.0

N180 G01 X34.5 F1

N190 Z-32.5 F0.5

N200 X34.0

N210 G00 Z1.0

N220 G01 X32.5 F1.0

N230 Z-31.5 F0.5

N240 X33.0

N250 G00 Z1.0

N260 G01 X30.5 F1.0

N270 Z-30.5 F0.5

N280 X31.0

N300 G00 Z1.0

N310 G01 X29.5 F1.0

N320 Z-29.5 F0.5

N330 X31.0

N340 G00 Z1.0

N350 G01 X27.5 F1.0

N360 Z-8.5 F0.5

N370 X28.0

N380 G00 Z1.0

N390 G01 X25.5 F1.0

N400 Z-8.0 F0.5

N410 X27.0

N420 G00 Z1.0

N430 G00 G53 X150.0 Z360.0

N440 T1 D1

N450 M4 S2000
N460 G96 S120
N465 LIMS=3000
N470 G00 X26 Z0
N480 G01 X23 F0.5
N490 X25 Z-1 F0.2
N500 Z-8
N505
N510 G02 X27 Z-10 CR=2.0
N520 G01 Z-29.5
N530 X36.0 Z-33.0
N540 Z-44.0
N550 G00 G53 X150 Z360 M9
N560 M5
N570 G4 F2
N580
N590
N600 M30

No decorrer do texto todas essas linhas serão mais bem entendidas. Alguns comandos devem aparecer em todas os blocos para sua devida atuação, enquanto que outros tem caráter de atuação permanente. Os primeiros são chamados COMANDOS NÃO MODAIS enquanto os segundos são os COMANDOS MODAIS.

2.5.11 - Comandos Modais

São comandos que, uma vez escritos e executados, permanecem atuando até sua desativação ou término do programa, mesmo que a máquina passe a executar os blocos de programa seguintes. Isso porque depois de escritos e executados são transferidos para a memória do CNC. Há comandos modais que atuam em pares compreendendo os de ativação aos quais estão associados os de desativação.

Exemplos de comandos modais

M03 = Liga eixo árvore (sentido horário)

M05 = Desliga eixo árvore

G01 = Movimentação em interpolação linear com avanço programado

G00 = Movimentação rápida

2.5.12 - Comandos Não Modais

São comandos que atuam somente dentro do bloco onde são escritos. Toda vez que sua atuação é requerida devem serem escritos.

Exemplos de comandos não modais:

G02 = Interpolação circular – sentido horário

G03 = Interpolação circular – sentido anti-horário

G53 = Inibição de deslocamento de origem

2.5.13 - Classificação dos comandos

Os comandos CNC podem ser classificados em cinco grupos distintos: Comandos sequenciais, de posicionamento, complementares, preparatórios e miscelâneos.

Os comandos sequenciais, ou instruções são aqueles que determinam a ordem de execução do programa CNC. Em geral, o programa é executado na mesma ordem que é escrito e a ordem dos números que compõem os comandos sequenciais serve mais para a organização do programador. Há casos, porém, de CNCs que permitem desvios no fluxo do programa com instruções do tipo "GOTO", de retorno ou "jumps".

Por exemplo:

N10 G53 G1 X300 Z300 F1000

N15 G90 G95 G71

N18 M4 S500

N20 LIMS=(R05)

N22 G96 S=(R01)

N23 T05 D1

N24 TRANS Z219.575

N25 R04=0

N26 R06=0

INICIO: X130 Z5 F5

Início do bloco para repetições.

N50 G1 X56 Z1 F5

N60 X55.7 F0.5

```

N70 Z-34 F=(R02)
N75 X56 F1
N80 X130 Z50 F5
N83 T07 D1
N90 G1 Z-10 F20
N92 G96 S80
N95 X56.0 F2
N96 MEAS=1 G1 X55.6 F10
N97 R11=$AA_MM[X]
N98 R12=55.7-(2*(R11-74.317))
N99 IF R12<0 GOTOF FINAL
N100 R04 = R04+1
N102 G1 X130 Z50
N103 T05 D1
N104 M0
N110 GOTOB INICIO
FINAL: G1 X130 F1
N120 G1 Z5
N122 M5
N125 R06=1
N130 M30

```

Depois de um passe de usinagem verifica-se o valor do parâmetro R12 se o mesmo for maior (<) que 0 o comando **GOTOF** retorna ao início do bloco programado até que este seja menor 0.

Essas instruções permitem a execução de trechos de programa várias vezes. Há também os casos de comandos para chamadas de sub-rotinas, que desviam o fluxo de programa para as sub-rotinas e retornam para a linha imediatamente seguinte. Exemplo:

Torno Index

```

N10 G53 G1 X300 Z560 F1000
MSG ("REFERENCIANDO")
N20 G90 G94
N30 M8
N40 TRANS Z260

```

N45 L1200 P50

N48 G53 G1 X300 Z560 F1000 M9

N50 M30

CNCs mais modernos aceitam que o bloco de programa seja "batizado" com um nome qualquer (label) de modo que a instrução GOTO contenha esse nome para facilitar a programação e edição de um programa.

Exemplo:

N5 R10=0

N8 G53 G1 X150.0 Z300.0 F2000

VLT: G53 G1 X150.0 Z300.0 F2.0 **Label (início do bloco)**

N10 M5

N15 G4 F2

N20 M3 S2000

N25 LIMS=3000

N30 G96 S200

N40 M08 G4 F2

N50 G3 X150.0 Z450.0 CR=150.0 F5.0

M60 G1 X200.0 Z350.0 F5.0

N70 G1 X50.0 F1.0

N80 G2 X300.0 Z400 CR=100.0 F100

N90 G2 X50.0 Z350 CR=100.0 F5.0

N100 M5

N110 G4 F2

N120 M4 S1000

N130 G4 F2

N135 R10=R10+1

N140 IF R10<30 GOTOB VLT **GOTOB (voltar para o início)**

N150 M30

Os comandos de posicionamento são os que definem, basicamente, a geometria da peça, pois a cada bloco de programa deve-se indicar para onde se mover a ponta da ferramenta. Exemplo:

N100 G01 X80 Z200 F10 Move a ponta da ferramenta, em interpolação linear para X80 e Z200.
 N120 G02 X1.0 R2.0 F0.3 Move a ponta da ferramenta em interpolação circular sentido horário.

Para a movimentação da ferramenta há que se estabelecer o sistema de referência em relação ao qual se medem todos deslocamentos. Do ponto de vista da programação CNC, o sistema de coordenadas pode ser definido como um referencial (ponto zero) em relação ao qual todas as dimensões são programadas. As máquinas CNC possuem um “Sistema de Coordenadas Absolutas (SCA)”, em relação ao qual todas as dimensões são tomadas, logo que a máquina é ligada e referenciada. Este é também conhecido no chão-de-fábrica como o “Zero-Máquina (ZM)”. Por convenção, os eixos de movimentação de uma máquina CNC obedecem ao um sistema ortogonal positivo, isto é, 3 eixos são perpendiculares entre si com a sequência X, Y, Z segundo a regra da mão direita conforme Figura 2.18.

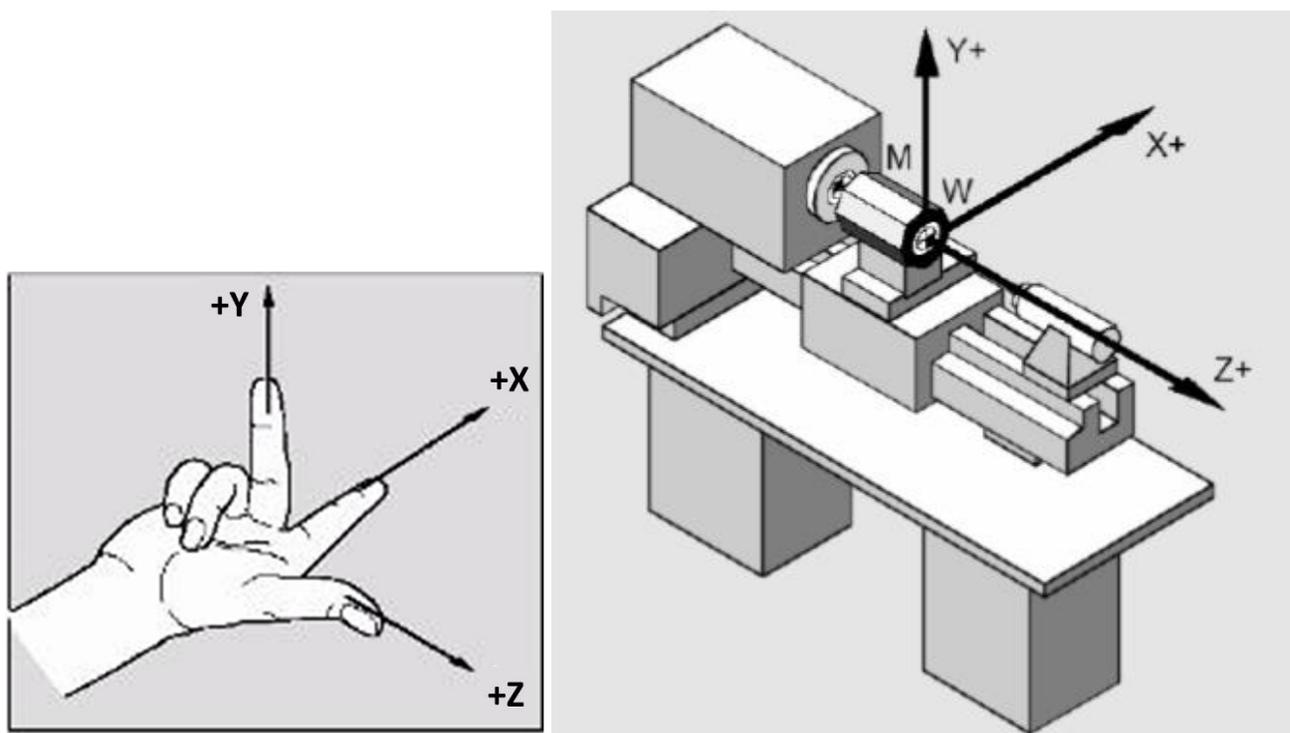


Figura 2.18 – Eixos de referência de um torno CNC.

Outra convenção também adotada para os eixos de uma máquina CNC é que o eixo-árvore sempre se alinha com o eixo Z. Para o torno, geralmente a origem deste sistema está em um ponto localizado no cruzamento entre a linha de centro do eixo-árvore e a face de encosto da placa, ou a face do “nariz” da máquina. Em outras máquinas, retificadoras, centros de usinagem isto pode variar e às vezes pode ser estabelecido pelo usuário, embora estes recursos fiquem restritos a profissionais que conhecem a máquina e seu sistema com

maior profundidade. A figura 2.19 mostra uma ilustração de um sistema de coordenadas absolutas típico de um torno.

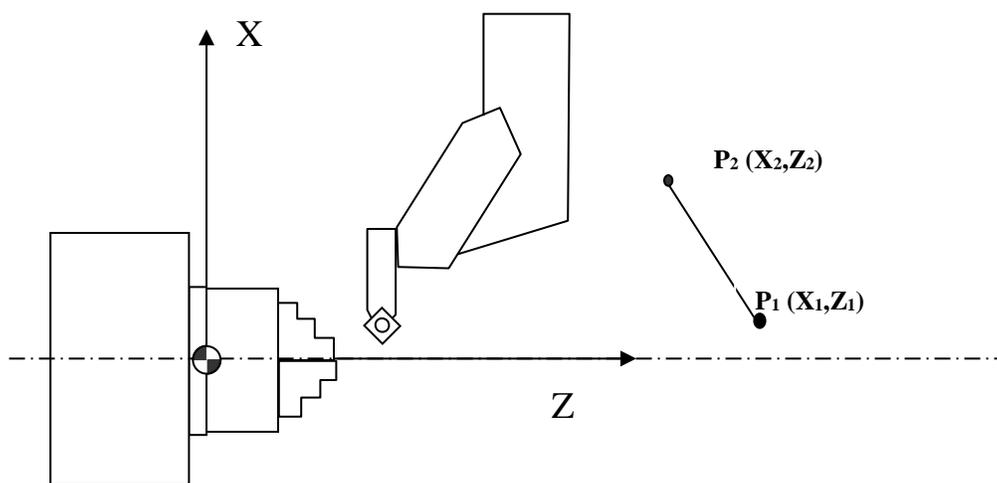


Figura 2.19 – Exemplo de um sistema de coordenadas típico de um torno.

O sentido do sistema de coordenadas é estabelecido de forma que as coordenadas aumentam no sentido de afastar a ferramenta da peça, o que muitas vezes evita acidentes que poderiam ser causados por um sinal negativo errado no programa CNC. Isto, porém, não é evitado se o torno executa uma operação de torneamento interno.

Outro sistema de coordenadas é estabelecido pelo programador, por meio de comandos no programa CNC. Este é o chamado “Sistema de Coordenadas da Peça (SCP)”, ou seja, é um sistema cuja origem está colocada na peça a ser usinada. Como as cotas de qualquer componente mecânico são estabelecidas em relação a um ponto da própria peça, o programador pode fazer deste ponto a origem de um sistema de coordenadas para a peça durante a usinagem, usando determinados comandos da linguagem CNC. Este é comumente conhecido como “Zero-Peça”. A origem deste sistema pode ser colocada em qualquer ponto dentro do espaço de trabalho da máquina. Dependendo da necessidade, diversos pontos de zero-peça podem ser estabelecidos no espaço de trabalho, como por exemplo, a Figura 2.20 ilustra um caso no qual a origem do sistema de referência da peça se situa na face externa da peça.

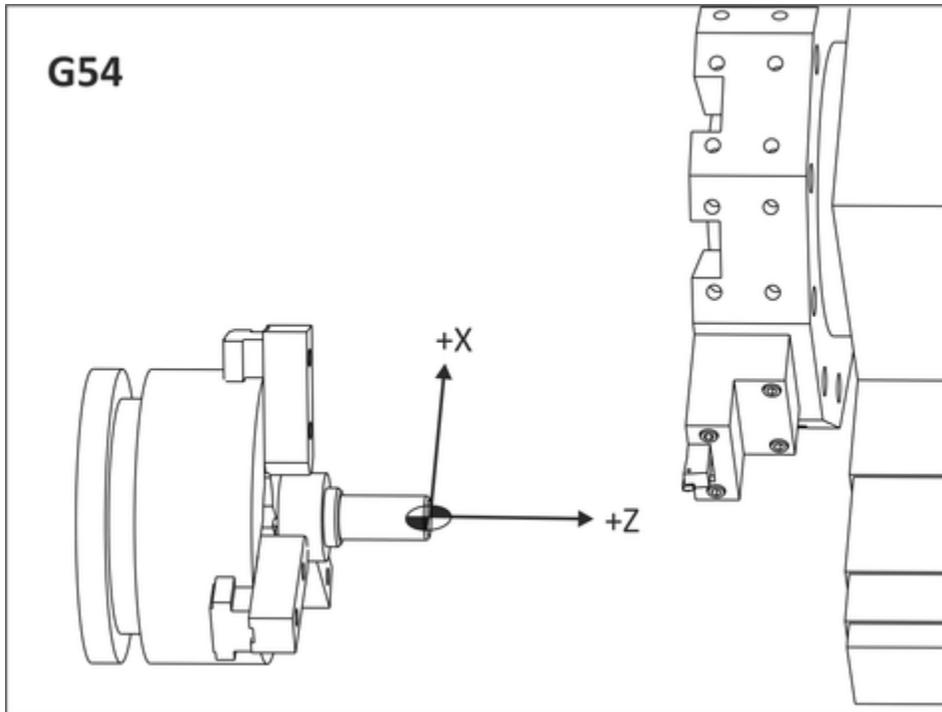


Figura 2.20 – Exemplo de sistema de referência da peça.

Comandos de posicionamento também podem conter sub-rotinas com geometria complexa de posicionamento e nesse caso o comando será, em geral, uma palavra.

N10 G53 G1 X300 Z560 F1000

MSG ("REFERENCIANDO")

N20 G90 G94

N30 M8

N40 TRANS Z260

N45 L1200 P50

N5 PROC L1200

N10 G1 X0 Z0 F1000

N15 M4 S200

N20 G1 X300 F500

N25 G1 Z480 F500

N30 M5

N35 M3 S400

N40 G1 Z0 F500

N45 G1 X0 F500

N50 M5

N55 M17

N50 G53 G1 X300 Z560 F1000 M9

N55 M30

Comandos Complementares definem para a máquina parâmetros adicionais na execução de determinada operação, complementando as informações de outros comandos no mesmo bloco de programação.

Exemplo:

F0.5 = avanço (0.5 mm/rev.)

S500 = rotação do eixo árvore (500 rpm)

T01 = posiciona a ferramenta (1)

H12 = Correção do comprimento da ferramenta (ferramenta 12)

P10 = Correção do comprimento da ferramenta (ferramenta 10)

Comandos Preparatórios são os que estabelecem para o CNC os modos de operação previstos pelo programador, em geral no início do programa. Esse grupo é formado pela letra "G" seguido de um número.

Exemplo:

G95 = avanço em mm/rev

G94 = avanço em mm/min

G71 = Medidas em mm

Os Comandos Miscelâneos, ou Auxiliares, complementam a programação no sentido de permitir a interação com outras partes da máquina, tais como: Ligar fluido refrigerante, abrir a placa, mudar ferramenta de trabalho, etc.. É formado pela letra "M" seguida por um número:

Exemplo:

M09 = desliga o fluido de corte

M03 = liga o eixo árvore no sentido horário

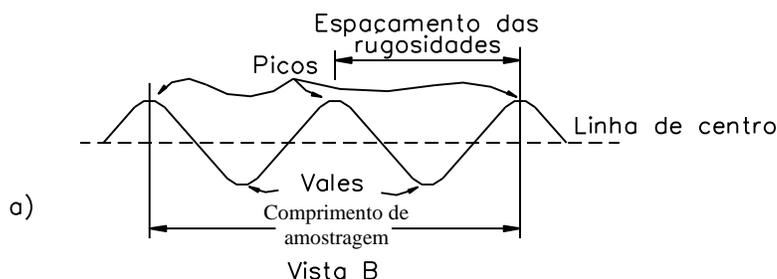
M30 = fim de programa

Com esta breve introdução à programação CNC espera-se que o leitor seja capaz de acompanhar e realizar o exercício prático utilizando o Torno CNC.

2.6 – Rugosidade superficial em Torneamento.

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou erros microgeométricos resultantes da ação inerente do processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc.). A rugosidade pode ser medida por vários parâmetros, que serão tratados posteriormente. Em muitos casos a rugosidade é utilizada com parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem. De fato, a rugosidade de uma superfície é dependente de vários parâmetros, tais como: máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta e operação de usinagem. Métodos estatísticos aplicados ao resultado da medição da rugosidade de uma superfície podem identificar as contribuições relativas de cada um destes parâmetros.

Normalmente as ondulações e falhas devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, pois representam erros de fabricação. A rugosidade, por sua vez, é um parâmetro que é especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada. Uma rugosidade baixa é essencial em superfícies de mancais, superfícies que requerem pintura, superfícies que servirão de escoamento de fluidos e gases, superfícies cujo visual exige brilho e aquelas que devem refletir raios e luzes. Superfícies que trabalham sob lubrificação devem possuir uma rugosidade característica, como por exemplo, as paredes dos cilindros de motores de combustão interna. Neste caso, a operação de brunimento tem a função de deixar a superfície com uma rugosidade que favoreça a lubrificação. A Figura 2.21 ilustra de maneira esquemática todos os elementos que representam o acabamento. Já a Figura 2.22 apresenta o perfil de uma superfície de aço temperado para rolamento, a qual foi torneada sob condição de desbaste. Neste caso, além da rugosidade, as ondulações estão presentes.



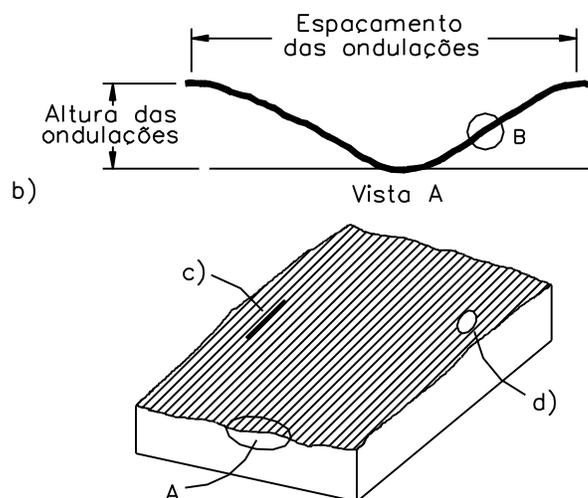


Figura 2.21. Elementos do acabamento superficial: a) rugosidade superficial; b) ondulações; c) marcas denotando direções das irregularidades; d) falhas (Juneja e Swkhon, 1987).

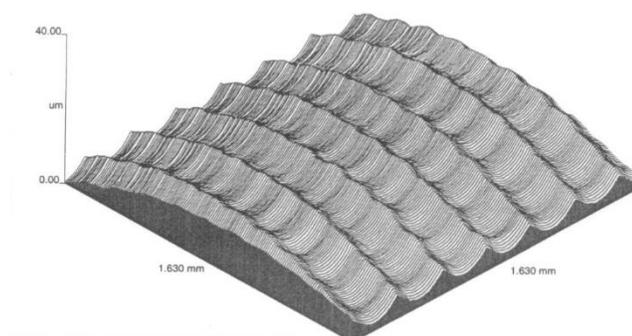


Figura 2.22: Perfil tridimensional de uma superfície em aço temperado (62 HRC) torneada sob condição de desbaste: $f=0,25$ mm/rev e $r_{\epsilon}=1,6$ mm (Abrão, 1995).

2.6.1 - Parâmetros para quantificação da rugosidade

Normalmente uma peça usinada é examinada em termos macrogeométricos (dimensões, forma e orientação) e microgeométricos (rugosidade). A peça é examinada depois da operação de usinagem, ou mesmo durante, de acordo com as tolerâncias e rugosidade especificadas no projeto. Os desvios dimensionais, de forma e de orientação são mais fáceis de se medir e controlar e dependem principalmente da natureza da operação e da rigidez da máquina ferramenta utilizada. A rugosidade, por sua vez, é afetada por um elevado número de variáveis e pode ser avaliada por diversos parâmetros, os quais podem ser classificados em:

- Parâmetros de amplitude: determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- Parâmetros de espaço: determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- Parâmetros híbridos: determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaço.

Diversas organizações, tais como ISO, DIN e JIS possuem normas técnicas para a avaliação da rugosidade de superfícies técnicas. A Tabela 2.1 apresenta os principais parâmetros empregados na quantificação da rugosidade de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002). A Figura 2.23 representa graficamente os parâmetros R_a e R_t .

Tabela 2.1: Alguns parâmetros de rugosidade.

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z^*	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil (<i>skewness</i>)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

* A norma DIN define o parâmetro R_z como sendo a média das cinco alturas máximas detectadas em cada comprimento de amostragem.

a)

l_n

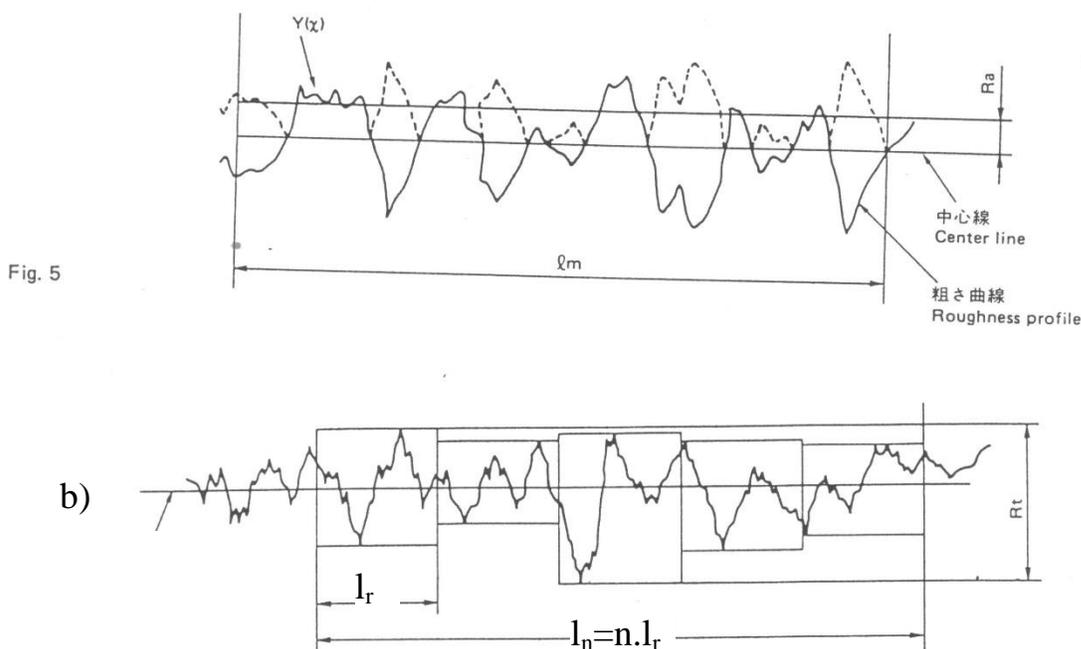


Figura 2.23: Alguns parâmetros de rugosidade: (a) R_a e (b) R_t

O comprimento de amostragem (l_r) é definido, segundo a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), como sendo o comprimento na direção do eixo X, usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação. Já o comprimento de avaliação (l_n) é entendido como sendo o comprimento na direção do eixo X usado para estabelecer o perfil sob avaliação e pode conter um ou mais comprimentos de amostragem. Normalmente é recomendado um comprimento de avaliação equivalente a cinco vezes o comprimento de amostragem de forma a se obter uma maior confiabilidade dos dados. A Tabela 2.2 apresenta esses valores de acordo com a norma ISO 4288 (1996):

Tabela 2.2: Valores recomendados para comprimentos de amostragem e de avaliação (ISO 4288 - 1996).

Faixa de R_a (μm)	Comprimento de amostragem l_r (mm)	Comprimento de avaliação l_n (mm)
até 0,02	0,08	0,4
de 0,02 a 0,1	0,25	1,25
de 0,1 a 2	0,8	4
de 2 a 10	2,5	12,5
de 10 a 80	8	40

Dentre os parâmetros de amplitude, o mais utilizado é o parâmetro R_a , amplamente empregado como parâmetro de controle de processo, uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo,

particularmente no desgaste da ferramenta. É um parâmetro muito utilizado pela indústria e está disponível nos instrumentos mais simples. Como representa um valor médio, ele é um parâmetro estável e não é influenciado por efeitos ocasionais. Embora bastante vantajoso, o parâmetro R_a isoladamente não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície, pois superfícies geometricamente diferentes podem apresentar R_a bem próximos, mas desempenhos em serviço bastante diversos. A Figura 2.24 ilustra perfis de superfícies diferentes que apresentam o mesmo valor de R_a .

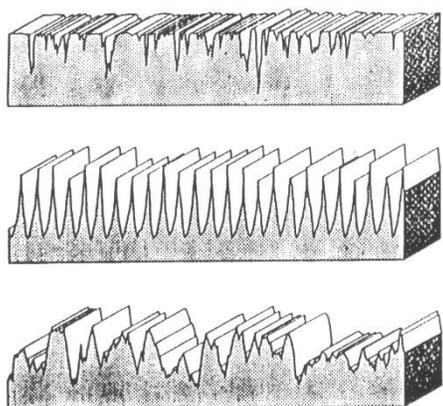


Figura 2.24: Representação de diferentes superfícies com o mesmo valor de R_a .

Já o parâmetro R_q tem o efeito de ampliar os valores dos picos e vales isolados ou esporádicos, podendo assim evidenciar defeitos ou marcas em superfícies bem acabadas, como em superfícies de espelhos e lentes. Além disso, ele representa o desvio padrão da distribuição de alturas do perfil.

Em casos nos quais é desejável (ou mesmo necessário) especificar a altura máxima da rugosidade, os parâmetros R_t ou R_z devem ser empregados, pois são diretamente influenciados por qualquer defeito ou irregularidade na superfície.

Além dos parâmetros definidos anteriormente, destacam-se ainda outros de natureza estatística utilizados para avaliar a rugosidade. Pode-se calcular, por exemplo, os valores de *skewness* (R_{sk}) e *kurtosis* (R_{ku}) de um perfil, sendo que o primeiro representa a assimetria do perfil e o segundo, seu achatamento. De maneira simplificada, R_{sk} indica se as irregularidades da superfície são em maioria picos ou vales, como ilustra a Figura 2.25. Se a distribuição da amplitude de um perfil tiver uma forma gaussiana balanceada, o valor de R_{ku} será próximo de 3. Uma superfície acidentada e áspera terá R_{ku} menor que 3, enquanto que superfícies com muitos picos o valor será maior que 3. Uma superfície retificada com um reboło afiado, por exemplo, terá R_{ku} igual a 3.

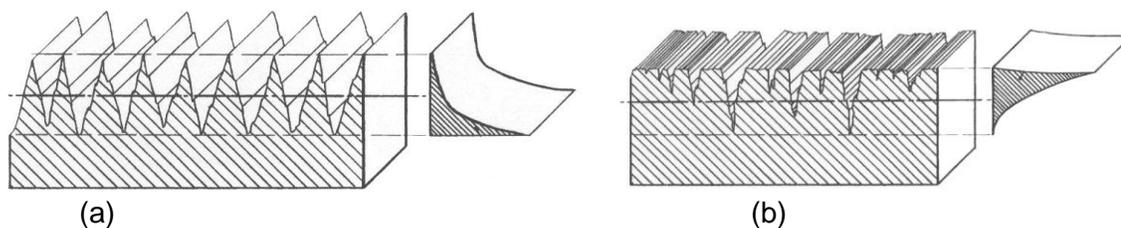


Figura 2.25: Comparação entre duas superfícies com diferentes valores de skewness: (a) R_{sk} positivo, (b) R_{sk} negativo.

Inúmeros outros parâmetros são definidos para medir a rugosidade, entretanto, a escolha do parâmetro a ser utilizado dependerá muito da aplicação da peça.

2.6.2 – Cálculo teórico da Rugosidade no processo de torneamento

Os parâmetros R_a e R_t podem ser calculados teoricamente, embora estes valores sejam apenas indicativos, uma vez que os valores reais estarão acrescidos de diversos outros fatores como vibração e desgaste das arestas, por exemplo. No processo de torneamento se o avanço f é menor que o raio de ponta r_ϵ da ferramenta, os valores de R_a e R_t são calculados, aproximadamente, por:

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_\epsilon} = \frac{f^2}{31,2r_\epsilon} \quad (2.1)$$

$$R_t = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (2.2)$$

Para o caso em que a ferramentas não tenha raio de ponta (Figura 2.26a), ou esse é muito pequeno, pode-se obter os mesmos valores como sendo:

$$R_a = \frac{f}{4(\tan\theta_s + \cot\theta_e)} \quad (2.3)$$

$$R_t = \frac{f}{\tan\theta_s + \cot\theta_e} \quad (2.4)$$

Para o caso em que a ferramenta tenha raio de ponta é menor do que o avanço (Figura 2.26b), pode-se obter R_t como sendo:

$$R_t = (1 - \cos \theta_e) r_n + f \cdot \sin \theta_e \cdot \cos \theta_e - (2 \cdot f \cdot r_n \cdot \sin^3 \theta_e - f^2 \cdot \sin^4 \theta_e)^{1/2} \quad (2.5)$$

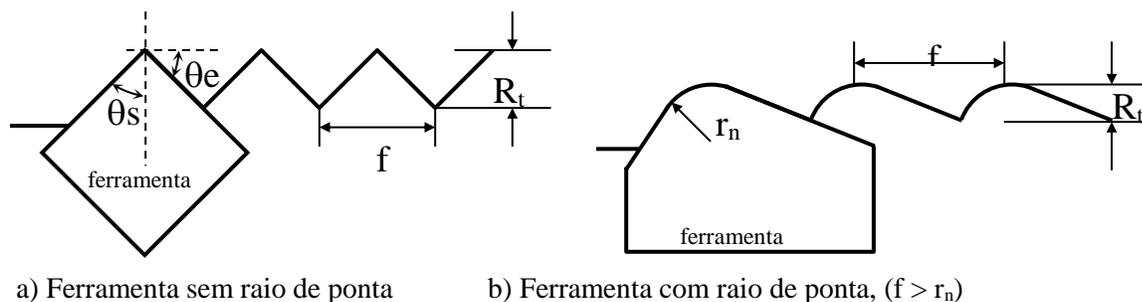


Figura 2.26: Perfil teórico de superfícies usinadas por torneamento.

2.6.3 - Medição da rugosidade

O aparelho empregado na medição da rugosidade é chamado rugosímetro. A medição pode ser feita com, ou sem contato, entre um apalpador e a peça, muito embora a medição com contato seja a mais utilizada pela simplicidade, versatilidade e custo inferior. Neste caso, o equipamento consiste de um apalpador de diamante que percorre, em linha reta, uma distância previamente definida (comprimento de avaliação). O deslocamento vertical do apalpador é convertido em sinal elétrico e então amplificado. O resultado pode ser apresentado, na forma numérica, pelo gráfico do perfil que representa a superfície analisada e há, ainda, a possibilidade de se utilizar filtros para eliminar a influência das ondulações.

Tendo em vista que um apalpador de diamante sempre possui um determinado raio de ponta, este já funciona como um filtro que faz com que o perfil detectado seja mais suave que o perfil real da peça, como ilustra a Figura 2.27. Assim, quanto menor o raio de ponta do apalpador, mais fidedigna será a representação do perfil. Rugosímetros de uso geral possuem apalpaadores com ângulo de ponta de 90° e raio de 5 a $10 \mu\text{m}$. A velocidade de deslocamento do apalpador situa-se em torno de $2,5 \text{ mm/s}$.

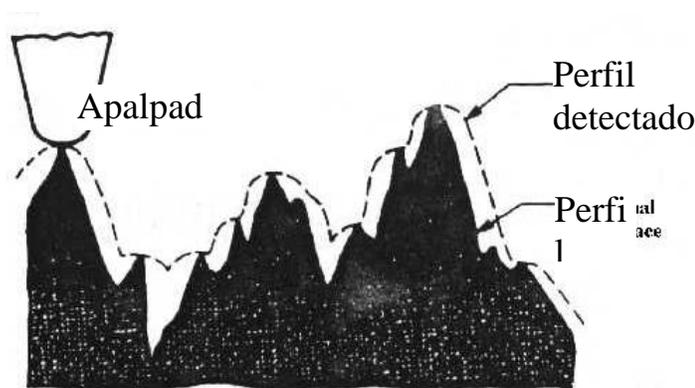


Figura 2.27: Perfil real e aquele detectado pelo apalpador do rugosímetro.

Outra desvantagem apresentada pelo apalpador refere-se ao fato de a área de contato entre o instrumento e a superfície ser muito pequena. Desta forma, mesmo com baixas forças de medição, a pressão de contato é muito elevada, causando danos inaceitáveis em superfícies de materiais macios e dificuldades de análise de alguns revestimentos. Em contrapartida, materiais muito duros e abrasivos provocam o desgaste progressivo da ponta do apalpador, levando a uma reprodução cada vez menos exata da superfície da peça. De forma a superar estes inconvenientes, a medição de rugosidade pode ser realizada sem contato, isto é, feita por meio de uma sonda óptica que incide raios infravermelhos sobre a superfície da peça e em seguida detecta a dispersão dessa radiação por meio de uma matriz de fotodiodos. A intensidade da dispersão é calculada e então correlacionada com os parâmetros conhecidos de rugosidade. Embora, a princípio, seu campo de aplicação seja o mesmo dos apalpadores mecânicos, na prática ela é empregada em situações nas quais o apalpador mecânico pode causar danos à superfície (ou vice-versa), tais como em borrachas, folhas delgadas, discos rígidos e cilindros de fotocopiadoras. A sonda óptica exige cuidados no que se refere à limpeza da superfície a ser avaliada, já que qualquer sujeira é interpretada como parte da superfície, e vibrações, que podem alterar os resultados.

Muitas vezes a representação bidimensional do perfil não é suficiente para sua completa caracterização. Assim, a perfilometria tridimensional se apresenta como uma ferramenta extremamente útil, permitindo que os parâmetros indicados na Tabela 2.1 sejam calculados tridimensionalmente. A superfície representada na Figura 2.19 foi obtida utilizando esta técnica. Além da perfilometria tridimensional, a rugosidade de uma superfície pode ser avaliada por meio de microscopia óptica ou eletrônica, entretanto, nestes casos a avaliação é apenas qualitativa.

2.6.4- Efeitos de alguns parâmetros de usinagem na rugosidade

Numa operação de usinagem na qual a ferramenta é nova, existe pouco contato entre as superfícies, não ocorre vibração e não há formação de aresta postiça de corte, a rugosidade será, teoricamente, formada pelas marcas de avanço deixadas na peça pela ferramenta. Estas marcas estão ilustradas na Figura 2.28 para uma operação de torneamento cilíndrico externo utilizando uma ferramenta com raio de ponta r_ϵ .

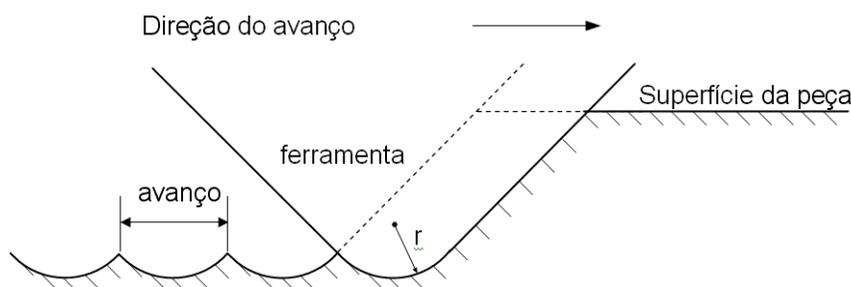


Figura 2.28. Marcas de avanço deixadas na superfície da peça.

A rugosidade sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo: a geometria da ferramenta de corte, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça, condições de corte e material da ferramenta. Em geral a rugosidade é menor (ou o acabamento é melhor) quando:

- As flexões geradas por esforços de usinagem, ou vibrações são pequenas.
- A ponta da ferramenta possui um raio de arredondamento.
- A ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas (evitando desvios).
- O material da peça é inerentemente puro, livre de defeitos (trintas, bolhas e inclusões).
- O eixo principal da máquina ferramenta está corretamente alinhado e as guias sem desgastes.
- A aresta de corte sem desgastes ou quebras.
- O corte ocorre sem aresta postiça de corte.

As condições de corte têm grande efeito sobre a rugosidade, sendo o avanço o parâmetro influente, isto é, a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática com o avanço, como mostram as Eq. 2.1 e 2.2.

Sob baixas velocidades de corte pode ocorrer a formação da APC e o resultado é um acabamento inferior. Um aumento no avanço sob baixas velocidades de corte resulta numa superfície ainda bem pior.

Isto normalmente é atribuído a um aumento no tamanho da APC. O efeito da APC no acabamento superficial é atribuído ao fato de que partes dela são cisalhadas durante o processo e permanecem aderidas à superfície da peça em usinagem. Portanto, o acabamento melhora quando se aumenta a velocidade de corte porque a APC desaparece. Além disso, a elevação da temperatura provoca a redução da resistência ao cisalhamento do material da peça, promovendo a redução das forças de usinagem e, conseqüentemente, a melhoria do acabamento. Por outro lado, o aumento da velocidade de corte é obtido por meio da elevação da rotação do eixo-árvore, que pode atingir valores onde as vibrações prejudicam o acabamento.

A profundidade de corte aumenta as forças e, portanto, as possibilidades de flexões. As alturas das ondulações também são aumentadas com a profundidade de corte.

A geometria da aresta tem grande efeito na rugosidade, principalmente o raio de ponta r_e . Este deve ser suficientemente grande (pelo menos o dobro do avanço) para diminuir o efeito das marcas de avanço, com apreciável melhoria na rugosidade. Entretanto, um raio de ponta excessivamente alto pode induzir vibrações.

Ainda com relação à influência da geometria da ferramenta, normalmente quanto maior o ângulo de saída, menor será a força de usinagem e, portanto, as alturas dos picos e profundidades dos vales que representam a rugosidade das superfícies serão menores.

O ângulo de folga α_o , por sua vez, deve ser suficientemente alto para evitar o contato com a superfície usinada. O contato gera forças adicionais que causam flexões, além de imprimir na superfície usinada os defeitos ou desgaste da ferramenta. Além disto, este ângulo deve ser adequado para ajudar na saída de fragmentos de APC, evitando que esses fragmentos fiquem aderidos à superfície da peça.

Além da influência das condições de corte e da geometria da ferramenta, outros efeitos devem ser considerados, dentre eles a rigidez do suporte da ferramenta, que deve possuir seção transversal suficiente para minimizar flexões. Este efeito é crítico em operações de mandrilamento, onde a ferramenta possui um comprimento em balanço considerável. A máquina ferramenta deve ser rígida, sem erros de alinhamento e com movimentos precisos, para que o acabamento não seja prejudicado. Além disso, são características desejáveis:

- Potência suficiente para manter a velocidade e o avanço previstos.
- Resiliência suficiente para evitar flexões.
- Rigidez e amortecimento contra vibrações.

- Possuir uma base (fundação) adequada para minimizar vibrações e sua transmissão para outras máquinas.
- Exatidão na fabricação de seus componentes de forma a reduzir ao mínimo o desalinhamento.
- Meios adequados para suportar rigidamente a peça e a ferramenta.

A composição química, dureza, microestrutura e a consistência metalúrgica do material da peça são fatores que também podem afetar o acabamento que, em geral, é melhorado da seguinte forma:

- Composição química desfavorável ao aparecimento da APC.
- Alta dureza e baixa ductilidade.
- Granulação fina e alta dureza dos microconstituintes.
- Consistência nas propriedades ao longo de toda seção transversal.

O fluido de corte reduz o desgaste da ferramenta e o atrito entre a ferramenta e a peça ou cavaco, contribuindo para a melhoria do acabamento. O fluido atuando como refrigerante, entretanto, pode aumentar a resistência ao cisalhamento do material da peça e, conseqüentemente, a força de usinagem, prejudicando o acabamento da peça. Um revestimento aplicado sobre uma ferramenta para atuar como lubrificante ou ainda para diminuir a afinidade química entre o material da peça e a ferramenta, pode contribuir para melhorar o acabamento.

2.7 - Prática: Otimização do tempo de Torneamento e da rugosidade superficial:

Na operação de torneamento há uma relação entre o avanço da ferramenta por volta da peça, o raio de ponta de ferramenta e a rugosidade obtida. Isso ocorre porque o movimento relativo entre ferramenta e peça produz uma geometria similar a uma rosca, cujo perfil é quase coincidente com o raio de ponta da ferramenta. A figura 2.29 mostra esse processo.

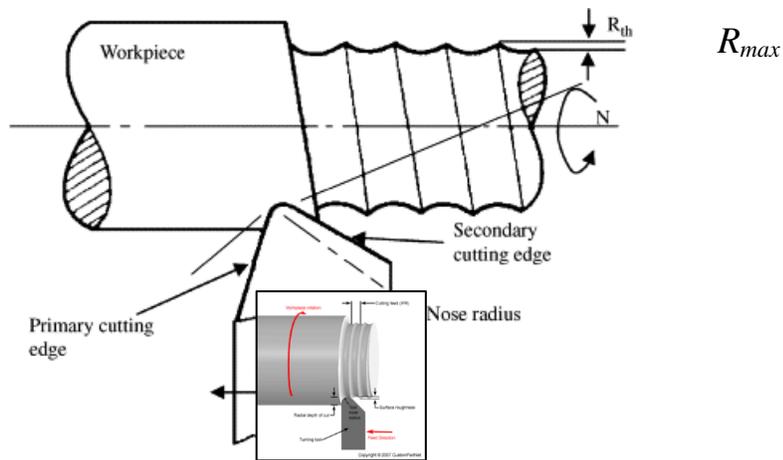


Figura 2.29 – Formação da rugosidade no torneamento

A relação que rege o valor de R_{max} em relação ao avanço e raio de ponta da ferramenta é facilmente dedutível a partir da análise geométrica do problema e resulta em:

$$R_{max} = a^2 / 8 \cdot r_p \quad (2.2)$$

onde:

a = avanço por volta

r_p = raio de ponta da ferramenta

É claro que a rugosidade vai depender também da geometria da ponta de ferramenta, que pode, eventualmente, ter um formado diferente do circular, como se pode observar na figura 10:

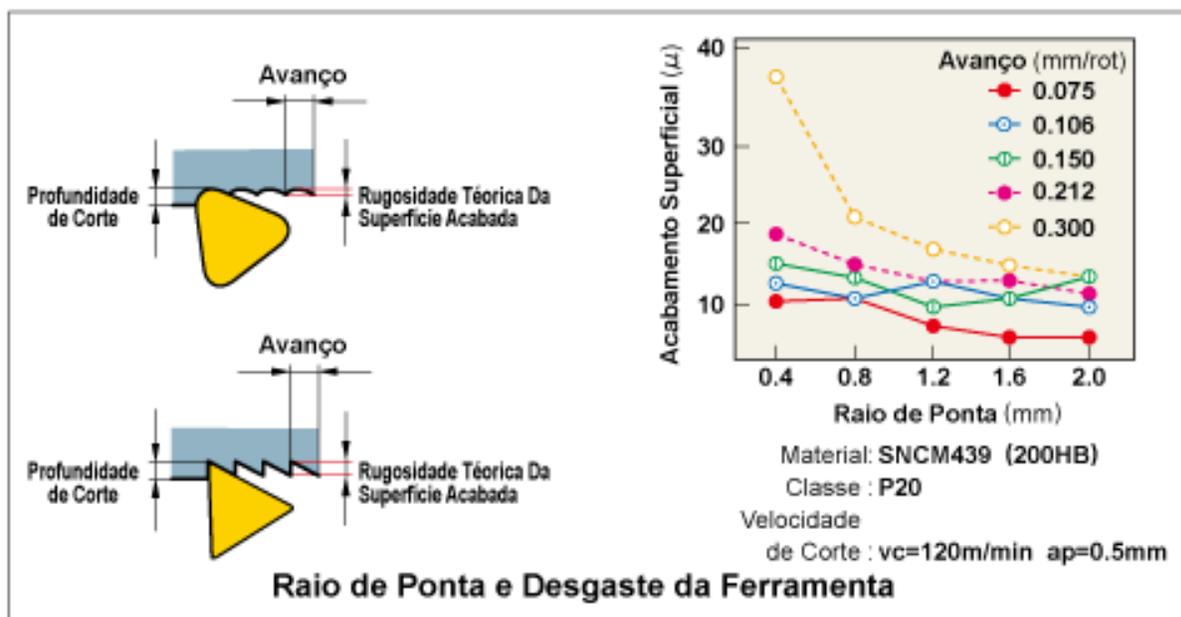


Figura 2.30 – Formação da rugosidade para diferentes raios de ponta e avanços

Apesar da equação cinemática descrita acima (2.2), há outros fatores que influenciam no valor da rugosidade obtida, de forma que há um mínimo de rugosidade possível, abaixo do qual o processo não permite melhoria. Tais fatores são intrínsecos dos processos de usinagem que ocorrem durante o corte, como por exemplo a formação de micro-rebarbas, a ocorrência de desgastes ou o fluxo lateral, que afetam a geometria da ponta da ferramenta, como mostra a figura 2.31

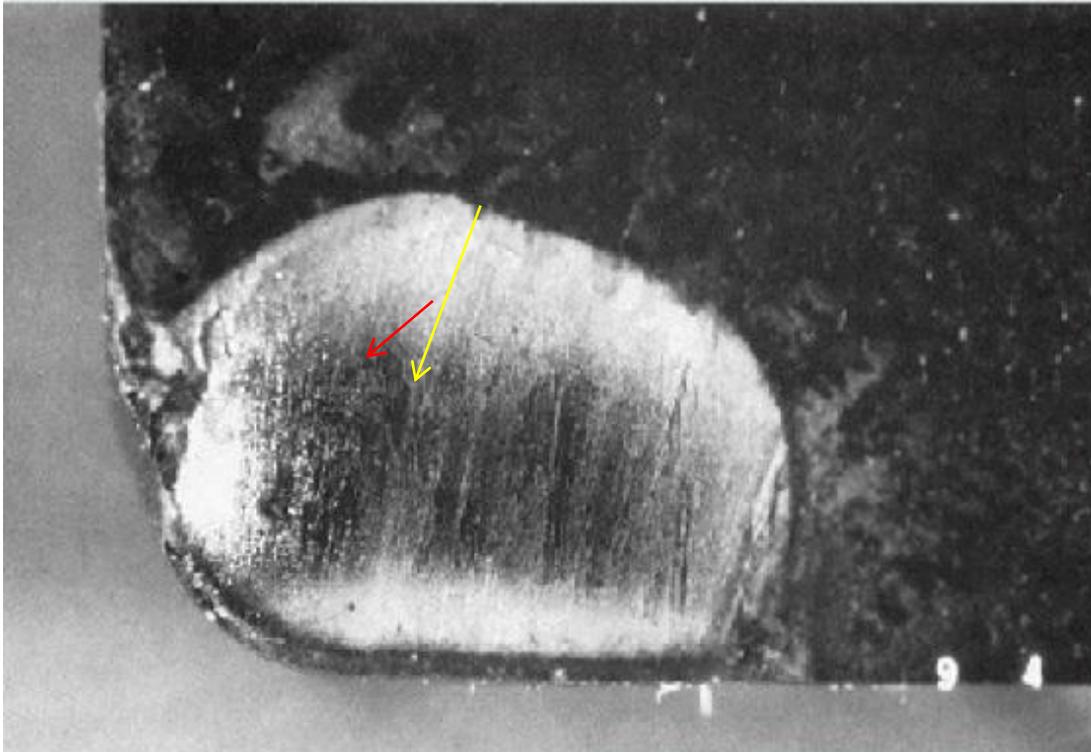


Figura 2.31 – ferramenta desgastada na ponta implicando em redução de raio (raio inicial em amarelo e raio após desgaste em vermelho)

2.8 - Problema proposto para a prática

Para um dado par peça/ferramenta, otimize o tempo de usinagem num passe de torneamento externo de uma peça de forma a atingir a rugosidade mínima possível para o processo.

Dicas:

- 1 - procure inicialmente identificar a validade da relação entre rugosidade e avanço por volta.
- 2 – avalie qual a velocidade de corte ideal para o processo.