

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

INTRODUÇÃO AO PLANEJAMENTO DE PROCESSOS DE
USINAGEM

Prof. Dr. REGINALDO T. COELHO
Prof. Dr. ERALDO JANONNE DA SILVA

Março 2018

ÍNDICE

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 3 |
| 2. Exemplo de um Planejamento de Processo de usinagem..... | 7 |
| 2.1: Sub-operações de usinagem | 13 |
| 2.2: Concentração/Separação de operações | 15 |
| 2.4: Seleção de máquinas-ferramentas..... | 17 |
| 2.5: Seleção de ferramentas..... | 17 |
| 2.6: Seleção de dispositivos de fixação | 17 |
| 2.7: Seleção de superfícies de referência para a fabricação | 18 |
| 2.8: Determinação de sobremetal em peças a serem usinadas | 20 |
| 2.6: Determinação de dimensões e tolerâncias de usinagem | 22 |
| 2.7 Seleção de condições de corte | 23 |
| 2.8 Determinação de tempos padrão | 24 |
| 2.9: Documentação do plano de processo..... | 24 |
| 3: Literatura para consulta adicional..... | 30 |

1. Introdução

Este texto tem como principal objetivo apresentar e orientar o Planejamento de Processos de Usinagem. O “Planejamento de Processos” é um tema muito abrangente, envolvendo todos os aspectos referentes ao planejamento de atividades que conduzam à fabricação de qualquer bem ou de serviço na sociedade moderna. O presente texto não tem a pretensão de abordar todos os inúmeros aspectos relacionados ao tema geral, mas somente aos processos de usinagem e, mais especificamente aplicado a matérias metálicas. Muitos dos aspectos aqui abordados, no entanto, servirão como base para abordagens mais gerais.

O planejamento de qualquer Processo Produtivo é uma função vital para qualquer indústria, pois reúne as informações necessárias para a transformação de matéria-prima, ou produtos semi-acabados em produtos finais. Alguns dos processos de manufatura mais frequentemente utilizados para tal transformação são: Processos Primários (fundição, forjamento, soldagem, punçionamento, estampagem), Processos Secundários, ou de acabamento (usinagem, tratamentos térmicos e químicos). Mais recentemente, no entanto, está em desenvolvimento uma terceira classe de processos chamados Processos Aditivos (Fusão Seletiva por Laser, Deposição Energética Direta) os quais são capazes de produzir forma 3D diretamente já com dimensões próximas às finais. Alguns desses processos são chamados também de “impressão 3D”. Para a obtenção de um produto final é necessário um planejamento das operações e sub-operações que permitam obter um produto final nas especificações. Os requisitos associados a seleção de um, ou a uma sequência desses processos, podem ser divididos em requisitos para a peça e para o processo.

Para a peça tem-se aspectos funcionais, os quais já vem, em geral, definidos no projeto da peça, tais como tolerância dimensional, tolerância de forma e posição, rugosidade superficial, forma geométrica e material. O projeto mecânico de um novo produto deve incluir estes atributos para possibilitar à atividade de planejamento do processo e a especificação do Plano de Processo, preferencialmente, com alternativas que poderão ser utilizadas na fabricação da peça. Já requisitos de processos devem levar em conta aspectos tecnológicos e econômicos como: tamanho do lote, custo e tempo de preparação de equipamento, custo unitário e taxa de produção.

As decisões associadas ao Planejamento de um Processo de Usinagem podem ser enumeradas como:

- Seleção da matéria-prima e do método de usinagem.
- Seleção dos processos de usinagem para cada superfície da peça.
- Determinação da sequência de operações.
- Determinação da fixação da peça para cada operação.

- Seleção do equipamento e ferramentas para as operações de usinagem.
- Determinação das dimensões e tolerâncias operacionais para as operações de usinagem.
- Seleção das condições de usinagem e determinação dos tempos padrões para cada operação.

O Planejamento de Processos de Usinagem, mais especificamente, pode ser definido como a atividade de selecionar e definir os processos que devem ser executados para transformar a matéria-prima em produto acabado. Mais especificamente, o planejamento é a seleção e sequenciamento de processos e de operações para converter uma matéria prima em um componente acabado, de acordo com especificações funcionais. O planejamento pode ainda ser definido como o módulo responsável pela conversão de dados de projeto em instruções de trabalho ou a determinação sistemática dos métodos que permitam que um produto seja manufaturado econômica e competitivamente. Apesar das diversas vertentes apresentadas, o que se procura enfatizar é o processo de transformação de um material bruto em um produto acabado. Quando se pensa em usinagem, planejar consiste na escolha de alguns recursos dentre os disponíveis, como máquinas-ferramentas, ferramentas de corte, dispositivos de fixação, definição de sequência de operações, definição de condições de corte e definição de operações auxiliares, de forma a sistematizar o trabalho do(s) executor(es) dessas tarefas para a obtenção do produto dentro das especificações de projeto.

Para o Planejamento, algumas atividades podem ser descritas como segue:

- A interpretação das especificações contidas na definição do Desenho Técnico da peça, incluindo principalmente tolerâncias dimensionais, tolerâncias geométricas, rugosidade superficial, tipo de material, dimensão da matéria-prima, número de peças no lote, etc (requisitos da peça e do processo);
- A seleção de processos e ferramentas para a usinagem da peça e suas formas respeitando as restrições impostas na definição do Desenho Técnico;
- A determinação das tolerâncias de fabricação e dimensões de montagem para garantir as tolerâncias de projeto em função das limitações das dimensões de fabricação por razões de comodidade e capacidade da máquina-ferramenta;
- A seleção das superfícies de referência para garantir a execução precisa do processamento das operações, simultaneamente com a seleção de dispositivos de fixação e a estabilidade da peça usando uma apropriada fixação;
- O sequenciamento adequado de operações com função de prioridades impostas pelas restrições tecnológicas e de precisão;

- O agrupamento de operações elementares sobre a mesma máquina objetivando a redução do tempo, respeitando os requisitos de precisão;
- A seleção de máquinas para executar as operações, levando em conta o número de peças a ser produzido (tamanho do lote);
- A seleção de métodos e sistemas de medição para garantir a conformidade dos componentes em relação aos requisitos funcionais;
- A determinação das condições de processamento para cada operação elementar levando em conta os tempos e custos de processamento/trabalho a fim de se realizar uma avaliação econômica;
- A elaboração das folhas de processo para serem disponibilizados em um “Plano de Processo” possível e de preferência com alternativas para serem transferidos para o departamento de manufatura para execução.

A Figura 1 ilustra tais atividades de uma forma mais clara.

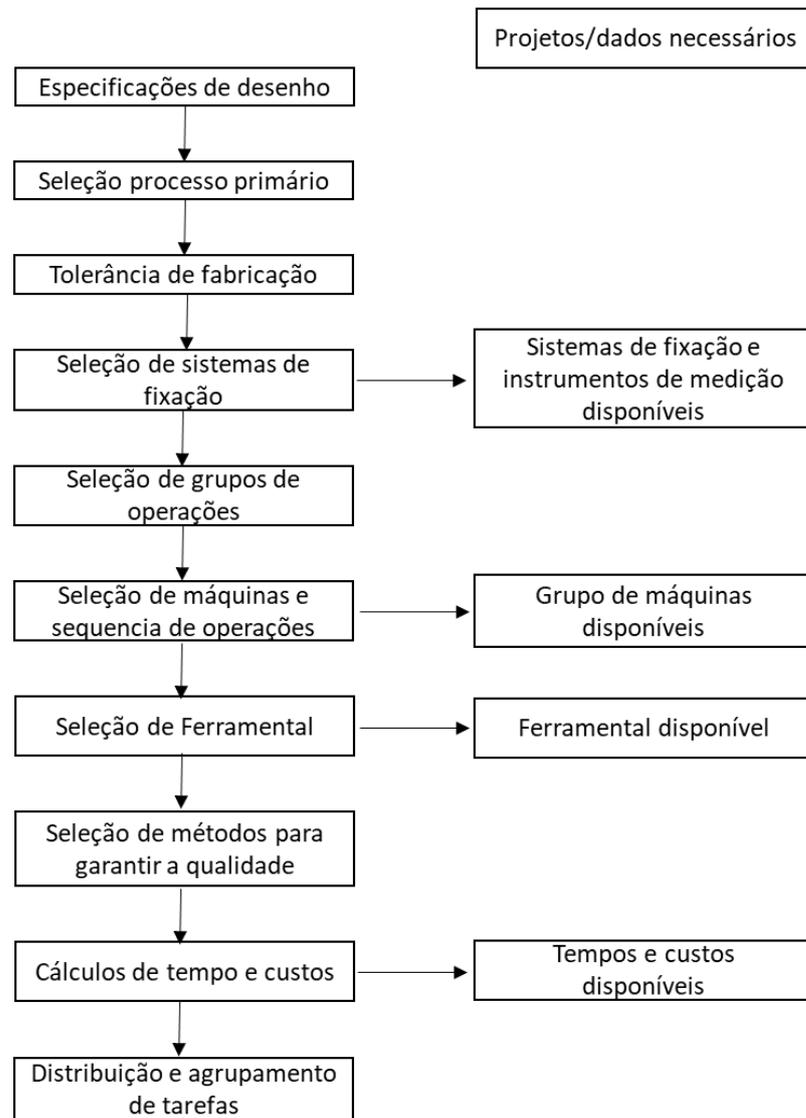


Figura 1 – Atividades típicas de uma sequência de planejamento de processos para usinagem

Não necessariamente a sequência para planejar as atividades de um plano de processos deve seguir a ordem apresentada na Figura 1. Muitas vezes também esse processo é iterativo e correções naquilo que foi inicialmente pensado podem ocorrer. Para orientar o processo todo, de maneira geral, usa-se inicialmente um Plano Macro de processos no qual se estabelecem de forma geral uma sequência de máquinas e operações, para depois ser detalhado. Novamente não se espera que esse seja um processo único. Uma recomendação para esse processo, de maneira mais lógica pode ser:

- Análise preliminar do Desenho Técnico da peça com todas as especificações.
- Seleção dos processos de usinagem (operações elementares), ferramentas e parâmetros de corte.
- Agrupamento dos processos e operações similares.

- Seleção da sequência de máquinas-ferramentas.
- Sequenciamento das operações de acordo com as relações de precedência segundo as restrições de ordem: dimensional, tolerâncias geométricas, tecnológica (desbaste antes de pré-acabamento) e econômicas (redução do custo de produção e desgaste/quebra de ferramenta, por exemplo).
- Seleção dos dispositivos de fixação e referências dimensionais.
- Preparação final do arquivo com o plano de processo para a peça.

Nesta proposta a seleção da máquina-ferramenta vem após a escolha dos parâmetros de corte e estes devem ser orientados para o mínimo tempo de produção (maior produtividade) ou menor custo de usinagem. Por este método as restrições para escolha da máquina baseiam-se nas condições tecnológicas de usinagem que irão definir a potência e a velocidade requerida para a máquina a ser selecionada e outras restrições disponíveis. Em planejamento do processo cada escolha feita em uma atividade e isso poderá causar restrições nas atividades posteriores. Estas restrições devem ser administradas para que se consiga definir planos de processos possível, realistas e com alternativas.

Como outra recomendação o planejamento do sequenciamento das operações de usinagem deve considerar fatores como: material, especificações técnicas da peça, características da matéria-prima, volume de produção, máquinas, ferramentas, sistemas de medição, dispositivos de fixação, entre outros. Quando se definem as operações de usinagem pode-se seguir para o projeto das mesmas, com os dados de fixação e os dados tecnológicos da operação (velocidade de corte, v_c , avanço, f e profundidade de usinagem a_p).

A partir da listagem da ordem lógica das operações deve-se realizar um detalhamento do plano de processos com as informações necessárias para as instruções de fabricação da peça.

2. Exemplo de um Planejamento de Processo de usinagem

Neste exemplo se faz a análise da peça determinando as operações necessárias à sua fabricação e estabelecendo uma sequência de processos e operações para fabricação da mesma.

Como o desenho da peça é a base para a geração do plano de processo, a sua análise deve ser o primeiro passo para a definição do plano de processo. A análise a ser empreendida deve considerar os fatores:

- **Estrutura da peça:** As peças fabricadas por usinagem apresentam formas e tamanhos variados, contudo é possível descrever uma peça em termos de formas básicas como cilindros, planos, cones, etc. Uma análise cuidadosa da estrutura da peça é importante, pois a seleção das máquinas de usinagem para cada superfície é função da sua forma básica. Por exemplo, uma superfície cilíndrica externa é feita, normalmente, num torno. As dimensões de cada superfície também são de grande importância, pois dentro de um mesmo tipo de superfície, diferentes operações poderão ser necessárias, como no caso de uma superfície de revolução que pode se apresentar na forma de um eixo, um disco, um anel ou um tubo. Peças prismáticas contendo faces planas normalmente serão feitas por fresamento, aplainamento, etc. Assim, se o engenheiro conhece as formas básicas e as dimensões de uma peça saberá quais são os métodos de usinagem mais adequados.
- **Observação de superfícies críticas e menos críticas:** Uma superfície será crítica quando mantém contato com as superfícies de outras peças, já as que não apresentam este tipo de contato são menos críticas. As superfícies críticas são aquelas que apresentam maior exigência de precisão dimensional ou de forma. Assim, o planejamento do processo deverá dar maior prioridade às operações feitas nestas superfícies. Com base nas tolerâncias e acabamento especificados para uma superfície crítica, se determina qual a máquina e/ou operação de usinagem a ser utilizada. As operações de desbaste e semi-acabamento são determinadas em função do método especificado para o acabamento. Assim o engenheiro com experiência e conhecimento dos principais métodos de usinagem que são utilizados pode se orientar melhor.
- **Estudo do material e de tratamentos térmicos:** As propriedades mecânicas do material de uma peça são um fator importante na seleção do método de usinagem, pois apresentam grande influência nas condições de corte que poderão ser utilizadas. Como tratamentos térmicos alteram as propriedades mecânicas, eles devem ser observados com cuidado e com conhecimento.
- **Estudo das dimensões entre as superfícies da peça:** As dimensões entre as superfícies de uma peça podem ser apresentadas de diversas formas. A Figura 2(a) mostra um sistema de cotas em paralelo, na qual todas as dimensões se referem a uma única superfície. A Figura 2(b) mostra cotas em série e a Figura 2(c) mostra cotas em sistema combinado, que por sinal, é o método mais comum de dimensionamento de peças. A forma como as superfícies de uma peça

são dimensionadas influencia a significativamente a sequência de operações uma vez que expressa a maneira como o projetista necessita com resultado final no produto.

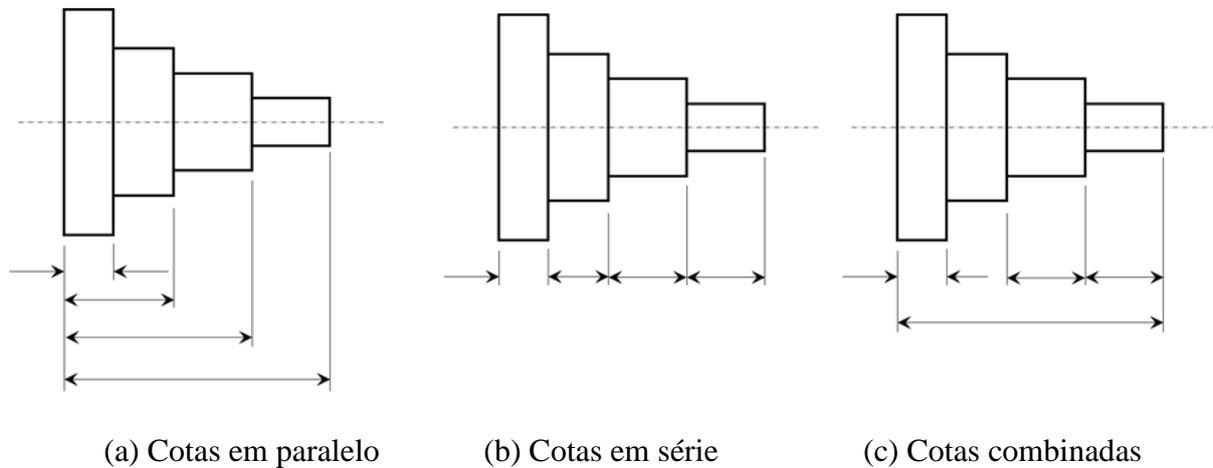


Figura 2 – Exemplo de diferentes sistemas de cotas conforme a utilização da peça na montagem.

A Figura 3(a) mostra o desenho de uma peça conforme o projetista imaginou. A Figura 3(b) e 3(c) mostram duas possíveis formas de se usinar a referida peça. Na sequência apresentada em 3(b) não se pode garantir que as superfícies internas das cotas A e B estarão rigorosamente paralelas àquela da OP10. Como a peça foi removida e novamente fixada pelo diâmetro externo nas duas operações e este não foi usinado na OP10, não há garantias de que as faces torneadas na OP20 estejam paralelas àquela obtida na OP10. Quando se remove uma peça fixando-a novamente, há risco de que a peça não se mantenha concêntrica e perpendicular, mesmo usando as melhores placas de fixação. Assim, deve-se sempre que possível executar o máximo de operações possíveis em cada fixação para aumentar a precisão dimensional e relativa entre as partes usinadas. Com isso, pode-se minimizar as tolerâncias de usinagem. Quando há a necessidade de se remover e novamente fixar a peça, deve-se preferir fixar em uma superfície já usinada na operação anterior, em alguma superfície de referência, como forma de se minimizar os erros relativos (tolerâncias) entre as partes de uma mesma peça.

A sequência proposta em 3(c) parece mais adequada, pois a segunda fixação usa as superfícies já usinadas na operação anterior. Mesmo assim, as dimensões A e B sempre serão consequência de uma boa fixação, devidamente encostando a peça axialmente durante a OP20. Se o sistema de fixação não pressionar a peça no sentido axial contra a fixação na OP20, haverá variações nas duas dimensões, A e B, conforme a peça encosta, ou não, na OP20. Percebe-se assim, que a sequência de usinagem e o sistema de fixação tem uma significativa influência na tolerância dimensional e de forma da peça, na tentativa de se fabricar seguindo-se fielmente as cotas do desenho da peça.

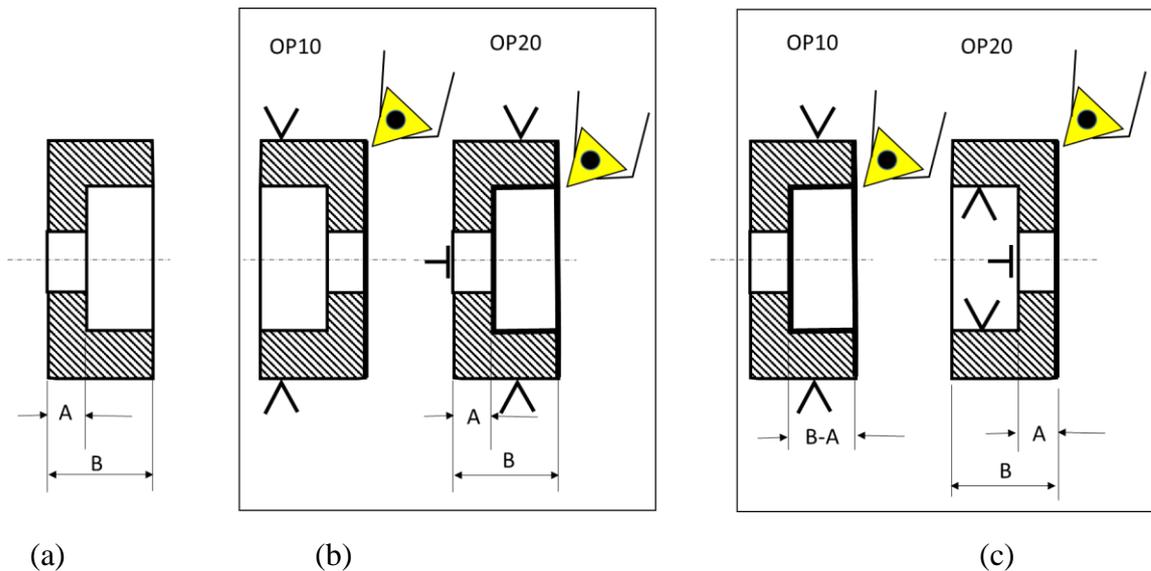


Figura 3 – Duas possibilidades de torneamento de uma peça simples

A seleção da sequência de operações de usinagem de uma peça é uma das etapas mais importantes no planejamento do processo, pois está diretamente ligado às tolerâncias possíveis de se obter e, conseqüentemente, aos custos de produção. Para que o engenheiro possa escolher adequadamente uma sequência de usinagem, é necessário que tenha conhecimento dos diversos processos e operações disponíveis. Também deve estar atualizado e bem informado sobre as características das máquinas e das ferramentas diversas que estas utilizam.

Dentre os processos convencionais de usinagem podem-se citar os mais comuns: torneamento, furação, fresamento, mandrilamento, retificação, entre outros. Para a usinagem de peças complexas ou de materiais de baixa usinabilidade (ligas de alta dureza), utilizam-se processos não-convencionais de usinagem como: eletro-erosão (EDM), usinagem eletroquímica (ECM), usinagem por ultrassom, etc.

Cada processo de usinagem tem uma faixa típica de valores de tolerância dimensional, assim como de rugosidade superficial, sob condições mais usuais. A Tabela 1 mostra um exemplo dos valores de tolerância dimensional de acordo com o processo de usinagem. É importante observar que estes dados podem variar conforme a condições de trabalho das máquinas, das ferramentas, condições de corte e da experiência do operador.

Tabela 1: Valores típicos de tolerância dimensional para diversos processos de usinagem

| Processo | Qualidade IT | Tolerância para 20 mm (± mm) | Tolerâncias geométricas | | | | |
|----------------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|---------------|
| | | | Paralelismo | Perpendicularidade | Concentricidade | Tolerância angular | Circularidade |
| Torneamento de acabamento | IT08 | 0,033 | 0,010 a 0,020 | 0,020 | 0,005 a 0,0010 | 0,010 | 0,010 |
| Torneamento de desbaste | IT09 | 0,052 | | | | | |
| Fresamento | IT10 | 0,084 | 0,010 a 0,020 | 0,020 | | 0,005 | 0,010 |
| Furação | IT12 | 0,210 | 0,200 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 |
| Aplainamento plano | IT10 | 0,084 | 0,200 | 0,100 | | 0,100 | |
| Aplainamento de formas | IT12 | 0,210 | 0,200 | 0,100 | | 0,100 | 0,500 |
| Mandrilamento | IT08 | 0,033 | 0,005 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,001 |
| Brochamento | IT07 | 0,021 | 0,005 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,005 |
| Serramento | IT14 | 0,520 | 0,250 | 0,150 | | 0,150 | |
| Retificação plana | IT06 | 0,013 | 0,001 | 0,001 | | 0,002 | |
| Retificação cilíndrica | IT04 | 0,006 | 0,001 | 0,001 | 0,0001 | 0,002 | 0,0005 |
| Lapidação | IT04 | 0,006 | 0,001 | 0,001 | | 0,005 | |
| Brunimento | IT04 | 0,006 | 0,0005 | 0,001 | 0,010 | 0,010 | 0,0005 |
| Alargamento | IT08 | 0,033 | 0,050 | 0,050 | 0,002 | 0,050 | 0,001 |
| Corte de engrenagens por caracol | IT07 | 0,021 | 0,010 a 0,020 | 0,020 | | 0,010 | 0,005 |

A Figura 4 ilustra a relação entre a tolerância e o custo resultante, mostrando uma relação exponencial entre ambas as variáveis.

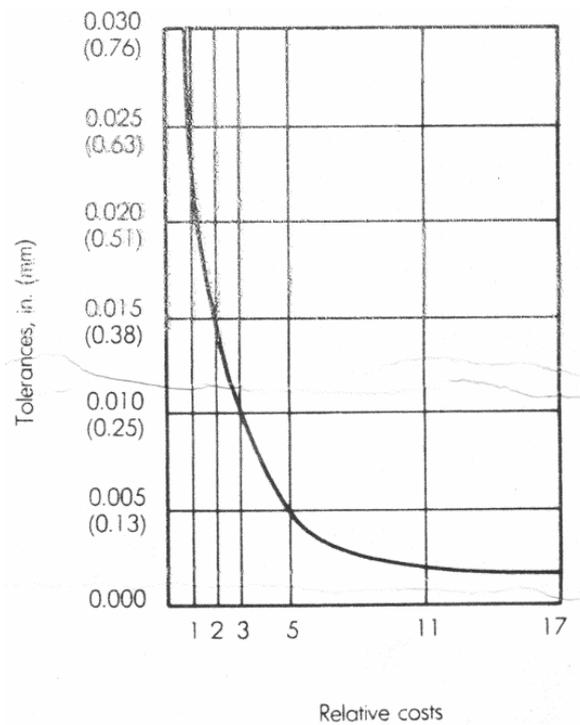


Figura 4 – Ilustração da relação entre a tolerância e os custos resultantes

A Tabela 2 mostra alguns valores típicos para a rugosidade das superfícies obtidas por diversos processos de usinagem.

Tabela 2: Valores típicos de rugosidade obtida para diversos processos de usinagem

| PROCESSO | VALORES DE RUGOSIDADE ($\square m R_z$) | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|--------|
| | 50 | 25 | 12,5 | 6,3 | 3,2 | 1,6 | 0,8 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,025 | 0,0125 |
| OXICORTE | | | | | | | | | | | | | |
| SNAGGING | | | | | | | | | | | | | |
| SERRA | | | | | | | | | | | | | |
| PLAINAMENTO, SHAPING | | | | | | | | | | | | | |
| FURAÇÃO | | | | | | | | | | | | | |
| USINAGEM QUÍMICA | | | | | | | | | | | | | |
| ELETROEROSÃO | | | | | | | | | | | | | |
| FRESAMENTO | | | | | | | | | | | | | |
| BROCHAMENTO | | | | | | | | | | | | | |
| REAMING | | | | | | | | | | | | | |
| FEIXE DE ELETRONS | | | | | | | | | | | | | |
| LASER | | | | | | | | | | | | | |
| ELETROQUÍMICA | | | | | | | | | | | | | |
| TORNAMENTO, | | | | | | | | | | | | | |
| BARREL FINISHING | | | | | | | | | | | | | |
| RETIFICAÇÃO ELETROLÍTICA | | | | | | | | | | | | | |
| ROLETAMENTO | | | | | | | | | | | | | |
| RETIFICAÇÃO | | | | | | | | | | | | | |
| BRUNIMENTO | | | | | | | | | | | | | |
| POLIMENTO ELETROLÍTICO | | | | | | | | | | | | | |
| POLIMENTO | | | | | | | | | | | | | |
| LAPIDAÇÃO | | | | | | | | | | | | | |
| SUPPERFINISHING | | | | | | | | | | | | | |
| FUNDIÇÃO EM AREIA | | | | | | | | | | | | | |
| LAMINAÇÃO A QUENTE | | | | | | | | | | | | | |
| FORJAMENTO | | | | | | | | | | | | | |
| FUNDIÇÃO EM MOLDE PERMANENTE | | | | | | | | | | | | | |
| INVESTMENT CASTING | | | | | | | | | | | | | |
| ESTRUSÃO | | | | | | | | | | | | | |
| LAMINAÇÃO A FRIO | | | | | | | | | | | | | |
| FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO | | | | | | | | | | | | | |

Além dos fatores já descritos, a seleção de uma operação ou processo de usinagem para uma dada superfície, deve considerar também os seguintes fatores principais:

- Forma da superfície, se rotacional ou prismática;
- Dimensões da superfície, em relação à capacidade das máquinas existentes;
- Tolerância dimensional e de forma, assim como o acabamento superficial;
- Peso da peça em relação à capacidade das máquinas;
- Material da peça e tratamento térmico aplicado;
- Volume de produção e frequência dos lotes.

Para a seleção das operações de usinagem, recomenda-se determinar, em primeiro lugar, a operação final das superfícies mais críticas. A Tabela 3 mostra sugestões e algumas rotas de usinagem que podem ser utilizadas para uma superfície cilíndrica externa, por exemplo.

Tabela 3: Sequência de operações de usinagem sugeridas para uma superfície cilíndrica externa

| OP | Descrição da Operação | Classe IT | Acabamento superficial Ra (μm) |
|----|--|-----------|--|
| 10 | Torneamento desbaste | 12-13 | 10-80 |
| 20 | Torneamento desbaste Torneamento semi-acabamento | 9-11 | 2,5-10 |
| 30 | Torneamento desbaste Torneamento semi-acabamento Torneamento acabamento | 7-9 | 1,25-2,5 |
| 40 | Torneamento desbaste Torneamento semi-acabamento Torneamento ultra-precisão | 5-6 | 0,08-1,25 |
| 50 | Torneamento desbaste Torneamento semi-acabamento Retificação desbaste | 7-9 | 0,63-2,5 |
| 60 | Torneamento desbaste Torneamento semi-acabamento Retificação desbaste Retificação acabamento | 5-6 | 0,08-0,16 |
| 70 | Torneamento desbaste Torneamento semi-acabamento Retificação desbaste Retificação semi-acabamento Lapidação | 3-6 | 0,008-0,63 |
| 80 | Torneamento desbaste Torneamento semi-acabamento Retificação desbaste Retificação acabamento Superacabamento | 3-5 | 0,008-0,16 |
| 90 | Torneamento desbaste Torneamento semi-acabamento Retificação desbaste Polimento | 4-5 | 0,003-1,25 |

2.1: Sub-operações de usinagem

Um processo de usinagem pode ser dividido em diferentes sub-operações, quais sejam:

- Desbaste. Grande parte do material da forma inicialmente assumida pode ser removida por meio de uma sub-operação de desbaste, ou seja, este tipo de operação visa dar à peça uma forma próxima à final de maneira mais rápida. Sendo assim, o importante é a taxa de remoção de material e não o acabamento ou a precisão dimensional. Ao final dessa operação deve-se prever material para ser removido nas sub-operações seguintes de semi-acabamento e/ou acabamento;
- Semi-acabamento. O objetivo desta sub-operação é, para superfícies menos críticas (com baixa tolerância ou rugosidade), obter o acabamento final. Já para superfícies críticas serve de preparação para a sub-operação de acabamento;
- Acabamento. Tem como objetivo garantir que superfícies críticas tenham a tolerância e acabamento superficial requeridos. Sendo assim, a quantidade de material removida numa sub-operação de acabamento é, em geral, mínima.

A divisão da sequência em sub-operações pode ser explicada com base nos seguintes motivos:

- Redução da influência de deformações da peça na tolerância das superfícies usinadas. Durante uma sub-operação de desbaste, devido às severas condições de corte utilizadas, a peça fica submetida a grandes esforços, os quais provocam deformações mecânica e/ou térmicas. As dimensões obtidas, após o desbaste, são então afetadas pela deformação da peça. Como os esforços devem ser menores numa sub-operação de semi-acabamento e ainda mais reduzidos numa sub-operação de acabamento, a deformação da peça, em cada etapa, será menor e assim as chances de se atingir as tolerâncias aumenta;
- Detectar possíveis defeitos internos no material o mais cedo possível. Peças obtidas por fundição podem conter defeitos internos revelados somente após a remoção das primeiras camadas de material. Se uma peça apresenta defeitos internos, que não podem ser corrigidos, todo trabalho de usinagem a peça será refugada. Assim, a detecção de prováveis defeitos deve ser executada o mais cedo possível. Em uma peça que apresente defeitos internos, estes serão revelados, muito provavelmente, durante as sub-operações de desbaste e, portanto, o agrupamento destas operações em uma etapa torna a detecção dos defeitos mais rápida;
- Evitar que superfícies acabadas sejam danificadas. Durante a fixação, o processo de corte e o transporte de uma peça, esta fica sujeita a choques que podem danificar suas superfícies. A execução de todas as sub-operações de desbaste e semi-acabamento antes do acabamento diminui esta possibilidade.

A decisão por dividir uma sequência de processo operações dependerá do grau de influência da deformação da peça na tolerância especificada. Para peças de baixas tolerâncias e baixa rigidez a divisão do processo em operações é de grande utilidade. Para peças de alta tolerância e de grande rigidez a divisão do processo em operações não é tão importante assim (inclusive deve ser evitada), já que eleva os custos de produção (pois aumenta a quantidade de *setups*) e não traz benefícios.

Um aspecto que não pode ser esquecido, durante a divisão do processo em operações, é a necessidade de acabamento das superfícies de referência para a fabricação mesmo durante o desbaste.

2.2: Concentração/Separação de operações

Um processo de usinagem é composto por um conjunto de operações ou sub-operações. Uma operação de usinagem se caracteriza quando se define a máquina, a ferramenta e os movimentos que esta fará, em relação à peça, para a remoção de material. Uma operação, por sua vez, se constitui de um conjunto de operações elementares. Uma operação elementar se dá quando não há mudança da ferramenta, da superfície usinada e das condições de corte utilizadas. Uma operação elementar pode ser composta por um conjunto de passes. Um passe é caracterizado por um movimento da ferramenta, em geral, na direção do avanço ao longo da superfície usinada.

Para a execução de uma operação necessita-se, basicamente, selecionar a máquina, fixar a peça, selecionar a ferramenta, acionar o eixo-árvore, ou a ferramenta, posicionar a ferramenta, avançar a mesma, remover o material, inspecionar as dimensões geradas. Há variações e atividades adicionais a estas, mas estas são as fundamentais. O final de uma operação se caracteriza pela execução de todas as sub-operações, operações elementares, remoção da peça do atual sistema de fixação e inspeção, deixando a peça pronta para a operações seguinte, na qual outra máquina-ferramenta, ou fixação serão necessárias. Assim, pode-se assumir que qualquer mudança de fixação da peça, ou de máquina-ferramenta, caracterizará uma outra operação.

Em seguida à seleção da máquina-ferramenta e uma definição preliminar das principais operações de usinagem tem-se uma etapa de concentração ou separação das mesmas, em geral visando minimizar as mudanças de fixação e de máquinas-ferramentas. A concentração de operações e de sub-operações deve ser sempre preferida para evitar mudanças de fixação e, por consequência, de faces de referência. Já a separação destas deve ser uma opção para simplificar a fabricação, ou seja, para evitar a fabricação de muitos detalhes antes da inspeção, possibilitando assim a identificação de inconformidades o mais cedo possível. A concentração de operações oferece as seguintes vantagens e demandas:

- Simplificação da programação/escalonamento da produção devido ao menor número de máquinas, fixações e, por conseguinte, de operações;
- Diminuição do tempo de manuseio e transporte das peças, pois o número de fixações também diminui;
- Utilização de equipamentos mais sofisticados;
- Necessidade de operadores de máquinas mais capacitados devido à maior complexidade das operações.

A separação de operações se traduz em operações mais simples e em grande número, o que oferece as seguintes vantagens:

- Menores exigências de equipamento e ferramental;
- Simplificação na preparação de máquinas;
- Escalonamento da produção mais complicado.

A decisão pela concentração, ou separação, das operações deve levar em conta:

1. As tolerâncias da peça. Para peças com baixas tolerância a usinagem deve ser dividida em sub-operações de desbaste, semi-acabamento e acabamento e em operações elementares com diversos passes visando minimizar o aumento de temperatura e as deformações;
2. Volume de produção. Para pequenos volumes de produção deve-se priorizar a concentração, visando simplificar a programação da produção. Quando se trabalha com grandes volumes de produção dois caminhos podem ser seguidos: separação das operações. É adotada em plantas com equipamentos tradicionais. A eficiência do processo se baseia na simplicidade das operações; Concentração das operações. É adotada quando se dispõe de equipamentos avançados (máquinas CNC). Em geral, a separação de operações conduz a ciclos de produção menores, mas aumenta o número de equipamentos e de ferramentas;
3. Tamanho e peso da peça. Para peças grandes e pesadas (difíceis de manusear) a concentração deve ser priorizada.

Em casos especiais, nos quais há operações de tratamento térmico, como: recozimento, normalização, envelhecimento, têmpera e revenido as operações de usinagem devem ser pensadas segundo as alterações que estes provocam nas características mecânicas do material. Tratamentos térmicos, em geral, deformam e alteram as dimensões das peças, assim como suas tolerâncias. Têmpera e revenimento aumentam a dureza, além das alterações já citadas. Assim, muitas vezes as operações de

usinagem devem, ou podem ser executadas antes ou depois dos tratamentos térmicos visando atingir as especificações da peça.

Além das operações de usinagem e de tratamentos térmicos, outras operações e sub-operações podem constar em um plano de processo. Operações como: inspeção dimensional, superficial, pesagem e limpeza também podem ser relacionadas, mesmo que não sejam de usinagem.

2.4: Seleção de máquinas-ferramentas

A máquina-ferramenta selecionada para uma dada operação influi tanto na precisão quanto na produtividade e no custo da usinagem de uma peça. Na seleção de uma máquina-ferramenta os seguintes fatores devem ser observados:

- A precisão de usinagem da máquina deve ser adequada às tolerâncias requeridas na especificação do desenho da peça;
- A área de trabalho da máquina deve apresentar dimensões compatíveis com as da peça que será usinada;
- A potência da máquina deve ser suficiente para a execução da operação;
- A produtividade da máquina deve ser adequada ao volume de produção desejado;
- As máquinas disponíveis devem ser, sempre que possível, utilizadas.

2.5: Seleção de ferramentas

A seleção de ferramentas de corte leva em conta aspectos como geometria, material, tamanho, rigidez, etc, os quais dependem, em grande parte, das operações e da estratégia adotada, das dimensões da superfície a ser trabalhada, do material da peça e da tolerância desejada. Sempre que possível deve-se optar por ferramentas padronizadas.

Se os resultados da utilização desta ferramenta não forem satisfatórios, ferramentas específicas são apresentadas para cada tipo de corte e material.

2.6: Seleção de dispositivos de fixação

Dispositivos de fixação são necessários para sujeitar a peça na máquina-ferramenta. Sempre que possível deve-se utilizar dispositivos de fixação padronizados como placas de 3 castanhas, pinças e prismas. Dispositivos específicos são utilizados somente quando absolutamente necessário, para garantir as tolerâncias ou aumentar a produtividade. Quando o volume de produção é pequeno e o

produto apresenta mudanças frequentes, dispositivos de fixação específicos tendem a aumentar os tempos de preparação e os custos de produção. Para a seleção dos dispositivos de fixação para usinagem, deve-se ainda pensar na rigidez da peça. Peças pouco rígidas não podem se sujeitar a altas forças de fixação, pois se deformam, ou quebram. Se a peça se deforma permanentemente, ou quebrar, durante a fixação se perde. Se a deformação for elástica, mas excessiva, isso se refletirá após a usinagem na tolerância final. Peças de baixa rigidez, mesmo corretamente fixadas, não pode estar sujeitas a condições severas de usinagem, pois essas podem arrancar, ou arrastar a peça fora do sistema de fixação. Desta forma, os sistemas de fixação devem ser selecionados com base na rigidez da peça, assim como as condições de usinagem compatíveis com o sistema de fixação e rigidez da peça. Por exemplo, peças na forma de tubos se fixadas por placas de 3 castanhas hidráulicas, passarão a ter 3 lóbulos após o torneamento cilíndrico externo. Se a extensão desses 3 lóbulos ultrapassar as tolerâncias dimensionais ou de forma do projeto, o sistema mais indicado será o de pinças.

2.7: Seleção de superfícies de referência para a fabricação

Normalmente, em um desenho de peça há uma “superfície de referência”, a qual é de importância para o correto funcionamento do produto. Esta superfície deve ser usada como referência para as cotas, assim como será para a fixação, ou inspeção, após a usinagem. O projetista do produto ao estabelecer a sua principal referência para as cotas e tolerâncias mais restritas, assume que na usinagem essa mesma referência será tomada pelo engenheiro. A referência no desenho pode ser um ponto, linha ou superfície a partir do qual a posição de um outro ponto, linha ou superfície é definida em um desenho de projeto. Na fabricação, se tal referência não for possível, o engenheiro de fabricação pode estabelecer a referência de fabricação. Esta pode ser um ponto, linha ou superfície a partir do qual a posição de uma superfície, que deve ser usinada. Esta é definida no croqui do planejamento de processo de fabricação. As dimensões no croqui do planejamento de processo são chamadas de dimensões de fabricação.

Pode-se também estabelecer a referência de fixação ou de posicionamento como sendo uma superfície da peça que define a sua posição, na direção da dimensão de fabricação, para a sua fixação na máquina-ferramenta. Assim, a posição da superfície a ser fabricada, em relação à ferramenta utilizada, depende da referência de fixação ou de posicionamento. Para a inspeção, quando for necessário pode-se estabelecer uma referência de medição. Esta é um ponto, linha ou superfície a partir do qual a posição de uma determinada superfície é medida após a usinagem. Nos planejamentos de processos que incluem a montagem, além da usinagem, pode haver a necessidade de uma referência de montagem, a qual é um ponto, linha ou superfície que determina a posição de uma peça em um conjunto, ou a posição de um subconjunto em uma máquina.

As dimensões de projeto, juntamente com suas tolerâncias, representam restrições a que cada elemento da peça está submetido. Uma dimensão de projeto é definida com base em requisitos funcionais de cada elemento. Já as dimensões de fabricação, com as respectivas tolerâncias, representam os requisitos que os processos de fabricação devem satisfazer. As dimensões de fabricação são elaboradas de tal forma que as dimensões de projeto sejam sempre garantidas. Pode-se, por motivos diversos, que serão abordados à frente no texto, estabelecer-se dimensões e tolerâncias diferentes daquelas do desenho de projeto do produto ou peça. Tais casos se tornam mais comuns em peças com tolerâncias muito pequenas e exigências maiores em termos de acabamento superficial.

Por outro lado, a seleção de métodos de posicionamento e medição estão diretamente relacionados às dimensões de fabricação. Na verdade, as referências de projeto, posicionamento e medição são conectadas como ilustrado na Figura 5.

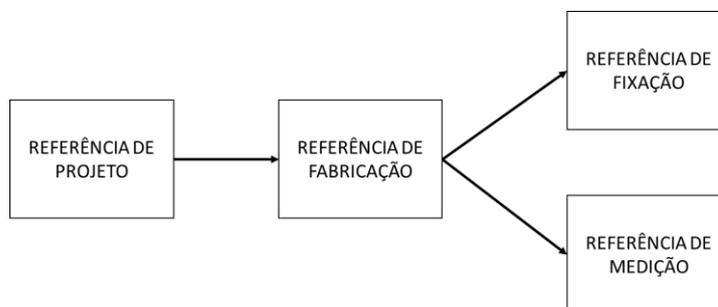


Figura 5: Relação entre referências de projeto, fabricação, fixação e medição nas superfícies de uma peça

A referência de fabricação é a superfície, ou detalhe, a partir do qual a posição da superfície que será usinada é cotada. Na operação de acabamento de uma superfície, se a referência de fabricação é a mesma da referência de projeto, então esta será obtida diretamente por meio da fabricação e a tolerância será de acordo com a máquina, fixação, ferramenta e operação selecionadas. Caso não ocorra a coincidência entre referências de fabricação e projeto, há então, a necessidade de realizar uma transferência de cotas. A Figura 6(a) mostra o desenho de projeto de uma peça. A Figura 6(b) mostra o desenho de fabricação da mesma peça. A cota C, assim como a sua tolerância, são determinadas por meio da transferência de cotas. Para exemplificar usemos as tolerâncias das cotas como: cota A = TolA, cota B = TolB e cota C = TolC.

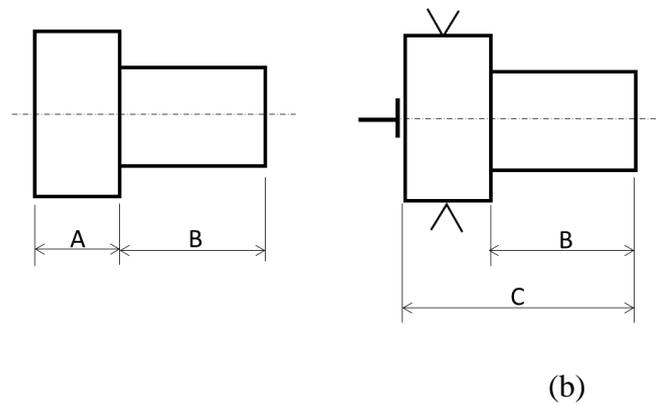


Figura 6: Situação onde as referências de projeto e fabricação não são as mesmas. (a) Projeto. (b) Fabricação

A cota A será obtida indiretamente por meio da cota C. As dimensões de fabricação devem garantir que as dimensões de projeto sejam atendidas. O valor da cota C e da sua tolerância podem ser então calculados da seguinte forma

$$C = A+B \quad (1);$$

$$\text{TolC} = \text{TolA} - \text{TolB} \quad (2);$$

Pode observar que houve uma redução na tolerância de fabricação (isto é, $\text{TolC} < \text{TolA}$). Isto indica que pode haver a necessidade de um processo de usinagem mais preciso, o que poderá levar a um maior custo. O mesmo raciocínio pode ser desenvolvido com relação à coincidência entre referências de fabricação/posicionamento e fabricação/medição. Desta forma, pode-se notar que não havendo coincidência entre referências de fabricação e referências de projeto, posicionamento e medição, poderá resultar em um estreitamento das tolerâncias na fabricação, o que deve ser evitado. Este é o chamado princípio de coincidência de referências e deve ser buscado desde a concepção do projeto para evitar possíveis aumentos nos custos de usinagem e de fabricação.

Na seleção de referências para a usinagem de operações finais, principalmente, (de acabamento) deve-se procurar adequadas referências de fabricação para a medição que sejam aquelas já observadas no projeto e estas superfícies devem ser aquelas de posicionamento. Tais procedimentos básicos aumentam as chances de sucesso no produto final.

2.8: Determinação de sobremetal em peças a serem usinadas

O sobremetal é o material que deve ser deixado para a remoção na operação seguinte. O sobremetal retirado em uma cada operação na sequência de usinagem de uma peça é chamado de sobremetal parcial, enquanto o sobremetal que é retirado durante toda a sequência do plano de processo, desde a matéria-prima, é chamado de sobremetal total. A cada operação em uma superfície está associada uma dimensão que deve ser obtida. O sobremetal a ser retirado numa operação depende das tolerâncias desta operação assim como das tolerâncias da operação anterior. A Figura 7 mostra uma superfície que tem dimensão L_{i+1} (com tolerância Tol_{i+1}) que será usinada até a dimensão L_i (com tolerância Tol_i). O valor nominal do sobremetal é Z_i (com as variações Z_{imin} e Z_{imax}).

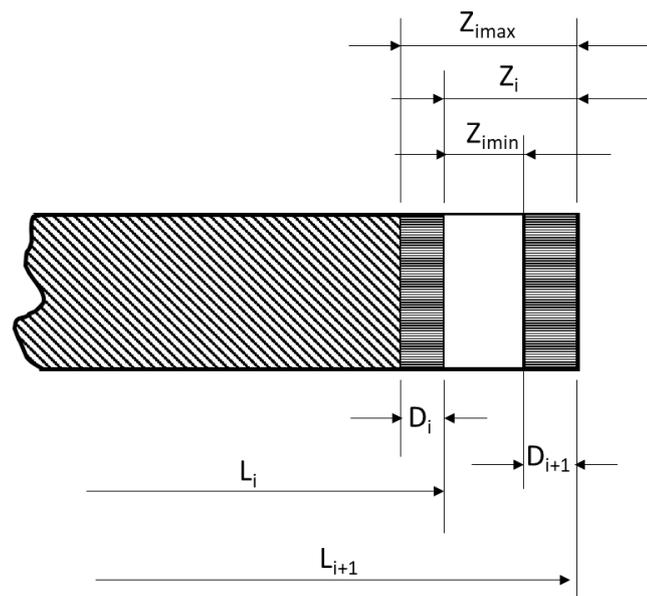


Figura 7: Superfície que será usinada mostrando dimensões e sobremetal parcial com respectivas tolerâncias.

O sobremetal adotado para as operações executadas numa superfície influencia de forma significativa a qualidade final e a produtividade do processo. Uma camada excessiva de sobremetal leva a um consumo exagerado de material, perda de tempo e de recursos, o que eleva os custos de produção e diminui a produtividade. Se a camada de sobremetal é muito fina, a rugosidade superficial e a camada afetada pela operação anterior não serão completamente removidas, o que pode levar a uma qualidade superficial inadequada.

A determinação de sobremetals deve considerar a qualidade superficial da operação anterior: todo processo de usinagem deixa, na superfície trabalhada, uma rugosidade e uma camada afetada pelo corte, que são proporcionais ao sobremetal utilizado. Cada operação posterior visa remover a rugosidade superficial e a camada afetada, produzida pela operação anterior, ao mesmo tempo em que aumenta a precisão dimensional e qualidade superficial. A qualidade e tolerância finais de uma

superfície são então obtidas com a redução gradual da camada afetada pelo corte e da rugosidade superficial de cada operação. A Figura 6 mostra um exemplo das dimensões obtidas pelas operações executadas numa superfície plana externa, juntamente com os sobremetais adotados. Outro fator a ser observado é a tolerância da operação anterior. Para garantir que o sobremetal de uma operação seja suficiente para remover a rugosidade superficial e a camada afetada pelo corte anterior, deve-se ter em mente a tolerância dimensional obtida na operação anterior. A Figura 6 mostra que o valor de $Z_{imin} (L_{i+1} - Tol_{i+1} - L_i)$ e, portanto depende da tolerância obtida na operação anterior (Tol_{i+1}).

Com o objetivo de facilitar a determinação de sobremetais, foram construídas tabelas de recomendações, como a Tabela 4, que traz valores de sobremetais a utilizar em operações de torneamento de superfícies cilíndricas externas.

Tabela 4 - Sobremetal recomendado no torneamento de uma superfície cilíndrica externa

| DIÂMETRO (mm) | SOBREMÉTAL NO DIÂMETRO | | | | | |
|------------------|------------------------|-----------|-----------------|-----------|-------------------------|---------------------------|
| | DESBASTE | | SEMI-ACABAMENTO | | OPERAÇÃO ANTERIOR | |
| | COMPRIMENTO (mm) | | | | TORNEAMENTO DA CASCA | TORNEAMENTO DE DEBASTE |
| | <=200 | >200 -400 | <=200 | >200 -400 | | |
| <=10 | 1,5 | 1,7 | 0,8 | 1,0 | IT14 | IT12-13 |
| >10-18 | 1,5 | 1,7 | 1,0 | 1,3 | | |
| >18-30 | 2,0 | 2,2 | 1,3 | 1,3 | | |
| >30-50 | 2,0 | 2,2 | 1,4 | 1,5 | | |
| >50-80 | 2,3 | 2,5 | 1,5 | 1,8 | | |
| >80-120 | 2,5 | 2,8 | 1,5 | 1,8 | | |
| >120-180 | 2,5 | 2,8 | 1,8 | 2,0 | | |
| >180-260 | 2,8 | 3,0 | 2,0 | 2,3 | | |
| >260-360 | 3,0 | 3,3 | 2,0 | 2,3 | | |

2.6: Determinação de dimensões e tolerâncias de usinagem

Cada dimensão de projeto, com as respectivas tolerâncias, é obtida por meio de uma série de operações de usinagem. A dimensão da operação final executada em uma dada superfície é determinada com base na dimensão estabelecida em projeto para aquela superfície. A dimensão de cada operação preparatória é determinada em função do sobremetal estabelecido para a operação seguinte, assim como da capacidade da máquina e operação selecionada. Assim, as dimensões são calculadas na ordem inversa da sua execução.

A Figura 8 mostra a relação entre as dimensões das operações e os sobremetais adotados para cada operação executada em uma superfície plana. L_1 é a dimensão da operação final (com tolerância TOL_1). L_2 , L_3 e L_4 são as dimensões das operações preparatórias (com tolerâncias TOL_2 , TOL_3 e TOL_4 , respectivamente). L_5 é a dimensão da matéria-prima bruta (com tolerância TOL_5). Observa-se que a dimensão de uma operação precedente é dada pela soma da dimensão e do sobremetal da operação atual ($L_2 = L_1 + Z_1$; $L_3 = L_2 + Z_2$, etc).

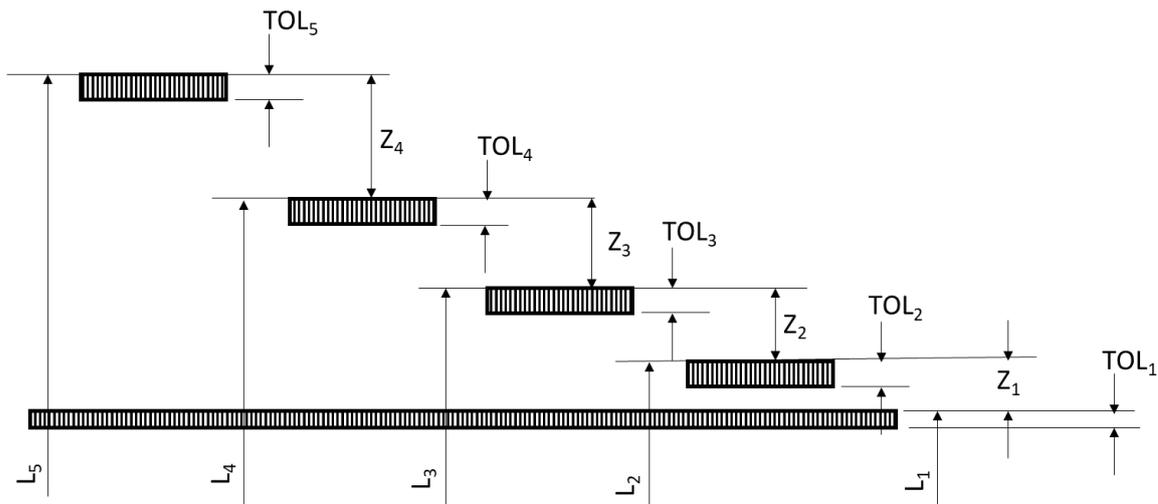


Figura 8: Dimensões das operações executadas numa superfície plana externa, juntamente com os sobremetais adotados

As tolerâncias de cada operação dependem do processo de usinagem utilizado. A tolerância da operação final é aquela especificada em projeto e a tolerância de cada operação preparatória é determinada em função da tolerância que pode ser obtida no processo escolhido para a sua execução. As tolerâncias escolhidas para um processo são de grande importância, pois, se forem muito estreitas, métodos precisos deverão ser utilizados, se forem muito amplas, ocorrerá uma grande variação no sobremetal da operação seguinte, o que pode impedir que se consiga a tolerância e qualidade superficial desejados.

2.7 Seleção de condições de corte

As condições de corte utilizadas numa operação de usinagem influenciam de forma bastante significativa a tolerância dimensional e a qualidade superficial obtidas, assim como na vida da ferramenta e produtividade de um processo. A seleção de condições de corte envolve a determinação de três parâmetros: profundidade e largura de usinagem (a_p e a_e), avanço (f) e velocidade de corte (v_c). O primeiro passo é a determinação da profundidade de a_p . Se for possível a execução da operação

em um único passe, então a_p pode ser determinada em função do sobremetal. Em operações de desbaste, a_p é função da potência da máquina-ferramenta, do comprimento da aresta de corte, da rigidez da peça, do método de fixação, etc. Desta forma, podem ser necessários vários passes de usinagem para a remoção do sobremetal, com profundidades de corte menores. A profundidade de corte está sempre associada à natureza da operação executada. Operações de semi-acabamento e acabamento geralmente são realizadas em um único passe devido ao pequeno sobremetal deixado.

Uma vez que a_p tenha sido determinada para uma operação de torneamento, deve-se selecionar um avanço (f) adequado. Se for o caso de uma operação de fresamento, largura de usinagem a_e deve vir a seguir, segundo as mesmas considerações para a profundidade. O avanço utilizado depende da capacidade da máquina-ferramenta (para operações de desbaste) e da qualidade superficial desejada (para operações de semi-acabamento e acabamento). Avanços nas faixas maiores, recomendadas pelas tabelas técnicas devem ser preferidos em desbaste e os menores para acabamento e semi-acabamento. Há também cálculos e recomendações de valores de avanço segundo a rugosidade superficial desejada.

Com os valores de a_p e f determinados segue-se ao cálculo da velocidade de corte (v_c), de acordo com a teoria da economia da usinagem, pode-se determinar a velocidade mais adequada à máxima produção, ou ao mínimo custo (Stemmer, 1993, Machado, 2012).

2.8 Determinação de tempos padrão

O tempo padrão é o tempo necessário para a execução de uma operação, sob condições bem determinadas. Os tempos padrão estabelecidos para as operações são a base para o planejamento da produção, levantamento de custos, etc. Inicialmente, são calculados com base nas condições de corte e das operações selecionadas. Posteriormente, deve-se aferir essas estimativas com base na produção real da peça.

2.9: Documentação do plano de processo

Depois que o conjunto de processos de fabricação foi previamente planejado, deve ser formalmente documentado. Inicia-se com dois documentos fundamentais: o Plano Macro e o Plano de Operações. Estes documentos são a base para a organização do chão-de-fábrica assim como para a realização de cada operação.

O Plano Macro mostra o processo de fabricação da peça como um todo. Relaciona os processos, as máquinas e ferramentas que devem ser utilizados em cada operação, assim como os tempos estimados. A Figura 9 mostra o esboço de um Plano Macro.

Plano de Processo de Fabricação (Macro)
SEP-285 – Práticas em Processos de Produção

Form-PP1

| | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|--|---------------------|-------------------------|-------------------------|------|----|
| código-peça | | classe-peça | denominação-da-peça | | | data | |
| código-peça-em-bruto | | denominação-/especificação-peça-em-bruto | | | | | |
| código-conjunto | | denominação-conjunto | | | volume-produção-da-peça | | |
| nome-do-processista-(aluno) | | | | equipe-(1) | | | |
| N | descrição-operação-(2) | | | máquina-código-nome-(1) | TP | TH | TM |
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |

Figura 9 – Exemplo de um formulário para um Plano Macro de Processos

Para cada peça a ser usinada, um Plano Macro deve ser adotado, a menos que situações muito particulares determinem de forma diferente.

Já o Plano de Operações é um documento detalhado para cada operação, que informa ao operador como cada operação deve ser executada. Contém informações tais como, a fixação da, a sequência de operações elementares, máquinas e ferramentas a utilizar, condições de corte que devem ser adotadas, etc. A Figura 10 ilustra um exemplo de formulário para o Plano de Operações.

Plano de Operações
SEP-285 – Práticas em Processos de Produção

Form-PP2

| | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------|--------------------|---------------------|---------|-----------------|----------------------|---------------|------|
| código-peça | | classificação-peça | denominação-da-peça | | código-conjunto | denominação-conjunto | | data |
| nº oper | Descrição da operação | | | máquina | volume-peça | processista-(aluno) | equipe | |
| N | descrição-sub-operação-(1) | | | | ferramental-(2) | | condições-(3) | T(4) |
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |

Figura 10: Exemplo de formulário para o Plano de Operações

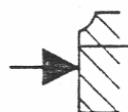
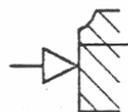
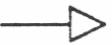
| Technology type | | Type of surface | Type of contact on surface | Function of technological element | | | | | |
|--|---|---|--|---|---|--|---|---|---|
| Function | Symbol | | Projections | | | | | | |
| Exact positioning Datum origin Definition of axis |  surface Triangle black | | support  | complete  | free  | | | | |
| Clamping of part Prepositioning Opposition against vibrations and deformations |  surface Triangle white | |  | | | | | | |
| Nature of surface | Symbol | | | | | | | | |
| Surface machined |  | | one line |  | | | | | |
| Surface raw |  | | two lines |  | | | | | |
| Technological type | Symbols | | | | | | | | |
| Fixed support |  | | |  | | | | | |
| Fixed centering |  | | |  | | | | | |
| System with clamping |  | | |  | | | | | |
| System with concentric clamping |  | | |  | | | | | |
| Irreversible fixed support |  | | |  | | | | | |
| Reversible support |  | | |  | | | | | |
| Sliding positioning |  | | |  | | | | | |
| Nature of contact | flat | curved | serrated | free | pan | swing bar | vee | fixed center | turning center |
| Symbol |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Figura 12 – Exemplos de indicações de fixação em croquis para operações de usinagem.

As indicações de fixação devem ser claras e devem fixar as peças em pontos que não interfiram com a operação em andamento. Também deve-se minimizar o número de fixações durante o processamento de uma peça, evitando os erros decorrentes das mudanças. Por último, as fixações devem, sempre que possível, refletir as superfícies de referência indicadas no projeto da peça (desenho técnico).

Para facilitar e muitas vezes se faz mesmo necessário, um formulário para um Plano de Preparação de Máquinas, existe. Este se faz impositivo quando se trata de máquinas complexas, ou mesmo alguma preparação muito diferente da usual. A Figura 13 mostra um exemplo desse formulário.

Plano de Preparação de Máquinas (1)
SEP-0285 – Práticas em Processos de Produção

Form PP5

| | | | | | |
|-------------|-----------------------|---------------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| código peça | classificação peça | denominação da peça | código conjunto | denominação conjunto | data |
| nº oper | Descrição da operação | | máquina | volume peça | processista (aluno) |
| Croquis | | | instruções | | |
| ferramentas | | | | | |

Figura 13 - Exemplo de formulário para o Plano de Preparação de Máquinas.

Adicionalmente também, para os casos especiais nos quais há uma complexidade maior do que o usual para seleção de ferramental, pode-se usar um resumo de todas as ferramentas e dispositivos necessários para cada operação. Isso é especialmente necessário em casos de sistema fabris maiores nos quais as tarefas de preparação de máquinas e de dispositivos é distribuída ou terceirizada. A Figura 14 mostra um exemplo de um formulário para esse fim.

Lista de Ferramental
SEP-0285 – Práticas em Processos de Produção

Form PP7

| | | | |
|-----------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| código peça | classificação peça | denominação da peça | data |
| código conjunto | denominação conjunto | volume peça | processista (aluno) |
| nº operação | Descrição da operação | máquina | equipe |
| Nº | Sistema ferramenta (1) / ferramenta | Ajuste (2) / Croquis (3) | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Figura 14 - Exemplo de formulário para o Lista de Ferramental.

Em seguida aos planos de usinagem segue-se com a documentação para o plano de inspeção. Muitas, embora a inspeção se dê após cada operação de usinagem, evitando-se assim maiores perdas

permitindo a usinagem de peças que deveriam ser refugadas ao longo da sequência de operações, ao final deve-se executar uma inspeção final. Nesta inspeção somente devem ser inspecionados aspectos que dependem da finalização da peça. Nestes casos, um plano de inspeção pode ser elaborado, como o que sugere o formulário da Figura 15.

Plano de Inspeção
SEP-0285 – Práticas em Processos de Produção

Form-PP6

| | | | | | | |
|-------------|-----------------------|---------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|--------|
| código peça | classificação peça | denominação da peça | código conjunto | denominação conjunto | data | |
| nº oper | Descrição da operação | | máquina | volume peça | processista (aluno) | equipe |
| | | | | instruções | | |
| | | | | ferramentas / dispositivos | | |

Figura 15 - Exemplo de formulário para o Plano de Inspeção.

Ao final, para produtos que necessitam de montagem, pode-se proceder com um plano de montagem a fim de instruir corretamente os executores deste procedimento. A Figura 16 mostra um exemplo para esse tipo de formulário.

Plano de Montagem (Macro)
SEP-0285 – Práticas em Processos de Produção

Form-PP8

| código conjunto | denominação conjunto | volume conjunto | data | | | |
|-----------------------------|------------------------|-----------------|---|----|----|----|
| nome do processista (aluno) | | equipe (1) | | | | |
| N | descrição operação (2) | Peça | estação de trabalho código -- nome (1) | TP | TH | TM |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Figura 16 - Exemplo de formulário para o Plano de Montagem.

Com essas informações e as adicionais, relacionadas no item 3 deste texto, pretende-se fornecer os primeiros passos para a elaboração de um Plano de Processos, dedicado especialmente a fabricação por usinagem, sem, no entanto, perder a generalidade para aplicações em outros campos da Manufatura.

3: Literatura para consulta adicional

Abdou, G.; Cheng, R. TVCAPP, Tolerance Verification in Computer-Aided Process Planning. International Journal of Production Research, v.31, n.2, p.393-411, 1993.

Alting, Leo; Zhang, Hong-Chao. Computer Aided Process Planning: the State-of-the-Art Survey. International Journal of Production Research, v.27, n.4, p.553-585, 1989.

Alvarez, A.J., Estudo dirigido: Métodos para Projeto, Planejamento do Processo e Fabricação de peças Assistidos por computador, Apostila curso de Pós graduação em Engenharia Mecânica, 2001.

Boogert R., Tool management in computer aided process planning, PhD thesis, University of Twente, 1994.

Boothroyd G., Making it simple, design for assembly, Mechanical Engineering, Feb. 1988, 28-30.

Butzke, A.U.; Ferreira, J.C.E. A Manufacturing Support System for Industrial Part Process Planning.

Chang T.C., Anderson D.C., Mitchell O.R., QTC - An integrated design/manufacturing/inspection system for prismatic parts, Computers in Engineering Conference, CIE '88, 1988, 417 - 426.

Chang T-C., Expert process planning for manufacturing, Addison Wesley, Reading, 1990.

Chang, T.C., Wysk R.A. e Wang, H.P. Computer Aided Manufacturing, Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, W.J. Fabrycky e J.H. Mize (eds.), 2ns Edition, 1998.

Cho, H.; Derebail, A.; Hale, T. *et al.* A Formal Approach to Integrating Computer-Aided Process Planning and Shop Floor Control. ASME Journal of Engineering for Industry, v.116, p.108-116, 1994.

Cutkosky M.R., Tenenbaum J.M., Muller D., Features in process based design, ASME Computers in Engineering (CIE) Conference, San Francisco, 1988, 557-562.

Deere & Company, Part Features for Process Planning, Moline Illinois, 1986.

Detand J., A computer aided process planning system generating non-linear process plans, Catholic University of Leuven, Belgium, PhD thesis, 1993.

Erve A.H. van 't, Computer Aided Process Planning for Part Manufacturing, an expert system approach, PhD thesis, University of Twente, 1988.

Ferreira, J.C.E., Planejamento do Processo Assistido por Computador - CAPP, Apostila, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 1996.

Ferreira J. C. E., Wysk, R. A., An Investigation of the Influence of Alternative Process Plans on Equipment Control, Journal of Manufacturing Systems, Vol.19/N.6, 2001, 393-406.

Finger S., Dixon J.R., A review of research in engineering design, Part I: Descriptive, prescriptive and computer based models of design processes, Research in Engineering Design, Vol.1, 1989, 51-67.

Finger S., Dixon J.R., A review of research in engineering design, Part II: , Representations, analysis and design for the Lifecycle, Research in Engineering Design, Vol.1, 1989, 121-37.

Groover, M. Automation, Production System, and Computer Integrated Manufacturing, 1987, Prentice Hall.

Halevi, G. e Weill, R.D., "Principles of Process Planning: A Logical Approach", Chapman & Hall, 1995.

Hashmi, K., Baradie, M. A., Ryan, M., Fuzzy Logic Based Intelligent Selection of Machining Parameters, Computers in Industry, 35, 1998, 571-574.

Houten F.J.A.M. van, PART: a computer aided process planning system, PhD thesis, University of Twente, Enschede, 1991.

ISO 1101, Technical drawings - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out - Generalities, definitions, symbols, indications on drawings, 1983.

ISO TC184/WG3 N324 -T7, ISO 10303 - Part 224 Mechanical Product Definition for Process Planning Using Form Features, South Carolina, EUA, 1994.

Jonkers F., A software architecture for CAPP systems, PhD thesis, University of Twente, 1992.

Kals H.J.J., Houten F.J.A.M. van, Erve A.H. van't, Integrated Process Planning, Proceedings of the Seminar on the automated factory approaching the year 2000 (La Fabbrica Automatica colle Soglie del 2000, Risultati E prospettive della Ricerce), Pisa, 23-24 Octobre, 1989.

Kiritsis, D., Porchet, M., A Generic Petri net model for dynamic process planning and sequence optimization, *Advances in Engineering Software*, Vol. 25, 1996, 61-71.

Kramer, G.A., Solving geometric constraint systems, a case study in kinematics, The MIT Press, Cambridge,

Lenderink A., Kals H.J.J., The integration of process planning and machine loading in small batch part manufacturing, *Robotics & Comp. Int. Manuf.*, Vol. 10, no. 1/2, 1993, 89-98.

Lenderink A., The integration of process and production planning in small batch part manufacturing, PhD thesis, University of Twente, 1994.

Maraghy H.A., Gu P.H., Expert system for inspection planning, *Annals of the CIRP*, vol.36, 1, 1987, 85-89.

Maraghy H.A., Maraghy W. H., A system for modeling geometric tolerances for mechanical design, *Proc. 3rd CIRP seminar on Comp. Aided Tolerancing*, Cachan (F), April 1993, 11-24.

Mentyle M., Opas J., Puhakka J., Generative process planning of prismatic parts by feature relaxation, in: *Advances of design Automation 1989*, presented at the ASME DDesign Technical Conferences - 15th Design Automation Conference, Montreal Quebec, Canada, 1989, 49-60.

Mentyle M., Directions for research in product modeling, in *Computer applications in production engineering*, eds. Kimura F., Rolstadas A., Elsevier Science Publishers (North Holland), IFIP, 1989, 71 - 85.

Rezende, D. F., Planejamento de Processo de Fabricação Assistido por Computador Através de um Sistema Especialista Baseado na Tecnologia de Features: Um Modelo de Desenvolvimento Voltado Para a Realidade Industrial, *Dissertação de Mestrado*, UFSC, 1996.

Salomons O.W., Two protocol studies to investigate redesign and process planning, University of Twente, internal report no. PT 417, 1992.

Silva, A. D., Uma Metodologia para Otimização Automática de Parâmetros de Usinagem. Florianópolis, 1994. Tese (Doutorado em Fabricação Mecânica-Planejamento de Processos). Universidade Federal de Santa Catarina.

Srinivasan V., Jayaraman R., Geometric tolerancing: II. Conditional tolerances, *IBM J. Res. & Developm.*, Vol. 33, No. 2, 1989, 105-123.

Stemmer, G. E. Ferramentas de Corte I. 3. ed. Florianópolis : Editora da UFSC, 1993.

Turner J.U., A feasibility space approach for automated tolerancing, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, 1993, 341-345.

Ullman D.G., Dietterich T.G., Stauffer L., A model of the mechanical design process based on empirical data, Artificial Intelligence for Engineering, Design, analysis and manufacturing, vol.2, 1988, 33 - 52.

Ullman D.G., Wood S., Craig D., The importance of drawing in the mechanical design process, Comput. & Graphics, Vol.14, No.2, 1990.

Ullman D.G., Design histories: archiving the evolution of products, proceedings of the DARPA Workshop on Manufacturing, February 5-6, Salt Lake City, Utah, 1991.

Ullman D.G., The mechanical design process, McGraw Hill, 1992.

Ullman D.G., A new view on function modeling, International Conference on Engineering Design, ICED'93, The Hague, August 17-19, Vol.1, 1993, 21-29.

Vandenbrande, Jan H.; Requicha, Aristides A.G. Geometric Computation for the Recognition of Spatially Interacting Machining Features. In: SHAH, Jami J.; MÄNTYLÄ, Martti; NAU, Dana S. Advances in Feature Based Manufacturing. Amsterdam : ELSEVIER, 1994. p.83-106.

Van't A.H., Generative Computer Aided Process Planning for Part Manufacturing - An Expert System Approach, PhD thesis, University of Twente, Enschede, 1985.

Vin L.J. de, Vries J. de, Streppel A.H., Kals H.J.J., PART-S, a CAPP system for small batch manufacturing of Sheet metal components, Manufacturing Systems, (proceedings of the CIRP Seminars), Vol. 22, No. 2, 1993, 133 - 141.

Vin L.J. de, Streppel A.H., Ittersum E. van, Kals H.J.J., Tolerancing and the accuracy of bending operations in sheet metal part manufacturing, proc. of the IMC-10 conference, Galway, September 8-10, 1993, 423-436.

Vin L.J. de, Computer Aided Planning of Bending Operations for Sheet Metal Components, PhD thesis, University of Twente, 1994.

154

Vin L.J. de, Streppel A.H., Kals H.J.J., Tolerancing and sheet bending in small batch part manufacturing, Annals of the CIRP, Vol.43/1, 1994, 421-424.

Vries T.J.A. de, Conceptual design of controlled electro-mechanical systems, a modeling perspective, PhD thesis, University of Twente 1994.

Vries J. de, Roosmalen A.A.H.M., Streppel A.H., Kals H.J.J., Planning and nesting in small batch sheet metal manufacturing, *Manufacturing Systems*, (proceedings of the CIRP Seminars), vol. 23, 1994.

Vries J. de, Salomons O.W., Streppel A.H., Vin L.J. de, Kals H.J.J., CAD-CAPP integration for sheet metal products, proceedings 2nd. Int. Conf. on Sheet Metal, Belfast, 1994, 75-86.