

Nas ferramentas jateadas a área de delaminação do revestimento AlCrN-Alcrona é superior à dos revestimentos AlCrN-Hélica e TiAlN-Futura, sendo que o revestimento com menor área de delaminação foi o TiAlN-Futura, conforme Fig. 4.50.

Para as cargas de indentação utilizadas neste ensaio, a carga estática crítica para destacamento dos revestimentos AlCrN-Hélica e AlCrN-Alcrona nas ferramentas com textura jateada é inferior a 30 kgf, como pode ser verificado na Fig. 4.54. Na ferramenta revestida de TiAlN-Futura não se observa delaminação do revestimento ao redor da indentação, apenas trincas indicando falha por coesão do filme. A carga estática crítica para delaminação do revestimento TiAlN-Futura na ferramenta com textura jateada está entre 30 e 60 kgf, como indica a Fig. 4.55, indentada com 60 kgf.

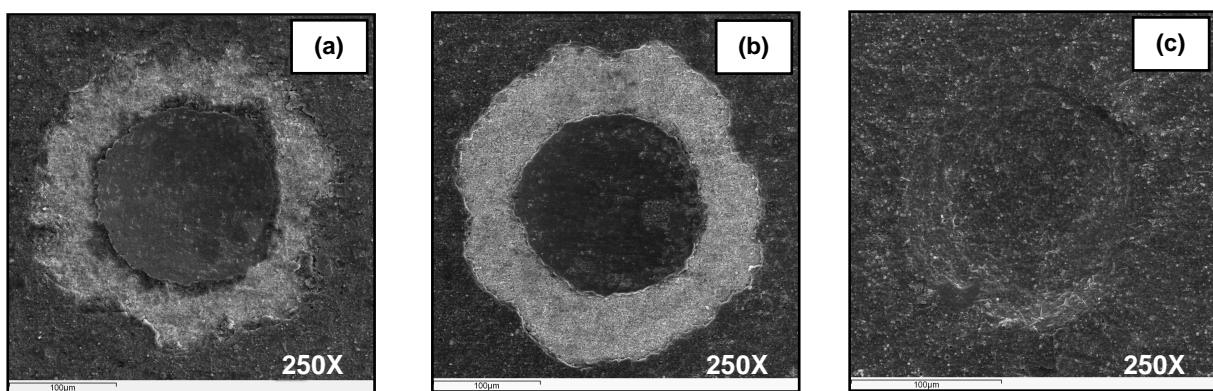


Figura 4.54 - Indentação mecânica com carga de 30 kgf para as ferramentas com textura jateada: (a) - AlCrN-Hélica, (b) - AlCrN-Alcrona e (c) - TiAlN-Futura.

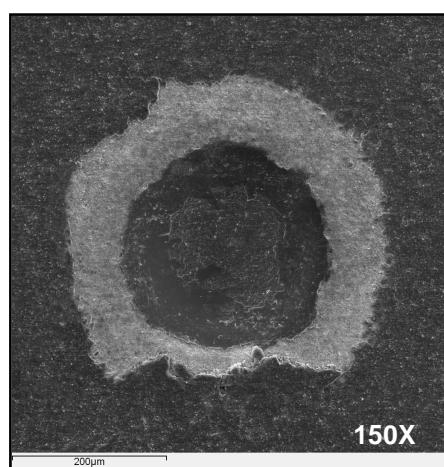


Figura 4.55 - Indentação mecânica com carga de 60 kgf para a ferramenta com textura jateada e revestida de TiAlN-Futura.

Nas ferramentas com textura laser somente a partir da carga estática de 60 kgf foi constatado a delaminação dos revestimentos, como pode ser verificado na Fig. 4.50, sendo que o TiAlN-Futura novamente apresentou uma menor área de delaminação, seguido pelo AlCrN-Hélica e AlCrN-Alcrona, conforme Fig. 4.56.

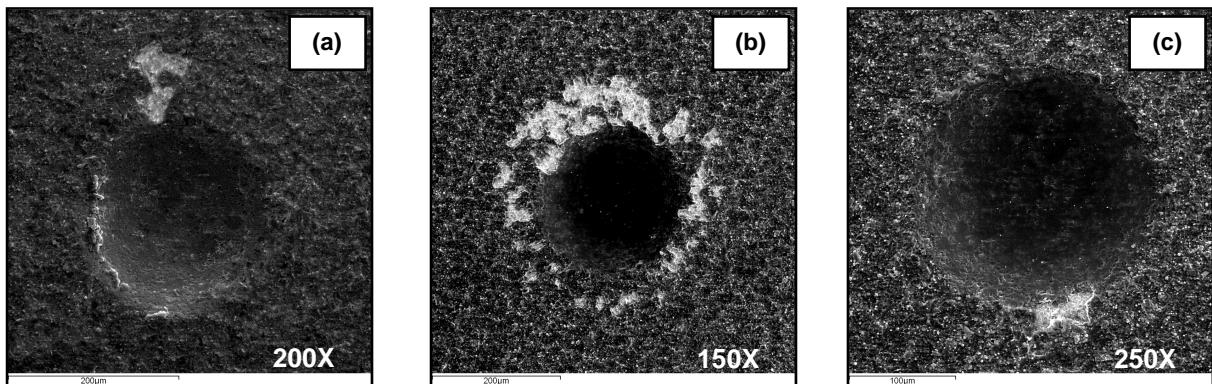


Figura 4.56 - Indentação mecânica com carga de 60 kgf para as ferramentas com textura laser: (a) - AlCrN-Hélica, (b) - AlCrN-Alcrona e (c) - TiAlN-Futura.

A menor área de delaminação do revestimento TiAlN-Futura para as ferramentas com textura jateada e laser, ratifica a sua maior adesividade sobre os substratos de metal duro, e sua maior capacidade em suportar carregamento.

Analizando o aspecto da fragmentação dos revestimentos depositados sobre os substratos com texturas jateada e laser, distinguiram-se formas diferentes de delaminação dos revestimentos. Para o substrato com textura laser ocorre uma delaminação descontínua dos revestimentos, ao passo que para o substrato jateado, a delaminação dos revestimentos na periferia das indentações ocorre de maneira contínua, com grandes áreas de destacamento.

A fragmentação dos revestimentos depositados sobre as ferramentas com textura laser não ocorre especificamente na borda da impressão deixada pela indentação, como na textura jateada, mas em pontos isolados do substrato, como observado na Fig. 4.53.

A forma particular de fragmentação dos revestimentos nos substratos ensaiados demonstra que a modificação prévia do substrato pelo feixe de laser, cria uma textura que propicia um ancoramento mecânico mais efetivo dos revestimentos em relação à textura obtida pelo jateamento.

Como verificado no item 4.3, o jateamento cria no substrato uma textura com uma topografia com orientação desordenada, diferentemente da superfície criada pela aplicação do feixe de laser, que provem uma textura do substrato com uma topografia periódica ou semiperiódica, formada, por exemplo, de microconcavidades com bordas salientes.

Essas microconcavidades, possivelmente, são formadas pelo espalhamento das microgotículas de material refundido do substrato, como pode ser observado nas Figs. 4.57 e 4.58, nas regiões delimitadas.

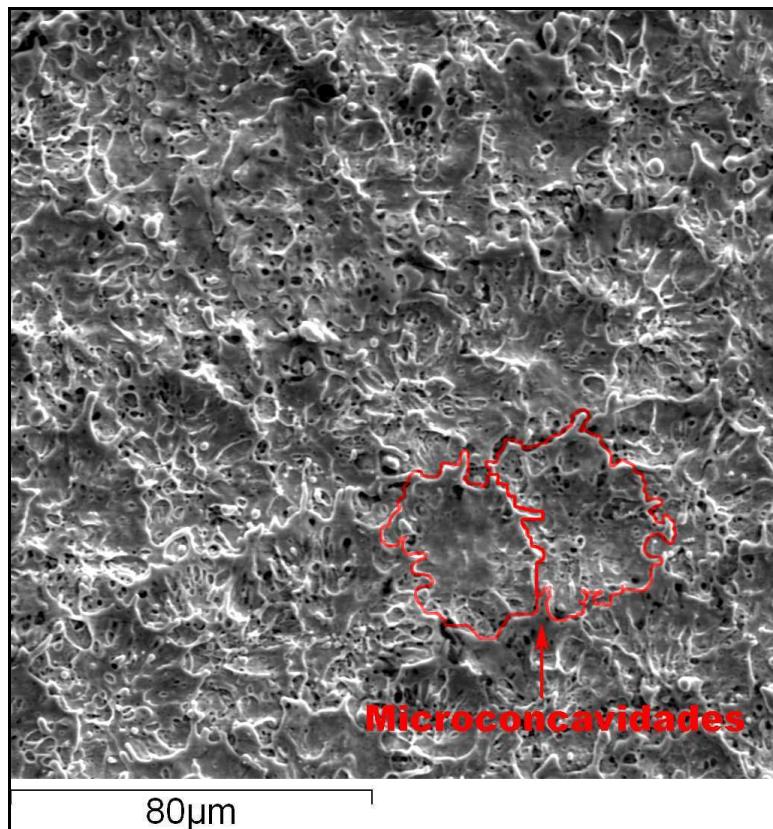


Figura 4.57 - Microconcavidades formadas pela texturização a laser.

As microconcavidades mostradas nas Figs. 4.57 e 4.58 podem servir de ancoramento ao revestimento posteriormente depositado. As tensões aplicadas pelo indentador, possivelmente, romperiam o revestimento depositado nas microregiões mais elevadas da superfície, aquelas com o aspecto de platô, ao passo que o revestimento depositado nas regiões formadas por microconcavidades sofreria uma menor perturbação da tensão aplicada pelo indentador, com isso o destacamento do revestimento ocorreria em pontos isolados.

Cada microconcavidade formada seria parcialmente isolada da anterior, como pode ser verificado nas duas microconcavidades identificadas sequencialmente na figura 4.49, limitadas por bordas proeminentes, e a disposição de cada microconcavidade daria origem a uma “célula revestida”.

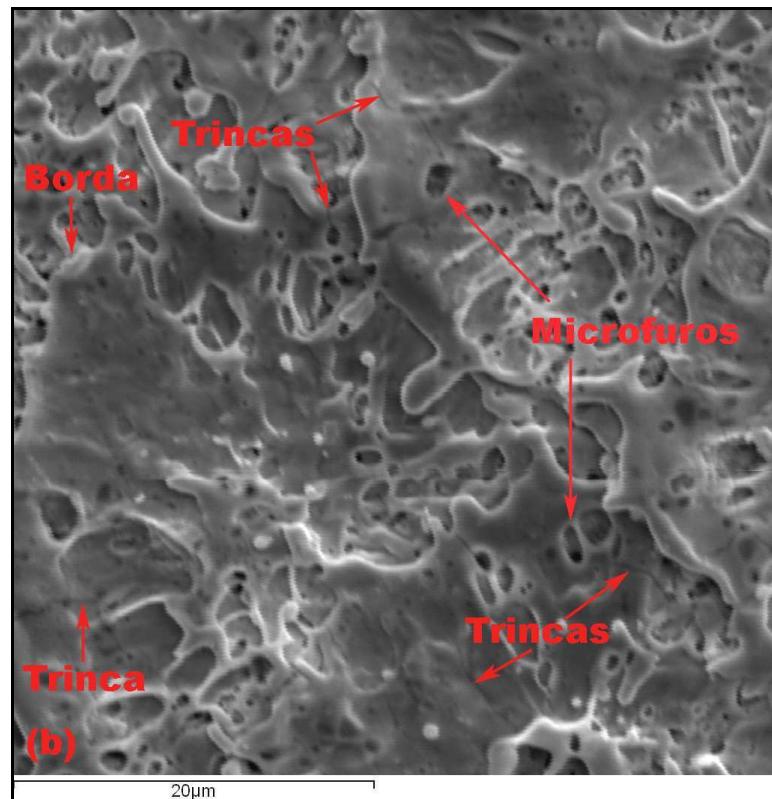
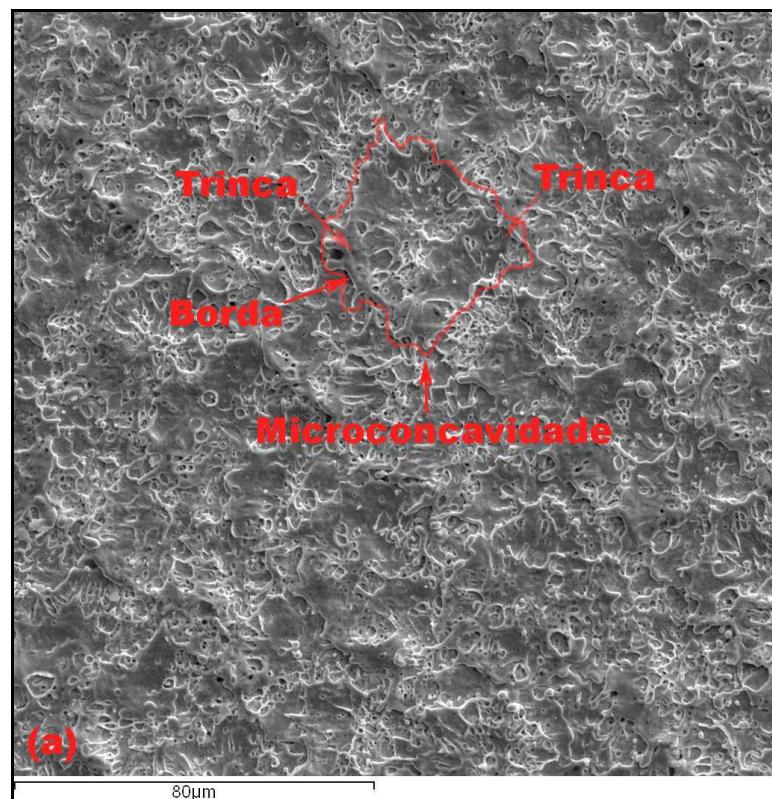


Figura 4.58 - Em (a) microconcavidade formada pela texturização a laser, e em (b) detalhe da microconcavidade apontada em (a).

Na Figura 4.58(b) o substrato laser mostra ainda a presença de pequenos furos na superfície. De acordo com Tiejun et al. (2001) esses pequenos furos são originados, provavelmente, por bolhas de gases que escapam durante a ablação laser do substrato de metal duro. Para Yilbas et al. (2007) e Arroyo (2009) esses pequenos furos podem funcionar como pontos de alívio das tensões térmicas induzidas no material, os quais não evitam completamente a formação de microtrincas superficiais, como indica a figura 4.50(b).

Essas microtrincas são multidirecionais formadas pelas tensões térmicas resultantes do rápido aquecimento e resfriamento da superfície durante a ressolidificação dos elementos constituintes do substrato (Karatas et al., 2007; Yilbas et al., 2007 e Arroyo, 2009).

Uma grande quantidade dessas microtrincas pode ser prejudicial à deposição posterior do revestimento, principalmente, se essas microtrincas se propagarem para o interior do substrato, como indicado nos trabalhos de Karatas et al. (2007) e Yilbas et al. (2007), podendo causar uma falha do conjugado substrato/revestimento.

Todas as características até então discutidas sobre a adesividade dos revestimentos partiram, essencialmente, da análise morfológica da superfície, ou seja, da forma e distribuição das microestruturas e microirregularidades, e da direcionalidade das texturas geradas pelos processos de jateamento e laser. Contudo, a composição química da ferramenta, também pode influenciar na adesividade dos revestimentos. O cobalto tem uma influência química na adesividade entre o substrato e o revestimento

O excesso de cobalto na superfície de substratos de metal duro produz uma pobre adesividade do revestimento (Tönshoff et al., 1999; Bouzakis et al., 2000 e Diniz et al., 2007).

Em substratos de metal duro revestidos com filme de diamante, por exemplo, o excesso de cobalto constitui um severo obstáculo para a deposição e adesividade desses filmes, devido ao seu efeito catalítico para formação de carbono amorfou ou “fuligem” na superfície da ferramenta (Cappelli et al., 1999), que resulta na contaminação da interface substrato/revestimento, logo, no possível destacamento prematuro do filme.

Além do excesso de cobalto, ocasionalmente existe a possibilidade de formação de uma camada de grafite na superfície da ferramenta durante o processo de sinterização, como ocorre, por exemplo, na ferramenta CNMG 120408-QM produzida pela Sandvik, em que o substrato é sinterizado de tal maneira que resulta numa zona superficial de 25 μm enriquecida com cobalto, uma camada de cobalto com espessura de aproximadamente 2 μm e uma camada de grafite também com espessura de 2 μm (Huddinge e Gavle, 2000). Para a ferramenta utilizada neste trabalho, SEMN 1204AZ-H13A, não foi encontrado na literatura nenhuma informação sobre o seu processo de fabricação.

A zona superficial enriquecida com cobalto é chamada de gradiente de cobalto, que serve para “revestir os grãos de carbonetos” melhorando as propriedades do substrato da ferramenta, como o aumento da tenacidade ou a resistência ao impacto (Vällingby et al., 1996 e Huddinge e Gavle, 2000). As duas camadas posteriores, de cobalto e grafite, resultantes do processo de sinterização, tem um efeito negativo nos processos de deposição CVD e PVD, que resulta na deposição de revestimentos com propriedades inferiores, e adesividade insuficiente sobre o substrato de metal duro. Estas camadas superficiais de cobalto e grafite devem ser removidas antes do processo de deposição do revestimento (Huddinge e Gavle, 2000).

Uma das técnicas utilizadas para a remoção dessas camadas, de cobalto e grafite, é justamente a utilização do jateamento de partículas duras, que podem ser Al_2O_3 , SiC e B_4C , juntamente com água, glicerina ou jateamento a seco. O problema dessa técnica é a falta de controle em relação à profundidade atingida pelo jateamento, principalmente próximo à aresta de corte da ferramenta. Nesta área, a zona de gradiente de cobalto é facilmente removida, ocasionando um aumento na dispersão das propriedades do produto final, a ferramenta revestida. Além disso, o jateamento convencional resulta em danos aos grãos de carbonetos, e uma remoção desigual da camada de cobalto que pode levar a uma pobre adesividade do revestimento (Huddinge e Gavle, 2000).

A remoção do cobalto pode ser realizada ainda por tratamento eletrolítico do substrato, utilizando uma mistura de H_2SO_4 (ácido sulfúrico) e H_3PO_4 (ácido fosfórico) concentrados, produzindo uma remoção efetiva do cobalto e do grafite, porém, a manipulação deste método é complicada e perigosa (Huddinge e Gavle, 2000).

Neste trabalho para verificar a eficácia das duas técnicas de tratamento do substrato de metal duro na remoção do cobalto, a superfície de saída de duas ferramentas sem revestimentos, SR-jateado e SR-laser, foram “varridas” por difração de raio-X.

As Figuras 4.59 e 4.60 mostram os resultados obtidos para os dois substratos analisados por difração de raio-X. A Figura 4.59 mostra somente picos de energia correspondentes a presença de WC na superfície da ferramenta SR-jateado. Já a Figura 4.60 mostra picos de energia de WC, e de óxido de cobalto CoO.

Numa análise preliminar pode-se dizer que o jateamento foi mais eficiente na remoção do cobalto do que o laser, e o efeito do cobalto presente na superfície das ferramentas não é um fator preponderante para a adesividade dos revestimentos testados.

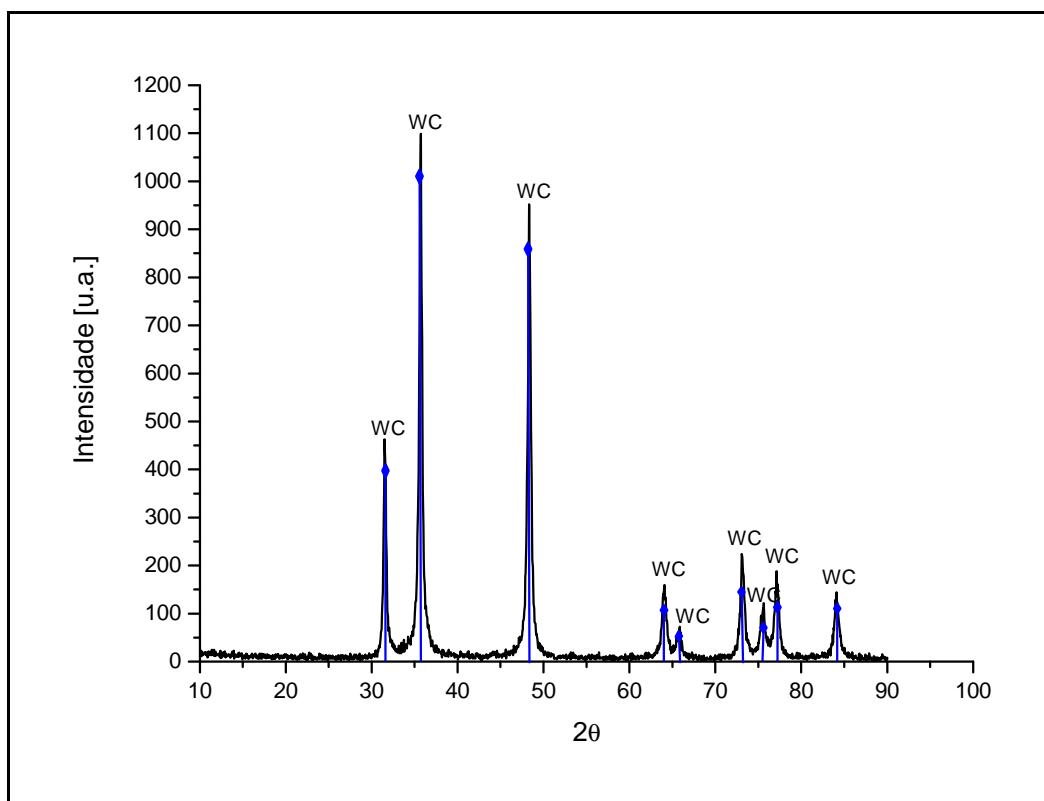


Figura 4.59 - Difratograma do substrato modificado por jateamento.

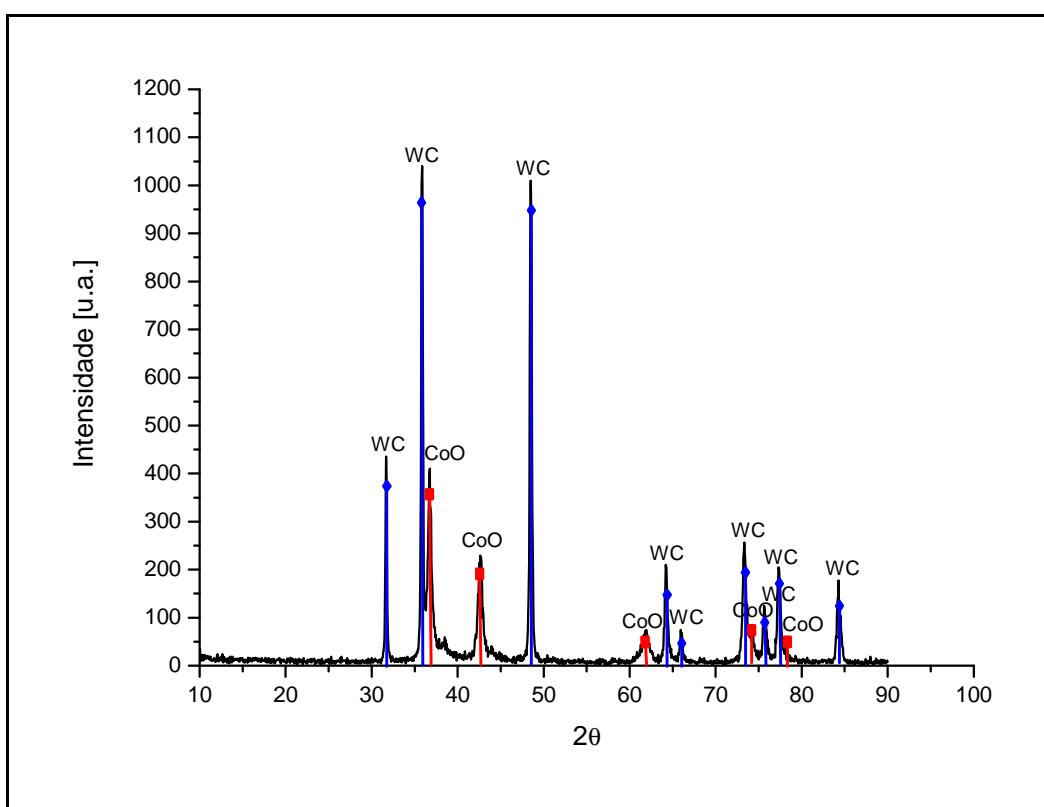


Figura 4.60 - Difratograma do substrato modificado por laser.

Os picos de cobalto mostrados no difratograma do substrato laser podem indicar uma possível migração de cobalto do interior do substrato para a superfície, em virtude da elevada densidade de potência utilizada na texturização, 638 MW/cm^2 . O calor gerado pela elevada densidade de potência utilizada, possivelmente, provocaria em parte a vaporização do excesso de cobalto presente na superfície do substrato, e também a migração do cobalto do interior do substrato. Porém, a quantidade de calor que chega ao interior do substrato não seria suficiente para a vaporização desse cobalto migrado, mas seria suficiente para a formação de óxidos, CoO .

No trabalho de Arroyo (2009) a análise por difração de raio-X de substratos de metal duro texturizados a laser, com diferentes densidades de potência (I_o) (137, 239, 273, 308 e 410 MW/cm^2 , com 32 pulsos fixos do laser) e diferentes quantidades de pulsos do laser (q_p) (16, 32, 64, 128 e 256, com densidade de potência fixa de 273 MW/cm^2), mostrou que a superfície das amostras estudadas não tinham excesso de cobalto. Por outro lado, resultados de EDS indicaram uma possível migração de Co do interior do substrato para a subsuperfície, sendo que esta migração aumentou proporcionalmente em função da quantidade de pulsos e da densidade de potência utilizadas.

No trabalho de Kano e Inoue (2006) também foi detectado na subsuperfície de substratos de metal duro um leve incremento do teor de cobalto com o aumento da quantidade de pulsos e/ou da densidade de potência do laser.

Nos trabalhos de Tiejun et al., (2001), Kano e Inoue (2006) e Arroyo (2009) foram detectadas ainda mudanças estruturais no carboneto de tungstênio constituinte do metal duro. Essas mudanças se deram pela formação de fases de carbonetos não-estequiométricos ($\beta\text{-WC}_{1-x}$, $\alpha\text{-W}_2\text{C}$ e W_3C) na camada superficial dos substratos, uma vez que pulsos de laser sobrepostos podem aumentar o efeito térmico acumulado, o que ocasionaria a transformação de fase do carboneto de tungstênio WC.

Neste trabalho o padrão de difração de raio-X visualizado indica que o WC na sua forma primitiva permanece como fase dominante.

Pelos resultados apresentados nos ensaios de indentaçāo estática, conclui-se que a modificāo superficial do substrato de metal duro por feixe de laser, anterior ao processo de deposição PVD, melhora a adesividade dos revestimentos AlCrN-Hélica, AlCrN-Alcrona e TiAlN-Futura, quando comparado ao processo de jateamento.

As condições de aplicāo do laser propiciam um controle proposital da texturização da superfície do substrato de metal duro, gerando uma topografia mais ordenada e uniforme de picos e vales, que contribuem para a menor delaminação dos revestimentos, como mostrado na Fig. 4.50.

4.4.2. Ensaio de Risco com Carga Progressiva

Os resultados destes ensaios são mostrados através de gráficos que relacionam a força tangencial com a distância percorrida pelo indentador.

O monitoramento da força tangencial é comumente utilizado em ensaios de risco ou *Scratch Test*, pois fornece dados importantes a cerca da falha adesiva do revestimento e do coeficiente de atrito dos materiais envolvidos. A intensidade do sinal adquirido, juntamente com uma análise de microscopia óptica ou eletrônica da trilha de desgaste formada, possibilita a identificação do mecanismo que provoca a falha do revestimento (Bunshah, 2001).

As Figuras 4.61, 4.64 e 4.67 mostram os resultados obtidos nos ensaios de risco com carga progressiva, de acordo com as condições estabelecidas no item 3.7.1.2 da metodologia de trabalho proposta. Foram realizados três riscos para cada conjugado substrato/revestimento.

A Figura 4.61 mostra os resultados obtidos para os ensaios de risco do revestimento AlCrN-Hélica. Numa análise direta dos gráficos observa-se que logo no início dos riscos, a cerca de 2,0 mm, as forças tangenciais adquiridas para a ferramenta com textura jateada tornam-se mais instáveis, e a aproximadamente 3,0 mm, as oscilações acentuam-se até atingir os 10 mm de riscamento.

A Figura 4.62 mostra a trilha de desgaste formada após a passagem do indentador para a ferramenta jateada e revestida de AlCrN-Hélica. Nesta imagem observa-se a delaminação do revestimento, expondo o substrato de metal duro. No início da trilha de desgaste há diversos pontos descontínuos de destacamento do revestimento. À medida que o indentador penetra no substrato, o destacamento do revestimento torna-se contínuo nas extremidades da trilha de desgaste.

Em relação à ferramenta com textura laser observa-se que as oscilações das forças tangenciais apresentam menores amplitudes, com uma região de instabilidade formada quando o indentador atingiu cerca de 8,0 mm de riscamento.

Na trilha de desgaste da ferramenta com textura laser não foi possível observar falhas adesivas do revestimento utilizando-se microscopia óptica, Fig. 4.63. Essas falhas ocorrem essencialmente no final da trilha de desgaste, como será mostrado mais à frente por meio de algumas imagens de microscopia eletrônica.

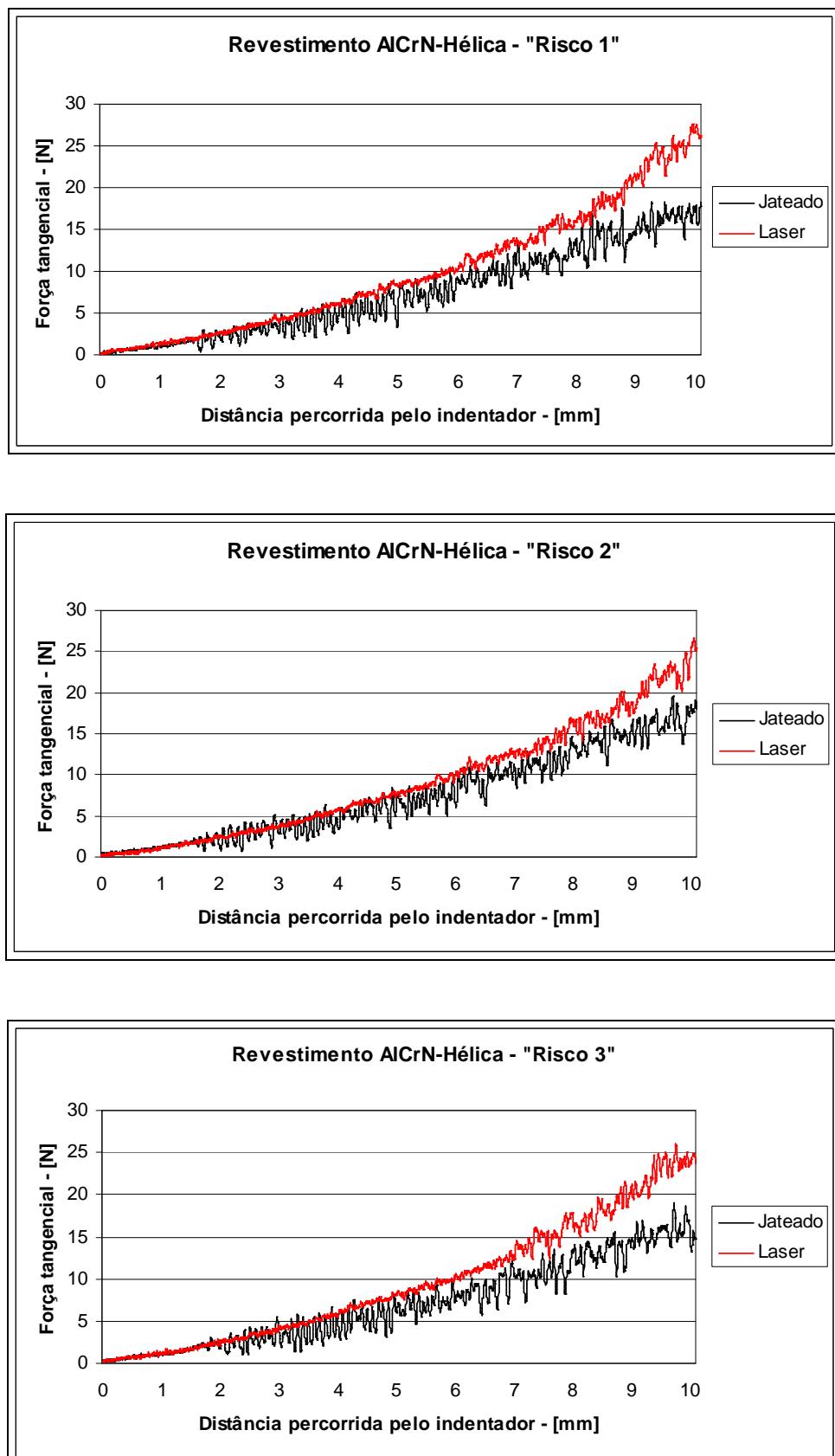


Figura 4.61 - Ensaios de risco para as ferramentas jateada e laser revestidas de AlCrN-Hélica.



Figura 4.62 - Trilha de desgaste para a ferramenta AlCrN-Hélica jateada.



Figura 4.63 - Trilha de desgaste para a ferramenta AlCrN-Hélica laser.

Diferentemente das ferramentas revestidas de AlCrN-Hélica, nas ferramentas revestidas de AlCrN-Alcrona há uma sobreposição das forças tangenciais, praticamente até o final da indentaçāo dinâmica, sendo que os valores adquiridos são menores, como pode ser observado na Fig. 4.64.

Assim como nos ensaios de risco das ferramentas revestidas de AlCrN-Hélica, as forças tangenciais adquiridas para o revestimento AlCrN-Alcrona apresentam maiores oscilações para a ferramenta com textura jateada.

Pela observação das oscilações das forças tangenciais na ferramenta com textura jateada e revestida de AlCrN-Alcrona é provável que o revestimento tenha se fragmentado a aproximadamente 2,0 mm de riscamento.

A Figura 4.65 mostra a trilha de desgaste formada para a ferramenta com textura jateada revestida de AlCrN-Alcrona. A trilha de desgaste mostra uma intensa delaminação contínua do revestimento nas extremidades do risco, expondo o substrato de metal duro, indício de uma falha adesiva do revestimento.

As forças tangenciais obtidas nos ensaios de risco para a ferramenta com textura laser e revestida de AlCrN-Alcrona mantiveram-se estáveis durante quase todo o percurso de riscamento. Oscilações instáveis das forças tangenciais são observadas para uma posição de riscamento acima de 8,0 mm, conforme Fig. 4.64.

Na imagem em microscopia óptica não é possível identificar evidências de delaminação do revestimento AlCrN-Alcrona ao longo da trilha de desgaste formada para a ferramenta com textura laser, conforme pode ser observado na Fig. 4.66. Provavelmente, falhas de natureza adesiva ocorram somente para posições acima de 8,0 mm de riscamento.

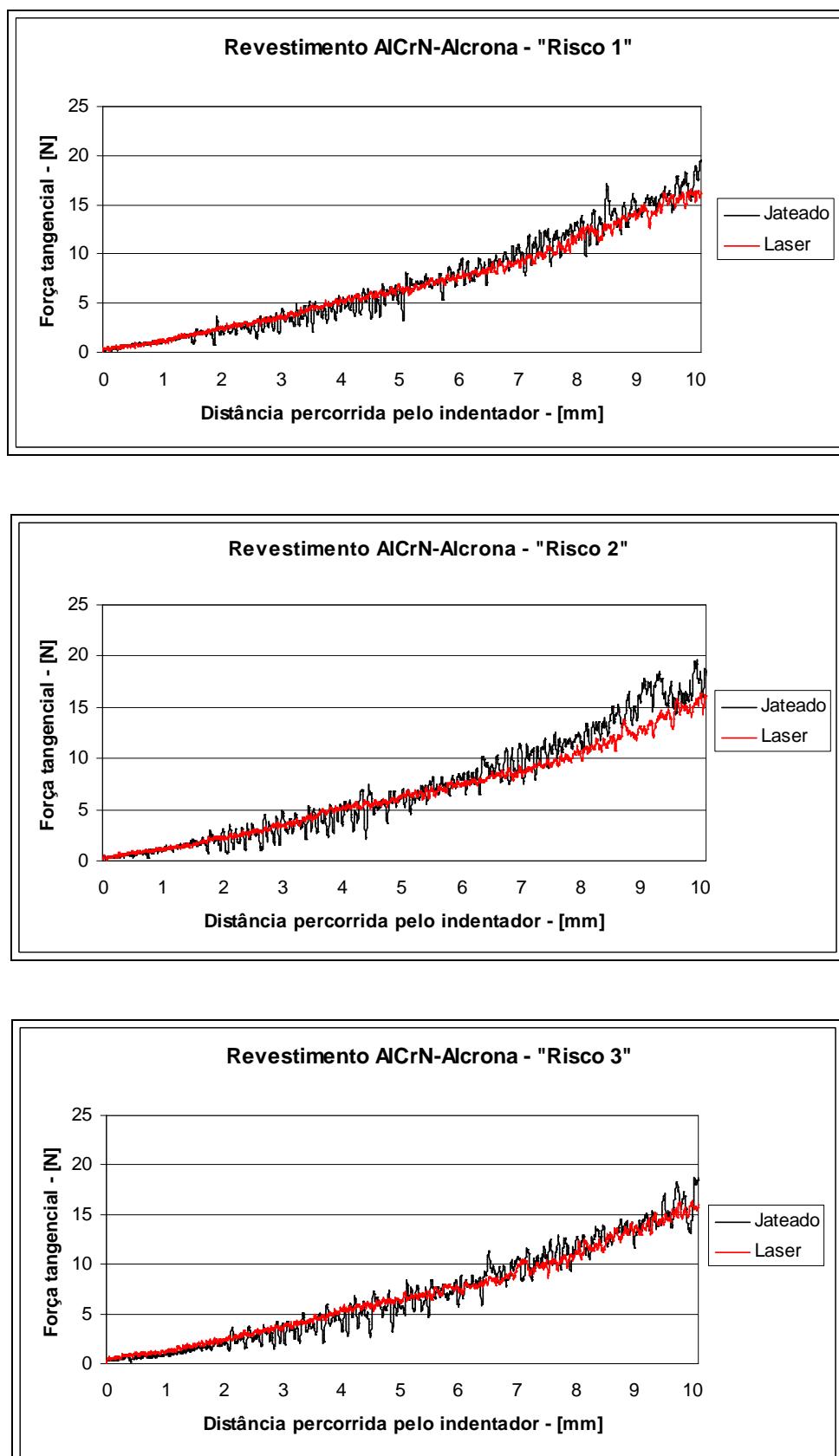


Figura 4.64 - Ensaios de risco para as ferramentas jateada e laser revestidas de AlCrN-Alcrona.

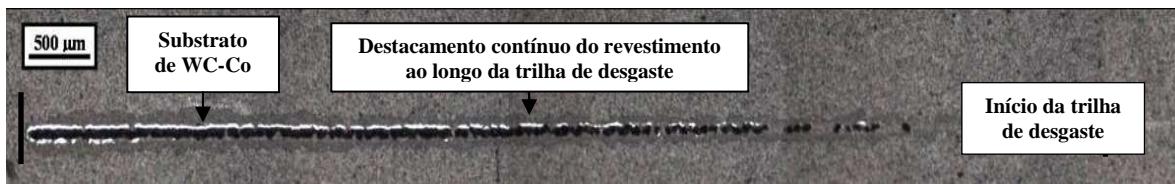


Figura 4.65 - Trilha de desgaste para a ferramenta AlCrN-Alcrona jateada.

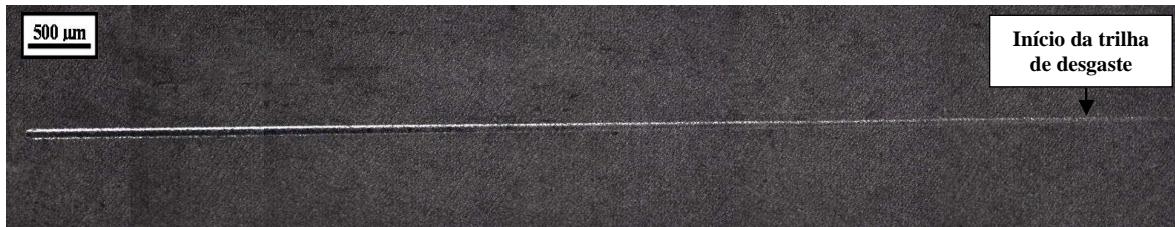


Figura 4.66 - Trilha de desgaste para a ferramenta AlCrN-Alcrona laser.

A Figura 4.67 evidencia que as forças tangenciais obtidas para as ferramentas revestidas de TiAlN-Futura, sobrepõem-se até cerca de 2,0 mm, e os valores adquiridos para a ferramenta com textura laser são menores.

A ferramenta jateada e revestida de TiAlN-Futura apresenta uma maior estabilidade para as forças tangenciais até cerca de 7,0 mm de riscamento. A partir desta posição observa-se oscilações bruscas nas forças, indicando falhas do revestimento.

A Figura 4.68 mostra a trilha de desgaste para a ferramenta jateada e revestida de TiAlN-Futura. Observa-se nas extremidades da trilha pontos de lascamento do revestimento TiAlN-Futura.

Por meio da Fig. 4.67 observa-se que para os três riscos realizados, a força tangencial adquirida para a ferramenta com textura laser e revestida de TiAlN-Futura praticamente manteve-se estável durante o percurso de indentação dinâmica da superfície.

Somente com a observação das forças tangenciais não é possível estabelecer uma posição durante o riscamento da superfície que indique uma falha de natureza adesiva do TiAlN-Futura depositado sobre a ferramenta com textura laser.

Provavelmente, pequenas flutuações da força tangencial indicariam falhas do revestimento de natureza coesiva, com propagação de trincas através do mesmo, e pequenos lascamentos do revestimento sem expor o substrato de metal duro.

A Figura 4.69 mostra a trilha de desgaste para a ferramenta com textura laser e revestida de TiAlN-Futura.

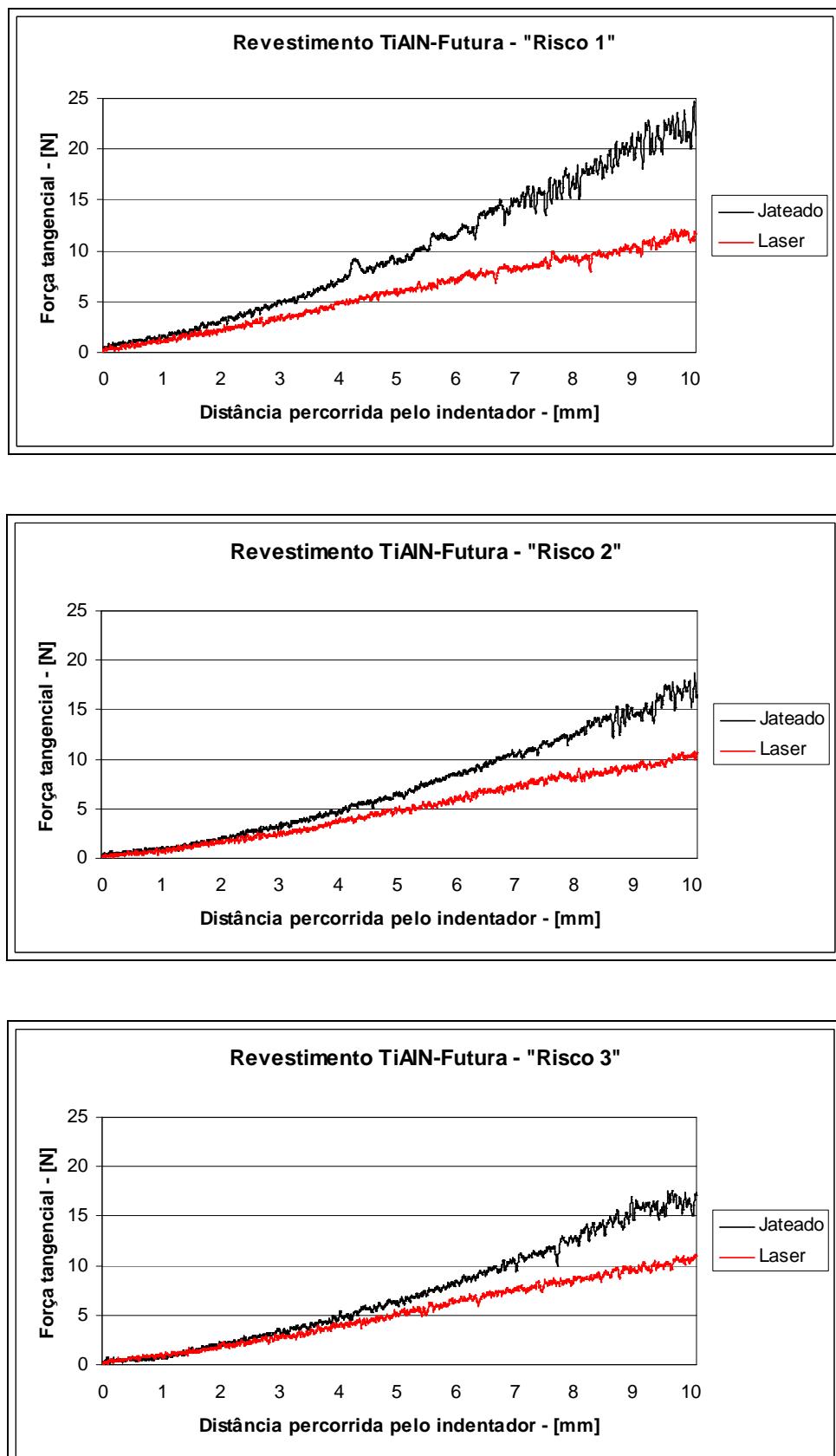


Figura 4.67 - Ensaios de risco para as ferramentas jateada e laser revestidas de TiAlN-Futura.

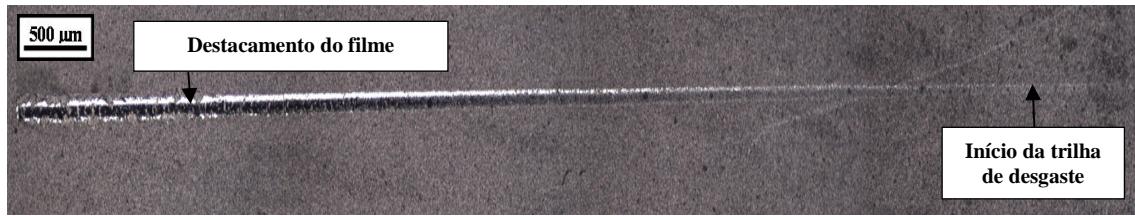


Figura 4.68 - Trilha de desgaste para a ferramenta TiAlN-Futura jateada.

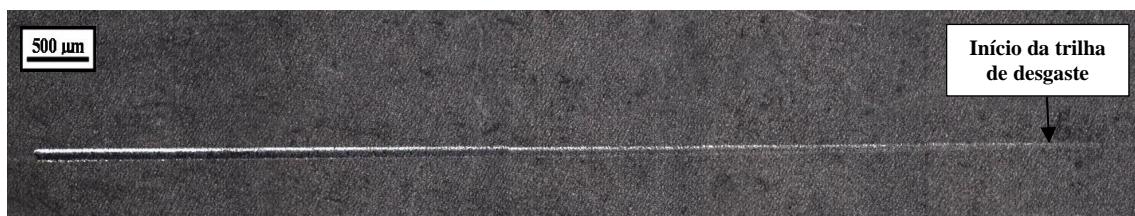


Figura 4.69 - Trilha de desgaste para a ferramenta TiAlN-Futura laser.

Apesar da dificuldade na interpretação dos resultados, a indentaçāo da superfície com carga dinâmica pode ser uma ferramenta importante para determinar os mecanismos que acarretam falhas no revestimento, e também, se presta à tentativa de quantificar a adesividade prática destes, apesar de renegarem a estes ensaios um caráter mais qualitativo do que quantitativo.

A quantificação da adesividade prática pode ser realizada por meio da aquisição das forças tangenciais, estabelecendo-se uma carga crítica de falha dos revestimentos.

A carga crítica é a medida quantitativa de referência do grau de adesividade do revestimento ao substrato. Nos ensaios de indentaçāo dinâmica realizados, a carga crítica é o menor valor da força tangencial que é capaz de iniciar e perpetuar as oscilações da força durante a formação da trilha de desgaste. Para outros, é a carga em que o revestimento é removido de maneira regular ao longo de todo o comprimento indentado (Tavares, 1997 e Bunshah, 2001).

Normalmente, distingui-se duas cargas críticas durante os ensaios de risco. A primeira carga crítica (L_{C1}) refere-se à carga para a qual surgem os primeiros defeitos ou falhas, como a formação e propagação de trincas, indicando uma falha coesiva, enquanto a segunda carga crítica (L_{C2}) está associada à falha total do revestimento, mais precisamente, ao aparecimento contínuo do substrato, indicação de uma falha de natureza adesiva (Tavares, 1997).

A Figura 4.70 mostra os resultados obtidos para a carga crítica de falha das ferramentas ensaiadas.

As cargas críticas da Fig. 4.70 foram determinadas através da equação proposta por Darbeida e Stebut citada no trabalho de Nouveau et al. (2005). Nesta Equação (4.1), a carga crítica é determinada pela primeira falha coesiva do revestimento ou pela primeira exposição do material do substrato por falha adesiva.

$$L_c = L_{\text{MÁX}} - L_r \times D / T_s \quad (4.1)$$

Na Equação (4.1), o termo L_c (N) representa a carga no ponto crítico, $L_{\text{MÁX}}$ (N) é a carga máxima adquirida no final do ensaio, L_r (N/min) é a taxa de carga indentada durante o risco, D (mm) é a distância entre o ponto crítico e o final do ensaio, e T_s (mm/min) é a velocidade de translação do indentador.

Neste trabalho, para o cálculo da carga crítica L_c utilizou-se como critério a primeira falha adesiva do revestimento, ou seja, será considerado como ponto crítico (D) o primeiro ponto de destacamento do revestimento com exposição do substrato de metal duro ou lascamento do revestimento com ou sem exposição do substrato. O ponto crítico (D) foi determinado utilizando-se microscopia eletrônica de varredura.

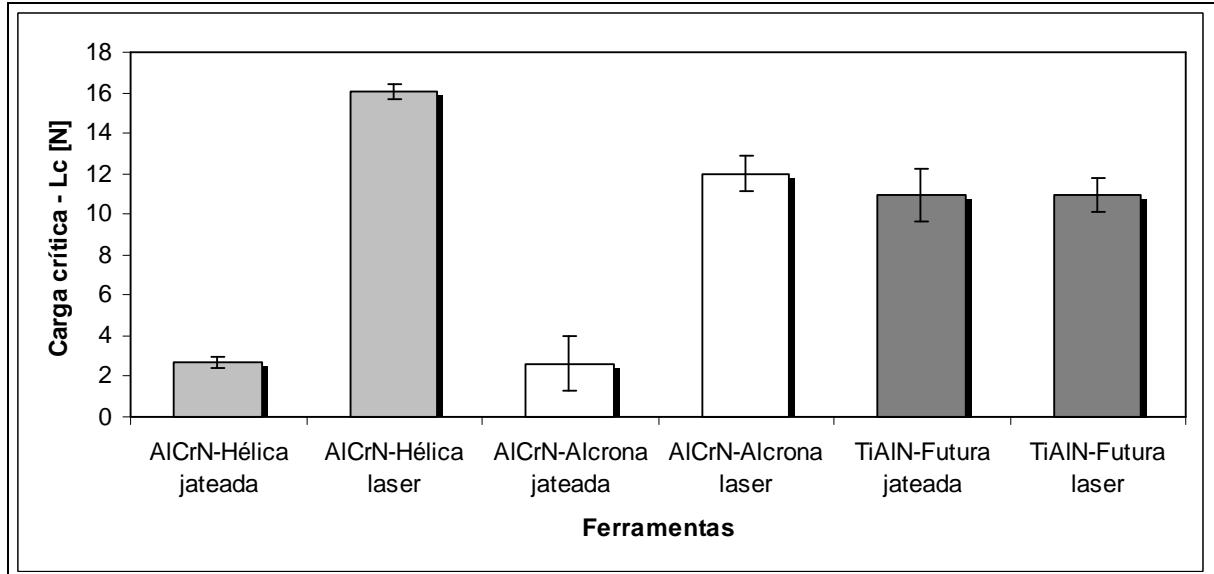


Figura 4.70 - Carga crítica de falha dos revestimentos para as ferramentas com textura jateada e laser.

Conforme a Figura 4.70, as ferramentas jateadas e revestidas de AlCrN-Hélica e AlCrN-Alcrona apresentam cargas críticas de falha dos revestimentos em torno de 3 N, e as revestidas com o TiAlN-Futura cerca de 11 N. Para as ferramentas texturizadas a laser as