

4.2. – ETAPA 1 – Primeiro lote de ferramentas texturizadas (7 texturas) - Influência dos parâmetros do LASER na textura produzida na ferramenta

4.2.1 – Análise visual e topográfica do primeiro lote de ferramentas texturizadas.

As ferramentas analisadas neste item foram texturizadas sobre o revestimento, usando os parâmetros apresentados na Tab. 3.7 (1).

Análise visual - Nesta primeira etapa foram produzidas 6 texturas (veja Fig. 4.12) variando os parâmetros do laser. A texturização das ferramentas T1 a T4 foi realizada com uma única varredura do feixe e incrementada a potência do laser nos níveis 40, 20, 10 e 5 Watts respectivamente. A texturização das ferramentas T4 a T6 foi realizada com a mesma potência no laser, 5 Watts, e incrementadas o número de varreduras nos níveis 1, 3 e 10 varreduras respectivamente.



Figura 4.12 - Fotografia das ferramentas texturizadas na etapa 1.

Foram fotografadas as superfícies de saída das ferramentas com um aumento de 12X. Visualmente pode se perceber que o parâmetro de maior potência, queimou os primeiros revestimentos da ferramenta T1, enquanto que uma menor potência, isto é, 5W com um único passe (T4), proporciona marcas sobre a superfície da ferramenta, sem se afastar da aparência da ferramenta convencional, em outras palavras, conservando grande parte do revestimento TiN. Quanto maior o número de passes sobre a ferramenta, maior foi o destacamento de revestimento como mostrado na Fig. 4.12 na ferramenta com 10 varreduras (ferramenta T6).

Topografia 3D - Para análise da topografia, foi varrida uma área de 4 mm², em cada ferramenta como apresentado na Fig. 4.13.

As dimensões das topografias geradas pelo laser, no formato de micro crateras superpostas, podem ser analisadas na Fig. 4.13. As superfícies mais rugosas são aquelas que apresentam uma gama de cores que inclui em uma única superfície a cor azul escuro (o vale mais profundo) e vermelha (o pico mais alto).

Este é o caso da topografia da ferramenta texturizada com maior potência (T1), onde observa-se grandes áreas na cor azul escuro, indicando que a potência aplicada no laser fundiu grandes densidades de picos de menor dimensão, deixando como resultado superfícies mais lisas acompanhadas de picos isolados. Este tipo de superfície provavelmente apresentará um desgaste acelerado na região dos picos, que são facilmente destacados e se tornam partículas duras que agirão contra a superfície da ferramenta.

Uma textura ideal deve possuir picos menos elevados e de maior largura, para dar uma maior área de contato que suportará o contracampo e crateras ou vales mais pronunciados, os quais servirão como cavidade para ancorar partículas duras que possam riscar a ferramenta e simultaneamente armazenar fluido que melhore a lubrificação.

Considerando as áreas onde há movimento relativo entre o cavaco e a ferramenta, uma superfície texturizada pode apresentar distribuição de pressão assimétrica, devido à presença das microcrateras, originando uma maior capacidade de sustentação de carga por um filme de fluido (RYK et.al, 2002).

A Tabela 4.2 mostra os parâmetros de rugosidade para as 7 ferramentas.

Tabela 4.2 – Parâmetros de rugosidade da superfície de saída das ferramentas.

	Ra [μm]	Rq [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]	RT [μm]	Sk	Ku	Rz [μm]
T1	0.8432	1.5525	20.7469	5.0736	25.8205	5.6617	56.7457	25.0688
T2	1.3377	2.1944	26.9824	5.7365	32.7189	4.0628	33.7663	31.2893
T3	1.4455	2.1164	19.4157	6.9264	26.3427	2.4129	14.9663	25.2367
T4	1.4118	2.0298	18.2609	6.1018	24.3628	2.1016	12.5007	23.4924
T5	1.3894	2.1785	26.4442	7.5168	33.9610	3.4807	26.2950	31.0174
T6	1.5081	2.3929	25.2609	7.1640	32.4249	3.4679	24.2516	31.0733
Sem T.	1.2864	1.8022	19.5797	6.5171	26.0967	2.1500	15.9623	24.6276

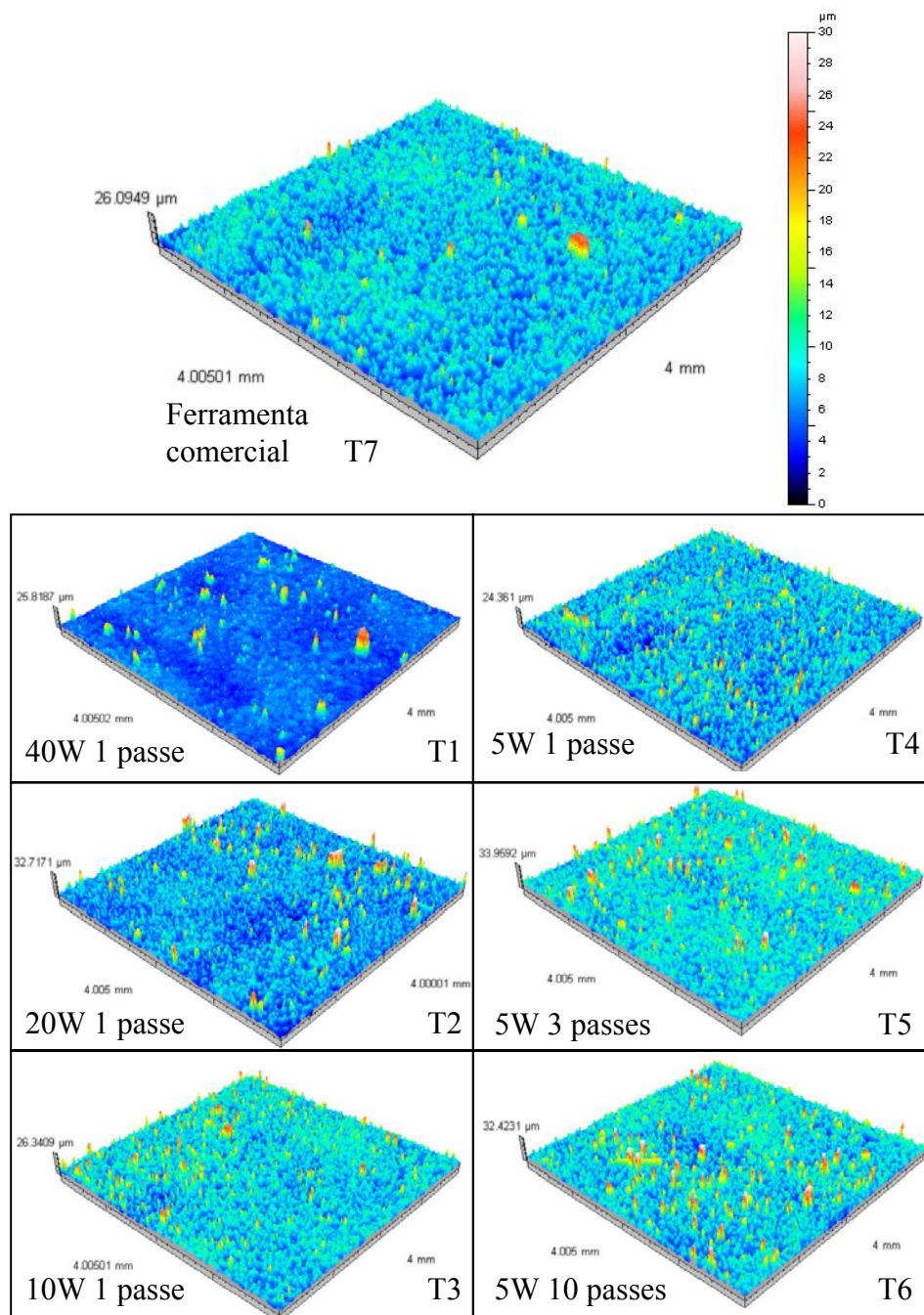


Figura 4.13 – Topografia 3D superfície de saída das ferramentas do primeiro lote.

A ferramenta 4, com valores ressaltados na cor cinza, apresentou os menores picos e simultaneamente apresentou o menor valor de Skewness (maior quantidade de vales), o que indica uma superfície mais adequada.

Utilizando este tipo de análise topográfica também podem ser levantadas outras características da superfície, tais como: a capacidade de carga (ETSION, 2009), volume disponível para alojamento de fluidos e partículas abrasivas (debris) (COSTA, 2005), entre outros.

4.2.2 – Análise química e MEV do primeiro lote de ferramentas texturizadas.

A microscopia eletrônica de varredura das superfícies de saída das 6 ferramentas texturizadas nesta etapa e uma ferramenta convencional (ferramenta 7) são apresentadas na Fig. 4.14.

Estas imagens foram processadas no laboratório de ensino e pesquisa em usinagem LEPU. A imagem gerada é uma combinação de (SE) elétrons secundários e elétrons retroespalhados. A técnica de elétrons retro espalhados permite visualizar as imagens em escala de cinzas, onde as áreas mais escuras representam os compostos de menor número atômico, por exemplo, o alumínio, presente nas camadas sub-superficiais do revestimento das ferramentas.

A área marcada como ferramenta 7 representa a ferramenta que não sofreu nenhum tipo de tratamento com o feixe laser. A microscopia desta superfície mostra uma cor que caracteriza principalmente uma composição de titânio, elemento presente na camada mais externa do revestimento da ferramenta.

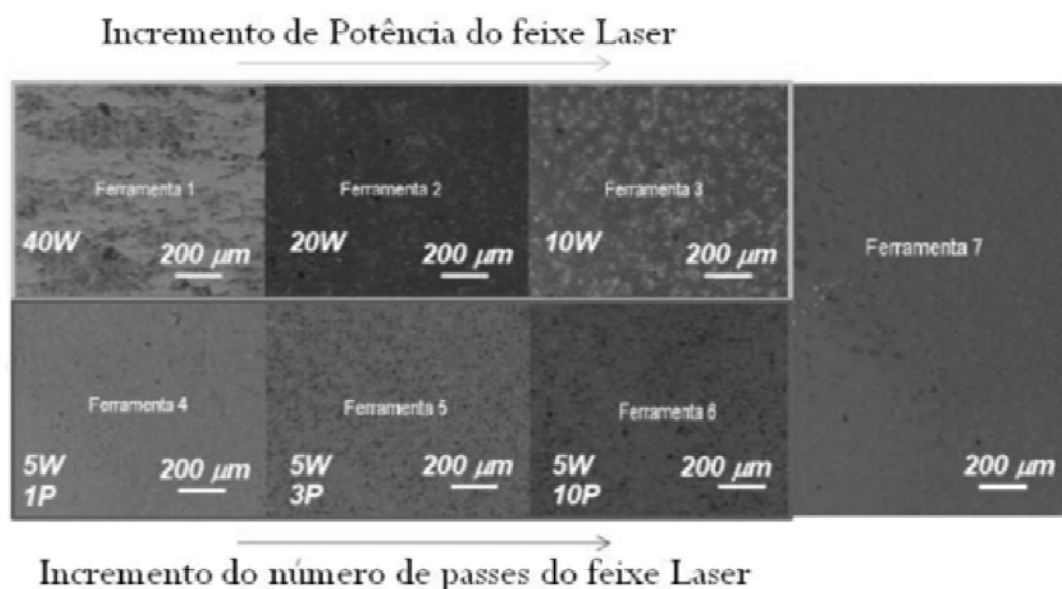


Figura 4.14 – MEV da superfície de saída de ferramentas.

Usando as imagens da Fig. 4.14, é possível observar dois efeitos sobre a ferramenta, o primeiro mostra que maiores potências do laser refletem em um dano proporcional nas

camadas de revestimento. Se considerarmos que esta ferramenta é revestida com três camadas (TiCN-Al₂O₃-TiN), a primeira foto, (ferramenta 1), apresenta uma área composta principalmente por titânio, característico da camada mais interna da ferramenta.

Em outras palavras, a potência de 40W no feixe laser, consegue retirar material até a camada mais próxima ao substrato (TiCN). A ferramenta 2, apresenta uma cor cinza escura, indicando que o laser retirou praticamente na sua totalidade a camada de TiN e deixou exposto o revestimento intermediário de alumina (Al₂O₃). A superfície texturizada com a potência de 10W mostra parte do revestimento da camada mais externa (TiN) e uma série de destacamentos na cor preta (Al₂O₃), distribuídos ao longo da superfície. O segundo efeito é a perda de revestimento devido ao número de varreduras do laser sobre a ferramenta. Analisando as ferramentas 4, 5 e 6 é evidente que quanto maior for o número de passes, maior será o destacamento de material de revestimento, mesmo para uma menor (potência de 5 W). Os dois tipos de remoção gradativa de revestimento tornam-se de interesse quando analisadas as ZAC geradas pelo laser. É muito provável que a área afetada pelo calor na condição de 5 W com 10 passes seja menor do que um único passe de 40 W.

Realizando uma análise química em laboratórios da Universidade Federal do Espírito Santo, A Figura 4.15 apresenta a composição da superfície da ferramenta T1.

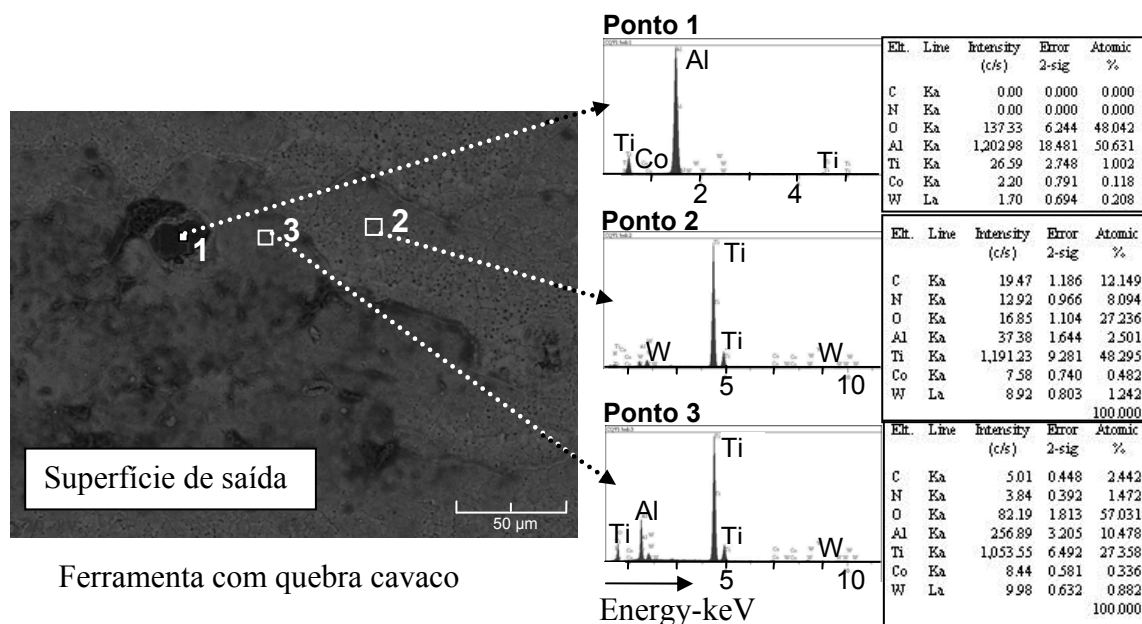


Figura 4.15 – EDX, composição química da superfície de saída da ferramenta com textura 1 (40 W).

A análise com EDS da textura 1 (40 W) (Fig. 4.15), mostra que houve destacamento dos revestimentos deixando expostas regiões compostas principalmente pela camada de TiCN. A região marcada com “1” (áreas mais escuras), mostra o alumínio característico da camada de Al_2O_3 , destacada quase na sua totalidade. Já os pontos 2 e 3, da mesma figura, mostram maior presença de titânio em níveis de energia próximos de 5 keV, provavelmente oriundos da camada mais próxima ao substrato (TiCN). Varias regiões analisadas na Fig 4.15 apresentam múltiplos pontos escuros, característicos do uso de laser sobre ferramentas de metal duro, como consequência da liberação de gases. As explosões dos gases no processo de sublimação do material produzem microfuros através do revestimento da ferramenta (VIANA, 2009; ARROYO, 2009). Em uma tentativa por observar o efeito do laser sobre a ferramenta a partir de uma vista transversal, a ferramenta com textura 4, ou seja, potência aplicada no feixe de 5W e um único passe, foi cortada ao meio por um processo de eletroerosão a fio. Posteriormente foi lixada e polida com pasta de diamante de 1 μm . A Figura 4.16(a) mostra a ferramenta convencional, a qual passou pelo mesmo processo de corte e preparação, e revela claramente a espessura da tripla camada de revestimento.

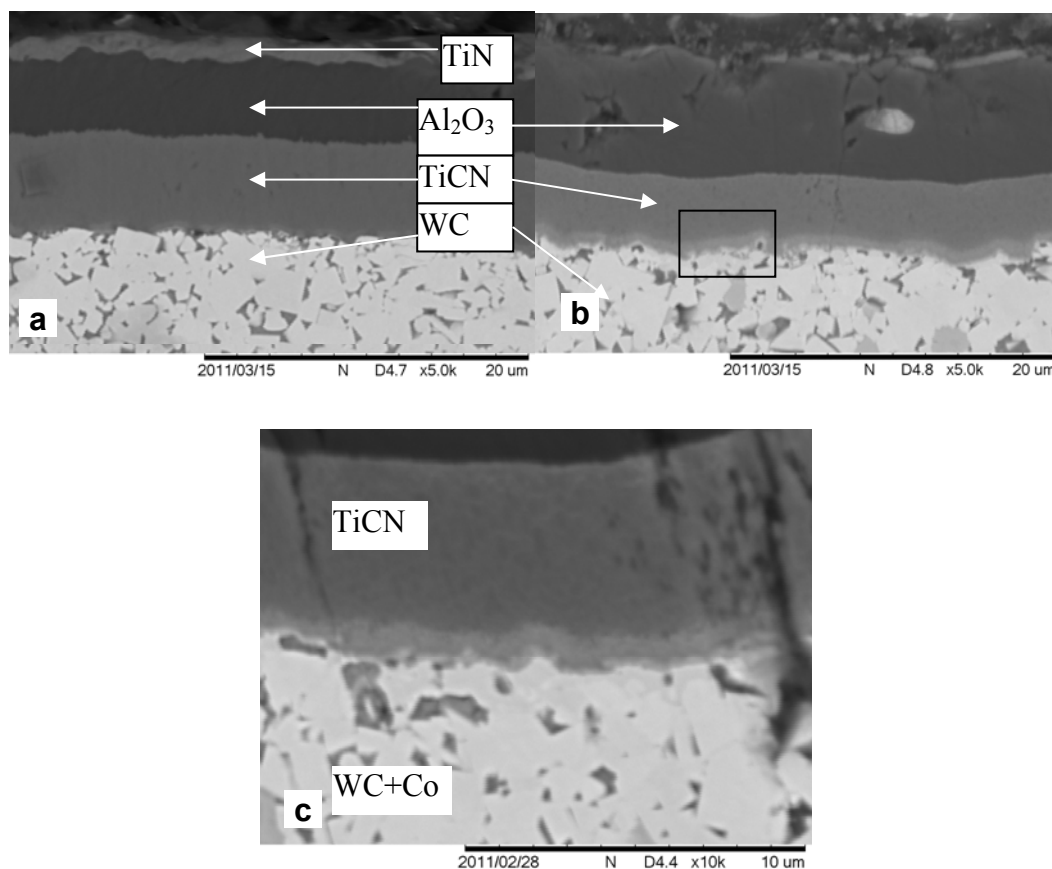


Figura 4.16 - Seção transversal a) ferramenta comercial revestida multicamada, b) ferramenta revestida e texturizada e c) ampliação de detalhe b.

A microscopia da Fig. 4.16 - b revela uma boa interação na interface da camada de revestimento de TiCN com o substrato. Uma ampliação desta imagem é apresentada com mais detalhe na Fig. 4.16 - c.

Analisando a Fig. 4.16 - b (texturizada), esta mostra a perda parcial de material da camada de revestimento TiN, quando comparada com a ferramenta convencional apresentada na Fig. 4.16 - a. As camadas consequentes de Al_2O_3 e TiCN aparentemente não se vem afetadas pela irradiação com o feixe laser para estes valores de energia.

4.2.3 – Análise comparativa das forças de corte do primeiro lote de ferramentas texturizadas

Nesta parte da primeira etapa foram usadas as ferramentas com as 7 texturas estudadas no item anterior. O material torneado foi o aço ABNT 1050, em três atmosferas diferentes, seco, MQF, jorro. O planejamento dos parâmetros de corte segue o planejamento descrito na Tab. 3.7 (1). Os gráficos das Fig. 4.17 até 4.19 apresentam os resultados obtidos em usinagem com atmosfera seco, MQF e jorro para as componentes da força de usinagem F_c , F_f e F_p respectivamente.

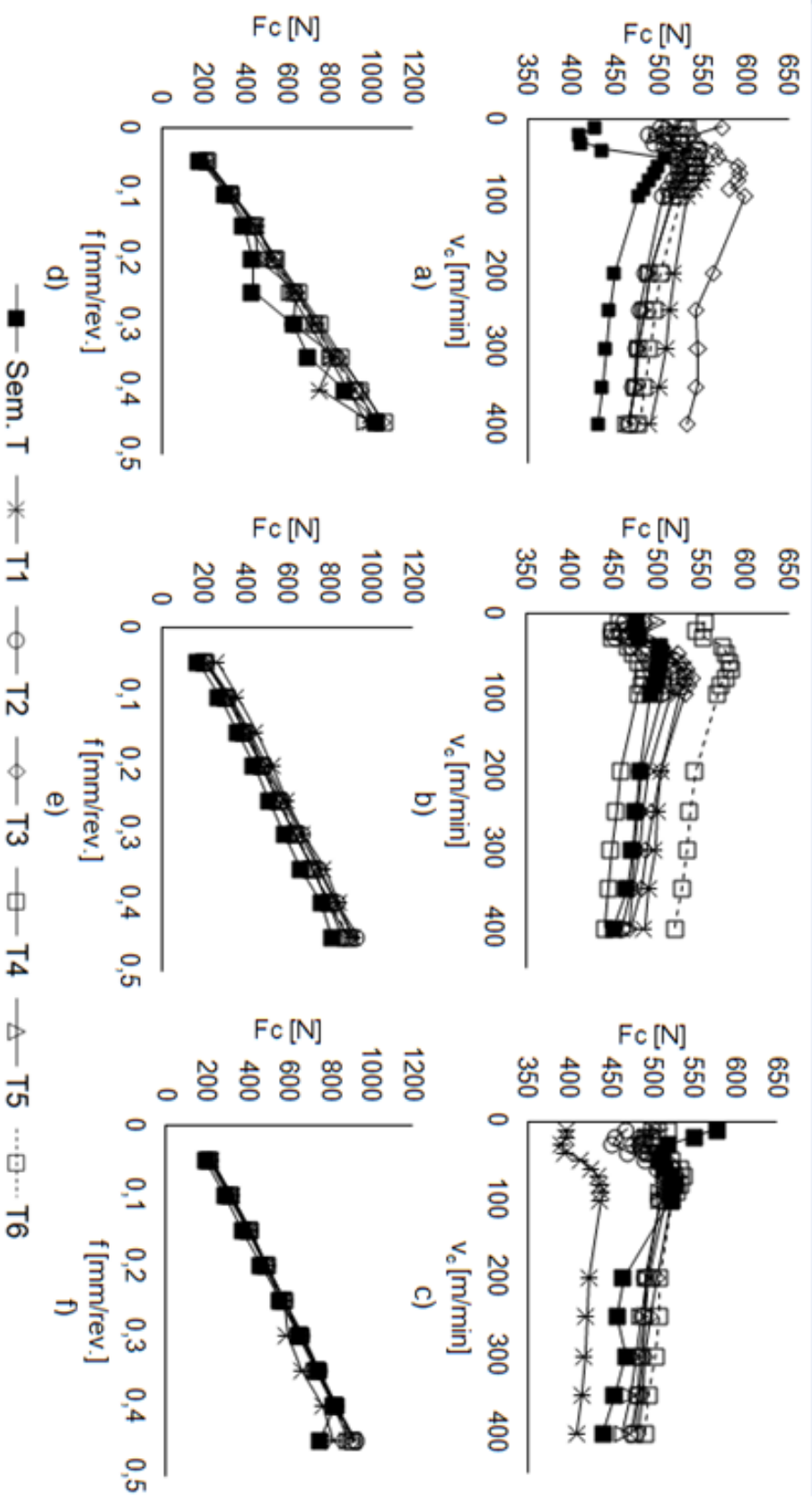


Figura 4.17 - Força de corte Vs vel. de corte a) seco, b) MQL, c) jorro; força de corte Vs avanço d) seco, e) MQL, f) jorro.

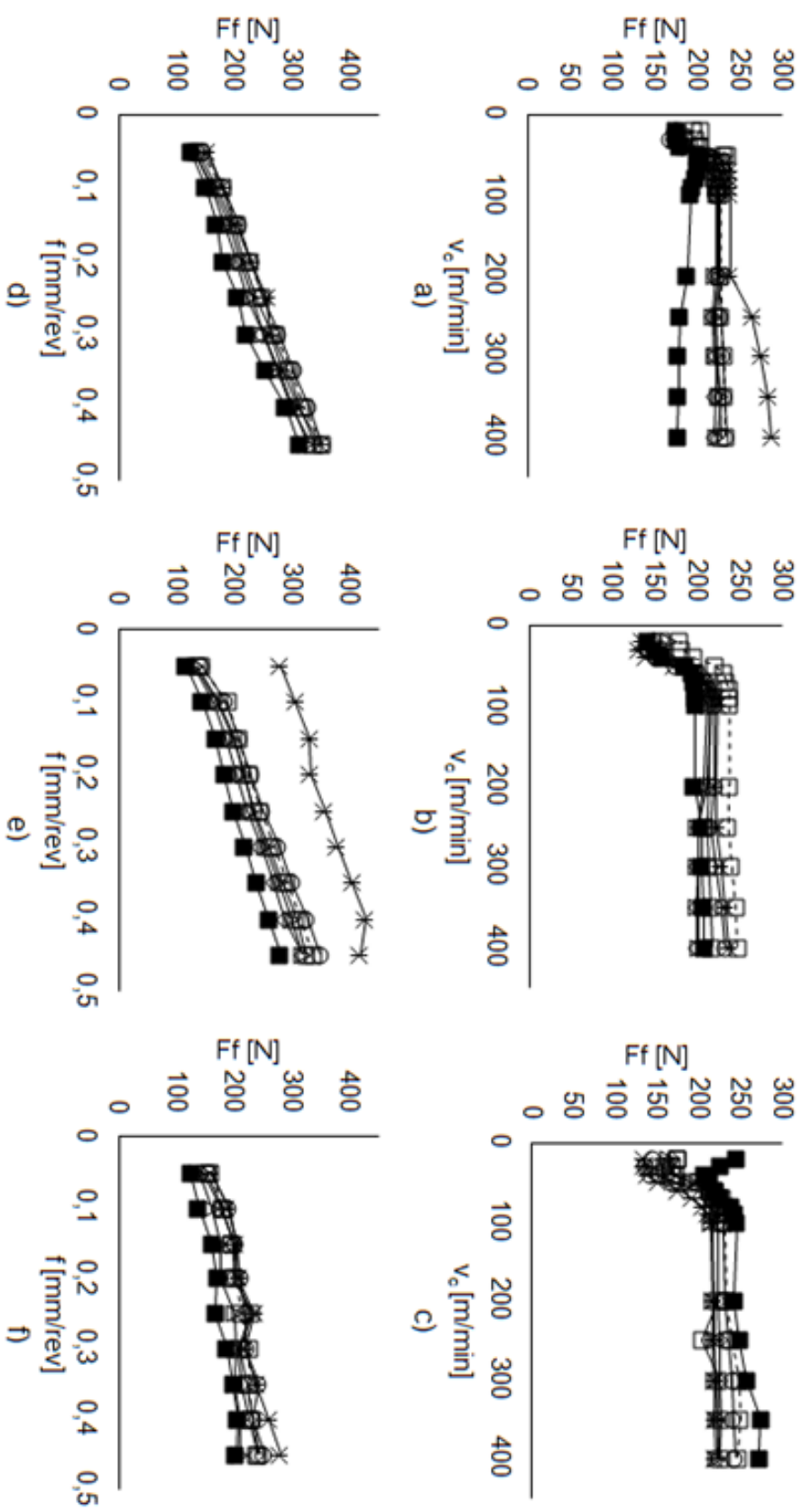
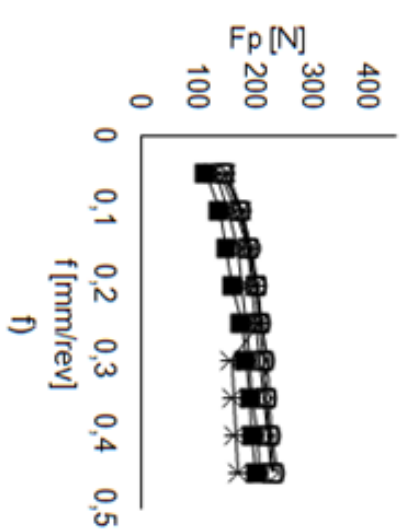
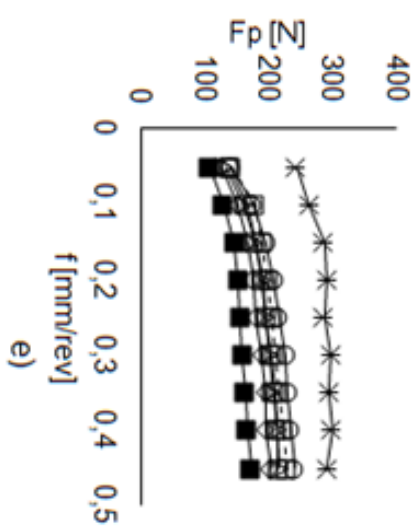
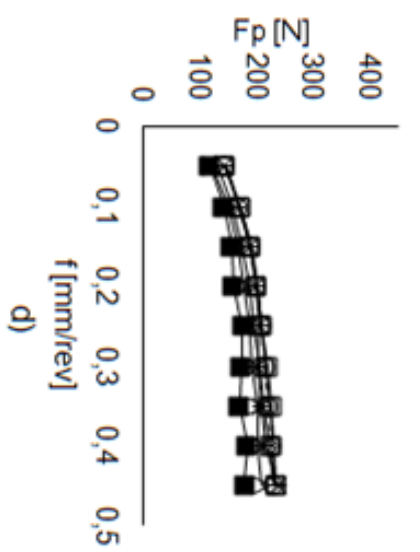
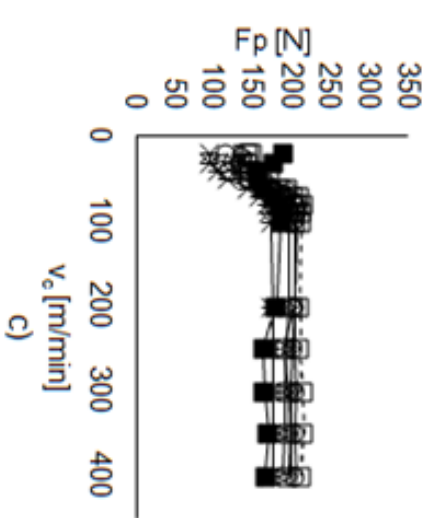
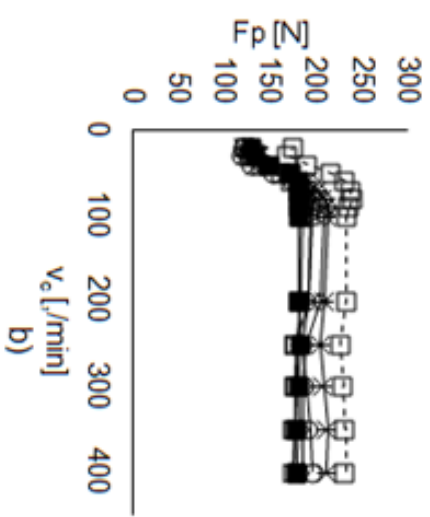
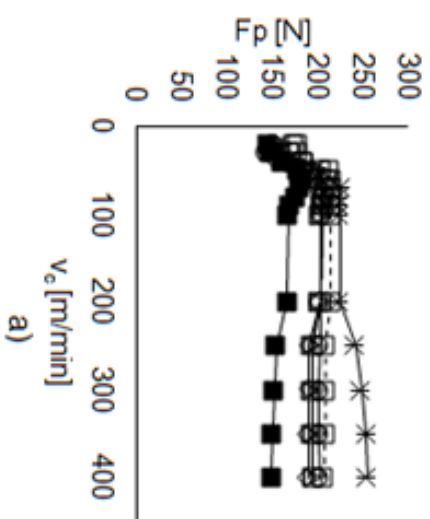


Figura 4.18 - Força de avanço Vs vel. de corte a) seco, b) MQF, c) jorro, força de avanço Vs avanço d) seco, e) MQF, f) jorro.



—■— Sem. T —*— T1 —○— T2 —◇— T3 —□— T4 —△— T5 ...□... T6

Figura 4.19 - Força passiva Vs vel. de corte a) seco, b) MQL, c) jorro; força passiva Vs avanço d) seco, e) MQL, f) jorro.

Os resultados em esta etapa levaram a conclusões apenas no uso de fluidos de corte e não no uso de diferentes texturas, já que nenhuma das ferramentas mostrou valores de força consideravelmente inferiores em todas as situações. Analisando as tendências apresentadas nos gráficos, a ferramenta sem textura mostrou-se como a melhor candidata na usinagem a seco.

O uso de fluidos de corte tanto em MQF quanto jorro, não apresentaram reduções significativas dos esforços de usinagem, pelo contrário, quando analisada isoladamente a ferramenta sem textura, o uso de fluido na forma de jorro resultou em maiores valores de força de corte. É provável que a posição do jato de jorro beneficiasse também o resfriamento da peça, o que ocasionaria uma maior resistência por parte do material devido à menor temperatura, gerando forças maiores. Ao analisar os gráficos que representam o comportamento das forças com a variação do avanço, observa-se que a inclinação do gráfico diminui em função da quantidade de fluido aplicada, este resultado pode representar uma possível eficácia da textura quando incrementadas as áreas de contato o que levaria a uma maior atuação por parte da textura e o fluido de corte. Esta etapa pode concluir que a estratégia de texturização de crateras superpostas em ambas as direções de varredura do feixe, não são a melhor alternativa na procura por benefícios para a usinagem, quando analisados os esforços durante a remoção de material.

Esta etapa forneceu informação útil para determinar as faixas nas quais é possível trabalhar com o feixe laser (valores de energia próximos de $3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$), e entender os fenômenos de ablação ou destacamento do material de revestimento. A etapa seguinte considera valores de densidade de energia próximos àqueles de melhor resultado na etapa 1, ou seja, densidades próximas aos $3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, aplicados na ferramenta T4 (5W e diâmetro focal de 100 μm). Adicionalmente a profundidade de corte também foi incrementada para 2 mm de ap, com a finalidade de observar uma maior área texturizada atuante no contato.

4.3 – ETAPA 2 – Segundo lote de ferramentas texturizadas (15 texturas) - Influencia da geometria da textura a LASER nas forças de usinagem

4.3.1 - Caracterização das forças de usinagem

Na etapa 2 foram reproduzidas 5 texturas em três valores de potência, 5, 11, e 17W, para um total de 15 texturas diferentes, cujos detalhes foram discutidos no capítulo de metodologia (Tab. 3.3 e 3.4). A texturização considerou valores de densidade de energia

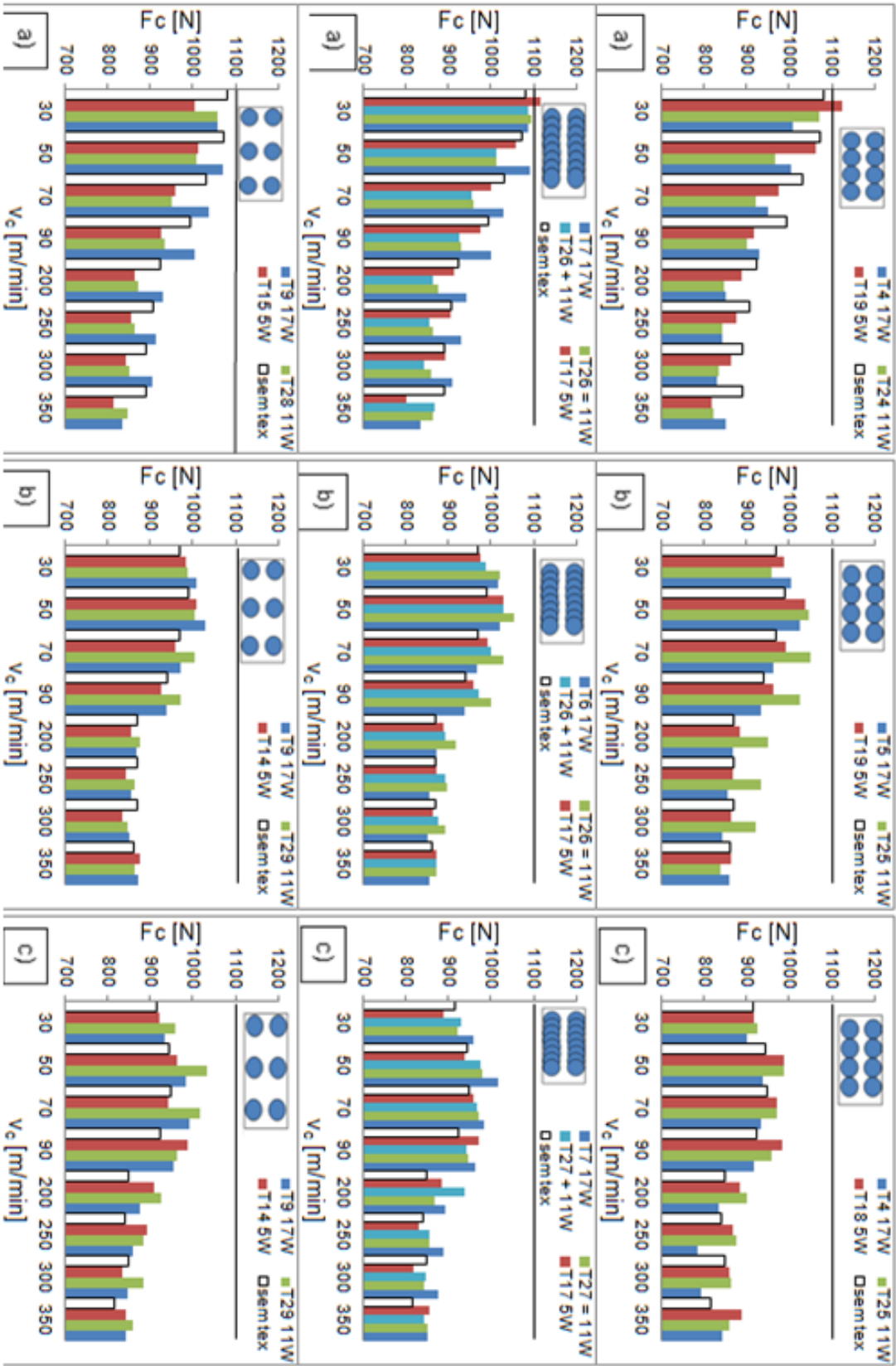
com base naqueles aplicados na etapa 1. Nesta segunda etapa variou-se o percurso de varredura do laser, controlando-o para reproduzir calotas separadas e superpostas em diferentes estágios.

Os maiores valores de força captados pelo dinamômetro foram as forças medidas na direção perpendicular ao avanço da ferramenta, medidas no plano de trabalho (F_c). Os valores máximos desta componente da força de usinagem com a velocidade variando e o avanço fixo em 0,2 mm/rev. foram próximos de 1000 N.

As condições de velocidade de corte fixa em (200 m/min) e o avanço variando, mostraram valores de força de corte que superaram os 1800 N, nas condições de corte mais severas. Cada ponto no gráfico representa uma média de 5000 pontos captados pelo sistema de aquisição, previamente filtrados. Os desvios padrão não foram mostrados já que estes são desprezíveis em relação à grandeza do sinal de força. Os maiores desvios foram de 25 N, estes se apresentaram nas condições de usinagem que exibiram APC (v_c inferiores a 70 m/min). Em velocidades de corte superiores a 70 m/min o desvio padrão dos pontos caiu para valores entre 8 e 10 N.

O primeiro gráfico apresentado na Fig. 4.20 mostra exclusivamente as forças de corte, resultantes da usinagem com avanço fixo, usando 15 ferramentas com texturas diferentes, propostas na segunda etapa. Na figura 4.20 a linha marcada a 1100 N serve como referência e representa o maior valor de força encontrado em todos os testes com variação da velocidade. A figura 4.21 apresenta os resultados da variação da força de corte em função da variação do avanço de corte com velocidade fixa, usando 15 ferramentas com texturas diferentes anteriormente citadas.

A comparação dos gráficos na horizontal mostra os resultados usando as três atmosferas, Seco; MQF e Jorro respectivamente. A comparação dos gráficos na vertical revela os resultados obtidos, variando unicamente a textura da ferramenta de corte. A comparação dentro de um único gráfico de barras estuda a comparação de uma mesma textura, reproduzida com potências no laser de 5, 11 e 17 W e a ferramenta sem textura (convencional), além da influência produzida pelo parâmetro de corte que esta variando (v_c e f).



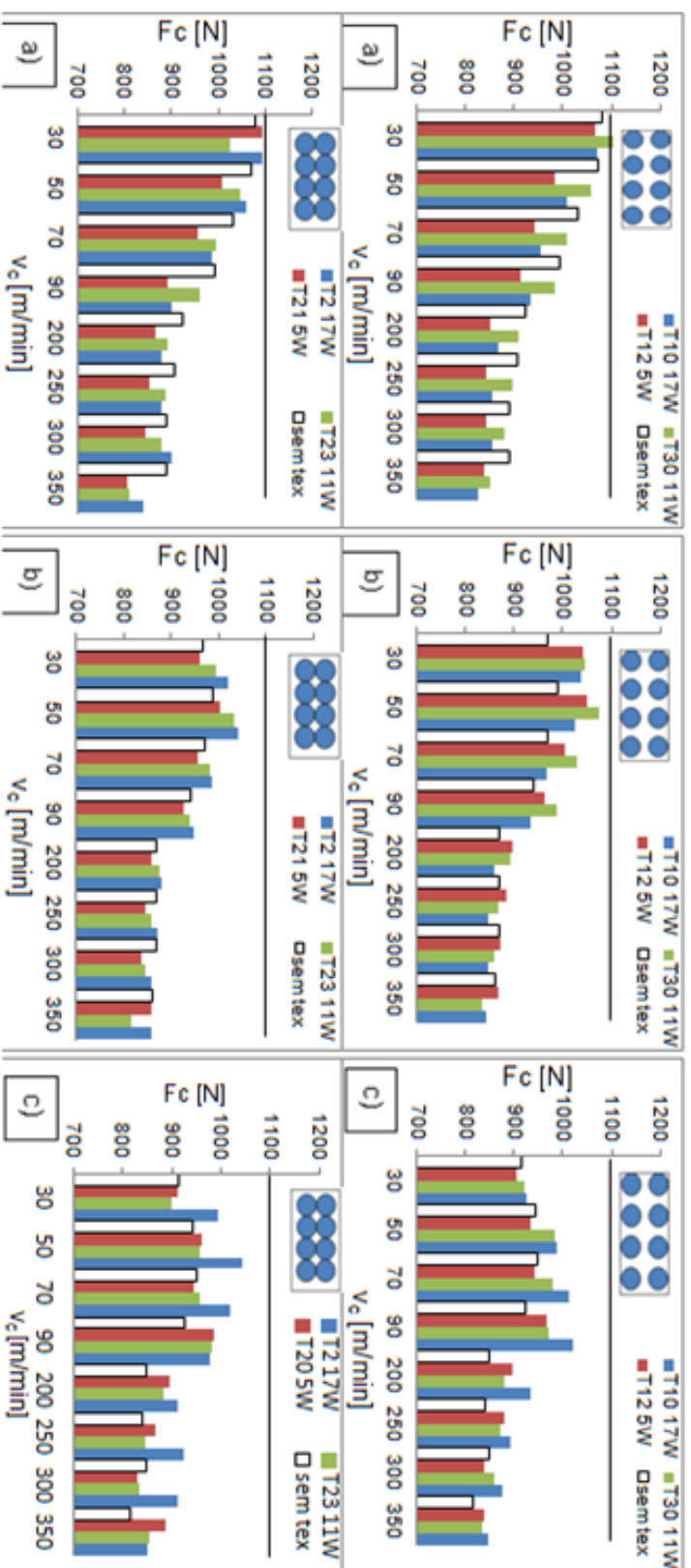
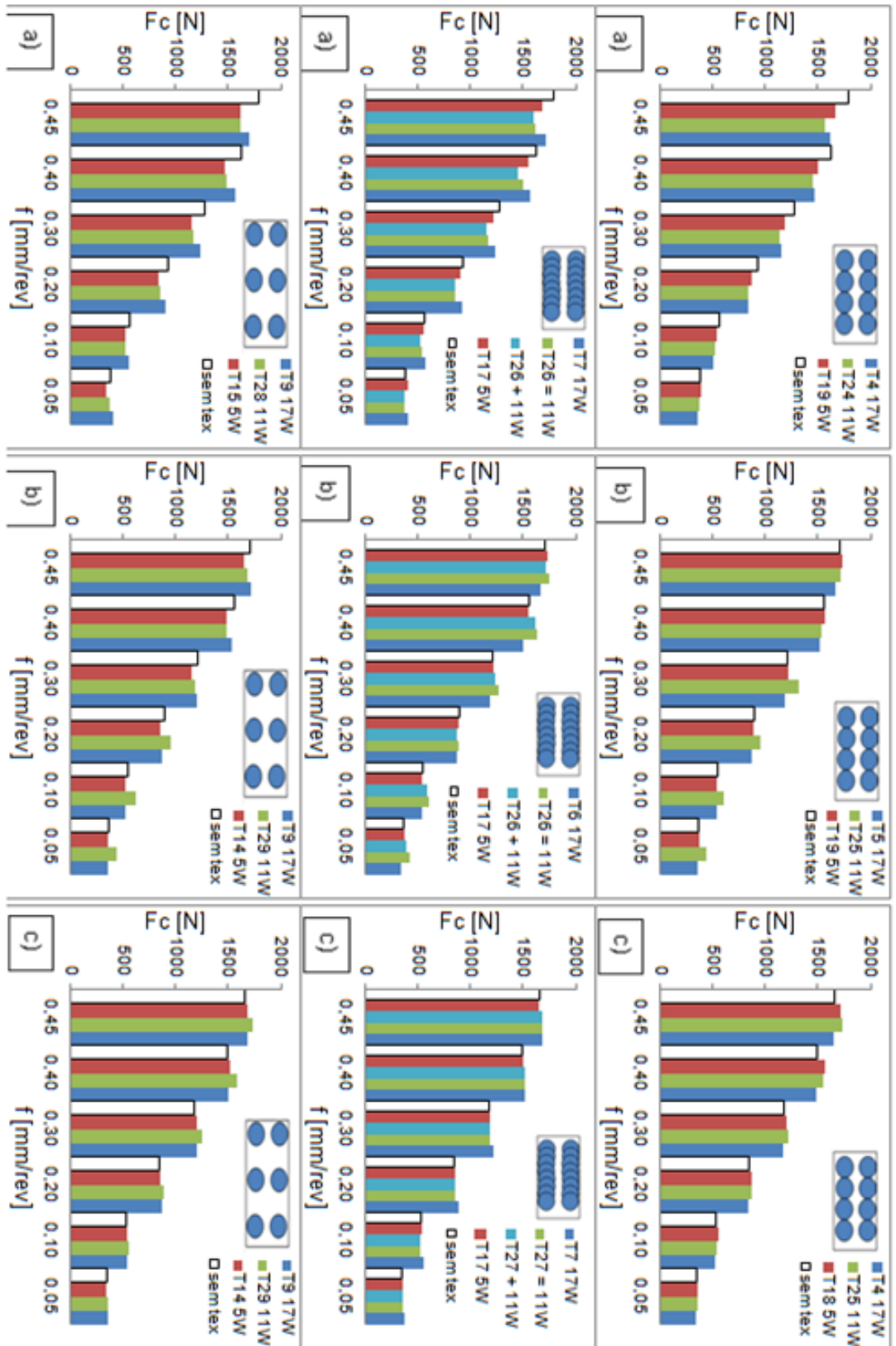


Figura 4.20 - Força de corte usando as ferramentas texturizadas na segunda etapa a) seco, b) MGF, c) jorro, $a_p = 2\text{mm}$, $f = 0,2\text{ mm/rev}$.



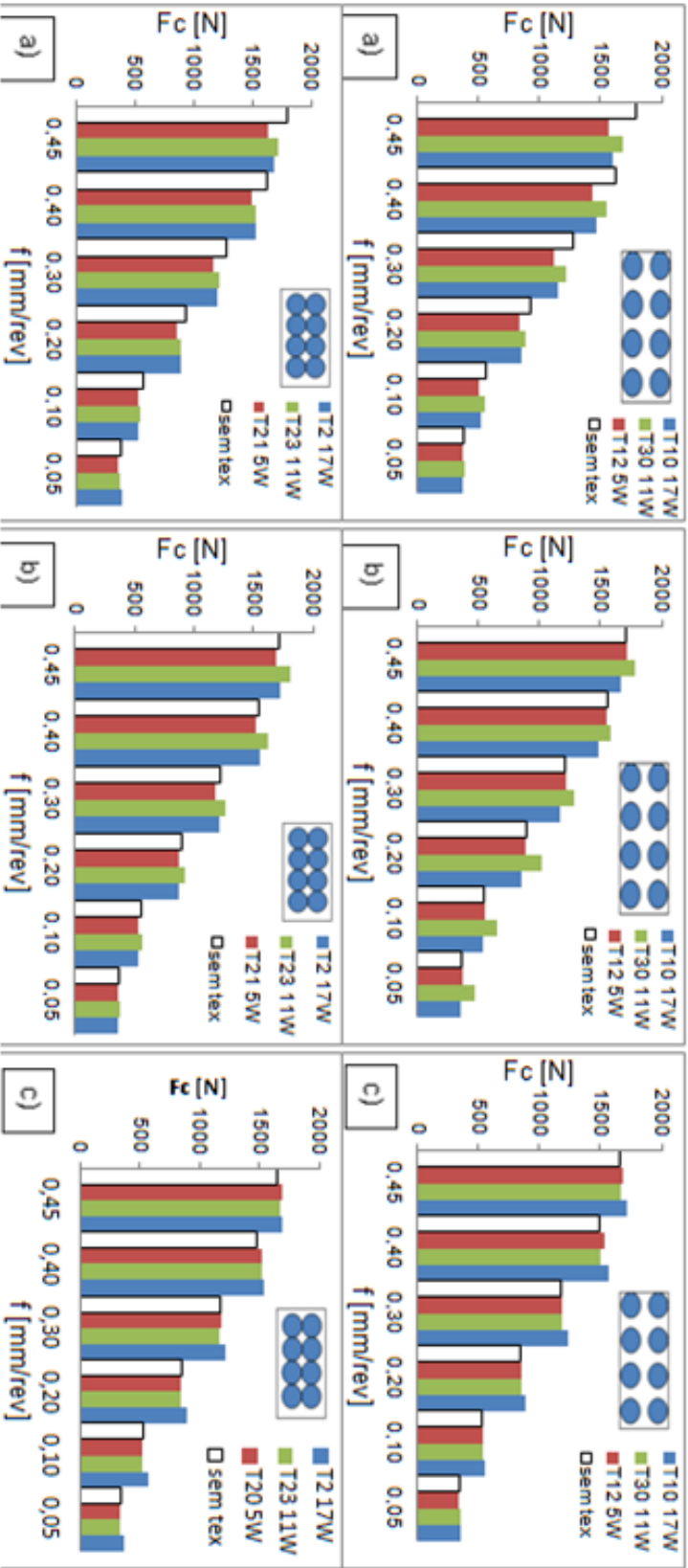


Figura 4.21 - Força de corte usando as ferramentas texturizadas na segunda etapa a) seco, b) MAF, c) jorro, $a_p = 2\text{mm}$, $v_c = 200\text{ m/min}$.

Esta parte do estudo tem o intuito de verificar se há influência por parte da combinação textura-atmosfera em algum nível de variação do movimento relativo entre a superfície da ferramenta e a raiz do cavaco (variação de v_c) ou na variação da área de contato entre estes (variação de f).

Para analisar os gráficos deve-se entender que cada figura esta composta por duas páginas e as variáveis são comparáveis no sentido vertical, horizontal e pela diferença de cores de cada gráfico de barras.

Os resultados desta etapa mostraram que o uso de texturas a laser não influenciaram significativamente nas forças de corte (Fig. 4.20 e 4.21) ou nas demais componentes da força de usinagem (veja Anexo 1). A variação das forças é mínima quando comparadas com os resultados encontrados nas ferramentas convencionais.

Considerando a afirmação anterior e usando como base de referência a linha a 1100 N, podemos ver dentro das tendências que:

- A força de corte é reduzida com o uso de fluido na forma de MQF e jorro, principalmente nas baixas velocidades de corte, onde há um maior efeito lubrificante por parte do fluido (Machado et al., 2011).
- Aparentemente o uso de fluido na forma de jorro apresenta-se como a melhor alternativa, quando considerada a força de usinagem.
- Na usinagem com MQF todas as texturas apresentaram resultados similares
- Na usinagem com jorro todas as texturas apresentaram resultados similares aos encontrados no uso de ferramentas sem textura, ainda, é importante resaltar que as texturas com canais paralelos (T26 e T27 11W) foram analisadas em duas orientações, a primeira disposta com as marcas paralelas ao movimento do fluxo do cavaco, representada por um símbolo (=) e posteriormente com as marcas dispostas perpendiculares ao fluxo do cavaco, representada por um símbolo (+). Esta variação na orientação das marcas também não obteve variações no comportamento da força de corte, embora houve uma sutil tendência de melhores resultados com as marcas dispostas perpendiculares. Este fato leva a considerar que as áreas de contato entre o cavaco e a ferramenta não variam significativamente na presença de uma textura, mas, isto não é motivo para não avaliar estas diferentes ferramentas estudando uma outra variável de saída. Por exemplo, a vida da ferramenta.

Estudando o comportamento na aplicação de MQF (veja anexo 1) as diferentes texturas aplicadas usando três potências diferentes em atmosfera de MQF, não apresentaram influências significativas nas mudanças das forças de usinagem.

Centrando a atenção na ferramenta de marcas paralelas, é interessante afirmar que mesmo usando a mesma ferramenta, a qual garante a mesma grandeza das crateras produzidas na texturização, foram observadas pequenas diferenças quando analisada a ferramenta no sentido paralelo e comparada com a mesma ferramenta no sentido perpendicular ao fluxo do cavaco.

Na primeira situação a área de contato cavaco-ferramenta interage com aproximadamente 10 linhas de cavidades da textura (sentido paralelo), na segunda situação apenas 5 ou menos cavidades interagem na mesma área de contato (sentido perpendicular). A ilustração da Fig. 4.22 representa esta situação, a seta indica o sentido de fluxo do cavaco e a área delineada indica a área de contato cavaco-ferramenta.

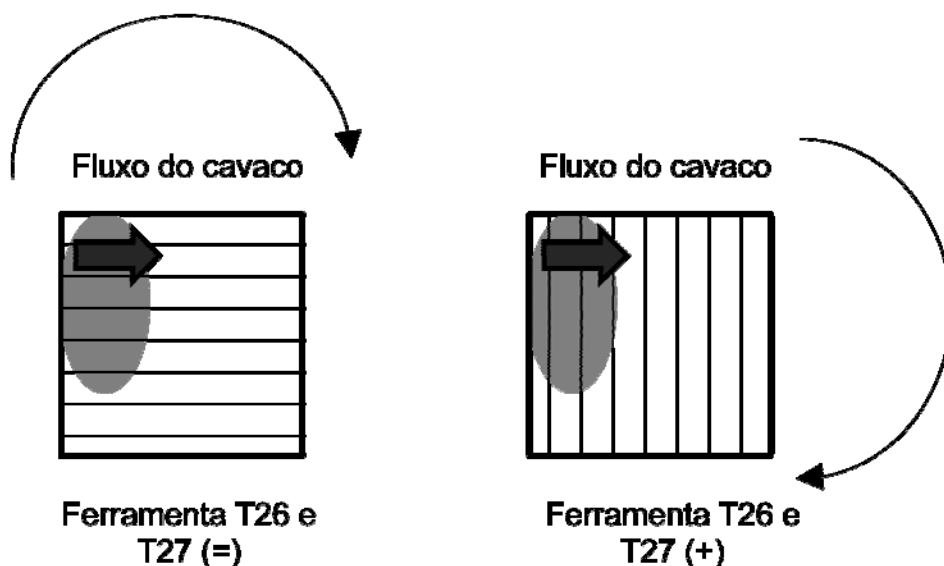


Figura 4.22 - Desenho esquemático de giro de ferramenta e movimento do cavaco.

4.3.2 – Análise topográfica do terceiro lote de ferramentas texturizadas

A análise topográfica mostra que várias ferramentas apresentaram descontinuidades na qualidade da texturização. Foi verificado que a textura evolui durante a texturização (veja Fig. 4.23), isto devido ao aumento do acoplamento do laser. No início, a ferramenta está fria e o plasma se desenvolve pouco. Com a continuidade do processo, aumenta a intensidade de ablação e o laser fica mais intenso. Nas texturizações com potências de 5W a energia do laser não alterou a topografia das ferramentas, em outras palavras, não houve ablação de material considerável, veja um exemplo de texturização com esta potência nas ferramentas da Fig. 4.23, as ferramentas T17 e T12 foram texturizadas usando diferentes padrões, mas não foram encontradas diferenças na topografia das mesmas.

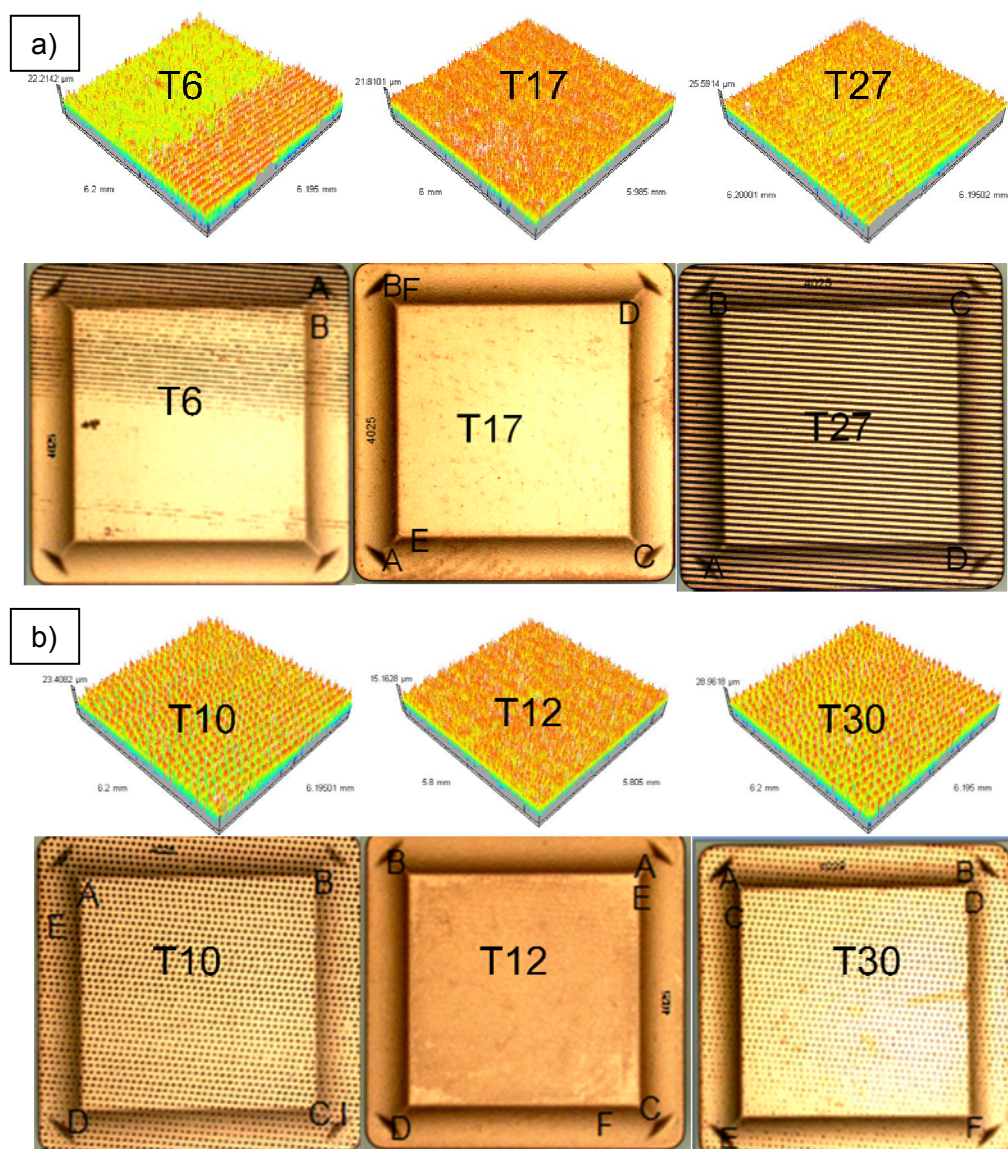


Figura 4.23 - Topografia 3D e fotos de texturas a 17, 5 e 11 W respectivamente das ferramentas a) T6, T17, T27 e b) T10, T12, T30

Todas as ferramentas texturizadas com 5W foram testadas para avaliar a possibilidade de influência do calor do feixe sobre a ferramenta.

Para garantir a presença da textura nos testes de usinagem usando as ferramentas texturizadas a 11 e 17 W, foram utilizadas apenas aquelas arestas que apresentavam o padrão de textura. Desta maneira o número de testes, para um tipo de textura foi distribuído entre as arestas com textura bem definida.

Aquelas arestas da ferramenta que usinaram em mais de uma ocasião, foram levadas ao microscópio para verificar a ausência de um desgaste severo sobre a textura. A Figura 4.20

apresenta as topografias de seis tipos de textura comparando a influência da potência do laser na topografia da ferramenta. Nesta figura mostra-se as imagens de topografia junto a sua respectiva fotografia capturada através de um microscópio ótico.

As texturas T6, T17 e T27 da Fig 4.23 a, foram texturizadas a 17, 5 e 11 W respectivamente. A geometria tem um formato de canais paralelos ao longo da ferramenta devido a superposição das crateras deixadas pela pulsação do laser em uma direção, com espaçamento na direção perpendicular a esta.

As ferramentas T10, T12 e T30 da Fig 4.23 b, foram texturizadas a 17, 5 e 11 W, respectivamente, com geometrias no formato de *dimples* ou micro poças espaçadas nos dois sentidos de varredura do feixe.

Como já foi citado anteriormente, cada uma das 15 texturas propostas para esta etapa foi duplicada ou repetida. Isto ajudou a verificar a repetibilidade da textura.

Analisando as texturas propostas, a condição que apresentou a maior homogeneidade de texturização (marcação mais homogênea) foi a textura com marcas paralelas, a 11 W de potência (T26 e 27).

4.3.3 – Análise química e MEV do terceiro lote de ferramentas texturizadas

Foram realizadas análises químicas e no MEV das ferramentas antes da usinagem. Usando microscopia eletrônica de varredura, verificou-se que a textura foi originada através de ablação das camadas mais externas da ferramenta, deixando zonas de erosão nas vizinhanças das marcas.

As Figuras 4.24, Fig 4.25 e Fig. 4.26, apresentam as ferramentas texturizadas nesta etapa, usando aumento de 100, 300 e 3000 vezes, respectivamente. A primeira ampliação permite ver o padrão de texturização em cada situação.

Analisando uma única marca foi observada uma variação de cor na escala de cinzas, o que indica um gradiente de energia que vai do valor máximo no centro do feixe, até valores de energia que não conseguem retirar o material. Este fenômeno faz com que o tamanho das marcas seja menor do que o diâmetro do spot (diâmetro do feixe incidente na amostra), que para esta etapa foi de 250 μm .

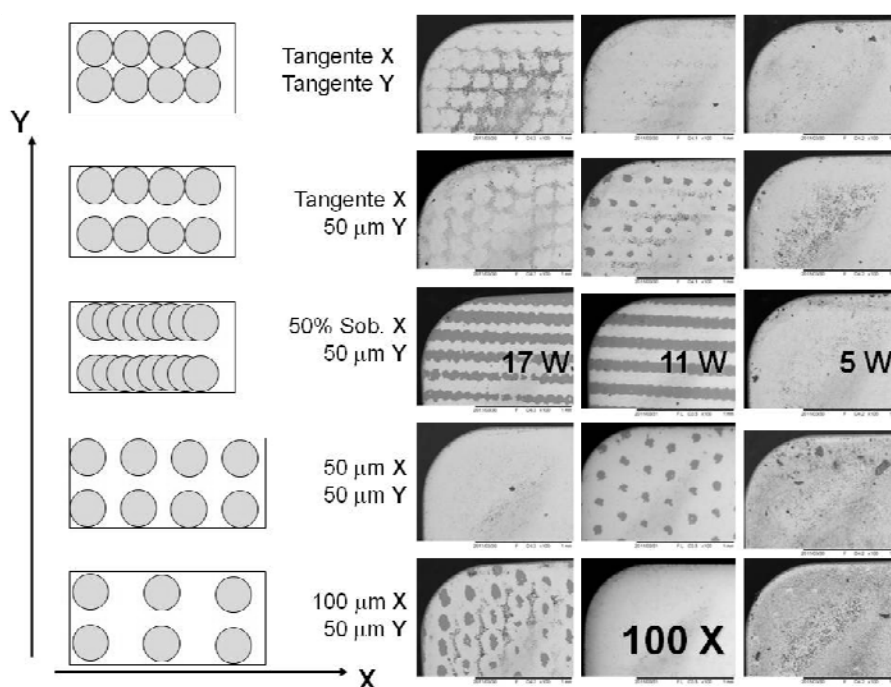


Figura 4.24 - MEV de ferramentas texturizadas a 17, 11 e 5 W respectivamente para cinco texturas diferentes com ampliação de 100X.

O aumento na ampliação da foto MEV para 300X (Fig. 4.25) permite visualizar as áreas claras ao redor de cada cratera, estas indicam a evaporação de impurezas (limpeza) da superfície.

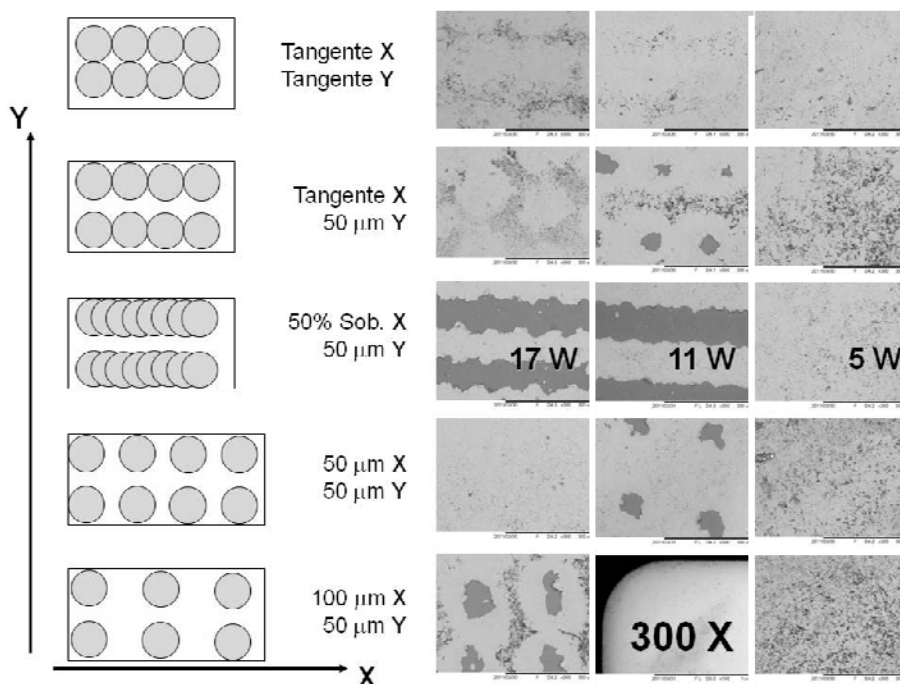


Figura 4.25 - MEV de ferramentas texturizadas a 17, 11 e 5 W respectivamente para cinco texturas diferentes com ampliação de 300X.

A variação no tamanho das crateras produzidas oscila entre 40 e 100 μm dependendo da potência aplicada no feixe.

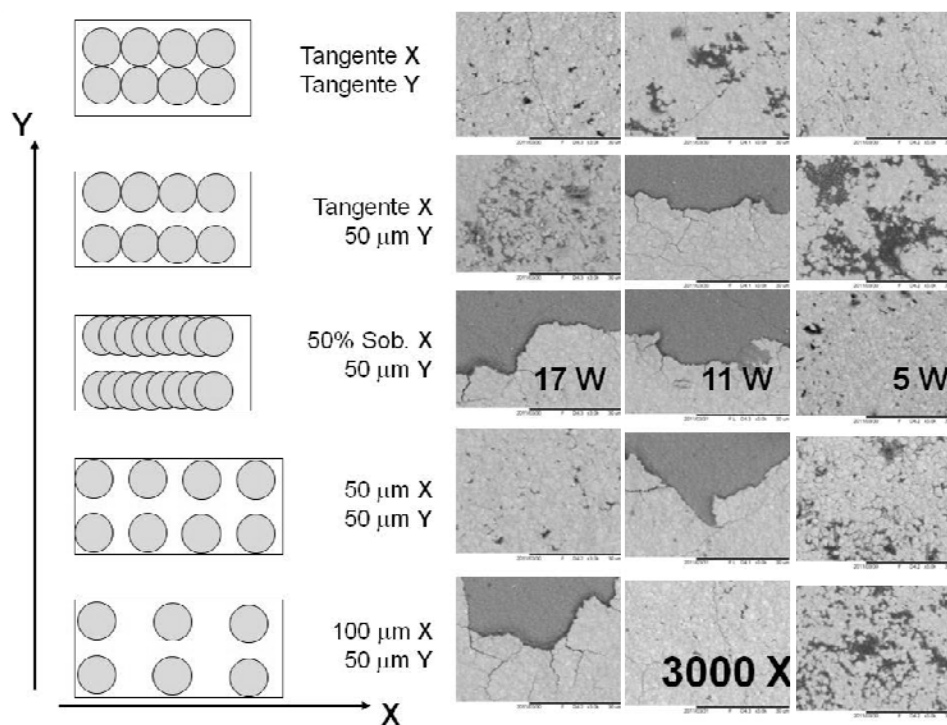


Figura 4.26 - MEV de ferramentas texturizadas a 17, 11 e 5 W respectivamente para cinco texturas diferentes com ampliação de 3000X.

A maior ampliação (3000X), apresentada na Fig 4.26, mostra, além da cratera fraturada, a propagação de trincas intragranulares no revestimento. Este fato leva a supor que em uma etapa inicial da formação do cavaco, fragmentos de revestimento TiN serão desprendidos da superfície da ferramenta e, aparentemente o revestimento de Al_2O_3 permanece inteiro e livre de trincas.

4.4 - ETAPA 3. Terceiro lote de ferramentas texturizadas (1 textura) – Influencia da textura na vida da ferramenta

Para a terceira etapa, foram manufaturadas novas texturas com um único padrão de geometria. Foram considerados os parâmetros do laser aplicados nas duas etapas anteriores. Embora tenham sido avaliados diferentes níveis de energia no laser, e diferentes geometrias nas texturas, os resultados não foram significativamente conclusivos. Assim,

decidiu-se recriar a melhor textura da segunda etapa (maior homogeneidade e repetibilidade), identificada com a nomenclatura T26 e T27, canais paralelos testados a 0 e 90° de inclinação, usando uma energia por pulso próxima daquela ferramenta com melhores resultados na etapa1 (ferramenta 4) com densidade de energia na ordem dos 10^7 [W/cm²]. Um corte transversal desta ferramenta é apresentado na Fig. 4.27.

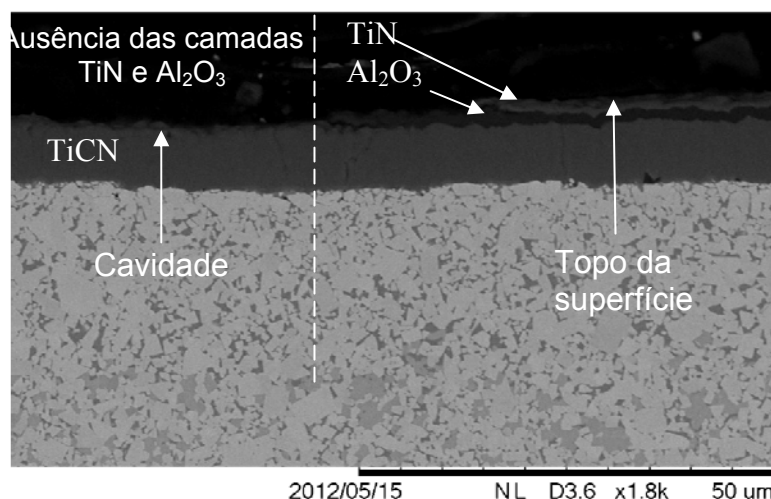


Figura 4.27 - MEV da seção transversal de um canal de uma ferramenta do terceiro lote de texturização.

A Figura 4.27 apresenta um corte da seção transversal da ferramenta texturizada utilizada nesta etapa, ressaltando a ausência dos revestimentos TiN e Al₂O₃ no fundo da cavidade (linha deixada pelo feixe laser). Na parte mais elevada da superfície (área não atingida pelo feixe), os revestimentos permaneceram intactos. Os parâmetros de corte do feixe laser e a estratégia de texturização foram apresentados com mais detalhe na metodologia deste documento.

4.4.1 – Análise topográfica do terceiro lote de ferramentas texturizadas

Com uso de interferometria a laser foram adquiridas as características da topografia das ferramentas texturizadas nesta etapa. A Figura 4.28-a mostra a topografia da superfície de saída da ferramenta e os parâmetros de rugosidade e a Fig 4.28-b apresenta um perfil isolado no sentido perpendicular aos canais, que permite ter uma noção do tamanho dos mesmos, mostrando as alturas dos picos como sendo de no máximo de 4 µm. Em outra posição, entretanto, considerando o parâmetro de rugosidade Rt, observa-se que este valor

pode atingir até 6,53 μm . Isto representa a ablação de duas, das três camadas protetoras da ferramenta, as quais possuem uma espessura total aproximada de 11 μm .

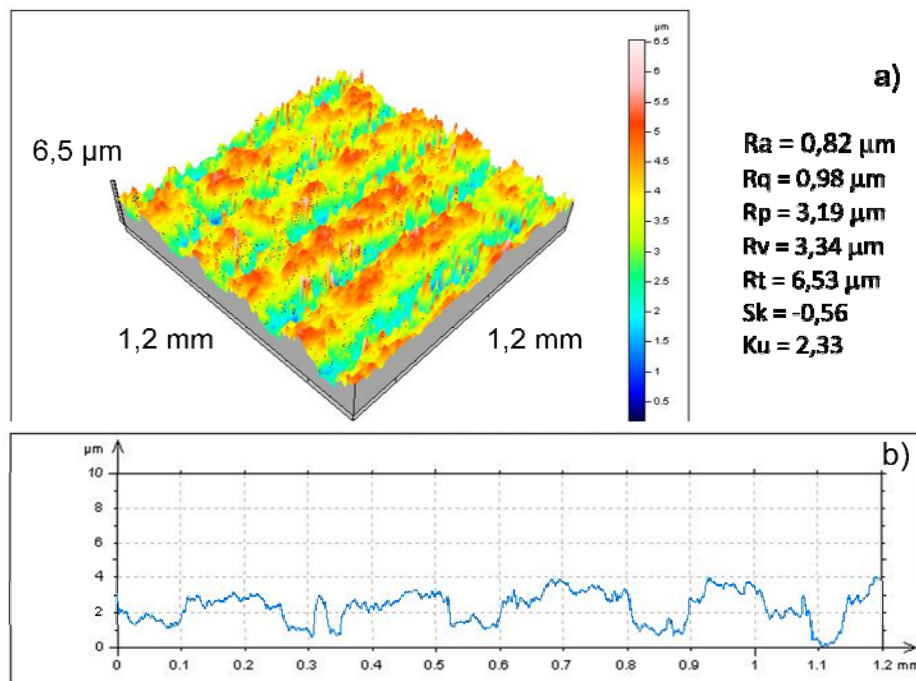


Figura 4.28 - Interferometria a laser de ferramenta texturizada no terceiro lote. a) Topografia 3D, b) perfil 2D.

4.4.2 – Análise química e MEV do terceiro lote de ferramentas texturizadas.

Usando um mapa de raios X via MEV/EDS (Fig. 4.29) são identificados os principais componentes da superfície de saída da ferramenta tratada com o laser. As áreas cinzas na primeira foto da esquerda são ricas em oxigênio (vermelho) e alumínio (verde), evidenciando a camada de Al_2O_3 , já as áreas com cinza mais clara na primeira foto da esquerda, são ricas em titânio, presente na camada mais externa TiN e na camada mais próxima ao substrato TiCN. Através desta fotografia é evidente como a trilha em cinza claro representa a camada TiN e as áreas de cinza claro irregulares representam a camada TiCN.

Esta figura também se torna útil para evidenciar a distribuição gaussiana da energia do feixe, sendo mais concentrado no centro da trilha, com remoção das duas camadas mais externas e menos intenso nos extremos, removendo apenas a camada mais externa de revestimento.

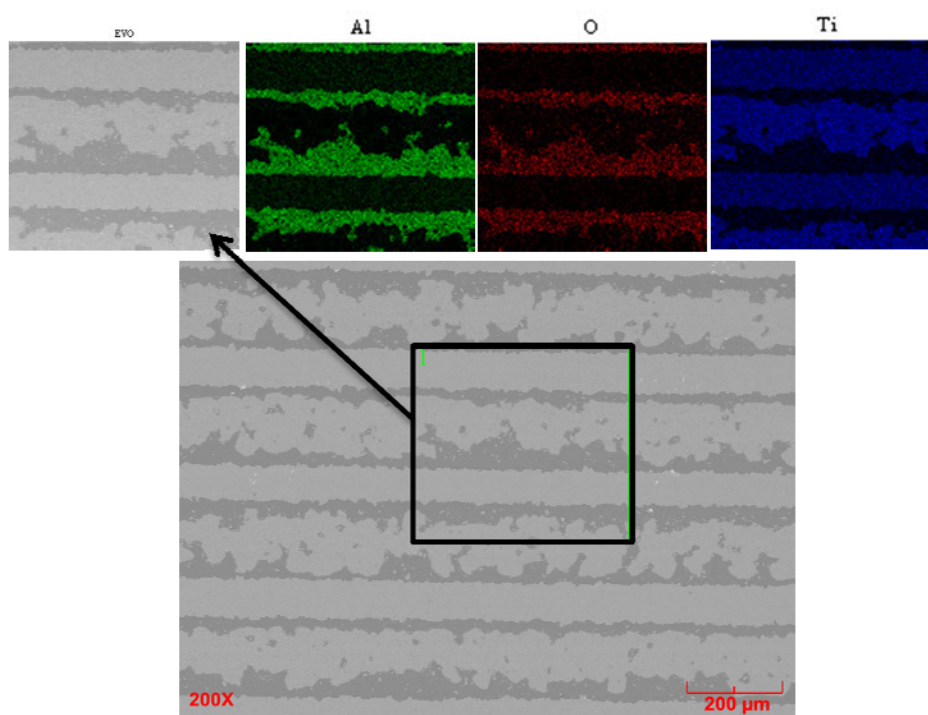


Figura 4.29 - Mapas de raios-x da superfície da ferramenta texturizada via MEV/EDS.

4.4.3 - Testes de vida do terceiro lote de ferramentas texturizadas

O estudo da vida de ferramenta, realizado nesta etapa, incluiu unicamente a análise de vida de ferramenta com aplicação de fluidos de corte, na forma de MQF e jorro. A usinagem a seco deste tipo de aços não têm grande aplicação no mercado. Como descrito no capítulo de metodologia os testes desta etapa obedecem a um critério de fim de vida composto. A Figura 4.30 mostra a curva de vida das ferramentas estudadas, nas velocidades de a) 150 [m/min] e b) 350 [m/min].

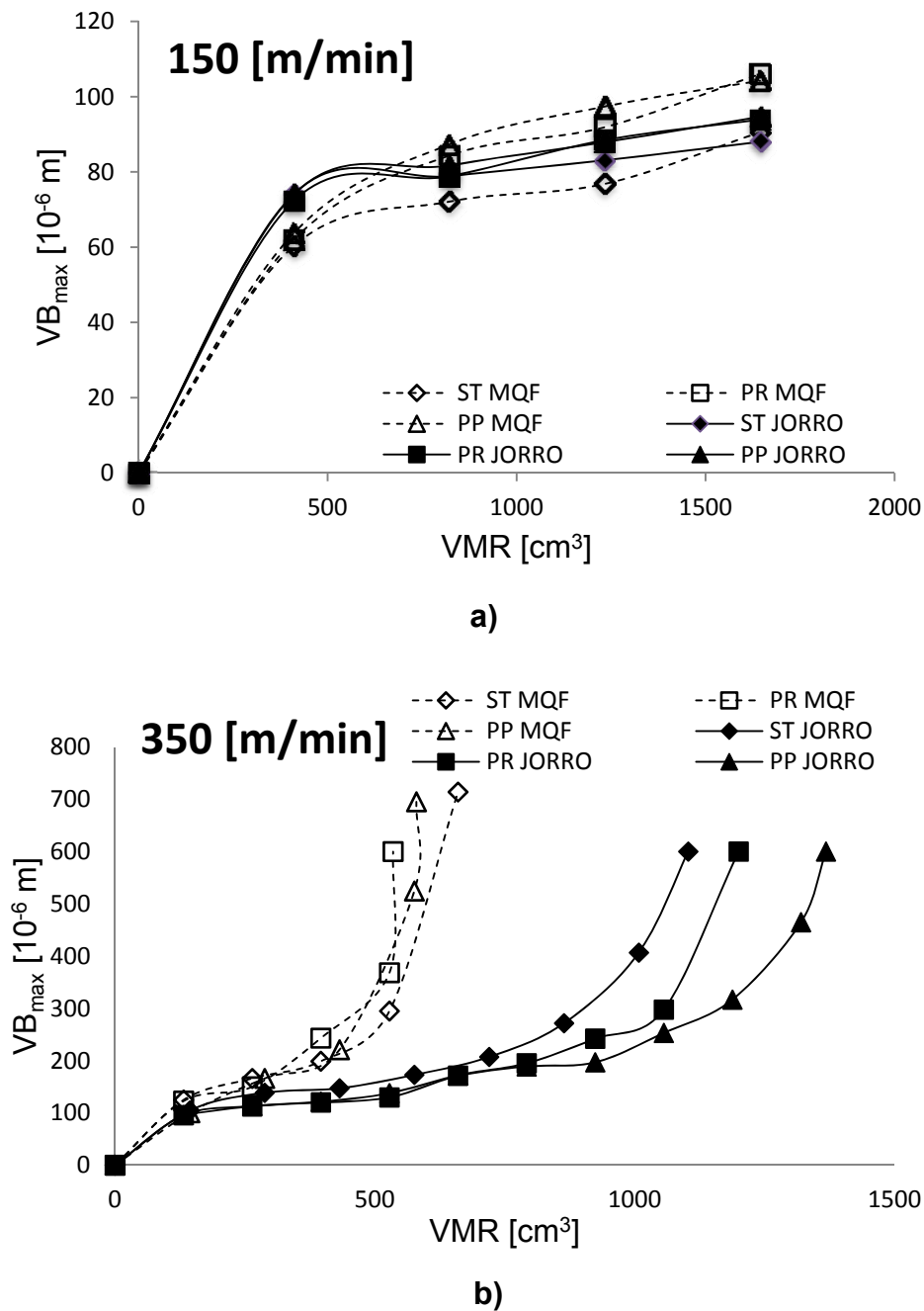


Figura 4.30 - Desgaste de flanco Vs volume de material removido, $f = 0,25 \text{ mm/min}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, atmosfera MQF e jorro, velocidade de corte a) 150 m/min, b) 350 m/min.

A Figura 4.31 apresenta uma réplica dos testes de vida, apresentados na Fig. 4.30.

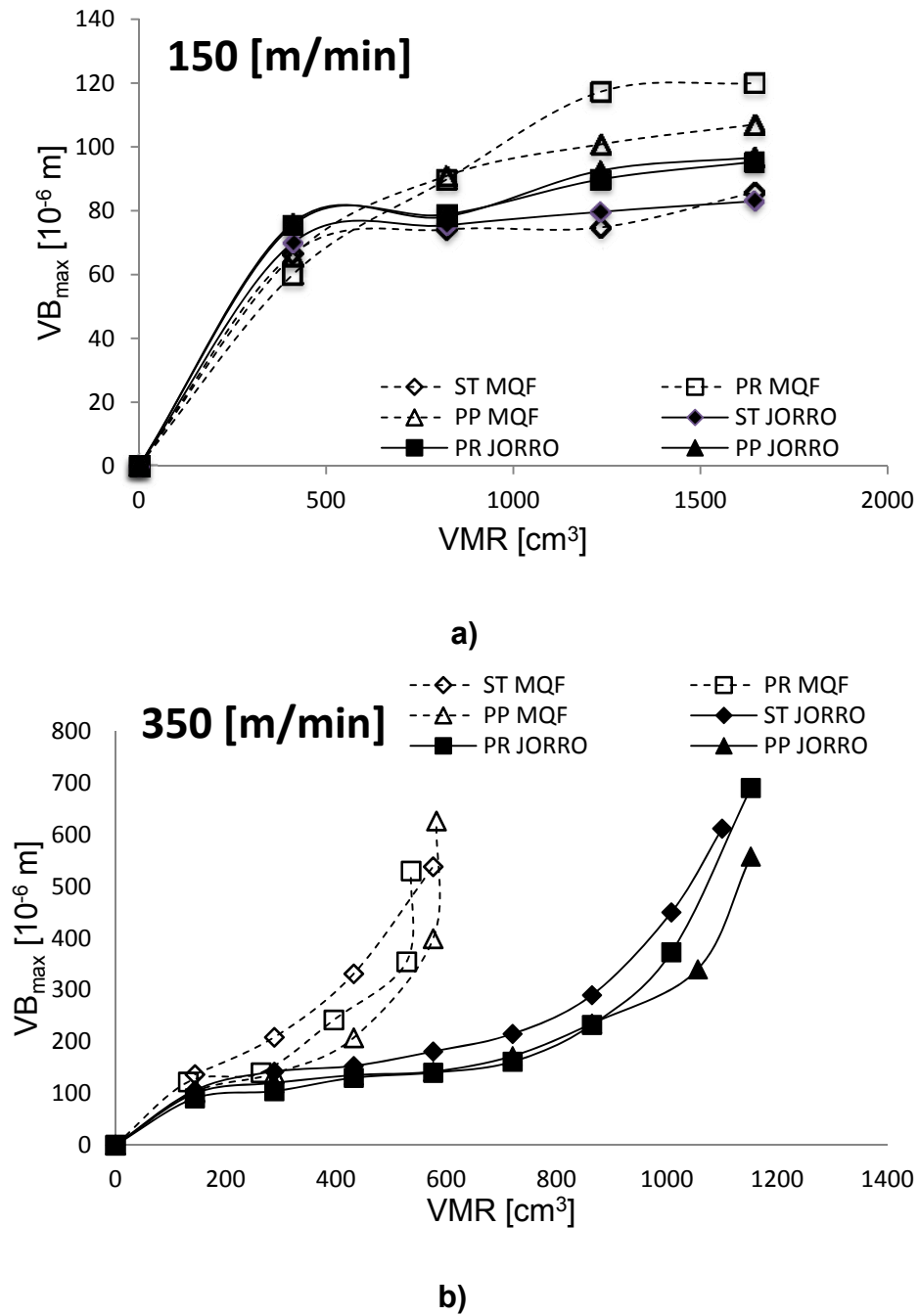


Figura 4.31 - Réplica de teste de vida de ferramenta, desgaste de flanco Vs volume de material removido, $f = 0,25 \text{ mm/min}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, atmosfera MQF e jorro, velocidade de corte a) 150 m/min, b) 350 m/min.

Na nomenclatura dos gráficos, ST = ferramentas comerciais sem texturas, PP = ferramentas com texturas perpendiculares ao fluxo do cavaco e PR = ferramentas com texturas paralelas ao fluxo de cavaco.

As curvas pontilhadas representam a usinagem com MQF enquanto que as linhas continuas representam a usinagem com uso de jorro.

As ferramentas testadas na velocidade de 150 m/min atingiram o critério de fim de vida, baseado na remoção de volume de material máximo, sem atingir o desgaste de flanco de 0,6 mm. As curvas de vida deste grupo de ferramentas mostraram-se bastante similares, sendo que, aparentemente, a ferramenta sem textura, na aplicação de jorro, mostrou o menor desgaste para o mesmo volume de material removido.

As ferramentas testadas na velocidade de 350 m/min atingiram o fim de vida baseado no critério de desgaste de flanco, sem atingir o critério baseado no volume de material removido máximo. Analisando os perfis de vida deste grupo, a ferramenta texturizada com marcas perpendiculares ao fluxo do cavaco (PP), mostrou-se como a melhor candidata na vida de ferramenta, quando aplicada uma atmosfera de jorro. Nesta mesma atmosfera a ferramenta com marcas paralelas ao fluxo do cavaco (PR) mostrou-se levemente superior a ferramenta sem textura.

Estes resultados indicam que é possível a hipótese de maior capacidade de retenção de fluido por parte das superfícies com texturas perpendiculares ao fluxo de cavaco. Adicionalmente uma afirmação que justificaria uma maior vida nas ferramentas texturizadas seria uma maior aderência por parte da camada TiCN devido a reações entre o substrato e o revestimento, promovidas pela temperatura do feixe laser. Este poderia ser um caso de estudo para um futuro trabalho.

Na aplicação de MQF os resultados de vida dos três tipos de ferramenta apresentam comportamentos similares, sendo que, aparentemente, a ferramenta sem textura mostrou uma leve vantagem, quando comparada com as ferramentas texturizadas. É inegável que as altas temperaturas poderiam enfraquecer uma ferramenta que perdeu parte da sua barreira de proteção térmica (camada Al_2O_3).

A aplicação de fluido de corte (MQF) apresentou resultados inferiores em relação à vida da ferramenta quando comparada com a aplicação na forma de jorro, para a velocidade de corte de 350 m/min (veja Fig 4.30 e 4.31 b). Estes resultados são coerentes com a literatura (MACHADO et al., 2011 e Scandiffio, 2000), onde a técnica MQF não tem se mostrado eficiente para o processo de torneamento de aços em altas velocidades, pois sua ação refrigerante é inferior que a condição de aplicação do fluido na forma de jorro.

Em esta etapa foi realizada uma análise visual mecanismos de desgaste do terceiro lote de ferramentas texturizadas.

A Figura 4.32 apresenta fotos das superfícies de saída das ferramentas utilizadas na usinagem com jorro, junto com um gráfico ilustrativo do desgaste apresentado por estas ferramentas.

Observa-se que as áreas afetadas termicamente e os desgastes nas ferramentas com texturas perpendiculares ao fluxo de cavaco são menos severas que nas ferramentas com texturas paralelas ao fluxo de cavaco, e estas, por suas vezes, menores e menos severas que nas ferramentas sem textura. Menores isotermas se desenvolveram nas ferramentas com marcas perpendiculares, possivelmente por possuir maior área para troca de calor com o fluido e um maior poder de retenção de lubrificante.

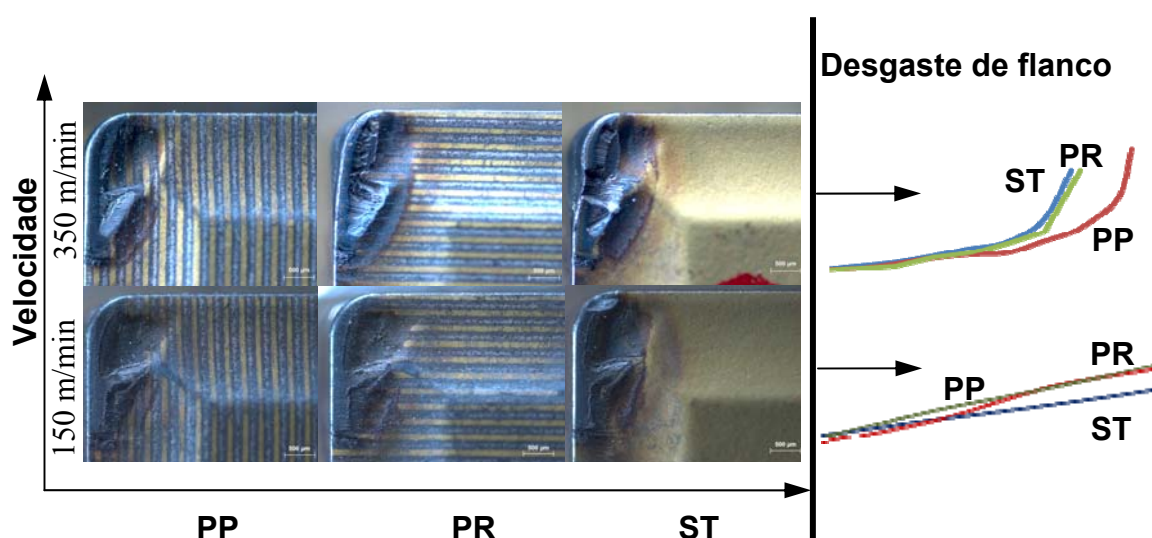


Figura 4.32 - Superfície de saída de ferramentas com, PP = Marcas perpendiculares, PR = Marcas paralelas, ST = Ferramenta Convencional (sem textura), usadas na condição Jorro.

As Figuras 4.33 até Fig. 4.38 mostram as fotografias das ferramentas usadas nos testes de vida em atmosferas MQF e jorro, indicando os diferentes mecanismos de desgaste.

Análise em microscopia eletrônica de varredura – MEV feitas nestas ferramentas indica que abrasão e attrition (adesão + arrancamento) são os principais mecanismos de desgastes atuantes no processo.

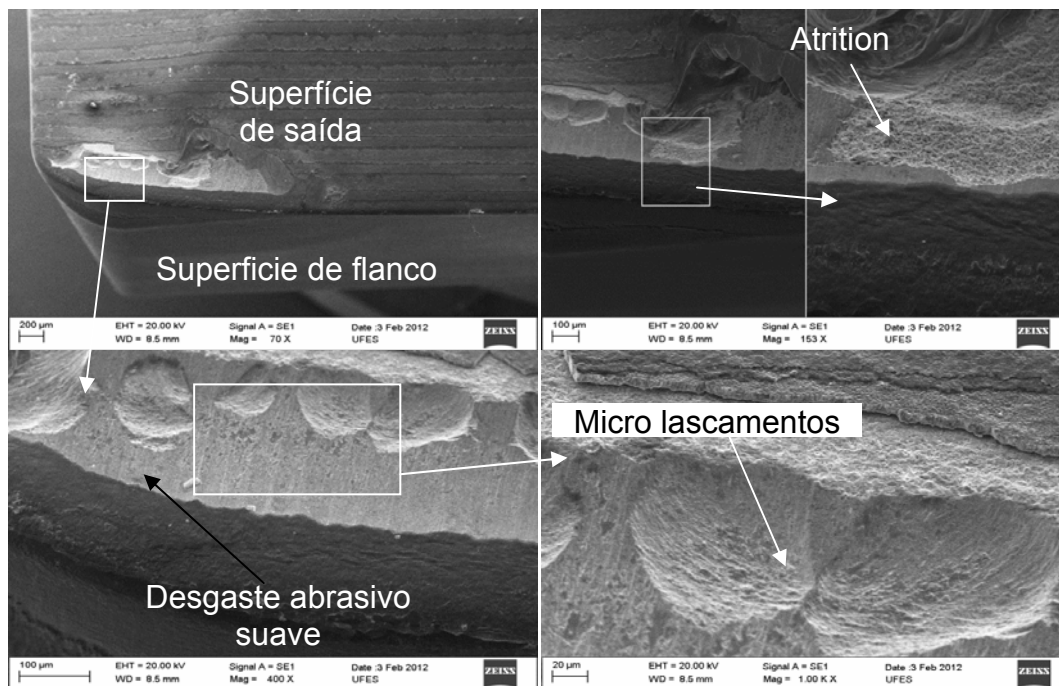


Figura 4.33 - MEV ferramenta no fim de vida, com marcas perpendiculares ao fluxo do cavaco $vc = 350$ m/min, atmosfera de corte jorro.

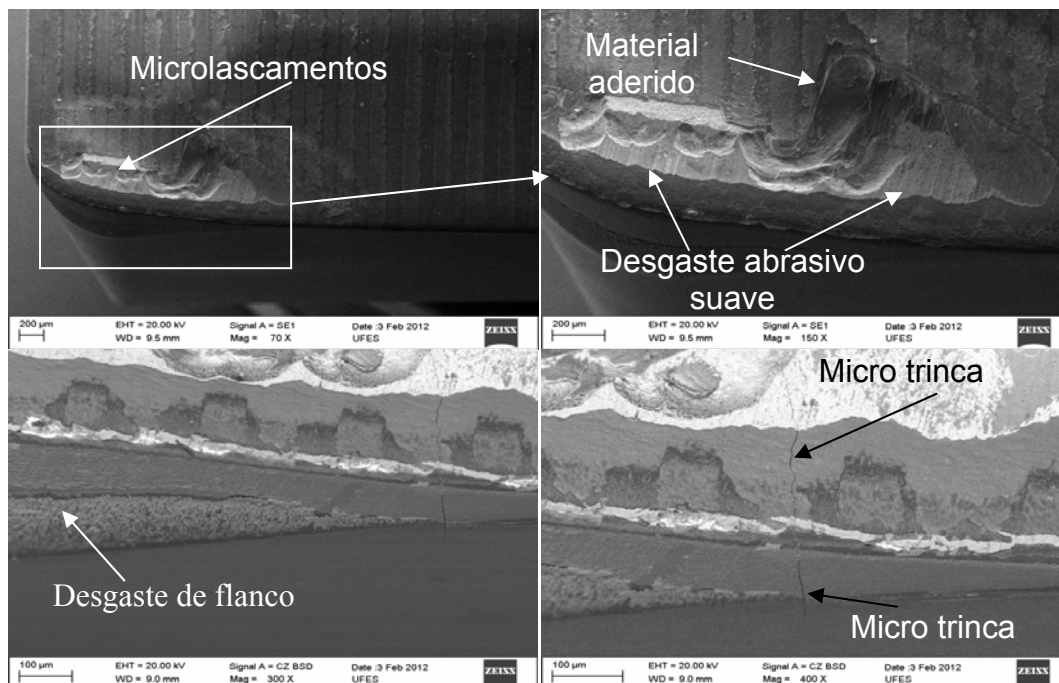


Figura 4.34 - MEV ferramenta no fim de vida, com marcas paralelas ao fluxo do cavaco $vc = 350$ m/min, atmosfera de corte jorro.