

AMPLIFICADOR

COMPUTADOR



Figura 3.6 - Máquinas-ferramenta utilizadas nos ensaios: a) Torno Mecânico Multiplic 35D b) Centro de Usinagem Discovery 760

3.4. Monitoramento do processo

Os ensaios de força no torneamento contaram com a utilização de um dinamômetro tridimensional, Kistler 9265-B (Fig. 3.2) para a medição das componentes das forças de usinagem. Um sistema de aquisição de sinais e um computador monitoraram o sistema com uma taxa de aquisição de 1 kHz durante um período de 7 segundos em cada teste. A Figura 3.7 mostra o esquema de montagem desses equipamentos.

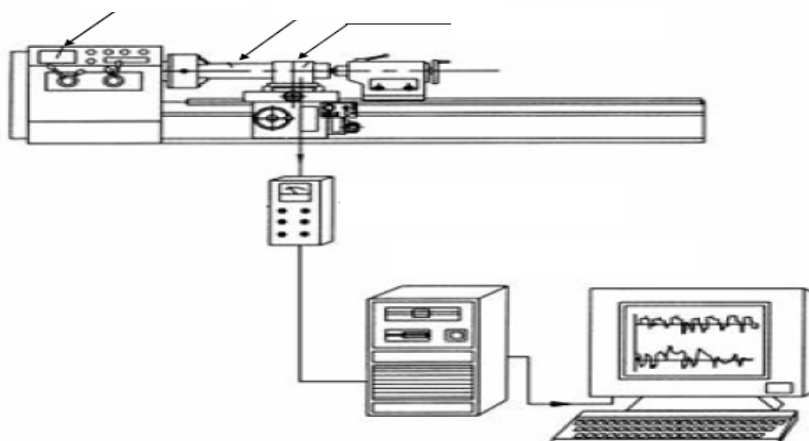


Figura 3.7 - Esquema de montagem do sistema de aquisição de força

Nos ensaios de fresamento, a evolução do desgaste das ferramentas foi monitorada utilizando-se um estereomicroscópio com câmera digital modelo SZ61, fabricante Olympus, cujo aumento utilizado foi de 45 vezes. A Figura 3.8 apresenta a montagem desses equipamentos.

Para a análise do desgaste das ferramentas no MEV, foi necessário um procedimento de limpeza das mesmas com a utilização de um equipamento de limpeza ultrasônica Cole Parmer – 8848, onde a ferramenta é submersa em um banho de acetona para a retirada de impurezas e outros contaminantes existentes sobre a superfície desgastada.

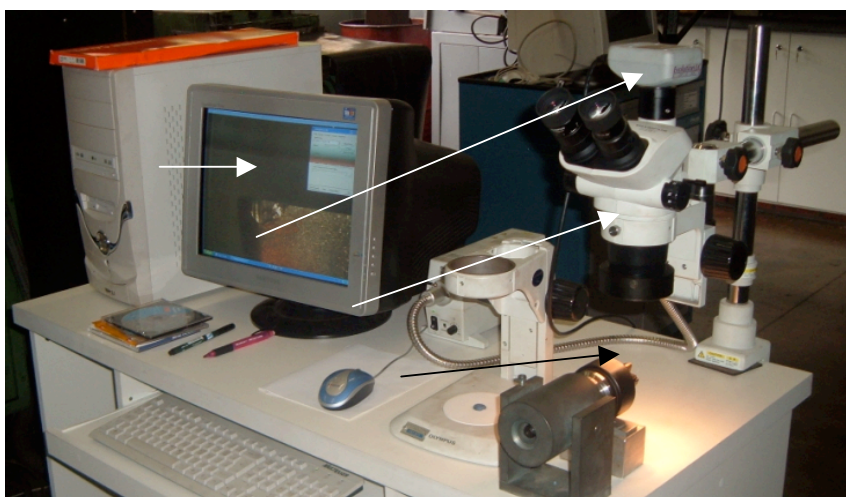


Figura 3.8 - Esquema de montagem do sistema de aquisição de imagens do desgaste das ferramentas

As medidas de rugosidade das superfícies usinadas foram feitas utilizando-se um rugosímetro da marca Mitutoyo, no início e no fim de cada ciclo de fresamento. A Figura 3.9 mostra o esquema de montagem deste dispositivo.

As operações de fresamento compreenderam ciclos equivalentes a uma passada completa da fresa sobre a superfície do bloco de material em usinagem, onde a fresa exerceu movimentos de avanço nos dois sentidos, concordante e discordante com trajetória em ziguezague sempre com uma penetração de trabalho igual à 24 mm e sem perder contato com a peça até o fim do ciclo, de modo a simular as operações de desbaste utilizadas na fabricação de um molde de injeção

de plástico. A Figura 3.10 ilustra a trajetória da fresa do início ao fim de um ciclo de fresamento completo.



Figura 3.9 - Esquema de montagem do rugosímetro

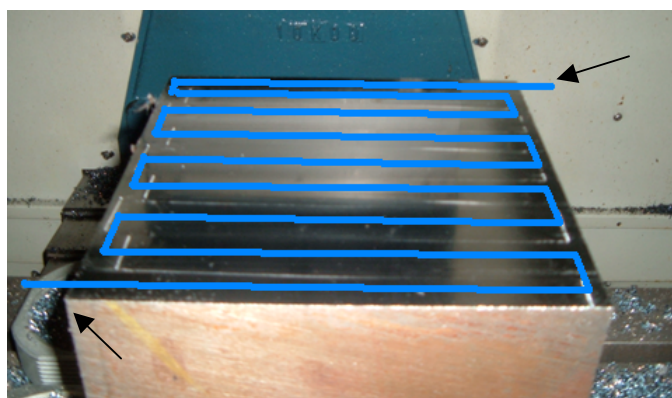


Figura 3.10 - Trajetória da fresa do início ao fim de um ciclo de fresamento completo

O cálculo do volume de material removido foi feito levando-se em consideração toda a área da superfície fresada de cada bloco de material retirada em uma passada completa para cada ciclo de fresamento, multiplicado pelo número de passadas completas realizadas e pelas respectivas profundidades de corte relativas a cada condição testada, até o fim de vida da ferramenta. Foi adotado como critério de fim de vida um desgaste de flanco máximo $VB_{Bmax} = 0,5 \text{ mm}$ recomendado pela norma ISO 8688-2/1989, sendo que a análise do desgaste foi feita para cada ciclo completo de fresamento, em função do volume de material

removido da peça fresada. A Figura 3.11 apresenta um desenho esquemático do processo.

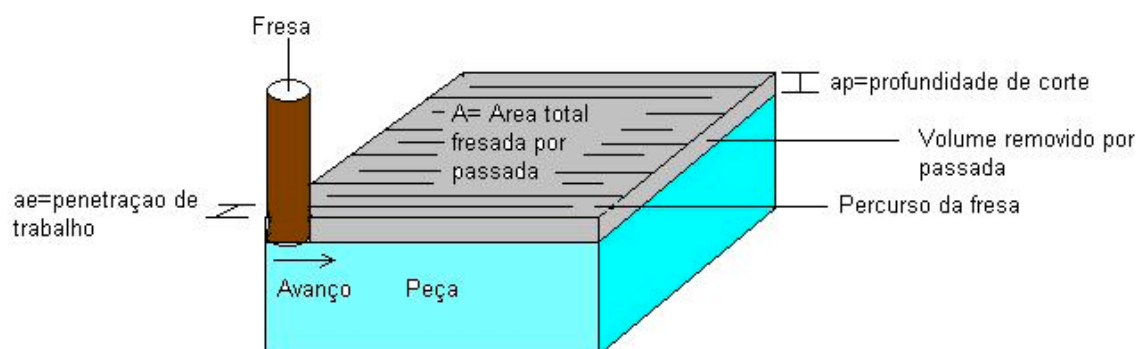


Figura 3.11 - Desenho esquemático do volume de material removido por passada completa a cada ciclo de fresamento

Nesse caso, o volume de material removido em cada condição testada foi calculado pela seguinte equação:

$$V_{rem} = A \cdot a_p \cdot n_p \quad (3.1)$$

Onde:

V_{rem} = Volume de material removido;

A = Área da superfície fresada;

a_p = Profundidade de corte;

n_p = Numero de passadas completas ou ciclos de fresamento até o fim de vida da ferramenta.

3.5. Condições de corte

A fim de verificar o efeito estatístico de cada parâmetro de corte e a interação entre eles utilizou-se um planejamento fatorial 2^k , cujos parâmetros analisados foram a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte e o material da peça, que se constituem em variáveis independentes para a análise estatística. A Tabela 3.2 mostra os níveis dos parâmetros considerados.

Tabela 3.2 - Níveis das variáveis independentes

Fatores	Nível	
	-1	+1
Velocidade de Corte (m/min)	100	200
Avanço (mm/rev/dente)	0,1	0,2
Profundidade de Corte (mm)	1	2
Combinação (1)	VP20 ISO	VP100 270 ppm Ti
Combinação (2)	VP20 ISO	VP100 350 ppm Ti
Combinação (3)	VP100 270 ppm Ti	VP100 350 ppm Ti

O uso de quatro variáveis de entrada resultou em um planejamento fatorial 2^4 com dezesseis testes, como mostrado na Tab. 3.3. Foram utilizadas as mesmas condições de corte para torneamento e fresamento. No torneamento foram feitas duas réplicas para cada condição totalizando 48 testes. No fresamento foi feita uma réplica para cada condição totalizando 32 testes. Esta metodologia foi repetida para cada combinação de materiais (1), (2) e (3) da Tab. 3.2, resultando em oito condições de corte diferentes para cada material. A Tabela 3.4 apresenta as condições utilizadas para cada material.

Tabela 3.3 - Condições dos testes de acordo com o planejamento fatorial 2^4

Teste	V_c (m/min)	f_z (mm/rev/dente)	a_p (mm)	Material
1	100	0,1	1	-1
2	200	0,1	1	-1
3	100	0,2	1	-1
4	200	0,2	1	-1
5	100	0,1	2	-1
6	200	0,1	2	-1
7	100	0,2	2	-1
8	200	0,2	2	-1
9	100	0,1	1	+1
10	200	0,1	1	+1
11	100	0,2	1	+1
12	200	0,2	1	+1
13	100	0,1	2	+1
14	200	0,1	2	+1
15	100	0,2	2	+1
16	200	0,2	2	+1

Tabela 3.4 - Condições de usinagem utilizadas nos testes de torneamento e de fresamento

Condições de Usinagem								Unidade
1	2	3	4	5	6	7	8	
Vc = 100	Vc = 200	Vc = 100	Vc = 200	Vc = 200	Vc = 100	Vc = 100	Vc = 200	m/min
f = 0,1	f = 0,1	f = 0,2	f = 0,2	f = 0,1	f = 0,1	f = 0,2	f = 0,2	mm/rev/dente
ap = 1	ap = 1	ap = 1	ap = 1	ap = 2	ap = 2	ap = 2	ap = 2	mm

3.6. Preparação das amostras para análise metalográfica e caracterização dos materiais

Nesse estágio do trabalho foram retiradas amostras de cada um dos blocos dos aços investigados para preparação metalográfica. Inicialmente as amostras foram lixadas com a utilização de lixas em uma seqüência numérica ascendente obedecendo à seguinte numeração: 150, 220, 320, 400, 600 e 1200. Em seguida, as amostras foram polidas com pasta de alumina de 3 e 1 μm . O ataque químico utilizado para revelação da microestrutura foi o Nital a 2%, cuja composição química consistiu de 98% de álcool etílico a 95% e 2% de ácido nítrico HNO_3 , por um período de 10 segundos. A Figura 3.12 apresenta as amostras retiradas dos blocos de aço e o formato do corte realizado nas mesmas antes da preparação metalográfica.

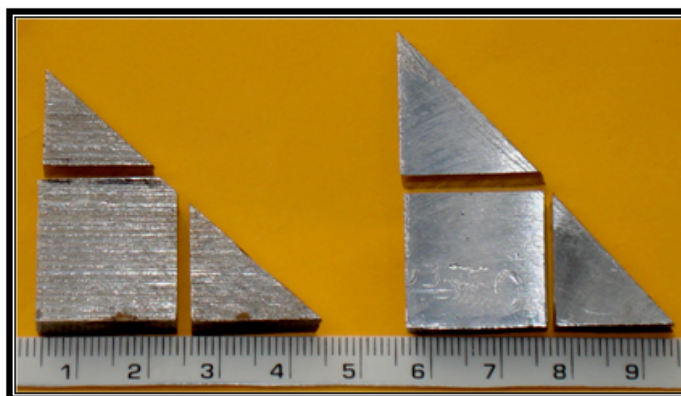


Figura 3.12 - Formato do corte realizado nas amostras antes da preparação metalográfica

Monitor

A análise metalográfica foi realizada com a utilização de um microscópio ótico Modelo Lambda com câmera digital modelo SZ61, fabricante Olympus. Também foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura – MEV de bancada, modelo TM 3000 da HITACHI, ambos pertencentes ao LEPU. As Figuras 3.13 e 3.14 apresentam tais equipamentos.

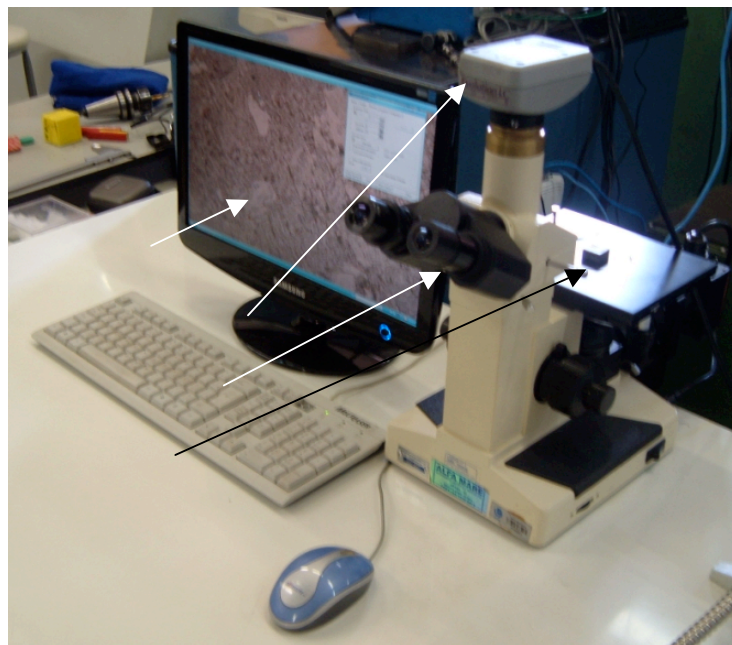
Câmara digital**Microscópio****Amostra**

Figura 3.13 - Microscópio ótico Modelo Lambda utilizado na análise das microestruturas



Figura 3.14 - Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado na análise das microestruturas

3.7. Ensaaios de dureza e microdureza

Foram realizados ensaios de dureza com os aços estudados utilizando-se o durômetro Universal Wolpert apresentado na Fig. 3.15.



Figura 3.15 - Durômetro Universal Wolpert utilizado nos ensaios de dureza

A Tabela 3.5 apresenta a dureza média dos três materiais, onde é possível observar que a dureza média do aço VP20 ISO é menor do que a dureza média do VP100 com 270 ppm de Ti, que por sua vez, é menor que a do VP 100 com 350 ppm de Ti.

Tabela 3.5 Resultados do ensaio de dureza Rockwell C

Ensaio de Dureza Rockwell C			
Durômetro Universal Wolpert - Carga: 150 Kg			
	VP20 ISO	VP100 270 ppm Ti	VP100 350 ppm Ti
Dureza média(HRC)	29	30	33
Desvio padrão(HRC)	1,12	1,6	1,5

Para os ensaios de microdureza utilizou-se um microdurômetro modelo HMV-2 marca Shimadzu apresentado na Fig. 3.16. Nesse caso, foram realizadas medidas de microdureza nas partículas de carbonitreto de titânio, bem como em outras duas fases predominantes no aço VP100. Os resultados relativos a esses ensaios são apresentados no tópico 4.



Figura 3.16 - Microdurômetro utilizado nos ensaios, pertencente ao LTM

3.8. Análise das amostras utilizando a técnica de espectrometria de energia dispersiva de raio X – EDX

No intuito de corroborar a composição química dos materiais analisados, bem como de comparar os espectros de contagem dos principais elementos químicos presentes nos referidos materiais, utilizou-se a técnica de espectrometria de energia dispersiva de raio X – EDX, cujo equipamento aplicado é semelhante ao apresentado na Fig. 3.17.

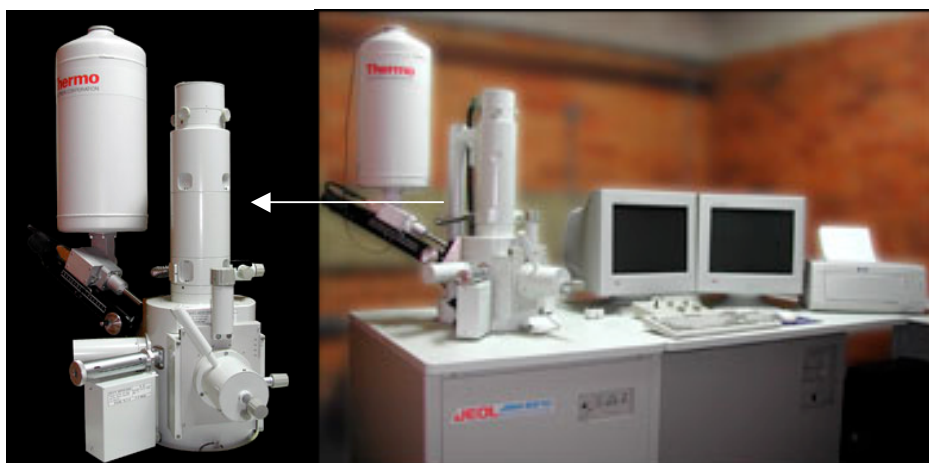


Figura 3.17 - Equipamento de EDX semelhante ao utilizado na caracterização das amostras

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultados relativos aos ensaios de força no torneamento

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de força no torneamento possibilitaram uma comparação entre o desempenho em usinagem dos aços VP100 com 270 e com 350 ppm de titânio, tendo como referência os resultados obtidos com o VP20 ISO nas mesmas condições. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam alguns dos resultados de força obtidos a partir dos testes realizados, onde foi possível perceber que o sinal de aquisição manteve um grau de uniformidade e linearidade, recomendados para esses tipos de testes, demonstrando, também, uma coerência entre as ordens de grandeza dos valores relativos à cada componente da força de usinagem medida.

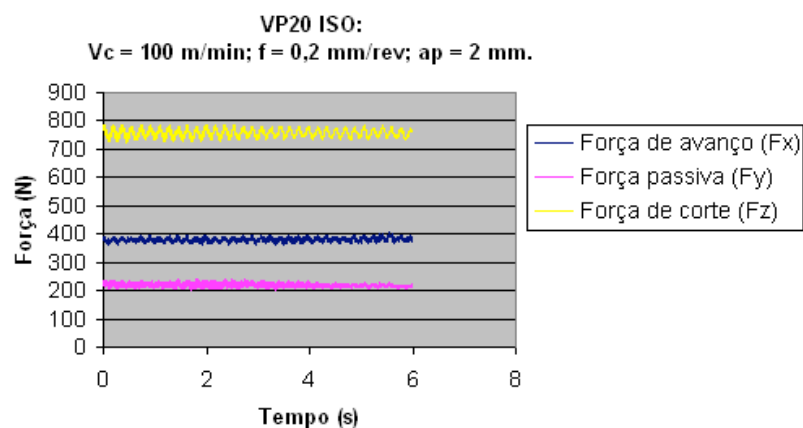


Figura 4.1 - Comportamento das componentes das forças de usinagem no torneamento para o aço VP20 ISO

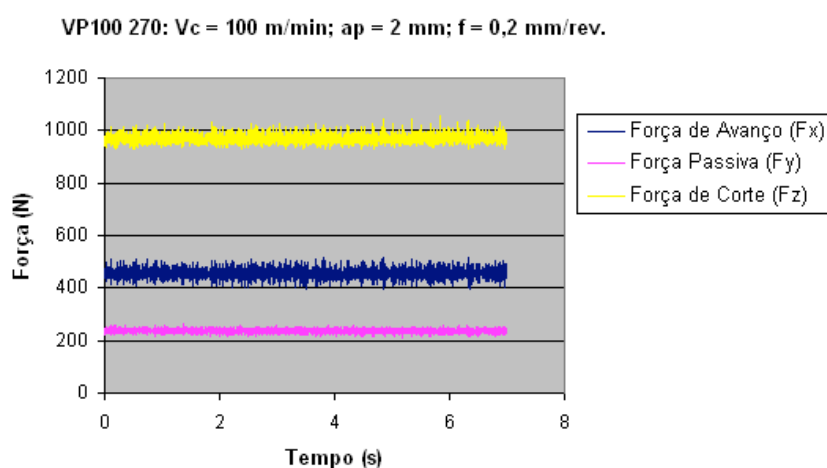


Figura 4.2 - Comportamento das componentes das forças de usinagem no torneamento para o aço VP100 270

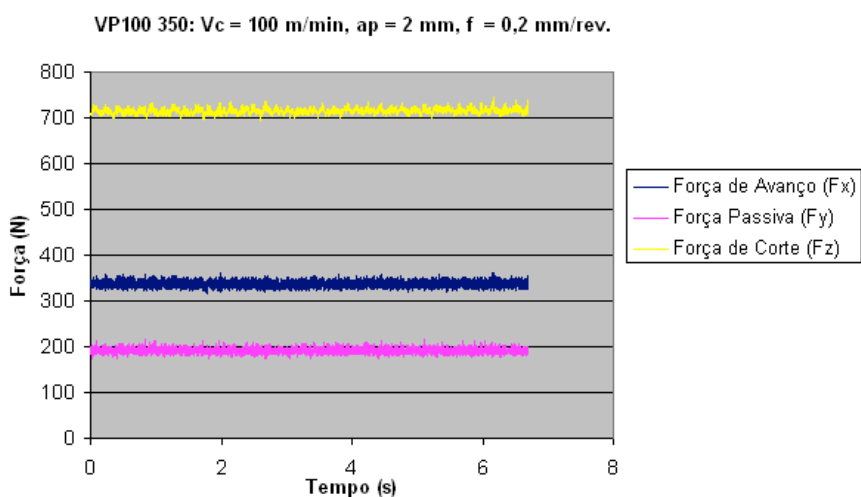


Figura 4.3 - Comportamento das componentes das forças de usinagem no torneamento para o aço VP100 350

Os resultados referentes à força de corte nos ensaios de torneamento aplicados aos três aços utilizados nas oito condições de corte diferentes da Tab. 3.4, são apresentados no gráfico da Fig. 4.4, onde é possível estabelecer um contraste entre o comportamento dos três aços para cada uma das oito condições de corte.

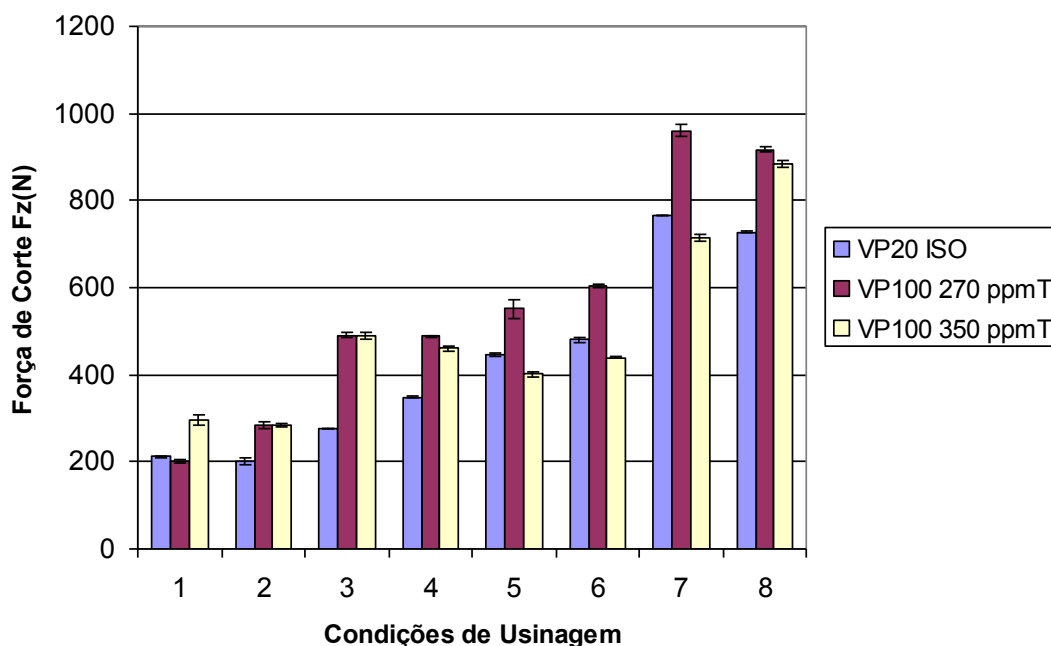


Figura 4.4 - Força de corte no torneamento em função de oito condições de usinagem diferentes para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de titânio

No caso das condições dos testes 1 e 2 da Tab. 3.4, por exemplo, observa-se que estas apresentaram os menores valores de força de corte para os três aços, certamente por se tratarem das condições mais brandas aplicadas, com menores avanço e profundidade de corte. Nesse caso, é possível perceber uma ligeira queda nos valores da força para o VP20 e para o VP100 com 350 ppm de titânio na condição 2, provavelmente causado pelo amaciamento térmico conseqüente ao aumento da velocidade de corte de 100 m/min na condição 1 para 200 m/min na condição 2. Entretanto, o aço VP100 com 270 ppm de titânio, se comportou de forma diferenciada nessas mesmas condições contrariando a tendência natural do fenômeno. Ainda na condição 1, o valor da força do VP20 ISO foi ligeiramente superior ao VP100 com 270 ppm de titânio e consideravelmente inferior ao VP100 com 350 ppm de titânio.

A presença de partículas de sulfeto de cálcio no aço VP20 ISO (MESQUITA; BARBOSA, 2003) e em contrapartida a presença de carbonitretos de titânio nos aços VP100 (GOMES; ZANATTA, 2008), justificam os comportamentos observados

nas condições 2 a 4 e na condição 8, onde o aço VP20 ISO apresenta forças de corte menores em relação aos aços VP100.

O aço VP20 ISO apresentou valores de força de corte menores que os do VP100 com 270 ppm de titânio e maiores que os do VP100 com 350 ppm de titânio nas condições dos testes 5 a 7 da Tab. 3.4. Observa-se ainda que, nas condições 4 a 8 da Tab. 3.4 o aço VP100 com 270 ppm de titânio apresentou forças de corte superiores às do aço VP100 com 350 ppm de titânio. Uma justificativa plausível para tais fenômenos requer uma análise mais detalhada da microestrutura dos materiais a fim de se diagnosticar possíveis influências dos elementos microestruturais nesse comportamento. Tal análise será feita em um subcapítulo posterior.

Com relação à influência dos parâmetros da Tab. 3.4, observa-se que tanto o avanço quanto a profundidade de corte afetam significativamente a força de corte, o que pode ser observado nas condições 3 a 8, onde as condições 7 e 8 são as mais críticas por agregarem os maiores valores de avanço e de profundidade de corte.

Os gráficos das Fig. 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, as forças de avanço e as forças passivas para os três aços em estudo nas oito condições da Tab. 3.4, onde é possível perceber que o comportamento das forças de avanço e passiva seguem uma tendência parecida à da força de corte.

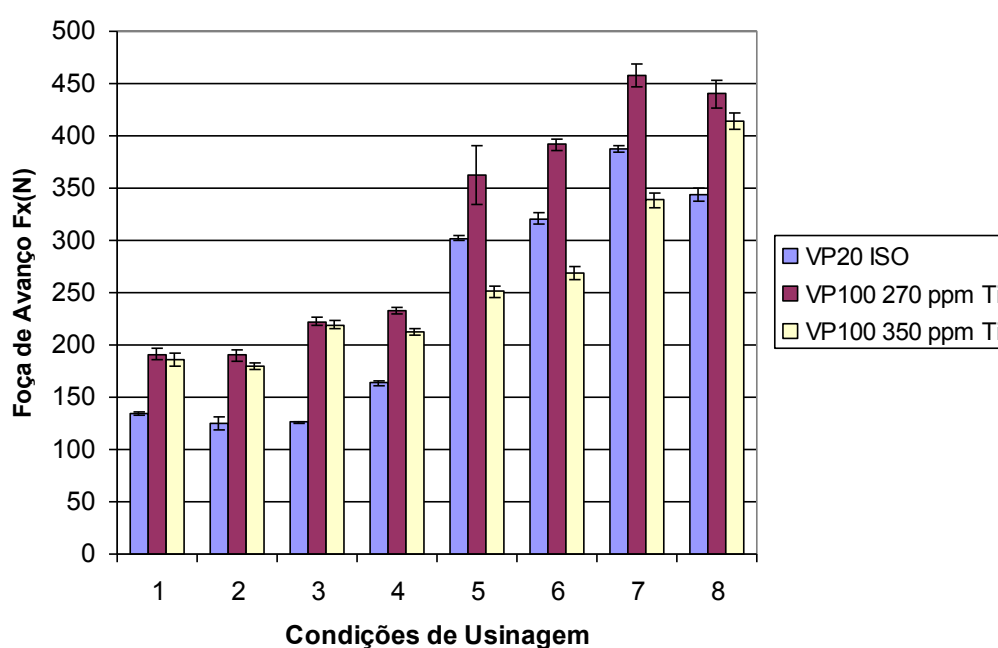


Figura 4.5 - Força de avanço no torneamento em função de oito condições de usinagem diferentes para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de titânio

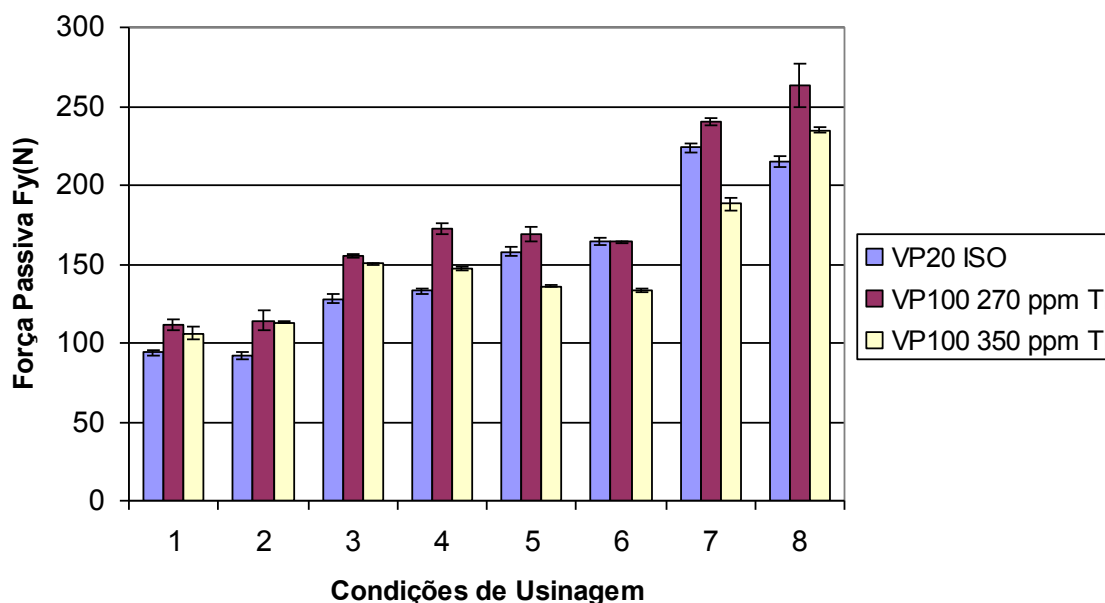


Figura 4.6 - Força passiva no torneamento em função de oito condições de usinagem diferentes para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de titânio

Os gráficos das Fig. 4.5 e 4.6 demonstram que os valores das forças de avanço são maiores que os das forças passivas, sendo ambas menores que as forças de corte, fato esperado para os comportamentos desses fenômenos, considerando-se a relação entre essas três forças em operações de torneamento de aço.

4.1.1. Análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios de força no torneamento

A partir do tratamento estatístico realizado foi possível determinar o nível de influência das variáveis consideradas nos testes de torneamento. Como resultado, foram obtidos os respectivos gráficos de Pareto relativos às comparações entre as forças de corte dos materiais analisados.

As Figuras 4.7 à 4.9 apresentam esses resultados.

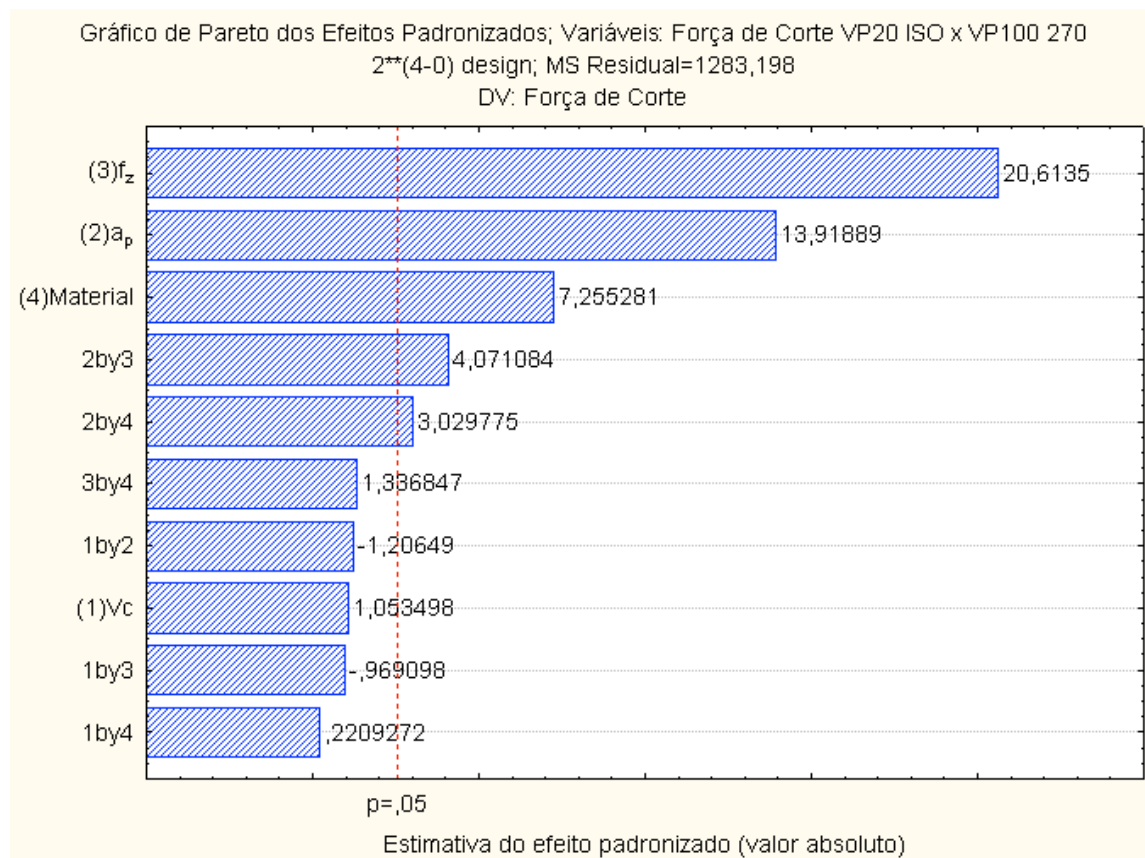


Figura 4.7 - Gráfico de Pareto com a estimativa dos efeitos das variáveis na força de corte do VP20 ISO com o VP 100 com 270 ppm de Ti

O gráfico da Fig. 4.7 indica que o avanço, a profundidade de corte e o material, bem como a combinação entre estes, foram as variáveis que tiveram influência na força de corte ao se comparar o desempenho do VP20 ISO com o VP100 com 270 ppm de titânio. Já na Fig. 4.8, que compara o desempenho do VP20 ISO com o VP100 com 350 ppm de titânio, o material exerceu uma influência menor na força de corte. Tal resultado pode estar relacionado a uma maior diferença no comportamento das forças de corte apresentada pelo VP100 com 270 ppm de titânio em relação ao VP20 ISO, que por sua vez, apresentou uma maior proximidade desses resultados em relação ao VP100 com 350 ppm de titânio, em cinco das oito condições testadas.

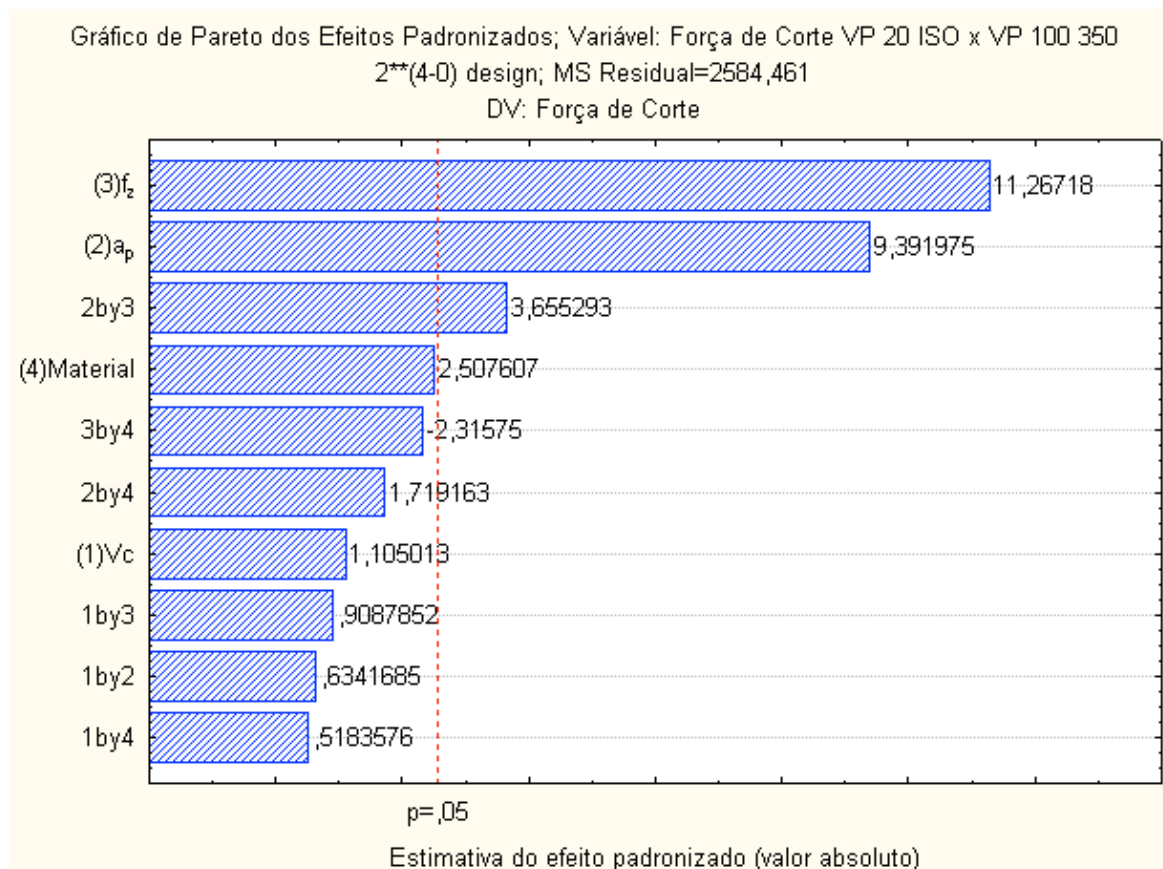


Figura 4.8 - Gráfico de Pareto com a estimativa dos efeitos das variáveis na força de corte do VP20 ISO com o VP100 com 350 ppm de Ti

A Figura 4.9 apresenta a comparação entre as duas modalidades do VP100, onde é possível observar que as variáveis influentes nos resultados da força de corte foi o avanço, a profundidade de corte, a combinação entre avanço e material e a combinação entre profundidade de corte e avanço.

Analisando especificamente a influência da combinação de efeitos entre as variáveis avanço e material, uma justificativa para tal fenômeno pode residir nas diferenças microestruturais entre ambos os aços, induzida pela diferença, principalmente, no teor de titânio, o que será analisado em um tópico posterior.

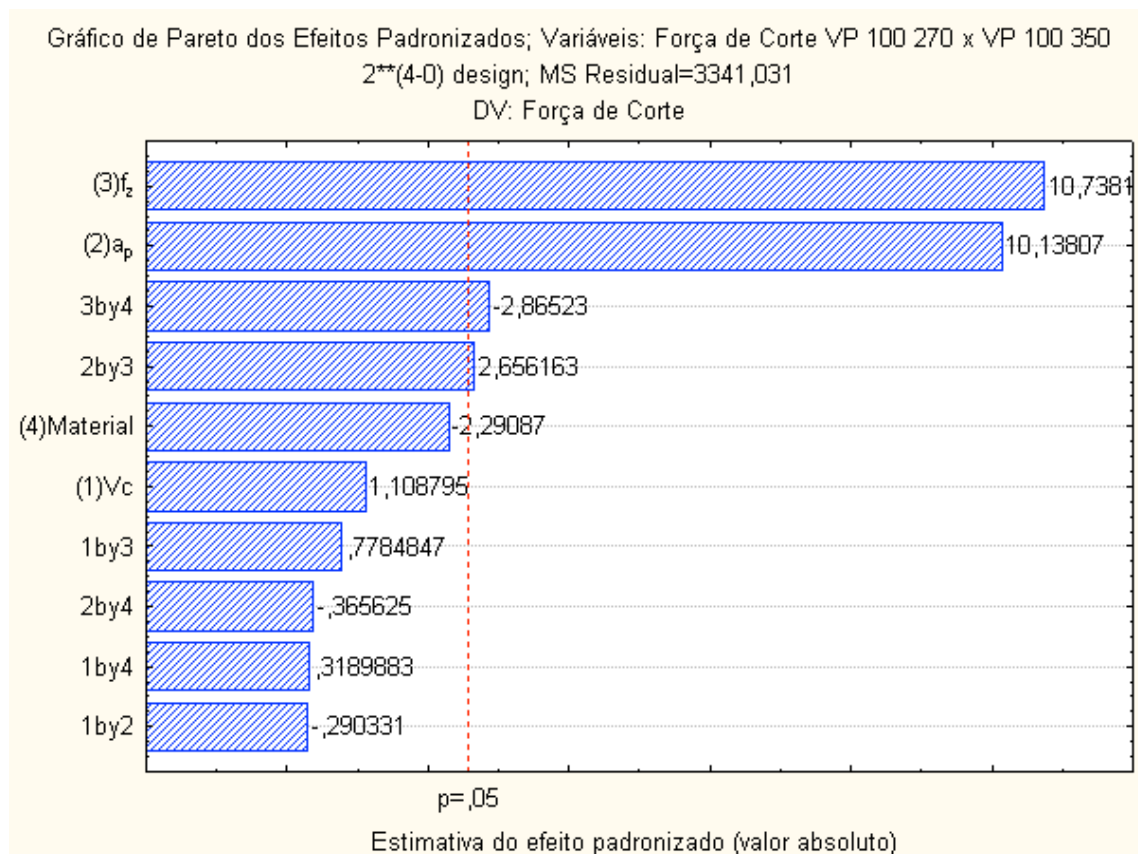


Figura 4.9 - Gráfico de Pareto com a estimativa dos efeitos das variáveis na força de corte do VP 100 com 270 e 350 ppm de Ti

4.2. Resultados relativos aos ensaios de fresamento

A partir dos ensaios de fresamento realizados foi possível observar a evolução do desgaste das ferramentas e a rugosidade das superfícies usinadas. Foram realizados testes com os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de titânio, utilizando-se as mesmas oito condições de usinagem dos testes de torneamento relativas à Tab. 3.4, com uma penetração de trabalho $a_e = 24$ mm recomendado pelo fabricante da ferramenta.

Correlacionando os resultados relativos ao volume de material removido até o fim de vida das ferramentas para os ensaios de fresamento realizados com os aços utilizados, foi possível elaborar o gráfico da Fig. 4.10 que apresenta uma

comparação entre esses resultados para cada condição de usinagem aplicada. Esses resultados são um indicador da usinabilidade desses materiais, onde observa-se que o aço VP20 ISO apresenta um desempenho melhor que os outros dois aços com um volume de material removido relativamente maior em todas as condições.

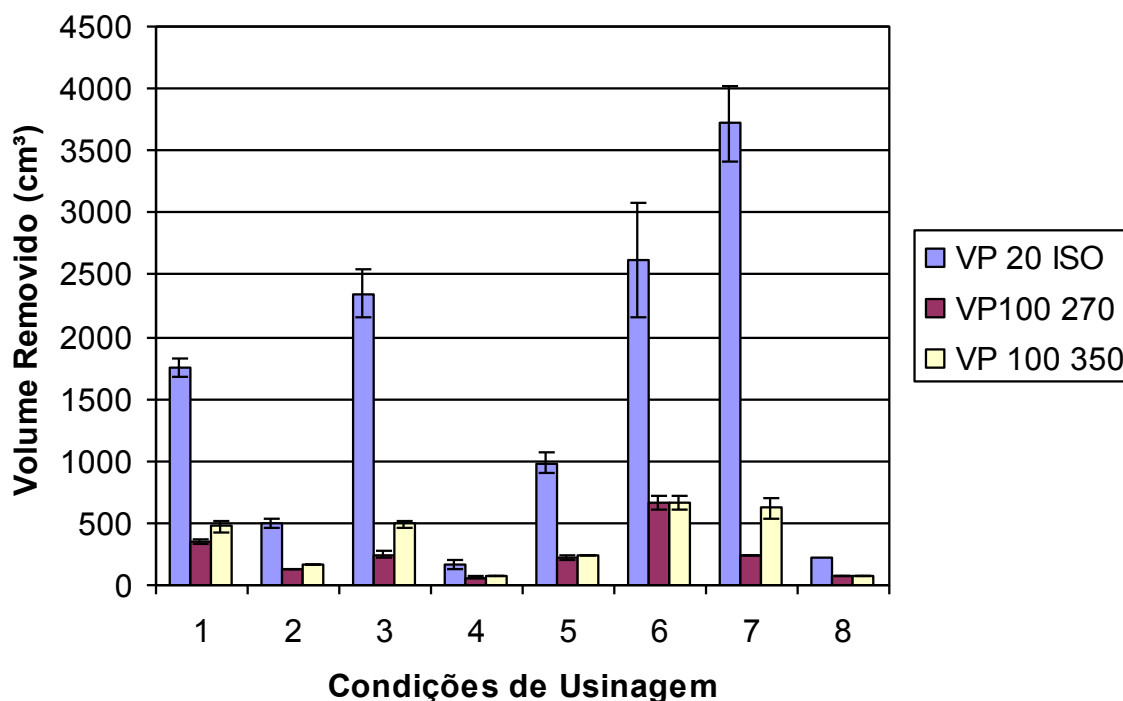


Figura 4.10 - Volume de material removido no fresamento dos aços VP20 ISO, VP100 270 e VP100 350 para cada uma das condições de usinagem da Tab. 3.4

Como relatado no item 4.1, o aço VP20 ISO possui níveis reduzidos de inclusões duras de alumina e silicato, cuja morfologia é modificada pela adição de cálcio, o que reduz o efeito danoso das mesmas. A formação de sulfeto de cálcio na superfície das inclusões minimiza o efeito abrasivo das inclusões sobre a aresta da ferramenta de corte gerando a melhoria de usinabilidade (MESQUITA; BARBOSA, 2003). Em contrapartida, a presença de carbonitreto de titânio (GOMES; ZANATTA, 2008), nos aços VP100, contribuem para o comportamento observado no gráfico, onde o volume de material removido foi significativamente menor em comparação com o aço VP20 ISO.

As Figuras 4.11 a 4.18 apresentam as oito curvas relativas à evolução do desgaste em função do volume de material removido nas operações de fresamento, comparando o desempenho dos três aços investigados. As curvas evidenciam um melhor desempenho para o VP20 ISO, seguido pelo VP100 com 350 ppm de Ti, sendo que, na maioria dos casos, o VP100 com 270 ppm de Ti apresentou pior desempenho, confirmando o que já havia sido constatado nos testes de torneamento. Contudo, em duas das condições testadas houve um desempenho equilibrado entre os aços VP100 como pode ser observado nas curvas das Fig. 4.17 e 4.18.

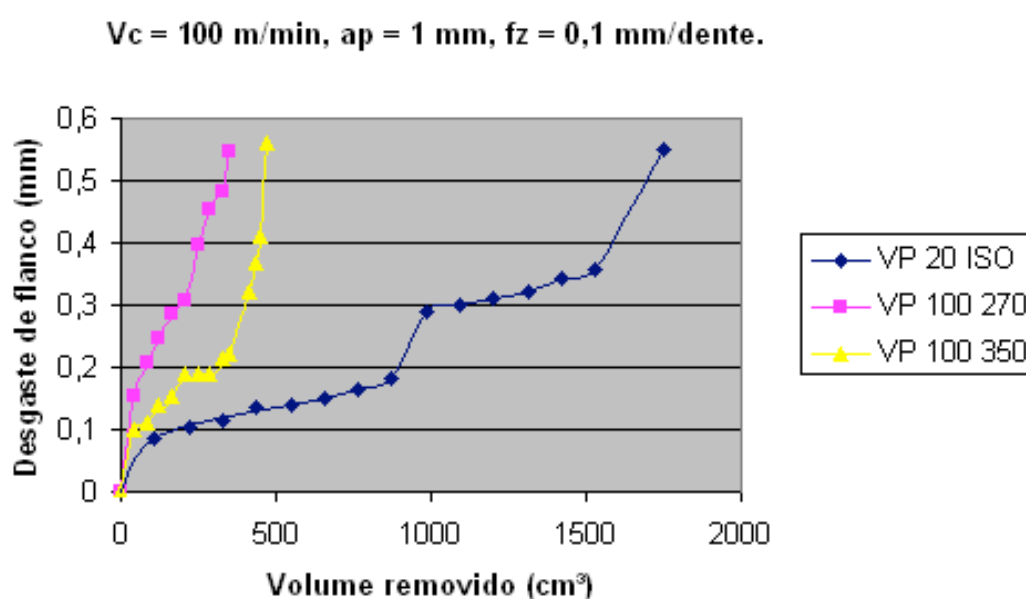


Figura 4.11 - Desgaste de flanco da ferramenta em função do volume de material removido no fresamento para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de Ti na condição 1 da Tab. 3.4

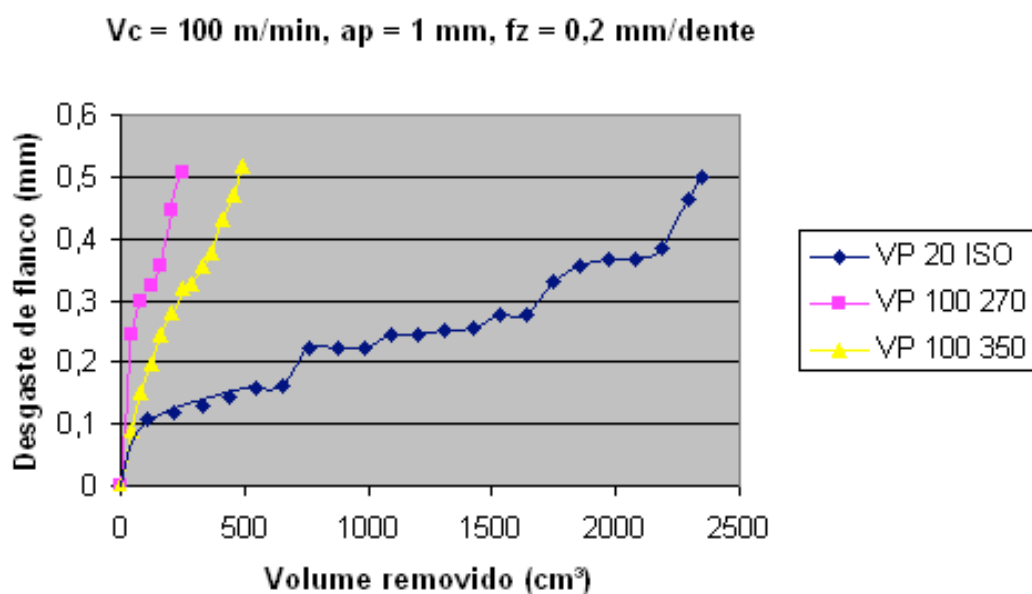


Figura 4.12 - Desgaste de flanco da ferramenta em função do volume de material removido no fresamento para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de Ti na condição 3 da Tab. 3.4

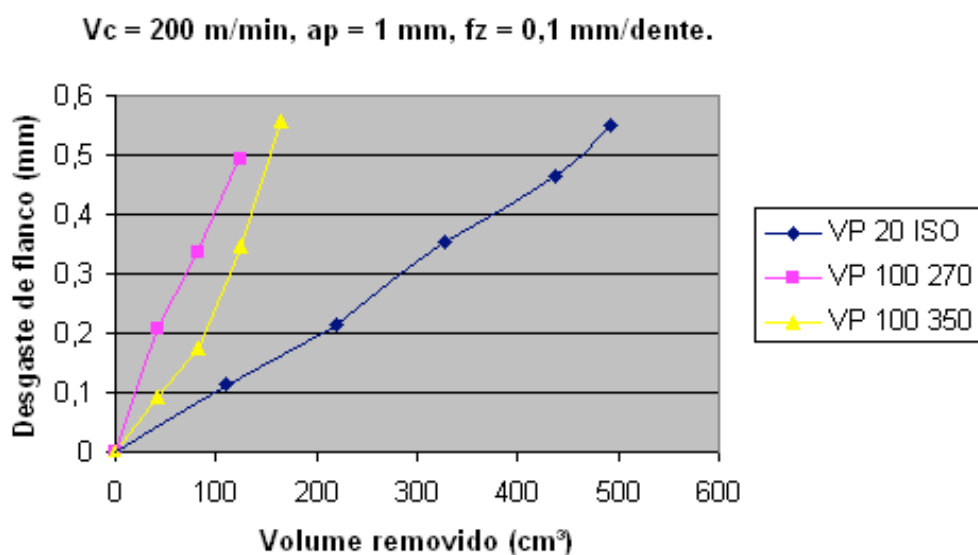


Figura 4.13 - Desgaste de flanco da ferramenta em função do volume de material removido no fresamento para os aços VP20 ISO e VP100 com 270 e 350 ppm de Ti na condição 2 da Tab. 3.4