

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais realizados e a partir dos quais foram obtidos os resultados que serviram de base para a execução deste trabalho. Os ensaios foram realizados no ferro fundido cinzento GH 190 (equivalente ao FC 200/250 da norma AISI), utilizado na fabricação de blocos de motores automotivos.

Inicialmente foram feitos vários testes preliminares para definir os parâmetros de usinagem, tais como as velocidades de corte a serem utilizadas. Estes serviram também para conhecer melhor o processo, principalmente com relação ao funcionamento dos dispositivos de fixação que seriam utilizados: cabeçote fixo, flutuante e auto-reversível. Os resultados desses testes não serão apresentados aqui.

O cabeçote fixo foi o único que permitiu a usinagem em velocidades consideradas altas para o rosqueamento. Com esse acessório (ou dispositivo) foi possível fabricar roscas com velocidade de corte de até 75 m/min, a máxima permitida pela máquina utilizada.

Com essas condições de corte não foi possível utilizar todos os cabeçotes, devido a limitações técnicas dos mesmos. Optou-se por não utilizar o cabeçote flutuante nos testes definitivos devido à não calibração das roscas usinadas com velocidades superiores a 30 m/min com esta fixação. Já com cabeçote auto-reversível foi possível calibrar todas as roscas testadas, mas não foi possível rosquear com velocidades superiores a 47 m/min, devido à limitação técnica desse equipamento, o qual não permite utilizar rotações superiores a 2500 rpm.

Deste modo, optou-se por utilizar nos testes definitivos dois cabeçotes e três velocidades de corte, que são respectivamente, o fixo (10, 37,5 e 75 m/min) e o auto-reversível (10 e 37,5 m/min).

Nos testes preliminares foram testadas duas condições de lubrificação: seco e MQL. Entretanto, após a realização destes pré-testes, definiu-se que o uso de lubrificante só seria utilizado para as condições mais severas, ou seja, para a usinagem com altas velocidades

de corte e para as ferramentas que apresentaram os piores resultados nos testes preliminares. A justificativa para a não utilização de MQL para as ferramentas com melhores desempenhos está relacionada ao número excessivo de testes, o que comprometeria a realização desse trabalho.

Nestes testes preliminares foram usinadas várias roscas com três tipos de materiais para machos de corte: HSS (aço rápido), HSS-E (aço-rápido com 3% de vanádio) e HSS-PM (aço-rápido obtido pela metalurgia do pó). Em função dos resultados obtidos ficou definido que os critérios de fim de vida dos machos seriam relacionados à falha catastrófica das ferramentas ou a não calibração dos furos rosqueados, medida através de um calibre passa-não-passa padronizado. O número máximo de furos rosqueados não ultrapassaria 1000 roscas por ferramenta.

Determinou-se que nos ensaios definitivos, as roscas seriam feitas em furos cegos, pois a maioria das roscas do bloco de motor é fabricada neste tipo de furo. É também durante a fabricação de roscas em furos cegos que são geradas as condições mais severas de rosqueamento, em termos de calor e torque produzidos, bem como dificuldade de saída do cavaco.

Nos ensaios definitivos foram utilizadas ferramentas de corte fabricadas em quatro tipos de aço-rápido: 1) HSS-E: aço-rápido AISI-M3 com 3% de Vanádio, conhecido como aço super-rápido, com dureza de aproximadamente 879 HV (66,4 HRC), fabricado pelo método de fundição convencional; 2) HSS: aço-rápido AISI-M7, fabricado pelo método convencional, que possui uma dureza medida de 871 HV (aproximadamente 66,2 HRC); 3) HSS PM: aço-rápido AISI-M7, fabricado pelo processo de metalurgia do pó, cuja dureza medida é 920HV (aproximadamente 67,5 HRC); 4) HSS NI: aço-rápido AISI-M7, fabricado pelo processo convencional e tratado superficialmente, cuja macrodureza medida é de 808 HV (64,5 HRC). O tratamento superficial utilizado foi a nitretação à plasma, realizado a uma temperatura de 480° C durante 90 minutos, para obtenção de uma camada nitretada cuja espessura estimada é de 0,04 mm e microdureza de 1000 a 1250 HmV0,3.

Foi ainda avaliado o desempenho de dois tipos de revestimentos: TiN (nitreto de titânio) e multicamadas de TiN/TiAlN nas ferramentas de HSS-E e HSS-PM. Como forma de monitorar os esforços gerados durante a evolução dos desgastes nas ferramentas para as diferentes condições de corte empregadas neste trabalho foi feito o acompanhamento do sinal de torque para as condições de ferramenta nova e em fim de vida.

Estudos das formas e mecanismos de desgastes presentes nas ferramentas ensaiadas foram feitos por meio de análises em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e em microscópio óptico. As roscas fabricadas com cada tipo de ferramenta em cada velocidade de corte, também foram analisadas no MEV.

3.1 Planejamento Experimental

Os ensaios definitivos foram divididos em duas etapas, onde foram utilizadas como variáveis independentes os substratos das ferramentas, as velocidades de corte, o tipo de cobertura e o sistema de fixação das ferramentas (mandril fixo e auto-reversível). Consideraram-se como constantes o material dos corpos de prova, a máquina-ferramenta e o tipo de refrigeração/lubrificação.

Além dessas duas etapas, foram feitos vários testes complementares com o objetivo de entender melhor os principais mecanismos de desgaste apresentados nos machos de corte utilizados em altas velocidades de corte. Esses testes ocorreram para as ferramentas que tiveram os piores resultados nos ensaios preliminares e serão detalhados a seguir.

Para a primeira etapa foram considerados três variáveis independentes ou de entrada. Variou-se a velocidade de corte em alta (75 m/min) e moderada (37,5 m/min); os substratos das ferramentas (HSS-PM e HSS-E); e finalmente os revestimentos (TiN e multicamadas (TiN/TiAlN)). Utilizou-se para esse experimento um planejamento fatorial com três fatores e dois níveis (2^k), pois possuem ampla aplicação industrial. Essas condições permitem a avaliação em separado dos efeitos individuais e dos efeitos de interação dos fatores num experimento no qual todos fatores variam simultaneamente num padrão de tentativas cuidadosamente organizado. Dessa forma, classificou-se a velocidade de corte, o substrato e a cobertura, para efeito do planejamento, como apresentado na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 Variáveis utilizadas na primeira etapa do planejamento estatístico

Variável	Fator (estudado)	Valor codificado (Fatorial 2^3)
Velocidade (Vc)	A1 = 37,5 m/min	-1
	A2 = 75,0 m/min	1
Substrato (Sub)	B1 = HSS-E	-1
	B2 = HSS PM	1
Revestimento (Rev)	C1 = TiN	-1
	C2 = TiN/TiAlN	1

A Tab. 3.2 apresenta os principais testes e seus respectivos fatores de controle, desenvolvida pelo *Software Statistical*. Com o objetivo de acompanhar e medir os desgastes no microscópio ferramenteiro, trocava-se as ferramentas de corte a cada 160 roscas, permitindo que dessa forma os testes fossem aleatórios. Isso possibilitou a cada ferramenta usinar em corpos de prova diferentes e em dias distintos. Como os testes deste trabalho foram baseados em experimentos fatoriais, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores, ou variáveis independentes, citadas acima foram testadas. Portanto, tem-se dois

níveis de velocidade de corte, dois tipos de substratos e mais dois de revestimento, os quais resultam em oito combinações a serem examinadas. É importante advertir que não houve repetições dos testes em nenhuma situação, devido ao grande número de ensaios necessários neste trabalho.

Tabela 3.2 Testes e respectivos fatores analisados com cabeçote fixo

Ensaio	Velocidade de corte	Substrato	Revestimento	Fatores
01	1 (75 m/min)	1(PM)	1(TiN/TiAlN)	A2B2C2
02	-1 (37,5 m/min)	1(PM)	1(TiN/TiAlN)	A1B2C2
03	1 (75 m/min)	-1(HSS-E)	1(TiN/TiAlN)	A2B1C2
04	-1 (37,5 m/min)	-1(HSS-E)	1(TiN/TiAlN)	A1B1C2
05	1 (75 m/min)	1(PM)	-1(TiN)	A2B2C1
06	-1 (37,5 m/min)	1(PM)	-1(TiN)	A1B2C1
07	1 (75 m/min)	-1(HSS-E)	-1(TiN)	A2B1C1
08	-1 (37,5 m/min)	-1(HSS-E)	-1(TiN)	A1B1C1

A segunda situação (etapa) analisada foi a comparação do desempenho dos dois tipos de cabeçotes. Também para análise estatística foram consideradas três variáveis independentes ou de entrada. Variou-se o tipo de cabeçote (fixo ou auto-reversível); os substratos das ferramentas (HSS-E e HSS-PM); e novamente os revestimentos: TiN e multicamadas (TiN/TiAlN). Desta vez a velocidade de corte foi considerada constante, pois os testes ocorreram com velocidades moderadas (37,5 m/min). Os demais parâmetros de corte foram mantidos constantes. Utilizou-se também para esse experimento um planejamento fatorial com três fatores e dois níveis (2^k). Assim, o planejamento ficou classificado conforme a Tab. 3.3.

Tabela 3.3 Variáveis utilizadas na segunda etapa do planejamento estatístico

Variável	Fator Estudado	Valor codificado (Fatorial 2^3)
Cabeçote (Cab)	A1 = Fixo	-1
	A2 = Auto-Reversível	1
Substrato (Sub)	B1 = HSS-E	-1
	B2 = HSS PM	1
Revestimento (Rev)	C1 = TiN	-1
	C2 = TiN/TiAlN	1

A Tab. 3.4 mostra a disposição dos testes e suas respectivas ordens de realização, embora, da mesma forma que a anterior, os testes foram realizados aleatoriamente, sempre usinando 160 roscas e medindo os desgastes no microscópio ótico.

Tabela 3.4 Testes e respectivos fatores analisados com velocidade de corte constante

Ensaio	Tipo de Cabeçote	Substrato	Revestimento	Fatores
09	1(Reversível)	1(PM)	1(TiN/TiAlN)	A2B2C2
10	-1(Fixo)	1(PM)	1(TiN/TiAlN)	A1B2C2
11	1(Reversível)	-1(HSS-E)	1(TiN/TiAlN)	A2B1C2
12	-1(Fixo)	-1(HSS-E)	1(TiN/TiAlN)	A1B1C2
13	1(Reversível)	1(PM)	-1(TiN)	A2B2C1
14	-1(Fixo)	1(PM)	-1(TiN)	A1B2C1
15	1(Reversível)	-1(HSS-E)	-1(TiN)	A2B1C1
16	-1(Fixo)	-1(HSS-E)	-1(TiN)	A1B1C1

Também avaliou-se os machos HSS-E sem revestimento (SR) e revestidos com TiN, em duas situações: à seco e com MQL. Para completar essa série de ensaios foram utilizados dois machos de HSS que sofreram tratamentos termoquímicos de nitretação. A Tab. 3.5 apresenta a configuração desses testes.

Tabela 3.5 Condições de teste complementares

Teste	Revestimento	Velocidade de Corte (m/min)	Cabeçote	Condição
17	HSS TiN	10	Fixo	Seco
18	HSS TiN	10	Reversível	Seco
19	HSS TiN	75	Fixo	Seco
20	HSS-E TiN	75	Fixo	MQL
21	HSS-E (SR)	75	Fixo	Seco
22	HSS-E (SR)	75	Fixo	MQL
23	HSS Nitretado	75	Fixo	Seco
24	HSS Nitretado	75	Fixo	MQL

Com isso, foi possível comparar o desempenho de duas classes de machos: HSS e HSS-E. Além disso, avaliou-se a eficiência do revestimento TiN versos o efeito da lubrificação no rosqueamento de ferro fundido, em alta velocidade de corte. Não foi feito nenhum teste utilizando MQL para as ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN, pois essas ferramentas tiveram um desempenho muito superior às ferramentas

sem revestimento e revestidas com TiN, na condição a seco, quando testadas nos testes preliminares e na primeira etapa dos testes, utilizando cabeçote fixo.

A tab. 3.6 resume a combinação dos vinte testes realizados nesta etapa do trabalho, sendo possível destacar os quatro tipos de substratos (HSS, HSS NI, HSS-E e HSS-PM), bem como os dois tipos de revestimentos empregados (TiN e multicamadas TiN/TiAlN, designado como Futura). Percebe-se também que em quatro condições foram utilizadas ferramentas sem revestimento.

Tabela 3.6 Ferramentas, revestimentos e condições de corte utilizadas na segunda etapa

Teste	Ferramenta	Revestimento	Velocidade de Corte (m/min)	Fluído de Corte	Cabeçote
01	HSS-PM	TiN/TiAlN	75	Seco	Fixo
02	HSS-E	TiN/TiAlN	75	Seco	Fixo
03	HSS-PM	TiN	75	Seco	Fixo
04	HSS-E	TiN	75	Seco	Fixo
05	HSS-E	TiN/TiAlN	37,5	Seco	Fixo
06	HSS-PM	TiN/TiAlN	37,5	Seco	Fixo
07	HSS-PM	TiN	37,5	Seco	Fixo
08	HSS-E	TiN	37,5	Seco	Fixo
09	HSS-E	TiN	75	MQL	Fixo
10	HSS-E	Sem Revestimento	75	Seco	Fixo
11	HSS-E	Sem Revestimento	75	MQL	Fixo
12	HSS NI	Sem Revestimento	75	Seco	Fixo
13	HSS NI	Sem Revestimento	75	MQL	Fixo
14	HSS	TiN	10	Seco	Fixo
15	HSS	TiN	75	Seco	Fixo
16	HSS	TiN	10	Seco	Reversível
17	HSS-PM	TiN/TiAlN	37,5	Seco	Reversível
18	HSS-PM	TiN	37,5	Seco	Reversível
19	HSS-E	TiN/TiAlN	37,5	Seco	Reversível
20	HSS-E	TiN	37,5	Seco	Reversível

Conforme descrito anteriormente, foram feitos alguns testes complementares (cabeçote fixo e auto-reversível), utilizando os machos que falharam prematuramente nos testes preliminares. Utilizou-se duas velocidades de corte (10 e 75 m/min) e em três

situações de corte utilizou-se MQL, com o objetivo de avaliar o efeito do uso de refrigerante/lubrificante nas condições mais severas.

Neste caso, somente em uma situação foi utilizado o cabeçote auto-reversível, quando comparou-se o desempenho dos machos HSS revestidos com TiN em baixa velocidade de corte (10 m/min) versus o desempenho de uma ferramenta semelhante em alta velocidade de corte (75 m/min). Os testes com baixa velocidade de corte (10 m/min) foram realizados devido ao fato de ainda hoje serem empregadas essas velocidades de corte no parque industrial do Brasil.

3.2 Máquina-Ferramenta

Todos os testes foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical CNC da linha Discovery modelo 760 com comando numérico Siemens 810 (Fig 3.1), cujas características estão descritas na Tab. 3.7. Os programas utilizados para os ciclos de rosqueamento foram o Ciclo 84, próprio para rosqueamento com macho rígido e o Ciclo 840, próprio para mandris flutuantes.



Figura 3.1 – Centro de usinagem vertical, modelo Discovery 760 (ROMI)

Tabela 3.7 Características do centro de usinagem discovery 760

Especificações técnicas	Valores	Especificações técnicas	Valores
Faixa de velocidades	10 a 10.000 RPM	Potência total instalada	15 KVA
Avanço rápido (eixos x / y)	25.000mm/min	Curso long. da mesa (x)	762 mm
Avanço rápido (eixos z)	20.000 mm/min	Curso trans. da mesa (y)	406 mm
Avanço de corte	1 a 5.000 mm/min	Curso vert. do cabeçote	508 mm
Pot. do motor principal CA	9 KW/12,5 cv	Comando	Siemens 810

3.3 Machos de Corte

Todas as ferramentas testadas neste trabalho são machos de corte para rosca métrica M6X1, cujas principais características geométricas são apresentadas na Tab 3.8

Tabela 3.8 Características geométricas dos machos utilizados nos ensaios

Macho máquina ISO 529 M6x1 6H (Canal reto)			
Características	Dimensões	Características	Dimensões
Nº de canais	3	Nº de filetes no chanfro	2
Ângulo de entrada	20°	Ângulo de saída ou de corte	12° a 14°
D(Diâmetro externo)	6mm (M6)	Passo	1 mm
D2 (Diâmetro efetivo)	5,350 mm	D1 (Diâmetro interno)	4,917mm
H1(altura do filete)	0,541 mm	Ângulo da rosca	60°

A Fig 3.2 mostra dois machos de corte M6X1, revestidos com multicamadas (TiN/TiAlN) (a) e TiN (b), coberturas muito utilizadas no meio industrial, as quais representaram os principais focos de investigação deste trabalho. Os machos utilizados possuem uma geometria específica (fora de catálogo), pois estas ferramentas são fabricadas exclusivamente para atender a montadora Fiat Automóveis Ltda.

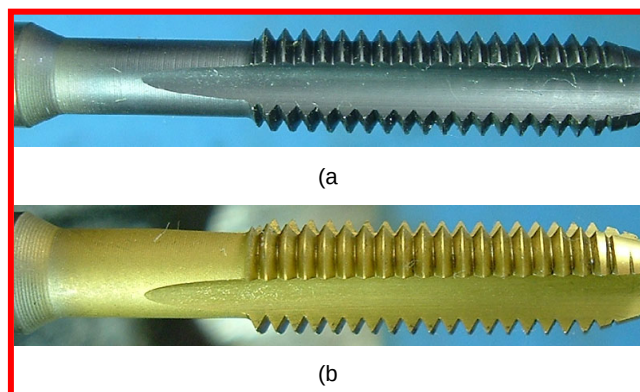


Figura 3.2 Ferramentas de corte utilizadas: a) HSS-PM TiN/TiAlN (Futura) e b) HSS-E TiN

3.4 Corpo-de-prova, ferramentas e sequência de execução dos testes

Conforme mencionado anteriormente os corpos-de-prova usinados foram barras de ferro fundido cinzento GH 190 (classificação segundo norma FIAT de 1991) cujas principais características são apresentadas na Tab. 3.9.

Tabela 3.9 Características do ferro fundido cinzento GH-190

Composição Química (%)					Características Estruturais			Dureza (HB)
C	Si	Cr	S	P	Matriz	Grafita	Cementita e carbono livre	207
3,2-3,5	2,0-2,5	≤ 0,2	≤ 0,15	≤ 0,10	Perlítica lamelar max. 5% de ferrita	Tipos B e D	Max. 1%	

A Figura 3.3 apresenta algumas micrografias do ferro fundido cinzento (GH 190), que caracterizam a estrutura da matriz (perlítica), com grafitas em forma de veios. Também é possível observar partículas de sulfeto de manganês e algumas regiões onde há predominância de ferrita, rica em fósforo, com precipitados de Fe_3P (steadita), indicado pelas setas dessa figura.

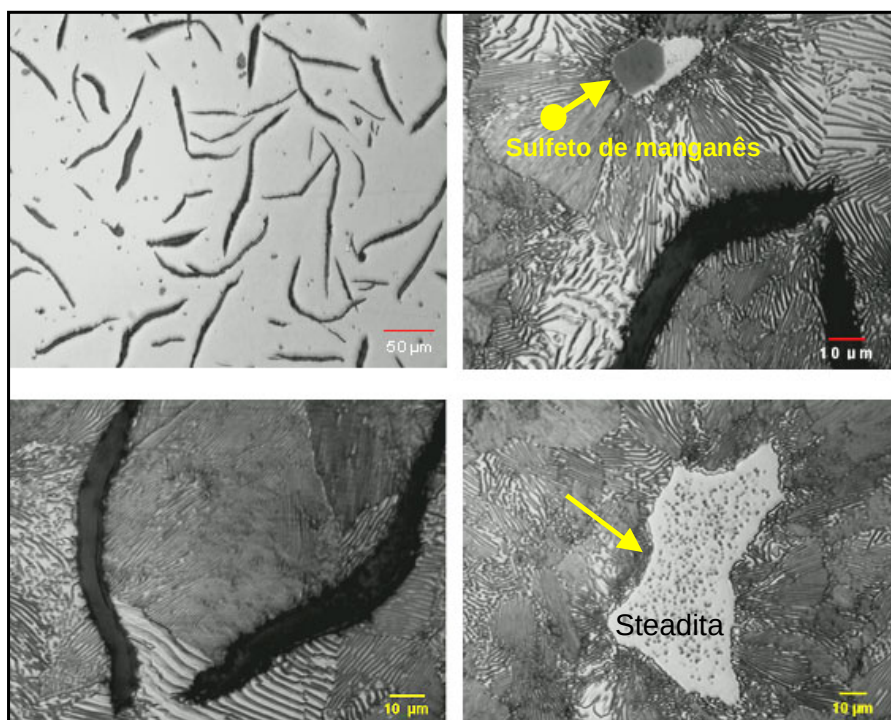


Figura 3.3 – Micrografias do ferro fundido cinzento GH-190; inclusões de sulfeto de manganês e ferrita rica em fósforo, com precipitados de Fe_3P (steadita)

A Fig 3.4 apresenta as principais dimensões das placas rosqueadas, assim como os detalhes das roscas fabricadas. Cada placa foi fresada (fresamento frontal) na superfície superior e inferior, com o objetivo de aplatar a região a ser rosqueada, garantindo a planicidade e o paralelismo, bem como retirar impurezas superficiais, comuns nas ligas fundidas em areia.

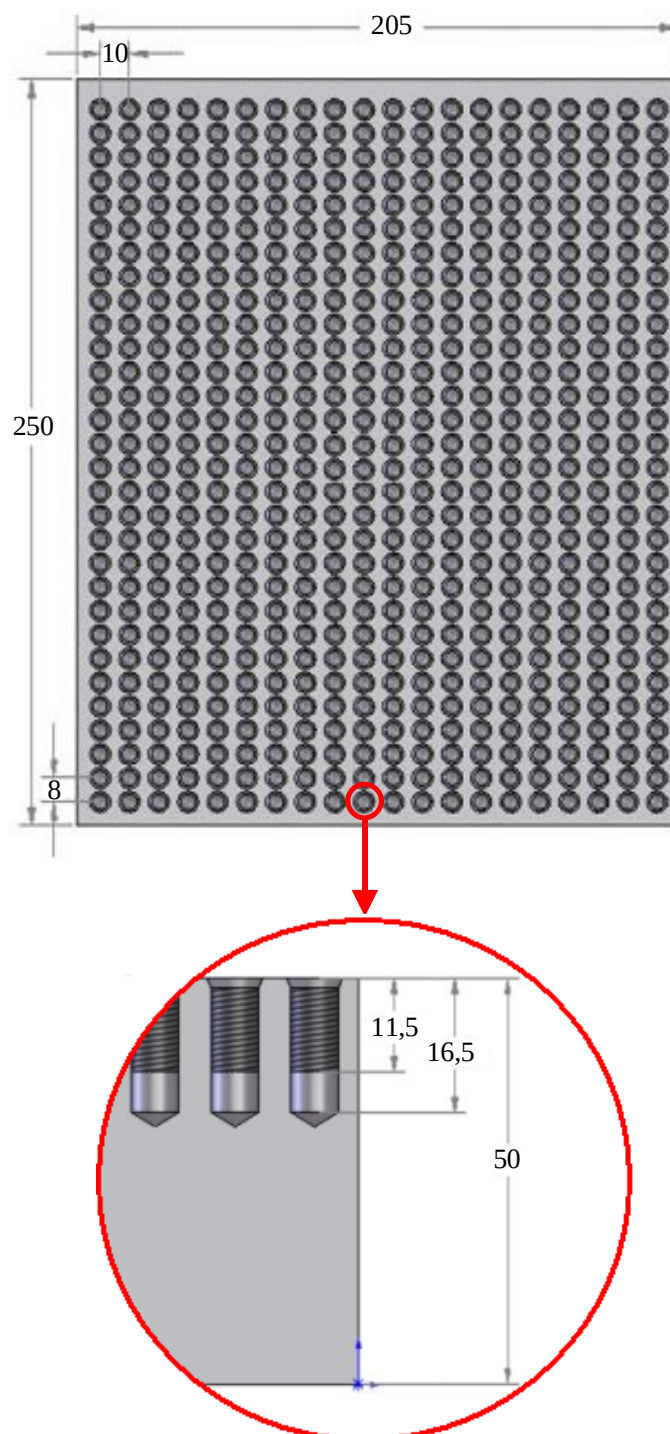


Figura 3.4 – Corpo de prova (ferro fundido GH 190) utilizado nos experimentos

A espessura das barras final foi de aproximadamente 50 mm, o que proporcionou a usinagem de roscas nos dois lados da peça. Os pré-furos tinham 16.5 mm de profundidade, dos quais as roscas feitas atingiam 11,5 mm de comprimento.

As figs 3.5 (a), (b) e (c) mostram o corpo de prova sendo furado, rosqueado e calibrado, respectivamente.

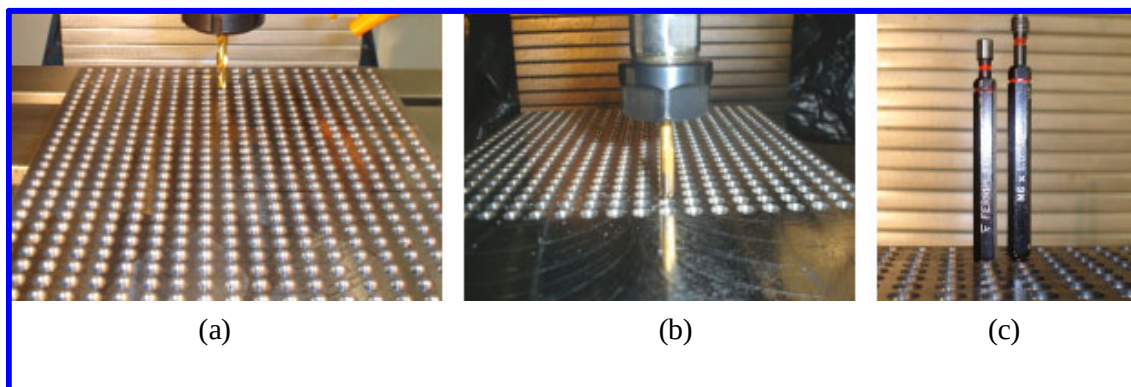


Figura 3.5 – Corpo de prova utilizado nos testes; (a) Furação; (b) Rosqueamento; (c) Calibre passa-não passa para furação e rosqueamento

O material usinado foi fixado em uma morsa, a qual estava fixa por parafusos na mesa principal do centro de usinagem. As ferramentas utilizadas foram colocadas nos mandris, armazenadas no magazine da máquina, sendo retiradas, dos cabeçotes, somente para a medição do desgaste no microscópio ótico. Para fabricar os pré-furos foram utilizadas brocas de metal duro escalonadas (SPLS), revestidas com TiN e cujas dimensões são $\varnothing 5.0 \times \varnothing 7.0 \times 76 \times 38\text{mm}$, haste 1885 HE 7. A geometria da broca (cônica) entre os diâmetros de 7 e 5 milímetros proporciona ao furo o chanfro necessário para a abertura das roscas.

A sequência de furação e rosqueamento foi planejada e programada no CNC, de forma que a broca furava 20 furos em cada etapa dos testes, na direção do eixo X da máquina e em seguida trocava-se a ferramenta (broca) por uma ferramenta de rosquear (macho). No intervalo entre a furação e o rosqueamento, o programa admitia uma parada, permitindo a limpeza dos furos com ar comprimido para retirada dos cavacos deixados pela operação de furação. A usinagem dos furos foi feita com velocidade de corte de 30 m/min e o controle dos furos usinados feito com um calibre Ferriplax 15177 a cada 20 furos usinados.

Durante todos os ensaios as roscas foram conferidas periodicamente com um calibre (Ferriplax 19264) passa-não-passa para rosca M6x1,0 6H, com o objetivo de verificar se as roscas feitas obedeciam às tolerâncias especificadas. A cada vinte roscas fabricadas eram

calibradas três roscas, nesta ordem: a terceira; a décima; e a décima sétima. Em alguns casos específicos, quando havia dúvida quanto à calibração, aumentava-se o número de roscas inspecionadas, calibrando outras roscas feitas anteriormente (roscas vizinhas). Sabe-se que um simples cavaco aderido na rosca é motivo de não haver calibração e comprometer os testes. As roscas eram reprovadas caso o calibre de rosca não enroscasse totalmente na extremidade passa, e/ou enroscasse mais de um filete de rosca completo na extremidade não-passa, em no mínimo três roscas subsequentes. Portanto, a presença de roscas defeituosas implicava no fim dos testes com o macho que as fabricaram.

3.5 Sistema de Indexação dos Machos de Corte

Conforme descrito anteriormente, foram empregados dois tipos de cabeçotes no rosqueamento interno com macho de corte, sendo um fixo e o outro auto-reversível.

O uso de cabeçotes fixos para rosquear só é possível em máquinas CNC modernas que possuem um perfeito sincronismo entre os motores de avanço e rotação, além disso, os CNCs destas máquinas possuem um ciclo próprio para rosqueamento com este tipo de cabeçote (Fig. 3.6). As figs 3.6 (a) e (b) apresentam o cabeçote fixo, fora do magazine e montado no eixo-árvore da máquina.

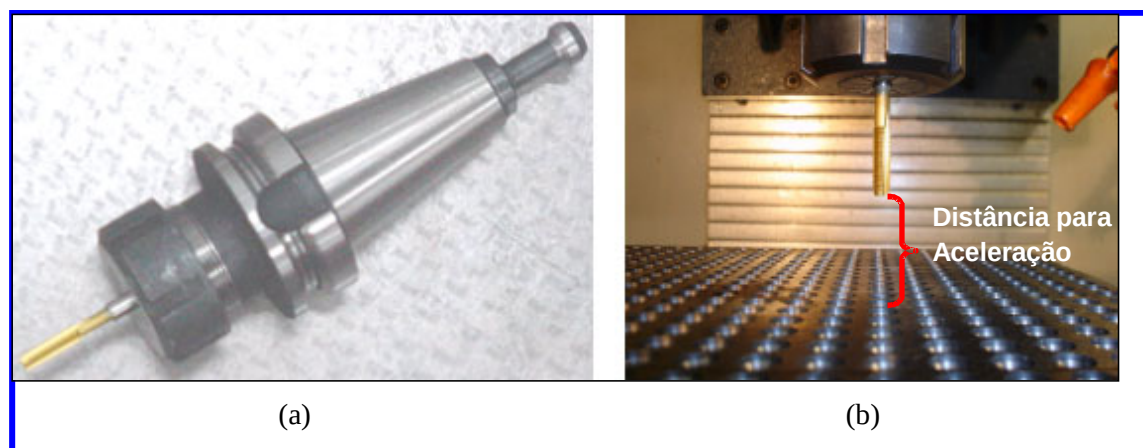


Figura 3.6 – Cabeçote fixo; (a) fora do magazine e (b) em operação

Mesmo em máquinas modernas, certos cuidados devem ser tomados quando se trabalha com altas rotações no rosqueamento. Como por exemplo, para se garantir que o rosqueamento seja realizado com a velocidade programada, deve-se iniciar o ciclo de rosqueamento a uma certa distância do furo, de tal forma que o eixo (ferramenta) ao

percorrer esta distância tenha tempo suficiente para atingir a velocidade de corte da operação. Assim, neste trabalho, quando se empregaram velocidades de corte moderadas (37,5 m/min) e altas (75 m/min), o macho foi posicionado a 25 e 35 milímetros acima do corpo de prova, respectivamente, distância necessária para garantir que a velocidade de corte fosse a esperada (37,5 e 75 m/min) ao atingir a parte chanfrada do furo a ser rosqueado (Fig 3.6 (b)). O retorno da ferramenta foi através da inversão da rotação e do avanço do eixo-árvore da máquina CNC.

O Cabeçote auto-reversível utilizado foi o CST TAPMATIC RDTIC - 50 com capacidade máxima de trabalho para macho de corte até M12 e macho laminador até M9. Este equipamento pode trabalhar até uma rotação máxima de 2500 rpm. O cabeçote com a indicação de seus componentes fundamentais podem ser conferidos na Fig 3.7.

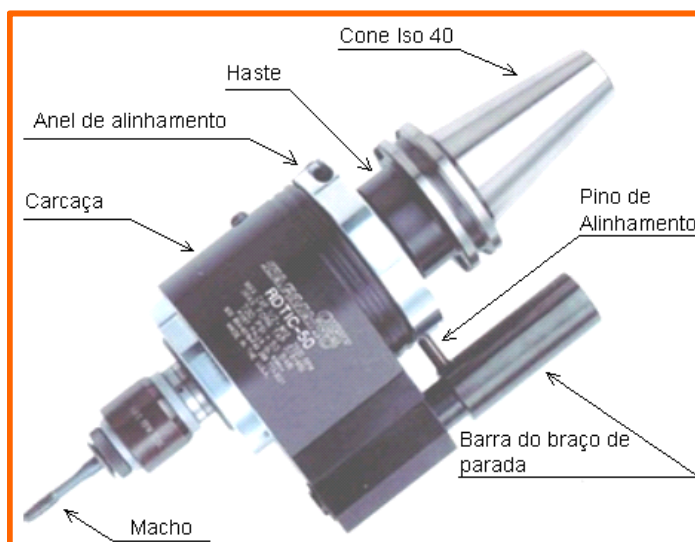


Figura 3.7 – Cabeçote de rosquear auto-reversível CST TAPMATIC RDTIC-50 (BEZERRA, 2003, modificado)

As principais funções do sistema de indexação são evitar que a carcaça do cabeçote de rosquear auto-reversível rotacione, de forma a suportar o torque proveniente da reversão do macho de corte ou de laminação após a confecção da rosca interna, e propiciar uma orientação à máquina para a posição correta do cabeçote quando este substitui uma outra ferramenta durante a troca de ferramentas. A inversão da rotação não é feita pela máquina como no caso dos cabeçotes fixos e flutuantes. A auto-reversão acontece dentro do cabeçote, através de um jogo de engrenagens cônicas. Ao atingir a profundidade programada o eixo árvore da máquina pára de avançar, mantendo somente o giro de rotação. O macho continua penetrando no furo até vencer a inércia rotacional e parar.

Enquanto isso o eixo-árvore inicia o movimento de retorno, possibilitando a distensão de uma mola, até haver a inversão da rotação dentro da carcaça do mandril. Uma das vantagens desse processo em relação aos cabeçotes fixos e flutuantes é que a máquina realiza o movimento de rotação apenas num sentido, não necessitando de reversão. Esse cabeçote é muito utilizado em máquinas que não possuem sincronismo de velocidade e avanço, como por exemplo, máquinas CNC antigas ou em furadeiras de coluna ou radiais.

3.6 Avaliação dos níveis de desgaste atingidos pelas ferramentas

Durante os ensaios, além do monitoramento da qualidade geométrica das roscas produzidas, por meio de um calibre passa-não-passa, mediu-se também o desgaste de flanco das ferramentas de corte a cada 160 roscas fabricadas, em um microscópio ferramenteiro, com ampliação de 40 vezes. Os valores de desgaste de flanco das ferramentas foram medidos nas três superfícies de folga, entre os três canais do macho de corte, e nos três primeiros filetes do mesmo, que correspondem à região do macho responsável pelo corte efetivo de material (SHA; NI; WU, 1990, apud REIS, 2004). A escolha das dimensões representativas do desgaste de flanco, que foram medidas no presente trabalho, se baseou nos resultados do trabalho de Reis (2004), no qual o autor procurou definir as cotas representativas do desgaste de flanco, por meio das quais se pudesse acompanhar a evolução do desgaste de flanco. Em seu trabalho Reis (2004) definiu as formas de desgastes apresentadas em um macho de corte com quatro canais, e fez um estudo estatístico da evolução das cotas críticas apresentadas na Fig. 2.27 do capítulo anterior. Entre as cotas que melhor representaram a evolução do desgaste estão as cotas 1 dos dentes 1, 2 e 3. Nos pré-testes do presente trabalho verificou-se que as formas de desgastes apresentadas nas superfícies de folga dos machos de corte com três canais foram semelhantes àsquelas presentes nos machos com quatro canais, de tal forma que as cotas escolhidas para acompanhar a evolução do desgaste de flanco nos machos de corte testados, foram as cotas 1 dos dentes 1, 2 e 3.

O critério de medição adotado foi o mesmo desenvolvido e aplicado por Reis (2004). Para auxiliar a medição direta do desgaste no microscópio ferramenteiro foi utilizado um dispositivo desenvolvido no laboratório com o objetivo de fixar o macho na mesma posição e poder girá-lo até 360°, garantindo assim a visualização dos principais ângulos e superfícies da ferramenta. Este dispositivo é mostrado na Fig. 3.8.

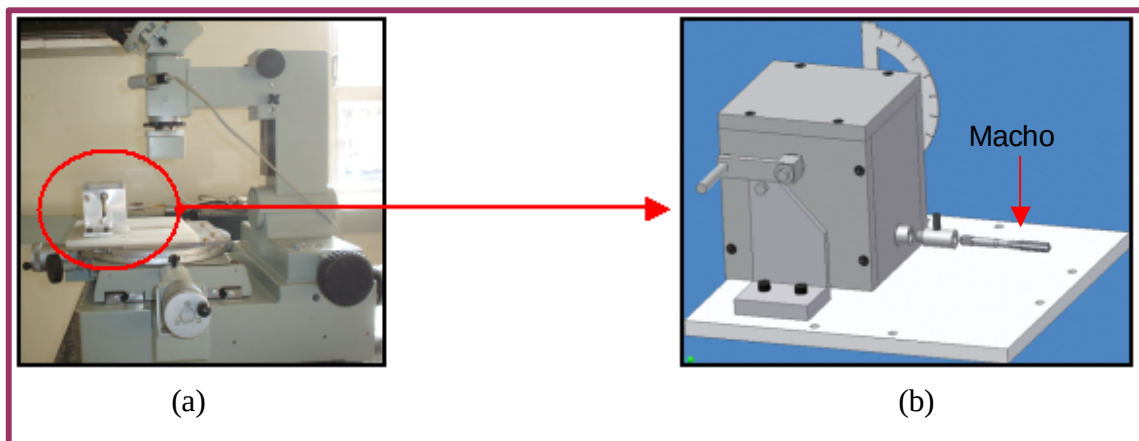


Figura 3.8 (a) Foto da montagem feita para a medição de desgaste no microscópio ferramenteiro; (b) Desenho do dispositivo fabricado

As ferramentas e equipamentos utilizados na avaliação dos níveis de desgaste foram os seguintes:

- ✓ Todos os 20 machos ISO 529 M6x1 6H utilizados nessa pesquisa (Tab. 3.6);
- ✓ Microscópio ferramenteiro (Fig 3.8a);
- ✓ Microscópio eletrônico de Varredura (MEV – Marca LEO 940 A)

Reis (2004) convencionou chamar de carreiras e dentes (D) as partes do macho mostradas na Fig. 2.27. Essas partes, correspondentes aos machos com três canais, são apresentadas na Fig 3.9.

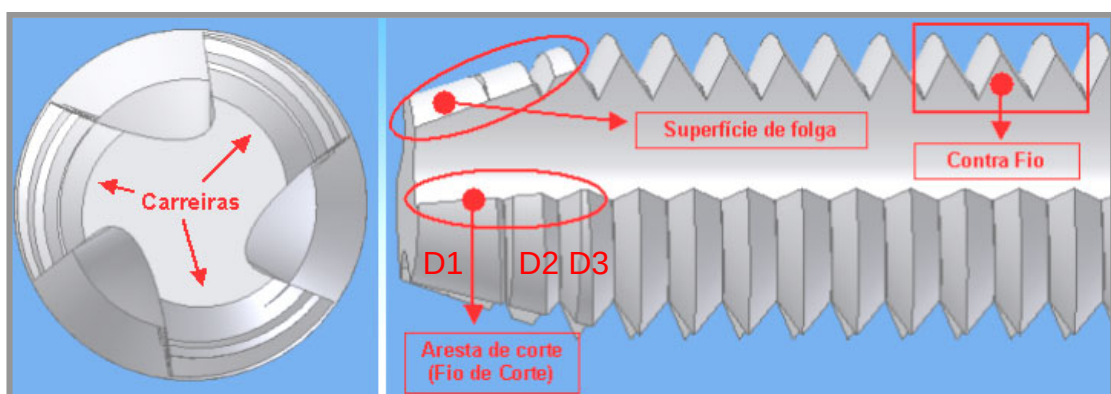


Figura 3.9 – Representação esquemática de um macho de corte e suas respectivas geometrias

Assim, as análises e medições de desgastes feitas neste trabalho se concentraram nos três primeiros dentes (D1, D2, D3) de cada carreira. As medições foram feitas na

superfície de folga e as análises de desgaste em toda extensão da ferramenta, com destaque para as arestas de corte ou fio de corte e no contra fio ou calcanhar (STEMMER, 1992; OSG, 2005).

3.6.1 Análises no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura)

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para a constituição da imagem são os elétrons secundários e os retro-espalhados. À medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retro-espalhados fornecem imagens características de variação de composição. Devido a estes recursos, o MEV se tornou uma arma poderosa para análises dos mecanismos e formas de desgaste desenvolvidas nas ferramentas de corte durante os processos de usinagem. Desta forma, utilizou-se um MEV neste trabalho, com o objetivo de analisar as superfícies das ferramentas testadas e das roscas produzidas, nas diferentes condições de teste, com o intuito de se explicar os fenômenos que ocorrem em escala micrométrica durante a usinagem e que determinam as formas de desgaste nos machos de corte, bem como as características das superfícies das roscas fabricadas.

Além disso, utilizou-se neste trabalho análises de EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) com o objetivo de fazer análises qualitativas do nível de desgaste de ferramentas revestidas com TiN e TiN/TiAlN. Para avaliar o nível de desprendimento dos revestimentos foi feita análise química das ferramentas revestidas com TiN e multicamadas de TiN/TiAlN.

A microanálise por Energia Dispersiva (EDS) é um dos mais importantes instrumentos para a análise química de materiais orgânicos e inorgânicos. Através da identificação dos raios-X emitidos pela amostra, quando da interação com o feixe eletrônico, é possível determinar a composição de regiões com até 1 μm de diâmetro. É uma técnica não destrutiva, podendo determinar quantidades de até 1 a 2% dos elementos presentes na amostra.

3.7 Estudo do Comportamento do Torque

Para compreender melhor o efeito do desgaste dos machos de corte na usinagem, foi feito a medição do torque gerado durante o rosqueamento com todas as ferramentas utilizadas neste trabalho. Iniciou-se com as ferramentas novas e em seguida com as

ferramentas em fim de vida. Os testes ocorreram no NUMA (Núcleo de Manufatura Avançada) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, em uma máquina CNC ROMI, Discovery 560, com características semelhantes às da máquina utilizada nos testes de usinagem com machos de corte, realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A justificativa de se medir o torque em outra Universidade foi o fato dos equipamentos necessários não estarem disponíveis no momento, o que poderia acarretar prejuízos para o andamento dos testes.

Com cada macho foram abertas roscas em três furos consecutivos, e durante esse tempo foram adquiridos os sinais de torque a uma taxa de 1000 pontos por segundo. Dessa forma, a cada três furos, trocava-se a ferramenta e repetia-se o ensaio. Todas as roscas realizadas nestes testes foram checadas periodicamente com um calibre passa-não-passa para rosca M6x1,0 6H (Ferriplax 19264), com o objetivo de verificar se as mesmas obedeciam às tolerâncias especificadas. A metodologia de execução dos testes foi a mesma empregada nos ensaios realizados no LEPU/FEMEC/UFU. Para as ferramentas que foram utilizadas com MQL, o critério também foi igual, observando a quantidade de óleo e ar comprimido, além da posição dos bicos de aspersão do fluido. Utilizou-se óleo pulverizado com ar comprimido, com uma vazão de 30 ml/hora.

3.7.1 Equipamentos utilizados para medir o torque

Para medição do sinal de torque foi utilizado um dinamômetro *Kistler* 9272 Fig (3.10 (a)), cujos dados técnicos são apresentados na Tab. 3.10. A Fig 3.10 (b) mostra a montagem do equipamento e do corpo de teste utilizado.

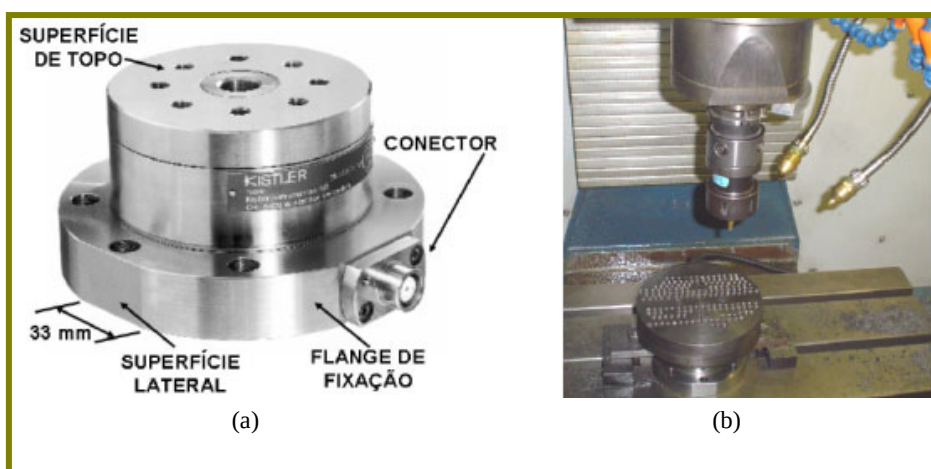


Figura 3.10 – (a) Dinamômetro *Kistler* 9272; (b) montagem do corpo de prova na máquina

As placas de ferro fundido foram torneadas na forma de disco, com um diâmetro de 170 mm possuindo uma espessura de 42 mm, para acompanhar o formato do dinamômetro utilizado. O material foi furado e fixado ao dinamômetro por quatro parafusos com cabeça *Allen*, conforme permitia o dinamômetro. O equipamento foi ajustado na mesa por chapas e parafusos e o programa adaptado para cada condição de teste. A programação foi a mesma utilizada na Discovery 760, alterando somente a quantidade de testes e o intervalo de rosqueamento.

Tabela 3.10 – Dados técnicos do dinamômetro *Kistler* 9272

Dados Técnicos		Valor
Faixa 1	Fx, Fy	-5... 5KN
	Fz	-5... 20 Nm
	Mz	-200...200 Nm
Limite	Fx, Fy	< 0.02 N
	Fz	< 0.02 N
	Mz	< 0.02 Ncm
Frequência Natural		4 KHz
Proteção		IP67
Peso		4.2 Kg

Também utilizou-se um amplificador de carga multicanal modelo 5019 da *Kistler*, conforme a Fig. 3.11.

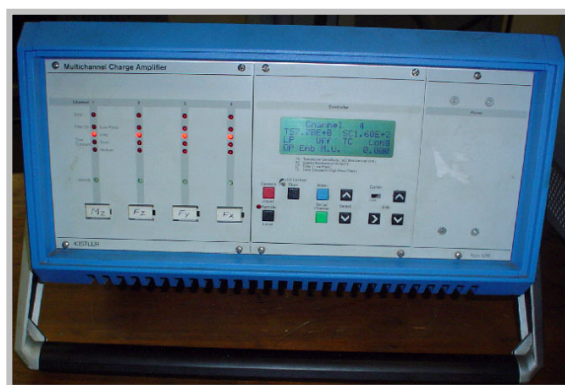


Figura 3.11 – Amplificador de carga multicanal *Kistler* modelo 5019

Esse amplificador permite a ajustagem de alguns parâmetros individualmente para cada um dos quatro canais disponíveis para trabalhar com o dinamômetro 9272 tais como filtro passa baixa, constante de tempo, sensibilidade do sensor em pC por unidade mecânica

e escala em unidades mecânicas por Volts. Trabalha com uma faixa de tensão para os sinais de -10 a 10 Volts (BEZERRA, 2003).

O filtro passa baixa pode ser de 10, 30, 100, 200, 1000, 3000, 10000 ou 30000 Hz. A faixa de trabalho da sensibilidade do sensor é de 1×10^{-2} a $9,99 \times 10^3$ pC por unidade mecânica. No caso da escala, a faixa de trabalho é de 1×10^{-3} a $9,99 \times 10^6$ unidade mecânica por Volts. A constante de tempo pode ser ajustada para curto, média ou longa. Além disso, esse amplificador possui duas opções para entrada de sinais: através de 4 soquetes BNC; ou por meio de um conector de oito vias que pode ser conectado com o cabo de oito vias 1677A5, também fabricado pela *Kistler*. Os sinais de saída podem ser enviados através de conexão IEEE bus, RS-232C com um conector de 25 pinos, controle remoto de função *reset-operate* com conector de 25 pinos, conector de 15 pinos para quatro canais de medição ou soquetes BNC para 4 canais de medição, Fig 3.12. Para coletar os sinais provenientes do módulo de entrada e saída de sinais modelo BNC-12, utilizou-se uma placa de aquisição A/D modelo PCIMIO-16E-4, da *National Instruments*. A placa mencionada foi instalada em um computador PC (processador AMD K6 II 350 MHz, 128 MB de memória RAM e 4.3 GB de disco rígido).

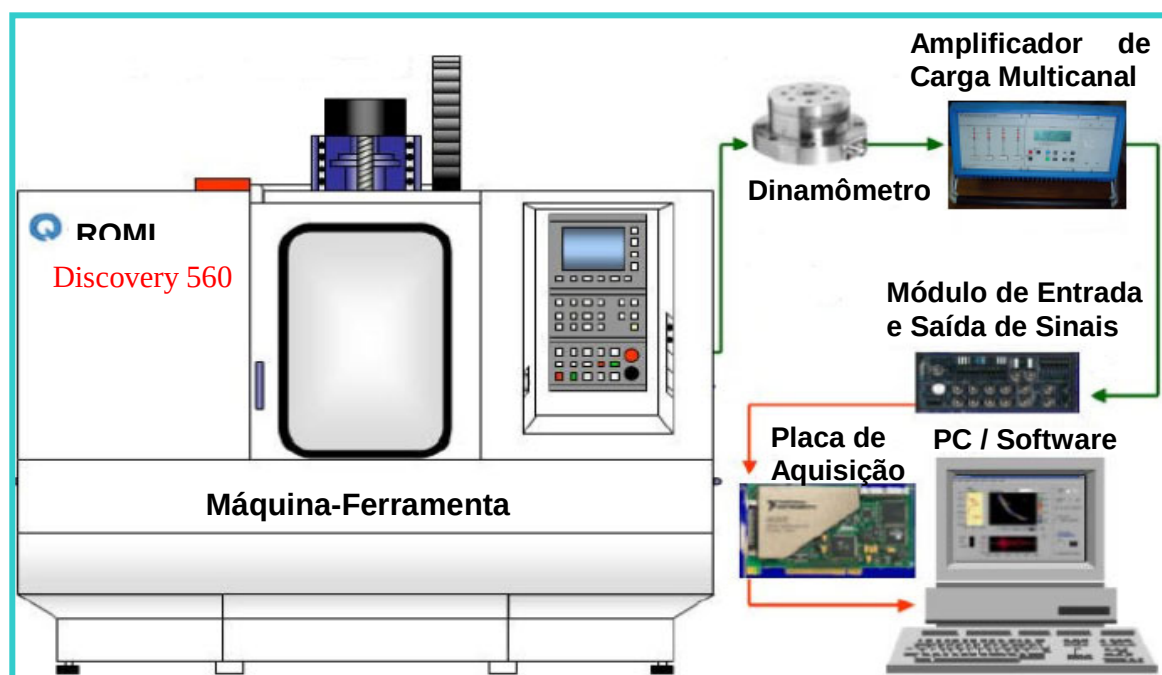


Figura 3.12 – Sistema de aquisição do sinal de torque (BEZERRA, 2003), Modificada

3.8 Sistema de lubrificação utilizado nos teste

Na usinagem de ferro fundido cinzento normalmente não é utilizado fluido de corte ou refrigerante de corte, pois os cavacos produzidos são em forma de lascas ou pedaços (ruptura). Entretanto, sabe-se que quando o usuário optar por utilizar algum tipo de fluido de corte, com o objetivo de aumentar a produtividade e/ou reduzir custos, os benefícios virão desde que utilizados corretamente. O fluido de corte deve ser aplicado usando um método que permita que ele chegue o mais próximo possível da aresta de corte, dentro da interface cavaco–ferramenta, para que ele possa exercer suas funções apropriadamente (MACHADO; DA SILVA, 2004).

A princípio estudava-se a possibilidade de rosquear todos os furos com as condições a seco e com MQL. Entretanto, após alguns testes, principalmente depois de observar alguns resultados considerados muito bons com algumas ferramentas de corte (macho) revestidos com TiN/TiAlN, optou-se por utilizar MQL somente em algumas ferramentas, sem revestimentos ou tratados superficialmente por nitretação, ou naqueles machos que apresentassem baixo índice de produtividade. A Fig 3.13 mostra o aparato montado na máquina CNC.

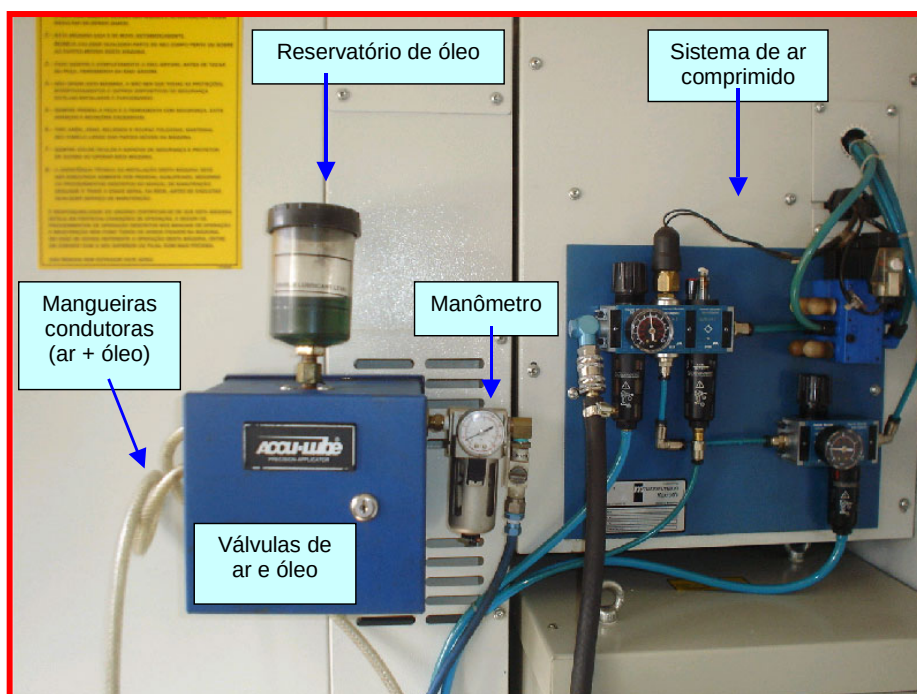


Figura 3.13 – Equipamento de mínima quantidade de lubrificante (MQL)

O aparelho pulverizador do fluido, fabricado pela *ITW Fluid Products Group* (*Accu-Lube®/LB-2000*), Modelo O2AO-STD, trabalhou com um fluxo contínuo de ar comprimido,

ajustado em torno de 4,3 bar, e “*spray*” intermitente de fluido na frequência de 1 pulso por segundo e utilizou-se um fluido biodegradável, atóxico e insolúvel em água, com composição química de óleos vegetais (soja, milho e canola) e aditivos anticorrosivos. A Tab. 3.11 mostra algumas características típicas deste óleo. O fluido de corte foi conduzido através de uma mangueira de menor diâmetro que chega ao bico, dentro de uma outra maior que conduz o ar comprimido. A mistura ar comprimido-fluido era injetada externamente sobre a ferramenta-peça por meio de 2 bicos, com uma vazão de 30 ml/hora de óleo lubrificante.

Tabela 3.11 - Características típicas do óleo vegetal *Accu-Lube®/LB-2000*

Propriedade	Valor
Densidade, g/ml (20/-3 °C)	0,900 – 0,940
Ponto de Ebulição	>100°C
Ponto de Fulgor	>300°C

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de rosqueamento expostos anteriormente. São abordados os seguintes itens: Análise estatística da vida das ferramentas de corte; Influência do tipo de fixação; Desgaste de flanco apresentado nos machos de corte; Mecanismos de desgaste; Qualidade das roscas fabricadas e finalmente o torque no rosqueamento.

4.1 Análise estatística da vida das ferramentas de corte

4.1.1 - Resultados da primeira etapa

Neste item serão discutidos os resultados numa visão estatística, sem, no entanto, se preocupar com os fenômenos de usinagem responsáveis pelos efeitos. Na primeira etapa foram utilizadas como variáveis independentes (fatores) a velocidade de corte, o substrato da ferramenta e o tipo de revestimento e a variável dependente (resposta) foi o número de roscas produzidas. A Fig. 4.1 mostra, graficamente, os resultados da vida dos machos de aço-rápido (PM) e super-rápido (HSS-E), revestidos com nitreto de titânio (TiN) e multicamadas de TiN/TiAlN (denominada comercialmente por Futura), usinando com cabeçote fixo e com velocidades de corte moderada (37,5 m/min) e alta (75 m/min).

É importante ressaltar que, devido a dificuldades de realização de cada teste (feitos em laboratório e não na indústria), não houve repetições para todas as ferramentas de corte, o que seria recomendado para dar maior confiabilidade aos resultados. A partir dos resultados mostrados na Fig. 4.1 observa-se que a única condição de corte em que se conseguiu atingir o limite de 1000 roscas fabricadas foi quando se utilizou uma ferramenta de HSS-PM revestida com TiN/TiAlN e com velocidade de corte em 37,5 m/min. Nas demais

condições, os testes foram encerrados antes de se chegar a 1000 roscas, pois a qualidade geométrica das mesmas foi reprovada pela análise com o calibre passa-não-passa, exceto a ferramenta HSS-E revestida com TiN/TiAlN e utilizada com 75 m/min, que falhou catastróficamente.

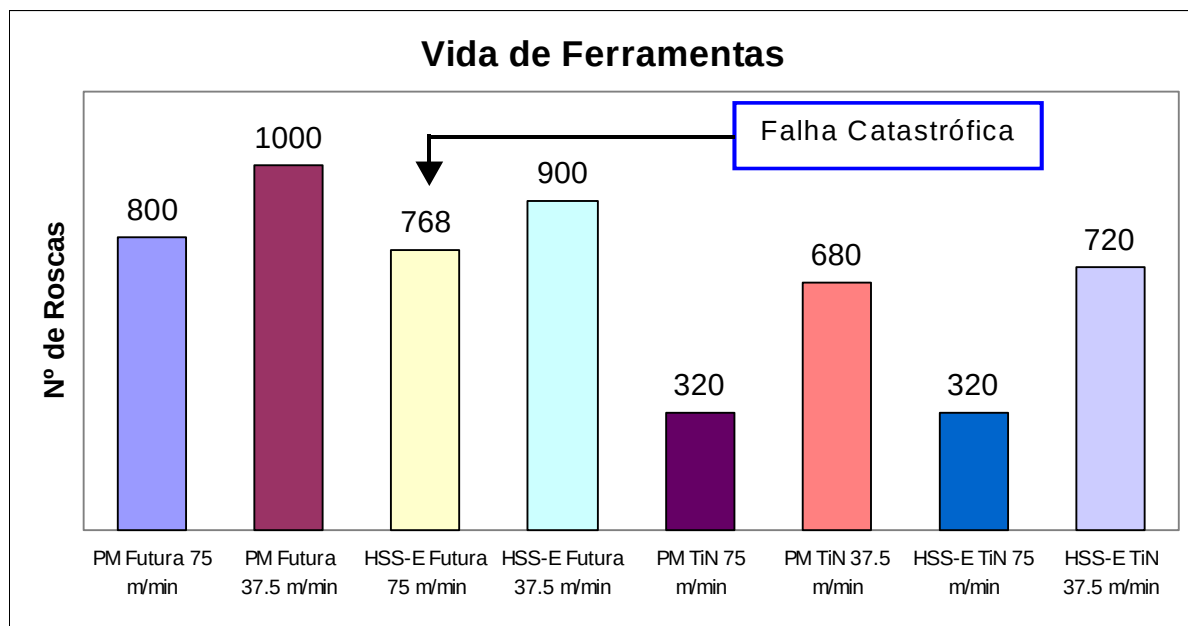


Fig. 4.1 – Vida das ferramentas em função do número de roscas fabricadas para as diferentes condições de substrato, revestimento e velocidade de corte utilizadas na primeira etapa deste trabalho

Para proceder à análise estatística dos dados da primeira etapa foi utilizado o quadro de ANOVA (análise de variância) com intervalo de confiança de 95 % e nível de significância de 5 %. A Tab. 4.1 mostra o resultado da análise de variância dos dados.

Tabela 4.1: Resultado da análise variância completa

	Coeficiente	Desvio Padrão	T(1)	Nível de Probabilidade (p)	-95, %	+95, %
Média/Interação	688,5	13,5	51,0000	0,012481	516,966	860,033
(1) Vc	-136,5	13,5	-10,1111	0,062758	-308,034	35,033
(2) Sub	11,5	13,5	0,8119	0,550821	-160,034	183,033
(3) Rev	178,5	13,5	13,2222	0,048056	6,966	350,033
1 by 2	-3,5	13,5	-0,2593	0,838506	-175,034	168,033
1 by 3	53,5	13,5	3,9630	0,157357	-118,034	225,033
2 by 3	21,5	13,5	1,5926	0,356944	-150,034	193,033

Pelo nível de probabilidade p é possível verificar quais são os fatores significativos na determinação do número de roscas usinadas. Um fator é considerado significativo se a probabilidade p for menor ou igual ao nível de significância (neste caso considerado de 0,05). De acordo com a Tab. 4.1, somente o revestimento (Rev) foi uma variável significativa, ou seja, teve influência relevante na resposta (número de roscas usinadas). Entretanto, a velocidade de corte (V_c) poderia ter sido considerada, também, como significativa, já que a probabilidade p foi de apenas 0,06, o que é bem próximo de 0,05. A Tab. 4.1 apresenta os coeficientes de um modelo para representar a vida da ferramenta (N° de Roscas) em função de todos os fatores, inclusive os não significativos. Este modelo é representado pela seguinte equação:

$$\text{Vida} = 688,5 - 136,5 \cdot V_c + 11,5 \cdot \text{Sub} + 178,5 \cdot \text{Rev} - 3,5 \cdot V_c \cdot \text{Sub} + 53,5 \cdot V_c \cdot \text{Rev} + 21,5 \cdot \text{Sub} \cdot \text{Rev} \quad (4.1)$$

Como alguns fatores (variáveis) não foram significativos é possível simplificar este modelo. Isto pode ser feito ignorando os efeitos que não foram significativos (onde p é maior que 0,05) de um a um, a começar pelo de menor significância (interação entre V_c e Sub). Após ignorar cada efeito não significativo, a análise de variância foi refeita até que se chegou aos coeficientes de um modelo reduzido contendo apenas as variáveis realmente significativas (Tab. 4.2). É importante observar que o fato de ignorar alguns efeitos pode tornar outros efeitos, outrora não significativos, relevantes.

Tabela 4.2: Resultado da análise variância reduzida

	Coeficiente	Desvio Padrão	T(1)	Nível de Probabilidade (p)	-95, %	+95, %
Média/Interação	688,500	14,04457	49,02250	0,000001	649,506	727,494
(1) V_c	-136,500	14,04457	-9,71906	0,000627	-175,494	-97,506
(3) Rev	178,500	14,04457	12,70954	0,000221	139,506	217,494
1 by 3	53,500	14,04457	3,80930	0,018952	14,506	92,494

É possível representar a vida da ferramenta (N° de Roscas) em função dos fatores significativos pela seguinte equação:

$$\text{Vida} = 688,5 - 136,5 \cdot V_c + 178,5 \cdot \text{Rev} + 53,5 \cdot V_c \cdot \text{Rev} \quad (4.2)$$

Apesar de reduzido, o modelo ainda apresenta coeficiente de correlação de 0,98, mostrando que o modelo representa bem o comportamento do processo. É importante

ressaltar que apesar da variável Rev (revestimento) ser do tipo *ON/OFF* (qualitativa e não quantitativa) e, por isso, não ser adequada para a composição do modelo, decidiu-se incluí-la no modelo apenas para facilitar a análise de sua influência na resposta.

Pelo modelo reduzido (ignorando os efeitos não significativos), observou-se que a velocidade de corte (V_c), o revestimento (Rev) e a interação entre estas duas variáveis têm influência significativa sobre a resposta (número de roscas fabricadas). Observa-se pela equação que o aumento da velocidade de corte tende a reduzir a vida das ferramentas (o coeficiente de V_c é negativo). Esta tendência de diminuição da vida com o aumento da velocidade de corte já era esperado e está relacionada com o aumento da temperatura, como será discutido posteriormente. Pela equação nota-se, também, que o uso do revestimento multicamadas de TiN/TiAlN teve um desempenho bem superior ao das ferramentas revestidas com TiN (o coeficiente de revestimento é positivo). Esse resultado pode estar relacionado com o efeito da temperatura na interface cavaco-ferramenta, o qual será abordado também neste trabalho. O que surpreendeu, analisando a equação do modelo para a previsão de vida da ferramenta, foi a ausência do termo relacionado ao substrato (não foi uma variável significativa). Era de se esperar um aumento de vida das ferramentas quando o substrato obtido através da metalurgia do pó (HSS- PM) fosse utilizado. A razão pela qual o substrato não foi influente na resposta pode ser o fato de se ter trabalhado com velocidades de corte elevadas (nível de *HSM - High Speed Machining* para o rosqueamento interno). As velocidades exigiram dos revestimentos maiores aderências em relação ao substrato. Uma vez desprendido o revestimento, as ferramentas se desgastaram rapidamente, independentemente do substrato. É fácil observar a predominância do efeito do revestimento sobre o substrato observando a equação do modelo completo (Eq. 1). Nota-se que o coeficiente do revestimento é cerca de 15 vezes maior do que o coeficiente do substrato ($Vida = \dots + 11,5 \cdot Sub + 178,5 \cdot Rev \dots$).

Pelo modelo reduzido definido estatisticamente, a condição que deu a maior vida foi quando se ajustou a velocidade de corte no nível “-1” (37,5 m/min) e se utilizou o revestimento “1” (multicamadas de TiN/TiAlN). Para estes níveis de variáveis o modelo previu uma vida de 950 roscas, o que é bem próximo dos valores observados experimentalmente. Os machos PM e HSS-E revestidos com TiN/TiAlN, quando rosquearam com velocidade de corte moderada (37,5 m/min), fizeram 1000 e 900 roscas, respectivamente, de acordo com a figura 4.1.

Pela Fig. 4.2 pode se observar a adequabilidade do modelo, já que os valores preditos se aproximam bastante dos valores observados. As Figs. 4.3, 4.4 e 4.5 ilustram melhor a influência das variáveis sobre a resposta. É possível observar a variação significativa na vida da ferramenta (número de roscas usinadas) em função de mudanças nos níveis de

velocidade de corte (Fig. 4.3) e de revestimento (Fig. 4.5). Já o substrato (Fig. 4.4) não acarretou mudanças significativas na vida da ferramenta (a variação foi menor que o desvio padrão).

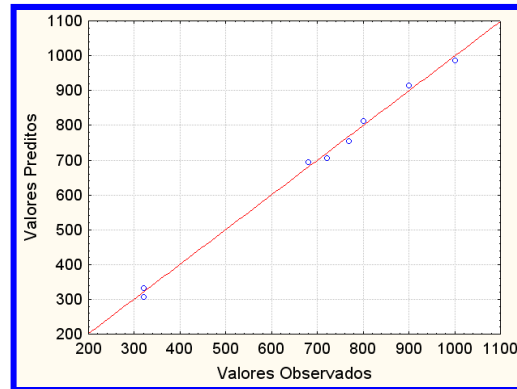


Figura 4.2: Valores preditos X valores observados

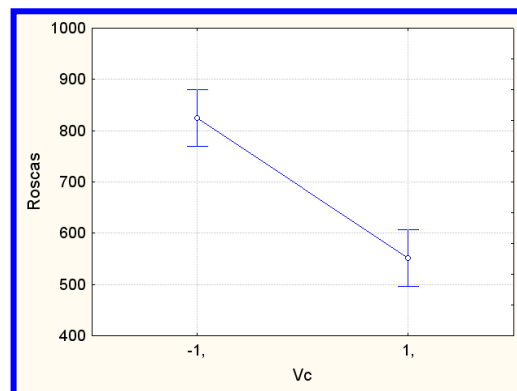


Figura 4.3: Influência da velocidade de corte: 37,5 m/min (-1) e 75 m/min (1)

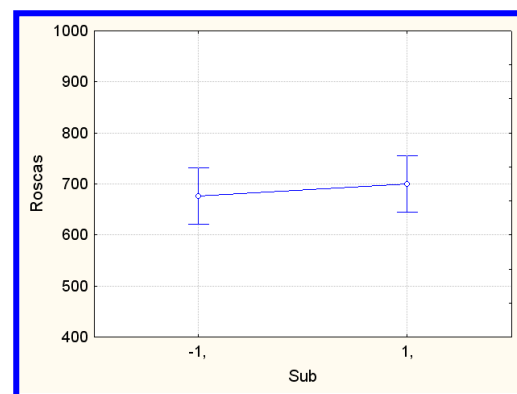


Figura 4.4: Influência do substrato: HSS-E (-1) e HSS-PM (1)

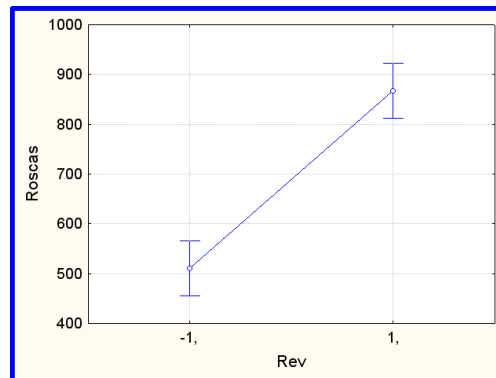


Figura 4.5: Influência do revestimento: TiN (-1) e multicamadas de TiN/TiAlN (1)

4.1.2. - Resultados da segunda etapa

Na segunda etapa foram utilizadas como variáveis independentes (fatores) os tipos de fixação, os substratos das ferramentas e os tipos de revestimentos e a variável dependente (resposta) foi o número de roscas produzidas. A Fig. 4.6 mostra, graficamente, os resultados da vida dos machos de aço rápido (PM) e super-rápido (HSS-E), revestidos com nitreto de titânio (TiN) e multicamadas de TiN/TiAlN, usinando com cabeçote fixo e auto-reversível com velocidades de corte moderada (37,5 m/min).

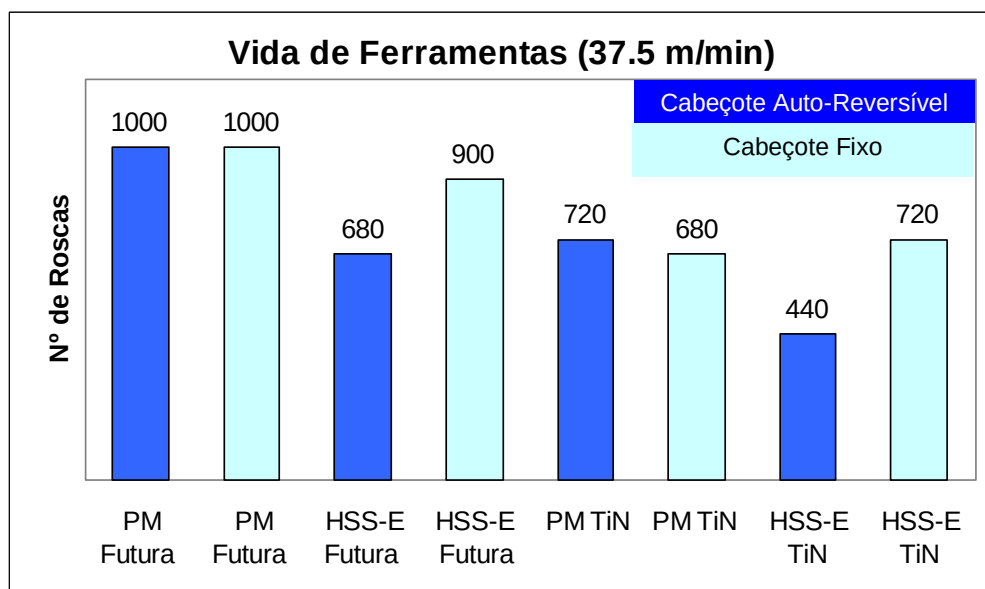


Fig. 4.6 – Vida das ferramentas em função do número de roscas fabricadas, para as diferentes condições de substrato, revestimento e cabeçote, utilizadas na segunda etapa deste trabalho

É importante ressaltar que, mais uma vez, devido a dificuldades de realização de cada teste, não houve repetições para todas as ferramentas de corte, o que seria recomendado para dar maior confiabilidade aos resultados. A partir dos resultados mostrados na Fig. 4.6 observa-se que a única condição de corte em que se conseguiu atingir o limite de 1000 roscas fabricadas, foi quando utilizou-se machos de HSS-PM revestidos com TiN/TiAlN, independente do tipo de cabeçote usado. Nas demais condições, os testes foram encerrados antes de se chegar a 1000 roscas, pois a qualidade geométrica das mesmas foi reprovada pela análise com o calibre passa-não-passa. Para proceder à análise estatística dos dados desta etapa foi utilizado o quadro de ANOVA (análise de variância) com intervalo de confiança de 95 % e nível de significância de 5 %. A Tab. 4.3 mostra o resultado da análise de variância dos dados.

Tabela 4.3: Resultado da análise de variância completa

	Coeficiente	Desvio Padrão	T(1)	Nível de Probabilidade (p)	-95,%	+95,%
Média/Interação	767,5	12,5	61,4	0,010367	608,672	926,327
(1)Cab	-57,5	12,5	-4,6	0,136275	-216,328	101,327
(2)Sub	82,5	12,5	6,6	0,095729	-76,328	241,327
(3)Rev	127,5	12,5	10,2	0,062215	-31,328	286,327
1 by 2	67,5	12,5	5,4	0,116572	-91,328	226,327
1 by 3	2,5	12,5	0,2	0,874334	-156,328	161,327
2 by 3	22,5	12,5	1,8	0,322829	-136,328	181,327

De acordo com a Tab. 4.3, nenhuma variável foi significativa. Entretanto, a variável revestimento (Rev) poderia ter sido considerada como significativa, já que a probabilidade **p** foi de apenas 0,06, o que é bem próximo de 0,05. A Tab. 4.3 apresenta os coeficientes de um modelo para representar a vida da ferramenta (Nº de Roscas) em função de todos os fatores. Este modelo é representado pela seguinte equação:

$$\text{Vida} = 767,5 - 57,5 \cdot \text{Cab} + 82,5 \cdot \text{Sub} + 127,5 \cdot \text{Rev} + 67,5 \cdot \text{Cab} \cdot \text{Sub} + 2,5 \cdot \text{Cab} \cdot \text{Rev} + 22,5 \cdot \text{Sub} \cdot \text{Rev} \quad (4.3)$$

Este modelo pode ser simplificado. Assim, ignorou-se o efeito de um a um, a começar pelo de menor significância (interação entre Cab e Rev). Após desprezar cada efeito não significativo, a análise de variância foi refeita até que se chegou aos coeficientes de um modelo reduzido contendo apenas variáveis realmente significativas (Tab. 4.4).

Tabela 4.4: Resultado da análise variância reduzida

	Coeficiente	Desvio Padrão	T(2)	Nível de Probabilidade (p)	-95, %	+95, %
Média/Interação	767,5	14,93039	51,40521	0,000016	719,985	815,015
(1)Cab	-57,5	14,93039	-3,85120	0,030915	-105,015	-9,984
(2)Sub	82,5	14,93039	5,52564	0,011677	34,985	130,015
(3)Rev	127,5	14,93039	8,53963	0,003374	79,985	175,015
1 by 2	67,5	14,93039	4,52098	0,020236	19,985	115,015

O modelo reduzido da vida da ferramenta (Nº de Roscas) em função dos fatores significativos é dado pela seguinte equação:

$$\text{Vida} = 767,5 - 57,5 \cdot \text{Cab} + 82,5 \cdot \text{Sub} + 127,5 \cdot \text{Rev} + 67,5 \cdot \text{Cab} \cdot \text{Sub} \quad (4.4)$$

Apesar de reduzido, o modelo ainda apresenta coeficiente de correlação de 0,97, mostrando que representa bem o processo. Como descrito anteriormente, na primeira etapa, apesar de estar lidando com variáveis do tipo *ON/OFF* (qualitativas e não quantitativas) e, por isso, não adequadas para a composição de um modelo, decidiu-se construir o modelo apenas para facilitar a análise.

Pelo modelo reduzido, observou-se que o tipo de cabeçote (Cab), o substrato (Sub), o revestimento (Rev) e a interação entre o tipo de cabeçote e revestimento tiveram influência significativa sobre a resposta (número de roscas fabricadas). Observa-se pela equação que a troca do cabeçote fixo pelo auto-reversível tende a reduzir a vida das ferramentas (o coeficiente do cabeçote é negativo). Esse fenômeno está relacionado com a velocidade de corte (constante para o cabeçote auto-reversível) e será abordado posteriormente. Pela equação nota-se, também, que o uso do substrato de HSS-PM proporcionou melhor desempenho, ou seja, maior vida (o coeficiente de substrato é positivo). É importante ressaltar que na primeira etapa esta variável não se mostrou significativa. Pelo modelo vê-se, também que o revestimento com multicamadas de TiN/TiAlN teve um desempenho bem superior ao das ferramentas revestidas somente com TiN (o coeficiente de revestimento é positivo). Esses resultados podem estar relacionados com a tenacidade dos substratos e com o efeito da temperatura na interface cavaco-ferramenta, assuntos que serão abordados nas próximas seções deste trabalho. Pelos coeficientes do modelo, nota-se a predominância do efeito do revestimento sobre as outras variáveis. O coeficiente do revestimento é cerca de 1,5 vez maior do que o coeficiente do substrato e 2,2 maior que o coeficiente do cabeçote.

Pelo modelo reduzido definido estatisticamente, as condições que possibilitaram maior vida foi quando se usou o revestimento “1” (multicamadas de TiN/TiAlN) e HSS-PM como substrato. Para estes níveis de variáveis o modelo prevê para o cabeçote fixo, 967,5 roscas e para o cabeçote auto-reversível, 987,5 roscas, valores bem próximos dos observados experimentalmente, conforme a Fig. 4.6.

Esses valores contradizem o que foi observado na Fig. 4.6, pois o cabeçote auto-reversível fez menos roscas que o fixo. Por conseguinte, quando o substrato foi trocado pelo HSS-E, o modelo prevê 802,5 roscas para o cabeçote fixo, contra 687,5 roscas para o cabeçote auto-reversível. Portanto, o cabeçote fixo foi mais eficiente em termos de quantidade de roscas usinadas.

Pela Fig. 4.7 pode se observar a adequabilidade do modelo, já que os valores preditos se aproximam bastante dos valores observados. As Figs. 4.8, 4.9 e 4.10 ilustram melhor a influência das variáveis sobre a resposta.

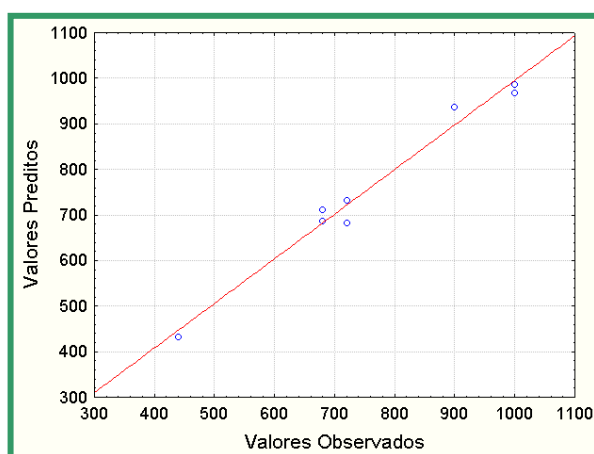


Figura 4.7: Valores preditos X valores observados

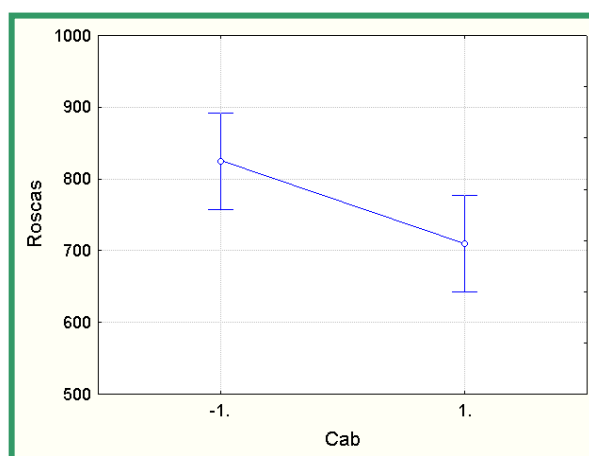


Figura 4.8: Influência do tipo de cabeçote: fixo (-1) e auto-reversível (1)

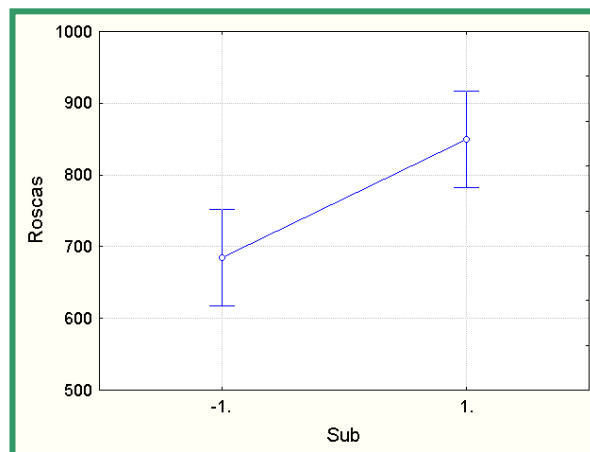


Figura 4.9: Influência do substrato: HSS-E (-1) e HSS-PM (1)

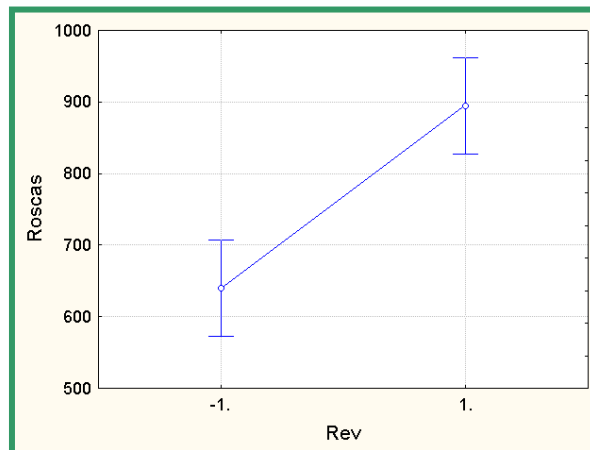


Figura 4.10: Influência do revestimento: TiN (-1) e multicamadas de TiN/TiAlN (1)

É possível observar a variação significativa na vida da ferramenta (número de roscas usinadas) em função do tipo de cabeçote (Fig. 4.8), do tipo de substrato (Fig. 4.9) e do revestimento (Fig. 4.10).

4.1.3. - Resultados dos testes complementares

O gráfico da Fig. 4.11 complementa a investigação sobre o rosqueamento em alta velocidade, com diversas situações de corte, variando o substrato dos machos, o tipo de refrigeração/lubrificação, a forma de fixação das ferramentas e revestimento. Escolheu-se a ferramenta que apresentou os piores resultados nos testes anteriores e comparou com ferramenta sem revestimento e nitretada em alta velocidade de corte (75 m/min). Somente em duas situações foi utilizada velocidade de corte considerada baixa (10 m/min) para as condições testadas neste trabalho (cabeçote auto-reversível e fixo), não apresentadas nesta

figura, sendo dois machos de HSS revestidos com TiN. Nessa situação de corte as ferramentas produziram 1800 roscas, com a calibração em bom estado, mas apresentando níveis de desgaste acentuados.

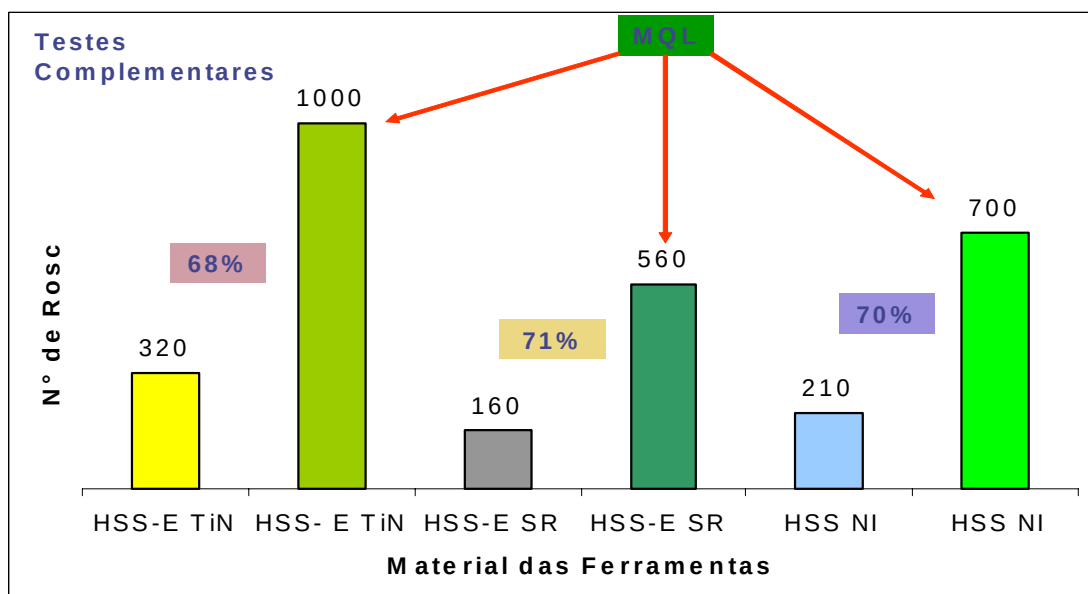


Figura 4.11 - Resultados obtidos para o rosqueamento com o cabeçote fixo, com e sem MQL, utilizando machos de corte em diversas condições de corte

Em três situações de corte foi empregado o uso de mínima quantidade de lubrificante (MQL), buscando relacionar o desempenho dessas ferramentas quando comparados com a usinagem a seco. Em alta velocidade pode-se observar que a única condição de corte em que se conseguiu atingir o limite de 1000 roscas fabricadas, foi quando se utilizou uma ferramenta de HSS-E revestida com TiN com aplicação de MQL. Nas demais condições os testes foram encerrados antes de se chegar a 1000 roscas, pois a qualidade geométrica das roscas fabricadas foi reprovada pela análise com o calibre passa-não-passa.

A Fig. 4.11 mostra também que a ferramenta revestida com nitreto de titânio (TiN) usada sem refrigeração / lubrificação, fabricou 68% de roscas a menos que a ferramenta que utilizou MQL (mesma condição de corte), e que o macho não revestido usado a seco produziu 71% de roscas a menos que outro semelhante, porém utilizando MQL. Este resultado evidencia a eficiência da técnica MQL em lubrificar e refrigerar o corte, além de proteger as superfícies da ferramenta contra os mecanismos de desgastes atuantes. Outro ponto que se observa na Fig. 4.11, é que quando se revestiu a ferramenta com TiN sua vida aumentou de 160 roscas (número de roscas fabricadas com a ferramenta sem revestimento)

para 320 roscas, enquanto o emprego de MQL em uma ferramenta não revestida implicou em um aumento na vida para 560 roscas, ou seja, o efeito da técnica de MQL na vida da ferramenta foi maior que o efeito causado pelo emprego do revestimento de nitreto de titânio.

Outra análise que pode ser abordada é com relação às ferramentas que sofreram tratamentos termoquímicos de nitretação. Verifica-se através da Fig. 4.11 que o macho nitretado que rosqueou a seco produziu 31% a mais que o macho não nitretado. A outra ferramenta nitretada que foi lubrificada por MQL produziu 25% a mais que o macho não nitretado, na mesma condição de corte. Isso comprova a eficiência da superfície das ferramentas que sofreram algum tipo de tratamento especial, como nitretação ou cobertura como nitreto de titânio (TiN). Da mesma forma, o uso de MQL favoreceu a vida do macho nitretado, aumentando em 70% o seu desempenho em relação ao corte a seco.

Após a análise dos itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 foi observado que o aumento da velocidade de corte reduziu a vida das ferramentas (nº de roscas usinadas), que o revestimento com multicamadas de TiN/TiAlN teve desempenho bem superior ao das ferramentas revestidas somente com TiN e que o tipo de substrato não acarretou mudanças significativas na vida das ferramentas revestidas que usinaram com 75 m/min, mas foi relevante para as velocidades de corte moderadas (37,5 m/min). Já o tipo de cabeçote teve influência no número de roscas fabricadas, pois o cabeçote fixo conseguiu fabricar aproximadamente 16% de roscas a mais do que o cabeçote auto-reversível ($V_c = 37,5$ m/min). Ficou evidente também que o uso de MQL no rosqueamento de ferro fundido cinzento aumentou significativamente a vida das ferramentas.

4.2 Influência do Tipo de Fixação

Conforme visto anteriormente (Fig. 4.6) o cabeçote fixo produziu em média 16% a mais do que o cabeçote auto-reversível, em termos de quantidade de roscas usinadas. Atribui-se o melhor desempenho do cabeçote fixo a três motivos: 1) melhor sincronismo de velocidade e avanço de corte no ciclo utilizado (ciclo 84 do Comando Siemens - CNC); 2) o ciclo com cabeçote auto-reversível permite que a ferramenta gire livremente após o fim de curso previsto pelo programa CNC, fazendo com que a ferramenta flutue livremente na direção do eixo Z, parando por inércia rotacional. Essa flutuação da ferramenta pode ser responsável por alguns mecanismos de desgaste discutidos nas próximas seções; 3) as velocidades de corte utilizadas para o cabeçote auto-reversíveis são consideradas como constantes

enquanto que para o cabeçote fixo a velocidade de corte não é constante durante todo o ciclo de usinagem.

O tempo de usinagem é um dos principais elementos que compõe os custos de fabricação. Neste sentido, faz-se necessário buscar os melhores recursos disponíveis para melhorar a produtividade. Buscou-se neste trabalho investigar as principais vantagens da utilização dos cabeçotes fixo e auto-reversível no rosqueamento interno com macho de corte. O custo inicial do cabeçote auto-reversível é superior ao do cabeçote fixo. Entretanto, constatou-se que o tempo real de usinagem (tempo de usinagem cronometrado para uma média de 20 roscas) é significativamente menor para o cabeçote auto-reversível, proporcionalmente à velocidade de corte. A Fig. 4.12 comprova a eficiência dos dois cabeçotes, sendo utilizado três velocidades de corte distintas.

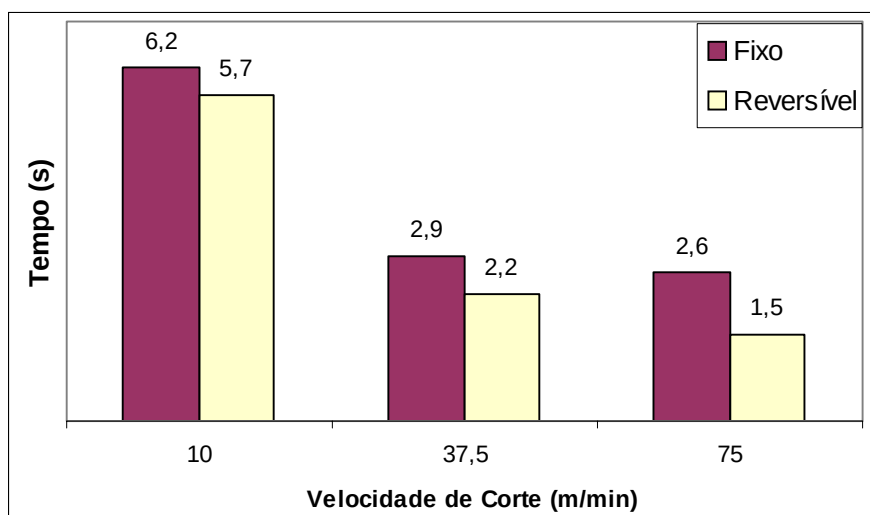


Figura 4.12 – Comparação do tempo de usinagem de um furo empregando os cabeçotes fixo e auto-reversível em três faixas de velocidade (10, 37,5 e 75 m/min)

Com 10 m/min a diferença de tempo foi pequena, inferior a 10%. Contudo, aumentando a velocidade de corte para 37,5 m/min, a diferença foi de 32% a favor do cabeçote auto-reversível. Conforme foi descrito no capítulo III, não foi possível usar com 75 m/min com o cabeçote auto-reversível, devido a limitações técnicas do modelo existente no LEPU. Todavia, foi feita simulação de usinagem sem o cabeçote estar montado no eixo-árvore e constatou-se que a diferença seria de 73% entre os dois cabeçotes. Portanto, em termos de tempo de usinagem, em todas as velocidades de corte testadas, o cabeçote fixo foi o que exigiu maiores tempos de usinagem (tempo ativo e passivo). A justificativa para essa diferença está relacionada ao tempo gasto pelo ciclo de usinagem utilizado para o cabeçote fixo, o qual necessita de acelerar os movimentos de avanço e rotação, para o

estágio de corte e para o retorno da ferramenta. Além disso, quanto maior for a velocidade de corte, maior será o espaço necessário para a aceleração e desaceleração, aumentando o tempo total de usinagem.

Além do mais, cabe ressaltar que o cabeçote fixo deve exigir da máquina ferramenta um sincronismo perfeito entre o avanço de corte e a velocidade de rosqueamento. O consumo de energia também é superior para o cabeçote fixo, devido ao ciclo de usinagem exigir acelerações e desacelerações em cada etapa do rosqueamento além da reversão constante do sentido de rotação, o que não acontece para o cabeçote auto-reversível. Já o ciclo de rosqueamento para o cabeçote auto-reversível funciona como um ciclo de furação, pouco exigindo da máquina-ferramenta (LINSS, 2002).

4.3 Desgaste de flanco apresentado nos machos de corte

4.3.1 Ferramentas sem revestimento e revestidas com TiN

A Fig. 4.13 mostra uma ferramenta revestida com TiN após usar 320 roscas, evidenciando o desgaste nas superfícies de saída e de folga de cada dente do macho, principalmente na parte cônica e nos primeiros filetes da parte cilíndrica do macho. O desgaste atingiu toda extensão da superfície de folga da parte cilíndrica, até o quarto dente do macho (aproximadamente 2,6 milímetros).

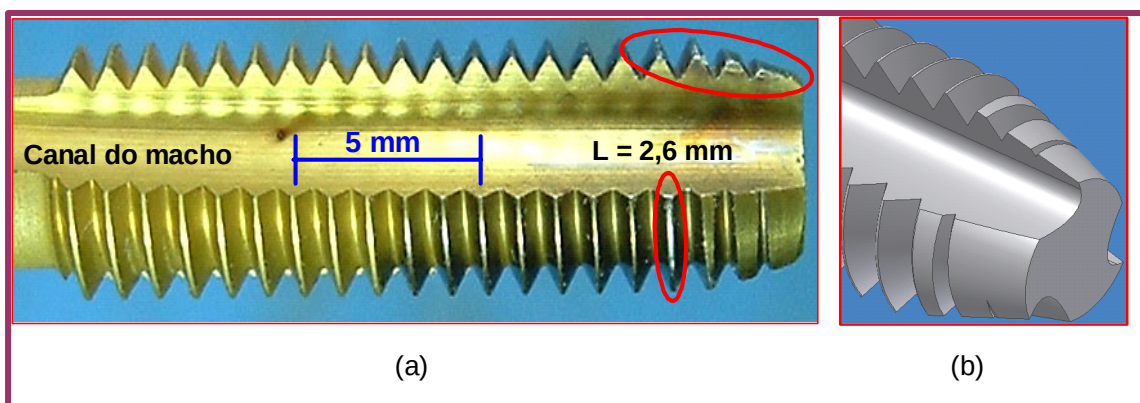


Figura 4.13 – (a) Macho de corte revestido com TiN após usar 320 roscas em ferro fundido cinzento; (b) detalhe do detalonamento (parte cônica) do macho onde mediu-se o desgaste na superfície de folga

A fim de comparar a evolução do desgaste de flanco nas ferramentas utilizadas neste trabalho, foram plotados os valores máximos de desgaste (em milímetros), medidos em

cada filete, para os três primeiros filetes de cada ferramenta em função do número de roscas feitas, conforme apresenta a Tab. 4.5. Esses valores representam o desgaste do macho de HSS-E revestido com TiN, utilizando MQL, com velocidade de corte de 75 m/min. Este procedimento foi utilizado para todas as demais condições e os resultados são mostrados nas Figs. 4.14 a 4.16.

Tabela 4.5 - Medição dos desgastes nas três carreiras do macho HSS-E TiN (MQL)

Nº de Roscas	Carreira 1	Carreira 2	Carreira 3
0	0	0	0
160	0,195 mm	0,208 mm	0,198 mm
320	0,345 mm	0,478 mm	0,275 mm
400	0,513 mm	0,572 mm	0,327 mm
560	0,594 mm	0,612 mm	0,604 mm
720	0,618 mm	0,691 mm	0,736 mm
1000	0,833 mm	0,858 mm	0,852 mm

Os gráficos das Figs. 4-14, 4-15 e 4-16 apresentam uma comparação dos desgastes das ferramentas de HSS-E, revestidas com TiN e sem revestimento, com duas condições de corte: a seco e com MQL. Observa-se nestas figuras que a ferramenta sem revestimento utilizada na condição a seco (HSS-E SR SECO) já apresentava elevados níveis de desgaste em todos os três primeiros filetes após usinar 160 roscas, sendo que no terceiro filete o desgaste atingiu todo o comprimento de pelo menos uma das superfícies laterais (compreendidas entre dois canais da ferramenta), caracterizando um tipo específico de avaria desenvolvido em machos de corte, devido ao mecanismo de deformação plástica, denominada por alguns autores (OSG, 1999; REIS, 2004) de rasgamento e que corresponde à perda da crista do filete.

O desgaste prematuro para as ferramentas sem revestimento deve-se ao fato de haver contato direto entre o substrato do macho com o material da peça. Em altas velocidades de corte a temperatura na usinagem é alta, comprometendo o desempenho das ferramentas de corte. Para os machos revestidos com nitreto de titânio pode-se dizer que o desgaste foi reduzido, principalmente os desgastes abrasivos, devido a sua alta dureza, a qual garante uma superfície mais resistente ao microcorte, microlascamento e ao microsulcamento (ZUM GAHR, 1987). Além disso, os revestimentos dificultam a adesão do material usinado à ferramenta, diminuindo a ocorrência de “*attrition*”.

Os revestimentos “endurecedores” apresentam um reduzido desgaste por abrasão e proporcionam pequena adesão aos cavacos que se soltam do material que está sendo

usinado. Isto, por sua vez, leva à redução da abrasão causada por partículas duras (inclusões) da peça ou da própria ferramenta, menores coeficientes de atrito e conseqüentemente menores forças de corte.

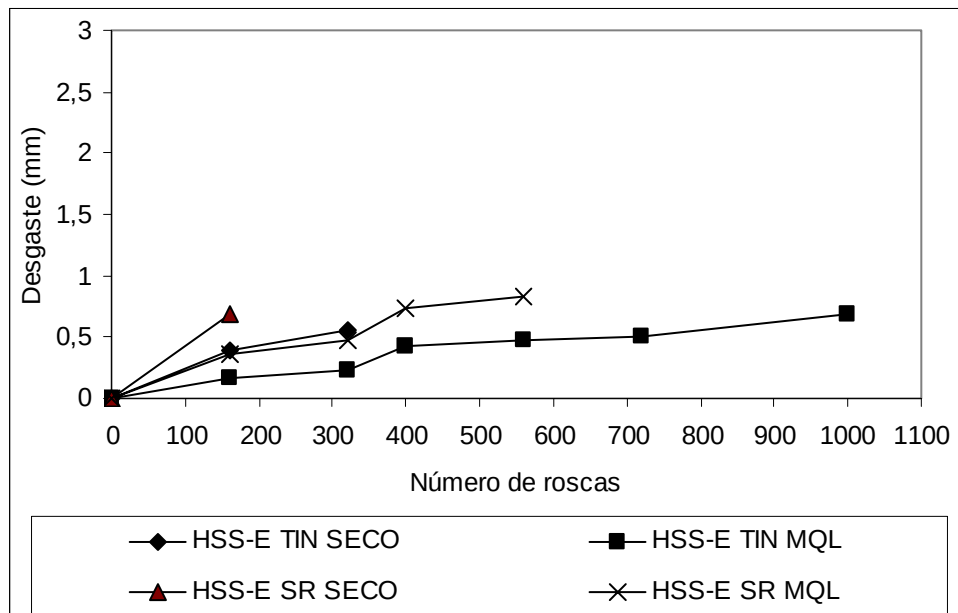


Figura 4.14 - Desgaste de flanco no primeiro filete versos o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), usando cabeçote fixo

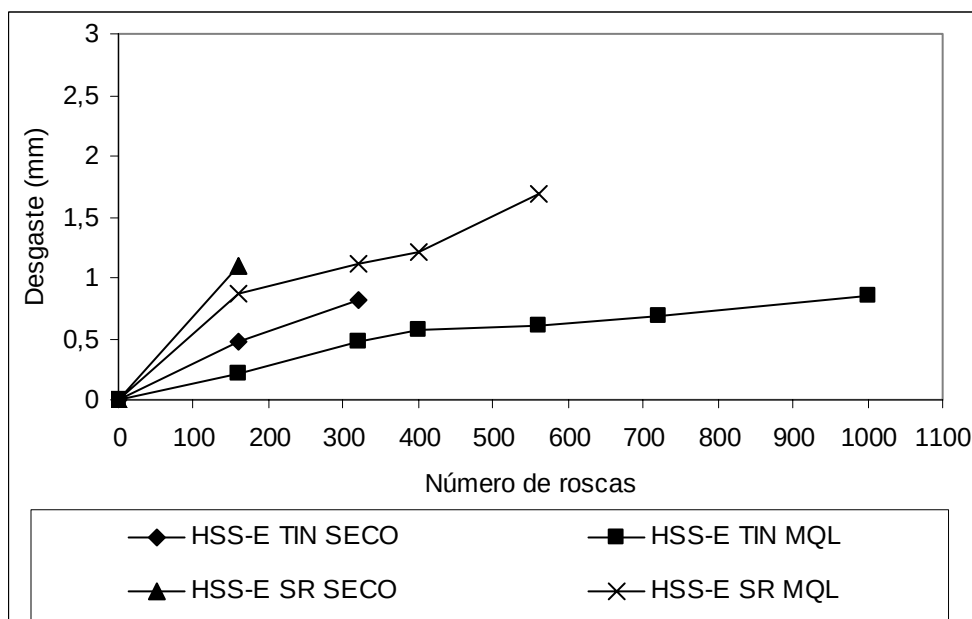


Figura 4.15 - Desgaste de flanco no segundo filete versos o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), usando cabeçote fixo

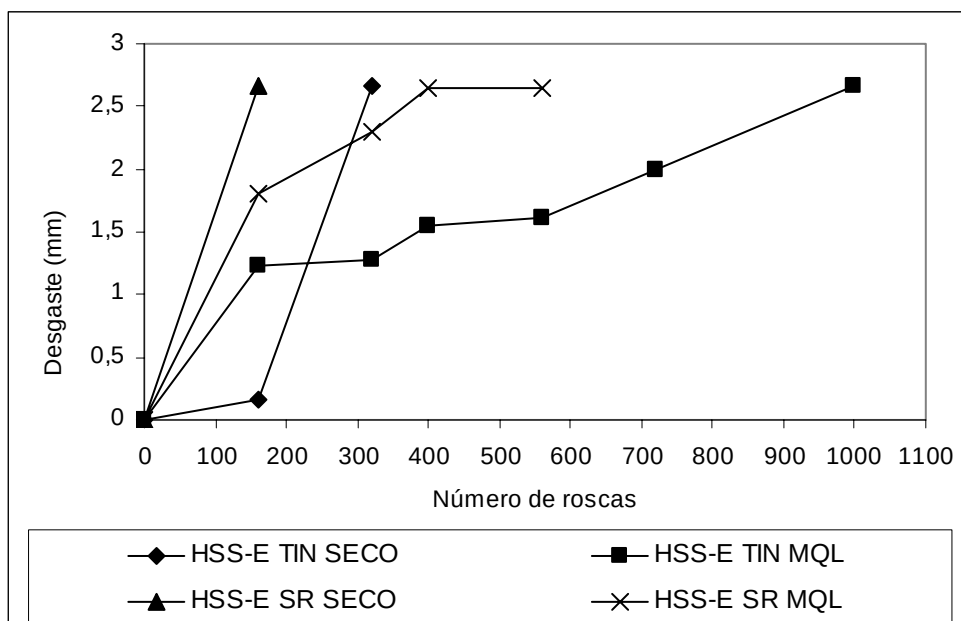


Figura 4.16 - Desgaste de flanco no terceiro filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), usando cabeçote fixo

4.3.2 - Ferramentas de HSS-E e PM revestidos com TiN e TiN/TiAlN com altas velocidades de corte

Observa-se nos gráficos das Figs. 4.17 a 4.22 que as ferramentas revestidas com TiN tiveram desgastes consideráveis. Com 320 roscas, o desgaste para a ferramenta HSS-E TiN ficou próximo de 0,6 mm de comprimento, no primeiro filete da ferramenta (Fig. 4.17). No segundo filete esse desgaste, foi maior, chegando a 0,8 mm (Fig. 4.18). O desgaste (rasgamento) no terceiro filete atingiu todo o comprimento do dente ($\pm 2,6$ mm), comprometendo assim a qualidade das roscas fabricadas.

As ferramentas fabricadas pelo processo da Metalurgia do Pó (PM), revestidas com TiN tiveram desempenho pouco superior ao das ferramentas fabricadas pelo processo convencional (HSS-E). Para o rosqueamento com altas velocidades, o desgaste das ferramentas de aço-rápido (PM) foi inferior nos dois primeiros filetes e muito próximos no terceiro filete.

O desempenho das ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN foi superior às ferramentas revestidas com TiN, independentemente dos substratos analisados. O número de roscas usinadas com os machos de aço-rápido PM, revestidos com TiN/TiAlN, foi em torno de 150% superior ao das ferramentas do mesmo material, revestidas com TiN (Fig. 4.1). O desgaste ficou inferior a 0,8 mm para os dois primeiros filetes do macho PM, revestido com multicamadas, na condição de alta velocidade de corte. Para o terceiro filete o

desgaste foi de aproximadamente 1,5 mm, após usar 800 roscas. Na mesma condição de usinagem, a ferramenta de aço super-rápido (HSS-E) revestido com TiN, fez 320 roscas e o desgaste no terceiro dente ficou acima de 2,5 mm de desgaste (rasgamento).

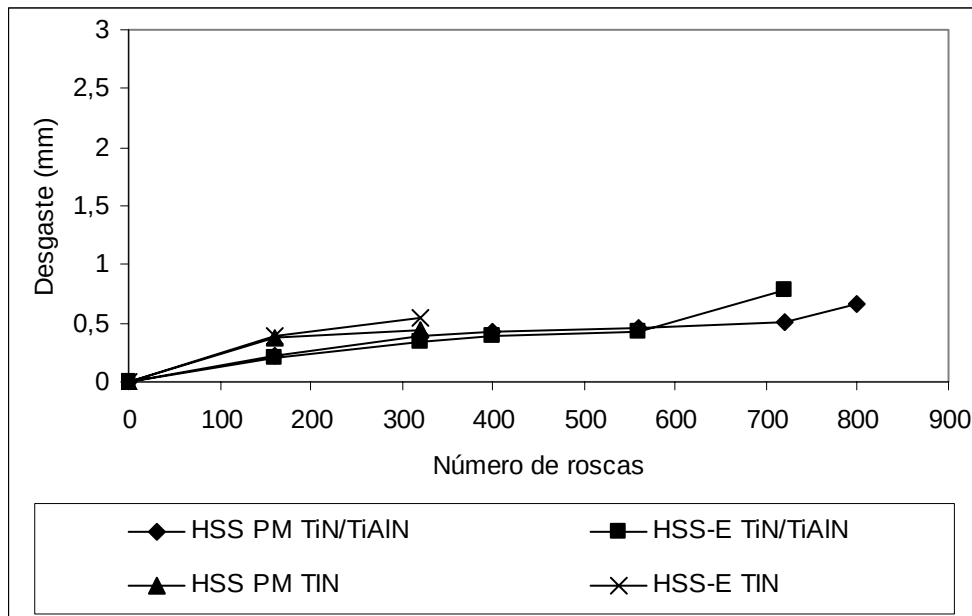


Figura 4.17 - Desgaste de flanco no primeiro filete versos o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), com cabeçote fixo

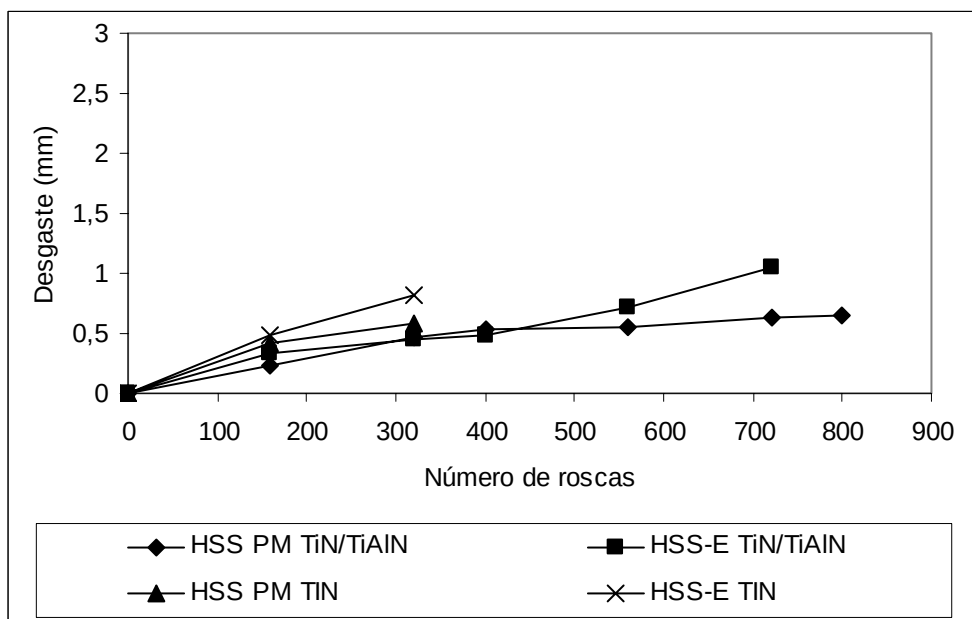


Figura 4.18 - Desgaste de flanco no segundo filete versos o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), com cabeçote fixo

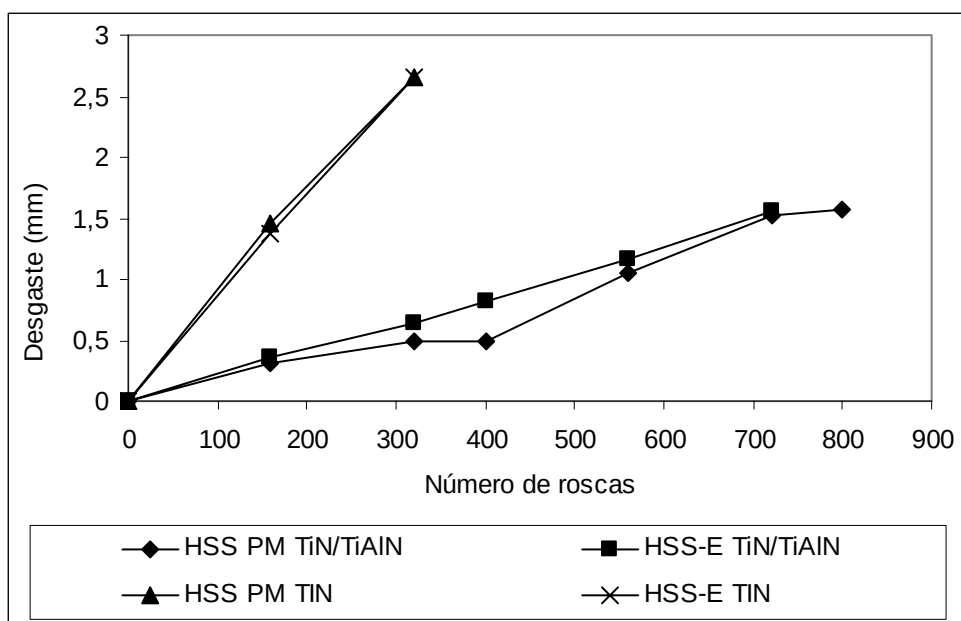


Figura 4.19 - Desgaste de flanco no terceiro filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), com cabeçote fixo

Acredita-se que as temperaturas atingidas no processo de rosqueamento, desenvolvidas neste trabalho, foram elevadas, principalmente quando se utilizou alta velocidade de corte (75 m/min). Embora o tempo de contato entre cada dente do macho seja relativamente curto, pode-se afirmar que o corte para o rosqueamento é contínuo, proporcionando o aumento da temperatura nos flancos dos dentes e na superfície de saída. Além do calor gerado devido ao atrito e às altas taxas de remoção de material, pode-se ainda acrescentar o problema do acúmulo de resíduos (cavacos) nos canais das ferramentas, responsáveis pelo aumento do desgaste e acréscimo do torque no rosqueamento.

Sabe-se que praticamente toda a energia consumida na usinagem é convertida em calor e que esse fenômeno é um dos grandes problemas para as ferramentas de corte. A dissipação da energia térmica nas zonas de cisalhamento primária e secundária afeta fortemente a resistência das ferramentas, pois as temperaturas nestas regiões são muito altas. Daí, a necessidade de utilizar substratos resistentes a altas temperaturas ou melhorar a superfície das ferramentas, adicionando revestimentos que diminuam o atrito ou que melhorem a dissipação do calor. Os resultados apresentados até o momento mostram que as ferramentas recobertas com multicamadas de TiN/TiAlN tiveram um desempenho muito superior ao das ferramentas revestidas com TiN. Esses resultados podem estar relacionados com o efeito da temperatura na interface cavaco-ferramenta. O alumínio

presente na cobertura multicamada TiN/TiAlN, reage com o meio ambiente na região de corte, formando uma camada externa de óxido (Al_2O_3) que é altamente dura, protegendo as outras camadas de revestimentos e conseqüentemente blindando o substrato dos machos de corte (PALDEY; DEEVI, 2003; HARRIS et al., 2003; VIANA, 2004; REITER et al., 2006). Essa reação química acontece em altas temperaturas, comprovando a melhor atuação das ferramentas revestidas com o revestimento TiN/TiAlN em alta velocidade de corte.

Essas camadas de óxidos também podem exercer a função de lubrificante sólido e isolante térmico na interface e agir como um obstáculo à condução do calor para o interior da ferramenta durante o corte (PALDEY; DEEVI, 2003; VIANA, 2004), mantendo a integridade desta, o que pode favorecer o aumento em sua vida útil e conseqüentemente aumentar o número de peças fabricadas.

4.3.3 - Ferramentas de HSS-E e PM revestidos com TiN e TiN/TiAlN em velocidades de corte moderadas

Na condição de corte moderada (37,5 m/min), o desgaste das ferramentas de corte, revestidas com multicamada (TiN/TiAlN), também foi significativamente menor, como pode ser visto nos gráficos das figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

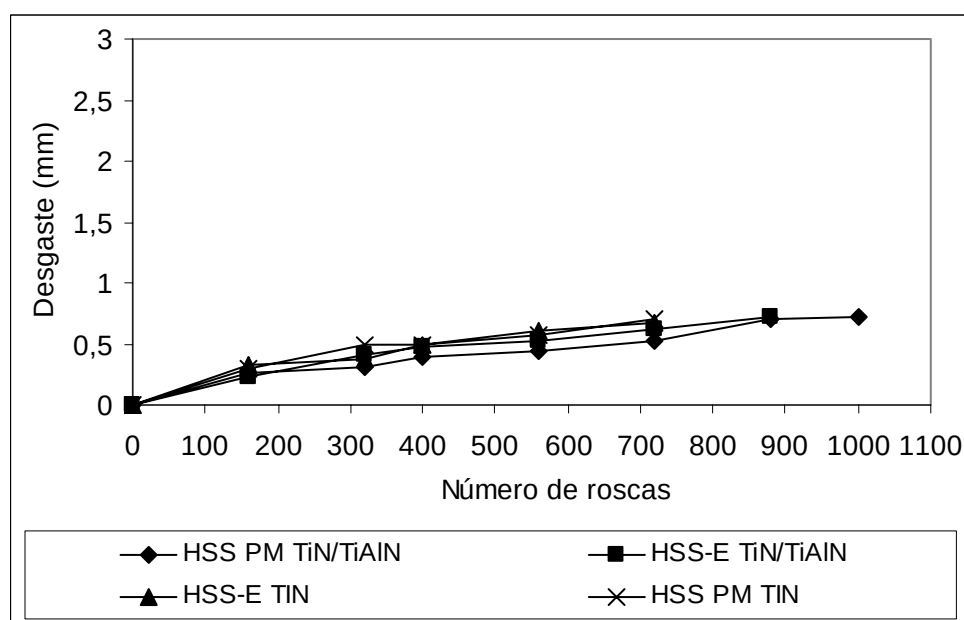


Figura 4.20 - Desgaste de flanco no primeiro filete versos o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=37,5$ m/min), cabeçote fixo

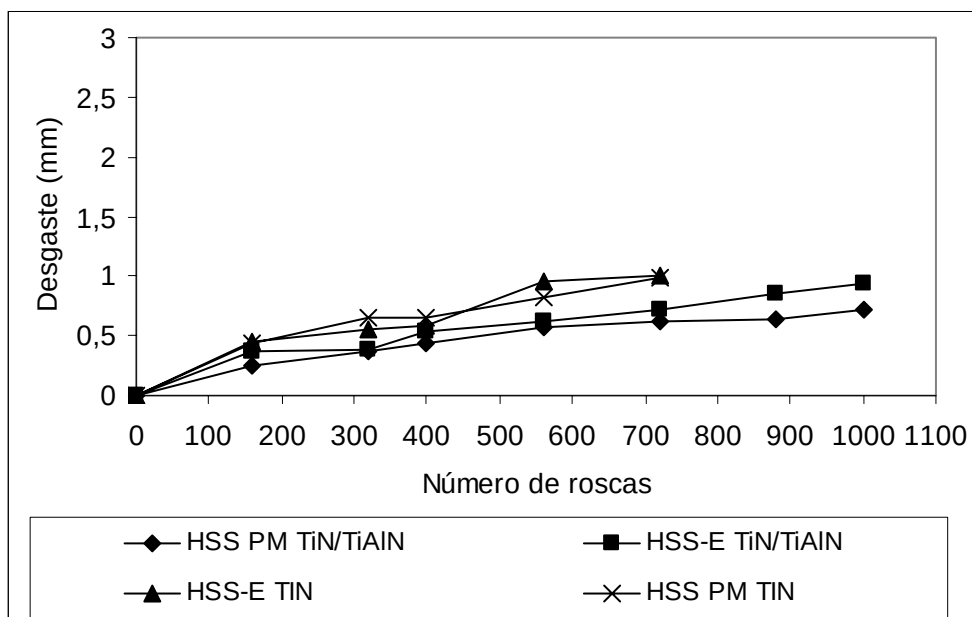


Figura 4.21 - Desgaste de flanco no segundo filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c = 37,5$ m/min), cabeçote fixo

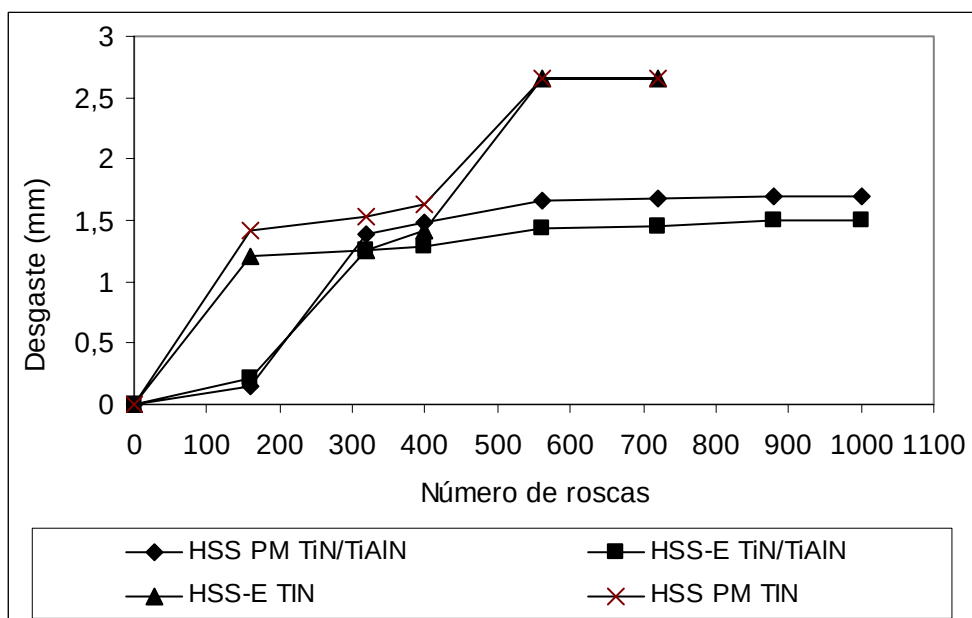


Figura 4.22 - Desgaste de flanco no terceiro filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c = 37,5$ m/min), cabeçote fixo

Verificou-se que os desgastes do macho de aço-rápido (PM) revestido com multicamadas, e do macho de aço super-rápido (HSS-E), também revestido com TiN/TiAlN,

foram inferiores aos desgastes dos machos revestidos com TiN, mesmo considerando que as ferramentas revestidas com multicamadas fizeram em média 300 roscas a mais que as outras ferramentas. A ferramenta de HSS-PM TiN, terceiro filete, atingiu 2,5 mm de desgaste com 560 roscas usinadas, enquanto que uma ferramenta semelhante, revestida com TiN/TiAlN, fez 1000 roscas e o desgaste ficou próximo de 1,5 mm, conforme a Fig. 4.22.

4.4 Mecanismos de Desgaste

A literatura apresenta vários mecanismos de desgaste e avarias para as diversas ferramentas de corte, principalmente para o torneamento e o fresamento. Entretanto, são poucos os estudos feitos em ferramentas sólidas rotativas de aço-rápido, como os machos de corte. Neste trabalho foi possível fazer algumas análises dos principais mecanismos de desgaste nessas ferramentas, como por exemplo, a adesão e a abrasão. Também foi considerada a deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas e/ou deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão, que normalmente não são consideradas como mecanismos de desgaste, mas sim um dos processos de destruição das ferramentas de corte (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004).

As boas propriedades térmicas e mecânicas dos revestimentos de TiN e multicamadas de TiN/TiAlN fizeram com que o desgaste das ferramentas fosse pequeno enquanto o revestimento esteve presente na superfície dos machos. Contudo, após o desprendimento desses revestimentos, os desgastes nos machos foram severos.

4.4.1 Mecanismos de desgaste apresentados nas ferramentas revestidas com TiN em HSM

A visualização e medição das dimensões do desgaste em microscópio ótico evidenciaram um maior nível de desgaste nas ferramentas revestidas com TiN do que as ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN. Os primeiros filetes daquelas ferramentas sofreram desgastes severos, com rasgamento até o quarto dente. As fotomicrografias da Fig. 4.23 mostram o estado de desgaste apresentado pelo macho de HSS-E revestido com nitreto de titânio, após usinar 320 roscas, a 75 m/min.

Além da deformação plástica ocorrida nessa condição de corte, houve também outros mecanismos de desgaste que podem ter influenciado no aumento do torque e conseqüentemente no final da vida da ferramenta. Com 160 roscas fabricadas já era perceptível o destacamento do revestimento nos primeiros dentes do macho. Com o

aumento do número de roscas, verificou-se que havia rasgamento na superfície de folga dos dentes da parte cilíndrica do macho, provavelmente resultantes das altas compressões existentes nas superfícies da ferramenta. Além do aumento da temperatura, devido ao acréscimo do desgaste, as forças de corte aumentaram significativamente, assim como os ruídos na operação de usinagem.

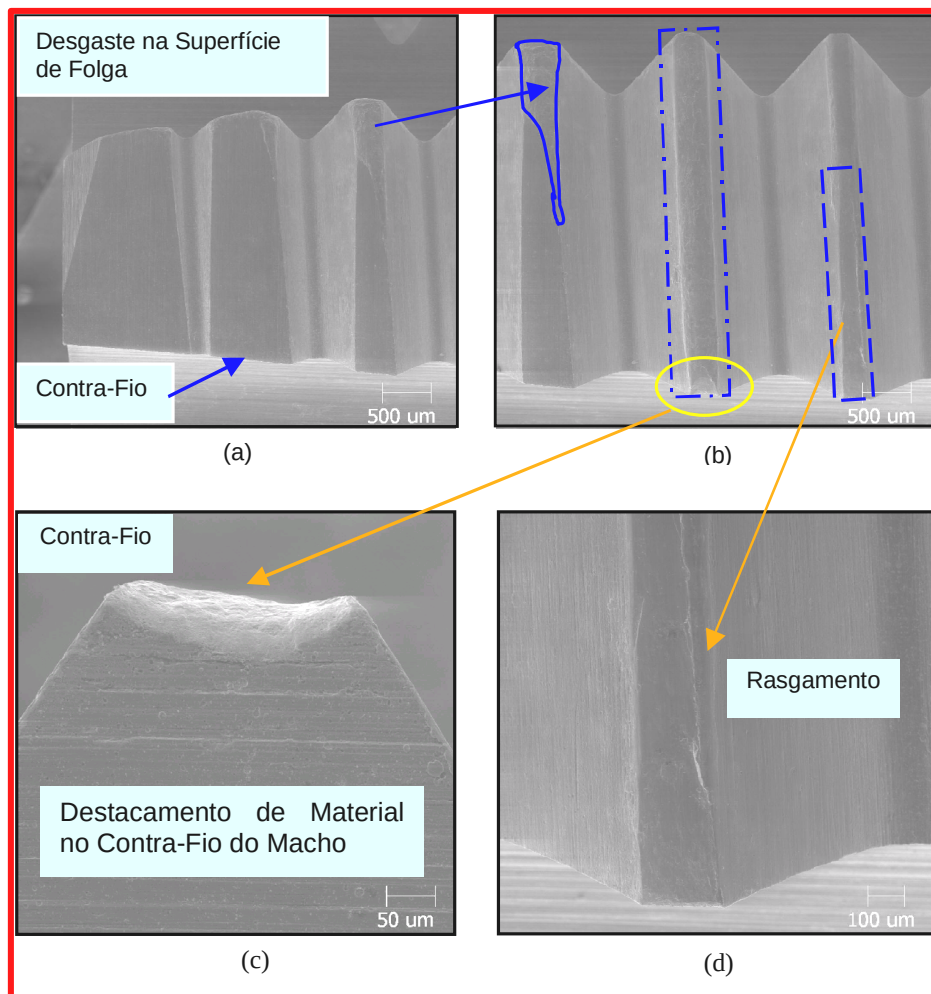


Figura 4.23 – Fotomicrografias (MEV) da ferramenta HSS-E revestida com TiN após usinar 320 roscas com velocidade de corte de 75 m/min

Na Fig. 4.24 são apresentadas fotomicrografias feitas no MEV, onde observa-se também a presença de partículas, aderidas sobre as superfícies da ferramenta, sugerindo que o mecanismo de desgaste por adesão (*attrition*) pode ter contribuído para a deterioração da ferramenta (macho HSS – PM).

O fluxo de cavacos sobre as superfícies de saída dos machos pode transportar elementos duros (fragmentos de desgaste) do próprio material da peça e também pequenos

grãos ou partículas arrancados da própria ferramenta, por adesão, como, por exemplo, partes do revestimento (nitreto de titânio – dureza de 2500 Hv), os quais, arrastados juntos com os cavacos, promovem o mecanismo de desgaste, por abrasão (TRENT; WRIGHT, 2000; ZUM GAHR, 1987; MACHADO; DA SILVA, 2004).

Assim, pode-se concluir que os altos níveis de desgaste, observados nas ferramentas revestidas com TiN, causados pelos mecanismos citados anteriormente, foram provavelmente os responsáveis pelos altos valores do sinal do torque medido no rosqueamento com estas ferramentas, que serão discutidos posteriormente.

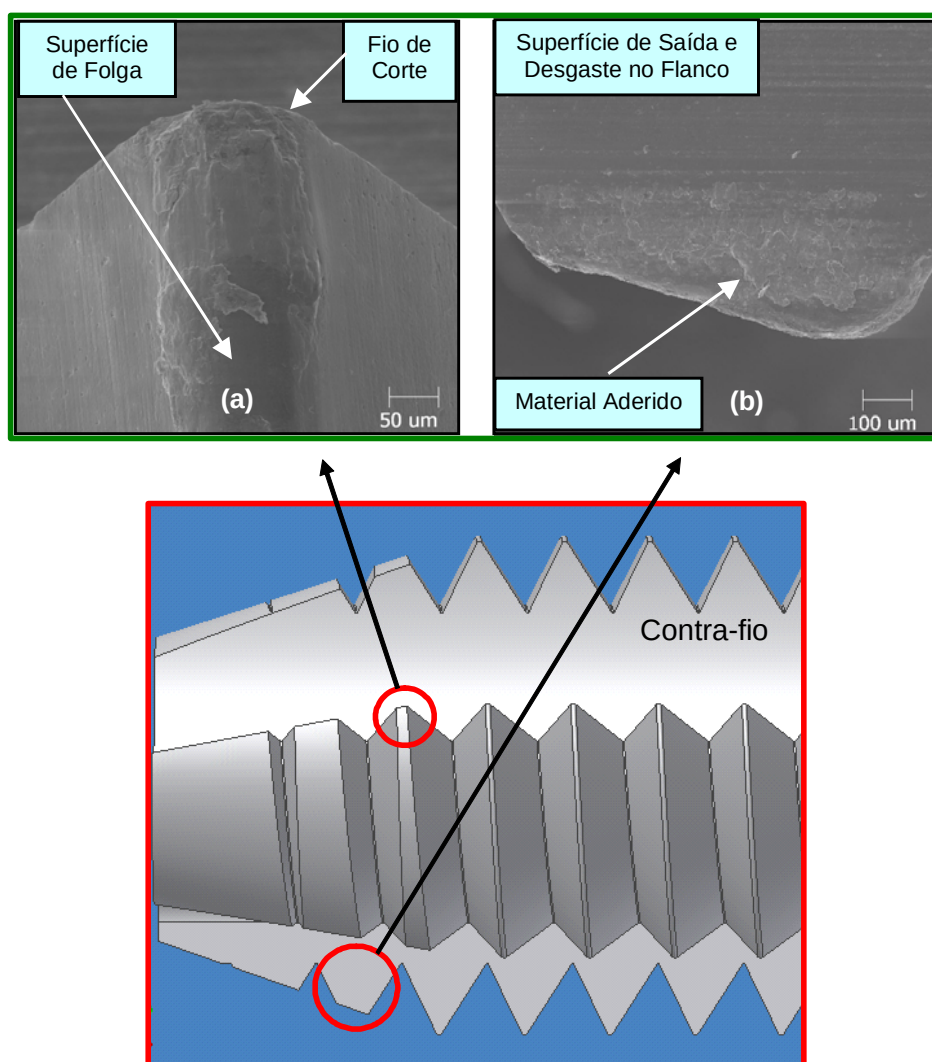


Figura 4.24 – Desenho esquemático mostrando o desgaste na superfície de saída e de folga do segundo e terceiro dente de um macho PM revestido com TiN, usando cabeçote fico com 75 m/min. (a) Fotomicrografias (MEV) apresentando detalhes do desgaste no terceiro dente (superfície de folga); b) detalhes na superfície de saída

4.4.2 Microanálise por Energia Dispersiva (EDS) nas ferramentas revestidas com TiN

O objetivo das análises desse trabalho foi investigar a presença de elementos químicos sobre as superfícies das ferramentas, com a finalidade de identificar os principais mecanismos de desgaste ocorridos na usinagem de ferro fundido cinzento GH 190. Foram escolhidas algumas regiões críticas na superfície de saída de um macho HSS-E revestido com TiN, após usar 320 roscas com uma velocidade de corte de 75 m/min. A Fig. 4.25 apresenta fotos no MEV mostrando material aderido ao substrato após o destacamento do revestimento, na região considerada até então como área desgastada.

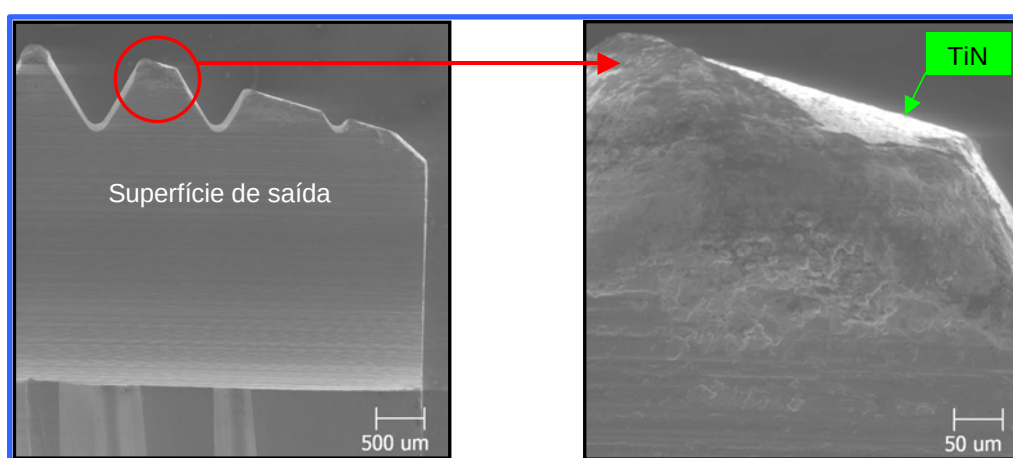


Figura 4.25 – Fotomicrografia feita em MEV de uma ferramenta de HSS-E (TiN) após usar 320 roscas em ferro fundido cinzento com $V_c = 75$ m/min

Para compreender melhor os mecanismos de desgaste que atuaram na superfície desta ferramenta, foi feito um espectro da análise química por meio de uma micro-sonda EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva), onde foram feitas três análises (sobre a linha horizontal e os pontos 1 e 2), de acordo com a Fig. 4.26.

Na região com desgaste traçou-se uma linha horizontal e fez-se EDS em toda sua extensão. Os resultados apresentaram uma grande quantidade de ferro (Fe), possivelmente do substrato após o destacamento do revestimento e também do ferro fundido (fofo), caracterizando adesão. Também é possível notar a presença dos elementos químicos: silício (Si), fósforo (P) e titânio (Ti), em menores quantidades. O titânio aparece com maior ênfase nas extremidades da linha, comprovando a presença do revestimento (TiN) nas bordas da ferramenta. A presença de fósforo e silício, provavelmente se deve a adesão de ferro fundido ao substrato do macho de corte.

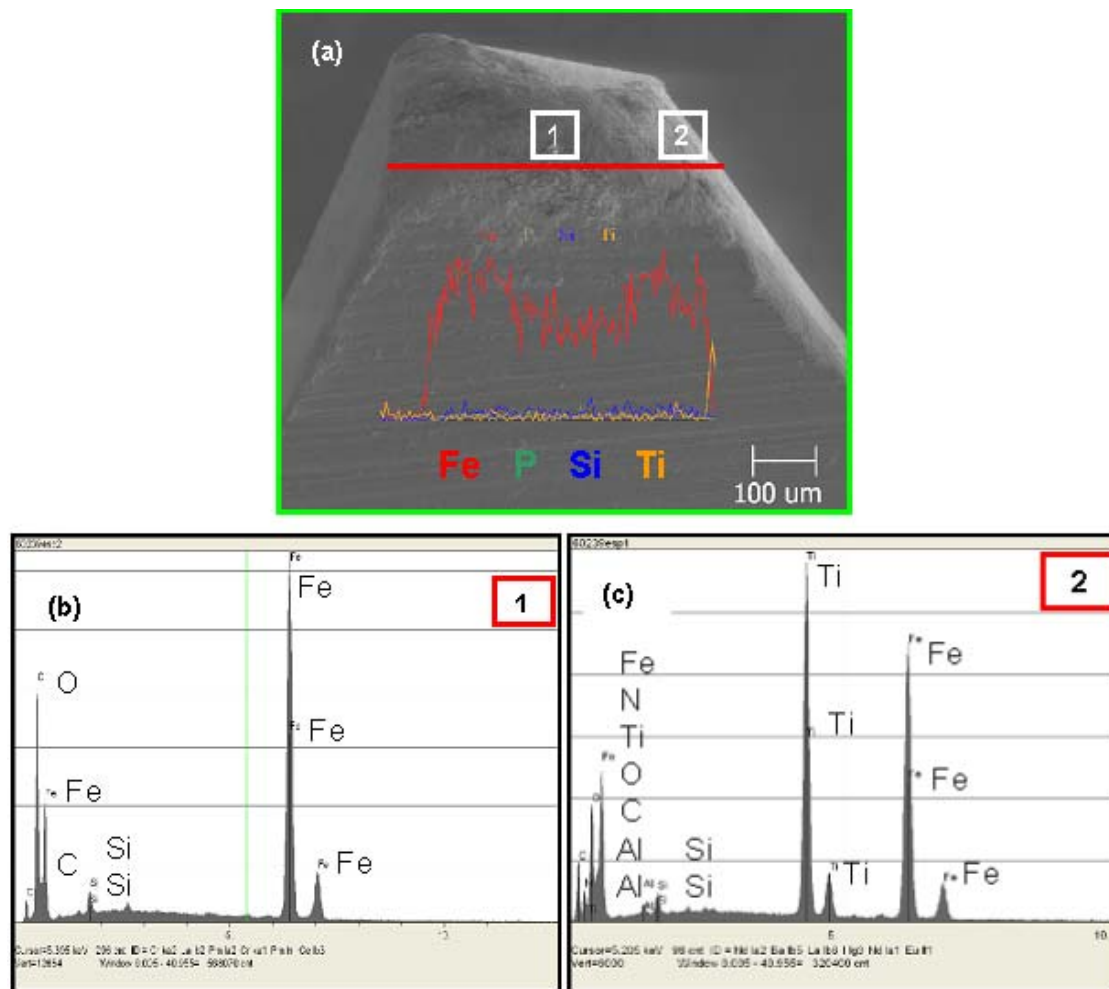


Figura 4.26 – Espectro por energia dispersiva (análise química): (a) fotomicrografia feita em MEV apresentando as três regiões analisadas e os principais elementos químicos presentes na região demarcada pela linha; (b) espectro da análise química da região 1; (c) espectro da análise química da região 2

Para esclarecer melhor a presença desses elementos químicos na região estudada, foram feitos alguns espectros em regiões distintas, denotadas na Fig. 4.26 como pontos 1 e 2. Na região 1, conforme era esperado, constatou-se a presença de ferro, carbono e silício. Já na região 2, percebe-se a presença dos mesmos elementos químicos da região 1, acrescidos de titânio (Ti), nitrogênio (N), oxigênio (O) e pequenas quantidades de alumínio (Al). Como esta região compreende o substrato desgastado e uma parcela da superfície de folga do macho, a qual ainda está revestida com TiN, acredita-se que o titânio e o nitrogênio são oriundos da camada de revestimento. A presença do oxigênio pode estar relacionada à formação de algum tipo de óxido, uma vez que as temperaturas de usinagem foram altas, devido as condições de corte utilizadas neste trabalho.

Uma análise mais detalhada do espectro (análise química) dos elementos que são mais significativos, na região varrida sobre a linha horizontal, apresentada na Fig. 4.26, pode ser vista na Fig. 4.27.

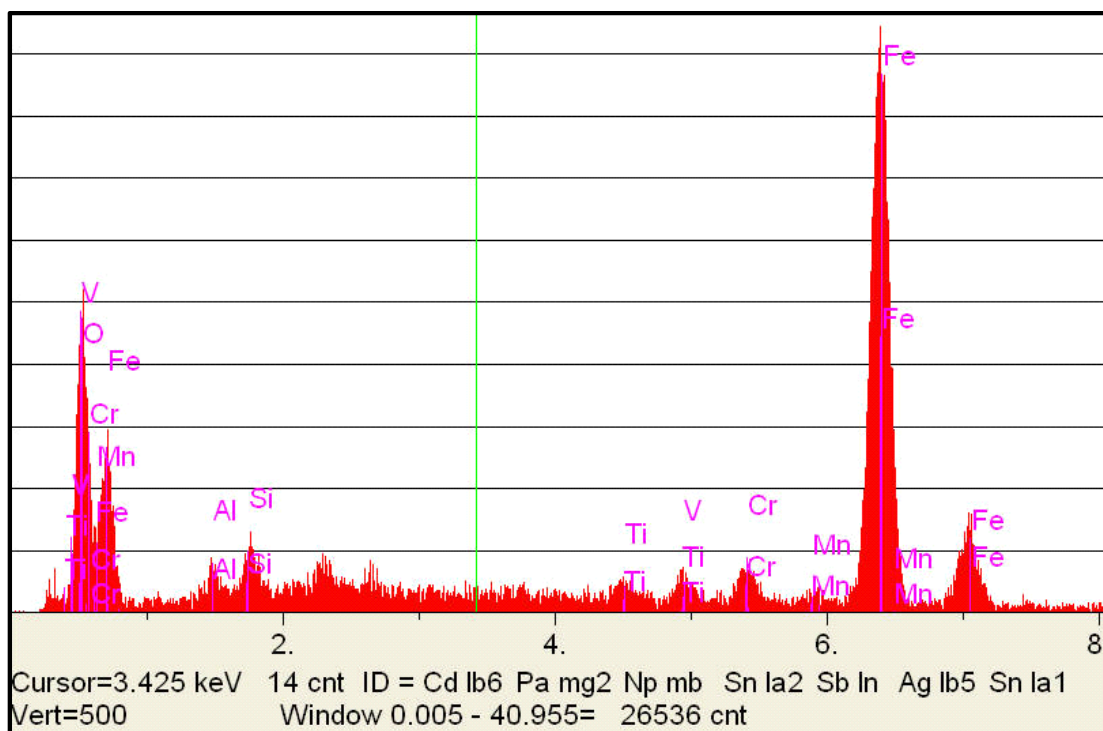


Figura 4.27 - Espectro da análise química sob a superfície demarcada pela linha central da figura 4.26

É importante salientar que, nas análises químicas das ferramentas, percebe-se a presença de outros elementos químicos, porém em forma de resíduos. No espectro da Fig. 4.27 são apresentados somente os elementos mais significativos. Estes resíduos não foram identificados por dois fatores: 1) A sonda de análise química apresenta dificuldade em analisar elementos leves e 2) a quantidade mostrada era insuficiente para ser identificada no gráfico.

4.4.3 Mecanismos de desgaste apresentado nas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN em HSM

Através do microscópio ótico não foi possível detectar os principais mecanismos de desgaste nas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN, no início do rosqueamento. O desgaste passou a ser observado a partir do momento em que ocorreu a remoção da camada de revestimento, na região da superfície de folga, em forma de

pequenas lascas. Esse mesmo acontecimento foi constatado em trabalhos anteriores, na furação e rosqueamento de ferro fundido cinzento GH 190 (SANTOS, 1999; REIS, 2004), e na furação da liga de Alumínio - Silício (VIANA, 2004), ficando comprovado que o desgaste de flanco das brocas e machos evoluem a partir desses pequenos lascamentos (SANTOS, 1999; REIS, 2004; VIANA, 2004).

Para as ferramentas utilizadas neste trabalho, esse fenômeno foi verificado em todas as ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN, independente do substrato e das velocidades de corte, conforme pode-se observar através da fotomicrografia (MEV) apresentada na Fig. 4.28.

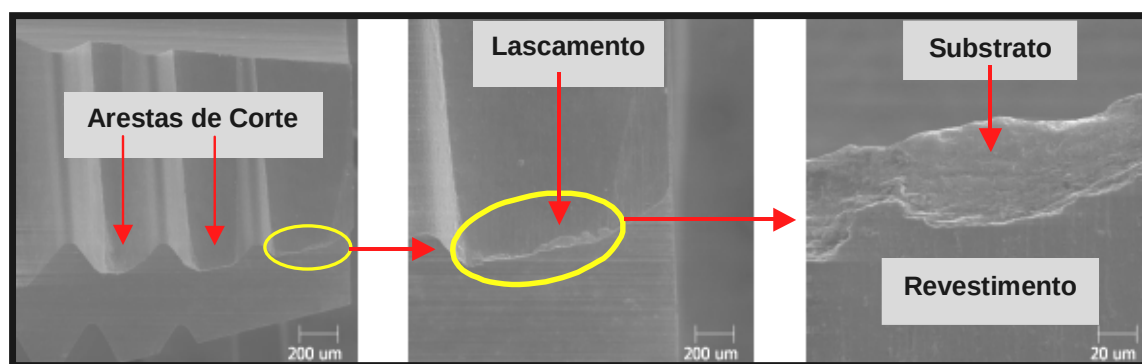


Figura 4.28 – Fotomicrografia feitas no MEV apresentando detalhes de lascamentos observados em um macho fabricado pela metalurgia do pó (PM), revestido com multicamadas de TiN/TiAlN

Com o aumento do lascamento e conseqüente exposição do substrato ao contato direto com o material a ser usinado, aumentou-se o atrito entre o macho e o corpo de prova, provocando fortes ruídos e o acréscimo progressivo das forças de corte. A única ferramenta que foi eliminada por falha catastrófica neste trabalho, macho HSS-E empregado a 75 m/min, revestido com multicamadas de TiN/TiAlN, apresentou seguramente esse tipo de desgaste. Com 720 roscas fabricadas o desgaste observado em microscópio ótico era pequeno. Entretanto, notava-se a presença de pequenos lascamentos na superfície de folga e os ruídos na usinagem eram muito intensos. Com 768 roscas usinadas a ferramenta quebrou, não permitindo análises mais detalhadas, como fotos no MEV, dos mecanismos de desgastes apresentados.

Para as condições moderadas (37,5 m/min), também ocorreram lascamentos, principalmente na região cônica ou nos primeiros dentes do macho. A Fig. 4.29 mostra duas fotomicrografias feitas no MEV, da superfície de folga de um macho de HSS-E, em fim de vida. A presença de lascas no revestimento pode ser observada tanto nos dois primeiros

dentes (parte cônica do macho), como no primeiro dente da parte cilíndrica (terceiro dente da ferramenta), o qual apresenta destacamentos do revestimento na superfície de folga do macho. A ausência do revestimento afetou diretamente o sinal de torque, conforme será descrito em uma seção posterior. Além disso, pode ter ocorrido abrasão e adesão (*attrition*).

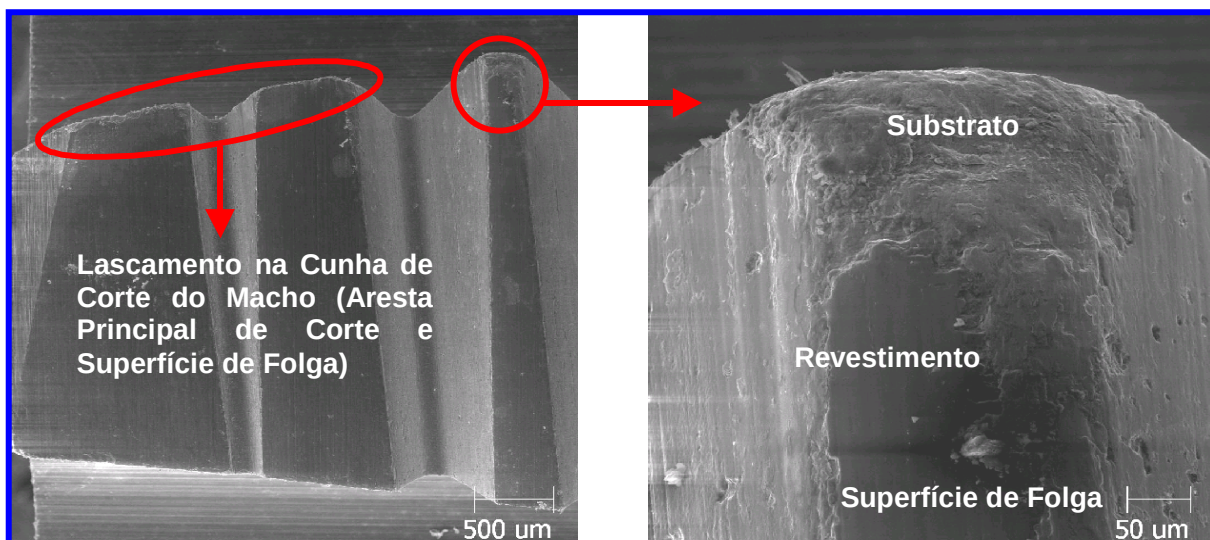


Figura 4.29 – Fotomicrografias feitas no MEV apresentando detalhe da cunha cortante de um macho de corte (HSS-E) revestido com multicamada TiN/TiAlN após usinar 900 roscas

A abrasão pode provocar nas ferramentas de corte microsulcamento, microcorte ou microlascamento, esse último podendo chegar ao macrolascamento. As consequências desse mecanismo de desgaste para os machos de corte são graves, pois as ferramentas de corte podem perder a aresta de corte e danificar o detalonamento (alívio na superfície de folga do macho), aumentando a área de contato entre a ferramenta e a peça, implicando em maiores atritos e aumento das forças de corte (REIS, 2004).

4.4.4 Microanálise por Energia Dispersiva (EDS) nas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN

Conforme mencionado anteriormente, foi feito também EDS em um macho (HSS-PM), revestido com multicamadas de TiN/TiAlN. Essa ferramenta produziu 800 roscas, com velocidade de corte de 75 m/min e o desgaste encontrava-se bastante avançado, conforme verifica-se nas fotomicrografias da Fig. 4.30, feitas no MEV.

Observa-se que o desgaste na superfície de saída foi intenso, principalmente no terceiro dente da ferramenta. Houve destacamento do revestimento, e conseqüentemente um aumento das forças de corte, pois o atrito na usinagem provocou intenso ruído. O flanco

do macho apresenta desgaste severo, justificando os altos valores de torque, conforme será abordado posteriormente.

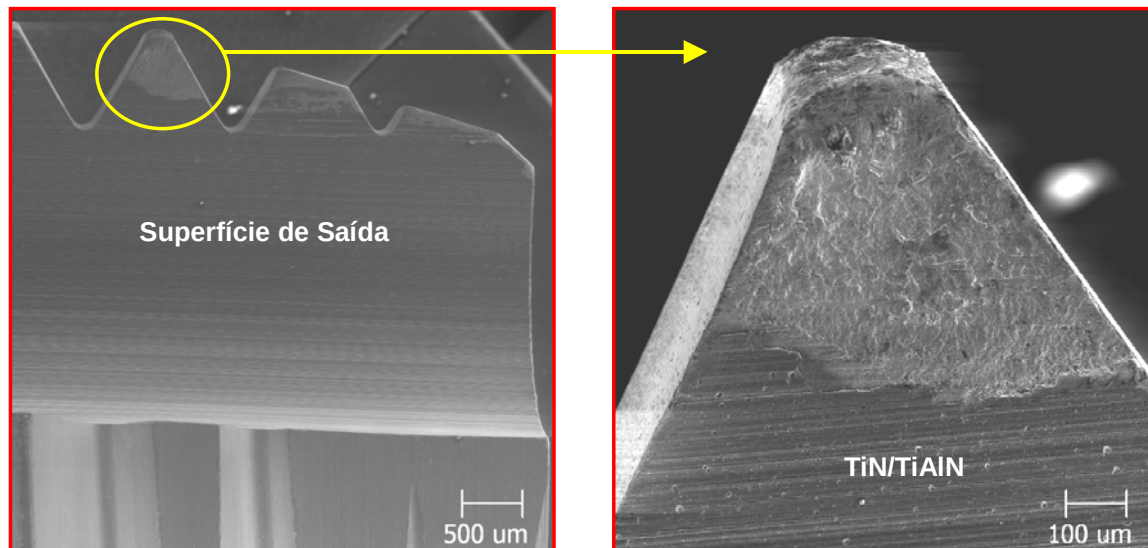


Figura 4.30 – Fotomicrografias, feita em MEV, de uma ferramenta de HSS–PM, revestida com multicamadas de TiN/TiAlN, após usar 800 roscas em ferro fundido cinzento com $V_c = 75$ m/min

A Fig. 4.31 apresenta um espectro da análise química dessa ferramenta. As análises foram feitas na posição marcada pela linha vertical (área desgastada e revestida com TiA/TiAlN). Os resultados apresentaram os cinco elementos químicos mais significativos (maiores valores do espectro). Na região que ainda havia revestimento os elementos químico titânio (Ti), alumínio (Al) e nitrogênio (N) apresentaram maiores picos, assegurando a presença desses elementos.

Entretanto, também verifica-se a presença de fósforo (P) e ferro (Fe), com menores intensidades. Na região de desgaste ocorreu o contrário: o nível de ferro aumentou (devido à presença desse elemento no substrato e provavelmente também devido à adesão de ferro fundido no substrato). Em contra-partida, o nível dos elementos alumínio e titânio caem drasticamente nessa região, comprovando o destacamento do revestimento. Existe somente uma posição em que o alumínio aparece em alta intensidade na região desgastada. Acredita-se que alguma partícula desse elemento encontra-se aderida no substrato, oriunda das partículas do revestimento, evidenciando o “attrition”. Essas partículas duras (nitretos de titânio alumínio) podem causar desgaste abrasivo, como o microcorte e o microlascamento nas superfícies de folga e de saída das ferramentas de corte, conforme descrito anteriormente (ZUM GAHR, 1987).

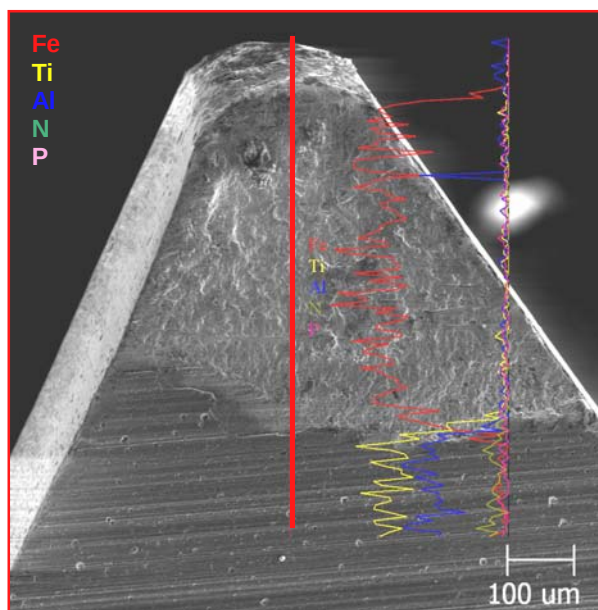


Figura 4.31 - Espectro por energia dispersiva (análise química): fotomicrografia feita em MEV apresentando o destacamento do revestimento (TiN/TiAlN), e os principais elementos químicos presentes sobre uma linha central (paralela à superfície de saída do macho)

A Figura 4.32 apresenta as regiões (1, 2 e 3) onde foram feitos alguns espectros aleatórios na superfície dessa ferramenta. O objetivo dessa divisão foi estudar, através das análises químicas, os principais elementos presentes na superfície de saída desgastada e na parte que ainda possui revestimento. Além disso, essa figura mostra, em destaque, uma parte da superfície de saída (desgaste), evidenciando a presença de material aderido e de riscos abrasivos.

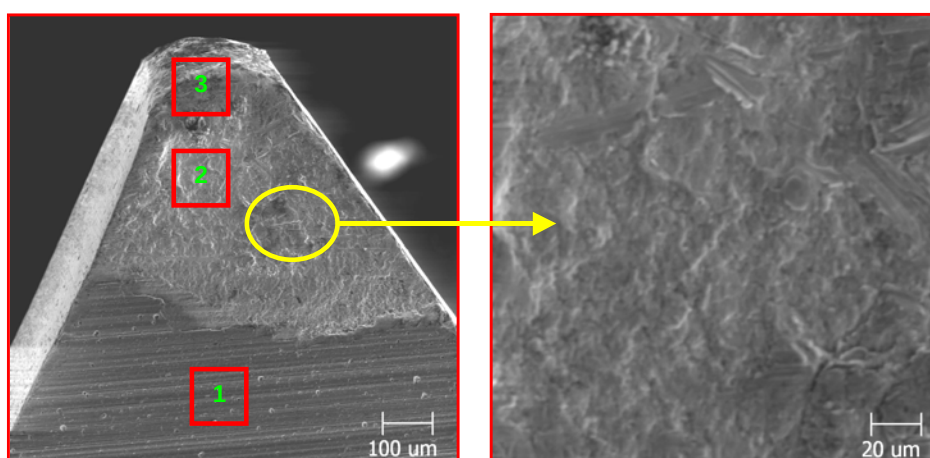


Figura 4.32 - Foto feita em MEV apresentando as três regiões analisadas e detalhe da superfície desgastada

A Fig. 4.33 apresenta os principais elementos químicos presentes na região 1 (EDS).

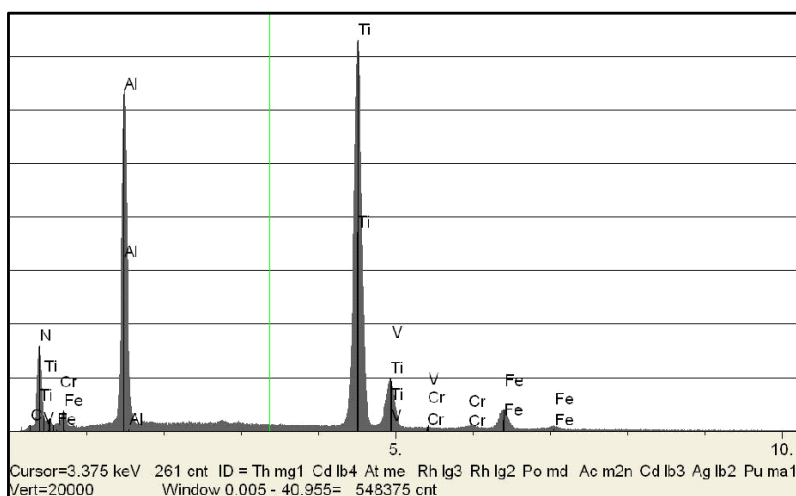


Figura 4.33 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 1 da Fig. 4.32

Observa-se que os elementos químicos que compõem o revestimento (Ti, Al, N) estão bem representados nesta figura. Isso comprova o bom estado do revestimento nessa região. Verifica-se também a presença de ferro (Fe), vanádio (V) e cromo (Cr). Esses elementos provavelmente são do substrato do macho de corte analisado.

A Fig. 4.34 aponta os principais elementos químicos presentes na região 2 (EDS).

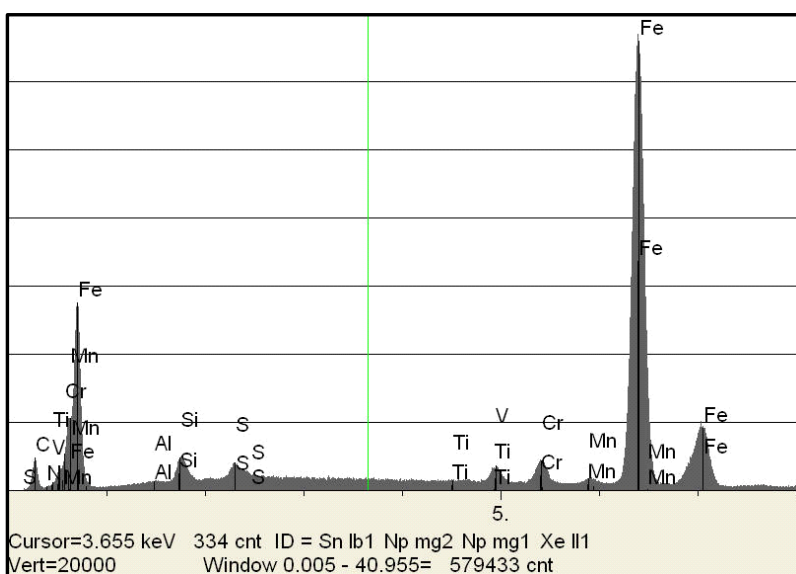


Figura 4.34 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 2 da Fig. 4.32

Observa-se a presença de ferro, manganês, cromo, vanádio, silício, alumínio, titânio, fósforo, carbono e nitrogênio. Essa composição indica uma mistura entre os materiais do macho (substrato) e do metal usinado (ferro fundido).

A Fig. 4.35 apresenta os constituintes químicos da região 3. Essa região é uma mistura entre a superfície de folga e de saída (aresta de corte) e caracteriza os elementos presentes no desgaste de flanco do macho de corte. Observa-se que a constituição química assemelha-se com a os elementos químicos da região 2, que também é uma região desgastada (superfície de saída da ferramenta). Entretanto, pode-se verificar a presença de oxigênio e a ausência de manganês. Isso pode ser esclarecido em função das posições das amostras. O desgaste na posição da amostra 2, deve ter uma incidência maior desse elemento (Manganês), no substrato do macho de corte. Já o oxigênio, pode ser uma pequena amostra de algum tipo de óxido, comum na usinagem em *HSM*, devido às altas temperaturas de corte.

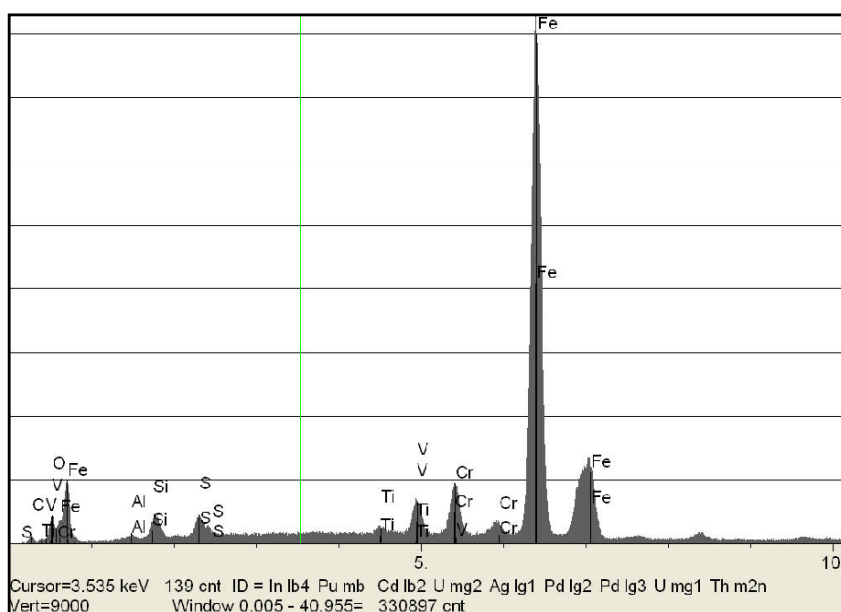


Figura 4.35 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 3 da Fig. 4.32

4.4.5 Mecanismos de desgaste apresentado nos machos estudados nos testes complementares

Conforme descrito no planejamento estatístico, foram feitos alguns testes complementares, com algumas ferramentas que tiveram os piores resultados nos pré-testes, com o objetivo de comparar os resultados com os demais testes. Assim, foram feitos testes

em baixa velocidade de corte (10 m/min), empregando-se os dois tipos de cabeçote utilizados neste trabalho, com machos de HSS revestidos com nitreto de titânio (TiN).

Além disso, avaliou-se os principais mecanismos de desgaste apresentados em ferramentas de HSS-E sem revestimento, HSS nitretadas e a influência do MQL nos mecanismos de desgaste.

As micrografias da Fig. 4.36 mostram os desgastes nos primeiros dentes do macho de HSS-E TiN, nas duas condições de corte; a) e b) 75 m/min e c) e d) 10 m/min. Houve destacamento do revestimento em quase todos os dentes, principalmente na parte cônica dos machos de corte.

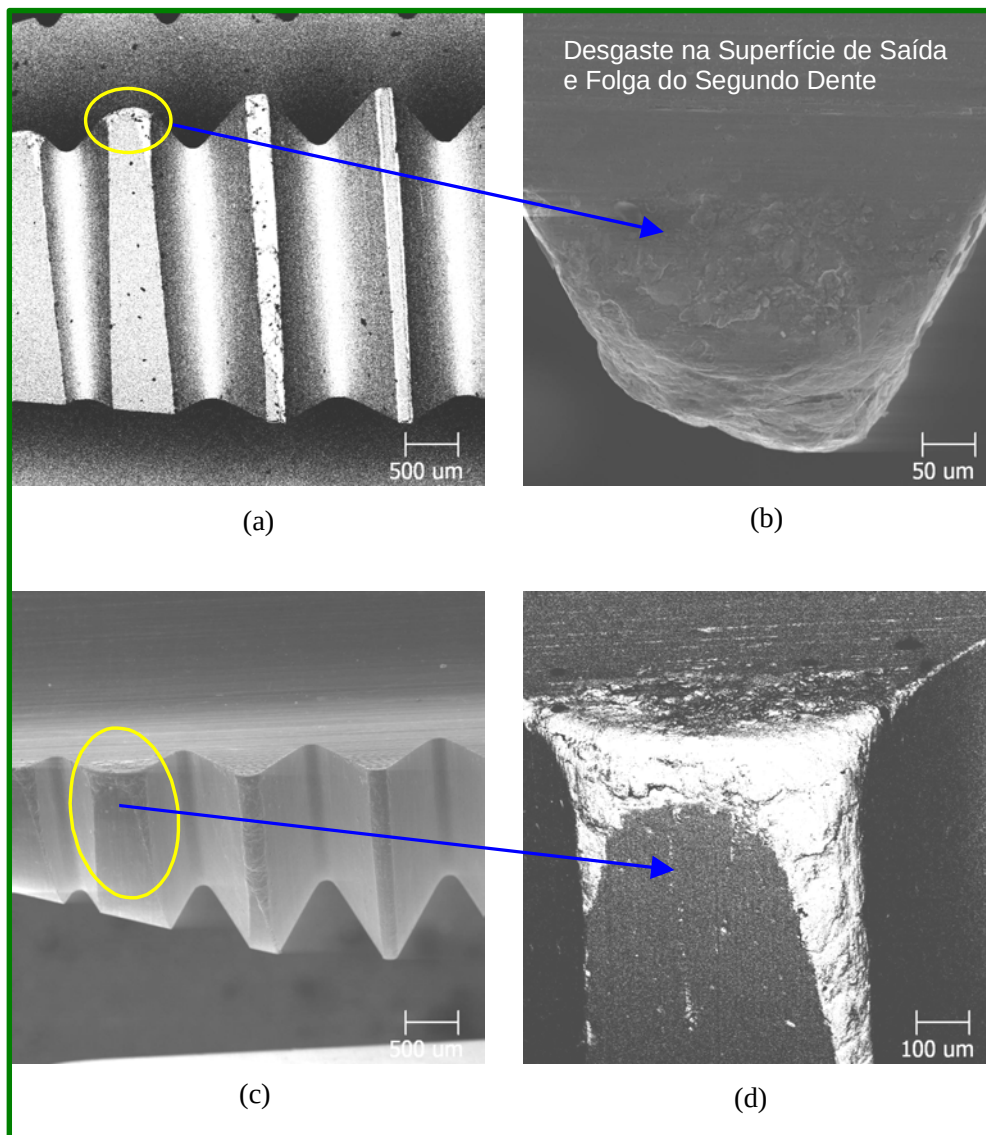


Figura 4.36 – Fotomicrografias evidenciando detalhes dos mecanismos de desgaste apresentados nos machos HSS-E revestidos com TiN; (a) e (b) 75 m/min; (c) e (d) 10 m/min

Conforme descrito anteriormente, para as velocidades de corte denominadas de *HSM* (75 m/min), além dos desgastes abrasivo e adesivo, ocorreu o processo de desgaste denominado desgaste por deformação plástica, comum em usinagem com ferramentas de HSS em altas velocidades de corte, devido às altas temperaturas desenvolvidas na interface cavaco-ferramenta. A Fig. 4.36 (a) e (b) mostra o estado de deformação do segundo dente do macho utilizado com velocidade de corte de 75 m/min. A aresta de corte foi totalmente destruída, aumentando a área de contato entre o macho e a peça e conseqüentemente, aumentando as forças de corte.

Para baixas velocidades de corte (10 m/min) os principais mecanismos de desgaste também foram a adesão e a abrasão. A Fig. 4.36 (c) e (d) apresenta o alto nível de desgaste nas superfícies de folga e saída do segundo dente do macho. Acredita-se que em todas as velocidades de corte empregadas neste trabalho, existiu a APC (aresta postiça de corte), pois o ferro fundido cinzento GH 190 apresenta duas fases: perlita lamelar com no máximo 5% de ferrita. Além disso, com o cabeçote fixo, pode-se dizer que as velocidades de corte variaram muito, devido a aceleração e a desaceleração, conforme descrito anteriormente. No entanto, as velocidades permaneciam na faixa em que a APC pode ser estável ou instável (10 a 75 m/min).

A Fig. 4.37 mostra uma seqüência de fotomicrografias de uma ferramenta de HSS-E (após usinar 160 roscas a seco) feitas no MEV. O cabeçote utilizado foi o fixo em alta velocidade de corte (75 m/min). Além das avarias apresentadas nos filetes 3, 4 e 5 das superfícies de folga do macho, Fig. 4.37 (b), pode-se destacar o detalhe da perda de material na porção final da ferramenta no quarto dente da primeira carreira, em função da deformação plástica ocorrida no contra-fio ou calcanhar da superfície de folga do macho de corte Fig. 4.37 (d). Esta perda de material no contra-fio ocorre como consequência da deformação plástica da crista que começa na aresta cortante levando à perda do detalonamento (condição criada, durante a fabricação da ferramenta, pela remoção de material na região traseira das cristas do macho, que produz folga e reduz o atrito durante o processo de rosqueamento), e se estende por todo o comprimento da crista, de tal forma que o material escoar em direção ao contra-fio, produzindo um acúmulo de material deformado nesta região da crista do filete (Fig. 4.37 (c)). Ao continuar o processo de deformação o material se rompe, formando uma cavidade, Figs. 4.37 (b e d). Cabe ressaltar que nesta ferramenta este processo se estendeu por vários filetes de tal forma que se observou rasgamento até o oitavo filete do macho.

Provavelmente isso ocorreu devido à falta de refrigeração, acarretando altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, promovendo o aquecimento rápido da ferramenta de corte. Isto, possivelmente causou o amolecimento do material do macho,

conduzindo-o a deformação plástica. Devido às elevadas velocidades de corte, a temperatura aumenta nas zonas de cisalhamento, promovendo o aquecimento da superfície de saída da ferramenta e favorecendo as condições de aderência. Isto estende o fluxo de deformações plásticas à sub-superfície. Quanto maior a taxa de deformação, maior o nível de temperatura e da abrangência do fluxo plástico, contribuindo para a elevação dos níveis de microdureza (SALES, 1999).

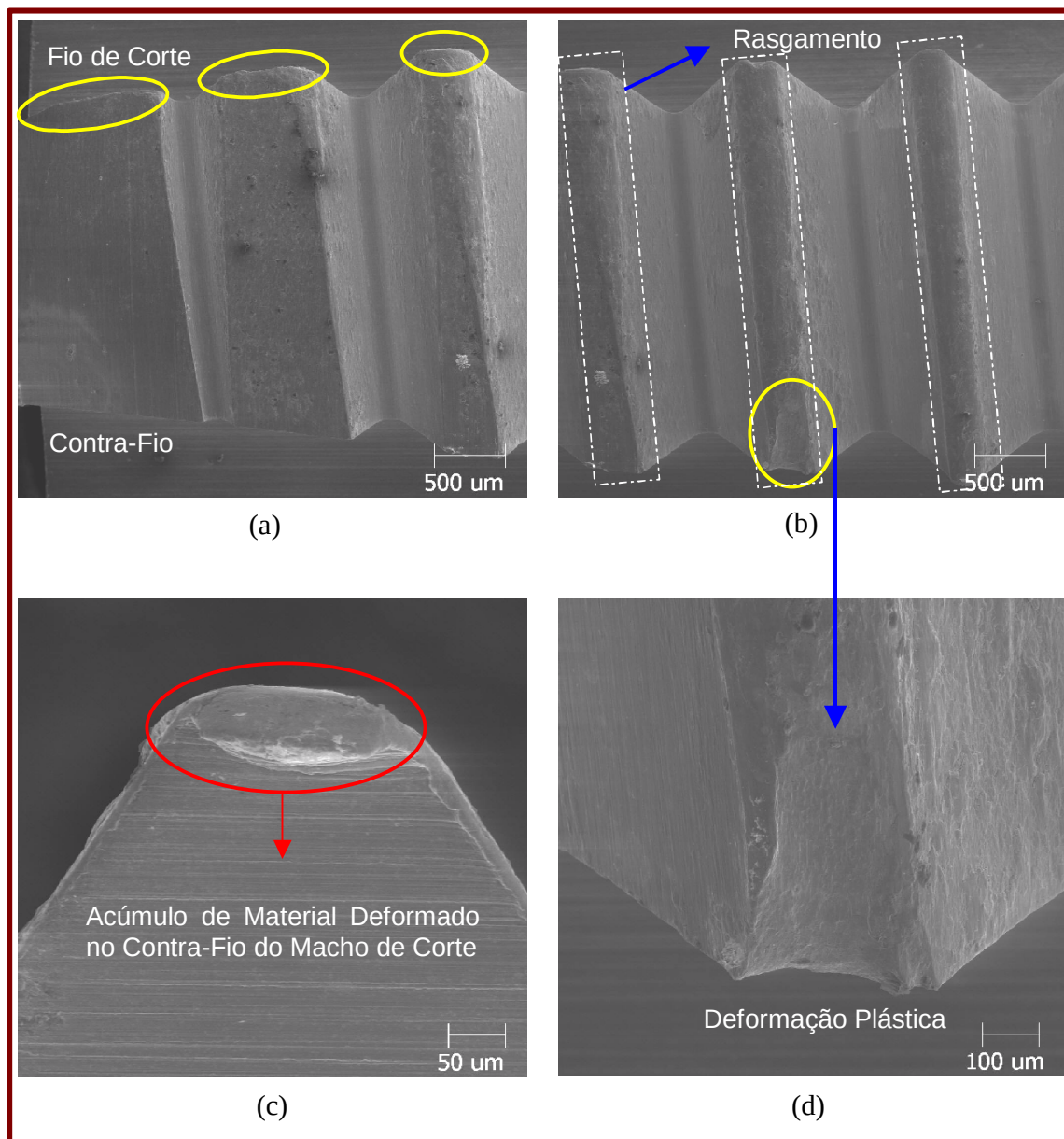


Figura 4.37 – Principais desgastes apresentados nos machos de corte sem revestimento, quando usinaram em alta velocidade de corte (75 m/min) com cabeçote fixo e sem refrigeração

Esse mecanismo de deformação plástica também foi observado nas ferramentas de HSS-E e PM, revestidas com TiN, usadas com *HSM*. Embora o número de roscas fabricados por essas ferramentas tenha sido maior, devido a presença da camada de TiN, após um certo número de roscas produzidas ocorria o destacamento do nitreto de titânio, e a ferramenta ficava com o substrato descoberto, passando a se comportar como uma ferramenta não revestida.

Para as ferramentas que sofreram tratamentos termoquímicos de nitretação os mecanismos de desgaste foram semelhantes aos observados nos machos sem revestimento. Houve adesão de material e observou-se riscos na direção de corte (superfície de folga) caracterizando o mecanismo de desgaste abrasivo. Como os testes ocorreram em alta velocidade de corte (75 m/min), observou-se o acúmulo de material deformado no contra-fio da ferramenta, conforme observado na Fig. 4.37. Embora o uso de MQL tenha diminuído o nível de desgaste em função do número de roscas fabricadas (para os machos nitretados), os mecanismos de desgaste foram semelhantes aos apresentados para as ferramentas sem revestimento.

4.4.6 – Mecanismos de desgaste apresentado nos machos utilizados com MQL

Embora o uso de MQL à base de soja, milho e canola, tenha aumentado a vida das ferramentas de corte testadas neste trabalho, constatou-se que a deformação plástica também existiu, principalmente na superfície de folga, especificamente no contra-fio da ferramenta. Tal deformação na crista pode ser vista na Fig. 4.38 onde é apresentada uma seqüência de fotomicrografias do macho HSS-E, sem revestimento, após usinar 560 roscas, com MQL. As fotos das Figs. 4.38 (a, b e c) apresentam em detalhe os desgastes nas arestas de corte e nas superfícies de folga dos primeiros dentes dessa ferramenta. Pode-se notar também que no quarto dente houve o rompimento do material no contra-fio do macho, devido à deformação plástica ocorrida nesta situação de corte. Ao continuar o processo de deformação o material se rompe e forma a cavidade apresentada na Fig. 4.37 (d).

Verifica-se através da Fig. 4.38 (d, e, f) a formação de um aglomerado de material do substrato do macho no contra-fio de praticamente todos os dentes do macho. Acredita-se que há o rompimento desse excesso de material no contra-fio do macho após o aumento do desgaste, durante o retorno da ferramenta dentro da rosca já usinada.

A presença dessa avaria nos machos testados com o uso de MQL é justificada pelo fato do fluido utilizado apresentar boas propriedades lubrificantes, mas pobres características refrigerantes. Dessa forma o fluido atua reduzindo o atrito e, portanto o calor gerado, mas não impede a elevação da temperatura na interface cavaco-ferramenta resultante da má refrigeração (retirada do calor gerado), principalmente em altas

velocidades de corte, exigindo ferramentas com coberturas mais eficientes. Mesmo que o uso de MQL permita a refrigeração através do ar comprimido, a técnica da mínima lubrificação não impede o aumento das temperaturas na superfície das ferramentas.

Embora tenha sido constatado que houve melhores resultados com o uso de óleo lubrificante no rosqueamento de ferro fundido, acredita-se que a lubrificação e, sobretudo a refrigeração não teve papel importante na retirada de calor da peça e da ferramenta, nas condições testadas, ou seja, com velocidades de corte de 75 m/min. Apesar da ferramenta sem revestimento utilizada com MQL (HSS-E SR MQL), ter fabricado 560 roscas (pelo critério do calibre) ela já apresentava níveis elevados de desgaste após usinar 320 roscas, inclusive apresentando rasgamento em alguns filetes.

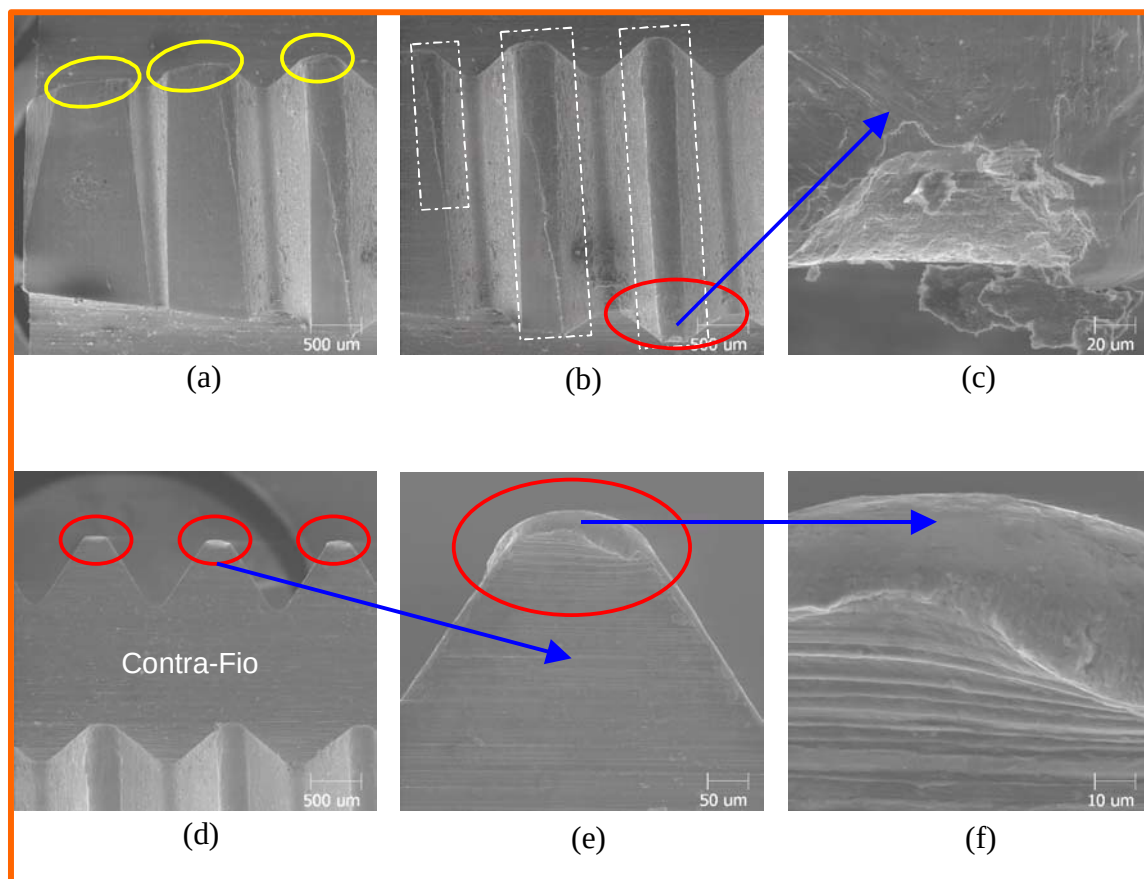


Figura 4.38 – Fotomicrografias de um Macho HSS-E sem revestimento, após usinar 560 roscas com velocidade de corte de 75 m/min, aplicando MQL; (a, b,c) desgastes, rasgamentos e deformação plástica; (d,e, f) formação de um aglomerado de material do substrato do macho por deformação nos contra-fios da ferramenta

Mesmo para as ferramentas revestidas com TiN onde foram aplicados MQL, com altas velocidades de corte (75 m/min), percebeu-se que os desgastes ocorreram com grande

intensidade. Na Fig. 4.39 observa-se fotomicrografias feitas no MEV da superfície de folga da ferramenta de HSS-E, revestida com TiN, após usinar 1000 roscas. Utilizou-se as técnicas de elétrons secundários (Fig. 4.39(a)) e elétrons retro-espalhados (Fig. 4.39(b, c, d, e, f)). A região clara nas fotos dessa figura equivale ao material da ferramenta mostrando que nestas regiões o revestimento foi arrancado deixando o substrato visível.

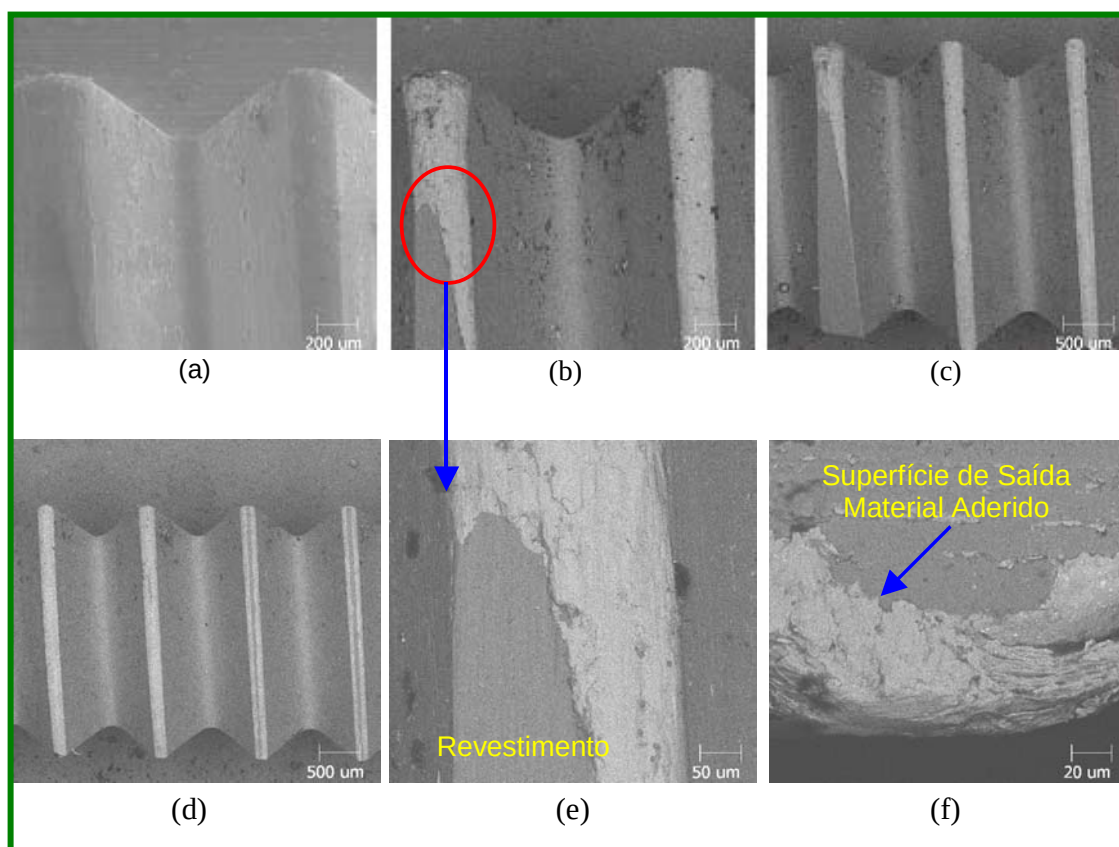


Figura 4.39 - Fotomicrografias feitas no MEV apresentando as formas de desgaste presentes no macho HSS-E revestido com TiN utilizando-se MQL : a) técnica de elétrons secundários; b), c), d), e) e f) técnica de elétrons retro-espalhados

Assim, observa-se claramente que houve desgaste excessivo em um dos filetes e rasgamento nos outros oito dentes seguintes. Cabe ressaltar que além do mecanismo de deformação plástica que levou ao rasgamento de alguns filetes das ferramentas utilizadas, outros dois mecanismos de desgaste estiveram presentes: abrasão e adesão. Na verdade o que parece ocorrer é uma evolução dos mecanismos abrasivo e adesivo para a deformação plástica com o decorrer da usinagem. Ou seja, a ferramenta em um estado avançado de desgaste, provocados pelos mecanismos adesivo e abrasivo, passa a gerar temperaturas cada vez maiores durante o corte o que resulta em um amolecimento do material da ferramenta e conseqüentemente em deformação plástica do filete.

4.4.7 Mecanismos de desgaste apresentado nos machos em função do tipo de cabeçote

Embora os mecanismos de desgaste fossem os mesmos para os dois cabeçotes, a forma como ocorreram esses desgastes merece uma análise mais criteriosa. Para o cabeçote auto-reversível a maioria das ferramentas apresentou um tipo de avaria não observada para o rosqueamento, com cabeçote fixo independente dos substratos, dos revestimentos e das velocidades de corte. Esse tipo de avaria será discutido a seguir.

Uma provável explicação para as avarias acontecidas na maioria das ferramentas, deste trabalho, pode estar relacionada com as forças resultantes, Fig. 4.40, encontradas na operação de rosqueamento interno com macho de corte. Para entender melhor o comportamento apresentado por F_z , deve-se ter em mente qual é a origem desta força. Segundo Sha; Ni; Wu, (1990), apud Reis (2004), existem três fontes possíveis para a força axial F_z durante o estágio de corte no rosqueamento:

- 1) Força normal sobre a superfície de folga nas condições de estado estável de corte;
- 2) Força normal sobre a superfície de folga na entrada da rosca;
- 3) Força normal sobre a superfície de saída nos machos de corte cujos canais não são retos

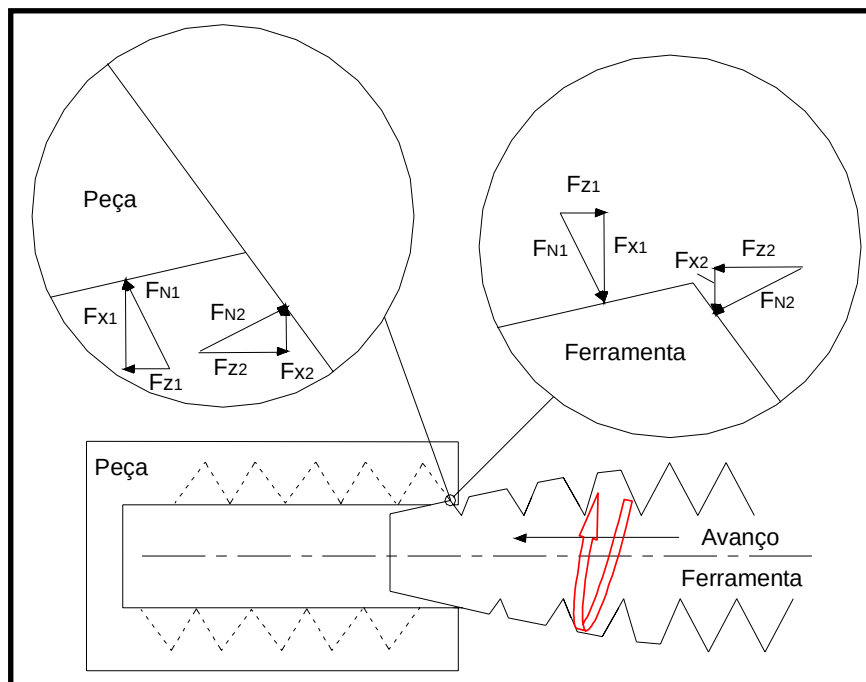


Figura 4.40 – Forças normais exercidas pela peça sobre a ferramenta e vice-versa, com suas respectivas componentes axiais e radiais (REIS, 2004)

Através da Fig. 4.41 pode-se comparar o perfil dos dentes de um macho novo (HSS-E TiN) com outros dentes do mesmo macho em fim de vida, após usinar 440 roscas. Na Fig. 4.41 (a) pode-se observar o início da parte cilíndrica do macho em estado original. Enquanto a 4.41 (b) apresenta o rasgamento em uma das extremidades do dente, comum à maioria dos machos que rosquearam com cabeçote fixo.

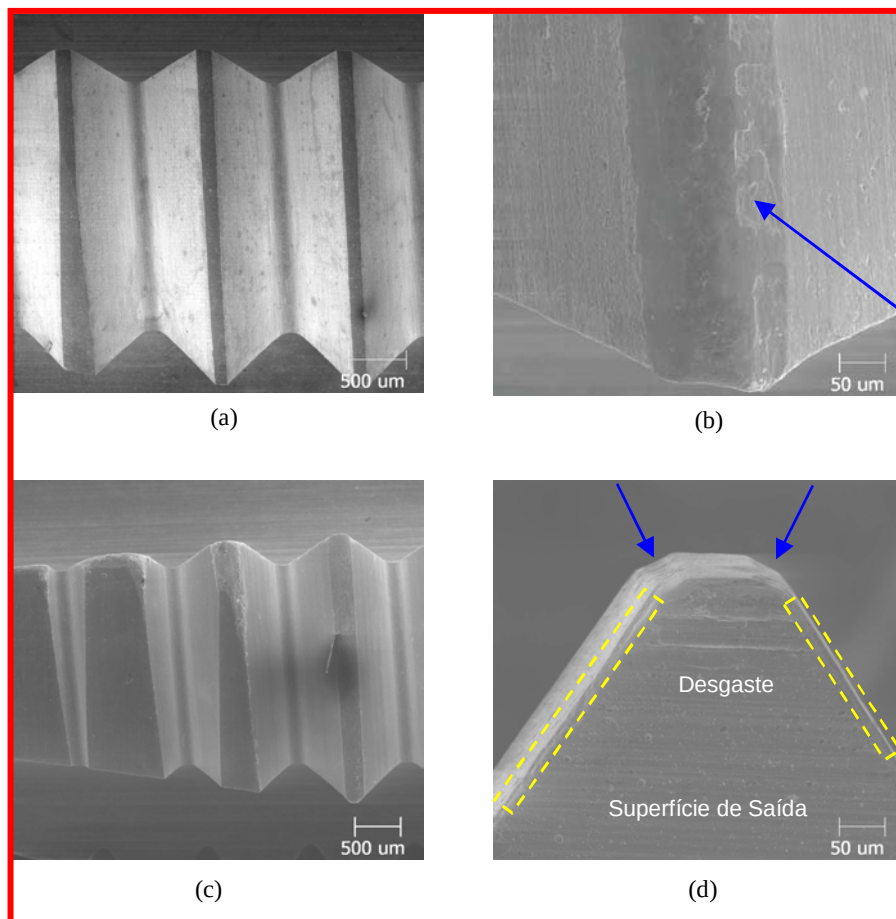


Figura 4.41 – Fotomicrografia apresentando detalhes dos tipos (formas) de desgaste apresentados nos machos de HSS-E revestidos com TiN quando usinaram com cabeçote fixo e auto-reversível; (a) macho novo; (b) macho de HSS-E TiN (fixo); (c) e (d) macho de HSS-E (auto-reversível)

Na Fig. 4.41 (c) verifica-se o perfil dos primeiros dentes de um macho (HSS-E TiN) que foi utilizado com cabeçote auto-reversível. Nota-se que esses dentes sofreram desgastes severos na aresta de corte, havendo também destacamento do revestimento em toda a extensão da superfície de folga. A Fig. 4.41 (d) apresenta o início do rasgamento do quinto dente do macho. Esse desgaste teve início após o quarto dente da ferramenta estar com um

nível de desgaste acentuado. O desgaste nos primeiros dentes da ferramenta proporcionou uma sobrecarga nos dentes posteriores, fazendo com que houvesse um aumento da taxa de sobremetal para os dentes cilíndricos.

A Fig. 4.42 ilustra bem o perfil desse desgaste, ilustrando o destacamento das camadas de revestimento em toda extensão da superfície de folga do macho, formando um chanfro de aproximadamente 45°.

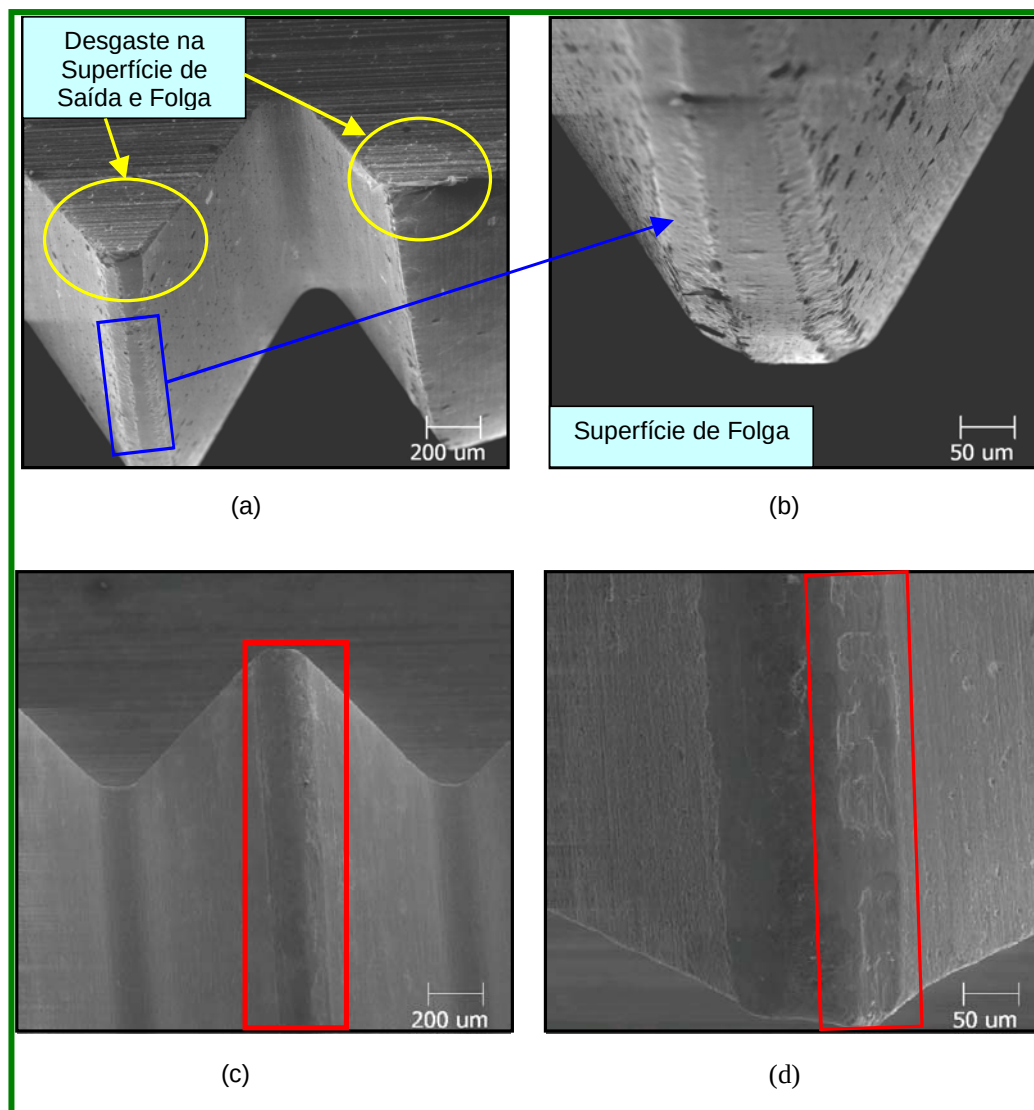


Figura 4.42 – Fotomicrografia da ferramenta HSS-PM revestida com TiN/TiAlN após usar 1000 roscas com uma velocidade de 37,5 m/min, utilizando cabeçote auto-reversível (a e b) e Ferramenta HSS-E revestida com TiN após usar 720 roscas com uma velocidade de 37,5 m/min, utilizando cabeçote fixo (c e d)

Através de análises feitas no MEV, com elétrons retro-espalhados, verificou-se que o substrato do macho ficou descoberto. Acredita-se que a diferença da forma do desgaste entre os machos utilizados com cabeçotes fixo e auto-reversível esteja relacionado às forças envolvidas no corte e no retorno da ferramenta no furo rosqueado. Para o cabeçote fixo o esforço (torque) é maior no corte, pois o mesmo retorna sincronizado com o perfil da rosca fabricada. Para o cabeçote auto-reversível os dentes do macho servem como guia para o retorno, havendo esforços nos dois lados dos dentes do macho.

A Fig. 4.43 apresenta uma seqüência de fotos feitas no MEV das ferramentas de HSS revestidas com TiN, que foram usinadas com os cabeçotes fixo e auto-reversível.

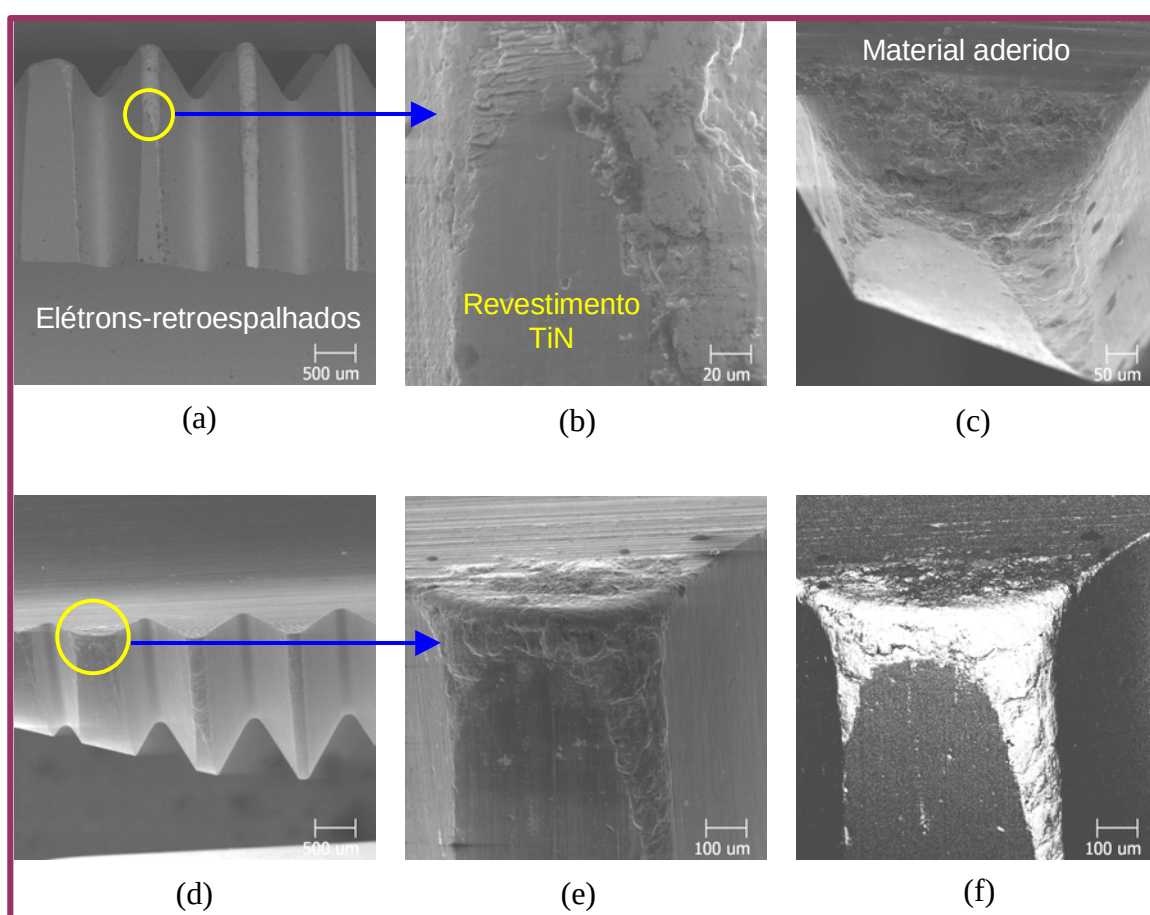


Figura 4.43 - Fotomicrografias feitas pelo MEV apresentando as formas de desgaste presentes na ferramenta (macho de HSS) revestida com TiN (seco), com velocidade de corte de 10 m/min cabeçote fixo: a), b) e c); cabeçote auto-reversível: d), e) e f)

Com ferramentas de HSS revestidas com TiN, foi possível fazer 1800 roscas na condição à seco, com os cabeçotes fixo e auto-reversível. Entretanto, verificou-se que as formas dos desgastes nas superfícies de saída e folga, foram parecidos com os desgastes

apresentados nas ferramentas de HSS-E e PM, revestidas com TiN, para as duas condições de velocidade de corte empregadas.

4.5 Qualidade das roscas fabricadas

A adesão de cavacos de ferro fundido nas roscas fabricadas e nas superfícies de saída e folga dos machos tem grande influência no desgaste e avaria das ferramentas. Verificou-se que para todas as condições de corte utilizadas nesta pesquisa, houve aderência de partículas e aglomerados de ferro fundido, tanto nas roscas fabricadas, como nas superfícies de flanco dos machos, independente dos revestimentos e das velocidades de corte desenvolvidas neste trabalho. O desprendimento desse material aderido pode acarretar prejuízos para as ferramentas de corte, pois partículas (microscópicas) de revestimento ou do próprio substrato podem se desprender do macho, provocando desgaste em suas superfícies de saída e de folga (*attrition*).

A Fig. 4.44 apresenta quatro fotomicrografias feitas no MEV, onde pode-se comparar o acabamento final de roscas fabricadas por ferramentas de HSS-PM, revestidas com TiN/TiAlN, usadas com velocidades de corte de 75 m/min, em duas situações: 1) macho novo e 2) macho em fim de vida. Para as ferramentas revestidas novas a ocorrência de material aderido nos flancos das roscas foi menor do que para as ferramentas em fim de vida, conforme a Fig. 4.44 (a). Já para as ferramentas em fim de vida, observa-se a presença de material aderido à superfície das roscas, Fig. 44 (b, c, d). Tal material pode ter várias origens. Acredita-se que as principais sejam: partículas provenientes de APC formada durante o processo; e pedaços de cavaco que são comprimidos contra a parede das roscas durante o corte e principalmente no retorno da ferramenta.

A mesma observação serve para as ferramentas sem revestimento, as quais apresentaram adesão, independente do estado de conservação do macho de corte. Essa mesma ocorrência foi observada para as ferramentas revestidas, em fim de vida, e portanto, com o revestimento já deteriorado.

Como dito anteriormente, tais partículas podem ter sua origem relacionada com a presença de cavacos tanto no estágio de corte como no retorno das ferramentas. Esta condição é acentuada neste trabalho onde as roscas foram feitas em furos cegos, não permitindo que os cavacos fossem eliminados no fim do furo. Desta forma estes cavacos seriam comprimidos contra a peça pela ferramenta, principalmente durante o estágio de retorno. O escorregamento entre o contra-corpo (macho) e o corpo (ferro fundido cinzento), além dos fragmentos de desgaste provenientes da ferramenta ou do material, são os

maiores responsáveis pelos desgastes abrasivos ocorridos neste tipo de operação. Além disso, os cavacos aderidos são comprimidos contra a ferramenta ou a peça, aumentando a dureza pelo encruamento dos cavacos (ZUM GAHR, 1987).

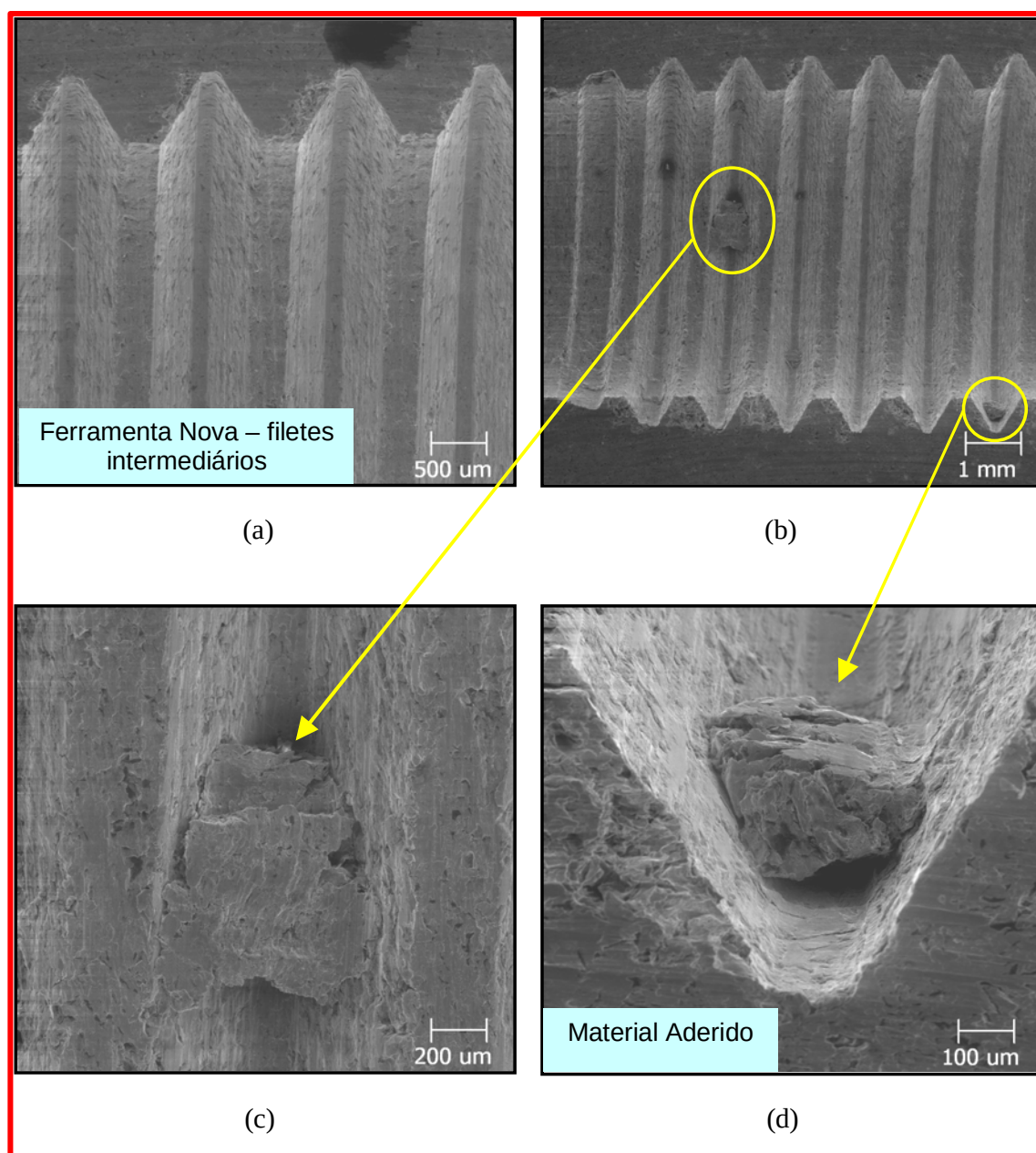


Figura 4.44 – Fotomicrografias das roscas fabricadas com machos PM TiN/TiAlN novo (a) e em fim de vida (b, c e d) com alta velocidade de corte (75 m/min) e detalhes do material aderido

A Fig. 4.45 mostra a adesão de ferro fundido nas roscas fabricadas, com as velocidades de corte moderada (37,5 m/min). A adesão foi observada em todas as situações

de corte, sendo menor para as ferramentas novas. Acredita-se que os motivos são os mesmos já discutidos na seção anterior.

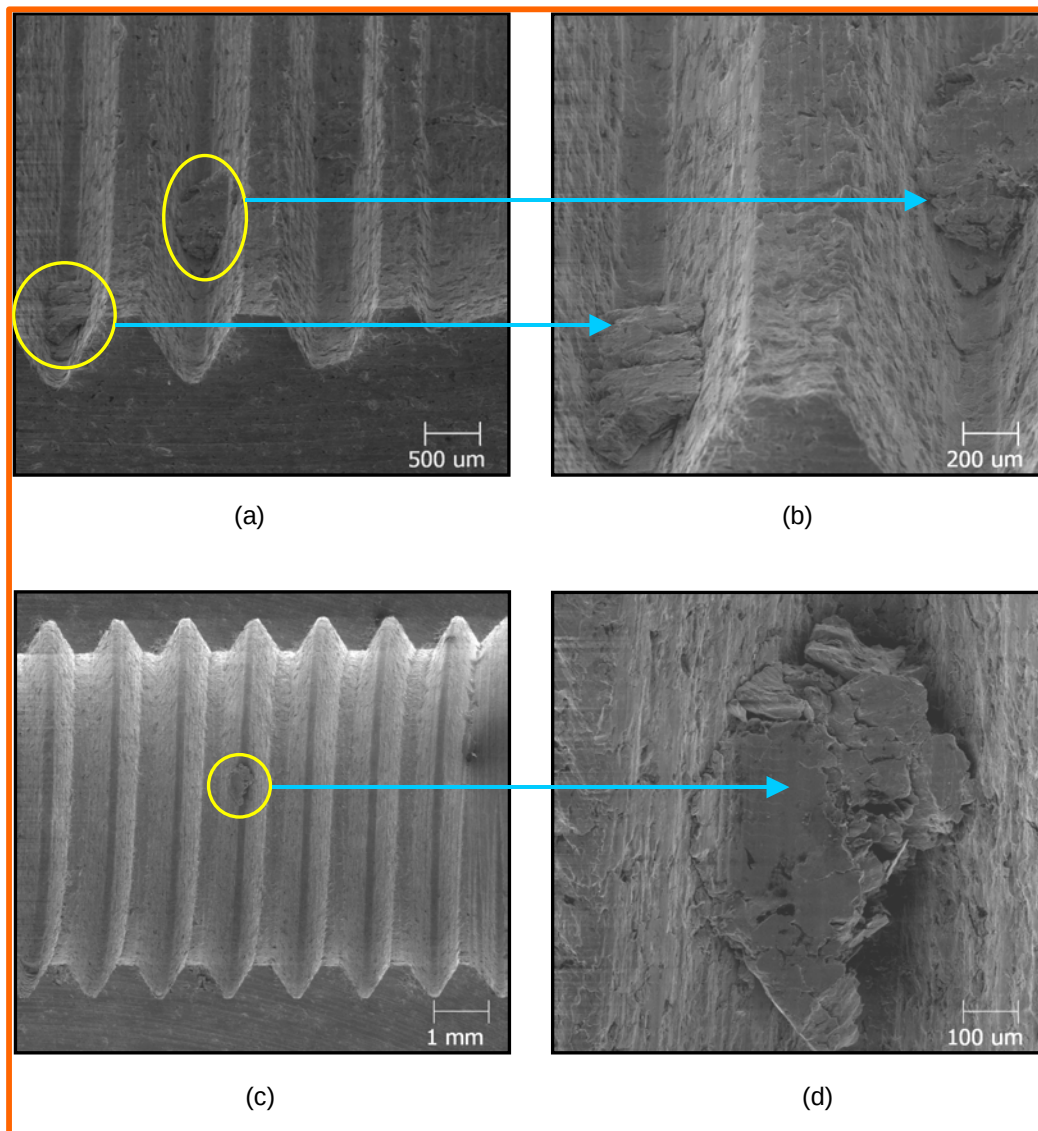


Figura 4.45 – Fotomicrografias das roscas fabricadas com machos HSS-E TiN/TiAlN (a e b) e ferramenta PM TiN/TiAlN (c e d); ambas com cabeçote auto-reversível e com velocidade de corte de 37,5 m/min

4.6 Torque no rosqueamento

Para facilitar o entendimento do comportamento do sinal de torque medido durante o rosqueamento interno com macho de corte, foram plotados gráficos com baixas velocidades

de corte, com o intuito de determinar os três estágios em que se divide esse processo: 1) corte; 2) repouso (parada da ferramenta no final do furo); 3) retorno da ferramenta. A Fig. 4.46 mostra o comportamento do torque durante o rosqueamento com mandril fixo e velocidade de corte de 10 m/min, com uma ferramenta nova.

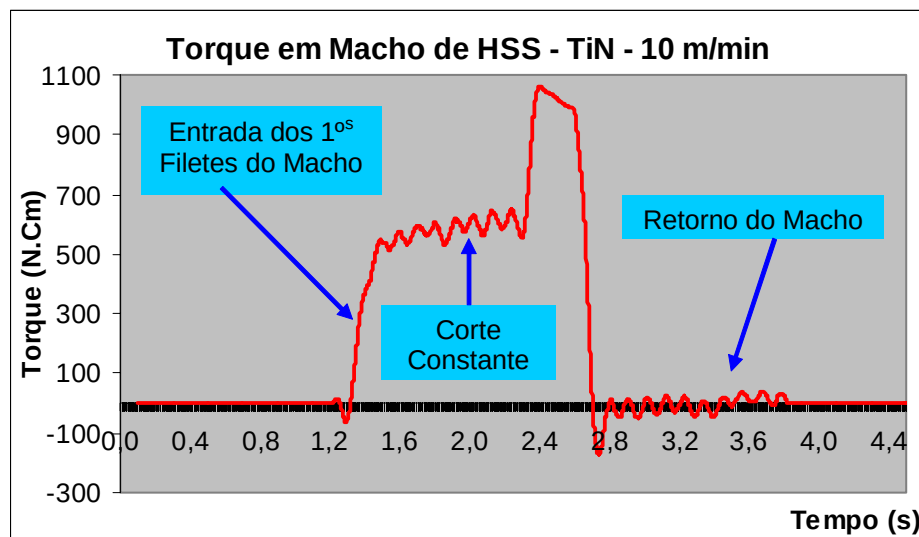


Figura 4.46 – Sinal de torque no rosqueamento com cabeçote fixo - velocidade de corte de 10 m/min

Para facilitar a interpretação o sinal foi filtrado, apresentando uma média móvel de cem pontos. Observa-se que há um aumento no sinal do torque a partir do momento que ocorre o contato do primeiro dente do macho (região cônica) com a peça. Esse aumento persiste até a entrada do sexto dente do macho, o que equivale no caso específico das ferramentas utilizadas neste trabalho, à penetração da região cônica da ferramenta na peça, já que tais ferramentas possuem seis dentes na região cônica, sendo dois em cada carreira. Em seguida, após a inserção do sétimo dente do macho (o primeiro da parte cilíndrica), o sinal do torque permanece praticamente constante, podendo haver pequenas alterações, devido principalmente ao enclausuramento dos cavacos, conforme descrito por Cao e Sutherland, (2002). Após um certo tempo, o sinal de torque sobe novamente, quase que instantaneamente, devido à frenagem do motor da máquina, que proporciona uma diminuição da velocidade de corte, aumentando as forças de corte. Esse valor fica registrado, pois o dinamômetro continua a adquirir o sinal, até haver a inversão da rotação e conseqüentemente o retorno da ferramenta. Para o retorno do macho o sinal do torque diminui drasticamente, podendo apresentar até um sinal negativo, devido a reversão do eixo-árvore da máquina e principalmente ao fato de que a ferramenta encontra-se travada

no final da rosca. À medida que os dentes do macho vão saindo da peça o sinal tende a normalizar, ficando muito próximo de zero. Se o desgaste for muito acentuado, o torque apresenta grandes valores no retorno do macho. Altos valores do sinal de torque durante o retorno da ferramenta podem também estar relacionados ao grande volume de cavacos entre os canais e os dentes da ferramenta, como, por exemplo, quando houver fluido de corte na usinagem de ferros fundidos, conforme será abordado posteriormente.

4.6.1 Comparação do Torque medido com as ferramentas novas utilizando cabeçote fixo e auto-reversível (10 m/min).

Para compreender melhor os sinais de torque buscou-se relacionar a influência dos dois cabeçotes de fixação (auto-reversível e fixo) no rosqueamento com ferramentas no estado original (nova). A Fig. 4.47 apresenta a configuração dos torques medidos com esses cabeçotes, em baixa velocidade de corte (10 m/min), em função do tempo de usinagem.

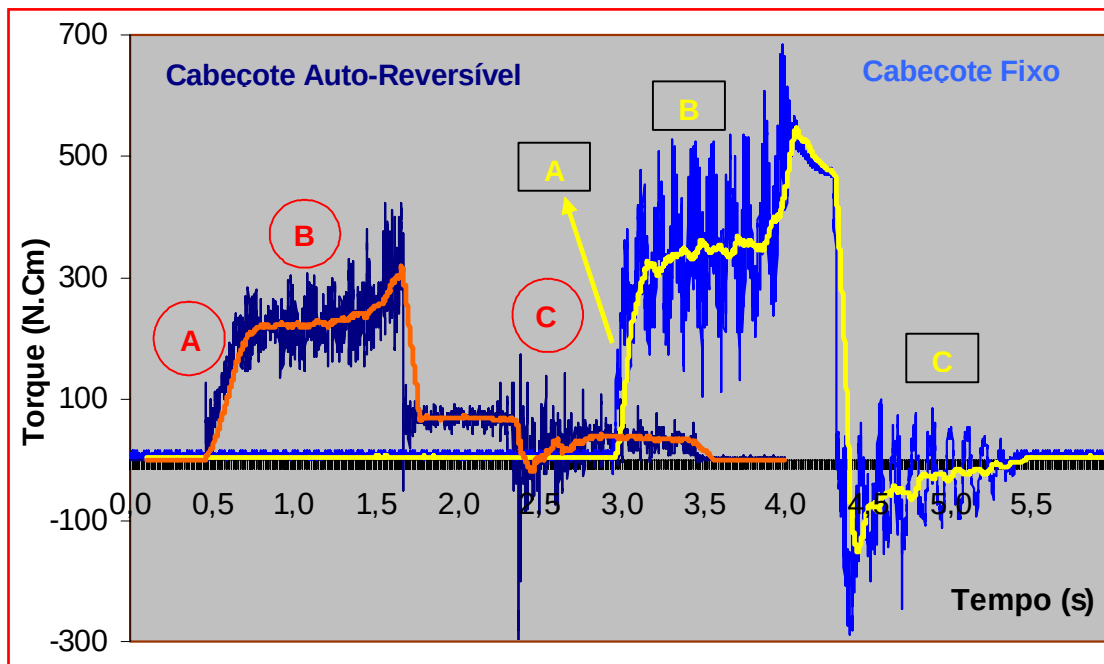


Figura 4.47 – Configuração do torque medido com cabeçote Auto-Reversível e Fixo (10 m/min). “A” constitui a entrada dos primeiros dentes. “B” representa o avanço dos dentes cilíndricos do macho e “C” significa o retorno do macho no furo rosqueado

Verifica-se que os dois sinais de torque apresentam valores distintos, mas a forma possui características semelhantes, com pequenas alterações no traçado dos gráficos. Em ambos os gráficos podem-se verificar o aumento acentuado do torque no momento da

entrada dos primeiros dentes do macho (parte cônica da ferramenta), representada pela letra “A”. Em seguida é possível verificar que o torque aumenta, mas em proporção muito inferior à fase inicial, representando a penetração do macho ao longo da rosca, representado por “B”. E finalmente há a reversão (para o cabeçote fixo é a máquina que inverte a rotação) e conseqüentemente o retorno da ferramenta, representado pela letra “C”. Para o cabeçote auto-reversível o eixo-árvore da máquina não pára de girar e quem faz a inversão de rotação é o próprio cabeçote, através de um conjunto de engrenagens internas.

Para os dois cabeçotes é possível verificar que o torque no retorno do macho possui valores negativos. Isto pode ser explicado em função da inversão da rotação da máquina (cabeçote fixo) ou do cabeçote auto-reversível, promovendo forças no sentido oposto ao corte, pois o macho encontra-se preso aos cavacos (furo cego).

4.6.2 Comparação do Torque medido com as ferramentas novas e em fim de vida utilizando cabeçote fixo com velocidades altas e moderadas

A Fig. 4.48 apresenta o torque medido entre duas ferramentas novas, fabricadas pela metalurgia do pó, revestidas com TiN/TiAlN, empregadas com duas velocidades distintas (75 e 37,5 m/min), utilizando o cabeçote fixo. Os valores do torque foram muito próximos, apresentando alguns picos superiores para a ferramenta que usinou com velocidade de corte moderada (37,5 m/min).

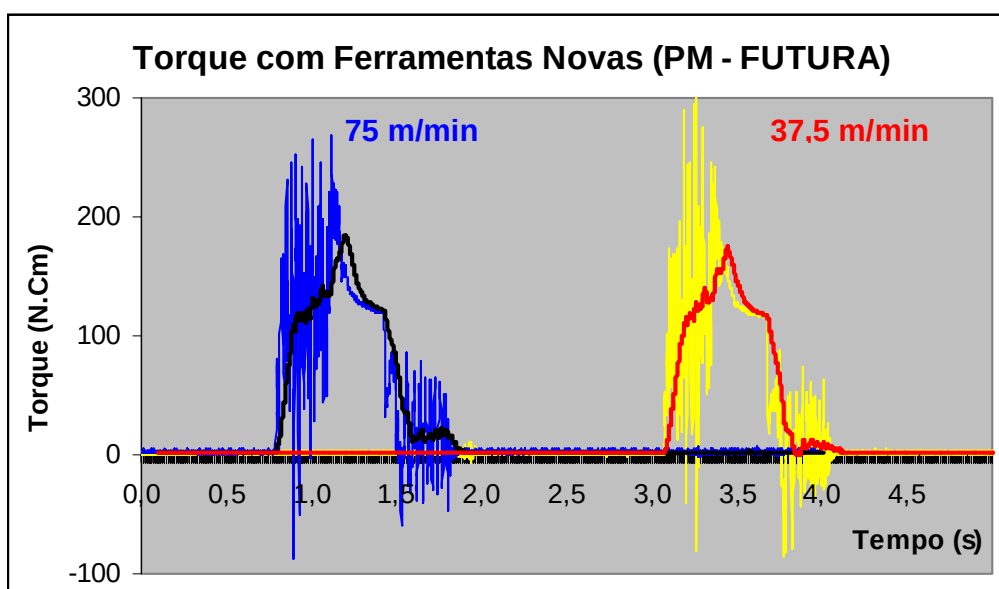


Figura 4.48 – Comparação do torque entre dois machos de corte novos, utilizando o cabeçote fixo em duas velocidades de corte: a) 75 m/min e b) 37,5 m/min

Observa-se que os valores do torque foram relativamente baixos (aproximadamente 200 N.Cm). Já o torque medido com uma ferramenta em fim de vida esses valores podem ser muito diferentes. Na Fig. 4.49 são apresentados os gráficos das médias móveis dos sinais de torque medida no rosqueamento com ferramentas novas e desgastada, já em fim de vida. Nesta figura fica evidenciado o aumento do torque no final da vida do macho.

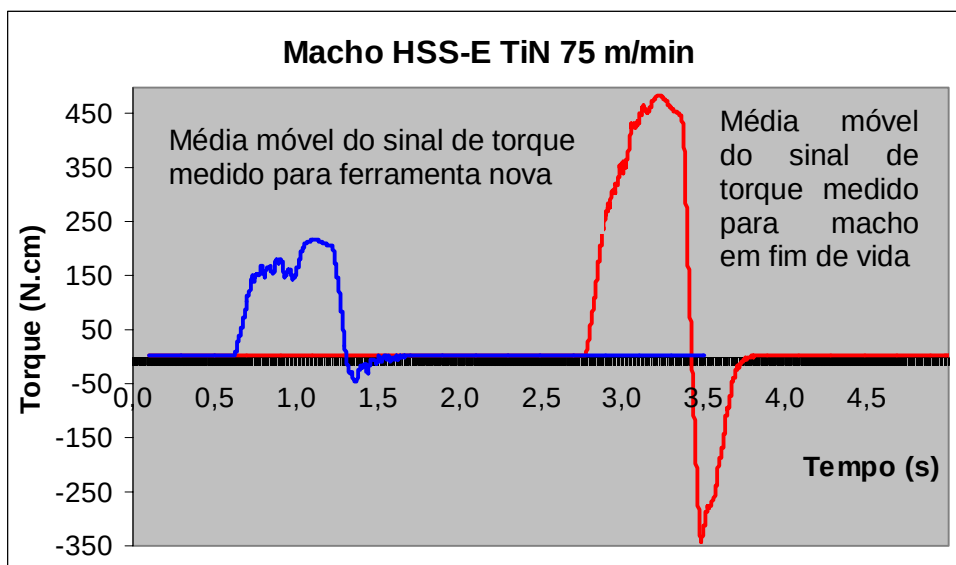


Figura 4.49 – Médias móveis dos torques medidos em duas ferramentas de HSS-E revestidas com nitreto de titânio, sendo a primeira (nova) e a segunda em fim de vida após usinar 320 roscas, com cabeçote fixo

O valor do torque para o macho HSS-E revestido com TiN (novo) foi de aproximadamente 200 N.Cm. Essa mesma ferramenta ao final de vida (após usinar 320 roscas com 75 m/min de velocidade de corte) apresentou um valor médio de torque superior à 450 N.Cm. Conforme foi discutido anteriormente, o desgaste nos primeiros dentes desse macho foi muito acentuado. Houve destacamento do revestimento em quase todos os dentes do macho, o que aumentou o contato do substrato da ferramenta com o corpo de prova. Além disso, a ausência dos revestimentos aumenta a aderência do ferro fundido na ferramenta, proporcionando maiores desgastes e conseqüentemente aumentando o torque.

A Fig. 4.50 apresenta algumas fotomicrografias feitas no MEV, caracterizando a adesão. Dependendo do estado de desgaste do macho e da quantidade de cavacos presos nos canais da ferramenta, os valores de torque podem ser alterados, independentes do tipo de cabeçote e das velocidades utilizadas. Em condições normais (macho novo), os revestimentos facilitam o escoamento dos cavacos sobre as superfícies das ferramentas

revestidas, pois o atrito é reduzido. Contudo, dependendo do grau de desgaste dos machos, o atrito e conseqüentemente o torque são maiores, devido à ausência dos revestimentos.

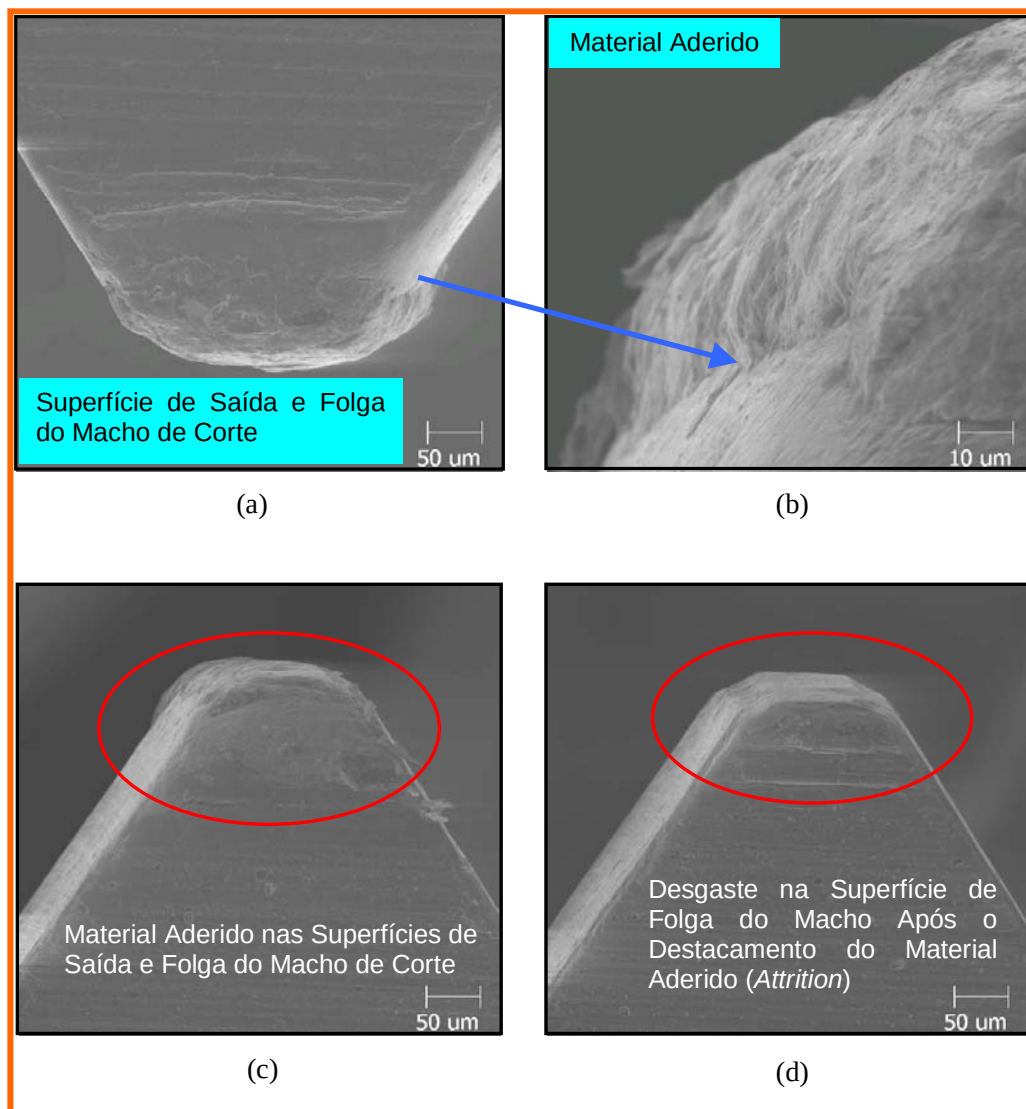


Figura 4. 50 – Fotomicrografias ilustrando a presença de material aderido na superfície de saída e folga dos machos HSS-E TiN (a e b); e PM – TiN/TiAlN (c e d) com cabeçote fixo

4.6.3 Influência dos revestimentos no torque

A Fig. 4.51 apresenta o torque medido na usinagem com duas ferramentas (novas), fabricadas pelo método convencional (HSS-E), sendo uma revestida com nitreto de titânio (TiN) e outra sem revestimento. Os testes foram realizados com velocidade de corte de 75 m/min, utilizando o cabeçote fixo. Pode-se constatar que o torque foi significativamente menor para a ferramenta revestida com TiN. Pode-se atribuir esses resultados à redução da aderência e atrito entre a ferramenta e a peça, diminuindo as forças decorrentes da fricção

entre o macho, a peça e os cavacos (EZUGWU; OKEKE; MACHADO, 1999; YUHARA, 2000; SCHULZ et al., 2000; GUANI; CHOUDHURY; MASJUKI, 2004; REIS, 2004).

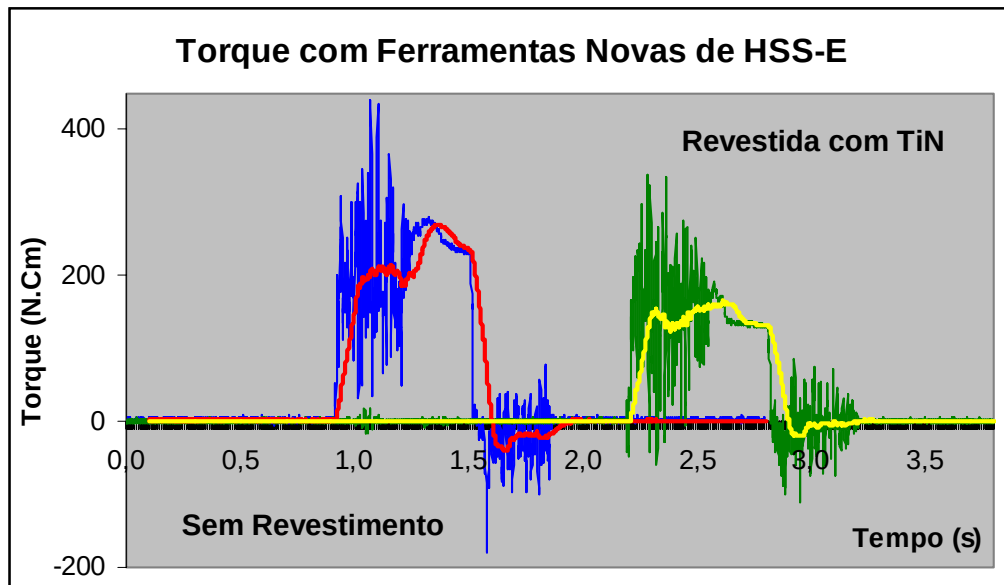


Figura 4.51 – Influência do revestimento TiN no sinal de torque gerado no rosqueamento do ferro fundido cinzento GH 190 utilizando o cabeçote fixo com uma velocidade de corte de 75 m/min

Neste caso os valores registrados para o torque quando a ferramenta estava retornando também foram pouco significativos. Quando a ferramenta encontra-se desgastada, o torque aumenta tanto no corte como no retorno, conforme será descrito posteriormente. Além disso, o sinal de torque é transiente, pois os cavacos podem ficar enclausurados nos canais dos machos, provocando alterações neste sinal (CAO; SUTHERLAND, 2002).

Outro fator que pode aumentar o torque no rosqueamento de ferro fundido cinzento é a condição de lubrificação.

4.6.4 Influência da lubrificação no rosqueamento interno com macho de corte

Nas Figs. 4.52 e 4.53, são plotados respectivamente os gráficos das médias móveis dos sinais de torque medidos no rosqueamento, com machos de HSS-E sem revestimento e revestidos com TiN, em altas velocidades de corte utilizando cabeçote fixo nas condições a seco e com MQL. Verificou-se que o sinal de torque foi alto em todas as condições, se comparados aos medidos no rosqueamento com as ferramentas revestidas com TiN/TiAlN,

que será abordado à seguir. Percebe-se também que para a ferramenta sem revestimento, o torque na condição a seco, foi menor que o medido quando se aplicou MQL.

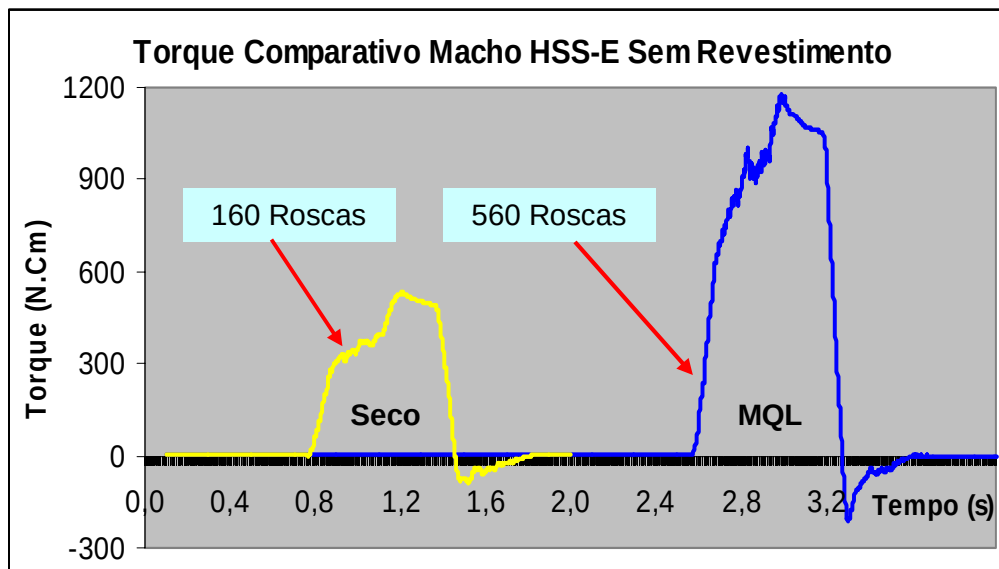


Figura 4.52 - Médias móveis dos torques medidos em duas ferramentas de HSS-E sem revestimento com alta velocidade de corte utilizando cabeçote fixo nas condições a seco e com MQL

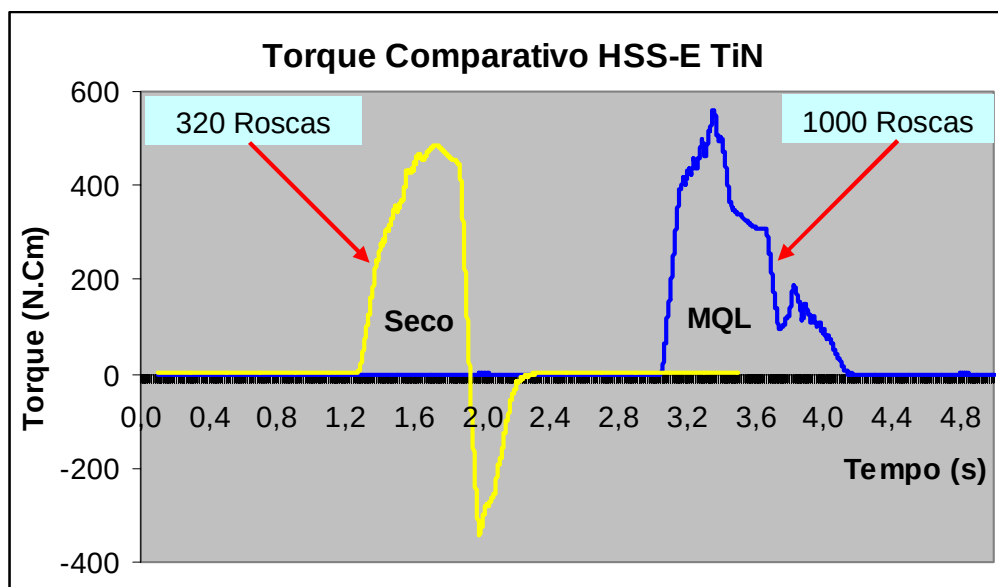


Figura 4.53 – Médias móveis dos torques medidos em duas ferramentas de HSS-E revestidas com TiN com alta velocidade de corte utilizando cabeçote fixo nas condições a seco e com MQL

Acredita-se que os cavacos em contato com o fluido de corte tenham formado uma pasta cinzenta, a qual preencheu os canais do macho, assim como o espaço vazio entre os dentes da ferramenta, aumentando o contato entre a peça e o macho. Cao e Sutherland, (2002), fizeram um estudo de rosqueamento usando diversos tipos de lubrificantes, em aços e mediram o torque em diversas situações de corte. Foi comprovado que o fato de usar óleo lubrificante nesta operação de usinagem não reduziu as forças de corte e que o torque é muito inconsistente e varia de acordo com o enclausuramento dos cavacos, que pode ser o maior motivo da quebra por torção de muitas ferramentas de rosquear.

A Fig. 4.54 apresenta a condição que fica os canais de um macho de corte, após usinar ferro fundido cinzento com óleo lubrificante. Pode-se verificar o empacotamento dos cavacos entre os quatro canais e filetes da ferramenta (DA MOTA et al., 2005).

Observou-se neste trabalho também que os valores do torque eram muito variados. Mesmo repetindo os testes em uma sequência de três furos, nas mesmas condições de usinagem, os resultados do torque eram distintos. Essa variação aconteceu para todos os testes, independente dos revestimentos, velocidades de corte, tipo de cabeçote e lubrificação. Isso comprova a inconsistência do valor do torque para o rosqueamento.



Figura 4.54 - Fotos ilustrativas de um macho de corte após usinar ferro fundido cinzento com óleo lubrificante (MQL)

4.6.5 Torque medido para as ferramentas revestidas com TiN/TiAlN

A Fig. 4.55 mostra o desempenho das ferramentas revestidas com multicamadas (TiN/TiAlN), nas condições de velocidade de corte alta e moderada, sendo utilizado cabeçote fixo. Observa-se que o sinal do torque durante o estágio de corte foi superior para a velocidade moderada. Esse comportamento a princípio confirma o que diz a literatura corrente (TRENT; WRIGHT, 2000; MÜLLER, 2004; MACHADO; DA SILVA, 2004;), segundo a qual a temperatura na usinagem aumenta proporcionalmente com as velocidades de corte,

favorecendo a deformação plástica do material a ser usinado, nas zonas de cisalhamento primária e secundária, diminuindo as forças de corte.

Entretanto, o nível de desgaste das ferramentas e a quantidade de cavacos enclausurados nos canais e nos dentes do macho também têm grande influência nos valores dos sinais do torque (CAO; SUTHERLAND, 2002), conforme descrito anteriormente. Verifica-se que o macho que usinou com 75 m/min apresentou um torque negativo (durante o estágio de retorno) muito superior à outra ferramenta, comprovando o seu alto nível de desgaste ou caracterizando a presença de material aderido na ferramenta, devido ao fato da ausência do revestimento. Todas as ferramentas deste trabalho foram observadas em microscópio ótico e eletrônico de varredura, o que permitiu constatar que houve a presença de desgastes e avarias, principalmente na superfície de folga dos machos analisados. Assim, a ferramenta que usinou com alta velocidade de corte apresentou lascamento na superfície de folga dos primeiros dentes no final da vida. Já o macho que rosqueou com velocidade de corte moderada apresentou material aderido na superfície de saída, desgaste de flanco e lascamentos na superfície de folga. Provavelmente isso provocou o maior torque medido durante o estágio de corte, além da temperatura ser inferior, quando da comparação com ao rosqueamento em alta velocidade.

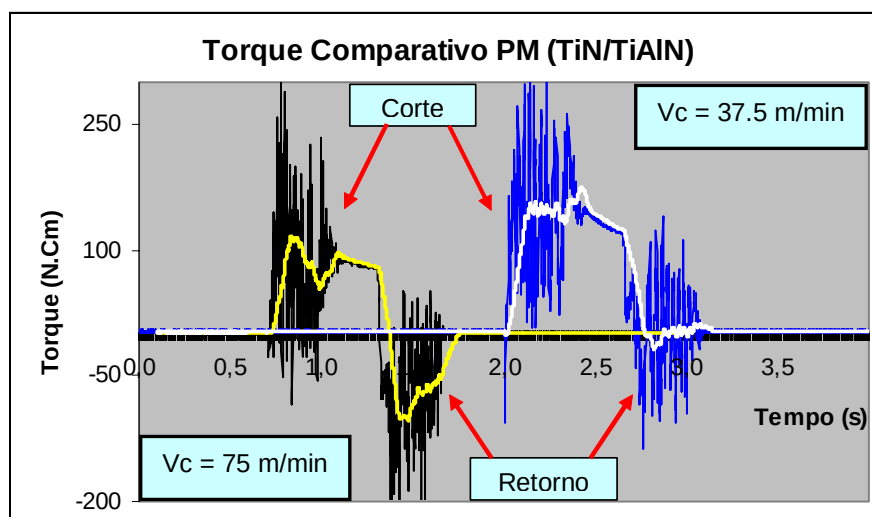


Figura 4.55 – Torque comparativo entre machos revestidos com TiN/TiAlN com velocidades de corte alta e moderada, utilizando cabeçote fixo

4.6.6 Torque medido para as ferramentas revestidas com TiN e TiN/TiAlN

Pode-se dizer que o torque para as ferramentas revestidas com nitreto de titânio (TiN), em fim de vida, é superior ao torque medido com as ferramentas revestidas com

multicamadas (TiN/TiAlN). Atribui-se esse fato ao alto grau de desgaste apresentado pelas ferramentas revestidas com TiN, deixando os substratos descobertos, aumentando o atrito entre a peça e a ferramenta de corte. Avaliando-se diversos gráficos, notou-se que as ferramentas revestidas com nitreto de titânio (TiN) sofreram maiores desgastes, pois o valor do torque foi significativamente maior.

A Fig. 4.56 mostra a comparação entre o torque medido entre duas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN e TiN, respectivamente em final de vida. Observa-se que os valores do torque possuem pequenas diferenças. Entretanto, pode-se ressaltar que o torque para o retorno foi maior para a ferramenta revestida com TiN.

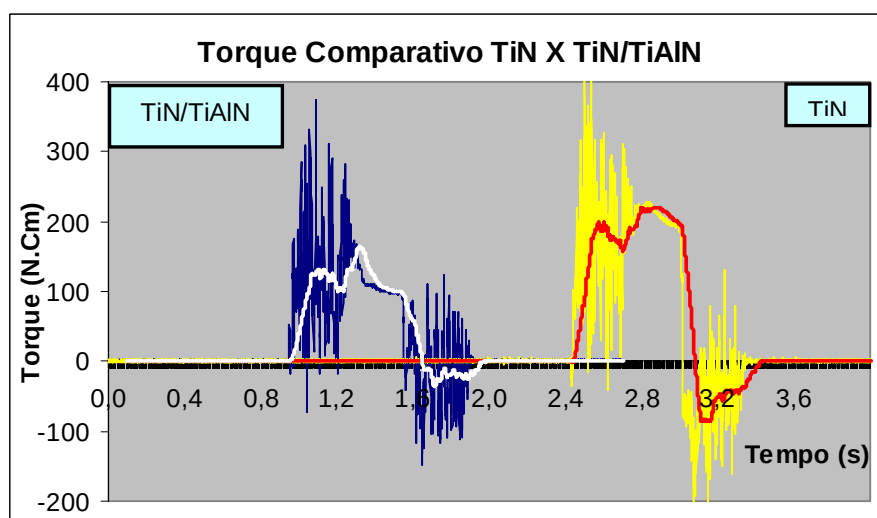


Figura 4.56 – Torque entre dois machos de corte fabricados pela Metalurgia do Pó, revestidos com multicamadas de TiN/TiAlN e TiN, utilizados em alta velocidade de corte (75 m/min)

4.6.7 Torque medido para os dois cabeçotes (fixo e auto-reversível)

Para comparar o comportamento do torque dos cabeçotes utilizou-se somente o resultado obtido durante a usinagem com velocidades moderadas (37,5 m/min) e baixas (10 m/min). Em média, os sinais de torque medidos nos ensaios com cabeçote alto-reversível apresentaram valores superiores aos medidos na usinagem com cabeçote fixo, conforme se observa nas Fig. 4.57. Neste caso, as duas ferramentas produziram o máximo de roscas prevista neste trabalho (1000 roscas).

Entretanto, dependendo do estado de desgaste do macho e da quantidade de cavacos presos nos canais da ferramenta, os valores podem ser alterados, independentes do tipo de cabeçote e das velocidades utilizadas.

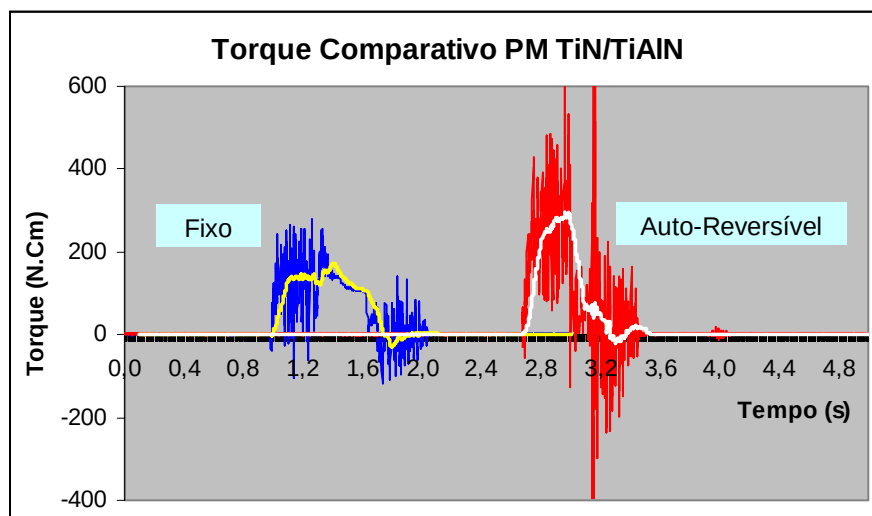


Figura 4.57 - Torque comparativo entre machos revestidos com multicamadas de TiN/TiAlN com cabeçote fixo e auto-reversível, com velocidade de corte de 37,5 m/min

A Fig. 4.58 mostra o torque para duas ferramentas (machos HSS-E TiN), em fim de vida. Para o macho que usinou com o cabeçote fixo foram feitas 720 roscas e o torque ficou em torno de 200 N.Cm. Já para a outra ferramenta (cabeçote auto-reversível), foram feitas 440 roscas e o torque foi superior, chegando próximo a 400 N.Cm (em média).

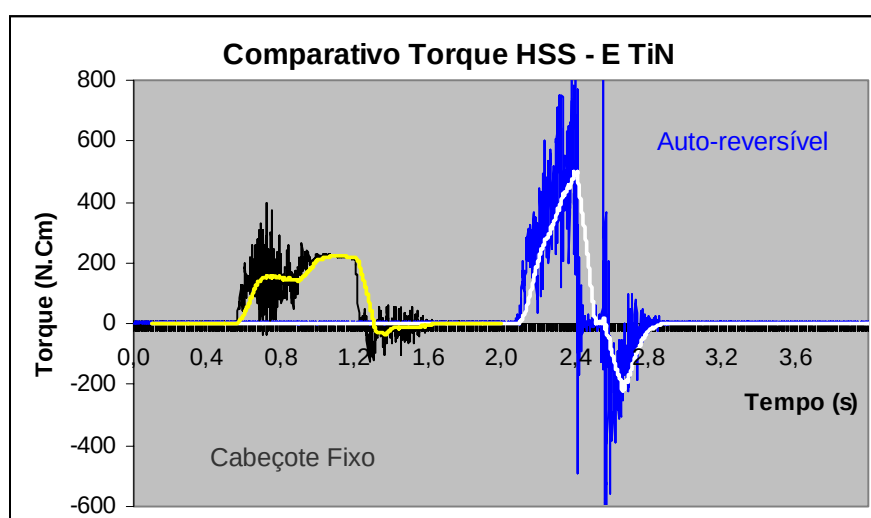


Figura 4.58 - Torque comparativo entre machos revestidos com TiN, utilizando cabeçote fixo e auto-reversível, com velocidades moderadas

CAPÍTULO V

Conclusões

Os resultados desse trabalho permitem afirmar que:

- O aumento da velocidade de corte reduziu a vida das ferramentas (n° de roscas usinadas), que o revestimento com multicamadas de TiN/TiAlN teve desempenho bem superior (vida e resistência ao desgaste) ao das ferramentas sem revestimento e revestidas somente com TiN. Além disso, o tipo de substrato não acarretou mudanças significativas na vida das ferramentas revestidas que usinaram com 75 m/min, mas foi relevante para as velocidades de corte moderadas (37,5 m/min). Já o tipo de cabeçote teve influência no número de roscas fabricadas, pois o cabeçote fixo conseguiu fabricar aproximadamente 16% de roscas a mais do que o cabeçote auto-reversível ($V_c = 37,5$ m/min). Ficou evidente também que o uso de MQL no rosqueamento de ferro fundido cinzento aumentou significativamente a vida das ferramentas.
- Para o cabeçote fixo rosquear em alta velocidade de corte é necessário prever um espaço entre a peça e a ferramenta, com o objetivo de garantir a velocidade programada após a aceleração sincronizada da velocidade e do avanço de corte. Entretanto, essas velocidades (corte e avanço), não são constantes até o final da rosca (furo cego). A máquina necessita de um intervalo de tempo para desacelerar o eixo-árvore e parar no final da rosca. Isso, conseqüentemente, aumentará o tempo de usinagem e os custos de fabricação.

- O rosqueamento com cabeçote auto-reversível permite usinar com velocidade de corte constante. Contudo, para usinar roscas com furos não passantes (cegos) com medidas precisas esse cabeçote não é recomendado, pois a posição de parada do macho não é exata, ao contrário do acontece com o cabeçote fixo (quando programado com encoder).
- A abrasão deve ter sido o principal mecanismo de desgaste predominante em todas as ferramentas utilizadas neste trabalho, embora as fotos feitas no MEV não mostraram com clareza tais evidências. A adesão foi constatada em quase todas as ferramentas analisadas. No entanto, a deformação plástica foi o principal processo de destruição das ferramentas de corte, principalmente no contra-fio dos machos, quando utilizadas com 75 m/min.
- Os sinais de torque permitiram fazer análises do estado de desgaste dos machos, apresentando resultados que possibilitaram comparar o desempenho dos revestimentos, bem como a influencia da velocidade de corte na vida das ferramentas e o desempenho dos cabeçotes fixo e auto-reversível.
- O torque foi maior para as ferramentas sem revestimento e revestidas somente com TiN. O fato de usar MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação) em ferro fundido cinzento, não diminuiu o torque. Entretanto, a vida das ferramentas aumentou aproximadamente dois terços, quando comparadas com as ferramentas que usinaram a seco.
- A presença de material aderido na superfície das roscas usinadas e a grande quantidade de cavacos nos canais e nos filetes dos machos proporcionaram variações no torque. O entupimento dos espaços vazios entre a peça e a ferramenta gerou o aumento do torque, proporcionando picos nos gráficos de torque.
- As ferramentas que atingiram alto grau de desgaste proporcionaram piores qualidades das roscas fabricadas.

CAPÍTULO VI

Proposta para trabalhos futuros

A metodologia empregada neste trabalho suscitou dúvidas que fazem jus a investigação posterior, tais como:

1. Investigar o desempenho dos machos revestidos, utilizados neste trabalho, em altas velocidades de corte empregando outros tipos de materiais, como o ferro fundido vermicular e aços de diversas composições.
2. Averiguar o comportamento do sinal de torque e da força de corte no rosqueamento de aços e ferros fundidos, com machos revestidos com outros revestimentos, como o Alcrona e Helica. O uso de fluidos de corte poderá ser investigado na usinagem dos aços.
3. Pesquisar a importância do sincronismo de avanço e velocidade de corte no rosqueamento interno com machos de corte, utilizando máquinas CNC de diversos fabricantes, aplicando técnicas de filmagem de alta velocidade.
4. Investigar a formação dos cavacos em furos cegos e passantes em diversos materiais, utilizando machos de corte com geometrias distintas, e com substratos de metal duro.
5. Fazer uma análise de custos dos processos de rosqueamento, comparando os desempenhos dos dois cabeçotes utilizados neste trabalho (fixo e auto-reversível).

CAPÍTULO VII

Referências bibliográficas

AGAPIOU, J.S. Evaluation of the effect of high speed machining on tapping. **Journal of Engineering for Industry** – Transactions of the ASME, v. 116, n.4, p. 457-462, nov. 1994.

ARTER, R. K. Coated-Cobalt Taps Run Long And Hot. **Tooling & Production**. v. 56, N.9, p. 63-64, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 1986, “P-Tb-41 – Terminologia e Simbologia De Roscas – Terminologia Brasileira”, Rio De Janeiro, Brasil.

ATTANASIO, A.; GELFI, M.; GIARDINI, C.; REMINO, C. Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear. **Wear**. v. 260, n.3, p.333-338, fev. 2006.

BALZERS. Balzers Coating Guide for cutting applications. v. 1. Disponível em: <<http://www.coating-guide.balzers.com>>. jul. 2005. 1 CD – ROM.

BECK, H.W. Alta velocidade e ferramentas de alto desempenho reduzem o tempo de usinagem. **Máquinas e Metais**. p. 40 – 47, abr. 1998.

BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. Surface Integrity and part accuracy in reaming and tapping stainless steel with new vegetable based cutting oils. **Tribology International**. v.35, n.12, p. 865 – 870, dez. 2002.

BEZERRA, A. A.; COELHO, R.T.; DA SILVA, L.R.; BRAGHINI JR, A.; SOTO, M. Investigação do Processo de Rosqueamento com Alta Velocidade de Corte em Ferro

Fundido. **XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia – MG. Proceedings of COBEM. Manufacturing Process.** v. 14. p. 66-75, 2001.

BEZERRA, A. A.; COELHO, R.T.; DA SILVA, L.R. Monitoração dos Processos de Roscamento: Revisão da Literatura. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM.** Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – Abcm, 10p. 2000.

BEZERRA, A. A.; COELHO, R.T.; BRAGHNI JR. A.; SILVA, L. R.; SOTO, M. Investigação do Sensor de Corrente na Monitoração do Roscamento com Alta Velocidade. **II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa – PB. Proceedings of CONEM,** 2002.

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.

CAO, T.; SUTHERLAND, J. W. Investigation of thread tapping load characteristics through mechanistics modeling and experimentation. **Journal of Machine Tools & Manufacture.** v 42, n. 14, p. 1527-1538, nov. 2002.

CIMM (CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA): Disponível em: "<http://construtor.cimm.com.br/cgi-win/construt.cgi?configuradorresultado+997>"; Acesso em: 20 out. 2005.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 6.ed. S. P: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1977. 576p.

COLDWELL, H.; WOODS, R.; PAUL, M.; KOSHY, P.; DEWES, R.; ASPINWALL, D. Rapid machining of hardened AISI H13 and D2 moulds, dies and press tools. **Journal of Materials Processing Technology.** v. 135, n. 2-3, p 301 – 311, abr. 2003.

COSTA, E.S.; MACHADO, A.R.; SOUZA JR.; E. A. DE.; RAMOS, C.A.D. Desempenho de brocas helicoidais de aço-rápido revestidas com TiN aplicando Mínima Quantidade de Fluido de Corte (MQF). **III Congresso Brasileiro de Fabricação.** Joinville- SC, abr. 2004.

CSELLE, T.; BARIMANI, A. Today's applications and future developments of coatings for drills and rotating cutting tools. **Surface & Coatings Technology** . v. 76-77, n. 2, p. 712 – 718, dec. 1995.

DA MOTA, P. R.; REIS, A. M.; DA SILVA, M. B.; GONÇALVES, R.A. Performance of high speed steel taps at high cutting speed. **Ecole nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Metz. Fifth International Conference on High Speed Machining**. v 1, p. 119-127, mar. 2006.

DA MOTA, P. R.; REIS, A. M.; DA SILVA, M. B.; GONÇALVES, R.A. Tapping Operation at High Cutting Speed. **Congresso Internacional de Engenharia Mecânica**. Ouro-Preto – MG. v. 1. nov. 2005. 1 CD ROM.

DERFLINGER, V.; BRÄNDLE, H.; ZIMMERMANN, H. New hard/lubricant coating for dry machining. **Surface and Coating Technology**. v. 113, n. 3, p. 286-292, mar. 1999.

DE SOUZA, A. J. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte no Torneamento**. 2004a. 226 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DE SOUZA, A. F. **Contribuições ao Fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades**. 2004b. 186 f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo (USP – São Carlos).

DHAR, N.R.; ISLAM, M.W.; ISLAM, S.; MITHU, M.A.H. The Influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel. **Journal of Materials Processing Technology** . v. 171, n. 1, p. 93-99, jan. 2006.

DILIDDO, T. The tapping key to successful threading. **Cutting Tool Engineering**. v. 39, n.1, p. 65-67. fev.1987.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 1 ed. mm editora, S. P: 242p. 1999.

EZUGWU, E.O.; OKEKE, C.I.; MACHADO, A.R. High speed threading of inclusion-modified steels with coated carbide tools. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 86, n. 1-3, p. 216 – 225, out.1999.

FALLBÖHMER, P.; RODRÍGUEZ, C.A.; ÖZEL, T.; ALTAN, T. High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. **Journal of Material Processing Technology**. v. 98, n. 1, p. 104-115, jan. 2000.

FANTIN, J.P. Ensaios com machos: em busca de bons resultados na usinagem. **Revista Máquinas e Metais**. n. 320, p. 58 – 60, set. 1992.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 3 ed. v.1, S.P: Editora Edgard Blücher Ltda, 1995. 751p.

FRANCO JR., A. R. **Obtenção de Revestimentos Dúplex por Nitretação a Plasma e PVD-TiN em Aços Ferramenta AISI D2 e H13**. 2003. 196 f. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FREIRE, J.M. Tecnologia Mecânica (Instrumento de Trabalho na Bancada), Livros técnicos e científicos editora S. A., Vol. 1 , 1º ed, 1976. 271p.

GU, JIE.; GARY, BARBER.; SIMON , TUNG.; GU, REN-JYH. Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts. **Wear**. v. 225–229, n. 1, p. 273-284, abr. 1999.

GUANI, J.A.; CHOUDHURY, I.A.; MASJUKI, H.H. Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 153-154, p. 1067-1073, nov. 2004.

HARRIS, S. G.; DOYLE, E. D.; VLASVELD, A. C.; AUDY, J.; QUICK, D. A study of the wear mechanisms of $Ti_{1-x}Al_xN$ and $Ti_{1-x-y}Al_xCryN$ coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions. **Wear**. v. 254, n. 7-8, p. 723-734, abr. 2003.

HOGMARK, S.; JACOBSON, S.; LARSSON, M. Design and Evaluation in Tribological Coatings. **Wear**. v. 246, n. 1-2, p. 20-33, nov. 2000.

ISO, 1977. Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools. ISO 3685.

ISCAR - ferramentas de corte – Goiânia. **Material Didático**. Palestra apresentada no SENAI-DR/GO. 2001. 1 CD ROM.

JOHNSON, M. Tapping. In: **AMERICAN SOCIETY FOR METALS**. Metals handbook, 9.ed. Metals Park, Ohio, USA. v.16 - Machining, p. 255-267. 1989.

KISHAWY, H.A.; DUMITRESCU, M.; NG, E. –G.; ELBESTAWI, M.A. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high speed machining of A356 alloy. **International Journal of Machining Tools & Manufacture**. v. 45, n. 2, p. 219–227, fev. 2005.

KOELSCH, J.R. Rosqueamento de alto desempenho. **Máquinas e Metais**. n. 432, p. 20-35, jan. 2002.

KOPAC, J. Influence of cutting material and coating on tool quality and tool life. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 78, n.1-3, p. 95–103, jun. 1998.

LINSS, M. Processo de rosqueamento de alto desempenho. **Revista Máquinas e Metais**. Aranda Editora – ano XXXIX, n. 443, p. 24-33, dez. 2002.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Apostila de Usinagem dos Metais**. 8. ed. Universidade Federal de Uberlândia. 2004. 257p.

MACHADO, A. R.; BÖHES, L.; DOS SANTOS, M. T.; GUESSER, W. L. **Tecnologias Avançadas de Manufatura**: Coleção Fábrica do Milênio. Capítulo 4. 1. ed. Jaboticabal – SP: Ed. Novos Talentos. 2005. v. 1. 169p.

MEZENTSEV, O. A.; ZHU, R.; DE VOR, R. E.; KAPOOR, S. G.; KLINE, W. A. Use of Radial Force for Fault Detection in Tapping. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 42, n. 4, p. 479-488, mar. 2002.

MÜLLER, P.; SOTO, M. Usinagem sem refrigeração de Furos e Roscas, 4º Seminário Internacional de Alta Velocidade, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, São Paulo, Brasil, p. 126-133. 1999.

MÜLLER, P. Ferramentas para furar e rosquear com HSC e sem refrigeração. **O Mundo da Usinagem**. p. 13–17, 2000.

MÜLLER, P. Ferramentas rotativas para usinagem em HSC. Usinagem Brasil. Disponível em: http://www.usinagem-brasil.com.br/construtordepaginas/htm/1_1_1738.htm. Acesso em 23 set. 2004.

NAVINSEK, B., PANJAN, P., CEKADA, M., QUINTO, D.T. Interface characterization of combination hard/solid lubricant coatings by specific methods. **Surface and Coatings Technology**. v. 154, n. 2-3, p. 194–203, mai. 2002.

NOUARI, M., GINTING, A. Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry and milling of titanium alloy. **Surface & Coatings Technology**. v. 200, n. 18-19, p. 5663-5676, mai. 2006.

NOVASKI, O.; CORRÊA M. A HSC como vantagem competitiva. **Revista Máquinas e Metais**. p. 74–89, nov. 1998.

OLIVEIRA, A. J. **Otimização das Condições de Usinagem Visando o Torneamento a Seco do Aço ABNT 1045 em Operações de Desbaste**. 2003. 112 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – Campinas, SP.

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

OSG ferramentas de precisão Ltda – **Machos, Cossinetes e Fresas** – São Paulo. Material Didático, maio 2005. 1 CD ROM.

PALDEY, S.; DEEVI, S.C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review. **Materials Science and Engineering**. v. 342, n. 1-2, p. 58–79, fev. 2003.

REIS, A. M. **Avaliação de 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.

REITER, A. E.; BRUNNER, B.; ANTE, M.; RECHBERGER, J. Investigation of several PVD coatings for blind hole tapping in austenitic stainless steel. **Surface & Coatings Technology**. v. 200, n. 18-19, p. 5532-5541, mai. 2006.

SALES, W.F. **Determinação das Características Refrigerantes e Lubrificantes de Fluidos de Corte**. 1999. 176 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia.

SAKAMOTO, Y.; TAKAYA, M.; ISHII, Y.; IGARASHI, S. Surface modified tool fabricated by radical nitriding. **Surface and Coatings Technology**. v. 142-144, p. 152-155. jul. 2001.

SANDVIK COROMANT. Novas tecnologias e tendências em furação e rosqueamento. **O Mundo da usinagem**. SANDVIK do Brasil S.A, Divisão Coromant, p. 18-21, 1999.

SANTOS, S. C. **Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral**. 1999. 122 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

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.

SHAW, M.C., **Metal Cutting Principles**. 3ª ed. Cambridge: Oxford University Press. 594 p. 1984.

SCHÜTZER, K.; DE SOUZA, A. F.; DEONÍSIO, C. C. C. **Introdução do Processo HSC na Indústria Brasileira**. In: 4º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Inovações Tecnológicas na Manufatura para o ano 2000, 1999, Santa Bárbara d'Oeste, SP. Anais do 4º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Inovações Tecnológicas na Manufatura para o Ano 2000. p. 79-98, 1999.

SCHULZ, H. A alta velocidade corta tempos e custos e aumenta a qualidade das indústrias. **Revista Máquinas e Metais**. p. 71-76, fev. 1997.

SCHULZ, H.; EMRICH, A. K.; FINZER, T; DÖRR, J. Quais são e para que servem os revestimentos. **Máquinas e Metais**, p. 38-45, set, 2000.

SKF. **Manual Técnico SKF**. São Paulo: SKF Ferramentas S.A., 261p. 1987.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. Ed. da UFSC. Florianópolis: 1992, 326p.

STOETERAU, R. L. **Apostila de Tribologia da UFSC**. 2000. 172 p.

ZHANG, B.; YANG, F.; WANG, J. Fundamental aspects in vibration-assisted tapping. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 132, n. 1-3, p. 345–352, jan. 2003.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworths – Heinemann. 2000, 446 p.

VIANA, R. **Desempenho de brocas de HSS revestidas na furação de ligas da Al-Si**. 2004. 141 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

YUHARA, D. A. Aplicação de revestimento PVD em ferramentas de corte. Disponível em: **www.brasimet.com.br**. Acesso em: 20 mai. 2005.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. 1^a ed. Amsterdam. Elsevier science publishers B.V., 1987, 560 p.