

Igor Cézar Pereira

ANÁLISE DO TORQUE E DA FORÇA AXIAL, EM  
DIFERENTES CONDIÇÕES DE CORTE DURANTE O  
ROSQUEAMENTO DE DOIS FERROS FUNDIDOS  
CINZENTOS (CrCuSn E CrCuSnMo) E UM FERRO  
FUNDIDO VERMICULAR DA CLASSE 350



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2010

Igor Cézar Pereira

ANÁLISE DO TORQUE E DA FORÇA AXIAL, EM DIFERENTES  
CONDIÇÕES DE CORTE DURANTE O ROSQUEAMENTO DE DOIS  
FERROS FUNDIDOS CINZENTOS (CrCuSn E CrCuSnMo) E UM  
FERRO FUNDIDO VERMICULAR DA CLASSE 350

**Dissertação** apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte  
dos requisitos para a obtenção do título de  
**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de  
Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

**Uberlândia – MG**

**2010**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

---

- P436a    Pereira, Igor César, 1983-  
          Análise do torque e da força axial, em diferentes condições de corte durante o rosqueamento de dois ferros fundidos cinzentos (CrCuSn e CrCuSnMo) e um ferro fundido vermicular da classe 350 [manuscrito] / Igor César Pereira. - 2010.  
          115 f. : il.
- Orientador: Márcio Bacci da Silva.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
          Inclui bibliografia.
1. Materiais - Teses. 2. Roscas (Mecânica) - Teses. 3. Processos de fabricação - Teses. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

---

CDU: 620.178.162



Sonhe com aquilo que você quiser.

Vá para onde você queira ir.

Seja o que você quer ser, porque você possui apenas uma vida e nela só temos uma chance de fazer aquilo que queremos.

Tenha felicidade bastante para fazê-la doce.

Dificuldade para fazê-la forte.

Tristeza para fazê-la humana. E esperança suficiente para fazê-la feliz [...].

Sonhe – Clarice Lispector.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que estimo, mas em especial dedico este trabalho a quem de fato o merece, minha mãe Juselem a quem tanto amo.

## AGRADECIMENTOS

- À Deus e a minha mãe Juselem Alves Ferreira Pereira em primeiro lugar, aos dois obrigado pela dedicação, paciência nas horas difíceis e principalmente pelo amor incondicional.
- Às minhas irmãs Fernanda Alves Ferreira Pereira e Alessandra Alves Ferreira Pereira, por estarmos sempre juntos, independente das dificuldades.
- À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar um sonho (este curso).
- Em especial ao professor Márcio Bacci da Silva, que antes de ser um orientador é um amigo, que me ensinou e ajudou em inúmeros momentos.
- Ao professor Álisson Rocha Machado e Rosemar Batista da Silva, pelo apoio e conhecimento passado.
- Ao meu tio Raul Pereira e minha tia Sirlei Pereira da Silva, obrigado pelo carinho, exemplo e por toda a ajuda neste caminho difícil mais recompensador. Isto não se pode agradecer a altura, mesmo assim muito obrigado.
- Aos amigos José Machado e Cleidiovani, Cláudio Luis Camargo de Oliveira, Carlos Mauricio da Silveira e Ilma Divina Borges da Silveira, estes que sempre pude contar seja nos momentos bons ou ruins, estiveram sempre presentes. Obrigado de coração.
- Aos amigos do LEPU, Rodrigo Heriques Lopes, Vitor Tomaz Guimarães Naves, Almir Kazuo, Sebastião Gonçalves Lima Junior e Ildeu Lúcio Siqueira que com dicas, discussões sobre usinagem e até mesmo piadas, ajudaram a superar dificuldades.
- Ao amigo e companheiro de pesquisa Paulo Rosa Da Mota, muito obrigado pelas dicas, informações e paciência em transmitir sua experiência sobre o processo de rosqueamento.
- Ao grande amigo Fernando Martins Ferreira, quem me ajudou desde a graduação até este momento. Exemplo de humildade, dedicação e caráter.
- Aos professores do programa de pós-graduação, pela dedicação com a qual fazem com que este programa seja tão bem conceituado.
- À Tupy pelo fornecimento dos corpos de prova.
- À OSG por disponibilizar ferramentas e seu laboratório para pesquisa.

- À CAPES e a FAPEMIG pelo apoio financeiro. Ao CNPq pelo apoio financeiro e pela disponibilização de uma bolsa de mestrado.
- À todos que contribuíram de alguma maneira para a cumprimento de mais esta etapa em minha vida.

Pereira, I. C. **Análise do Torque e da Força Axial, em Diferentes Condições de Corte Durante o Rosqueamento de Dois Ferros Fundidos Cinzentos (CrCuSn e CrCuSnMo) e um Ferro Fundido Vermicular da Classe 350.** 2010. 100p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### **Resumo**

A operação de rosqueamento interno é um processo de alta complexidade se comparado a outros processos convencionais, como furação, fresamento e torneamento. Além disso, existe pouca investigação a respeito da influência das condições de corte. Assim, um dos objetivos deste trabalho é buscar maiores conhecimentos sobre os fenômenos envolvidos no rosqueamento interno com macho de corte. Os materiais da peça utilizados neste trabalho também são relativamente novos e com grande aplicação na indústria automobilística, principalmente na fabricação de cabeçotes de motores de combustão interna. Neste trabalho foram utilizados machos de corte de aço-rápido com três canais retos (M6 X 1) revestidos com TiAlN (FUTURA). Foram analisadas a influência de diferentes condições de corte, onde foram variadas a velocidade de corte, forma de aplicação de fluido de corte e tipo de fluido. Os testes foram realizados em três materiais diferentes: ferro fundido vermicular da classe 350 e dois ferros fundidos ligados (CrCuSn e CrCuSnMo). Os resultados mostram a diminuição do torque e aumento da força axial com a velocidade de corte. O ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn foi o que apresentou a pior usinabilidade, considerando o torque, quando usinado a seco, independente da velocidade de corte usada. Neste trabalho também foram verificadas algumas características importantes do processo, como a influência no torque e força de avanço devido à alteração no avanço axial, erro de concentricidade do macho em relação ao pré-furo, geometria da ferramenta de corte, revestimento do macho de corte e comprimento roscado.

**Palavras Chaves:** *Rosqueamento, Ferro Fundido Cinzento Ligado, Ferro Fundido Vermicular, Torque, Força de Corte.*

Pereira, I. C. **Analysis of Torque and Axial Force in Different Cutting Conditions When Tapping Alloyed Gray Cast Iron (CrCuSn e CrCuSnMo) and Compacted Graphite Iron ISO 350**. 2010. 100p. Master Dissertation, Federal University of Uberlândia. Uberlândia, MG, Brazil.

### **Abstract**

The tapping operation is a complex cutting process when compared to other conventional processes like drilling, milling and turning. Furthermore, there are few publications about the effect of cutting conditions for this operation. For that reason, one of the objectives of this work is to gather information and knowledge about the phenomenon involved in the tapping operation. The workpiece materials used in this work are also the result of recent development of the manufacturing industry and are applied mainly in the production of heads for engine motors. The main objective of this work is to compare the torque and axial force when machining three different materials, two alloyed gray cast iron (CrCuSn and CrCuSnMo) and one compacted graphite iron. It was used high speed cutting tools with three straight flutes (ISO M6x1) TiAlN coated. It was investigated the effect of cutting speed, form of application and the type of the cutting fluid. The results show the decrease of torque and increase of axial force with cutting speed. The CrCuSn alloyed gray cast iron was the most difficult to cut material, concerning torque, when no cutting fluid is applied. It was also investigated in this work the effect of axial feed rate, concentricity error of tap and hole, tap geometry, type of coating and machined length on torque and axial force.

**Keywords:** *Tapping, Alloyed gray cast iron, Compacted graphite iron, Cutting forces.*

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Letras Latinas

|                        |                                                                      |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| ABNT.....              | Associação Brasileira de Normas Técnicas                             |
| APC.....               | Aresta Postiça de Corte                                              |
| CBN.....               | Nitreto Cúbico de Boro Policristalino                                |
| CNC.....               | Comando Numérico Computadorizado                                     |
| CrC.....               | Carboneto de cromo                                                   |
| CrN.....               | Nitreto de cromo                                                     |
| CVD.....               | "Chemical vapour deposition"                                         |
| f.....                 | Avanço de corte                                                      |
| FC 250.....            | Ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn                              |
| Fe <sub>3</sub> C..... | Cementita ou Carboneto de ferro                                      |
| FUTURA.....            | Denominação comercial para revestimento de multicamadas de TiN/TiAlN |
| HB.....                | Dureza Brinell                                                       |
| HSS.....               | Aço rápido M7 convencional                                           |
| HSS-E.....             | Aço rápido especial M3 com alto teor de vanádio                      |
| HSS-NI.....            | Aço rápido M7 convencional com tratamento superficial de nitretação  |
| HSS-PM.....            | Aço rápido fabricado pelo processo da metalurgia do pó               |
| L/D.....               | Relação do comprimento (L) em função do diâmetro (D)                 |
| LEPU.....              | Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem                         |
| M6 X 1.....            | Rosca métrica com 6 milímetros de diâmetro e passo igual a 1 mm      |
| Mn.....                | Manganês                                                             |
| Si.....                | Silício                                                              |
| Cr.....                | Cromo                                                                |
| Ni.....                | Níquel                                                               |
| Mo.....                | Molibdênio                                                           |
| Sn.....                | Estanho                                                              |
| S.....                 | Enxofre                                                              |
| W.....                 | Tungstênio                                                           |
| Ti.....                | Titânio                                                              |
| Cu.....                | Cobre                                                                |
| P.....                 | Fósforo                                                              |

|                       |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| MQF.....              | Mínima Quantidade de Fluido   |
| PVD.....              | "Physical Vapour Deposition"  |
| TaC.....              | Carboneto de Tântalo          |
| TiC.....              | Carboneto de Titânio          |
| TiCN.....             | Carbonitreto de Titânio       |
| TiN.....              | Nitreto de titânio            |
| TiAlN.....            | Nitreto de titânio e alumínio |
| VB <sub>B</sub> ..... | Desgaste de flanco médio      |
| V <sub>c</sub> .....  | Velocidade de corte           |
| WC.....               | Carboneto de Tungstênio       |

## SUMÁRIO

|                                                                    |             |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Resumo.....</b>                                                 | <b>viii</b> |
| <b>Abstract.....</b>                                               | <b>ix</b>   |
| <b>Lista de Símbolos e Abreviaturas.....</b>                       | <b>x</b>    |
| <b>I – Introdução.....</b>                                         | <b>01</b>   |
| <b>II – Revisão Bibliográfica.....</b>                             | <b>03</b>   |
| <b>2.1 Processos de Usinagem.....</b>                              | <b>03</b>   |
| <b>2.2 Características e Tipos de Rosca .....</b>                  | <b>04</b>   |
| <b>2.3 Rosqueamento.....</b>                                       | <b>07</b>   |
| 2.3.1 Rosqueamento Externo.....                                    | 07          |
| 2.3.2 Rosqueamento Interno.....                                    | 09          |
| 2.3.3 Tolerância .....                                             | 11          |
| 2.3.4 Sincronismo.....                                             | 14          |
| <b>2.4 Geometria da Ferramenta.....</b>                            | <b>15</b>   |
| <b>2.5 Materiais para Ferramenta.....</b>                          | <b>21</b>   |
| 2.5.1 Aço Rápido.....                                              | 22          |
| 2.5.2 Metal Duro.....                                              | 24          |
| <b>2.6 Tipos de Revestimentos e Tratamentos Superficiais .....</b> | <b>26</b>   |
| <b>2.7 Fluido de Corte.....</b>                                    | <b>30</b>   |
| <b>2.8 Ferro Fundido.....</b>                                      | <b>33</b>   |
| 2.8.1 Características do Ferro Fundido Cinzento.....               | 37          |
| 2.8.2 Características do Ferro fundido Vermicular.....             | 42          |
| <b>III – Procedimentos Experimentais.....</b>                      | <b>45</b>   |
| <b>3.1 Materiais Utilizados.....</b>                               | <b>45</b>   |
| 3.1.1 Preparação dos Corpos de Prova.....                          | 48          |
| 3.1.2 Ferramentas Utilizadas.....                                  | 51          |
| 3.1.3 Fluido de Corte.....                                         | 52          |

|                                                                                                   |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>3.2 Equipamentos Utilizados.....</b>                                                           | <b>53</b>     |
| 3.2.1 Máquina-Ferramenta.....                                                                     | 53            |
| 3.2.2 Sistema de Fixação dos Corpos de Prova.....                                                 | 54            |
| 3.2.3 Equipamentos para Medição de Força e Torque.....                                            | 55            |
| <b>3.3 Metodologia.....</b>                                                                       | <b>56</b>     |
| <br><b>I V – Resultados e Discussões.....</b>                                                     | <br><b>60</b> |
| <b>4.1 Torque Durante o Rosqueamento.....</b>                                                     | <b>60</b>     |
| <b>4.2 Força na Direção Axial.....</b>                                                            | <b>62</b>     |
| <b>4.3 Efeito da velocidade de corte na força e torque para os materiais A, B e C a seco.....</b> | <b>65</b>     |
| <b>4.4 Efeito da Lubrificação.....</b>                                                            | <b>68</b>     |
| <b>4.5 Comparação da Usinabilidade para os Três Materiais.....</b>                                | <b>74</b>     |
| <b>4.6 Características do Processo.....</b>                                                       | <b>75</b>     |
| 4.6.1 Velocidade de Corte.....                                                                    | 75            |
| 4.6.2 Efeito da Variação do Passo.....                                                            | 81            |
| 4.6.3 Revestimentos.....                                                                          | 84            |
| 4.6.4 Comprimento Roscado.....                                                                    | 85            |
| 4.6.5 Excentricidade.....                                                                         | 88            |
| 4.6.6 Influência do número de canais dos machos de corte nas forças axiais e no torque.....       | 91            |
| <br><b>V – Conclusões.....</b>                                                                    | <br><b>93</b> |
| <br><b>VI – Proposta para Trabalhos Futuros.....</b>                                              | <br><b>95</b> |
| <br><b>VII – Referências Bibliográficas.....</b>                                                  | <br><b>96</b> |

# CAPÍTULO I

## Introdução

Devido ao enorme esforço da sociedade em amenizar e até mesmo acabar com os efeitos da poluição, para que se possa melhorar a qualidade de vida atual e futura, as políticas ambientais e até mesmo a cobrança do cidadão comum sobre as indústrias vem aumentando significativamente. Para isso as indústrias fazem cada vez mais investimentos para reduzir a emissão de gases e lixo para o meio ambiente. Uma grande evolução na indústria automobilística neste sentido, por exemplo, foi a criação de carros elétricos e o uso de combustíveis alternativos. Porém essa tecnologia ainda levará certo tempo para atingir a grande massa consumidora e um tempo maior ainda para substituir motores a diesel.

Outra significativa evolução no setor automobilístico, em especial na área de materiais utilizados, e que ajuda a diminuir a poluição, com um melhor rendimento térmico do motor, é a utilização de materiais como ferros fundidos cinzentos ligados e um material mais recente o ferro fundido vermicular na fabricação de blocos e cabeçotes de motores. Esse material consegue substituir o ferro fundido cinzento com propriedades próximas ou até mesmo superiores. A empresa Tupy, uma das principais fabricantes de blocos de motores e cabeçotes, vêm utilizando este material, com resultados extremamente satisfatórios. Motores antes fabricados com o ferro fundido cinzento, hoje são fabricados com o vermicular, o que permite uma redução de até 15% do seu peso, associado às melhores propriedades térmicas, que aumentam o rendimento do motor e permite uma menor emissão de poluentes e menores consumos (XAVIER, 2003).

Entretanto, todas estas vantagens têm seu custo, já que do ponto de vista da fabricação, a alteração do material da peça pode causar prejuízo à produção. O ferro fundido cinzento tem como principal característica uma ótima usinabilidade. Entre os ferros fundidos é o mais fácil de ser usinado. A substituição pelo ferro fundido vermicular causa inúmeros problemas como

um maior tempo de produção, menor vida da ferramenta (devido a sua maior resistência mecânica o que acelera os mecanismos de desgaste) e principalmente um maior custo de produção, o que aumenta o custo do produto final (MOCELLIN, 2002).

Para solucionar, ou ao menos minimizar estes problemas, faz-se necessário a utilização de ferramentas revestidas e ferramentas de maior resistência mecânica para aumentar a vida. Este problema vem despertando nos últimos tempos o interesse dos principais laboratórios de pesquisa em usinagem principalmente no processo de fresamento em altas velocidades de corte. No entanto, um processo tão utilizado na fabricação de blocos de motores, que é o rosqueamento interno, não poderia ficar de fora destas pesquisas (DA MOTA, 2009).

O principal objetivo deste trabalho é fornecer informações importantes para melhor entendimento do referido processo de rosqueamento interno com macho de corte. Para tanto, pretende-se avaliar as forças de corte e torque em diferentes condições de usinagem durante o rosqueamento de dois ferros fundidos cinzentos ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e um ferro fundido vermicular da classe 350. O desempenho do processo será avaliado através da obtenção das forças de usinagem e torque utilizando dinamômetro rotativo por telemetria. Neste trabalho também será avaliado a influência de alguns parâmetros no processo, entre eles a forma de aplicação do fluido de corte e o revestimento da ferramenta.

A seguir são apresentadas as etapas deste trabalho. No capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais temas envolvidos nesta pesquisa: processo de rosqueamento, característica da ferramenta, material da ferramenta, revestimentos usados nas ferramentas, características dos materiais utilizados nos ensaios, dentre outros.

No capítulo III será descrita a metodologia adotado para execução dos ensaios e também os equipamentos e máquinas envolvidas nos testes.

No capítulo IV são apresentados os resultados e discussão sobre as possíveis causas e efeitos dos fenômenos analisados. Já o capítulo V é a conclusão do que foi discutido no capítulo IV. No capítulo VI serão apresentadas sugestões sobre possíveis trabalhos futuros.

Por fim, no capítulo VII virão as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

# CAPÍTULO II

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Processos de Usinagem

A usinagem é o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavaco algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas (TRENT; WRIGHT, 2000). Isso demonstra a importância da usinagem e de suas pesquisas para a evolução industrial.

De acordo com Machado et al, (2009), a usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático e que envolve um elevado número de variáveis. Para Shaw (1984), é praticamente impossível prever o desempenho no corte dos metais. No entanto, o estudo e interpretação de maneira adequada contribuem para o entendimento do processo, este é o procedimento mais próximo da capacidade de prever seu comportamento (MACHADO et al, 2009). Logo se faz necessário estudar os processos de usinagem e suas particularidades.

Os processos mais comuns de usinagem convencional podem ser divididos da seguinte maneira:

- ✓ Torneamento.
- ✓ Aplainamento.
- ✓ Furação.
- ✓ Alargamento.
- ✓ Mandrilamento.
- ✓ Fresamento.
- ✓ Brochamento.
- ✓ Retificação.
- ✓ Brunimento.

- ✓ Rosqueamento.

Para este trabalho o tema será o último, ou seja, o rosqueamento. Este é um processo muito específico, utilizado apenas para fabricação de roscas. No entanto, é um dos processos mais complexos em termos de ferramentas utilizadas e máquina-ferramenta, apesar de ter a possibilidade de operação manual. Neste processo, a ferramenta utilizada depende do tipo de rosca a ser fabricada, o material a ser usinado, dentre vários outros. A seguir serão apresentadas inicialmente algumas características das roscas.

## 2.2 Características e tipos de roscas

A rosca é um elemento de união e de transmissão de movimento muito comum, sendo a melhor opção em uniões que se deseja desfazer com maior facilidade sem causar danos às partes unidas. Como todo componente a rosca, têm seus elementos básicos que irão aparecer independente do seu tipo e formato. Estes elementos serão apresentados abaixo:

- ✓ Ângulo da Rosca: Ângulo formado pelos flancos adjacentes do perfil, num plano axial.
- ✓ Crista: Superfície do filete de rosca que une dois flancos consecutivos.
- ✓ Raiz: Superfície do filete de rosca que une dois flancos adjacentes.
- ✓ Flanco: Uma das faces laterais de um filete de rosca, que liga a crista com a raiz.
- ✓ Passo: Distância medida paralelamente ao eixo, entre dois pontos correspondentes de dois perfis adjacentes, no mesmo plano axial e do mesmo lado do eixo.
- ✓ Diâmetro Maior: Nas roscas cilíndricas é o diâmetro do cilindro circunscrito à crista de uma rosca externa ou à raiz de uma rosca interna.
- ✓ Diâmetro Efetivo: Nas roscas cilíndricas é o diâmetro do cilindro coaxial imaginário cuja superfície intercepta os perfis dos filetes em uma posição tal que a largura do vão nesse ponto é igual à metade do passo. Nas roscas cujos filetes têm perfis perfeitos a intersecção se dá em um ponto onde a espessura do filete é igual à largura do vão.
- ✓ Diâmetro Menor: Nas roscas cilíndricas é o diâmetro do cilindro inscrito na raiz de uma rosca externa ou na crista de uma rosca interna.
- ✓ Altura do Filete: Distância medida perpendicularmente ao eixo da rosca e compreendida entre os cilindros ou cones que tangenciam as cristas e as raízes dos filetes.

✓ **Avanço:** É a distância axial percorrida em uma rotação completa. Na rosca de uma entrada o avanço é igual ao passo, já na de duas entradas é o dobro do passo e assim sucessivamente.

✓ **Número de Fios:** É o número de filetes compreendidos em uma polegada (25,40 mm), do comprimento de rosca.

A Figura 2.1, ilustra os itens citados acima.

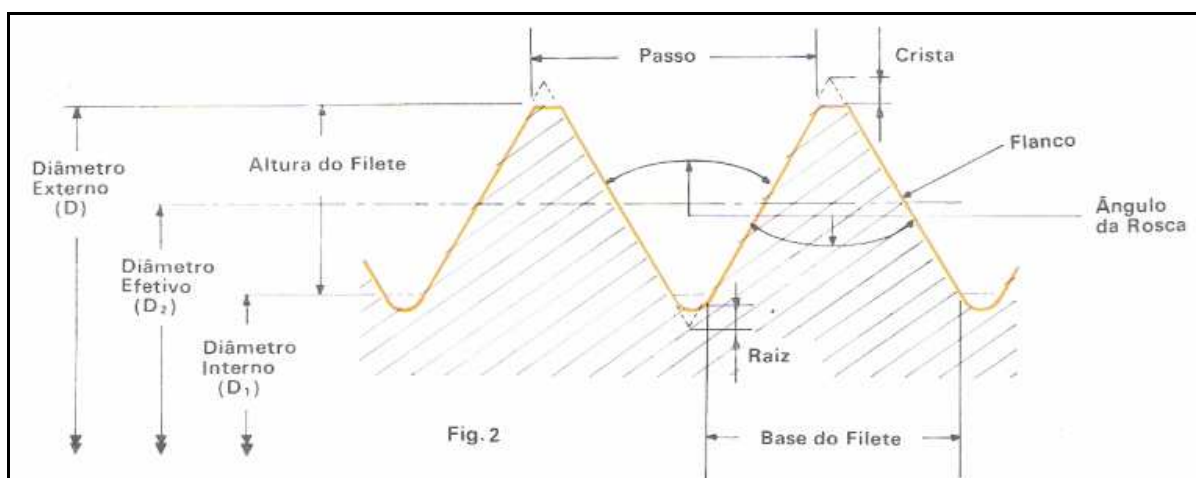


Figura 2.1 – Representação dos elementos básicos de uma rosca, independente de suas medidas (OSG, 1999)

O tipo de rosca é determinado pelo formato dos filetes, pelo passo, número de entradas e até mesmo pelo sentido dos filetes. Pelo número de entradas ou número de filetes são:

✓ **Rosca simples ou de uma entrada:** Constituída de apenas uma helicóide, são as mais comuns (uso geral).

✓ **Rosca múltipla ou de várias entradas:** Constituída de várias helicóides, neste tipo de rosca o avanço é igual ao passo vezes o número de entradas.

Quanto ao passo ou profundidade dos filetes são classificados em:

✓ **Rosca Grossa:** É a mais comum e é recomendada para as aplicações comuns, especialmente onde se requerem repetidas inserções e remoções do parafuso ou onde o parafuso é rosqueado em um material mole.

✓ **Rosca Fina:** São mais resistentes ao afrouxamento decorrente de vibrações que as roscas grossas por causa do seu menor ângulo de hélice e, portanto são utilizadas em automóveis, aviões e outras aplicações submetidas a vibração.

- ✓ Rosca Ultrafina: São utilizadas onde a espessura de parede é limitada.

Quanto ao formato do filete são classificadas em:

- ✓ Rosca Triangular: O mais comuns dos perfis dos filetes são usados principalmente para a fixação, uma vez que devido ao alto atrito é pouco usado para transmissão de movimento.

- ✓ Rosca Quadrado: Esta provê uma máxima eficiência, em transmissão e rigidez, também elimina qualquer componente de força radial entre o parafuso e a porca. Infelizmente é mais difícil de ser fabricada devido a sua face perpendicular.

- ✓ Rosca Trapezoidal (Acme): Usada também para a transmissão de movimento, mas com a vantagem de ser mais fácil de fabricar do que a quadrada. Em parafusos, permite o uso de porca partida, que pode ser apertada radialmente para eliminar folgas.

- ✓ Rosca Botaréu: Se a carga axial for unidirecional, a rosca botaréu pode ser usada para obter maior resistência na raiz.

- ✓ Rosca Arredondada: Empregadas em peças submetidas a trabalhos grosseiros, exemplo, bocais de lâmpadas e tampas de garrafa.

Quanto ao sentido do filete, as roscas podem ser classificadas em:

- ✓ Rosca Direita: De uma maneira pratica, para aparafusar tem que girar no sentido horário.

- ✓ Rosca Esquerda: Para aparafusar tem que girar no sentido anti-horário.

Diante destes inúmeros tipos de roscas, após a segunda guerra mundial houve a padronização na Inglaterra, no Canadá e nos Estados Unidos no que hoje se conhece como série *Unified National Standard (UNS)*. O padrão europeu é definido pela ISO. Dentro desta padronização três sistemas são os mais utilizados: o sistema métrico, sistema inglês e o sistema americano para roscas polegadas.

No sistema métrico a forma de especificar uma determinada rosca, por exemplo, é M 8 x 1,25, sendo que 8 é o diâmetro maior e 1,25 é o passo de hélice. Neste sistema o ângulo de rosca é 60°. Já no sistema inglês (Whitworth) a maneira de especificar é 5/8"-18UNC sendo que 5/8" indica o diâmetro maior e 18 o número de fios por polegada, e no sistema inglês o ângulo de rosca é de 55°, o que diferencia do sistema americano em que o ângulo de rosca é de 60°. As roscas são classificadas em classe, estas classes definem diferentes quantidades de tolerância na fabricação de parafusos ou furos roscados. As classes 1A, 2A, e 3A aplicam-se a parafusos, já a classe 1B, 2B e 3B são aplicadas a roscas internas (furos

roscados). A norma define diferentes tolerâncias para as diferentes classes que devem ser observada dependendo da solicitação de projeto.

O próximo item será para tratar dos processos de rosqueamento interno e externo, sendo que de uma maneira mais aprofundada do rosqueamento interno que será o tema do trabalho.

## **2.3 Rosqueamento**

O processo de rosqueamento é um processo de usinagem destinado à obtenção de filetes, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira e uma delas se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada ao eixo de rotação.

O rosqueamento é um processo muito complexo, uma vez que geralmente é executado em peças semi-acabadas ou acabadas, logo, deve-se ter a máxima preocupação para não danificá-las. O processo de rosqueamento pode ser dividido em dois tipos o rosqueamento externo e o interno que aqui será tratado com mais detalhes (FERRARESI, 1970).

### **2.3.1 Rosqueamento externo**

Processo que consiste em rosquear superfícies externas cilíndricas ou cônicas de revolução (FERRARESI, 1970). O rosqueamento externo pode ser realizado por uma ferramenta de perfil único (Fig. 2.2-e), uma de perfil múltiplo (Fig. 2.2-f), com cossinete (Fig. 2.2-g), com jogo de pentes (Fig. 2.2-h), com fresa de perfil múltiplo (Fig. 2.2-i), com fresa de perfil único (Fig. 2.2-j).

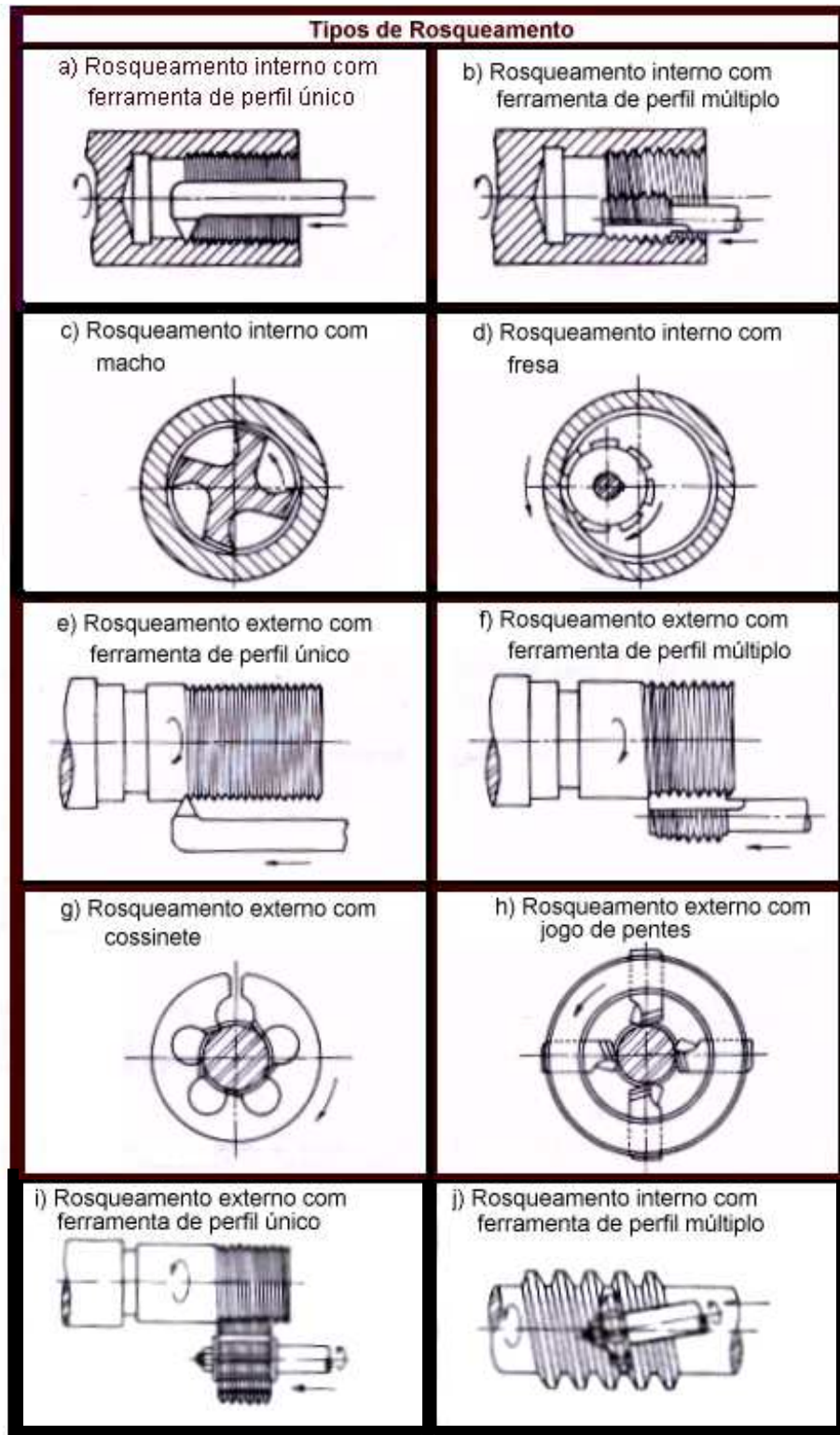


Figura 2.2 – Tipos de rosqueamento: (a) rosqueamento interno com ferramenta de perfil único, (b) com ferramenta de perfil múltiplo, (c) com macho, (d) com fresa, (e) rosqueamento externo com ferramenta de perfil único, (f) com ferramenta de perfil múltiplo, (g) com cossinete, (h) com jogo de pentes, (i) com fresa de perfil múltiplo e (j) com fresa de perfil único (FERRARESI, 1970)

### 2.3.2-Rosqueamento interno

O rosqueamento interno é executado em superfícies internas cilíndricas ou cônicas de revolução. Esta pode ser executada com ferramenta de perfil único (Fig. 2.2-a), com ferramenta de perfil múltiplo (Fig. 2.2-b), com macho (Fig. 2.2-c) e com fresa (Fig. 2.2-d).

O macho de corte é atualmente a ferramenta de corte para a fabricação de rosca interna mais usada, devido a sua alta produtividade e sua maior precisão, seja em pequenos ou grandes diâmetros. A usinagem de rosca com macho segue um procedimento padrão que irá se repetir principalmente nas operações automatizadas. No processo que utiliza macho máquina, as etapas podem ser divididas em: entrada, corte, parada, retorno e saída, como mostrado na Fig. 2.3.

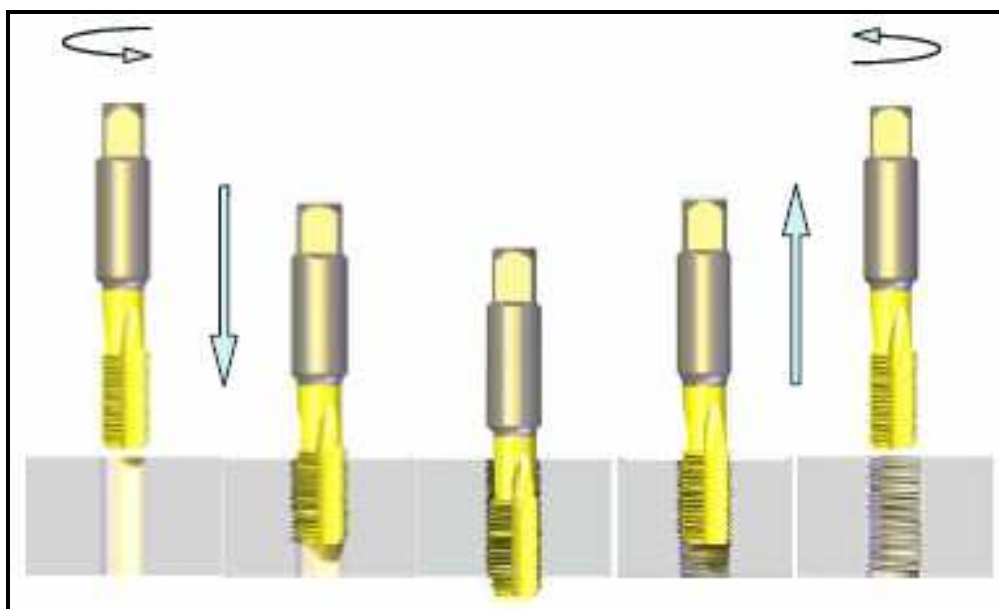


Figura 2.3 – Princípio do processo de rosqueamento (DA MOTA, 2009)

Como mostrado na Fig. 2.3. A primeira etapa é marcada pela aproximação e entrada do macho. A segunda pelo corte propriamente dito e a terceira etapa é a parada no fim da rosca com a inversão do movimento. Já a quarta etapa é o retorno da ferramenta de corte e a última etapa é a saída do macho de corte da peça. A segunda etapa ainda pode ser dividida em mais duas, sendo a primeira onde a ferramenta corta em velocidade constante e a segunda quando a ferramenta está desacelerando para a parada que é a terceira etapa. Claro que isso dependerá da velocidade de corte e do comprimento de rosca, já que em alguns casos a ferramenta poderá entrar já desacelerando.

O rosqueamento interno é uma operação de alta complexidade devido a características como a dificuldade de saída do cavaco principalmente em furos cegos e em material onde o cavaco é curto, a dificuldade de lubrificação e refrigeração quando necessário, grandes profundidades roscadas e sistemas de fixação da ferramenta. Isso gera uma enorme preocupação, já que por ser uma operação em muitos casos realizadas em peças já com um alto valor agregado, não podem falhar, pois a falha gera altos custos.

Para alguns problemas são apontadas soluções práticas para minimizar os efeitos:

- ✓ Seleção do material em função de uma melhor usinabilidade para a usinagem de roscas (SKF, 1987);
- ✓ Evitar em projetos furos com profundidade maior do que 1,5 vezes o diâmetro do macho de corte (CARROLL, 1995). Caso seja necessário, escolha uma ferramenta com canais que facilitem a saída do cavaco.
- ✓ Para furos não passantes deixar uma folga (Tab. 2.1) em projeto para o acúmulo de cavacos durante o rosqueamento de tal forma que o seu acúmulo não trave a ferramenta, evitando assim a quebra da ferramenta.

Tabela 2.1 – Folga recomendada em função das características da ferramenta, tipo de material e comprimento do furo (OSG, 1999)

| Tipo de macho e comprimento do chanfro                             | Comp. da Rosca | Material               |             |                        |             |
|--------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|
|                                                                    |                | Aços em geral          |             | Ferro Fundido          |             |
|                                                                    |                | Comp. da folga no furo |             | Comp. da folga no furo |             |
|                                                                    |                | D até 6mm              | D acima 6mm | D até 6mm              | D acima 6mm |
| <b>Canal Reto 2,0 filetes</b>                                      | 1 D            | 0,5 D                  | 0,5 D       | 0,5 D                  | 0,3 D       |
|                                                                    | 2 D            | 1,0 D                  | 0,5 D       | 1,0 D                  | 0,5 D       |
|                                                                    | 3 D            | 1,0 D                  | 1,0 D       | 1,0 D                  | 1,0 D       |
| <b>Ponta Helicoidal 4,5-5,0 filetes<br/>Canal Reto 4,0 filetes</b> | 1 D            | 1,5 D                  | 1,0 D       | 1,0 D                  | 0,5 D       |
|                                                                    | 2 D            | 2,0 D                  | 1,5 D       | 1,5 D                  | 1,0 D       |
|                                                                    | 3 D            | 2,5 D                  | 2,0 D       | 1,5 D                  | 1,0 D       |
| <b>Canal Helicoidal 2,5 filetes</b>                                | 1 D            | 0,5 D                  | 0,5 D       | 0,5 D                  | 0,5 D       |
|                                                                    | 2 D            | 0,5 D                  | 0,5 D       | 1,0 D                  | 0,5 D       |
|                                                                    | 3 D            | 0,5 D                  | 0,5 D       | 1,0 D                  | 0,5 D       |

O item subsequente trata das tolerâncias envolvidas nos processo de rosqueamento, seja do furo ou mesmo da rosca em si.

### 2.3.3 Tolerância

Para a fabricação de rosca é normal a utilização de um macho de corte com a tolerância de acordo com a rosca interna desejada, mas não se pode afirmar que a tolerância da rosca interna será rigorosamente idêntica à tolerância do macho. Isto porque, em um rosqueamento existem variações nas condições de usinagem, que não contribuem para a realização perfeita da tolerância na rosca (OSG, 1999).

A classe de tolerância da rosca e do macho fica definida através dos seguintes parâmetros (OSG, 1999):

- 1-Diâmetro externo;
- 2-Diâmetro efetivo ou do passo;
- 3-Diâmetro interno;
- 4-Passo;
- 5-Meio ângulo de rosca (ângulo de flanco);

Esta tolerância deve vir designada em projeto e o macho de corte é selecionado em função dela. Um exemplo de como é especificada a tolerância de uma rosca é mostrada na figura 2.4.

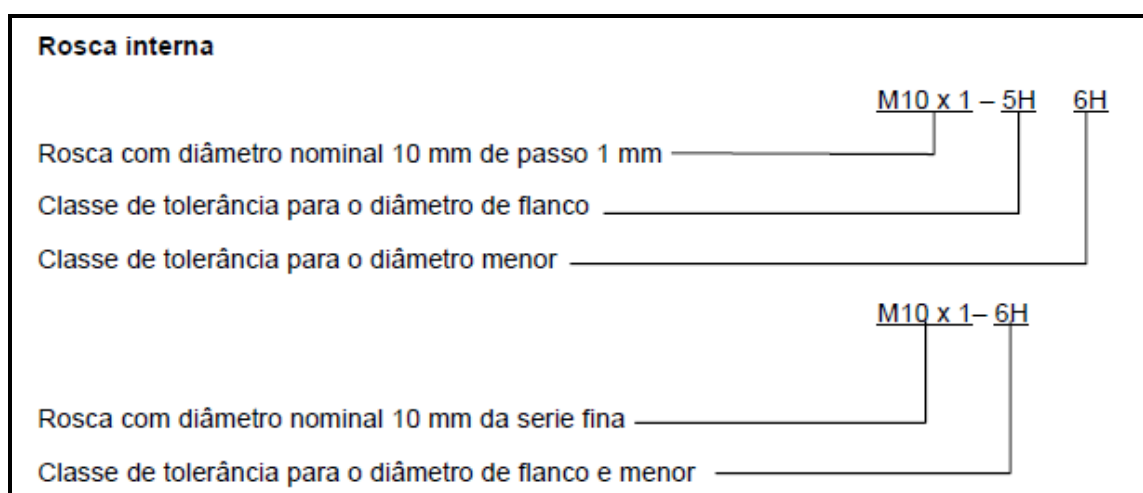


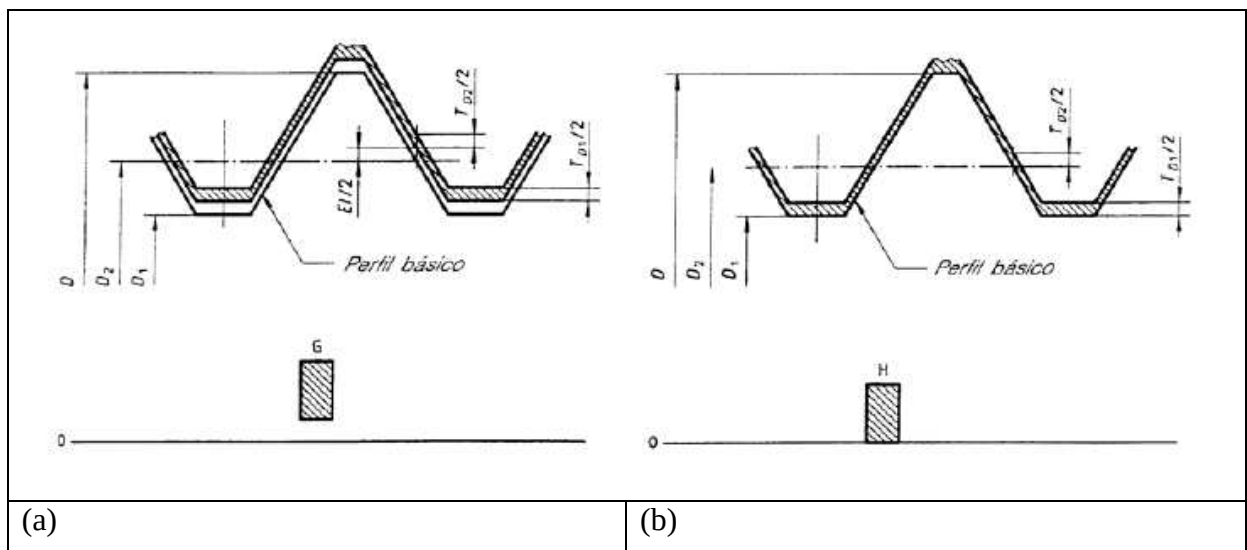
Figura 2.4 – Tipo de especificação de tolerâncias (ABNT, 2004)

Existem três tipos de classe de tolerâncias mais usuais que são a fina, a média e a grossa, para três grupos de comprimento de contato, curto, médio e longo. A aplicação destes

grupos se dá pela combinação de graus e posições dos campos de tolerâncias. Normalmente deve ser usado o grau médio e o comprimento de contato normal, ou seja, grau 6. Os graus de tolerância abaixo de 6 são destinados aos comprimentos de contato curtos e/ou grau de tolerância fino. O grau de tolerância acima de 6 é destinado para o grau de tolerância normal e/ou comprimento de contato longo (ABNT, 2004).

Assim como o grau de tolerância, existem as posições de tolerância, que são designadas por letras e são normalizadas da seguinte maneira para roscas internas:

- ✓ G com afastamento fundamental positivo (Fig. 2.5-(a));
- ✓ H com afastamento fundamental zero (Fig. 2.5-(b));
- ✓ e, f e g com afastamento fundamental negativo (Fig. 2.5-(c));
- ✓ h com afastamento fundamental zero (Fig. 2.5-(d));



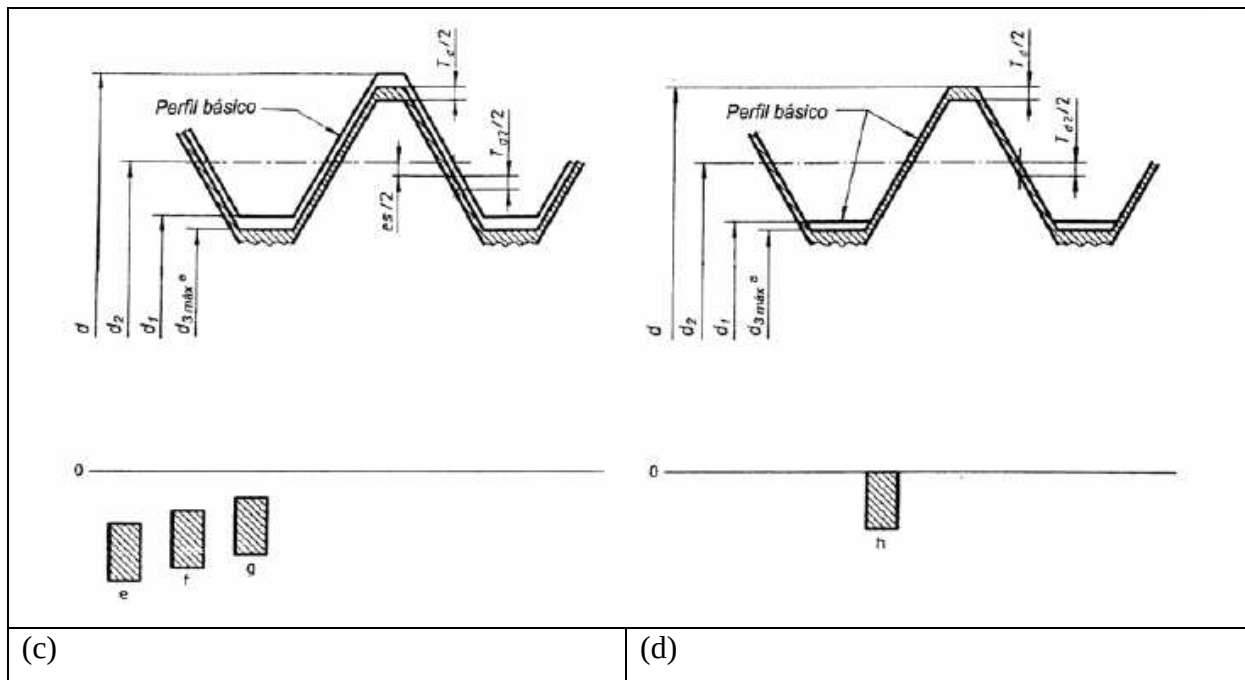


Figura 2.5 – Graus de tolerância para rosqueamento interno (ABNT, 2004)

Existem classes de tolerâncias recomendadas com a finalidade de reduzir o número de calibradores e ferramentas. Para isso, as seguintes regras gerais foram formuladas para a escolha da classe de tolerância (ABNT, 2004):

1-Fina: Para rosca de precisão, quando é necessária uma pequena variação do ajuste.

2-Média: Para uso geral.

3-Normal: Para o caso onde podem ocorrer dificuldades de fabricação, por exemplo, quando devem ser roscadas barras laminadas a quente longas e furos cegos longos.

Estas recomendações serão mostradas na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 – Qualidade de tolerâncias recomendadas para roscas internas (ABNT, 2004)

| Qualidade de tolerância | Posição de Tolerância G |           |      | Posição de Tolerância H |           |           |
|-------------------------|-------------------------|-----------|------|-------------------------|-----------|-----------|
|                         | S                       | N         | L    | S                       | N         | L         |
| Fina                    |                         |           |      | <b>4H</b>               | 5H        | 6H        |
| Média                   | (5G)                    | <b>6G</b> | (7G) | <b>5H</b>               | <b>6H</b> | <b>7H</b> |
| Grossa                  |                         | (7G)      | (8G) | -                       | 7H        | 8H        |

A qualidade de tolerância citada na Tab. 2.2, refere-se ao passo da rosca, assim a classificamos em fina, média ou grossa.

#### 2.3.4 Sincronismo

As dificuldades no rosqueamento interno não estão apenas relacionadas com a geometria complexa da ferramenta. Outro fator que dificulta ainda mais a operação de rosqueamento é a necessidade de um perfeito sincronismo entre os movimentos de rotação e de avanço (DA MOTA, 2006). Com a evolução das máquinas utilizadas específicas em linhas de produção e de máquinas CNCs, este problema está sendo minimizado. No entanto, por mais moderna e sofisticada que a máquina seja, sempre haverá um erro de sincronismo, por menor que seja.

No entanto, nem todas as linhas de produção possuem este tipo de maquinário sofisticado, e sua utilização em massa pode ser considerada recente, principalmente no parque industrial brasileiro. Recentemente acessórios foram desenvolvidos para superar as dificuldades que máquinas convencionais e até mesmo máquinas CNCs mais antigas possuíam, uma vez que elas não possuem a capacidade de sincronismo necessário entre a rotação e o avanço para o rosqueamento. Dois dispositivos muito utilizados para isso são: o cabeçote flutuante, que possui um sistema de compensação da rosca, e a unidade de rosqueamento auto-reversível de alta velocidade.

A falta de sincronismo e de rigidez das máquinas ou sistemas de fixação resultam em uma não uniformidade das roscas. Alguns materiais de ferramentas como metal duro exige um ótimo padrão de rigidez e sincronismo para que se obtenha sucesso com a ferramenta (HENDERER, 2006).

As máquinas mais avançadas já possuem uma função que permite esse sincronismo entre os movimentos, dispensando assim a utilização de dispositivos. Um efeito negativo, está no tempo de usinagem e na depreciação da máquina que são maiores, quando comparado com os cabeçotes auto-reversíveis, pois o ciclo de usinagem é composto de aceleração, desaceleração e parada do eixo-árvore. Para o retorno do macho acontece a inversão do movimento do eixo da máquina, aumentando o tempo de usinagem (BEZERRA, 2003). Durante o rosqueamento com cabeçote auto-reversível o eixo-árvore da máquina gira somente em um sentido.

## 2.4 Geometria da ferramenta

O macho é uma ferramenta sofisticada tanto em sua utilização como em sua fabricação, empregada para a usinagem de roscas internas cilíndricas ou cônicas, que possui filetes externos e rasgos longitudinais, originando daí o aparecimento de arestas cortantes e sulcos necessários à saída dos cavacos (FREIRE, 1976). Atualmente, o processo de fabricação dos machos está se simplificando com o avanço tecnológico. Suas operações são quase automáticas, visando atender os mercados consumidores mais exigentes (OSG, 1999).

A geometria do macho de corte, tal como o comprimento de rosca, o canal, comprimento de haste, dentre outras características, é mostrado na Fig. 2.6. A geometria da ferramenta permite que combinando o movimento rotativo com avanço, o macho usine roscas internas, sendo imprescindível que a classe ou a tolerância da rosca fique dentro de uma faixa determinada, pois o processo termina com um único avanço da ferramenta (REIS, 2004).

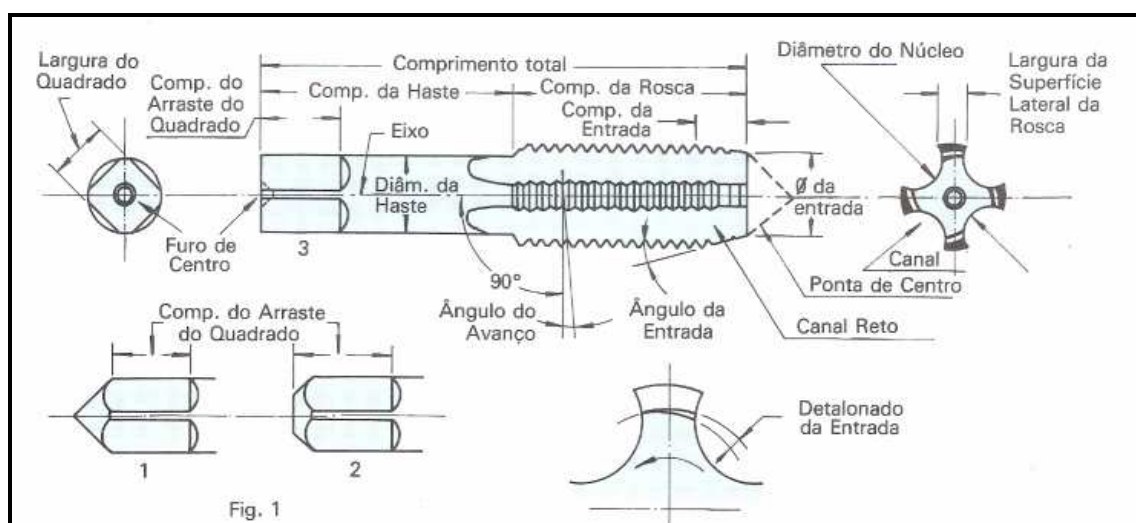


Figura 2.6 – Nomenclatura dos detalhes de um macho de corte (OSG, 1999)

Cada uma dessas características geométricas do macho tem uma finalidade durante a usinagem. Neste item serão apresentadas as finalidades das principais características e algumas recomendações. Uma importante característica é a geometria do canal do macho, pois esta determinará o ângulo de saída, e este é determinado de acordo com o material a ser usinado.

A resistência à torção de um macho é determinada pelo diâmetro do núcleo. Porém, quanto maior for este núcleo, maior a dificuldade para saída do cavaco. Com isso, a

necessidade de projetar cada tipo de macho para um tipo de material específico (OSG, 1999). Para materiais de fácil usinagem, como por exemplo, o alumínio, é usado ângulo de saída maior, já para materiais de difícil usinagem é usado ângulos menores. A Fig. 2.7 mostra dois tipos de geometria dos canais dos machos.

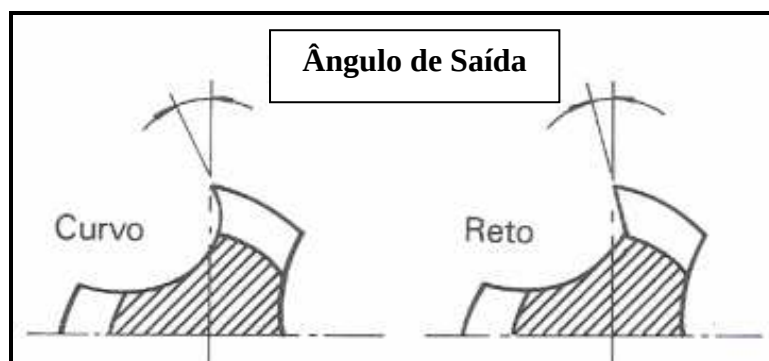


Figura 2.7 – Tipos de ângulo de saída (OSG, 1999)

A Tabela 2.3, mostra uma série de materiais seus respectivos ângulos de corte e face de corte, recomendados de acordo com o fabricante de ferramentas.

Tabela 2.3 – Tabela de orientação para o uso de machos (Adaptado de OSG, 1999)

| Material a ser Rosqueado             | Ângulo de Saída | Face de Corte | Material a ser Rosqueado | Ângulo de Saída | Face de Corte |
|--------------------------------------|-----------------|---------------|--------------------------|-----------------|---------------|
| Aço com baixo teor de Carbono        | 8° - 12°        | Curvo         | Alumínio                 | 14° - 18°       | Curvo         |
| Aço com médio e alto teor de Carbono | 5° - 8°         | Reto          | Liga de Alumínio         | 12° - 14°       | Curvo         |
| Aço para Ferramentas                 | 5° - 8°         | Reto          | Cobre                    | 14° - 18°       | Reto          |
| Aço Inoxidável                       | 8° - 12°        | Reto          | Ferro Fundido            | 4° - 8°         | Reto          |
| Aço Cromo                            | 8° - 12°        | Reto          | Bronze                   | 1° - 4°         | Reto          |
| Aço Manganês                         | 10° - 14°       | Curvo         | Latão                    | 2° - 6°         | Reto          |
| Aço Fundido                          | 6° - 9°         | Reto          | Plástico Duro            | 2° - 6°         | Reto          |

A ferramenta de rosquear pode ser classificada em vários tipos, como por exemplo, (OSG, 1999):

- ✓ Macho de ponta helicoidal: Auxilia no direcionamento do cavaco, empurrando-o para frente com baixo torque, sendo o canal raso, proporciona uma estrutura mais resistente. É recomendado para furos passantes, em materiais com cavacos longos e alta velocidade de corte.
- ✓ Macho de canal helicoidal: A saída do cavaco é em direção a haste. Seu torque é baixo, aplicável para rosqueamento até o fundo do furo, ou seja, para furos cegos e materiais com cavaco longo.
- ✓ Macho com canal reto: Possui arestas de corte resistentes, fácil de reafiar, recomendado tanto para furos cegos como passantes e para materiais de boa plasticidade.

Estes três tipos de machos são apresentados no diagrama da Fig. 2.8.

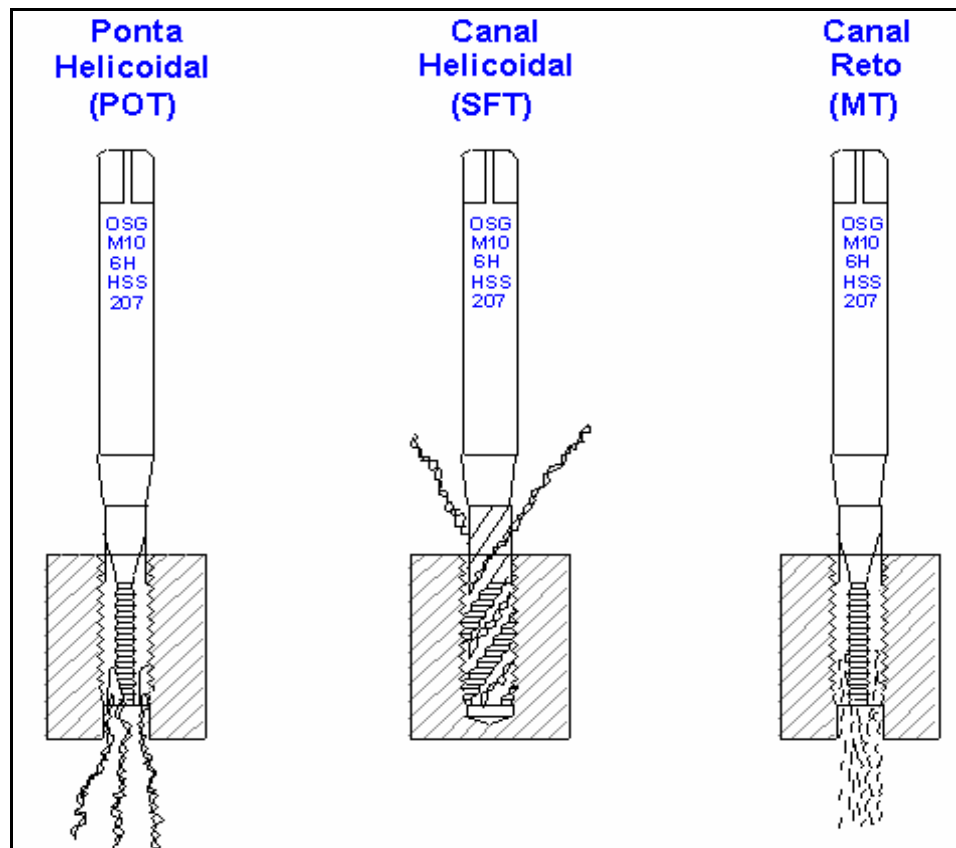


Figura 2.8 – Três tipos de macho básico (OSG, 2009)

Uma outra característica fundamental do macho de corte é o comprimento do chanfro (Fig. 2.9). Afinal, a remoção de material da rosca é determinada pelos filetes da parte chanfrada e os primeiros filetes da parte cilíndrica, sendo os restantes dos filetes do macho, apenas filetes alisadores, não devendo assim exercer a função de corte. Com isso o número de filetes cortantes irá variar com o material utilizado e o tipo de ferramenta (OSG, 1999). Na Fig. 2.9, o comprimento do chanfro é chamado de comprimento de entrada.

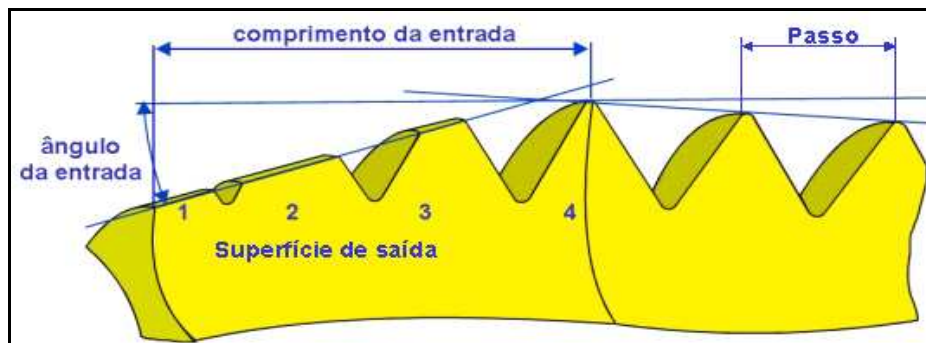


Figura 2.9 - Comprimento do chanfro de um macho de corte (Titex Plus, 1999, apud BEZERRA, 2003)

O número de filetes na área chanfrada vezes o número de canais, dará o número de vezes em que a ferramenta avança sobre o material para que possa formar um filete de rosca completo. A velocidade com que as arestas avançam perpendicularmente ao eixo de rotação é a velocidade de avanço. O rosqueamento é caracterizado por duas velocidades de avanço, uma citada anteriormente e o avanço em relação ao passo da ferramenta. O avanço perpendicular ao eixo de rotação é mostrado nas Figuras 2.10 - (a) e (b).

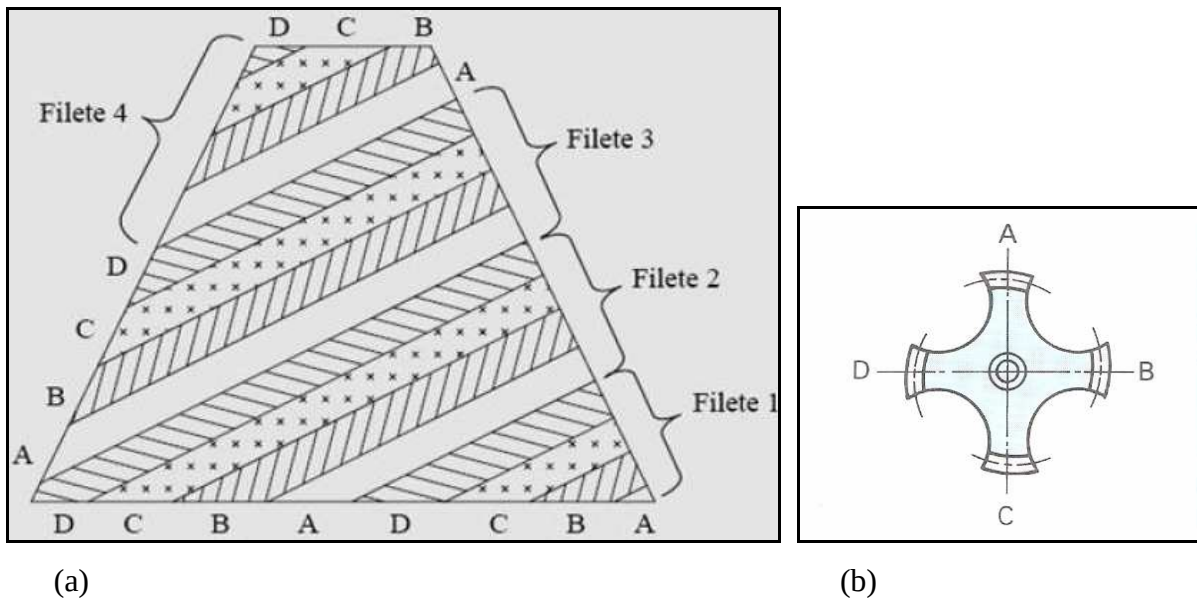


Figura 2.10 – Esquema do avanço dos dentes do macho de corte sobre o canal do filete de rosca, com um macho de quatro canais (OSG, 1999, apud REIS, 2004)

Uma outra característica dos machos de corte é a detalonagem, que nada mais é do que uma condição criada pela remoção de material na superfície lateral traseira da rosca, produzindo folga e reduzindo o atrito (OSG, 1999). Há também diferentes tipos de ângulos de saída, assim como nos insertos de metal duro os machos de corte tem diferentes tipos e valores de ângulos de saída. A Fig. 2.11, mostra os tipos de detalonagem e ângulos de saída.

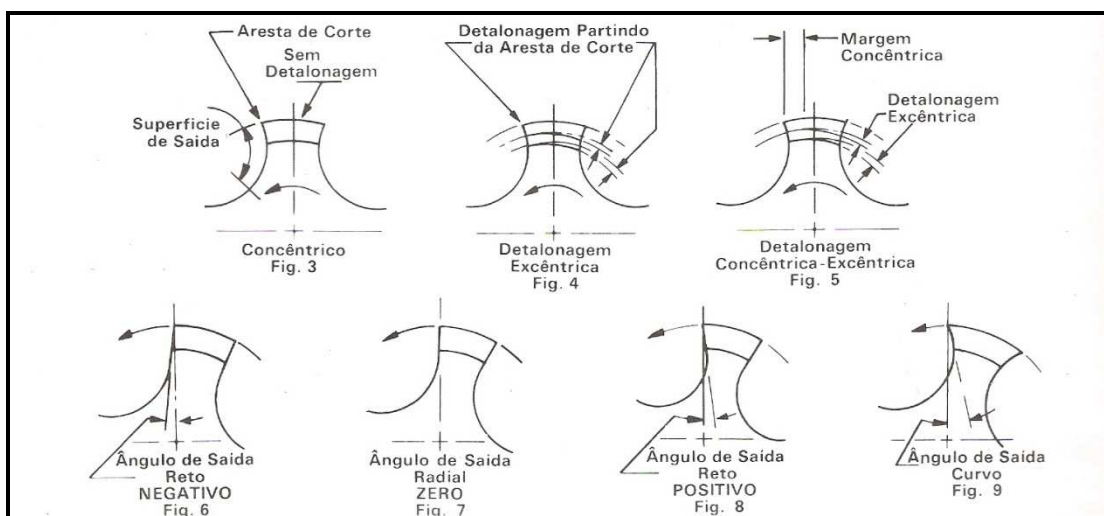


Figura 2.11 – Ilustração dos tipos de detalonagem e possíveis ângulos de saída (OSG, 1999)

Uma outra característica dos machos de corte é o número de canais, que podem ser determinados tanto pela resistência que a ferramenta necessita para usinar a rosca ou pode ser pela necessidade de armazenar o cavaco na saída da ferramenta. Existem ferramentas de dois, três e quatro e até algumas especiais com mais canais. A ferramenta de dois canais tem um maior espaço de armazenamento entre duas fileiras de dentes e a ferramenta de três canais tem uma maior resistência



Figura 2.12 - Número de canais em um macho de corte (KENNAMETAL, 2005)

Todas essas características são fundamentais para um bom rendimento da ferramenta e um melhor acabamento e tolerância da rosca. Reunir estas características em uma ferramenta para um determinado material determina o rendimento da mesma.

## 2.5 Materiais para ferramenta de corte

A grande evolução dos materiais alcançou também a área de materiais para ferramenta de corte. Uma lista genérica é mostrada na Fig. 2.13, que engloba desde ferramentas de aço carbono até ferramentas de diamante natural. Quanto maior a dureza, menor a tenacidade, que são as duas principais características das ferramentas.

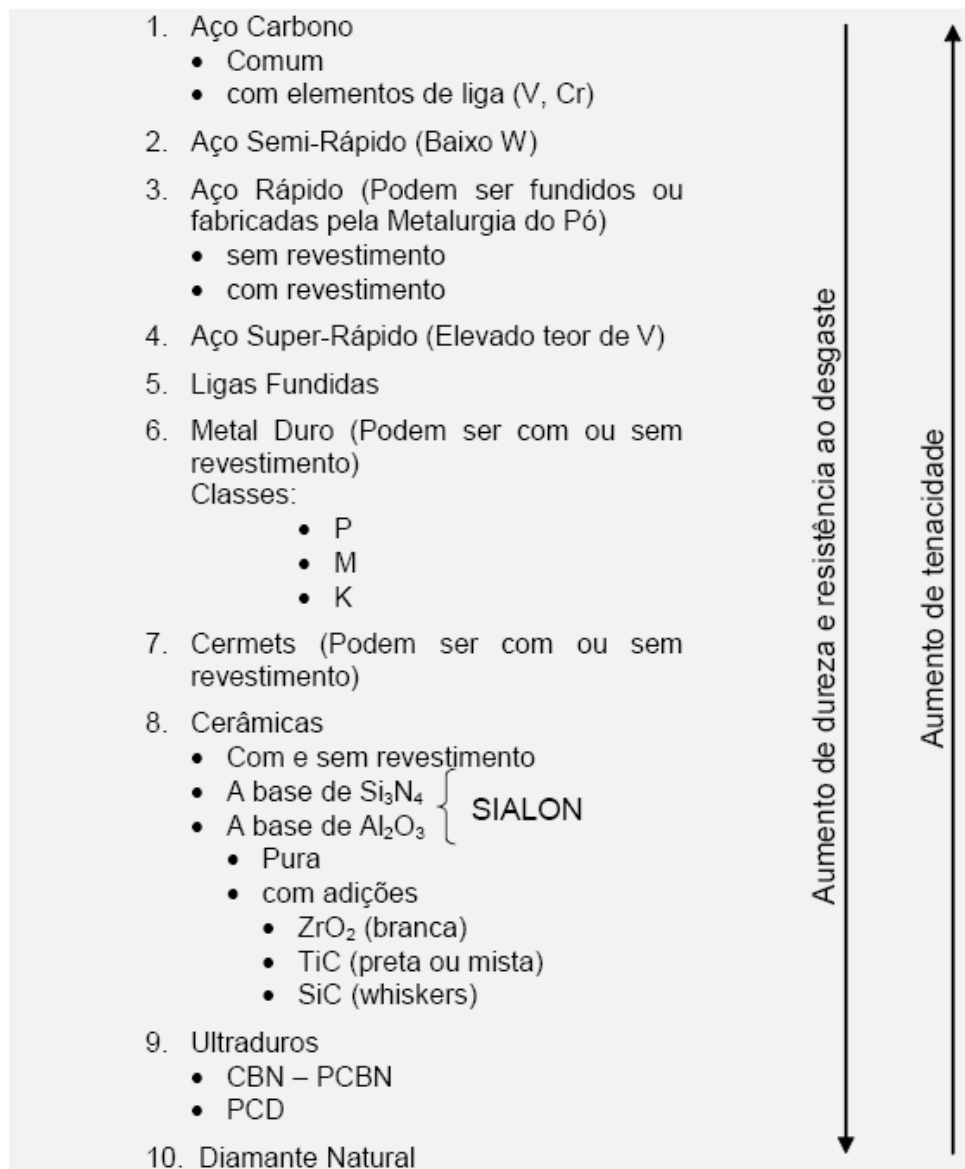


Figura 2.13 – Classificação dos materiais para ferramenta de corte (MACHADO, DA SILVA, 2004)

Apesar da imensa gama de materiais de ferramenta de corte, em machos de corte essa gama é restrita. Há basicamente dois tipos de materiais para ferramenta de corte, que são: o aço rápido, mais comum e mais utilizado e com uma ótima performance na relação custo benefícios para a grande parte das situações, e o metal duro, mais recente e com ótimos resultados obtidos.

A seguir serão apresentados alguns detalhes do aço-rápido e metal duro.

### 2.5.1 Aço rápido

Hoje em dia pode-se encontrar um variado grupo de aços rápidos, cada um tendo uma aplicação específica (MACHADO et al, 2009). As ferramentas fabricadas com aço-rápido são divididas em dois grandes grupos: aços ao tungstênio (W), identificado pela letra “T”, e aços ao molibdênio (Mo), identificado pela letra “M”.

De acordo com Chiaverini (2008), os principais elementos das ligas de aços rápidos são:

- ✓ *Carbono*: Cujo teor varia de 0,70% a 1,60%. Teores menores representam menores durezas no estado revenido. A medida que se eleva o teor de carbono, aumenta a quantidades de carbonetos complexos, o que significa maior dureza e resistência ao desgaste. O aumento de carbono também auxilia no tratamento térmico com a retenção da austenita.
- ✓ *Tungstênio*: Considerado o elemento mais importante. O carboneto formado pelo tungstênio, ( $M_6C$ ), juntamente com o ferro, são responsáveis pela alta resistência ao desgaste. Quanto maior a quantidade de tungstênio maior a velocidade de corte que pode ser empregada.
- ✓ *Molibdênio*: É usado como substituto do tungstênio, formando o mesmo tipo de carboneto duplo com o carbono e o ferro. Seu peso atômico é cerca da metade do peso atômico do tungstênio. Tem uma tendência maior a decarbonetação no aquecimento do tratamento térmico e suas durezas a quente são menores.
- ✓ *Vanádio*: Contribui para aumentar a eficiência de corte do aço rápido. Aparece em teores de 1% a 5%, é desoxidante, mas forte formador de carboneto. Esse é o carboneto de maior dureza encontrado nos aços rápidos. Há de se tomar cuidado com a porcentagem de vanádio em relação à de carbono, pois o mesmo promove a ferritização.
- ✓ *Cromo*: É encontrado nos aços rápidos, em teores entre 3% e 5%. É um elemento básico no que se refere à temperabilidade do aço rápido.
- ✓ *Cobalto*: Tem como principal efeito aumentar a dureza a quente e, em consequências aumentar a dureza de corte. Como ele tem uma grande capacidade de dissolução na matriz, produz uma maior dureza média. O cobalto aumenta a condutividade térmica dos aços rápidos e os aços com

cobalto produzem uma grande quantidade de austenita retida na têmpera, resultando em maiores endurecimentos secundários no revenido.

- ✓ Outros: O enxofre em teores de 0,05% a 0,2%, melhora a usinabilidade. O nióbio diminui a tendência de descarbonetação e o titânio pode substituir em parte ou integralmente o vanádio.

Os aços rápidos em sua especificação podem ser divididos em três classes, estas designações são referentes aos seus constituintes ou ao processo de fabricação. São estas designações:

- ✓ HSS: É a designação mais comum, indica um aço rápido padrão. Na fabricação de machos, o aço rápido é ainda hoje o principal material de ferramenta utilizado na maioria das aplicações, por aliar tenacidade e dureza. Contudo, a classe de aço-rápido utilizada varia de acordo com a escolha do fabricante.

- ✓ HSS-E: Também chamados de aços super rápidos, possuem uma maior resistência ao desgaste e consequentemente uma maior eficiência no corte. Em sua constituição possui vanádio ou cobalto, sendo que o vanádio em uma porcentagem acima de 2,6% (SKF, 1987).

- ✓ HSS-PM: Aços rápidos produzidos pela metalurgia do pó, possuem partículas mais finas e uma dispersão mais uniforme na matriz. Além disso, os pós podem ser obtidos de aços previamente ligados pelo processo de atomização, o que garante partículas contendo carbonetos bem finos e uniformemente distribuídos. Os pós são compactados e sinterizados para formar o produto que vai ser conformado e usinado para obter a ferramenta (MACHADO et al, 2009). Os aços rápidos HSS-PM têm uma melhor usinabilidade na retífica do que o HSS, devido à granulação mais fina e também uma maior tenacidade (REIS et al., 2003). Juntamente com os revestimentos representam os dois grandes avanços nos anos 70 (MACHADO et al., 2009).

O revestimento geralmente aumenta a dureza e diminui o coeficiente de atrito da superfície. A utilização de ferramentas de aço rápido revestida aumenta a vida da mesma. A forma de deposição da camada de revestimento nos aços rápidos, só é possível através do processo PVD (*Physical Vapour Deposition*), já que pelo método CVD (*Chermical Vapour Deposition*) as temperaturas são acima do limite que o aço rápido suportaria sem haver alterações em suas propriedades.

Ferramentas de aço rápido são muito eficazes para velocidades de corte baixas e até médias, já que mantêm a sua dureza a quente até aproximadamente uma temperatura de 600°C

e possuem uma ótima tenacidade. Estas características transformam em um material muito utilizado para o processo de rosqueamento, uma vez que é um processo que exige muito da ferramenta principalmente tenacidade.

### 2.5.2 Metal duro

O metal duro foi o segundo grande impulso da área de materiais de ferramentas, pois com este as velocidades de corte puderam ser aumentadas em mais ou menos 10 vezes. O metal duro fabricado pelo processo de metalurgia do pó, possui uma excelente combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade (MACHADO et al., 2009).

A Fig. 2.14 mostra a classificação padronizada segundo norma, do metal duro. Dentro de cada classe existem ainda sub-classes divididas segundo a tenacidade e dureza.

Contudo a utilização de metal duro em ferramentas de rosquear (machos de corte) exige uma série de cuidados, já que apesar da maior resistência ao desgaste e maior dureza, estas são ferramentas menos tenazes do que ferramentas de aço rápido. Logo, machos de corte de metal duro exigem máquinas-ferramentas rígidas, com um ótimo sincronismo para operação de rosqueamento ou para as que não possuem essa função, sistemas de rosqueamento como cabeçote auto-reversíveis e ótimos equipamentos, pois as ferramentas de metal duro têm uma tendência ao lascamento ou quebra.

Além dessa gama de classes de metal duro, surge o revestimento das mesmas, o que teve uma grande importância para o avanço tecnológico destas classes de ferramentas uma vez que passou-se a ter uma vida maior, e uma possibilidade de aumentar ainda mais as velocidades de corte durante as operações de usinagem.

| Principais Classes     |                      |                                                                                                                                     | Classes de Aplicação                   |                                 |                                                                                            |                                                                                            |
|------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Letra de identificação | Cor de identificação | Materiais a serem usinados                                                                                                          | Metais Duros                           |                                 |                                                                                            |                                                                                            |
| P                      | Azul                 | <b>Aços:</b><br>Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica                           | P01<br>P10<br>P20<br>P30<br>P40<br>P50 | P05<br>P15<br>P25<br>P35<br>P45 | a<br>   | b<br>   |
| M                      | Amarelo              | <b>Aço Inoxidável:</b><br>Aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico e ferrítico) e aço fundido                           | M01<br>M10<br>M20<br>M30<br>M40        | M05<br>M15<br>M25<br>M35        | a<br>   | b<br>   |
| K                      | Vermelho             | <b>Ferro Fundido:</b><br>Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal e ferro fundido maleável.                     | K01<br>K10<br>K20<br>K30<br>K40        | K05<br>K15<br>K25<br>K35        | a<br> | b<br> |
| N                      | Verde                | <b>Metais não Ferrosos:</b> Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos.                                         | N01<br>N10<br>N20<br>N30               | N05<br>N15<br>N25               | a<br> | b<br> |
| S                      | Marrom               | <b>Superligas e Titânio:</b><br>Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio. | S01<br>S10<br>S20<br>S30               | S05<br>S15<br>S25               | a<br> | b<br> |
| H                      | Cinza                | <b>Materiais Duros:</b><br>Aços endurecidos, ferro fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados.                                | H01<br>H10<br>H20<br>H30               | H05<br>H15<br>H25               | a<br> | b<br> |

- |                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>a- Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.</p> <p>b- Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Figura 2.14 – Classificação dos metais duros

## 2.6 Tipos de revestimentos e tratamentos superficiais

Os diferentes tipos de revestimentos e tratamentos superficiais são utilizados em ferramentas de corte com o intuito de proporcionar uma união de características que apenas o material de base não conseguiria. Assim, é possível unir características como maior dureza superficial e manutenção da tenacidade do núcleo, diminuição do coeficiente de atrito entre cavaco-ferramenta, dentre outras de extrema importância para ferramentas de corte.

Durante a fabricação do aço rápido são realizados uma série de tratamentos térmicos, necessários para garantir sua dureza e formação de carbonetos complexos. E mesmo após esses tratamentos ainda podem ser realizados alguns tratamentos superficiais e até mesmo técnicas para o revestimento das ferramentas.

O procedimento seguido para os tratamentos térmicos em aços rápidos são muito rigorosos. O aço rápido pode ser temperado em banho de sal ou forno de leito fluidizado a  $550^{\circ}\text{C}$ , e após a equalização, é resfriado em ar até a temperatura de toque manual, antes de ser submetido ao revenimento. O aço rápido é um aço com endurecimento secundário, isto é, atinge sua dureza máxima só após o revenimento. As temperaturas de austenitização são críticas para os aços rápidos, sendo altamente recomendável seguir à risca as indicações do fabricante. Enquanto altas temperaturas de austenitização são necessárias para garantir que a máxima quantidade de carbonetos entre na solução, as temperaturas não ficam muito abaixo do ponto de início de fusão. Por esta razão o controle de temperatura do processo é essencial (CIMM, 2009).

É recomendado o pré-aquecimento do aço rápido em duas etapas antes da austenitização, para minimizar o choque térmico. Estes tratamentos são normalmente conduzidos em temperaturas de  $600-650^{\circ}\text{C}$  e  $840-880^{\circ}\text{C}$ , dependendo do tipo de aço rápido. Depois do pré-aquecimento a ferramenta deve ser aquecida até a temperatura de austenitização recomendada e ali mantida por 2 a 5 minutos antes do resfriamento (CIMM, 2009).

Além de tratamentos térmicos, como mencionados anteriormente, há também a utilização de alguns tratamentos termoquímicos. Para uma das ferramentas utilizadas neste trabalho, o tratamento usado foi a nitretação. A nitretação é um tratamento de endurecimento superficial em que se introduz superficialmente no aço, até certa profundidade, nitrogênio, sob a ação de um ambiente nitrogenoso, a uma temperatura determinada (CHIAVERINI, 2008).

Para Chiaverini (2008), a nitretação é realizada com os seguintes objetivos:

- ✓ Obtenção de elevada dureza superficial.
- ✓ Aumento da resistência ao desgaste e da resistência à escoriação.
- ✓ Aumento da resistência à fadiga.
- ✓ Melhora da resistência à corrosão.
- ✓ Melhora da resistência superficial ao calor, até temperaturas correspondentes às de nitretação.

Atualmente, a maior parte das ferramentas, tanto aço rápido quanto metal duro, são revestidas. Para aços rápidos a técnica mais usada para aplicação de revestimento é o PVD (Physical Vapour Deposition). A técnica PVD, consiste na formação de uma camada de revestimento sob um substrato através da deposição física de átomos, íons ou moléculas de uma determinada espécie de revestimento (BUNDINSKI, 1988). A Fig. 2.15, mostra uma ilustração do processo.

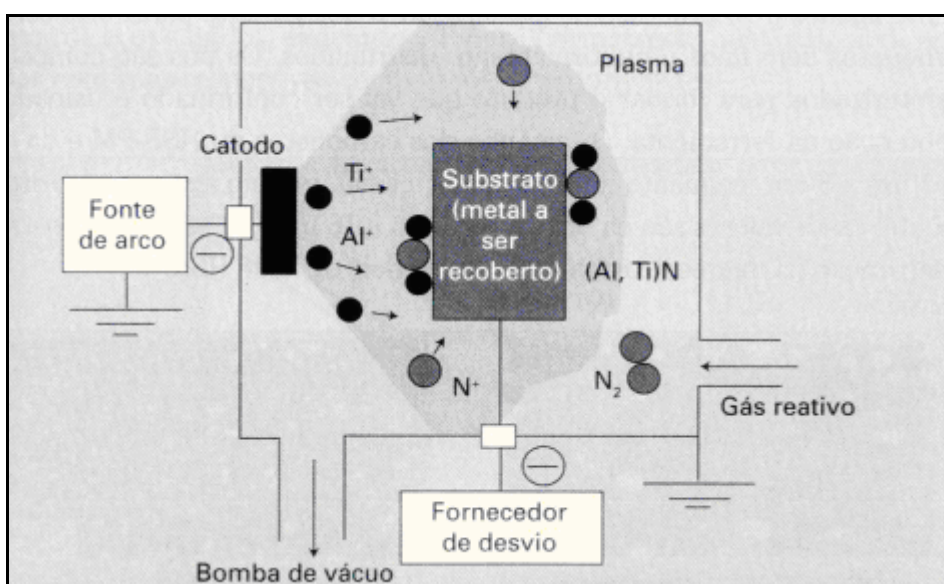


Figura 2.15 – Ilustração do processo de PVD por implantação iônica (MITSUBISHI, 2005, apud. MACHADO et al., 2009)

Existe uma enorme gama de revestimentos, sendo cada um para uma determinada função, contendo uma determinada característica. A Kennametal (2005) cita alguns revestimentos utilizados por ela em suas ferramentas (Tab. 2.4):

Tabela 2.4 - Alguns Tipos de revestimento e tratamentos para ferramentas de HSS (KENNAMETAL, 2005)

| <b>Revestimento</b>                                                    | <b>Propriedades e Aplicações</b>                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Precauções</b>                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nitreto de Titânio (TiN)</b>                                        | O revestimento tem uma dureza de 2300 Vickers. Fornece uma melhora significativa na vida da ferramenta e no acabamento final, utilizado em altas velocidades de rosqueamento. Aplicado em uma ampla faixa de materiais como: aços, materiais ferrosos e plásticos. Coloração dourada.               | Use com cuidado em materiais não ferrosos como o alumínio por causa da tendência à adesão.                                                     |
| <b>Carbonitreto de Titânio (TiCN)</b>                                  | Dureza de 3000 Vickers. Ele é mais duro, tenaz e mais resistente ao desgaste do que o TiN, quando em condições moderadas de temperatura de corte. Como o TiN, TiCN deve ser usado a altas velocidades de corte, abrange uma gama de materiais como o aço e os ferrosos. Coloração azul-acinzentado. | Use com cuidado em materiais não ferrosos como o alumínio por causa da tendência à adesão. TiAlN é uma melhor escolha para altas temperaturas. |
| <b>Nitreto de Titânio + Carboneto de Cromo + Carbono (TiN + CrC/C)</b> | Dureza de 2300 Vickers. O que combina a resistência ao desgaste do TiN com a camada de lubrificante do CrC. É bom para aços inoxidáveis e não ferrosos, incluindo alumínio e titânio. Escolha ideal para série 300 dos aços inoxidáveis. Coloração preto-acinzentado.                               | Efetivo em materiais ferrosos e não-ferrosos.                                                                                                  |
| <b>Nitreto de Titânio e Alumínio (TiAlN)</b>                           | Dureza de 3300 Vickers. Uma fina camada de revestimento, melhora a vida da ferramenta e o acabamento final. Especialmente em condições em que altas temperaturas podem ser geradas. Usado para aço inoxidável PH e ligas a base de níquel (inconel). Coloração violeta-acinzentado.                 | Use com cuidado em materiais não-ferrosos, devido à tendência de adesão.                                                                       |

|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                          |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                          |
| <b>Nitreto de Cromo (CrN)</b>        | Dureza média de 1800 Vickers. Tem a menor resistência ao desgaste do que os anteriores. Entretanto ao contrário dos citados CrN não adere quando usado em alguns materiais não-ferrosos. Usado para bronze, ligas de zinco e ligas de magnésio. | Ineficiente em materiais não-ferrosos.                                                                                   |
| <b>Nitretação (MAXI #1)</b>          | Tratamento superficial. Aumenta a vida útil em materiais abrasivos. Usado para alumínio e outros materiais.                                                                                                                                     | Evitar rosca cônica, grandes espirais, e pequenos diâmetros ou passos finos, devido a tendência de lascamento do filete. |
| <b>Oxidação (SH-50)</b>              | Ajuda a prevenir a adesão em materiais ferrosos (a base de ferro). Para usinagem de aço de livre corte. Usado para aço, aço inoxidável e ferros.                                                                                                | Tem tendência de causar empastamento em materiais não ferrosos como o alumínio.                                          |
| <b>Nitretação e Oxidação (SH-47)</b> | Combina os benefícios do tratamento superficial da nitretação e oxidação. Usado para aços, aços inoxidáveis e ligas de níquel.                                                                                                                  | Ver precauções para tratamento superficial de nitretação e oxidação.                                                     |

O desempenho de uma ferramenta revestida pode ser muito superior ao de uma ferramenta sem revestimento. A Fig. 2.16, por exemplo, mostra uma comparação de desempenho de brocas de aço rápido sem revestimento e revestidas com TiN, TiCN, WC/C e TiN + TiAlN (multicamadas), usinando ferro fundido cinzento GH 190, a seco e com aplicação de MQF (SANTOS, 2002).

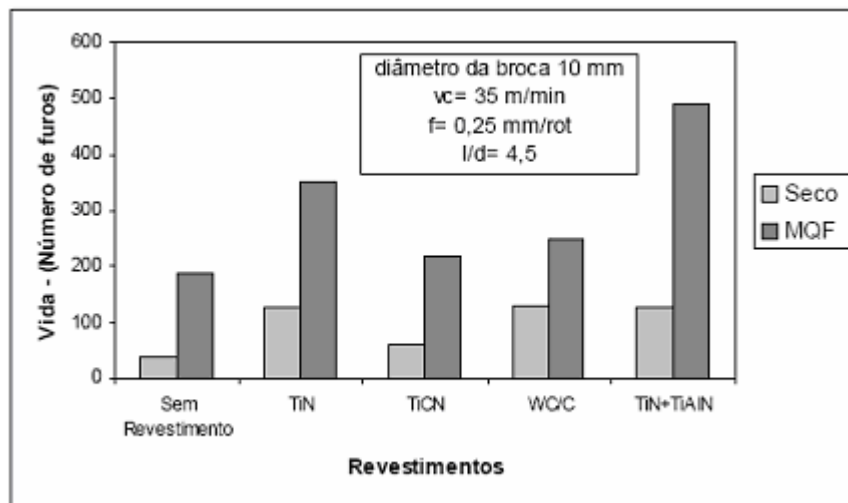


Figura 2.16 – Desempenho das brocas de aço rápido no corte a seco e com aplicação de mínima quantidade de fluido (SANTOS, 2002)

Além do revestimento, o fluido de corte também pode trazer benefícios para a usinagem. A seguir é apresentada uma breve revisão sobre fluido de corte.

## 2.7 Fluido de corte

Em se tratando de sistemas de manufatura, qualquer esforço para aumentar a produtividade e/ou reduzir os custos deve ser considerado. Na usinagem, o uso do fluido de corte, quando escolhido e aplicado apropriadamente, traz benefícios. A seleção adequada de um fluido de corte deve recair sobre aquele que possuir composição química e propriedades corretas para lidar com as adversidades de um processo de corte específico. Ele deve ser aplicado usando-se um método que permita sua chegada o mais próximo possível da aresta de corte dentro da interface cavaco-ferramenta, a fim de assegurar que suas funções sejam exercidas adequadamente (MACHADO et al., 2009).

Em muitos casos o fluido de corte é imprescindível, ou seja, não há como usinar sem sua presença. Um bom exemplo é o rosqueamento interno de aço carbono sem a utilização de fluido de corte. Os fluidos de corte possuem algumas funções, Machado et al. (2009) lista as principais:

- ✓ Lubrificação a baixas velocidades de corte.
- ✓ Refrigeração a altas velocidades de corte.

- ✓ Remoção de cavacos da zona de corte.
- ✓ Proteção da máquina-ferramenta e da peça contra oxidação.

Agindo como lubrificante, o fluido de corte contribui para reduzir o atrito e a área de contato cavaco-ferramenta, e sua eficiência vai depender da habilidade de penetrar na interface cavaco-ferramenta no curto período de tempo disponível e formar um filme com resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material da peça. Porém, como refrigerante, o fluido de corte favorece a transferência de calor da região de corte, reduzindo assim a temperatura da ferramenta e da peça, ainda que a temperatura na interface cavaco-ferramenta não seja significativamente alterada.

Os fluidos de corte podem ser gasosos, sólidos ou líquidos, sendo que os gasosos ainda não têm uma grande utilização, seja pela limitação na ação refrigerante ou lubrificante, ou seja, pela limitação econômica. Os sólidos têm uma grande limitação que é o acesso a locais onde exerce sua função de reduzir o atrito cavaco-ferramenta. Hoje em dia já são fabricadas ferramentas com uma cobertura deste tipo de lubrificante, mas a cobertura sai rapidamente.

O fluido líquido é o mais utilizado e eficaz, dentro da perspectiva do custo benefício. Estes são agrupados em três grandes categorias: óleos, emulsões e soluções. De acordo com Machado et al. (2009), o objetivo final ao usar o fluido de corte é reduzir o custo de fabricação ou aumentar a taxa de produção, além de evitar alterações microestruturais na peça decorrentes de elevadas temperaturas de usinagem. Outros benefícios do emprego de fluidos de corte são:

- ✓ Aumento da vida da ferramenta.
- ✓ Redução das forças de usinagem e, portanto, da potência de usinagem.
- ✓ Melhoria do acabamento da peça.
- ✓ Facilidade de remoção dos cavacos da região de corte.
- ✓ Redução do risco de distorção da peça.

Existem três tipos básicos de aplicação de fluido, como mostrado na Fig. 2.17.

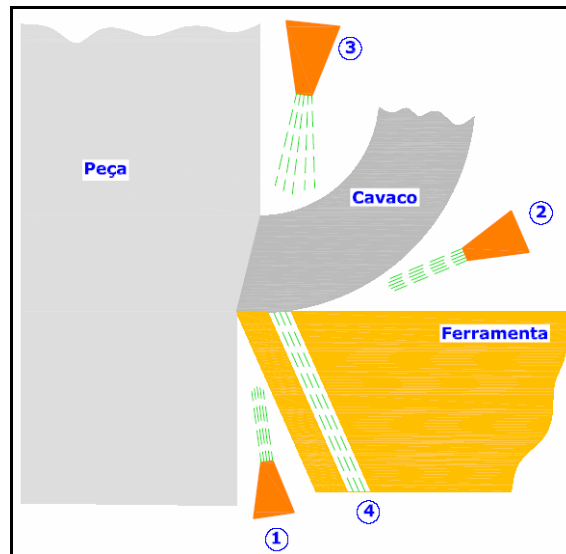


Figura 2.17 – Direções de aplicação do fluido: 1- através da superfície de folga; 2- na saída do cavaco; 3- sobre-cabeça; 4- por dentro da ferramenta (ALMEIDA et al., 2007)

No processo de rosqueamento, a forma de aplicação do fluido de corte é normalmente através de jorro, semelhante à situação três da Fig. 2.17. Dependendo do diâmetro do macho e da máquina ferramenta, a aplicação de fluido através de canais internos é a melhor opção.

A seleção do fluido de corte ideal é difícil devido à grande variedade de produtos disponíveis em um mercado altamente competitivo. O custo é alto e a utilização de um fluido de corte tem que ser justificada economicamente, isto é, os benefícios devem superar o investimento. Existem muitas operações na qual o emprego do fluido de corte é vital, como na retificação e rosqueamento de aço carbono.

A escolha do fluido de corte depende do material da peça, da ferramenta de corte e da operação de usinagem. No caso do ferro fundido cinzento é comum a usinagem a seco, já no caso do ferro fundido maleável, se for usado fluido de corte, deve ser usado um óleo integral ou algum tipo especial de emulsão (MACHADO et al., 2009). De acordo com Ferraresi (1970), para os ferros fundidos podem ser usados óleos graxo-minerais cloro-sulforados e óleos emulsionáveis.

## 2.8 Ferro fundido

Dentre as ligas ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria. Não só devido às características inerentes ao próprio material, como também pelo fato de, mediante introdução de elementos de liga, aplicação de tratamentos térmicos adequados e pelo desenvolvimento do ferro fundido nodular, ter sido viável o seu emprego em aplicações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços (CHIAVERINI, 2008).

A tecnologia de ferros fundidos tem recebido, continuamente, importantes desenvolvimentos, tanto em processos de fabricação como em materiais. Estes desenvolvimentos, resultantes de necessidades nas áreas de aplicação ou ainda de redução de custos, trazem como consequência a atualização tecnológica de um material de longa tradição de uso na indústria automobilística (GUESSER; GUEDES, 1997).

De acordo com Chiaverini (2008), ferro fundido é uma liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0% em quantidades superiores à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita. As ligas entre 2,0% e 4,3% de carbono são chamadas de hipoeutéticas, aquelas com carbono acima de 4,3% são chamadas de hipereutéticas. Essas ligas apresentam na solidificação geralmente uma fase pró-eutética (austenita, grafita) e que se completa com uma solidificação eutética (austenita + grafita ou austenita + carbonetos) (GUESSER, 2009).

Para os ferros fundidos é muito importante controlar a morfologia da grafita, já que esta tem uma forte influência em suas propriedades (ZHAO et al, 2007). O formato da grafita em geral identifica o ferro fundido e determina as suas principais características em relação aos outros. Características como resistência à tração, usinabilidade, capacidade de amortecimento e condutividade térmica, são diretamente afetadas pelo formato da grafita.

Chiaverini (2008) distingue os seguintes tipos de ligas de ferro fundido:

- ✓ *Ferro fundido Cinzento*: cuja fratura mostra uma coloração escura (por isso sua denominação), caracterizada por apresentar como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício e estrutura em que uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).
- ✓ *Ferro fundido branco*: cuja fratura mostra coloração clara (por isso sua denominação), caracterizado por apresentar ainda como elementos de liga

fundamentais o carbono, mas cuja estrutura, devido a condições de fabricação e menor teor de silício, apresenta o carbono quase inteiramente na forma combinada ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

- ✓ *Ferro fundido mesclado*: cuja fratura mostra uma coloração mista entre branca e cinzenta caracterizado igualmente por uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).
- ✓ *Ferro fundido maleável*: caracterizado por ser obtido a partir do ferro fundido branco, mediante a um tratamento térmico especial (maleabilização), resultando numa transformação de praticamente todo o ferro combinado na forma de nódulos.
- ✓ *Ferro fundido nodular*: caracterizado por apresentar, devido a um tratamento realizado ainda no estado líquido, carbono livre na forma de grafita esferoidal, o que confere ao material característica de boa ductilidade, donde a denominação frequente para esse material de ferro fundido dúctil.
- ✓ *Ferro fundido vermicular*: é um produto que, como o ferro fundido nodular, exige a adição de elementos especiais como terras raras, com um elemento adicional, como o titânio, que reduz a formação de grafita esferoidal. O ferro fundido vermicular pode ser considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o nodular.

Esses materiais citados acima têm uma grande importância para a indústria de bens de consumo, logo características de boa fundibilidade e usinabilidade, são de grande importância do ponto de vista industrial. A Tab. 2.5 mostra a faixa de composição dos ferros fundidos mais comuns e a Fig. 2.18, mostra o gráfico comparativo da usinabilidade dos materiais, tendo como base de comparação o ferro fundido cinzento.

Tabela 2.5 – Faixa da composição de ferros fundidos típicos comuns (CHIAVERINI, 2008)

| Tipo              | Composição Química |         |           |           |           |
|-------------------|--------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
|                   | C                  | Si      | Mn        | S         | P         |
| <b>Branco</b>     | 1,8/3,6            | 0,5/1,9 | 0,25/0,80 | 0,06/0,20 | 0,06/0,20 |
| <b>Maleável</b>   | 2,2/2,9            | 0,9/1,9 | 0,15/1,20 | 0,02/0,20 | 0,02/0,20 |
| <b>Cinzento</b>   | 2,5/4,0            | 1,0/3,0 | 0,20/1,00 | 0,02/0,25 | 0,02/1,00 |
| <b>Nodular</b>    | 3,0/4,0            | 1,8/2,8 | 0,10/1,00 | 0,01/0,03 | 0,01/0,10 |
| <b>Vermicular</b> | 2,5/4,0            | 1,0/3,0 | 0,20/1,00 | 0,01/0,03 | 0,01/0,10 |

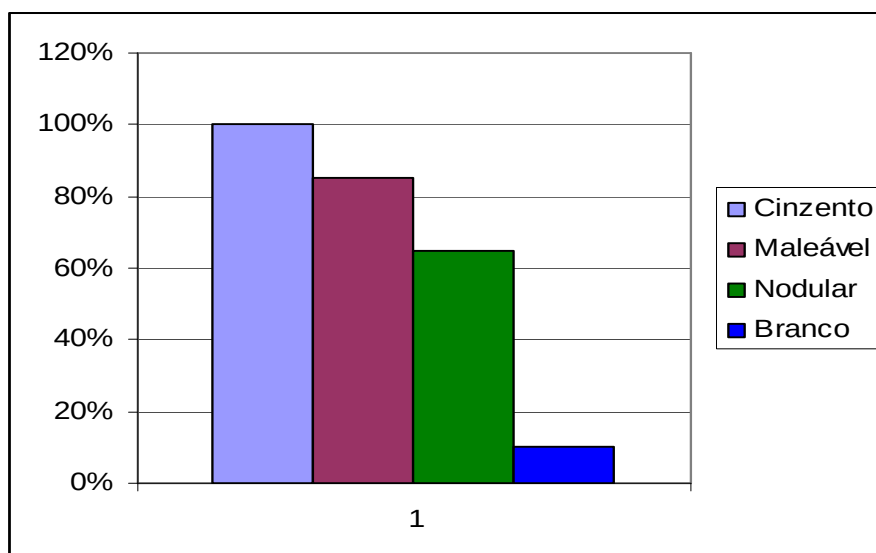


Figura 2.18 – Desempenho comparativo em usinagem entre diversos tipos de ferros fundidos (SANDIVIK, 1994, apud. MACHADO et al., 2009)

Para Machado et al (2009), existe algumas recomendações gerais para um bom desempenho na usinagem de ferros fundidos. São estas:

- ✓ Uma baixa porcentagem de carbono pode levar a dificuldades de usinagem, pois haverá menor porcentagem de veios de grafite e menor indução à fratura de cavacos.
- ✓ Microestruturas com alta porcentagem de ferrita e alto teor de Si são mais resistentes mecanicamente, menos dúcteis e tem menor tendência a gerar APC, o que melhora o processo de usinagem.

- ✓ O aumento de perlita aumenta a dureza e a resistência mecânica, não permitindo altas velocidades de corte e de avanço, além de diminuir o desempenho em usinagem.
- ✓ Quanto mais refinada a estrutura lamelar, pior será o desempenho em usinagem, levando a menores valores de velocidade de corte e de avanço.
- ✓ Porcentagens tão pequenas quanto 5% de carbonetos na microestrutura reduzem substancialmente as condições de corte. Esse efeito é pior em estruturas perlíticas.
- ✓ As partes superiores da peça fundida concentram as piores impurezas, uma vez que estas tendem a “boiar” durante o envazamento do metal fundido.
- ✓ Ferros fundidos cinzentos são os mais fáceis de usinar com cavacos curtos e quebradiços, seguidos dos nodulares e maleáveis, com cavacos longos. Os ferros fundidos vermiculares e brancos estão na outra ponta da escala.
- ✓ Os principais tipos de desgaste quando usinando FoFo são a abrasão, a adesão e a difusão, nessa ordem. A abrasão é causada por carbonetos na microestrutura e por areia na superfície. A adesão pode vir da APC em baixas velocidades de corte. E a difusão pode ocorrer em altas velocidades na superfície de saída quando não se usam coberturas apropriadas, PCBN ou cerâmicas.
- ✓ Para FoFo branco, somente PCBN e cerâmicas têm sido usados com sucesso, além de uma crescente tendência de empregar a retificação.

Seguindo estas recomendações conseguem-se condições de corte maiores e melhores acabamentos e produtividade.

A grafita presente em quase todos os ferros fundidos desempenha um papel importante na usinabilidade, porém a presença de inclusões de sulfetos e a relação ferrita/perlita da matriz possuem efeito significativo. A presença de grafita nos ferros fundidos cinzentos, nodulares e vermiculares, em quantidades em torno de 11% e 12%, auxilia na quebra do cavaco, de modo que os ferros fundidos são classificados como materiais de cavacos descontínuos. Entretanto, os ferros fundidos apresentam diferenças significativas entre si, pois a usinabilidade pode ser alterada por pequenas variações microestruturais (GUESSER, 2009).

De acordo com Guesser (2009), a microestrutura pode afetar a usinabilidade de diversas maneiras:

- ✓ Abrasividade: partículas duras da microestrutura promovendo o desgaste abrasivo da ferramenta de corte. Este efeito é intensificado pelo aumento da força de corte.
- ✓ Lubrificação na interface cavaco-ferramenta: ação lubrificante da grafita e de partículas de sulfeto de manganês.
- ✓ Quebra do cavaco: sulfeto de manganês e grafita, particularmente a lamelar, favorece a quebra do cavaco, diminuindo o tamanho da região de aderência e o tempo de contato cavaco-ferramenta.

Nos itens seguintes serão tratados com mais detalhes a usinabilidade do ferro fundido cinzento e o ferro fundido vermicular, que são os materiais utilizados neste trabalho. Serão apresentadas as principais propriedades destes materiais, características de usinabilidade de cada um, dentre outras não menos importantes.

#### 2.8.1 Características do ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento com certeza é o ferro fundido mais utilizado. Isso é devido suas características como: boa fundibilidade, ótima usinabilidade, resistência ao desgaste e grande capacidade de amortecimento. Com todas essas características há um grande interesse industrial sobre este material.

Como em todas as ligas metálicas, existe uma correlação íntima entre as propriedades do ferro fundido e a sua estrutura, correlação essa que, no caso particular do ferro fundido cinzento, é mais estreita e mais complexa, tendo em vista a presença de carbono livre na forma de grafita e a forma de distribuição e dimensões que os veios de grafita apresentam. A Fig. 2.19 apresenta uma micrografia de ferro fundido cinzento da classe FC 250. Observa-se neste exemplo a morfologia da grafita e a distribuição, caracterizando o ferro fundido cinzento. É freqüente, ainda, adicionar outros elementos de liga visando alterar certas características do material (CHIAVERINI, 2008). Os ferros fundidos cinzentos exibem uma resistência elevada ao desgaste, relacionada à morfologia da grafita (GHADERI; AHMADABADI; GHASEMI, 2003).

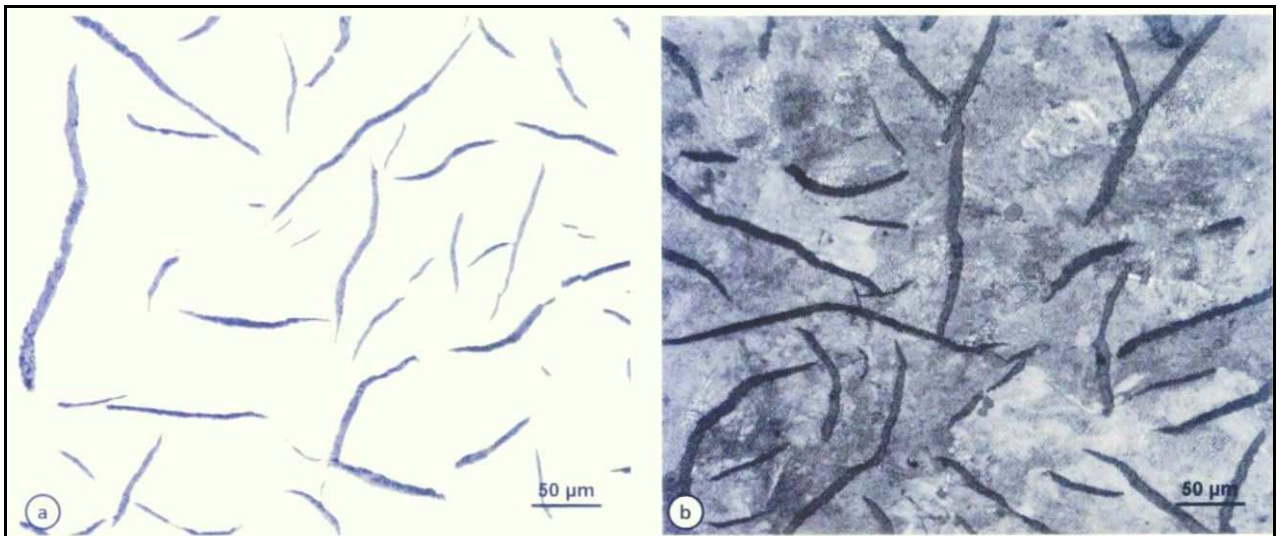


Figura 2.19 – Microestrutura de ferro fundido cinzento, revelando a estrutura da grafita (sem ataque, 200X) e também a matriz (com ataque, 400 X), classe FC 250 (GUESSER, 2009)

De acordo com a Norma ABNT, os ferros fundidos cinzentos são classificados tanto pela sua resistência a tração como por sua faixa de dureza Brinell. A classificação pelo limite de resistência a tração é dado pela NBR 6589/1986, enquanto que, pela dureza é a NBR 8583/1984. As tabelas 2.6 e 2.7 mostram a classificação dos ferros fundidos cinzentos segundo estas duas normas.

A classe FC-100 é empregada principalmente para aplicações envolvendo choque térmico ou ainda alta capacidade de amortecimento de vibrações. Disco e tambores de freios podem ser fabricados nas classes FC-150 a FC-250. Blocos de motores normalmente são especificados na classe FC-250, enquanto os cabeçotes de motores podem ser especificados nas classes FC-250 e FC-300. As classes FC-350 e FC-400 são empregadas para aplicações muito específicas, como alguns eixos de comandos de válvulas. Sua utilização tem decrescido, sendo substituída por ferros fundidos nodulares (GUESSER, 2009). Estes exemplos são demonstrações da grande importância do ferro fundido em especial para a indústria automobilística.

Tabela 2.6 – Classe de ferro fundido cinzento prevista na norma ABNT NBR 6589/1986, conforme a resistência à tração (GUESSER, 2009)

| Classe        | D (mm) (*) | d (mm) (**) | LR mínimo (MPa) |
|---------------|------------|-------------|-----------------|
| <b>FC 100</b> | 20         | 20,0        | 100             |
| <b>FC 150</b> | 13         | 8,0         | 230             |
|               | 20         | 12,5        | 180             |
|               | 30         | 20,0        | 150             |
|               | 45         | 32,0        | 110             |
| <b>FC 200</b> | 13         | 8,0         | 280             |
|               | 20         | 12,5        | 230             |
|               | 30         | 20,0        | 200             |
|               | 45         | 32,0        | 160             |
| <b>FC 250</b> | 13         | 8,0         | 330             |
|               | 20         | 12,5        | 280             |
|               | 30         | 20,0        | 250             |
|               | 45         | 32,0        | 210             |
| <b>FC 300</b> | 20         | 12,5        | 330             |
|               | 30         | 20,0        | 300             |
|               | 45         | 32,0        | 260             |
| <b>FC 350</b> | 20         | 12,5        | 380             |
|               | 30         | 20,0        | 350             |
|               | 45         | 32,0        | 310             |
| <b>FC 400</b> | 30         | 20,0        | 400             |
|               | 45         | 32,0        | 360             |

Sendo que  $\underline{D}$  é o diâmetro da barra no estado bruto,  $\underline{d}$  é o diâmetro do corpo de prova usinado e  $\underline{LR}$  é o limite de resistência mínimo.

Tabela 2.7 – Norma ABNT (NBR 8583/1984) – Peças de ferro fundido cinzento classificadas conforme a dureza Brinell (GUESSER, 2009)

| Classe   | Faixa de Dureza Brinell |
|----------|-------------------------|
| FCHB 158 | 145 – 170               |
| FCHB 175 | 150 – 200               |
| FCHB 200 | 170 – 230               |
| FCHB 225 | 190 – 260               |
| FCHB 265 | 240 – 290               |
| FCHB 295 | 270 – 320               |

As propriedades dos ferros fundidos cinzentos são influenciadas basicamente por três elementos: carbono, silício e em menor extensão o fósforo. Desses o mais importante é o silício, pois, ele é o principal responsável pela formação de grafita (CHIAVERINI, 2008).

Outros elementos podem ser adicionados para melhorar determinadas características. A influência dos elementos químicos se deve principalmente a dois efeitos:

- 1- Decomposição da cementita, ou seja, são elementos grafitizantes: Silício, alumínio, níquel, cobre e titânio. Tem este efeito quando adicionados ao ferro fundido.
- 2- Estabilização de carbonetos, ou seja, retardam a formação da grafita: Destacam-se manganês, cromo, molibdênio e vanádio, entre outros.

Dentre as várias funções dos elementos químicos adicionados ao ferro fundido, destacam-se (CHIAVERINI, 2008).

- O cromo e o vanádio aumentam a resistência à tração (para teores entre 0,5 e 1,0%) e dureza, além de favorecerem a formação de perlita;
- O cromo e o molibdênio aumentam a resistência à ruptura transversal. O níquel e o titânio também têm esta função.
- O níquel é um elemento grafitizante. Normalmente é adicionado em teores entre 0,5 e 1,5%.

Normalmente, a adição de elementos de liga nos ferros fundidos de baixa teor em liga é feita pela combinação de vários elementos, sendo as combinações clássicas Cr-Ni, Cr-Ni-Mo, Cr-Cu, Cr-Cu-Mo e Ni-Mo (CHIAVERINI, 2008).

A figura 2.20 mostra alguns resultados de desgaste em fresamento frontal para três velocidades de corte na usinagem de três materiais: dois ferros fundidos cinzentos ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e um vermicular da classe 350.

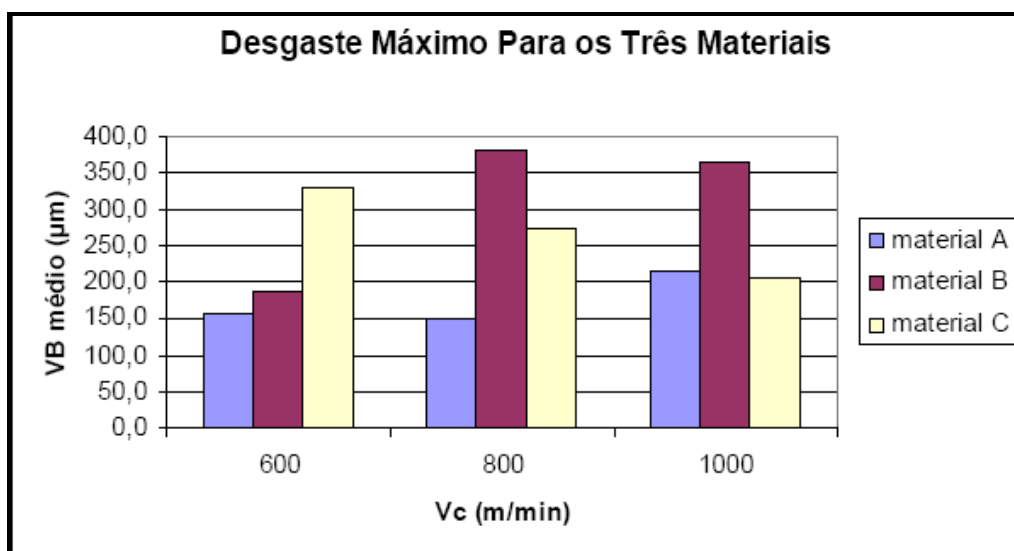


Figura 2.20 – Resultados de desgaste no fresamento de ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn (material A), ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo (material B) e ferro fundido vermicular da classe 350 (material C) (NAVES, 2009)

Percebe-se que em duas das três condições o ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo, teve um desgaste maior do que o vermicular. Isso se deve aos seus elementos de liga, que além de afetar a usinabilidade, demonstra um comportamento diferente em velocidades diferentes.

Dentre os ferros fundidos com grafita, os melhores resultados de usinabilidade são obtidos com os ferros fundidos cinzentos. Estes materiais apresentam grafita em forma de veios, que age como lubrificante (MARWANGA et al., 2000). Em geral são usados como referência para comparar a usinabilidade entre os diferentes tipos.

A usinabilidade diminui com o aumento do limite de resistência à tração, ou seja, quanto maior a classe dos ferros fundidos menor a usinabilidade. Isto se dá em função do aumento da quantidade de perlita na matriz e consequente diminuição da quantidade de grafita (GUESSER, 2009). A Fig. 2.21 mostra a influência da quantidade de cementita na vida de brocas para várias velocidades de corte.

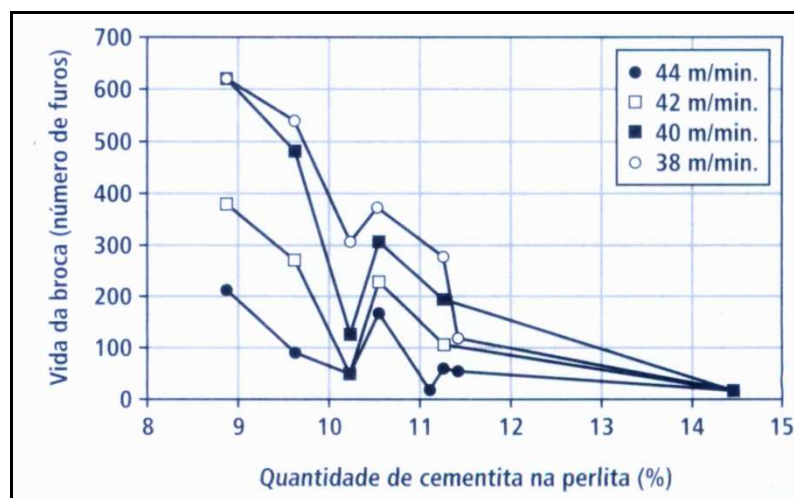


Figura 2.21 – Diminuição da vida da ferramenta (ensaio de furação) com o aumento da quantidade de cementita na perlita, para as várias velocidades de corte (BATES, 1996, apud. GUESSER, 2009)

A perlita possui boas propriedades mecânicas e uma razoável usinabilidade, e esta é influenciada pelo tamanho de grão, sendo que a perlita “grossa” tem melhor usinabilidade. Um outro efeito importante da microestrutura refere-se ao tamanho da grafita no acabamento superficial. Quanto maior o tamanho da grafita, maior são as partículas formadas pela fratura, o que pode conduzir a problemas de acabamento.

### 2.8.2 Características do ferro fundido vermicular

Os ferros fundidos vermiculares apresentam características de usinabilidade intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o nodular. Isso ocorre devido a maior resistência do vermicular, em função do tipo da grafita e também de sua matriz. O cavaco formado na usinagem não é mais descontínuo, podendo agora ser considerado parcialmente contínuo ou até mesmo contínuo em alguns casos.

A grafita no ferro fundido vermicular tem uma morfologia diferente dos ferros fundidos cinzentos. As lamelas têm as extremidades arredondadas, o que confere uma forma parecida com vermes. Assim, este material tem propriedades mecânicas e térmicas intermediárias entre o cinzento e o nodular. A Fig. 2.22 mostra uma micrografia típica de um ferro fundido vermicular. Normalmente este material apresenta certa quantidade de grafita nodular.

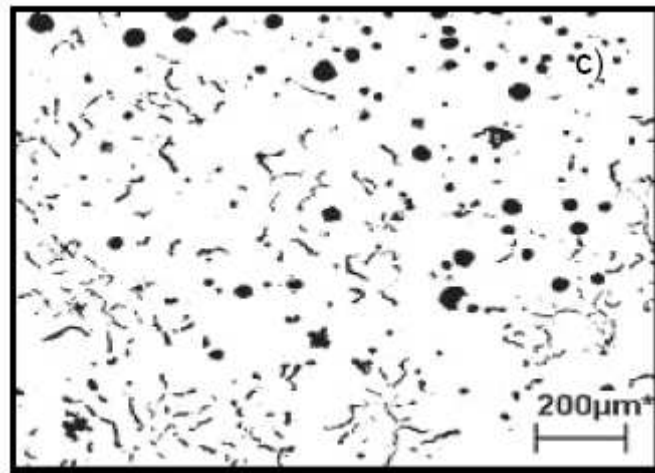


Figura 2.22 – Micrografia do ferro fundido vermicular da classe 450 (classificação ASTM) (DA MOTA, 2009)

A Fig. 2.23 mostra a diferença entre as usinabilidades dos ferros fundidos cinzentos e vermiculares em diferentes operações de usinagem.

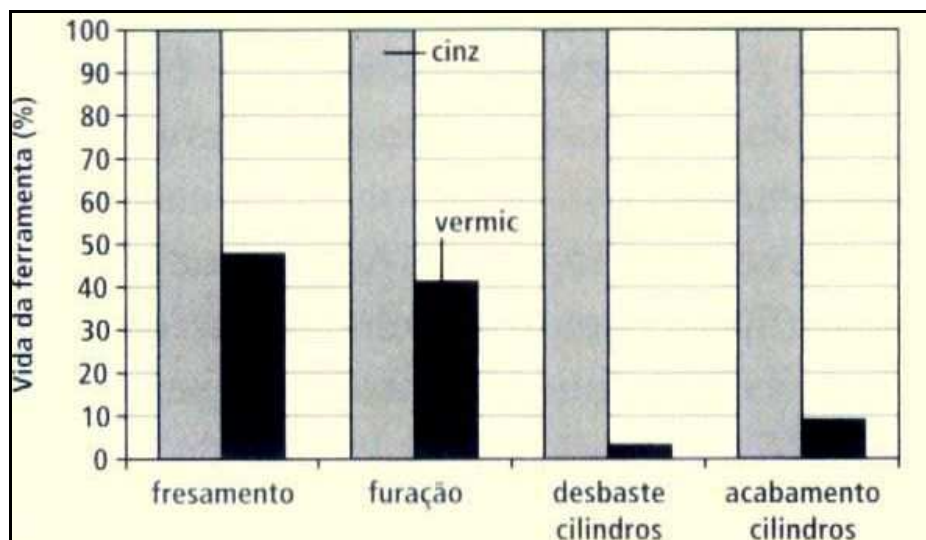


Figura 2.23 – Resultado de usinagem de motores em linhas contínuas (REUTER; SCHULZ, 1999)

Assim como o ferro fundido cinzento a usinabilidade dos ferros fundidos vermiculares decresce à medida que se caminha para classe de maior resistência (GUESSER, 2009). Há também a influência da ferrita, pois a dureza da ferrita afeta a usinabilidade, verificando-se um decréscimo da usinabilidade com o aumento do teor de silício (de 3% para 4%) que corresponde a um aumento da dureza de 170 para 200HB (DAWSON et al., 1999).

A presença de partículas de maior dureza também afeta de maneira negativa os índices de usinabilidade. Logo, pequenas alterações serão sentidas de maneira direta na usinabilidade, o que requer uma maior atenção da indústria para que o material satisfaça a sua necessidade, mas, no entanto, não piore para o processo de fabricação.

Em alguns casos, como a usinagem de ferro fundido vermicular com ferramentas de PCBN, a vida da ferramenta no corte interrompido pode diminuir em até 50%. As diferenças mais significativas na usinabilidade do ferro fundido vermicular são notadas a altas velocidades de corte (ABELE; SAHM; SCHULZ, 2002).

## **CAPÍTULO III**

### **Procedimentos Experimentais**

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais, assim como materiais e equipamentos utilizados para realização do trabalho. O desempenho do processo de rosqueamento interno foi avaliado para três ferros fundidos diferentes em várias condições de usinagem. A avaliação foi feita através da medição das forças de corte e do torque durante a usinagem utilizando dinamômetro rotativo por telemetria.

Além do material da peça também foram variadas as ferramentas de corte, comprimento da rosca, velocidade de corte, avanço axial, concentricidade da ferramenta e pré-furo e a forma de aplicação do fluido de corte.

#### **3.1-Materiais Utilizados**

Para a realização dos testes foram utilizados três materiais para o corpo de prova, sendo eles um ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn (material A), outro ligado ao CrCuSnMo (material B) e ainda um ferro fundido vermicular da classe 350 (material C). Estes materiais são utilizados na fabricação de blocos de motores, pois eles possibilitam um aumento na potência do motor sem que haja um aumento do peso, uma vez que estes materiais têm uma maior resistência mecânica.

Os materiais foram fornecidos pela Tupy S.A., empresa de Joinville/SC. Os corpos de prova foram inicialmente utilizados para avaliação da usinabilidade no fresamento frontal (NAVES, 2009). O fabricante tem uma designação própria para o material, sendo FC 250 (ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn), FC 300 (ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo) e FV 350 (ferro fundido vermicular).

A empresa forneceu várias informações sobre os materiais utilizados, uma delas é a composição química dos mesmos, que segue abaixo na Tab. 3.1

Tabela 3.1-Composição química dos ferros fundidos fornecidos pela Tupy S.A

| <b>Material</b> | <b>C (%)</b> | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>S</b> | <b>Cu</b> | <b>Sn</b> | <b>Mo</b> | <b>Cr</b> | <b>Ti</b> |
|-----------------|--------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>FC 250</b>   | 3,4          | 2,1       | 0,55      | 0,09     | 0,62      | 0,055     | 0         | 0,19      | 0,013     |
| <b>FC 300</b>   | 3,3          | 2,1       | 0,54      | 0,09     | 0,9       | 0,03      | 0,27      | 0,26      | 0,009     |
| <b>FV 350</b>   | 3,5          | 2,3       | 0,25      | 0,006    | 0,19      | 0,024     | 0         | 0         | 0,01      |

Para os dois ferros fundidos cinzentos ligados a matriz é 100% perlítica. Já o ferro fundido vermicular da classe 350 possui uma matriz perlítica com 44% de ferrita. A Tab. 3.2 mostra mais informações da microestrutura destes materiais.

Tabela 3.2-Tipo da matriz e caracterização da grafita

| <b>Material</b> | <b>Matriz</b>                          | <b>Grafita</b>  |             |                |                |
|-----------------|----------------------------------------|-----------------|-------------|----------------|----------------|
|                 |                                        | <b>Forma</b>    | <b>Tipo</b> | <b>Tamanho</b> | <b>Nodular</b> |
| <b>A</b>        | <b>Perlita 100%</b>                    | <b>I</b>        | <b>A</b>    | <b>4-5</b>     | <b>-</b>       |
| <b>B</b>        | <b>Perlita 100%</b>                    | <b>I</b>        | <b>A</b>    | <b>4-5</b>     | <b>-</b>       |
| <b>C</b>        | <b>Perlita com<br/>~44% de ferrita</b> | <b>III - VI</b> | <b>-</b>    | <b>-</b>       | <b>15%</b>     |

A tabela 3.3 apresenta algumas das propriedades mecânicas dos materiais como: dureza, resistência à tração, condutividade térmica e micro dureza da perlita. Todas essas propriedades são de enorme valia para caracterização da usinabilidade dos materiais.

Tabela 3.3 – Propriedade mecânica dos materiais usinados

| <b>Propriedade</b>                         | <b>Material A</b> | <b>Material B</b> | <b>Material C</b> |
|--------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Resistência à Tração<br/>(Mpa)</b>      | 233,06            | 251,17            | 356,52            |
| <b>Dureza (HB)</b>                         | 216,4             | 223,5             | 174,9             |
| <b>Micro Dureza da Perlita<br/>(HV 01)</b> | 320,3             | 330,13            | 341,64            |
| <b>Condutividade Térmica<br/>(W/K.m)</b>   | 50                | 45,5              | 37                |

As figuras 3.1 à 3.2 mostram a micrografia destes três materiais com ataque de nital a 3%.

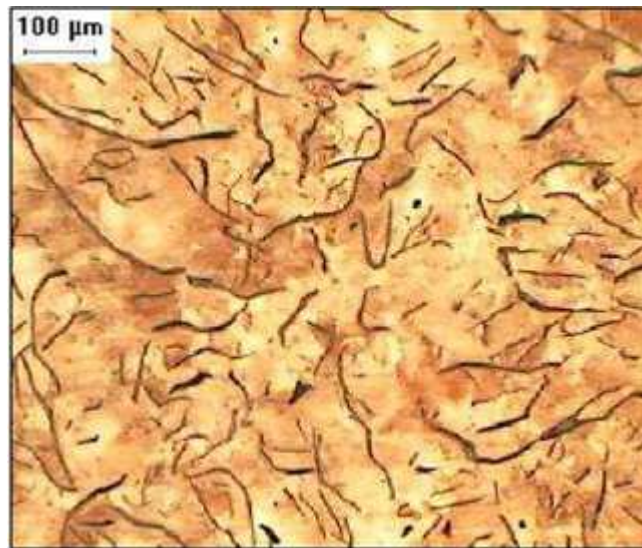


Figura 3.1 - Micrografia do ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn atacada com nital 3%

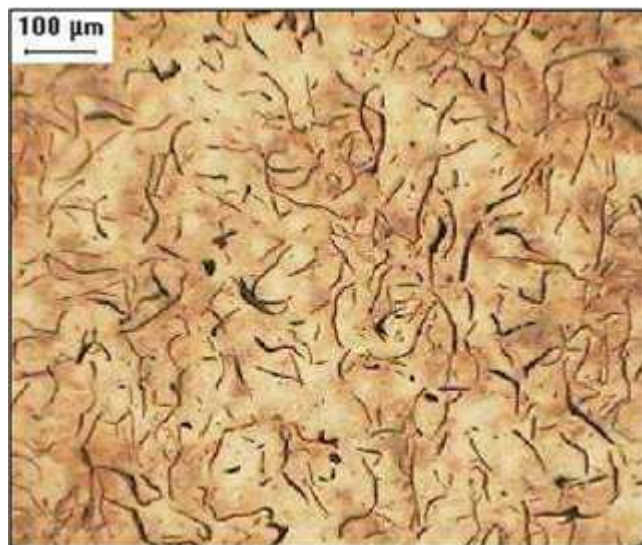


Figura 3.2 - Micrografia do ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo atacada com nital 3%

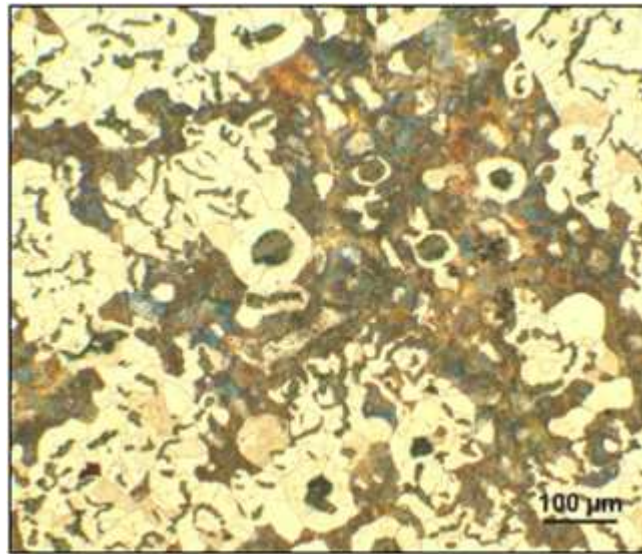


Figura 3.3 - Micrografia do ferro fundido vermicular da classe 350 atacada com nital 3%

Conhecer os componentes da matriz em suas porcentagens é um fator muito importante para a usinagem, já que estes indicam uma forte tendência sobre a usinabilidade dos materiais. Matrizes ferríticas tendem a ser mais fácil de usinar do que matrizes perlíticas, além é claro de um efeito conhecido como efeito de tamanho, no qual o efeito dos microconstituintes têm uma grande influência na usinagem com pequenas profundidades de corte.

#### 3.1.1-Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fornecidos em bruto com a geometria apresentada na Fig. 3.4-a. Inicialmente foram utilizados para ensaios de fresamento (NAVES, 2009). A geometria final dos corpos de prova utilizados neste trabalho é mostrada na Fig. 3.4-b.

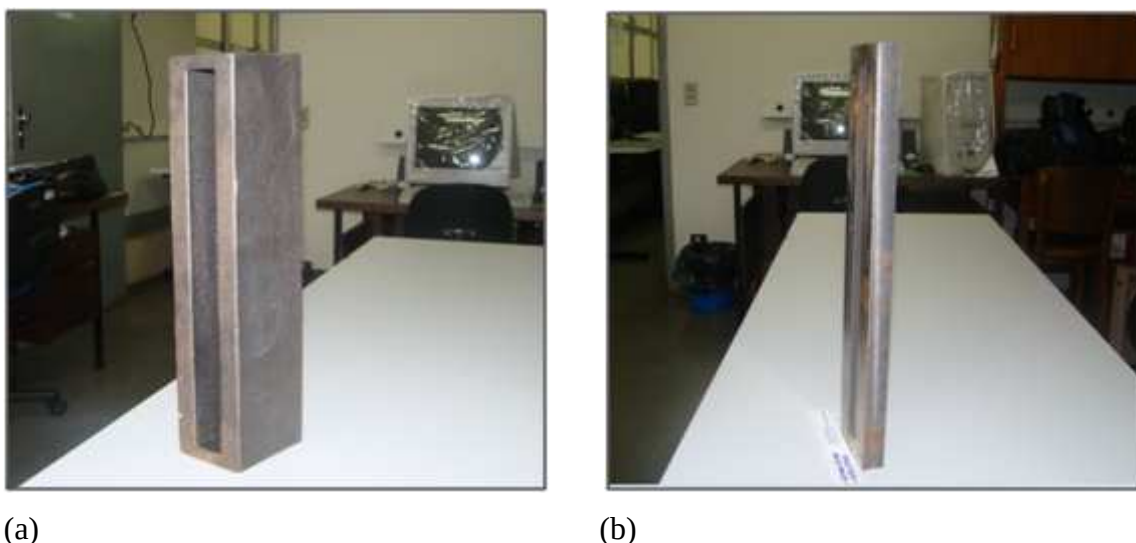


Figura 3.4 – Imagens dos corpos de prova; (a) corpo de prova bruto e (b) corpo de prova usinado

Todos os corpos de prova tiveram a sua lateral usinada com 25 mm de largura em todo o seu comprimento, retirando em cada lateral 3 mm de espessura. Também foi feita uma usinagem na base com a mesma profundidade de corte. As medidas finais do bloco são de 352 mm x 65 mm x 21 mm.

Após a fixação na morsa para os testes de rosqueamento, os corpos de prova eram usinados na face superior para garantir o perpendicularismo retirando apenas uma fina camada de aproximadamente de 0,5 mm de espessura na face onde seria feito os furos. A Fig. 3.5 mostra uma foto da operação de furação de um corpo de prova.

Durante a furação utilizou-se uma velocidade de corte de 20 m/min, fluido de corte emulsionável com concentração de 15% e uma velocidade de avanço de 150 mm/min para um diâmetro de 5 mm. Os furos eram feitos com uma profundidade de 15 mm e estes eram escareados com 1 mm x 45°. A Fig. 3.6 abaixo apresenta um desenho representativo do furo.

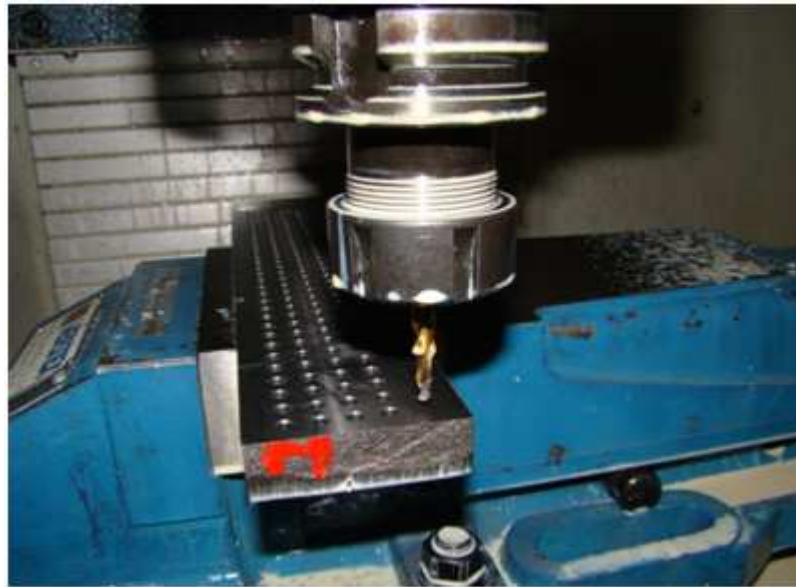


Figura 3.5- Furação do corpo de prova para rosqueamento

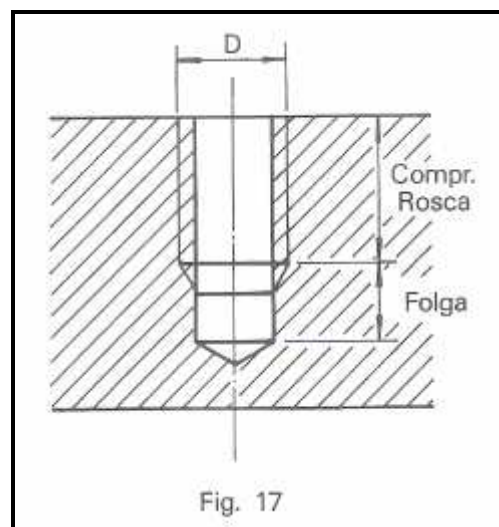


Figura 3.6 –Ilustração do furo onde será realizada as roscas

Um corpo de prova escalonado foi preparado para testes de rosqueamento com diferentes comprimentos de rosca. A Fig. 3.7 mostra uma foto da seção transversal do corpo de prova, que possui diferentes espessuras.

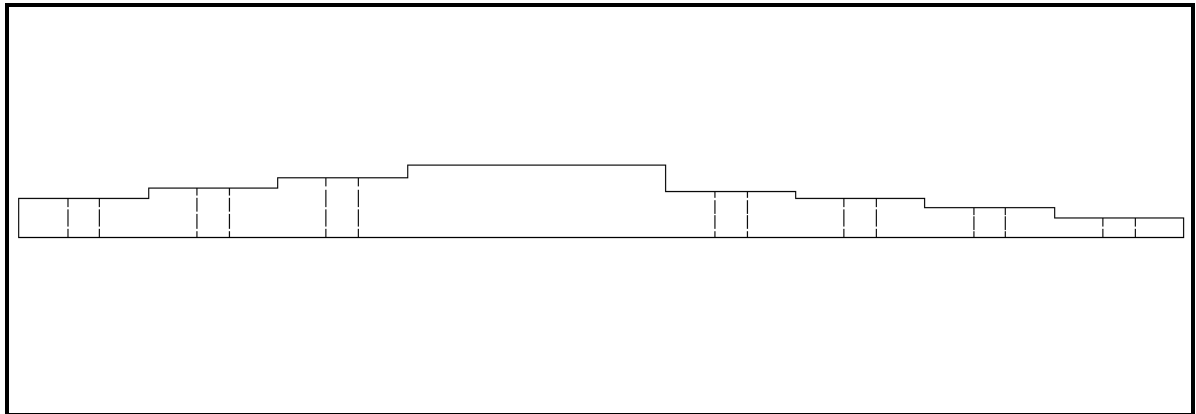


Figura 3.7 – Corpo de prova com diferentes espessuras para o rosqueamento

### 3.1.2-Ferramentas utilizadas

Foram utilizadas quatro tipos de macho de corte, fornecidos pela OSG:

- Aço-rápido especial (HSS-E) M6 6H com revestimento Futura.
- Aço-rápido especial (HSS-E) M6 6H revestido com TiN.
- Aço-rápido convencional (HSS) M6 6H.
- Aço-rápido convencional (HSS) nitretado M6 6H.

Para o pré-furo foi utilizada uma broca de metal duro escalonada, com diâmetro menor de 5 mm e maior de 8 mm e com comprimento útil de 14 mm. Esta ferramenta foi fabricada pela Dormer. A Fig. 3.8 mostra foto de cada uma das ferramentas.



Figura 3.8 – Diferentes machos e a broca utilizada para os ensaios

### 3.1.3-Fluido de Corte

Em alguns ensaios foi usada uma emulsão de água e óleo em jorro e MQF (mínima quantidade de fluido). Para o MQF foi utilizado um óleo vegetal Accu-Lube LB 2000, fabricado pela ITW Chermical Products LTDA. Em sua composição há óleo vegetal, aditivos e anti-oxidante e ainda é biodegradável. O óleo emulsionável é o Vasco 1000 (semi-sintético), fabricado pela Blaser Swisslube do Brasil LTDA. Este é um fluido a base de óleo vegetal miscível em água, recomendado para operações de usinagem em geral e retífica. A Fig. 3.9 ilustra estas duas formas de aplicação.

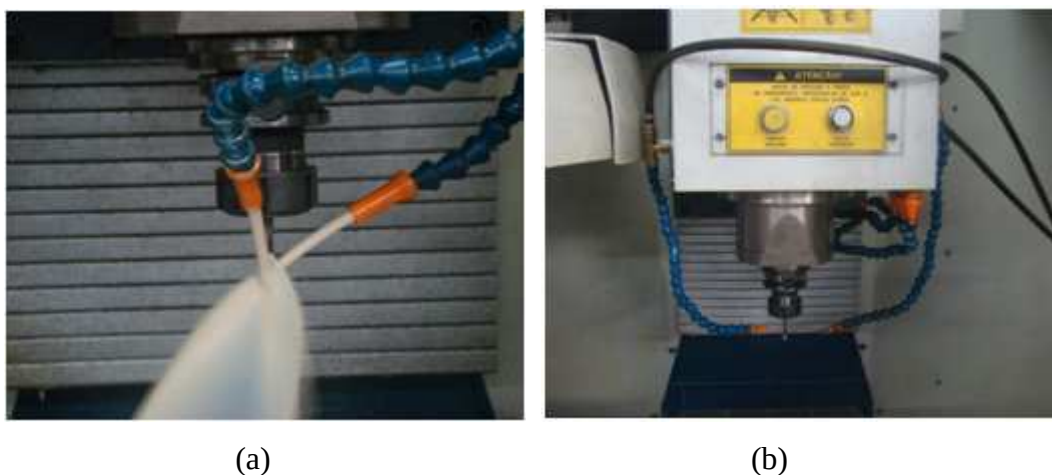


Figura 3.9 – Modo de aplicação de fluido, sendo (a) a aplicação em jorro e (b) MQF

O equipamento utilizado para a aplicação em MQF é um pulverizador de fluido, modelo O2AO-STD fabricado pela ITW Fluid Products Group. Este equipamento trabalha com um fluxo contínuo de ar comprimido, com pressão em torno de 6,0 bar, e “spray” intermitente de fluido na frequência de 1 pulso por segundo. A Fig. 3.10 mostra a montagem do equipamento. A vazão de fluido de corte é de aproximadamente 30 ml/h.

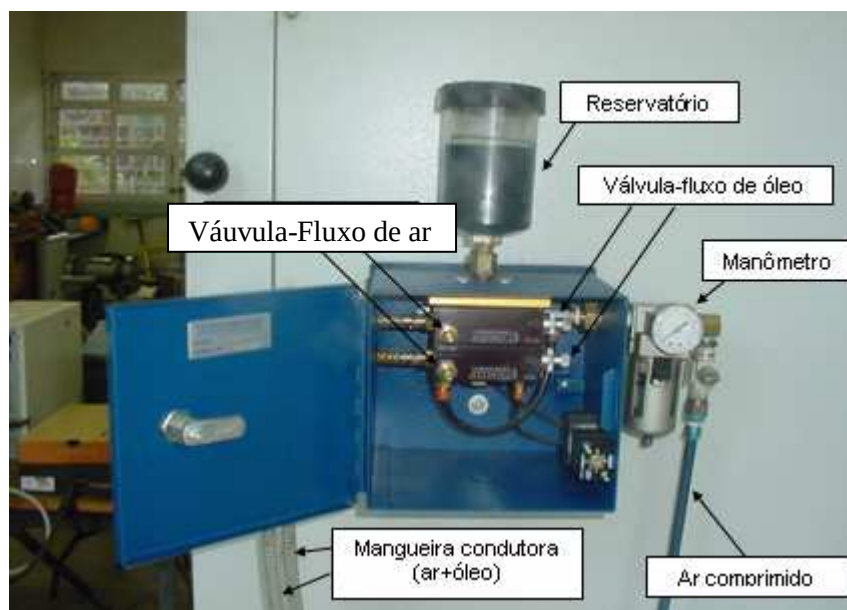


Figura 3.10 – Sistema de aplicação de fluido por MQF (COSTA, 2005).

O óleo semi-sintético foi aplicado com uma vazão de 1230 l/h e uma concentração de 15%.

### 3.2-Equipamentos Utilizados

Neste tópico serão apresentados os equipamentos e acessórios necessários para a realização dos testes. Entre eles está o equipamento para a medição de força e torque, um computador para armazenar e analisar dados, um centro de usinagem e acessórios como uma morsa e um mandril para a fixação da broca. Todos os equipamentos usados nos ensaios são de propriedade da Universidade Federal de Uberlândia e estão sob a responsabilidade do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU).

#### 3.2.1-Máquina-ferramenta

Durantes os ensaios de rosqueamento foi utilizado um centro de usinagem Discovery 760 Romi com 3 eixos, potência de 11 KW, com variação contínua de velocidade variando de 0 a 10000 rpm. A Fig. 3.11 apresenta uma foto do centro de usinagem.



Figura 3.11 - Centro de usinagem CNC, Discovery 760 Romi, utilizada para os ensaios de rosqueamento

### 3.2.2 - Sistema de fixação dos corpos de prova

O sistema de fixação foi feito através de uma morsa Vertex, com comprimento de seus mordentes menor do que o da peça. Com isso ficou um comprimento em balanço em cada extremidade de 100 mm. A Fig. 3.12 mostra um corpo de prova fixado na morsa.



Figura 3.12 – Sistema de fixação da peça

### 3.2.3 Equipamentos para medição de força e torque

Para medição da força de avanço e torque durante a operação, foi utilizado um dinamômetro da Kistler modelo 9123 C1211, com condicionador de sinal de multicanais da Kistler modelo 5223131. O dinamômetro foi fixado no mandril da máquina, o qual transmitiu os sinais de força e torque por telemetria. A Fig. 3.13 mostra o sistema montado no Centro de Usinagem. Para aquisição dos sinais foi utilizada uma placa de aquisição de sinais da DAK 6202, e utilizada uma taxa de aquisição de 100 Hz.



Figura 3.13 – Dinamômetro por telemetria Kistler

A montagem do condicionador, do computador e da placa de aquisição está mostrada na Fig. 3.14, lembrando que o modelo de placa de aquisição de sinais fica embutido na CPU.



Figura 3.14 – Montagem de parte do sistema de aquisição de sinais de força e torque

### 3.3 – Metodologia

Foram realizados ensaios para verificar o comportamento na usinagem dos três materiais dos corpos de prova em diversas condições de corte, variando a velocidade de corte em três níveis e o tipo de aplicação do fluido. Para cada condição selecionada foi realizado 5 repetições. Nesta etapa foram utilizadas as condições de corte mostradas na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros de corte usados na primeira etapa dos testes de rosqueamento

| Material da peça | Velocidade de corte | Fluido de Corte | Revestimento de ferramenta. | Nº de condições |
|------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| A                | 20                  | Sem/jorro/MQF   | Futura                      | 3               |
|                  | 35                  | Sem/jorro/MQF   |                             | 3               |
|                  | 75                  | Sem/jorro/MQF   |                             | 3               |
| B                | 20                  | Sem/jorro/MQF   | Futura                      | 3               |
|                  | 35                  | Sem/jorro/MQF   |                             | 3               |
|                  | 75                  | Sem/jorro/MQF   |                             | 3               |
| C                | 20                  | Sem/jorro/MQF   | Futura                      | 3               |
|                  | 35                  | Sem/jorro/MQF   |                             | 3               |
|                  | 75                  | Sem/jorro/MQF   |                             | 3               |
| Total            |                     |                 |                             | 27              |

Também foram realizados ensaios para verificar o efeito de alguns parâmetros no processo de rosqueamento. Para estes ensaios foram variados parâmetros tais como:

- Velocidade de avanço da máquina: é alterado o passo indicado na programação da máquina.
- Tipo de revestimento: é alterado o revestimento da ferramenta e tratamento termoquímico.
- Velocidade de corte: os valores de velocidade de corte são alterados desde pequenos valores até o limite da máquina-ferramenta.
- Excentricidade do macho em relação ao pré-furo.

- Comprimento da rosca: esta variação é feita através da alteração da espessura do corpo de prova, assim garantimos que os dentes da parte cônica do macho e os dentes alisadores serão utilizados.

Estes testes foram realizados apenas no ferro fundido vermicular (material C). As Tab 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 mostram as condições de corte utilizadas.

Tabela 3.4-Condição de corte usada para investigar a variação do revestimento da ferramenta

| Revestimento        | Tin        | Futura | Nitretação | Sem revestimento |
|---------------------|------------|--------|------------|------------------|
| Material            | A          |        |            |                  |
| Velocidade de Corte | 35 m/min   |        |            |                  |
| Fluido de Corte     | Sem fluido |        |            |                  |

Tabela 3.5-Condições utilizadas para analisar a excentricidade da ferramenta

| Excentricidade | Material | Velocidade de Corte | Fluido de Corte | Material do Revestimento                |
|----------------|----------|---------------------|-----------------|-----------------------------------------|
| 0,00           | A        | 35 m/min            | Sem Fluido      | Ferramenta com tratamento de nitretação |
| 0,03           |          |                     |                 |                                         |
| 0,05           |          |                     |                 |                                         |
| 0,10           |          |                     |                 |                                         |
| 0,15           |          |                     |                 |                                         |
| 0,20           |          |                     |                 |                                         |
| 0,30           |          |                     |                 |                                         |
| 0,40           |          |                     |                 |                                         |
| 0,50           |          |                     |                 |                                         |

Tabela 3.6 – Condições utilizadas para analisar a variação da velocidade de avanço

| Material | Velocidade de Corte | Fluido de Corte | Material do Revestimento                | Velocidade de avanço |
|----------|---------------------|-----------------|-----------------------------------------|----------------------|
| A        | 35 m/min            | Sem Fluido      | Ferramenta com tratamento de nitretação | 0,992                |
|          |                     |                 |                                         | 0,994                |
|          |                     |                 |                                         | 0,996                |
|          |                     |                 |                                         | 0,998                |
|          |                     |                 |                                         | 1,000                |
|          |                     |                 |                                         | 1,002                |
|          |                     |                 |                                         | 1,004                |
|          |                     |                 |                                         | 1,006                |
|          |                     |                 |                                         | 1,008                |

Tabela 3.7 – Variação da velocidade de corte

| Material | Ferramenta de corte | Velocidade de Corte (m/min) |
|----------|---------------------|-----------------------------|
| C        | M6 x 1 HSS Futura   | 0,95                        |
|          |                     | 1,88                        |
|          |                     | 3,77                        |
|          |                     | 7,54                        |
|          |                     | 15,08                       |
|          |                     | 20                          |
|          |                     | 30,16                       |
|          |                     | 35                          |
|          |                     | 60,32                       |
|          |                     | 75                          |

Apesar da enorme vida de um macho de corte, podendo em alguns casos fabricar até duas mil roscas antes de chegar ao fim de vida, aqui para não influenciar um possível desgaste sobre as forças medidas, cada ferramenta fez no máximo de 25 roscas. Assim minimiza a influencia do desgaste anterior sobre os resultados obtidos.

## **CAPÍTULO IV**

### **Resultados e Discussões**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos de acordo com os procedimentos do capítulo anterior. No entanto, inicialmente será feita uma discussão a respeito do comportamento dos sinais de força e torque. Isto se faz necessário porque, por se tratar de uma operação complexa, estes sinais não podem ser interpretados apenas utilizando um valor representativo, como média, por exemplo.

#### **4.1 Torque durante o rosqueamento**

O torque, assim como a força, durante o rosqueamento tem um comportamento peculiar e pode ser dividido em etapas que representam estágios durante a operação. A Fig. 4.1 mostra um exemplo, do sinal do torque para uma condição de corte específica. O sinal foi dividido em três etapas: corte, parada e retorno. Na primeira etapa, assim que o macho toca a peça, o rosqueamento inicia e o torque aumenta rapidamente e oscila em torno do valor de 1,5 N.m. Em seguida, na segunda etapa o sinal fica quase retilíneo, com pouca oscilação. Este ponto significa que houve uma parada, esta é uma parada programada para a inversão do movimento. A terceira etapa inicia com uma queda brusca do torque, indicando a inversão do movimento. Essas etapas são para um furo não passante, já que em um furo passante o formato do sinal é um pouco diferente.

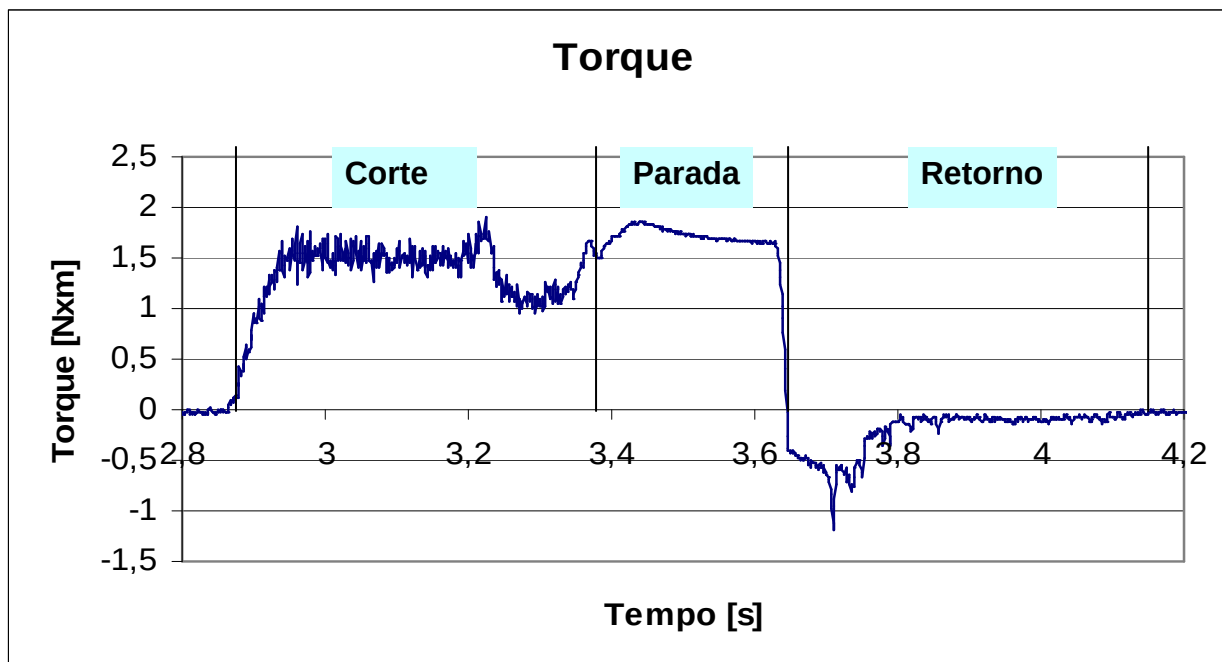


Figura 4.1 – Gráfico do sinal de torque, para o material C, velocidade de corte de 20 m/min a seco, com as especificações das etapas

O sinal de torque além de ser um sinal de mais fácil interpretação, é menos sensível a mudanças do que o sinal de força, já que o sinal de força percebe pequenas mudanças sofrendo, em algumas vezes, grandes alterações. No gráfico do torque, logo após a abrupta elevação que marca o início do corte, há uma fase constante, quase retilínea, que marca o corte da rosca efetivamente. Teoricamente nesta fase há uma velocidade de corte constante. No entanto, quando se rosqueia furos não passantes esta fase é marcada por uma descontinuidade no gráfico que marca o início da desaceleração (frenagem). Isto significa que, roscas de furos não passantes ou mesmo as de furos passantes feitas a altas velocidades de corte, em máquinas CNCs com mandril fixo, não são fabricadas com a velocidade de corte constante. Um exemplo disso, é que nos testes realizados a velocidade de 75 m/min, o eixo árvore inicia a desaceleração antes mesmo de a ferramenta tocar a peça.

Durante a parada da ferramenta, o torque é aproximadamente igual ao torque durante o corte. Para roscas passantes o torque é quase zero durante a parada, pois no furo passante a parada não é durante o corte, mais sim quando até os dentes alisadores já estão saindo da peça. Por último tem-se o retorno da ferramenta. Nessa fase não há corte de metal, mas ainda pode existir atrito do macho de corte com o material da peça, seja pela falta de sincronismo entre o passo da ferramenta e o passo atuante na máquina-ferramenta, por cavaco que entra

entre a ferramenta e a peça ou mesmo por material aderido ao filete de rosca. Como o macho gira em sentido contrário ao giro de entrada, é esperado que o resíduo de torque que aparece seja negativo.

#### 4.2 Força na direção axial

A figura 4.2 mostra um exemplo típico do comportamento da força axial durante o rosqueamento. Neste caso a força varia praticamente durante toda a operação. Inicialmente a força aumenta, até que toda parte cônica do macho entre na peça. Logo após a entrada de todo o comprimento cônico a força passa a diminuir chegando a uma fase quase constante quando próximo de sua parada.

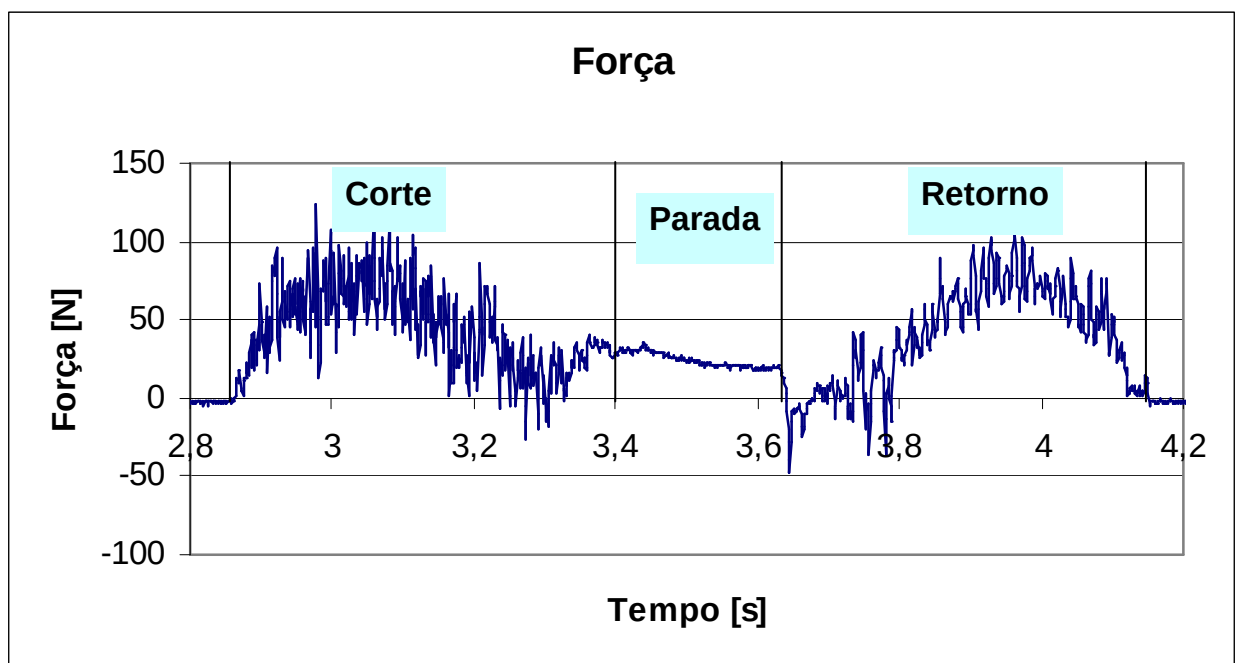


Figura 4.2 – Gráfico do sinal de força axial, para o material C, velocidade de corte de 20 m/min a seco, com as especificações das etapas

A próxima etapa é a parada. Esta pode estar ligada diretamente à velocidade de corte, devido ao sincronismo da máquina-ferramenta. Em outras palavras, quanto menor a velocidade de corte, mais fácil de manter o sincronismo entre as partes, mas quando não há, pode-se ao final da primeira parte do processo de rosqueamento (antes da parada), haver uma

movimentação do eixo árvore para corrigir um erro de posição final. Esta correção faz com que a força aumente (devido à tendência de pressionar os dentes do macho contra o filete de rosca) ou diminua em relação a última tendência (devido à tendência de aliviar a pressão do dente do macho contra o filete de rosca) durante o corte.

A última fase é o retorno. Uma peculiaridade desta etapa é que a partir de uma determinada velocidade de corte o valor médio da força durante o retorno é maior do que durante a entrada, quando há o corte efetivamente dito. Isso pode ser explicado pela falta de sincronismo, que não há na entrada, uma vez que ainda não existe rosca para existir uma falta de sincronismo. Na entrada o que pode existir aqui será chamado de erro de passo, diferença entre o passo da ferramenta e o avanço axial da máquina-ferramenta. No entanto, durante a saída do macho de corte como já existe uma rosca, este erro de passo será tratado como uma falta de sincronismo, que por consequência aumenta o valor da força média, devido a fatores tais como o atrito dos dentes do macho com o filete de rosca usinado. A diferença aumenta com a velocidade de corte, pela maior dificuldade da máquina-ferramenta em manter um sincronismo a altas velocidades.

A Figura 4.3, a seguir mostra um gráfico comparativo entre três sinais de força sendo, para velocidades de 20 m/min, 35 m/min e 75 m/min. Foi feito uma média móvel para obter um gráfico mais limpo para uma comparação.

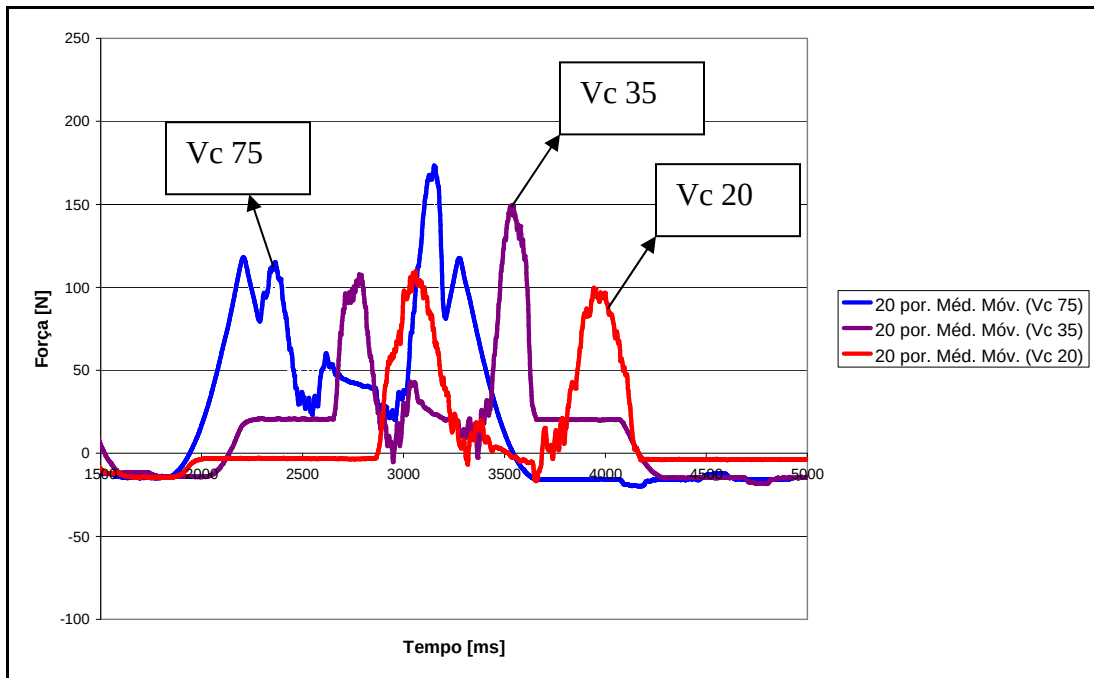


Figura 4.3 - Gráfico comparativo entre os três sinais de força sendo um para a velocidade de 20 m/min, outro para 35 m/min e outro para 75 m/min, material C, a seco

Na Figura 4.4, é mostrado uma comparação entre o sinal de força e torque. Como o valor numérico do torque é inferior ao da força, este foi multiplicado por 60. Assim, pode-se analisar as duas grandezas (força e torque) em uma mesma escala e comparar seus pontos básicos. A velocidade em que foi feito este ensaio é de 20m/min e o material usado foi o C. Percebe-se no gráfico que durante o retorno da ferramenta, enquanto o torque é aproximadamente zero após curto período, a força axial atinge valores similares à fase de corte.

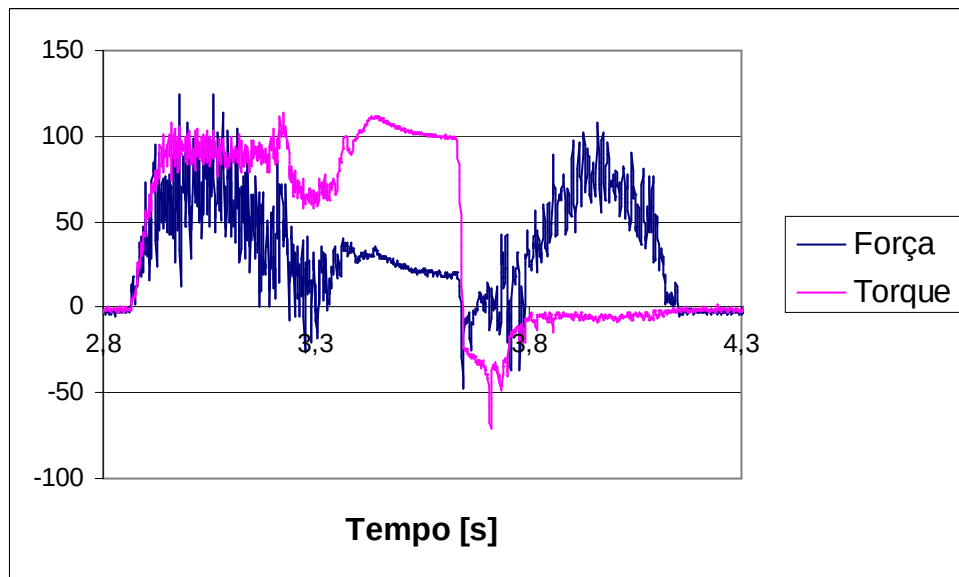


Figura 4.4 - Comparação entre o sinal de força e torque com velocidade de corte 20 m/min, material C

Um fato causador de muitos problemas durante a análise dos dados é a baixa repetibilidade destes para este processo. Ao analisar os gráficos, calcular as médias e desvios padrões, observou-se alguns pontos fora da curva ou desvios padrões bem acentuado. Isso dificulta a análise, diminui a confiabilidade das médias, mas ainda sim permite tirar conclusões. Cao e Sutherland (2002) notaram que não é possível uma boa repetibilidade, isso está relacionado à formação e disposição do cavaco durante o rosqueamento. Estes durante o processo ficam entre a ferramenta e a peça, o que provoca uma oscilação.

#### 4.3 Efeito da velocidade de corte na força e torque para os materiais A, B e C a seco

A figura 4.5 mostra o efeito da velocidade de corte na força axial para os três materiais. Verifica-se um aumento da força com a velocidade de corte. A princípio este resultado parece incoerente. No entanto, esta força axial é composta de várias forças, como: atrito, tração ou compressão e a força de corte. A força axial é então influenciada pelo erro de sincronismo. E o sincronismo depende da velocidade de corte. Há também um possível aumento de material aderido tanto nos filetes como no fundo da rosca, pois apesar de um aumento das velocidades de corte essas ainda não são altas. Todos estes fatores contribuem para o aumento da força axial com o aumento da velocidade de corte.

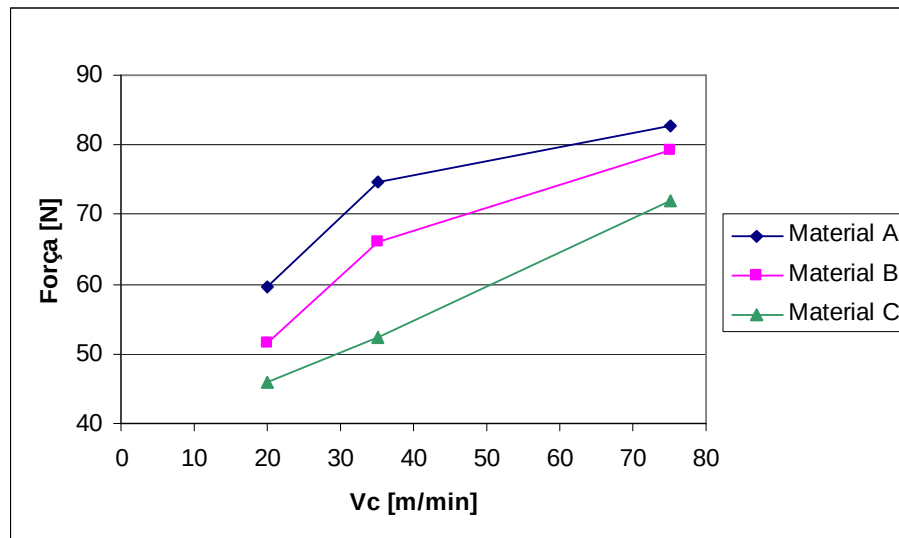


Figura 4.5 - Gráfico de força de entrada comparativo entre os materiais A, B e C a velocidade de 20, 35 e 75 m/min, a seco

Considerando a força axial como índice de usinabilidade, fica evidente pelos valores apresentados no gráfico (Fig. 4.5), que o material C apresenta uma melhor usinabilidade em relação ao material B que por sua vez possui uma usinabilidade melhor do que o material A.

Mesmo em operações sem erro de sincronismo, a força axial indica a usinabilidade de um material. No entanto, em se tratando de operação com ferramenta rotativa, o torque pode ser mais importante neste caso. A Fig. 4.6 mostra a relação entre velocidade de corte e torque para os três materiais, novamente sem fluido de corte.

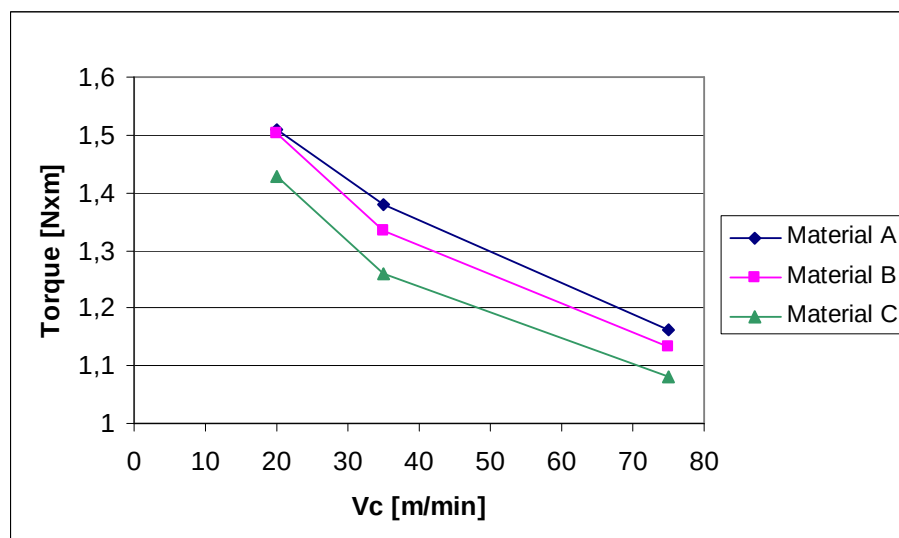


Figura 4.6 – Gráfico do torque para os materiais A, B e C, velocidade de 20, 35 e 75 m/min a seco

O torque é construído principalmente pelas forças de corte em cada dente atuante do macho de corte. O torque resultante é a somatória das forças de corte vezes o raio da ferramenta, mais a parcela realizada pelo atrito. A parcela do torque devido ao atrito talvez possa ser prevista. Durante o período de retorno da ferramenta, mesmo não ocorrendo usinagem, existe uma parcela de torque. Este torque pode ser devido ao atrito.

Como o torque durante a usinagem depende da força de usinagem, então o torque diminui com o aumento da velocidade de corte. Isso se deve ao fato que com uma maior velocidade de corte, maior a geração de calor e consequente redução da resistência ao cisalhamento do material (MACHADO et al, 2009), como mostrado na Fig. 4.6.

Os valores apresentados na Fig. 4.6 são médias feitas durante o corte, ou seja, entre a entrada e a parada. Portanto neles estão contidos “erros” principalmente nos valores de 35 e 75 m/min. Esses erros fazem com que os valores da medição do torque diminuam. Os resultados são mais sensíveis nas velocidades de 35 e 75 m/min, devido o maior tempo de desaceleração. Logo as diferenças nos torques, poderiam ser menores, se não houvesse o efeito da desaceleração diminuindo o valor real do torque.

Tanto a força quanto o torque indicam o material C como mais fácil de usinar, seguido do material B e material A. Entretanto, Naves (2009) apresenta resultados diferentes para o fresamento, mostrados na Fig. 4.7. Considerando o tempo de vida da ferramenta como parâmetro de usinabilidade, o material A tem melhor usinabilidade, seguido do material B e por último o C. Isto demonstra que nem sempre se podem extrapolar resultados em diferentes processos de usinagem.

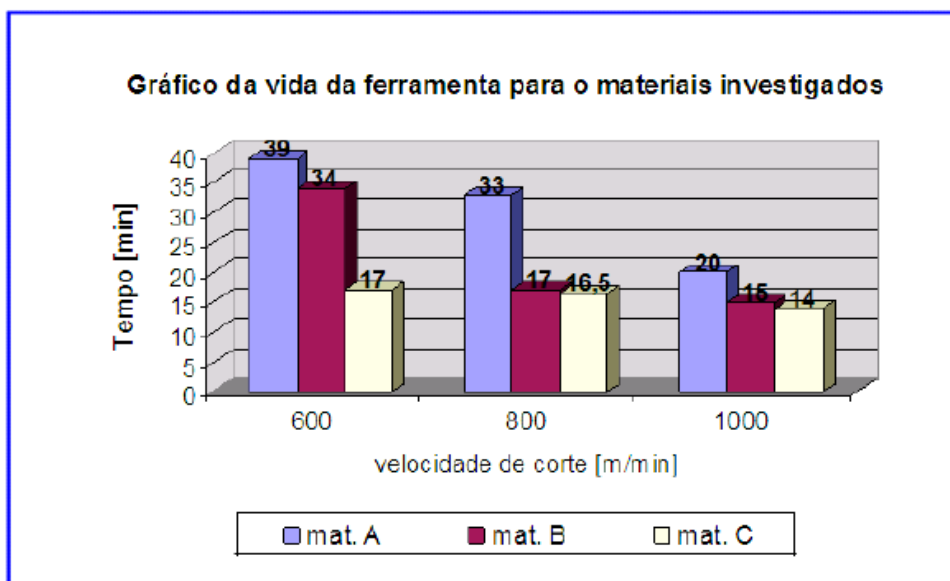


Figura 4.7 - Tempo de vida da ferramenta para  $VB_b$  de 0,15mm (Naves, 2009)

#### 4.4 Efeito da lubrificação

A aplicação de fluido teve um efeito significativo no torque, reduzindo em aproximadamente 10% em relação a usinagem a seco. Os melhores resultados foram atingidos com a aplicação de fluido emulsional em jorro. Como o fluido de corte utilizado neste trabalho possui uma concentração de 15%, além de atuar como lubrificante e refrigerante, assim como o MQF, atua também como um removedor de cavaco. Isto diminui a probabilidade dos cavacos se alojarem entre a ferramenta e a peça, efeito esse que pode levar à quebra da ferramenta, além de problemas na qualidade da rosca. Nota-se que o uso de fluido emulsional e MQF, em alguns casos igualou alguns valores de torques de diferentes materiais. Isso demonstra que os fluidos de corte têm diferentes efeitos em diferentes tipos de materiais, Fig. 4.8.

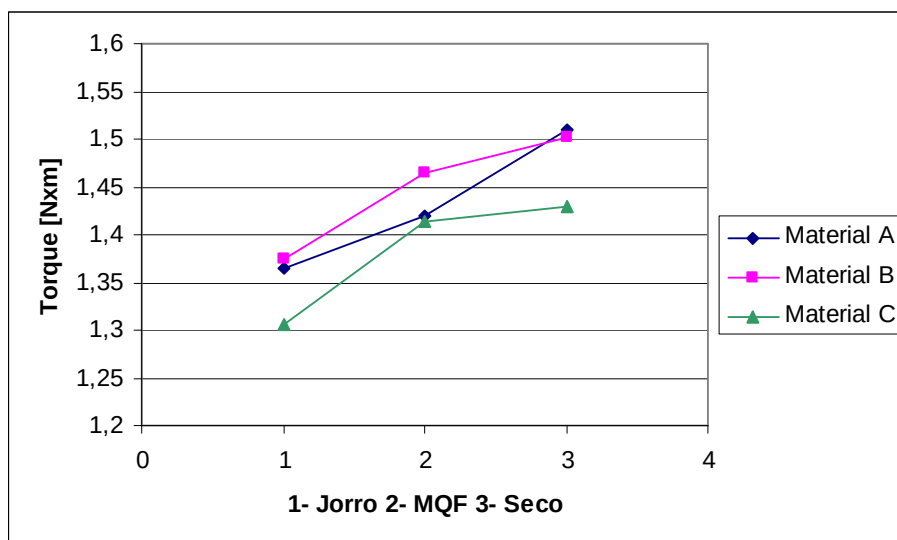


Figura 4.8 – Efeito do tipo de fluido de corte no torque, para os três tipos de materiais (A, B e C) com velocidade de 20 m/min

Na força axial, Fig. 4.9, os efeitos da lubrificação nos materiais C e B são muito parecidos com o torque, mantendo a mesma tendência de redução (aproximadamente 9% em relação ao maior valor). Contudo, o material A apresentou uma redução mais significativa, aproximadamente de 33% e atingiu valores menores do que o material C que tinha obtido os menores valores de força e torque para usinagem a seco.

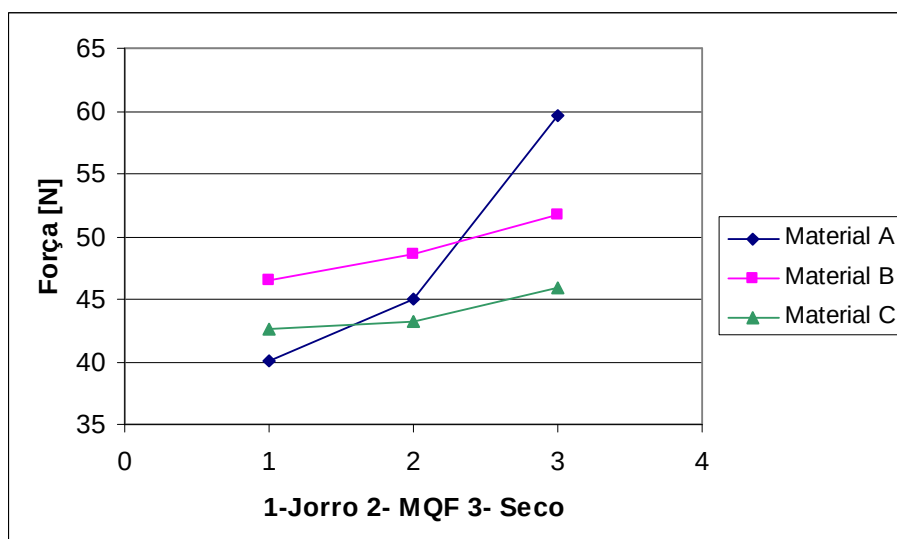


Figura 4.9 - Efeito do tipo de fluido de corte na força de entrada, para os três tipos de materiais (A, B e C) com velocidade de corte de 20 m/min

Quando a velocidade de corte foi aumentada para 35 m/min a tendência dos três materiais continuam parecidas, Fig. 4.10, o material A continua sendo o que sofre a maior influencia do fluido de corte, tendo uma redução total de 12,3% no valor do torque, quando comparando a condição a seco e com jorro. Cao e Sutherland (2002), afirmam que o fluido de corte aplicado no processo de rosqueamento serve para diminuir as forças de usinagem e melhorar a qualidade superficial das roscas fabricadas. No entanto, o fluido de corte exercerá o seu papel com maior eficiência a baixas e médias velocidades de corte, uma vez que a altas velocidades de corte eles passam a ter em alguns casos um papel negativo sobre a usinagem.

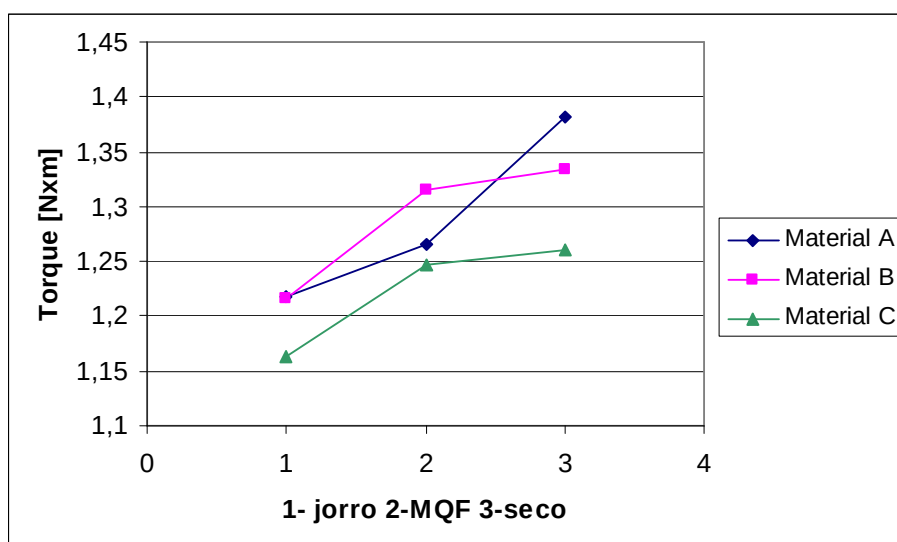


Figura 4.10 - Efeito do tipo de fluido de corte no torque, para os três tipos de materiais (A, B e C) com velocidade de corte de 35 m/min

A figura 4.11 mostra o efeito da forma de aplicação do fluido de corte na força axial, para a velocidade de corte de 35 m/min. O efeito agora é um pouco diferente para os materiais B e C, quando comparado com a velocidade de 20 m/min.

O material C por sinal apresentou pouca vantagem com a utilização de fluido a velocidade de corte de 20 m/min. Contudo, a utilização de fluido de corte no material A apresentou uma redução tanto do torque como da força axial.

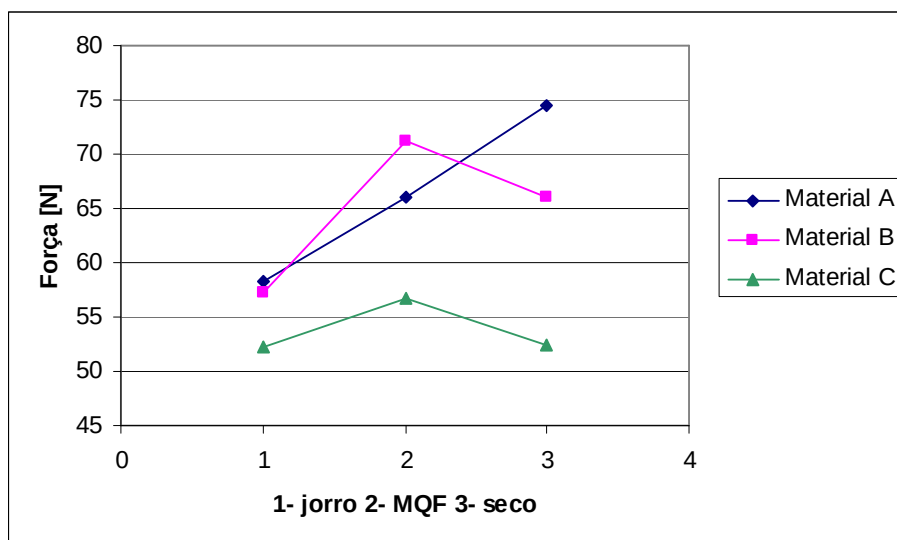


Figura 4.11 - Efeito do tipo de fluido de corte na força de entrada, para os três tipos de materiais (A, B e C) com velocidade de corte de 35 m/min

Diferente do que ocorre para as velocidades de corte de 20 e 35 m/min, a 75 m/min, Fig. 4.12, os efeitos dos fluidos de corte nos materiais B e C são desprezíveis ou bem menos significativos. Mas o material A apresentou um comportamento diferente dos outros dois no que diz respeito à utilização do fluido, este teve um decréscimo no torque de 13% aproximadamente.

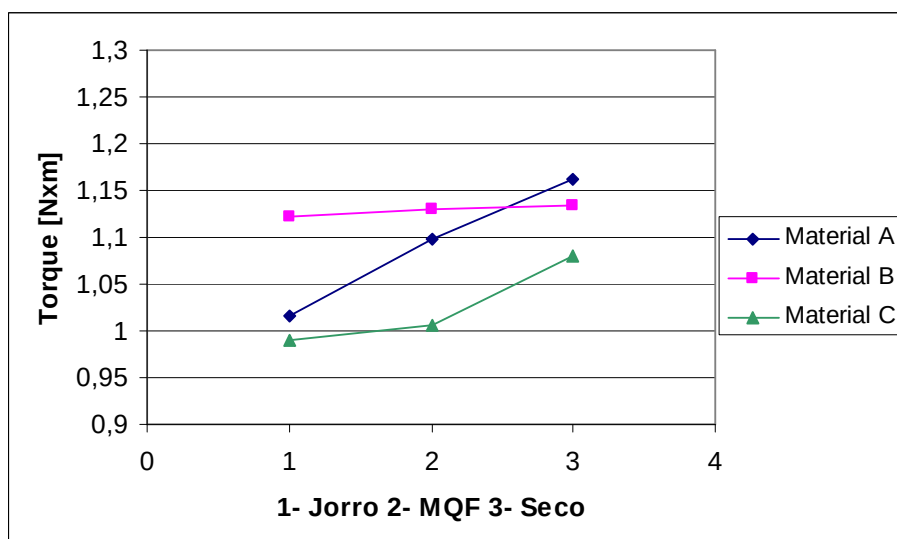


Figura 4.12 - Efeito do tipo de fluido de corte no torque, para os três tipos de materiais (A, B e C) com velocidade de corte de 75 m/min

Ao analisar o gráfico de força, Fig. 4.13, percebeu-se que os três materiais sofrem uma influência muito parecida, está ao contrário do que foi apresentado até o momento é negativa. Quando aplicado fluido de corte em jorro, os valores de força apresentados foram os piores, o que pode ser explicado pela presença de cavacos suspensos durante o rosqueamento. Isso pode criar situações em que este cavaco se insira entre a ferramenta e a peça, aumentando assim os esforços de tração compressão e atrito. No rosqueamento a 75 m/min o tempo de usinagem é muito curto. O fluido de corte não contribui para o escoamento dos cavacos e tão pouco diminui a temperatura na interface cavaco-ferramenta. Portanto, o uso de fluido de corte para o rosqueamento com macho de corte em ferro fundido com velocidade de corte alta (para o processo) pode não ter efeito positivo.

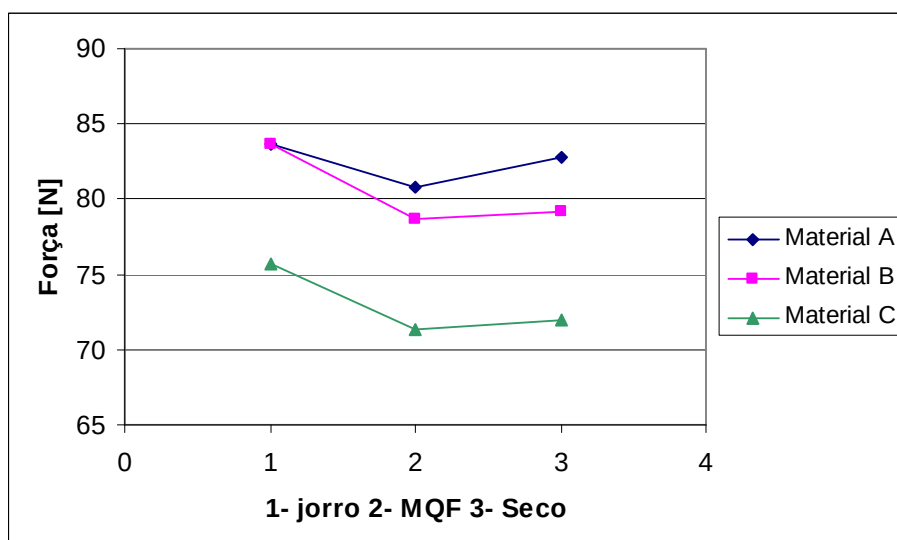


Figura 4.13 - Efeito do tipo de fluido de corte na força, para os três tipos de materiais (A, B e C) com velocidade de corte de 75 m/min

Ao observar a evolução de cada material para um determinado tipo de aplicação, Fig. 4.14, observou-se a real variação que o material A sofreu com a utilização de diferentes condições de aplicação de fluido. Enquanto o material C sofreu pequenas alterações na força axial, aproximadamente 5 N, o material A sofre alterações de até 20 N, levando-se em consideração que as únicas alterações foram os materiais utilizados e o fluido de corte. Logo, essa diferença demonstra uma grande influência do fluido sobre o material A e uma pequena sobre o C. Já o material B sofreu uma influência intermediária.

Enquanto o material A apresenta-se como o pior na condição a seco, nas outras condições ele alternou entre os melhores e piores valores de força e torque, sendo que em

média apresentou-se como um valor intermediário. Isto pode ser resultado de um maior efeito lubrificante sobre o material A, já que mesmo com o aumento da velocidade de corte, esta ainda é considerada baixa.

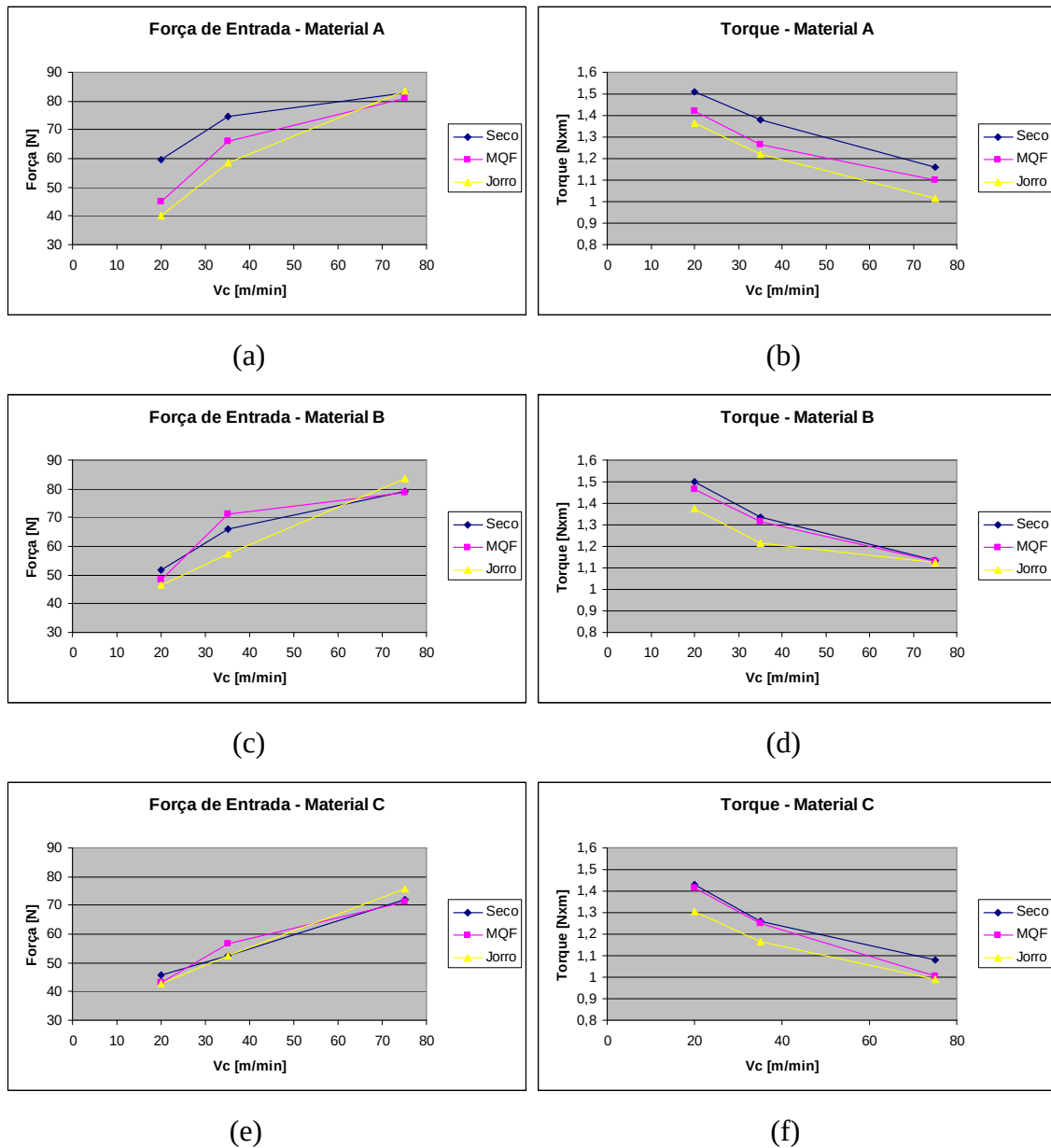


Figura 4.14 – Efeito do tipo de fluido de corte na força, para os três tipos de materiais (A, B e C) com velocidade de corte de 20, 35 e 75 m/min. (a) e (b) representam respectivamente a força e o torque no material A, (c) e (d) representam a força e o torque no material B e (e) e (f) representam a força e o torque no material C

#### 4.5 Comparação da usinabilidade para os três materiais

Os itens anteriores mostram os gráficos com resultados de força e torque para os três materiais sobre várias condições de corte.

Os valores do torque indicam que o material C tem a melhor usinabilidade, seguido pelo material B e por último o A. Isso pode ser explicado pelo fato que o material C tem menor dureza e pior condutividade térmica, sendo assim, o que pode atingir as maiores temperaturas, reduzindo assim sua resistência à ruptura. Já o material A além de ter os valores de dureza e resistência à tração muito próximos do material B, ainda possui a melhor condutividade térmica, o que cria um efeito contrário ao que foi citado no material C, ou seja, ao invés de aquecer, ele resfria rapidamente, mantendo a sua resistência à ruptura mais próxima a da temperatura ambiente.

Outra característica importante do material C, que contribui para uma melhor usinabilidade, é sua matriz, com 44% de ferrita. Segundo Machado et al. (2009), esta estrutura possui uma dureza de 150 HB, além de ser macia e com alta ductilidade, o que pode levar a ocorrência de APCs em baixas velocidades, mas sua usinabilidade é melhor do que a perlita.

Analisando ainda a usinabilidade dos ferros fundidos pela constituição da matriz, Guesser (2009), diz que a quantidade de cementita presente na perlita pode afetar diretamente a usinabilidade do material. Com isso, quando é analisado o motivo pelo qual o material A tem uma pior usinabilidade em relação ao material B, contrariando os resultados encontrados em trabalhos como Naves (2009) e também algumas informações da literatura científica, que diz que em um mesmo tipo de material o que tiver a maior resistência à tração terá os piores índices de usinabilidade. Lembrando que aqui é considerado que o material A possui uma maior quantidade de cementita em sua matriz perlítica, já que este possui uma maior quantidade de estanho, que tende a aumentar a porcentagem de cementita na perlita.

Assim, este pode ser um dos motivos pelo qual o material A tem valores de torque superiores aos obtidos pelo material B. Isso é conhecido como efeito de tamanho, ou seja, quando a profundidade de corte, no caso aqui analisado a profundidade de avanço dos dentes sobre o material, é pequena o suficiente para que os micros constituintes passem a afetar de maneira mais efetiva a usinabilidade.

Note que tanto no torque quanto na força, o material A teve os maiores valores, seguido de B e por fim o material C. Lembrando que parte desta força axial é constituída de “erros”, como por exemplo, de sincronismo, mas como este erro tende a ocorrer em todos os materiais esta diferença de força entre eles pode ser analisada como sendo a diferença de usinabilidade dos materiais. Para velocidade de corte de 35 m/min notou-se a maior diferença entre as forças, talvez porque nesta velocidade de corte os efeitos da temperatura já possam ser mais significativos. Uma vez que à medida que se aumenta a velocidade de corte aumentasse a temperatura na interface cavaco-ferramenta.

Como o material a tem uma maior condutividade térmica em relação aos outros dois materiais, este tende a possuir menores temperaturas nas mesmas condições de corte. Logo, a força necessária para cisalhá-lo é maior, por isso o material a possui os maiores valores de força a velocidade de corte de 35m/min.

#### **4.6 Características do Processo**

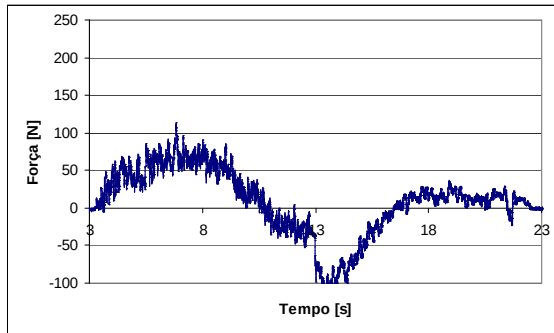
Por se tratar de um processo pouco investigado e com maior complexidade, a influência de parâmetros precisa ser melhor entendida. Neste item serão analisados os efeitos dos seguintes parâmetros: velocidade de corte (analisado anteriormente dentro de uma faixa utilizada na prática); passo utilizado na máquina-ferramenta, revestimento, comprimento roscado, concentricidade do macho e pré-furo e geometria da ferramenta (número de canais e o formato dos canais).

Quase todas essas características podem ser alteradas inúmeras vezes em uma mesma linha de produção, algumas mesmo sem a ação do operador, pelo simples erro da máquina-ferramenta. Outras podem ser alteradas por exigências de projeto, como por exemplo, a profundidade de rosqueamento. Por isso a inclusão de um item de discussão que trata de características que aparentemente são pré-determinadas e fixas em uma linha de produção, mas que, no entanto, podem sofrer alterações quase que regularmente.

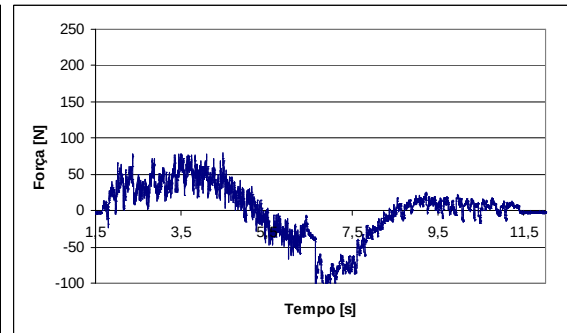
##### **4.6.1 Velocidade de corte**

Apesar de já ter sido apresentado um item sobre este assunto, o mesmo tratava do efeito da velocidade sobre os três materiais. O foco aqui é o efeito da velocidade de corte sobre o sincronismo da máquina-ferramenta. Os testes foram realizados a seco e o material

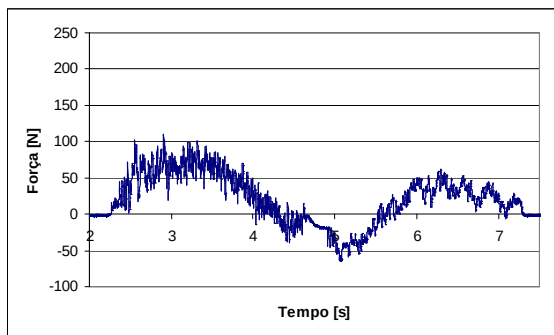
utilizado foi o C (vermicular). A Fig. 4.15 mostra o sinal da força na direção do avanço axial para várias velocidades de corte.



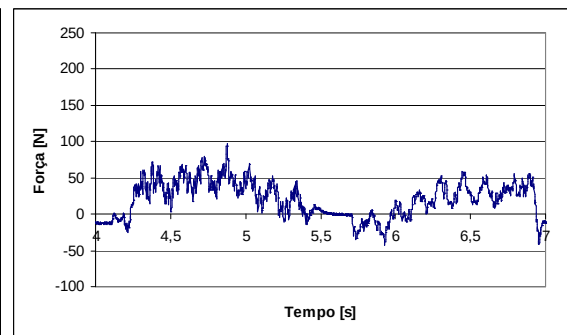
(a)



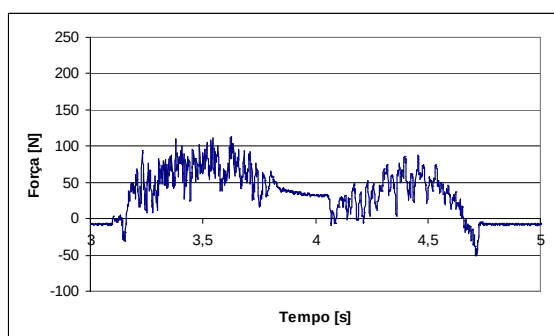
(b)



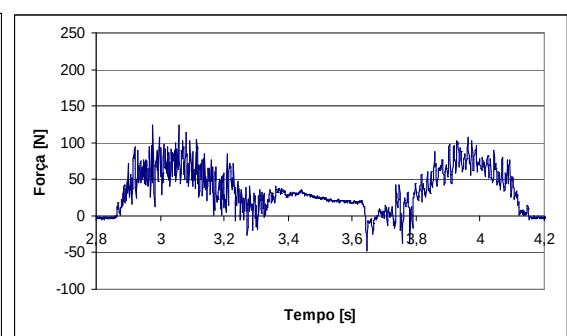
(c)



(d)



(e)



(f)

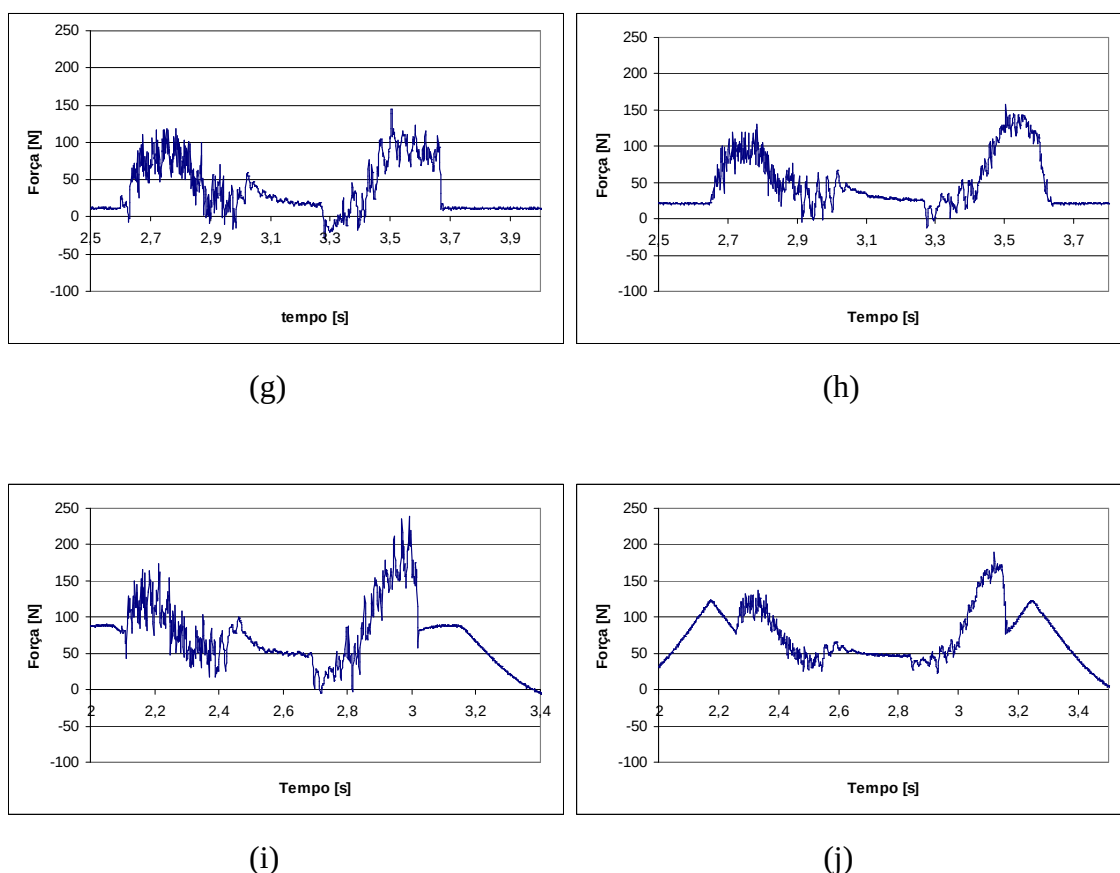


Figura 4.15 – Efeito da velocidade de corte na força axial, usinando o material C em uma condição a seco. Sendo (a) 0.94, (b) 1.88, (c) 3.76, (d) 7.53, (e) 15.07, (f) 20, (g) 30.15, (h) 35, (i) 60.30 e (j) 75 m/min

A força média na entrada atingiu valores próximos à 31N na velocidade de corte de 0,94 m/min e 71N para 75 m/min (valores calculados através de média dos pontos). A Fig. 4.16 mostra a variação da força média com a variação da velocidade de corte. A velocidade de corte influenciou principalmente a força axial. Note que para as velocidades de corte de 0,94 e 1,88 m/min, Fig. 4.15 (a) e (b), a força foi aproximadamente zero no retorno, representando assim uma condição ideal. Mas durante o corte existe uma força negativa que pode ser devido ao acúmulo de cavaco. Esse acúmulo de cavaco pode ser favorecido pelas baixas velocidades de corte. A partir de 3,76 m/min, Fig. 4.15 (c), as forças de corte durante o retorno começam a subir chegando a partir de 20 m/min, Fig. 4.15 (f), serem maiores do que as forças de entrada.

A princípio o principal efeito da velocidade de corte é no sincronismo da máquina-ferramenta. Na entrada o erro se associa à força de usinagem na entrada, ficando mais difícil separar o que é erro e o que é força de usinagem. No entanto, no retorno da ferramenta isso

não ocorre, pois teoricamente não há mais corte. Logo, todo o valor de força será associado a um erro, no caso de sincronismo.

Conforme discutido anteriormente, o aumento da força com a velocidade de corte pode estar relacionado com erros inerentes ao sistema. Talvez, uma boa indicação deste fato é a variação do torque com a velocidade de corte, já que o torque depende basicamente da força de corte. A Fig. 4.17 mostra os sinais de torque para várias velocidades de corte. A Fig. 4.18 mostra a variação do torque médio com a velocidade de corte.

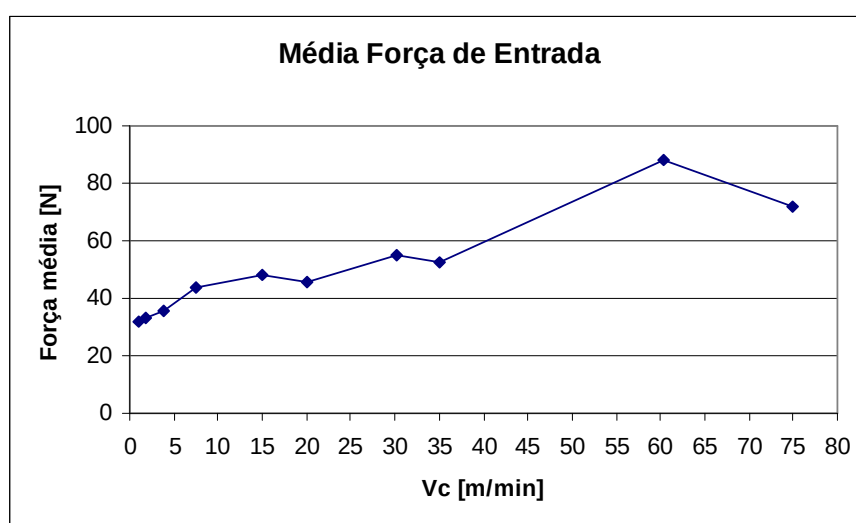
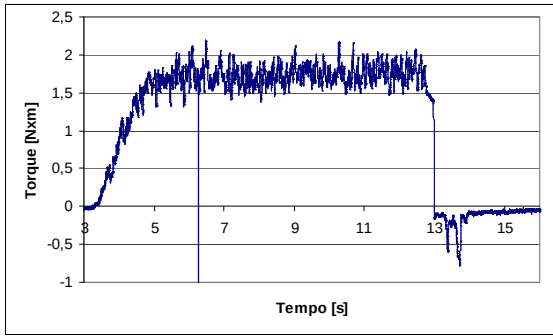
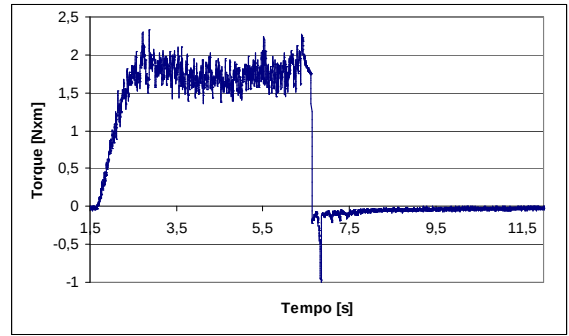


Figura 4.16 – Média das forças axiais de entrada, em função da variação da velocidade de corte

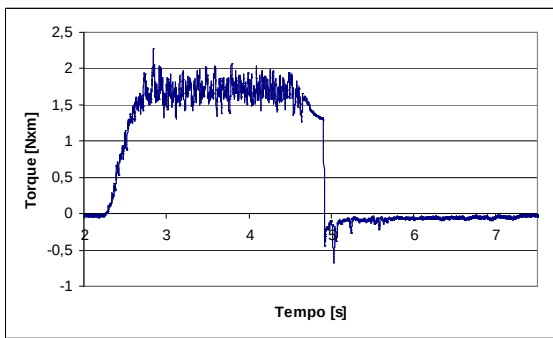
Durante os testes observou-se que para alguns casos o maior valor do torque pode estar associado a uma menor força na direção axial. Baixos valores de força indicam que os erros do processo foram minimizados (não inteiramente), mesmo assim, o torque durante a usinagem pode alcançar um valor maior. Isso pode mostrar uma não dependência do torque em relação a força na direção axial.



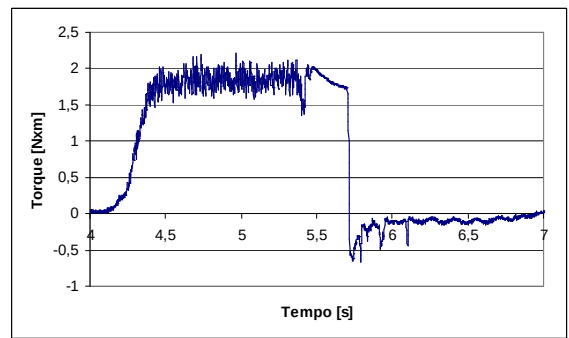
(a)



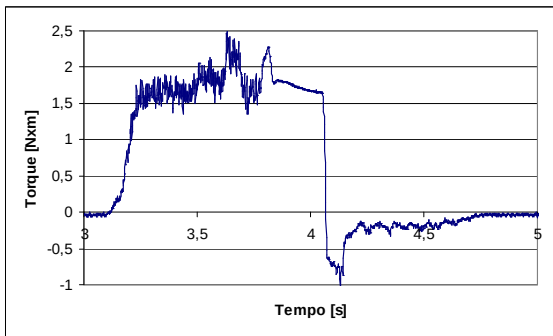
(b)



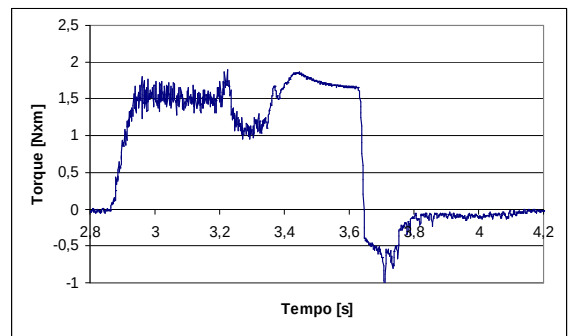
(c)



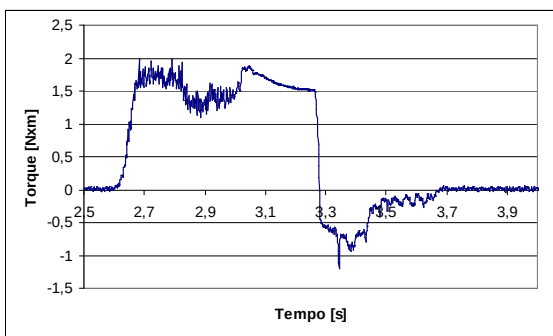
(d)



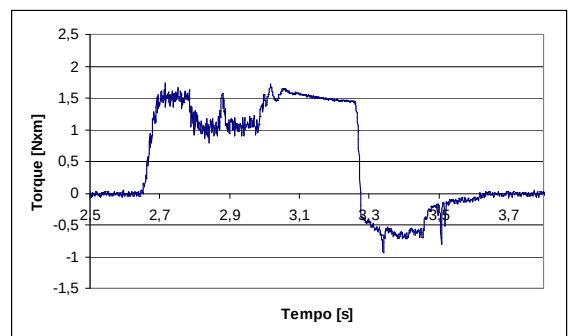
(e)



(f)



(g)



(h)

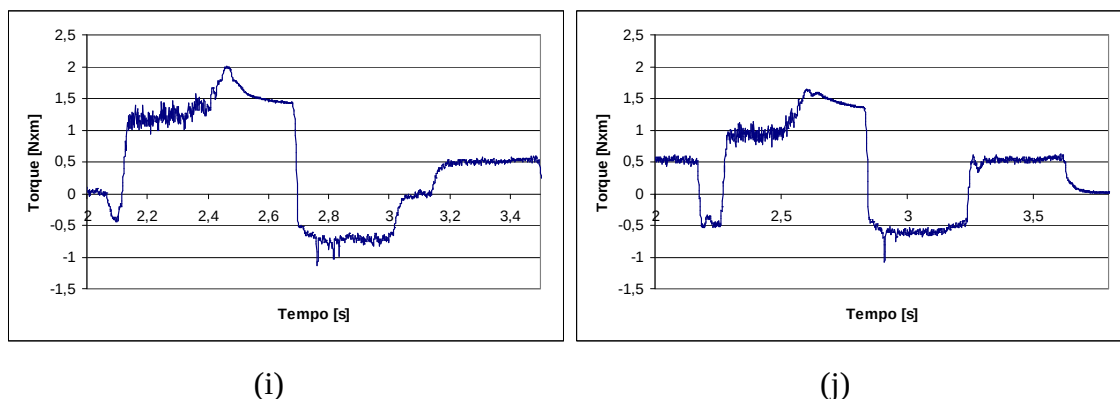


Figura 4.17 – Efeito da velocidade de corte no torque, usando o material C em uma condição a seco. Sendo (a) 0.94, (b) 1.88, (c) 3.76, (d) 7.53, (e) 15.07, (f) 20, (g) 30.15, (h) 35, (i) 60.30 e (j) 75 m/min

Portanto, a partir de certa velocidade, a velocidade de rosqueamento não é a indicada na programação do CNC, e o torque analisado necessário para o rosqueamento não é o coletado pelo dinamômetro. Nos ensaios a 60,30 m/min, Fig. 4.17-(h), já é observado que a velocidade selecionada não é a mesma do processo real. O torque que coletado é então a união do torque necessário para a usinagem da rosca, menos uma parcela de torque de frenagem.

A Figura 4.18 mostra o gráfico com os valores médios do torque para cada velocidade de corte, sendo estes valores diretamente ligados à força de corte, este em termos gerais indica que a força de corte cai com o aumento da velocidade de corte. Este fato está de acordo com a literatura. Por ser um material que possui segunda fase e as velocidades de corte utilizadas foram baixas, há a possibilidade de existir APC durante todos os pontos da curva.

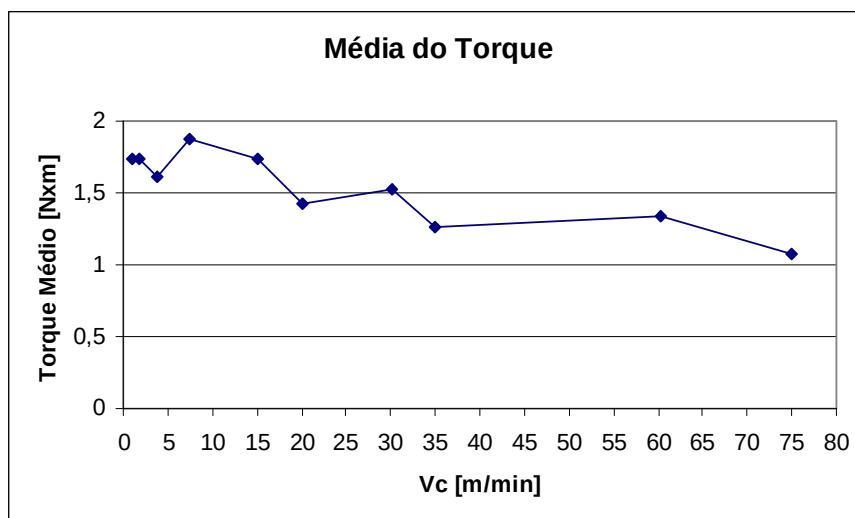
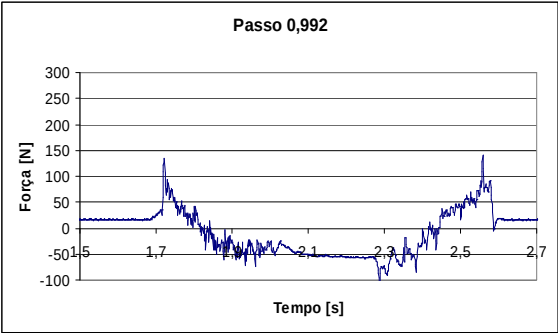


Figura 4.18 – Média dos torques, em função da variação de velocidade de corte

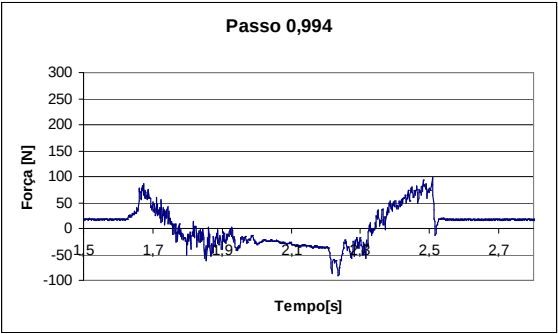
Para os gráficos de torque (fig. 4.17), um fenômeno percebido foi uma descontinuidade que marca o início da desaceleração. Observou-se que para as baixas velocidades de corte, até 7,53 m/min, essa característica não é percebida com clareza. A partir de 15,07 m/min, essa descontinuidade passa a ser observada com maior facilidade, e cada vez mais em pontos que tendem ao início do gráfico, com o aumento da velocidade. Isso acontece porque quanto maior a velocidade, maior o tempo necessário para a desaceleração. O auge deste fenômeno é quando o valor da velocidade associado ao comprimento roscado cria uma situação em que a desaceleração começa antes mesmo da ferramenta tocar a peça, isso faz com que o valor do torque diminua, devido ao torque contrário criado na frenagem.

#### 4.6.2 Efeito da variação do passo

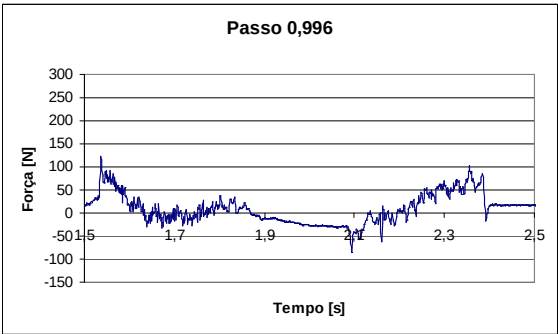
O motivo para analisar o efeito de diferentes passos de rosca, é justificado por acreditar que uma das fontes de erros do sistema seja uma diferença entre o passo da ferramenta e o passo programado na máquina-ferramenta. O passo ideal, aquele que apresenta os menores valores de força e torque, deveria coincidir com o passo pré-determinado do macho de corte. Para estes ensaios foi usado o material A, a seco, com uma velocidade de corte de 35 m/min e o macho de corte nitretado com três canais retos. A Fig. 4.19 mostra as forças na direção axial para vários avanços programados na máquina-ferramenta.



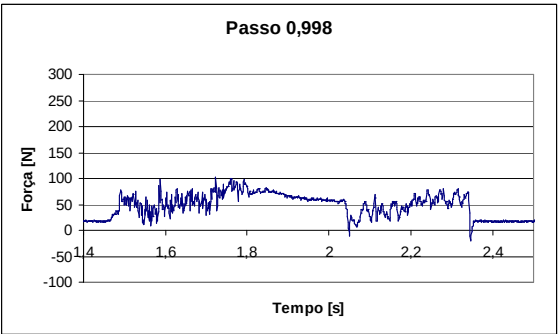
(a)



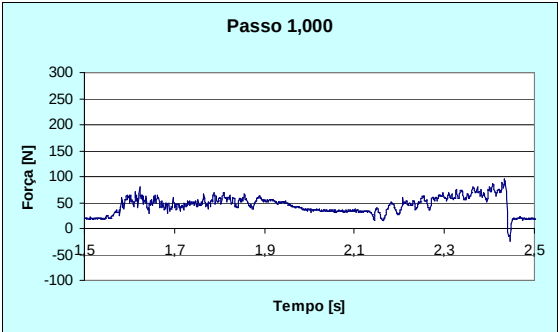
(b)



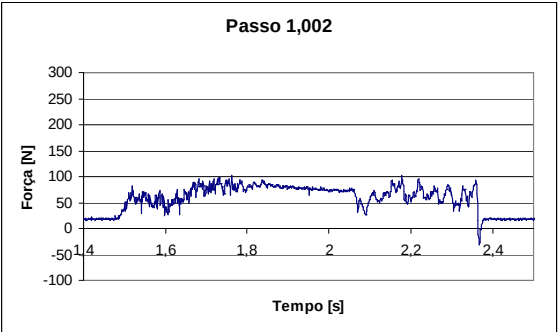
(c)



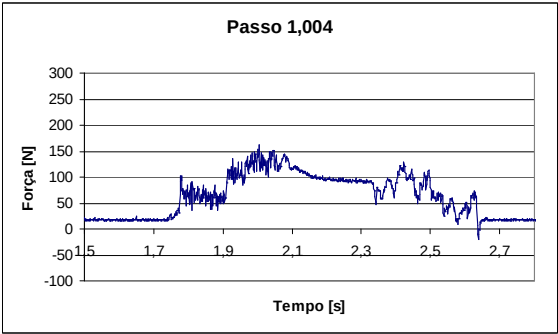
(d)



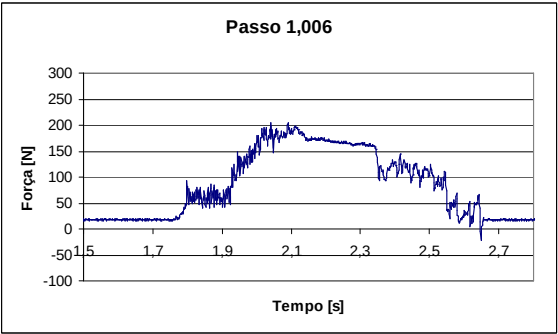
(e)



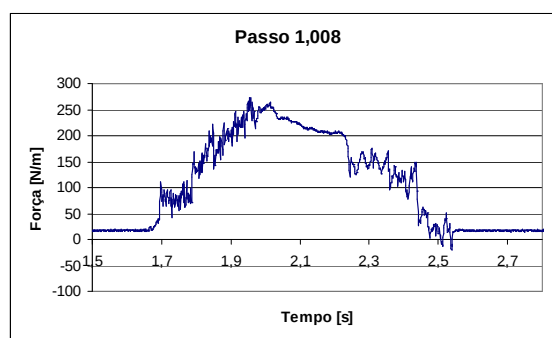
(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 4.19 – Efeito da variação do passo na força axial, durante a usinagem do material A, a seco com velocidade de corte de 35 m/min. Sendo (a) 0,992, (b) 0,994, (c) 0,996, (d) 0,998, (e) 1,000, (f) 1,002, (g) 1,004, (h) 1,006, (i) 1,008

Nota-se que para avanços menores que 0,998 mm/rev, a fase em que há a parada é negativa e até mesmo parte do corte e retorno. Contudo, a partir de 0,998 mm/rev os valores são quase que exclusivamente positivos. Da Mota (2009) obteve resultados similares para machos de metal duro. A partir do passo de 1,002 mm/rev observa-se uma fase inicial constante da força, essa parte corresponde à fase cônica da ferramenta. A parte negativa nos primeiros gráficos resulta do esforço de tração que é exercido sobre a ferramenta, uma vez que esta desloca com um passo menor do que o recomendado. Logo para avanços maiores que o passo recomendado, o esforço é de compressão, portanto o valor da força aumenta.

Observa-se que, para avanço de 0,996 mm/rev, Fig 4.19-(c), durante parte da fase de corte a força é quase nula, assim como durante a parada. No entanto, quando utilizado um passo igual ao do macho de corte, ou seja, 1,000 mm/rev, Fig. 4.19-(e), o valor da força sobe consideravelmente. Isto significa que, um erro de passo na ferramenta de 1  $\mu\text{m}$ , alteraria o passo para 0,999 ou 1,001 mm/rev e seria suficiente para causar um aumento da força axial. Mesmo assim, esta ferramenta estaria dentro da tolerância.

O valor do avanço utilizado, que resulta em força nula, pode sugerir que o avanço e o passo da ferramenta estão bem próximos. É difícil, no entanto, afirmar se o avanço ou o passo estão corretos, neste caso.

O torque não tem grandes alterações com a variação do avanço da máquina. Isto significa que, o passo correto a ser utilizado seria o que resulta em menor força, desde que fabrique roscas dentro da tolerância especificada. Seria uma boa alternativa para aumentar a vida da ferramenta.

Um último ponto observado aqui é que pode indicar um possível erro de passo entre a máquina e a ferramenta é a posição no gráfico da parada programada. Observe que ela (a posição) sobe para valores acima do passo padrão e diminui para valores abaixo do passo padrão, com um maior número de testes, isto pode indicar se para um caso específico houve erro de sincronismo ou não.

#### 4.6.3 Revestimento

Para esta etapa foi usado o material A, uma condição a seco e um macho de corte nitretado HSS M6 6H com três canais retos. O objetivo é comparar os valores de força e torque para diferentes revestimentos e tratamentos termoquímicos. A Fig. 4.20 mostra o comportamento das forças para os diferentes revestimentos.

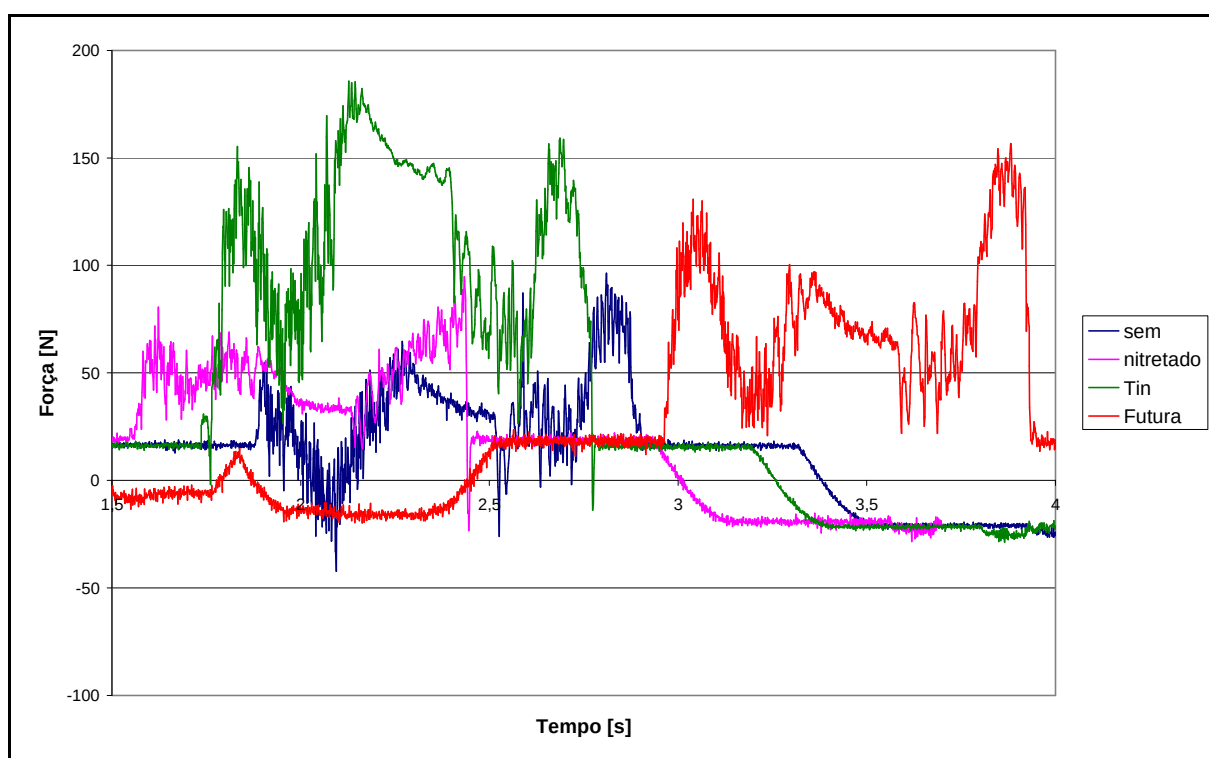


Figura 4.20 – Comportamento das forças axiais, para diferentes tipos de revestimento, usando o material A, a seco e com velocidade de 35 m/min

Observou-se que as ferramentas sem revestimento e nitretada, possuem os menores valores de força. Apesar dos valores de força serem consideravelmente maiores para ferramentas com revestimentos, Da Mota (2006) compara a vida de ferramentas sem revestimento, com futura, com TiN e nitretadas, e apresenta o macho revestido com futura

como a maior vida, seguido da ferramenta com TiN, a nitretada e por fim a sem revestimento. Seus testes foram realizados em um ferro fundido cinzento GH 190, equivalente ao FC 200/250 da norma AISI. Apesar das forças axiais serem maiores para ferramentas não revestidas, essa tendência não se manter para o torque. Isso indica que a força axial não tem uma influência tão significativa na vida da ferramenta.

Durante a fase de corte com macho nitretado, a força tem uma tendência linear, observada em outros testes com a mesma ferramenta, mas que não se repete para os outros revestimentos. Em todos os casos o valor da força no retorno da ferramenta é maior do que na entrada. Reis (2004) atribuiu este fato a possíveis partículas de substrato ou de revestimento que se soltam e ficam presentes na interface entre a crista do macho e a superfície do filete de rosca gerado. Isto explicaria o fato da quebra da ferramenta durante o retorno. Outro aspecto a ser observado é o fato de ferramentas com revestimento possuírem um maior raio de arredondamento da cunha cortante (MACHADO et al., 2009).

Ferramentas revestidas, assim como as de metal duro tem uma limitação em relação à utilização de máquinas automatizadas, este tipo de ferramenta não se adaptam muito bem a máquinas de baixa rigidez (REIS, 2004).

#### 4.6.4 Comprimento roscado

Para os testes de comprimento roscado o material utilizado foi o ferro fundido vermicular (material C). A ferramenta utilizada foi um macho de corte HSS M6 6H Ni, com três canais retos, a uma velocidade de 35 m/min e condição a seco. O objetivo foi analisar o efeito do comprimento de rosca próximo do valor recomendado que é de 1,5 vezes o diâmetro. A Fig. 4.21 mostra os resultados dos sinais de força para os comprimentos de 3, 6 e 10 mm.

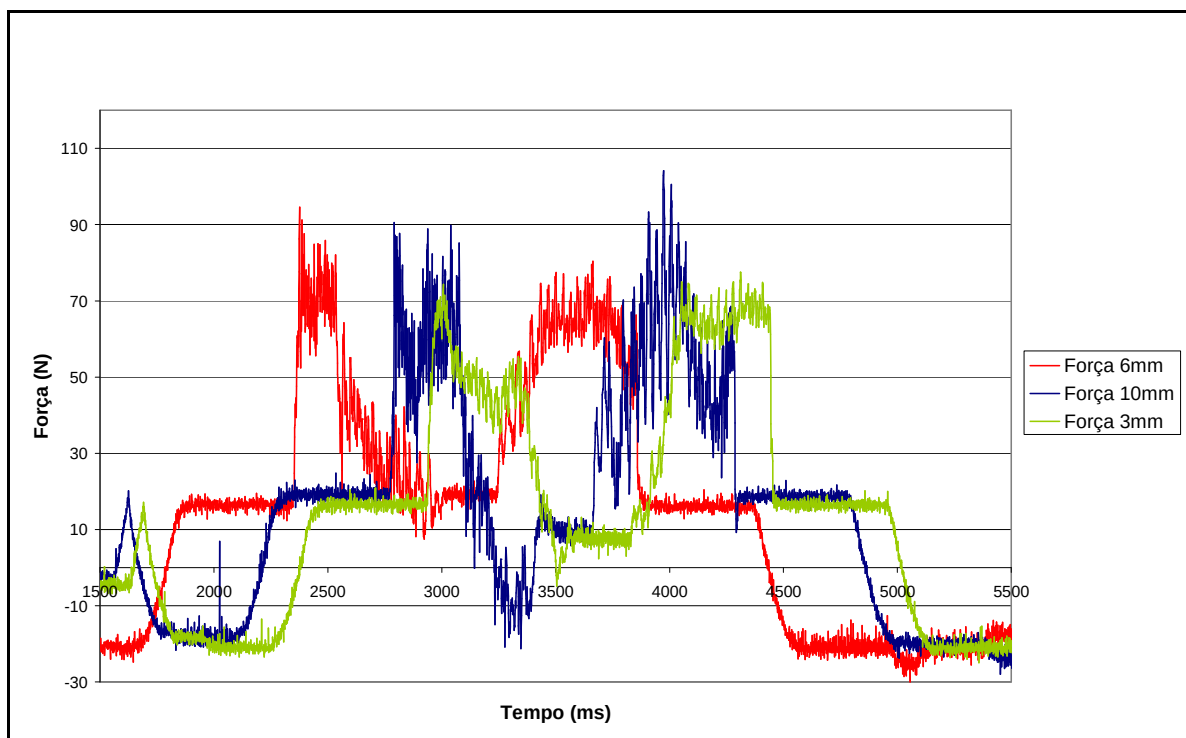


Figura 4.21 – Comparação entre as forças de avanço, para um comprimento de rosca de 3, 6 e 10 mm, usinando o material C, a 35 m/min a seco

A comparação entre os gráficos de força axial, permite que se ratifiquem os efeitos de erros de passo e sincronismo. Mesmo com diferentes comprimentos roscados o tempo de atuação e o valor das forças, tanto na entrada como no retorno são muito semelhantes. Se comparado com o torque (Fig. 4.22), representante direto da força de corte, o tempo de atuação da força restringe apenas ao tempo de fabricação dos filetes e não ao tempo em que a ferramenta esta dentro do ciclo de rosqueamento. Lembrando que apesar de passantes os furos, o macho de corte está sempre em contato com a peça durante o ciclo de rosqueamento.

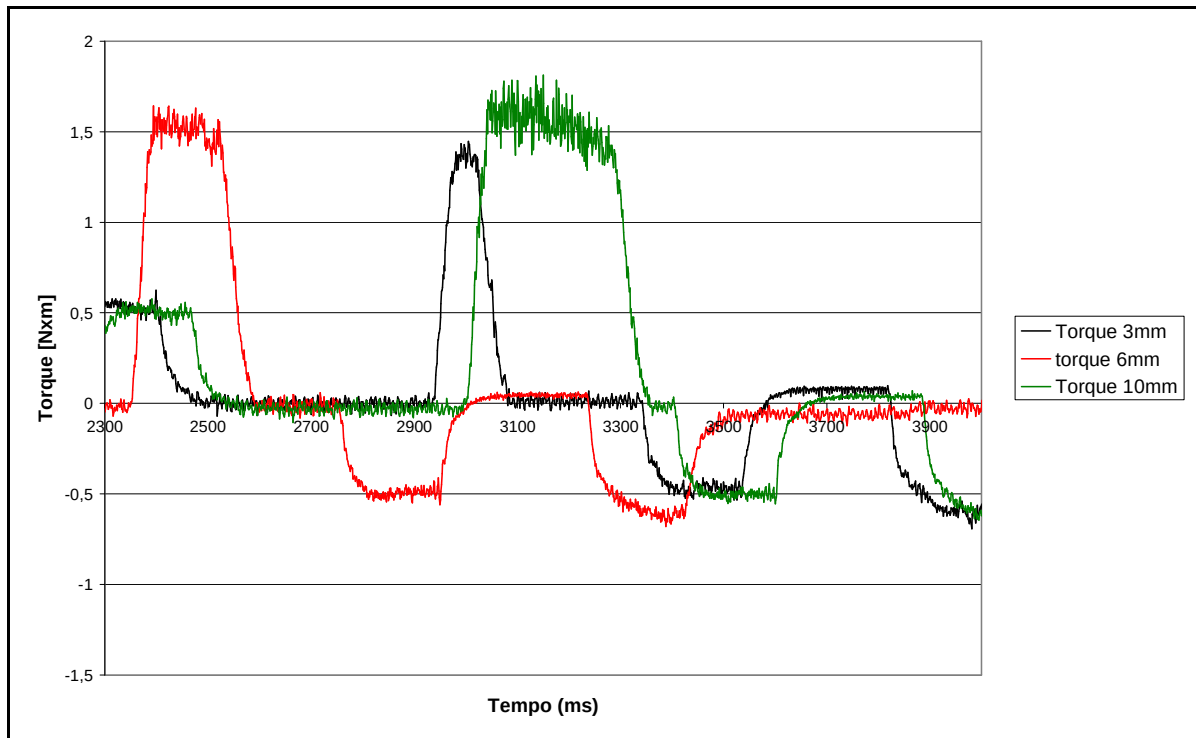


Figura 4.22 - Comparação entre os torques, para um comprimento de rosca de 3, 6 e 10 mm, usinando o material C, a 35 m/min a seco.

A Figura 4.23 mostra a média dos torques para os diferentes comprimentos roscados, no gráfico observa-se uma tendência de crescimento do torque, mesmo que pequena, já que os comprimentos de rosca aqui analisados ainda estão dentro da faixa que é indicada pelo fabricante de ferramenta (1,5 vezes o diâmetro).

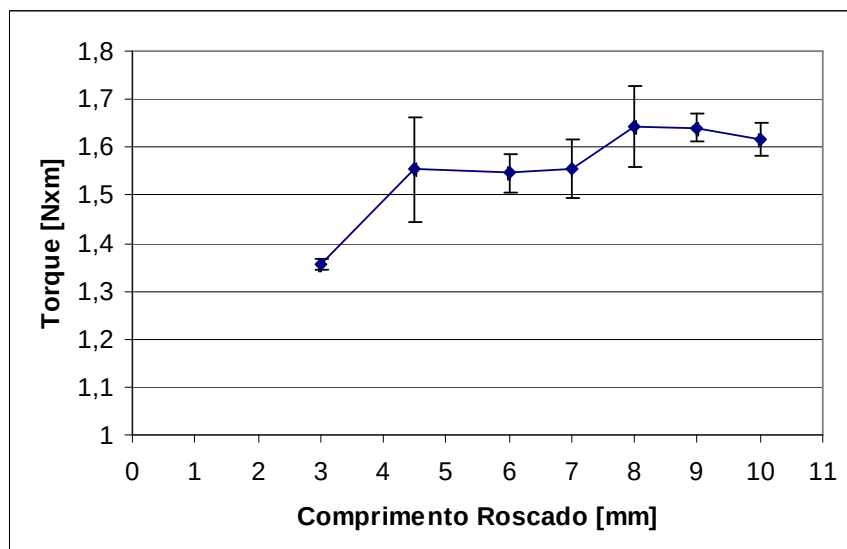


Figura 4.23 – Média dos torques para diferentes comprimentos roscados

#### 4.6.5 Excentricidade

Para a análise da excentricidade o material usinado foi o ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn (material A) e a ferramenta utilizada foi um macho de corte HSS M6 6H Ni. A velocidade de corte foi de 35 m/min e não foi utilizado fluido de corte. A Fig. 4.24 mostra os resultados da força para vários valores de excentricidade.

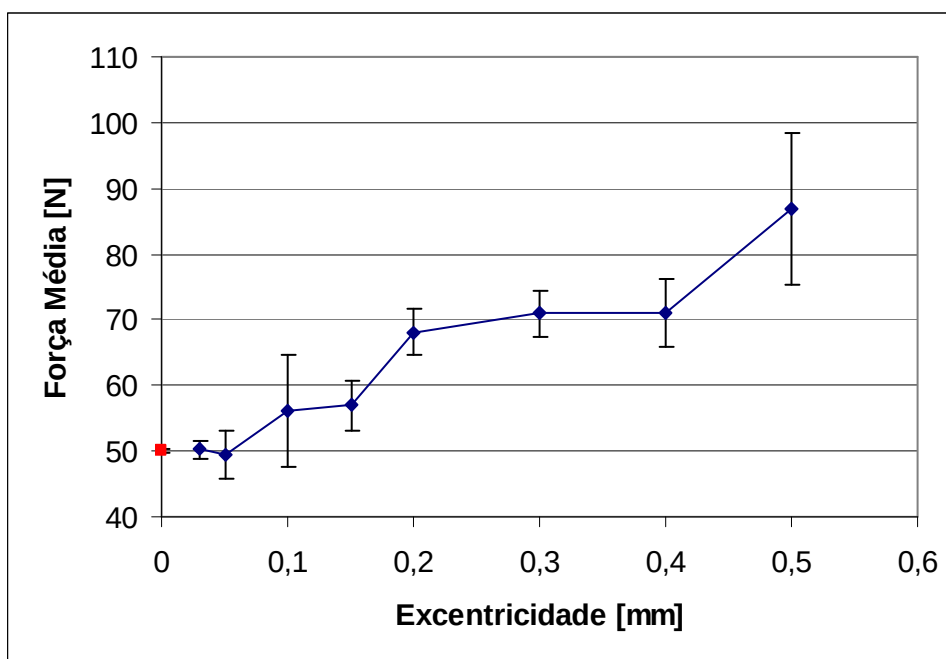


Figura 4.24 – Comparação entre as médias das forças axiais de entrada, para diferentes valores de excentricidade. O material usinado foi o A, com uma velocidade de corte de 35 m/min

Observa-se uma elevação considerável da força axial com o aumento da excentricidade. Para excentricidades menores que 0,05mm não há alteração no valor médio das forças. Como toda ferramenta não possui uma rigidez perfeita, o macho ao ser deslocado para um dos lados faz com que apareça uma força lateral desbalanceada, que a partir de certo valor de força, irá causar uma deflexão na ferramenta. Isso faz com que no lado em que a força desbalanceada atue, os dentes do macho sejam forçados contra o filete da rosca, o que causa aumento da força axial.

A usinagem de roscas com machos de corte desalinhados em relação aos pré-furos pode ser melhor interpretada ao avaliar as forças radiais. Da Mota, (2009), apresentou

resultados para as forças radiais com variações superiores a 1000%. O presente trabalho trata de forças axiais, mas mesmo assim, os aumentos apresentados por Da Mota (2009), são coerentes com os apresentados neste.

A Figura 4.25 mostra os valores médios de torque. Observa-se que há um aumento de 25,87% em relação a excentricidade zero. O torque durante todos os testes se mostrou menos sensível às alterações feitas durante a usinagem das roscas, mas ainda sim ele sofreu alterações, mesmo para o menor valor de excentricidade, uma vez que este é constituído pelas forças X e Y e estas são as que mais sofrem mudanças devido à excentricidade.

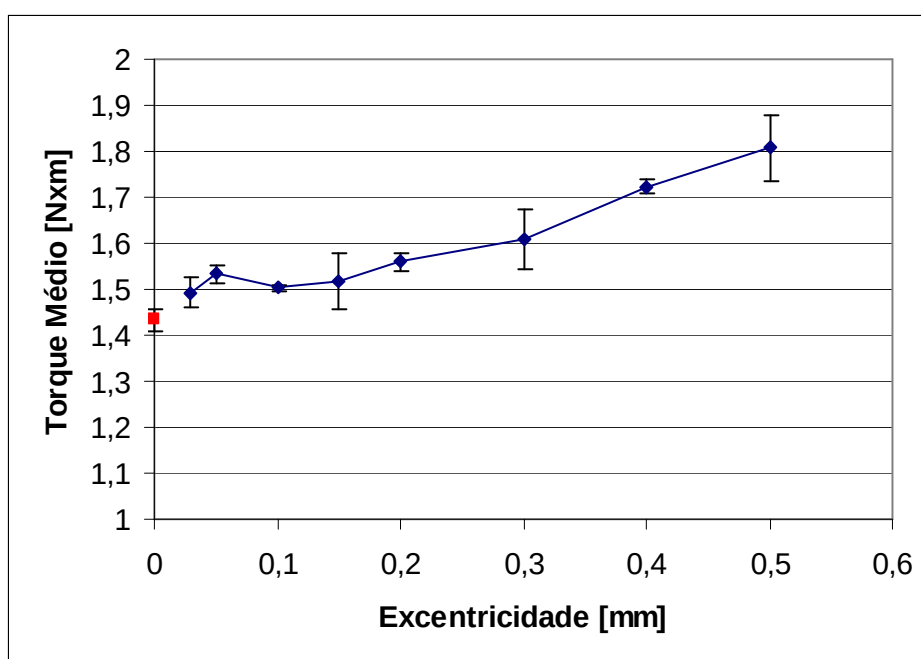


Figura 4.25 - Comparação entre as médias dos torques, para diferentes valores de excentricidade. O material usinado foi o A, a uma velocidade de corte de 35 m/min

Uma característica apresentada nos gráficos de força com excentricidade, é que houve uma maior oscilação durante a fase de corte e de retorno. Esta oscilação principalmente para valores de excentricidade, como será mostrado na Fig. 4.26, pode ser comparado ao batimento da ferramenta, que pode causar esta oscilação nas forças axiais e radiais e consequentemente no torque. Na Fig. 4.26 foram comparados os gráficos de força sem excentricidade, com 0,03 e 0,05mm de excentricidade.

Note que pequenas variações na excentricidade da ferramenta não causam variações visíveis no valor de força axial, no entanto, o torque sofreu um aumento. Isso pode ser

explicado pelo o que foi considerado aqui como um batimento da ferramenta, situação em que a ferramenta não está centralizada adequadamente, com isso as forças radiais sofrem um aumento e consequentemente o torque.

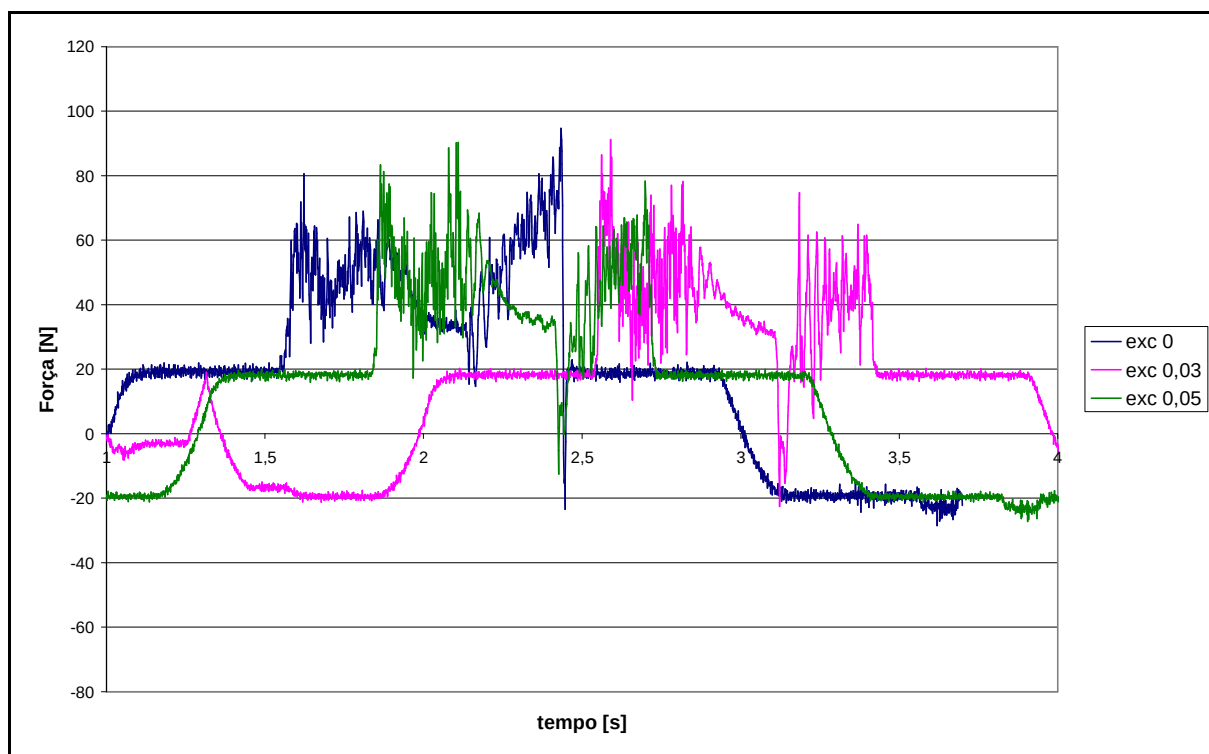


Figura 4.26 – Comparação entre os gráficos de força axial, com 0, 0.03 e 0.05 mm de excentricidade.

A Figura 4.27, mostra que com o aumento da excentricidade da ferramenta há também um aumento na frequência de oscilação. Uma outra característica observada foi a diminuição dos valores de força axial durante o retorno. Note que durante o retorno a força oscila em torno de um ponto “médio” que coincide com o ponto final da parada programada ao contrário dos sinais onde não houve um deslocamento da ferramenta em relação ao furo.

A Figura 4.24 mostrou que a força axial de entrada aumenta com o aumento da excentricidade. Logo as forças de entrada da Fig 4.27 são maiores do que as da Fig. 4.26, no entanto, as forças de retorno não apresentam essa tendência de aumento. Isso pode ser explicado, pois durante o retorno não há mais material para ser retirado, então não há mais a mesma força que causava a deflexão inicial da ferramenta. Consequentemente as forças de tração, compressão e atrito que o material da peça causava na ferramenta diminuí, com isso as forças axiais diminuem.

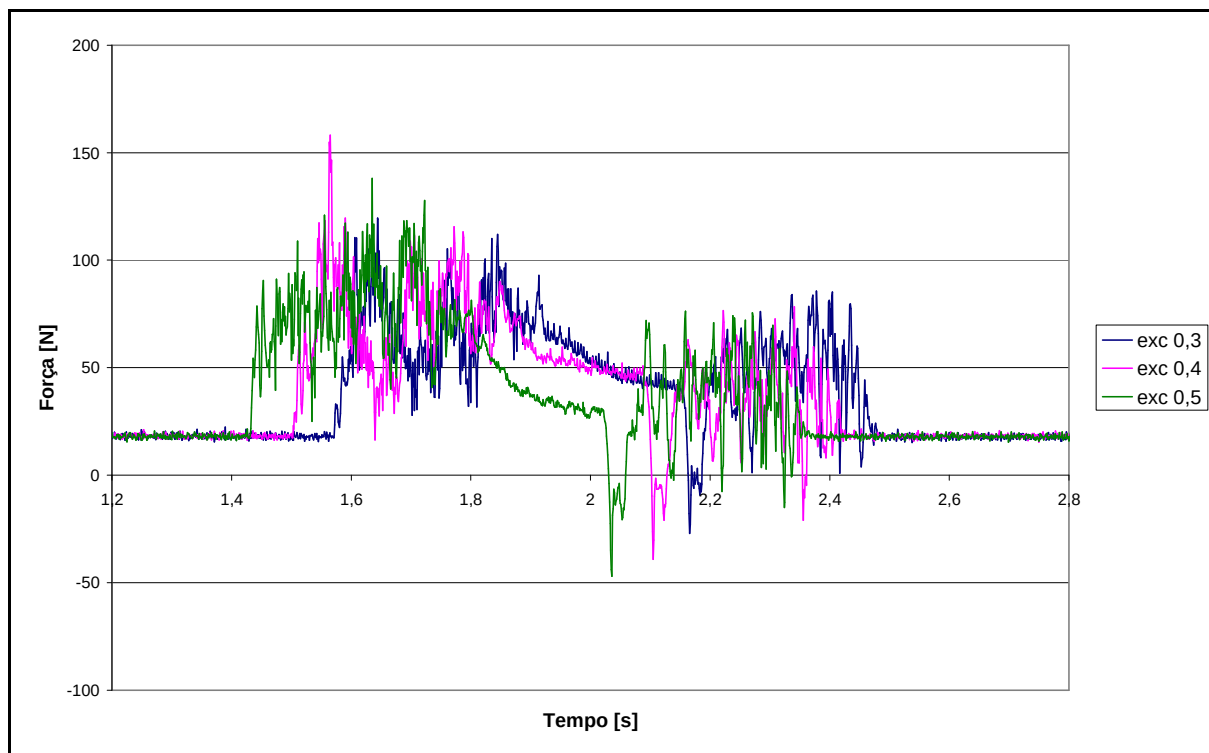


Figura 4.27 – Comparação entre os gráficos de força axial, com 0,3, 0,4 e 0,5 mm de excentricidade.

#### 4.6.6 Influência do número de canais dos machos de corte nas forças axiais e no torque

Para avaliar o efeito do número de canais, foram utilizados machos HSS-E Futura M6 6H com quatro canais e com três canais. O material foi o C com velocidade de 35 m/min e usinado a seco.

Na comparação das forças de entrada o macho de três canais apresentou uma tendência a ser maior do que o de quatro canais (Fig. 4.28). Um dos motivos que pode explicar isso é a área, ao analisar a área de contato do macho de três e quatro canais notamos que a do macho de três canais possui uma maior área de contato. Logo para a mesma pressão de contato, para a ferramenta de maior área terá uma maior força axial. Caso fossem excluídos os erros de sincronismo e de passo, essa diferença seria minimizada ou até mesmo inexistente.

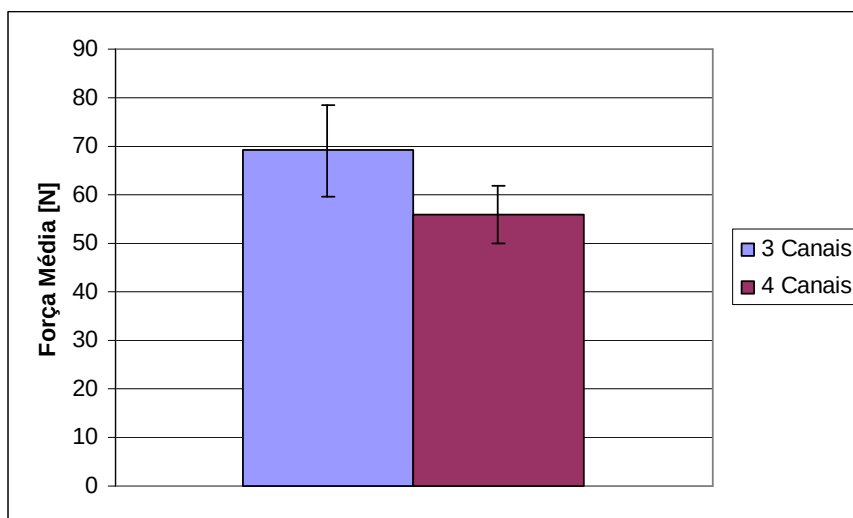


Figura 4.28 – Comparação entre as médias das forças, para ferramentas de três e quarto canais, usinado material C a 35 m/min

No entanto quando analisamos o gráfico do torque (Fig. 4.29), os resultados são opostos, o macho de quatro canais apresenta um torque maior do que o de três canais. Um motivo pode ser o número de canais, já que um menor número de canais resulta em um alojamento maior entre os dentes para o cavaco, isso facilitaria a sua saída para o fundo do furo, saindo da região de corte o que pode aumentar o torque.

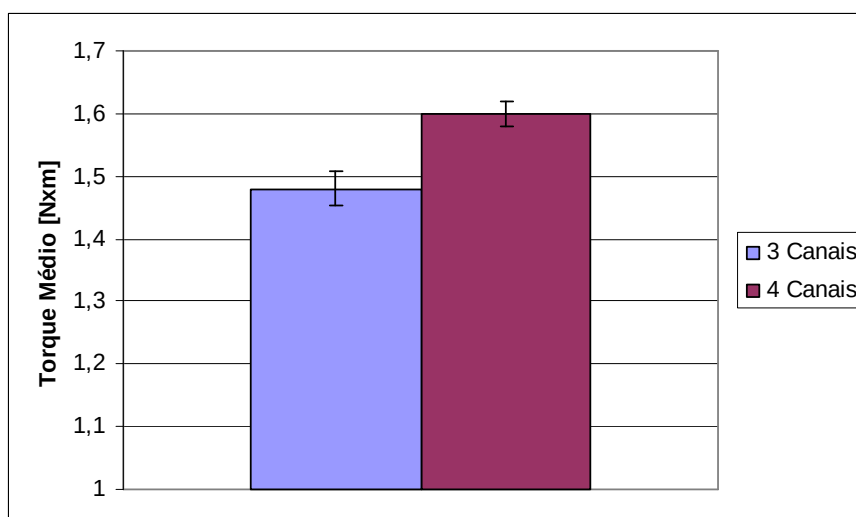


Figura 4.29 – Comparação entre as médias dos torques, para ferramentas de três e quarto canais, usinado material C a 35 m/min

## Capítulo V

### Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho levam a concluir que:

- Na condição a seco nas três velocidades analisadas o material A obteve os maiores valores de força axial e torque, seguido do material B e por último o material C. Para os três materiais nessas condições a força aumenta com a velocidade de corte e o torque diminui.
- Quando aplicado MQF, os maiores valores de força são obtidos quando usinando o material B, exceto na velocidade de corte de 75 m/min. Para esta velocidade, o material A passa a ter os maiores valores de força. O torque é maior para o material B seguindo do material A e material C.
- A força axial aumento com a velocidade de corte. Após 20 m/min o valor médio da força de retorno passa a ser superior a força axial durante o corte.
- O torque diminui com a velocidade de corte. O gráfico do torque com a velocidade de corte, sugere a formação de aresta postiça de corte entre as velocidades de 5 e 20 m/min.
- Os menores valores de força axial são obtidos quando se utiliza avanço axial de 0,992 a 0,996 mm.
- Ferramentas sem revestimentos apresentam os menores valores de força axial, seguidos das ferramentas nitretadas, revestidas com TiNAl e TiN.
- Existe uma pequena variação na força axial ao variar o comprimento roscado, quando este comprimento esta dentro da faixa de aproximadamente 1,7 vezes o diâmetro. Contudo no torque observa-se um efeito maior do comprimento roscado. No torque o valor médio aumenta com o aumento do comprimento.

- Quanto maior a excentricidade maior a força e o torque. A força axial durante o retorno da ferramenta diminui em relação à força na fase de corte com o aumento da excentricidade.
- O número de canais provoca um efeito contrario da força axial em relação ao torque. A força é maior e o torque menor para uma ferramenta de três canais.

## **CAPÍTULO VI**

### **Propostas para trabalhos futuros**

- 1- Mostrar gráficos de força axial e torque dente a dente, ou seja, retirar todos os dentes do macho de corte deixando apenas o primeiro, depois em outra ferramenta deixa-se o primeiro e o segundo e assim sucessivamente até que se alcance os dentes alisadores. Com isso poderá ser feita uma análise da influencia de cada dente, principalmente da parte cônica, na força e torque.
- 2- Analisar a influência do comprimento roscado, para grandes profundidades, tais como duas, três ou quatro vezes o diâmetro da ferramenta. Após isso, analisar o desgaste para o mesmo tempo de usinagem.
- 3- Utilizar uma base amortecida, para compensar o esforço axial para observar a influencia nos erros de sincronismo e avanço axial.
- 4- Avaliar a qualidade e tolerância das roscas quando se usina com avanços axiais diferentes do passo do macho, onde a força axial é menor.

## CAPÍTULO VII

### Referências Bibliográficas

ABELE, E.; SAHM, A.; SCHULZ, H. Wear Mechanism when Machining Compacted Graphite Iron. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1, p. 53-56, 2002.

ALMEIDA, D. O.; NAVES, V. T.; MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. Influência da Direção de Aplicação do Fluido de Corte na Temperatura da Interface Cavaco-Ferramenta. IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4, 2007, Águas de São Pedro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004, “NBR ISO 04:003.03-028. – **Rosca métrica ISO de uso geral – Tolerâncias – Parte 1: Princípios e dados básicos**”, Rio de Janeiro, Brasil.

BEZERRA, A. A. **Estudo do Desgaste no Roscamento com Alta Velocidade em Ferro Fundido**. 2003. 209 f. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BUDINSKI, K. G. **Surface Engineering For Wear Resistance**. 1.ed. New Jersey: Prentice-Hall. 1988. 420p. ISBN 0-13-877937-6.

CAO, T.; SUTHERLAND, J.W. Investigation of thread tapping load characteristics through mechanistics modeling and experimentation. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 42. p. 1527–1538. jul. 2002.

CARROLL, L. Tapping the Deep Hole. **Cutting Tool Engineering**. P. 36-43, agosto 1995.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7.ed. São Paulo: Associação Brasileira de metalurgia e Materiais, 2008. 599p.

CHIAVERINI, V. **Contribuição para o Estudo dos Fatores Determinantes da Vida de Ferramentas de Metal Duro.** 1967. 253 f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo.

**CIMM (CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA):** Disponível em:

“[http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material\\_didatico/4808](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/4808)”; Acesso em: 25 novembro 2009.

DA MOTA, P. R. **Investigação do comportamento de ferramentas de aço-rápido no processo de rosqueamento interno em alta velocidade de corte.** 2006. 142 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DA MOTA, P. R. **Estudo do Processo de Rosqueamento Com Macho de Metal Duro em Ferro Fundido Vermicular.** 2009. 160 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DAWSON, S.; HOLLINGER, I.; Robbins, M.; DAETH, J.; REUTHER, U.; SCHULZ, H. The effect of Compacted Graphite Iron. Compacted Graphite Iron Design and Machining Workshop. Bad Nauheim, Germany, 1999.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 751p. ISBN 85-212-0257-1.

FREIRE, J.M. **Tecnologia Mecânica** (Instrumento de Trabalho na Bancada), Livros Técnicos e Científicos. Editora S. A., v. 1, 1ª ed, 1976. 271p.

GHADERI, A. R.; AHMADABADI, M.; GHASEMI, H. M. Effect of Graphite Morphologies on the Tribological Behavior of Austempered Cast Iron [J]. **Wear**, n. 255, p. 410-416, 2003.

GUESSER, W. L. **Propriedade Mecânicas dos Ferros Fundidos.** 1.ed. São Paulo: Blucher, 2009. 336p.

GUESSER, W. L.; GUEDES, L. C. Desenvolvimento Recentes em Ferros Fundidos Aplicados à Indústria Automobilística. In: Seminário da Associação de Engenharia Automotiva - AEA, 1997, São Paulo.

HENDERER, T. Solid Synchronicity: Realizing true high-speed synchronous tapping with solid-carbide tools. **Cutting Tool Engineering**. V. 58, n. 2, fevereiro 2006.

KENNAMETAL. Catalogo Kennametal - Technical Data. Kennametal Inc. p. 180-200, 2005.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; DA SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1.ed. São Paulo: Blucher, 2009. 371p.

MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B. **Usinagem dos Metais - Apostila Didática**. Uberlândia: Edufu (Editora UFU), 2004. 257p.

MARWANGA, R. O.; VOIGT, R. C.; COHEN, P. H. Influence of Graphite Morphology and matrix Struture on Chip Formation During Machining of continuously Cast Ductile Irons. **AFS Tranactions**. V. 108, p. 651-661, 2000.

MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação**. Florianópolis, 2002a. Dissertação – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

NAVES, V.T.G. **Estudo da Usinabilidade dos Ferros Fundidos Cinzentos Ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e Vemircular Classe 350 no Fresamento Frontal em Alta Velocidade de Corte**. 2009. 145 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

OSG. **Manual Técnico – Machos**. OSG ferramentas de precisão Ltda. v.1, São Paulo, p. 1-58, 1999.

OSG SULAMERICANA : Disponível em:

“<http://www.osg.com.br/v3/paginas/importanteSeguranca.asp?lang=pt>”; Acessado em: 15 novembro 2009.

REIS, A.M. **Avaliação do Desempenho de Diferentes Materiais de Ferramenta no Processo de Rosqueamento Interno de Ferro Fundido Cinzento, Através do Monitoramento do Desgaste**. 2004. 192 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

REIS, A. M.; VIOLATTI, D. C.; SEPPE JÚNIOR, W.; SOUZA JÚNIOR, A. M.; DA SILVA, M. B. "Avaliação do Desempenho de Ferramentas de Aço-Rápido no Rosqueamento Interno do Ferro Fundido Cinzento Gh – 190". II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2, 2003, Uberlândia – MG, **Proceedings of II COBEF**.

REUTER, U.; SCHULZ, H. CGI Machinability and Developments Toward Production. Compacted Graphite Iron Design and Machining Workshop. Bad Nauheim, Germany, 1999.

SANTOS, S.C. **Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Aço Rápido e de Metal Duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento**. 2002. 199 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles**. Nova Iorque: Oxford University Press, 1984. 594p. ISBN 0-19-859002-4.

SKF. **Manual Técnico SKF.Ferramentas S. A**, 1987, São Paulo.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 446p. ISBN-13: 978-0-7506-7069-2. ISBN-10: 0-7506-7069-X.

Xavier, F. A. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-duro, Cerâmica e CBN**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.

ZHAO, X.; WANG, J.; JING, T. **Gray Cast Iron With Directional Graphite Flakes Produced by Cylinder Covered Compression Process**. JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL. 2007, 14(5) : 52-55.