

vaporização de camadas micrométricas por ablação do material. O processo de ablação promove uma rápida transição de líquido superaquecido para uma mistura de vapor e gotículas na superfície do substrato (Lima et al., 2005). A ablação não influencia nas propriedades mecânicas do substrato modificado, mas melhora significativamente as propriedades superficiais (Dumitru et al., 2005).

A Figura 4.32(b) mostra o aspecto das “gotículas de material resolidificado” na superfície do substrato de metal duro após a passagem do feixe de laser. A densidade de potência do laser utilizado, 683 MW/cm<sup>2</sup>, poderia até mesmo provocar uma intensa evaporação-sublimação de Co e WC, em virtude das altas temperaturas pontuais geradas no substrato durante o pulso do laser, que não dura mais do que 30 ns. As mudanças de fase do Co e WC também dependem da quantidade de pulsos do laser utilizado no processamento da superfície.

Lee (1998) e Tiejun et al., (2001) observaram em seus estudos que para uma intensidade de potência do laser de 32 MW/cm<sup>2</sup> ocorre fusão do Co, com 80 MW/cm<sup>2</sup> o WC funde e o Co evapora, e com uma intensidade de 200 MW/cm<sup>2</sup> o WC sofre evaporação. O Co possui um ponto de fusão de aproximadamente 1495°C e a uma temperatura acima de 2927°C ocorre sua evaporação. O WC funde a aproximadamente 2870°C e sofre evaporação à cerca de 6000°C.

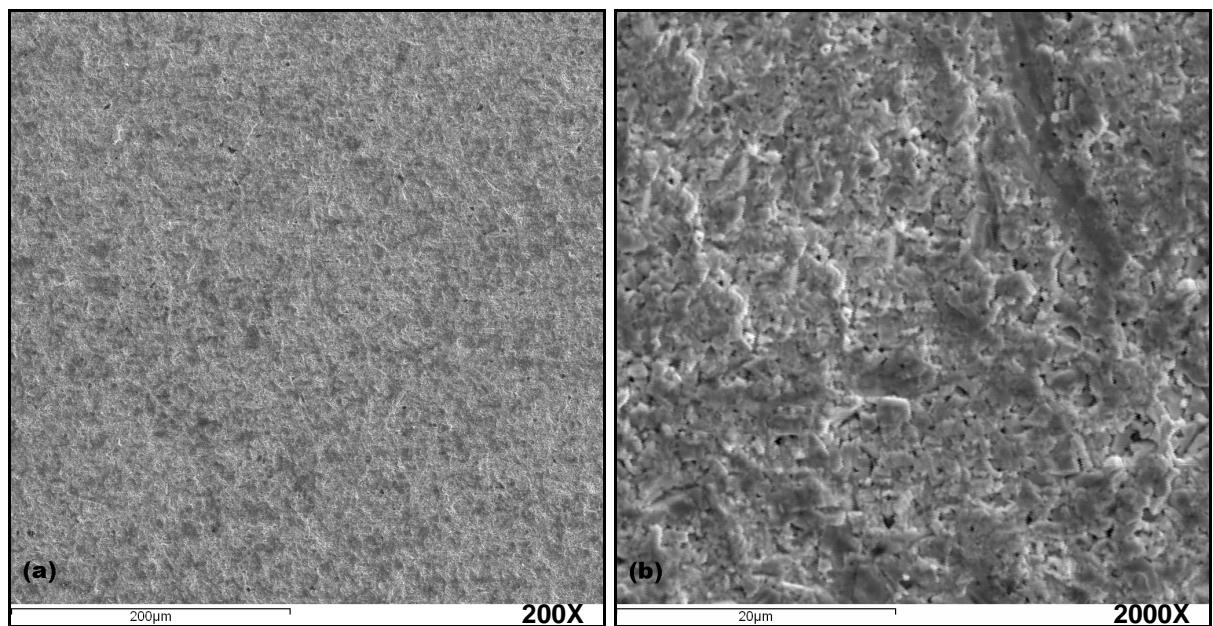


Figura 4.31 - Substrato de metal duro com textura jateada sem revestimento.

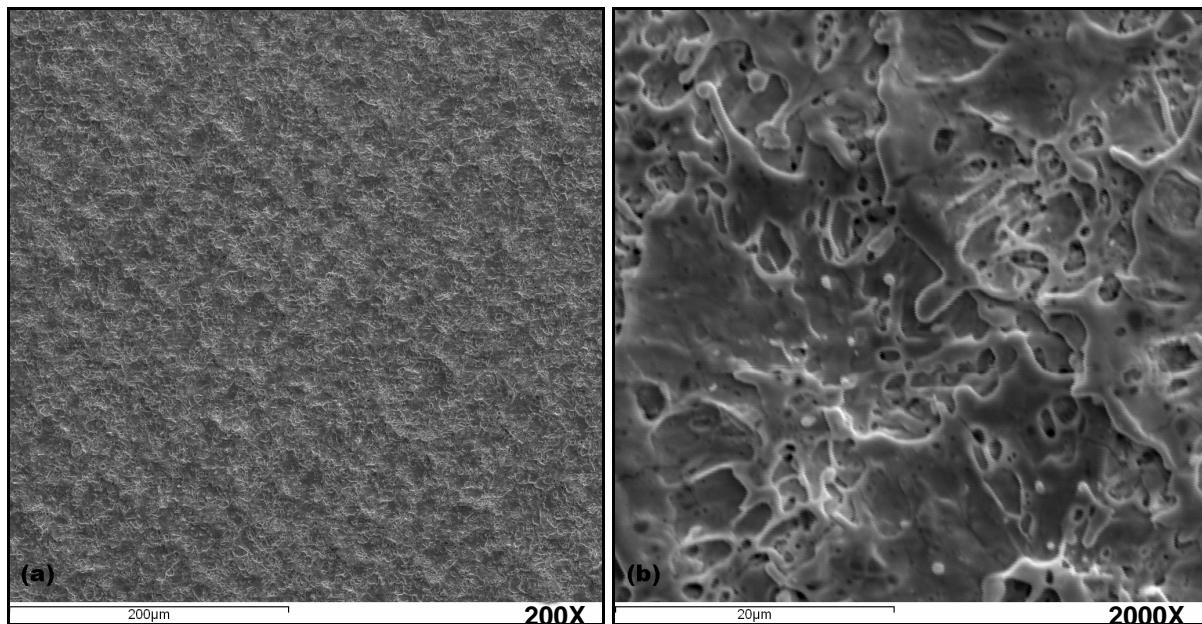


Figura 4.32 - Substrato de metal duro com textura laser sem revestimento.

Nas Figuras 4.31 e 4.32 observa-se, também, que o substrato modificado por feixe de laser apresenta um aspecto mais rugoso do que o substrato modificado por jateamento.

A Tabela em anexo I.1 e as Figs. 4.33 a 4.36 mostram os resultados dos parâmetros topográficos de amplitude obtidos por perfilometria 3D dos substratos jateado e laser.

As rugosidades 3D da Tab. I.1 e das Figs. 4.33 a 4.36 foram obtidas por meio da varredura das áreas, A1 e A2 com  $2 \times 2 \text{ mm}^2$ , na superfície de saída das ferramentas.

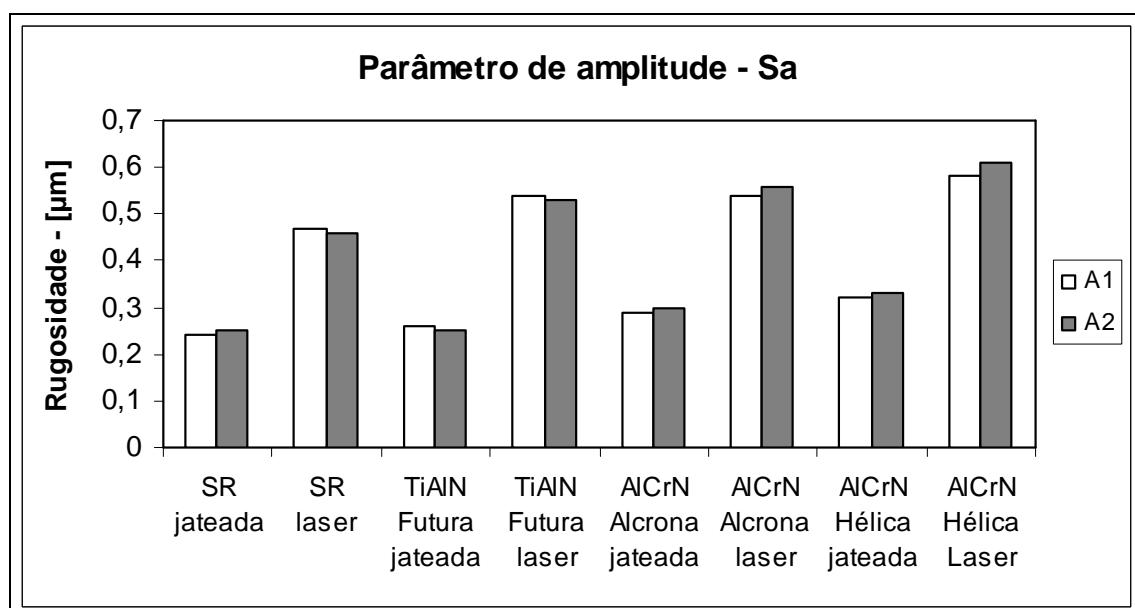


Figura 4.33 - Desvio aritmético médio da superfície (Sa) das ferramentas texturizadas por jateamento e laser, medido por meio das áreas de varredura A1 e A2.

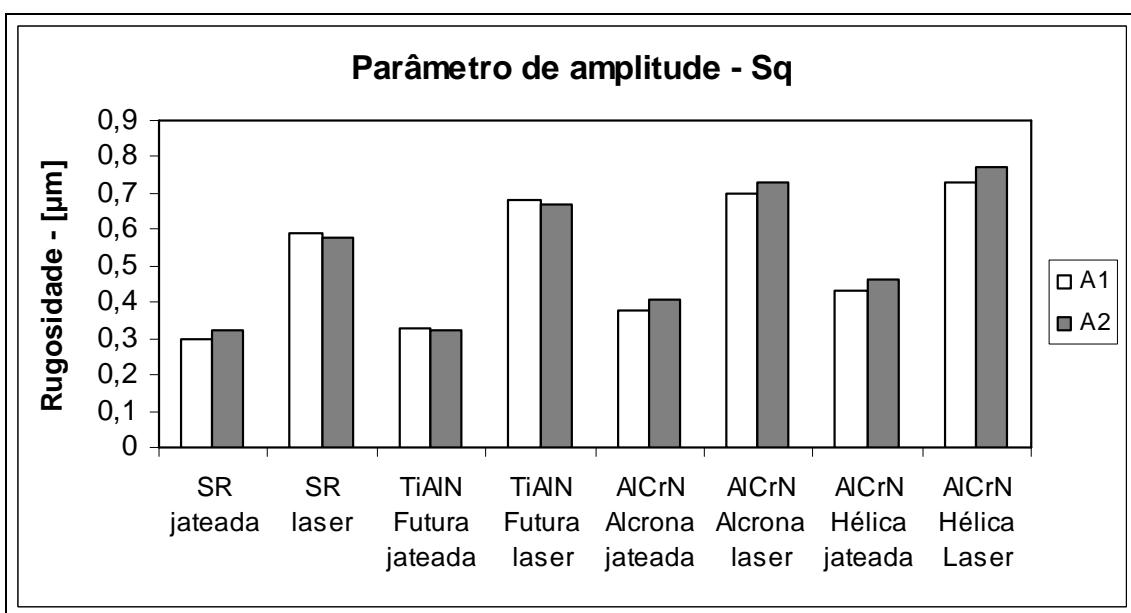


Figura 4.34 - Desvio quadrático médio da superfície (Sq) das ferramentas texturizadas por jateamento e laser, medido por meio das áreas de varredura A1 e A2.

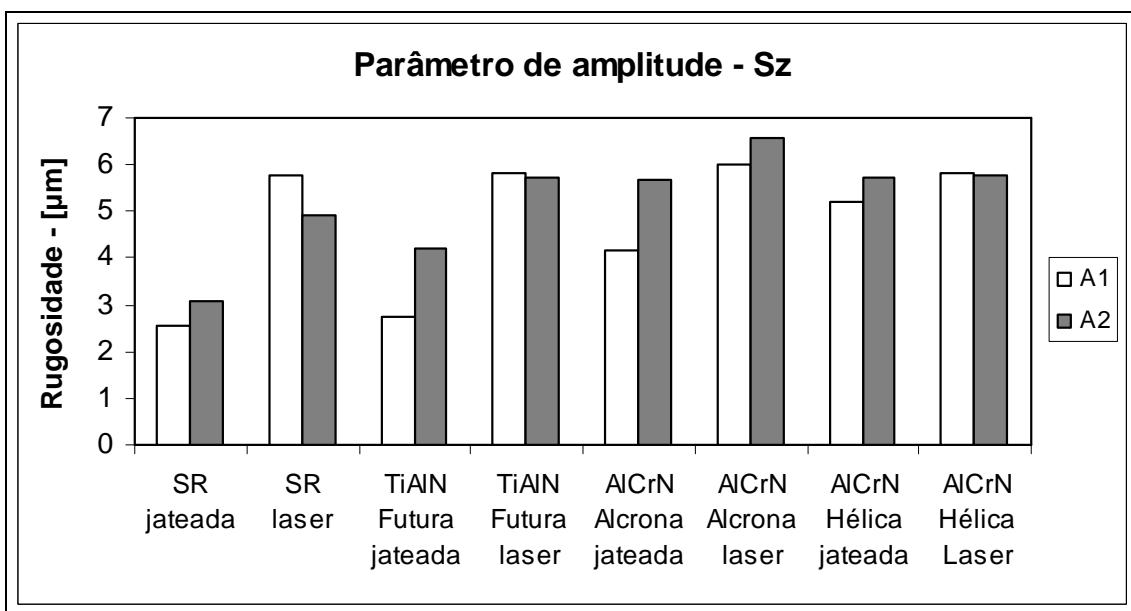


Figura 4.35 - Altura média das dez maiores distâncias pico-vale (Sz) das ferramentas texturizadas por jateamento e laser, medida por meio das áreas de varredura A1 e A2.

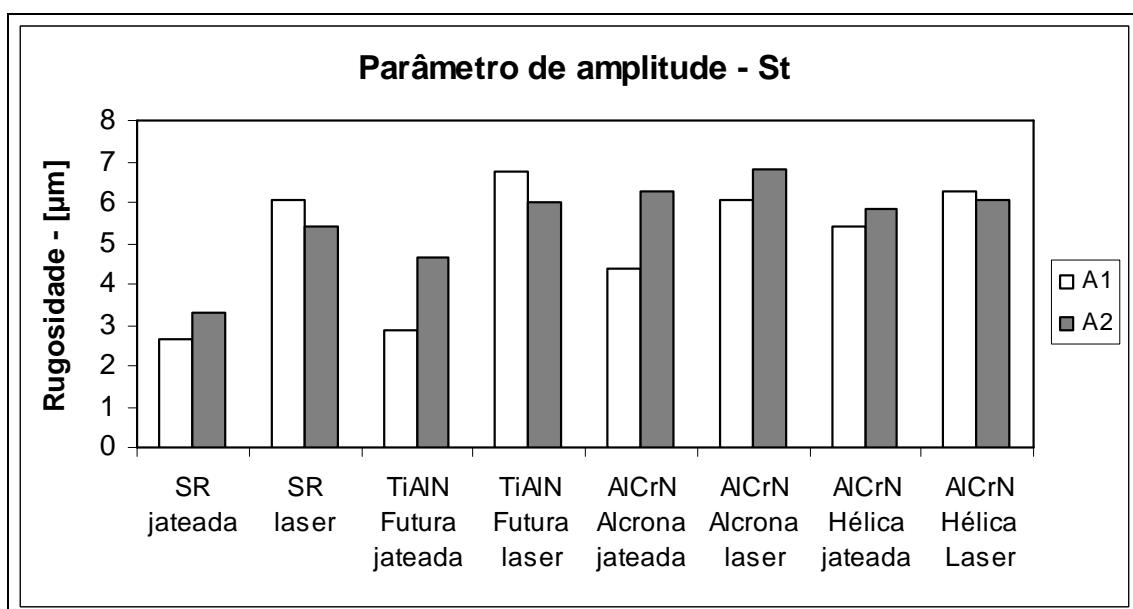


Figura 4.36 - Altura total da superfície (St) das ferramentas texturizadas por jateamento e laser, medida por meio das áreas de varredura A1 e A2.

Nas Figuras 4.33 a 4.36 os valores dos parâmetros de amplitude  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$  e  $St$  mostram que o substrato sem revestimento modificado por jateamento (SR-jateada) apresenta uma menor rugosidade em relação ao substrato sem revestimento tratado com laser (SR-laser).

Dentre os parâmetros de amplitude selecionados, o  $S_q$  é o parâmetro mais representativo estatisticamente, uma vez que o seu resultado indica que a dispersão da rugosidade é maior para o substrato modificado por feixe de laser. A maior dispersão da rugosidade para o substrato modificado por laser pode estar relacionada à severidade do processo, à intensa formação das gotículas de material resolidificado, como indica a Fig. 4.32(b), que se sobrepõem ao atingirem o substrato e a absorção preferencial do feixe de laser ao interagir com os materiais constituintes do substrato.

Outra característica observada nas Figs. 4.33 a 4.36 é que as rugosidades dos substratos SR-jateada e SR-laser aumentam após a deposição dos revestimentos TiAIN, AlCrN-Alcrona e AlCrN-Hélica. Provavelmente isso ocorre em virtude da formação de macro partículas ou grânulos na superfície do substrato após a deposição do revestimento. A formação dessas macro partículas é a principal desvantagem do processo de deposição PVD por evaporação por arco catódico, processo utilizado neste trabalho. As macro partículas são resultantes da formação de gotículas durante a evaporação do arco de materiais com baixo ponto de fusão, caso do alumínio constituinte dos revestimentos. Acredita-se também que a evaporação muito rápida durante o processo de arco catódico produz um excesso de átomos que não são completamente ionizados antes de atingirem a

superfície do substrato. Este excesso de átomos neutros pode coalescer para formar macro partículas durante o voo antes de atingirem o substrato (PalDey e Deevi, 2003).

As Figuras 4.37 e 4.38 mostram os valores obtidos para os parâmetros de distribuição de amplitude ou estatísticos das superfícies das ferramentas texturizadas por jateamento e laser, Ssk (*Skewness*) e Sku (*Curtose*).

O Ssk representa o grau de assimetria das amplitudes da rugosidade da superfície sobre o plano médio. Mais especificamente, ele indica que uma superfície constituída predominantemente por vales tenderá a um Ssk menor que zero, ao passo que uma superfície constituída predominantemente por picos tenderá a um Ssk maior que zero (Cohen, 2008).

Conforme a Figura 4.37, o Ssk do substrato sem revestimento e jateado (SR-jateada) indica uma superfície com a preponderância de vales. Já o substrato sem revestimento tratado com laser (SR-laser) indica uma superfície com a preponderância de picos. Após a deposição dos revestimentos, somente o TiAlN manteve o Ssk negativo do substrato SR-jateada, os revestimentos AlCrN-Alcrona e AlCrN-Hélica apresentaram Ssk positivos, como pode ser observado na Fig. 4.37. Já para o substrato SR-laser, após a deposição do TiAlN o Ssk torna-se negativo, enquanto que o AlCrN-Alcrona e o AlCrN-Hélica mantiveram o mesmo sinal do Ssk do substrato SR-laser, como indica a Fig. 4.37.

A Sku está relacionada à curva de distribuição de amplitudes da rugosidade da superfície, mais precisamente à forma da curva. Se as amplitudes da superfície seguem uma distribuição Normal ou Gaussiana, então a Sku é igual a 3, e o Ssk é igual a zero. Se a curva se apresenta mais aguda a Sku é maior, e tende a ser maior que 3, e se mais achatada a Sku tende para menor que 3 (Griffiths, 2001). Para Cohen (2008) a Sku indica a presença excessiva de elevados picos/vales profundos na superfície analisada, tendendo para uma Sku maior que 3, ou a ausência destes, tendendo para a Sku menor que 3.

Os resultados da Fig. 4.38 mostram que todos os substratos testados, revestidos ou não, apresentaram uma Sku maior do que 3, indicando que a distribuição das amplitudes dos perfis dos substratos estudados não são Gaussianas, tendendo a uma distribuição com maior quantidade de picos elevados ou vales profundos. Pelos dados da Fig. 4.38 verifica-se que os substratos tratados a laser estão mais próximos de uma distribuição Gaussiana, conforme análise da Sku dos substratos.

O substrato texturizado a laser e revestido de TiAlN (TiAlN-laser) é o que mais se aproxima de uma superfície com distribuição normal, para Ssk próximo de zero (Ssk = -0,07) e Sku próxima de 3 (Sku = 3,12), conforme área de varredura A1. Já o substrato texturizado por jateamento e revestido de AlCrN-Hélica (AlCrN-Hélica jateada) é o que apresenta a curva de distribuição de amplitudes mais aguda, com a maior Sku igual a 8,67, e

caracterizado por picos desordenados na superfície, com maior Ssk igual a 1,01, conforme área de varredura A2.

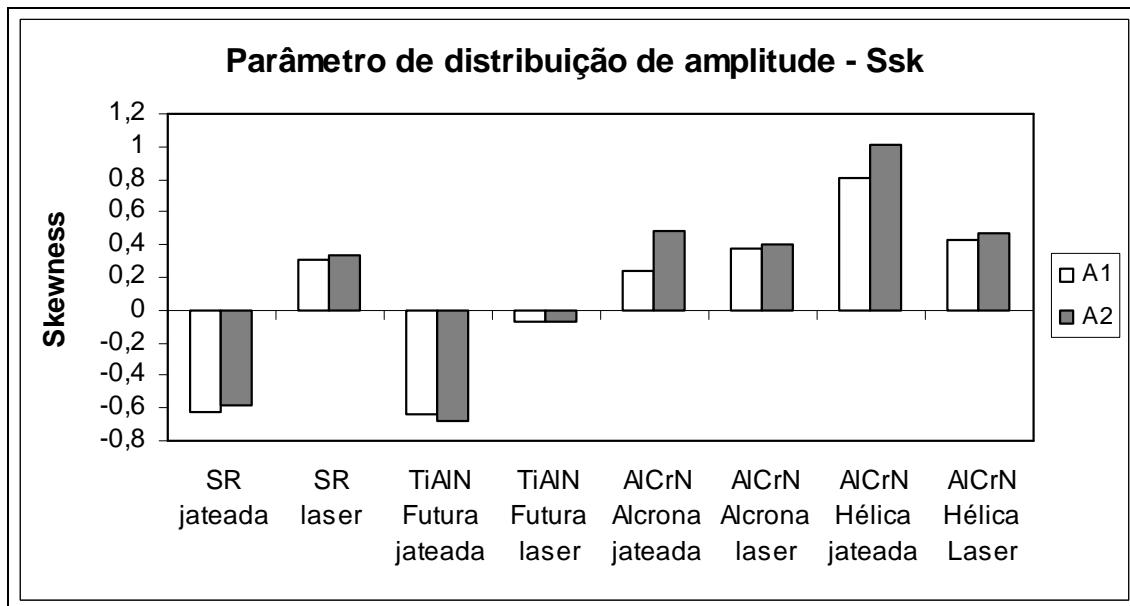


Figura 4.37 - Skewness (Ssk) das ferramentas texturizadas por jateamento e laser, medido por meio das áreas de varredura A1 e A2.

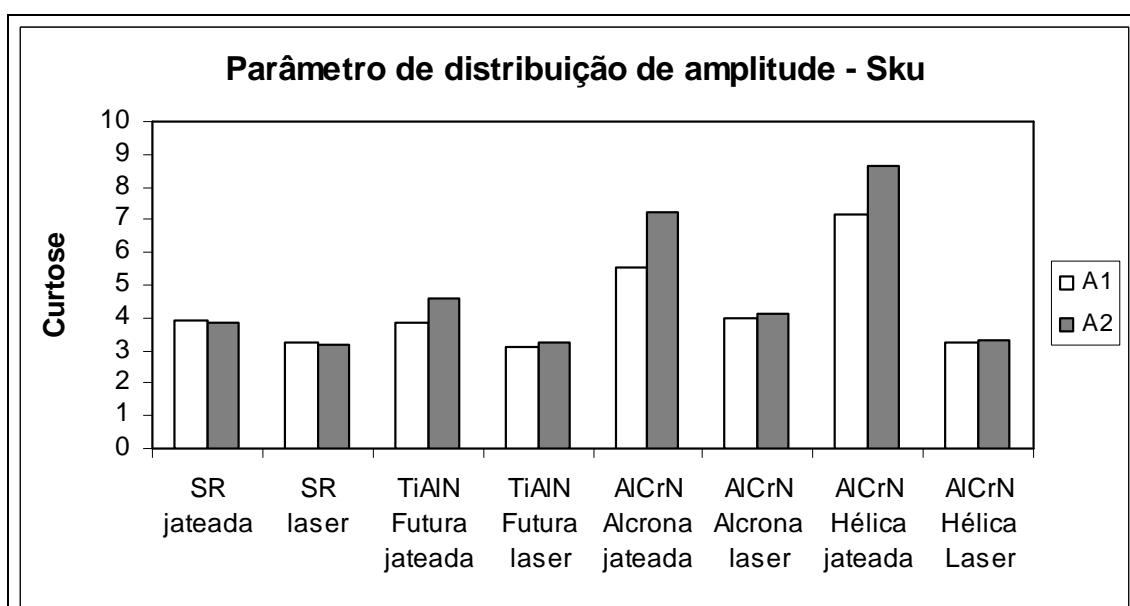


Figura 4.38 - Curtose (Sku) das ferramentas texturizadas por jateamento e laser, medida por meio das áreas de varredura A1 e A2.

Os parâmetros de distribuição de amplitude, Ssk e Sku, tendem a sofrer de uma pobre repetibilidade, uma vez que pontos muito elevados ou muito baixos de amplitude da superfície podem afetar o cálculo destes parâmetros. Por isso, no cálculo destes parâmetros deve-se fazer medições suficientes da superfície para fornecer valores estatisticamente significativos (Cohen, 2008).

Neste trabalho apenas duas áreas foram varridas por perfilometria, o que pode afetar os valores obtidos dos parâmetros de distribuição Ssk e Sku. No caso dos substratos revestidos, as dispersões dos resultados dos parâmetros de amplitude podem também ser influenciadas pelas características específicas do processo de deposição dos revestimentos, que afetam, sobretudo, a morfologia do filme.

O aumento da complexidade na nucleação e crescimento dos revestimentos, pela quantidade de elementos constituintes dos mesmos, aumenta a possibilidade do aparecimento de defeitos, como poros, na morfologia do revestimento, podendo implicar numa maior dispersão das rugosidades do substrato revestido.

Como a topografia de uma superfície é tridimensional por natureza, para caracterizar melhor a morfologia dos substratos estudados foram também adquiridos e analisados dois parâmetros para a descrição de propriedades espaciais das superfícies.

Os parâmetros adquiridos e analisados por meio do software *Mountains Map* foram à densidade de picos (Sds) e a razão da textura superficial (Str). A densidade de picos (Sds) é caracterizado como o número de picos por unidade de área, utilizando o critério de definição de pico, como o maior dos oito picos vizinhos da área medida tomada no plano médio. Já a razão da textura superficial (Str) indica numa superfície analisada a “direcionalidade” da textura, ou seja, qual a direção preferencial da textura da superfície.

As Figuras 4.39 e 4.40 mostram os histogramas com as estimativas dos picos dos substratos sem revestimentos texturizados por jateamento e laser, respectivamente.

De acordo com a Fig. 4.39, para o substrato SR-jateada a maior densidade de picos da superfície, cerca de 2900 a 3300 pks/mm<sup>2</sup>, está concentrada em picos com altura em torno de 2,4 a 2,6 µm, conforme áreas analisadas A1 e A2.

Para o substrato SR-laser a maior densidade de picos da superfície, cerca de 1900 a 2000 pks/mm<sup>2</sup>, concentra-se em picos com altura em torno de 3 a 3,4 µm, de acordo com as áreas A1 e A2, conforme Fig. 4.40.

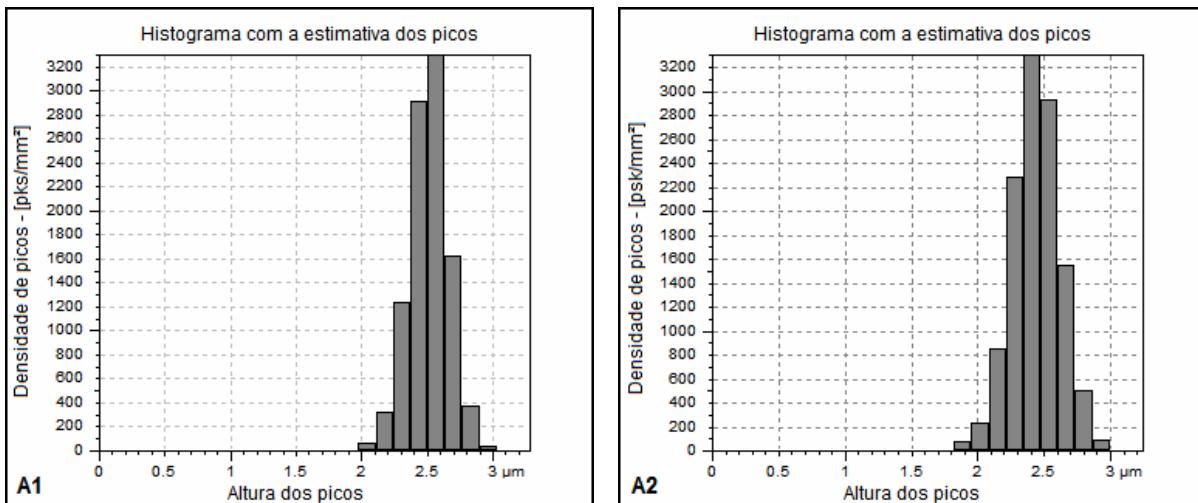


Figura 4.39 - Estimativa da densidade de picos do substrato texturizado por jateamento sem revestimento, áreas de varredura A1 e A2.

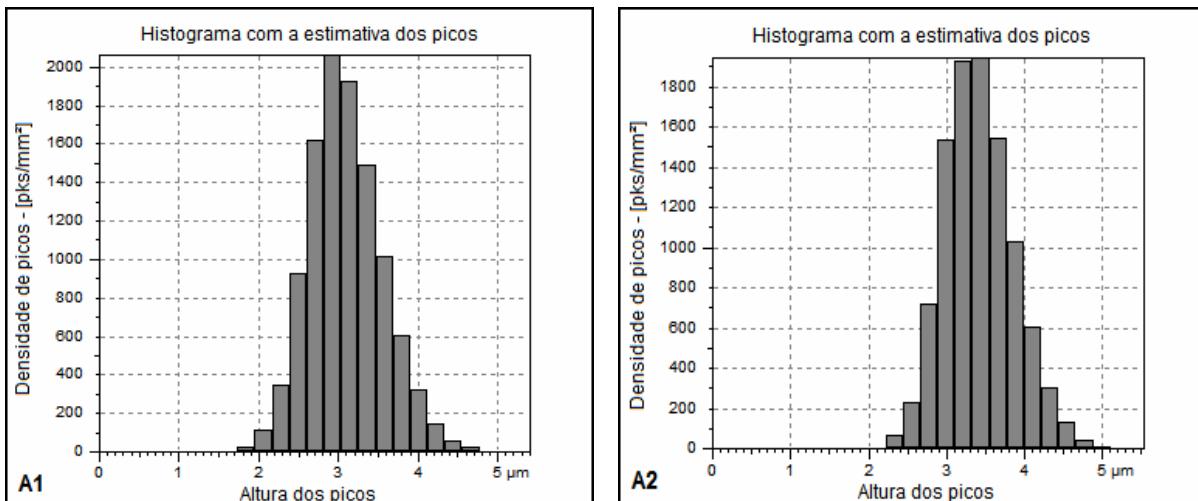


Figura 4.40 - Estimativa da densidade de picos do substrato texturizado a laser sem revestimento, áreas de varredura A1 e A2.

As Figuras 4.41 a 4.43 mostram a densidade de picos dos substratos SR-jateada e SR-laser após a deposição dos revestimentos TiAlN, AlCrN-Alcrona e AlCrN-Hélica.

A deposição dos revestimentos aumentou a densidade dos picos, e de maneira geral, a faixa de altura dos picos das superfícies.

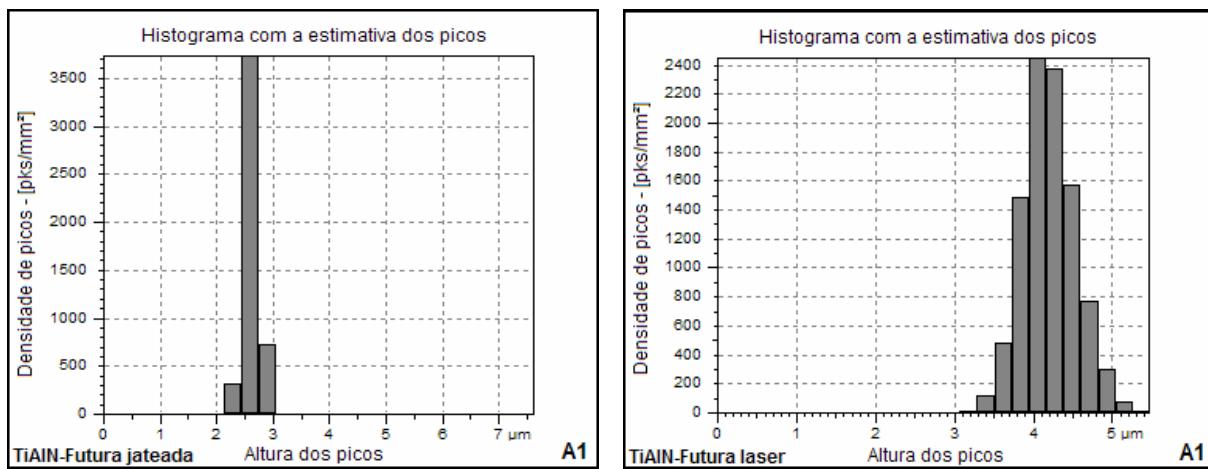


Figura 4.41 - Estimativa da densidade de picos dos substratos jateado e laser após a deposição do revestimento TiAlN-Futura, área de varredura A1.

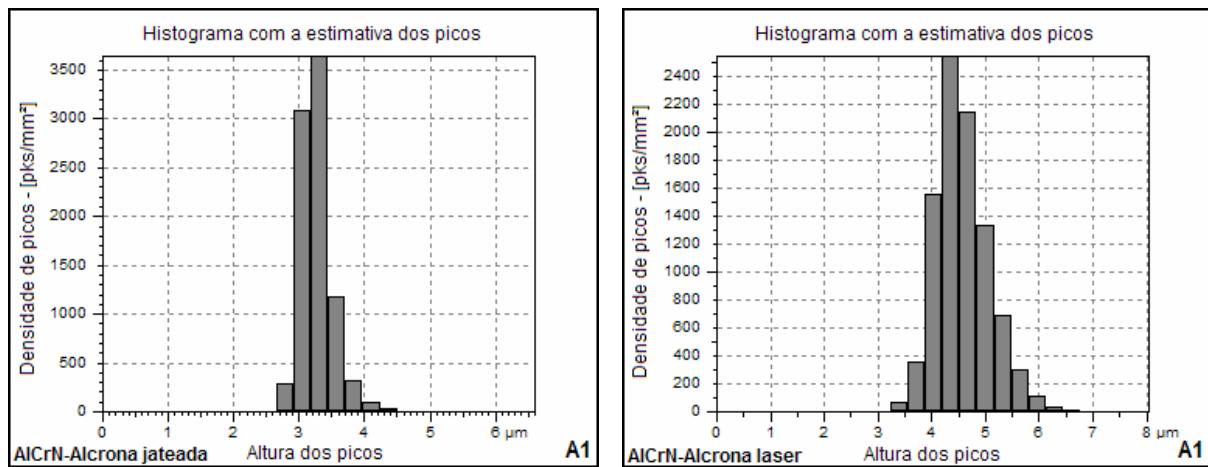


Figura 4.42 - Estimativa da densidade de picos dos substratos jateado e laser após a deposição do revestimento AlCrN-Alcrona, área de varredura A1.

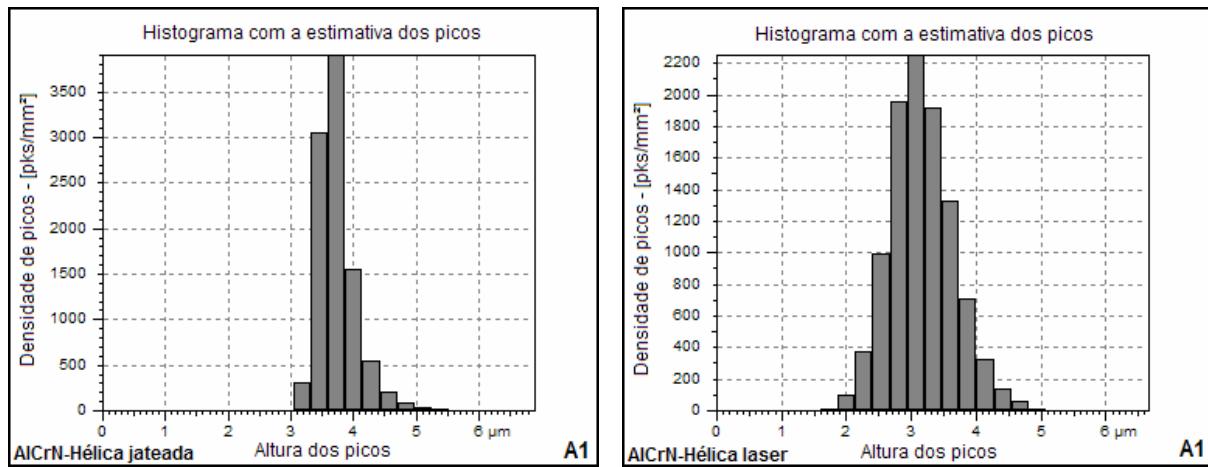


Figura 4.43 - Estimativa da densidade de picos dos substratos jateado e laser após a deposição do revestimento AlCrN-Hélica, área de varredura A1.

A densidade e a altura dos picos são fatores que podem controlar as ligações químicas entre a superfície do substrato alvo e os átomos dos elementos constituintes dos revestimentos durante o processo de deposição. Além desses fatores, a distribuição angular da deposição dos átomos do revestimento (*adatoms*) também influencia diretamente nessas ligações químicas revestimento-substrato (Mattox, 1996).

A densidade e a altura dos picos das superfícies dos substratos SR-jateada e SR-laser podem ser um indicativo da adesividade do revestimento, uma vez que uma pobre adesividade pode ser atribuída a um baixo grau de ligações químicas entre os átomos do revestimento e do substrato (Mattox, 1996).

A altura dos picos pode ser uma condição desfavorável à deposição do revestimento, uma vez que picos muito elevados dificultam a incidência dos átomos dos elementos constituintes do revestimento nos vales do perfil de rugosidade (Mattox, 1996).

A princípio, uma elevada densidade de picos da superfície também dificultaria a movimentação dos átomos do revestimento em direção ao perfil mais baixo da rugosidade do substrato, formando uma interface defeituosa, com a presença de vazios.

Para Bouzakis et al. (2001) o espaçamento médio entre sucessivos picos do perfil de rugosidade da superfície pode influenciar no travamento mecânico do revestimento sobre o substrato. Assim, um aumento na densidade dos picos diminuiria o espaçamento entre os picos do perfil de rugosidade, podendo efetivamente aumentar o travamento mecânico do revestimento.

Os dados obtidos nas Figs. 4.39 e 4.40 identificam para os substratos SR-jateada e SR-laser concentrações de picos em alturas diferentes, dificultando uma análise direta da influência destes picos na adesividade dos revestimentos. Além do que, é uma tarefa difícil diferenciar os efeitos dos picos das superfícies em relação às ligações químicas entre o substrato e o revestimento, e em relação ao travamento mecânico do revestimento sobre o substrato.

As Figuras 4.39 a 4.43 mostram também que os substratos modificados por laser apresentam uma distribuição de picos que se aproxima de uma distribuição normal em relação aos substratos jateados, justificando a  $S_{\text{ku}}$  próxima de 3 para o substrato SR-laser, conforme a Fig. 4.38.

Outro aspecto peculiar que diferencia os substratos texturizados é a aparente ordenação periódica da textura, particularmente dos picos, do substrato SR-laser em relação ao substrato SR-jateada, como pode ser verificado nas imagens em perfilometria 3D da rugosidade dos substratos, Figs. 4.44 e 4.45.

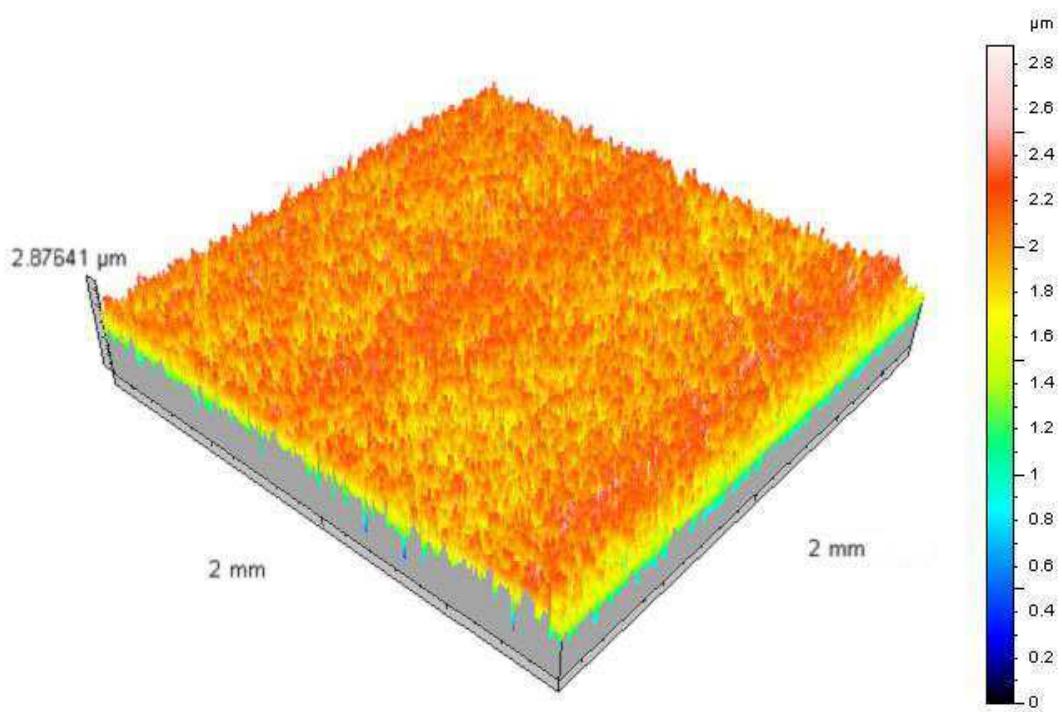


Figura 4.44 - Perfilometria 3D da rugosidade do substrato sem revestimento modificado por jateamento.

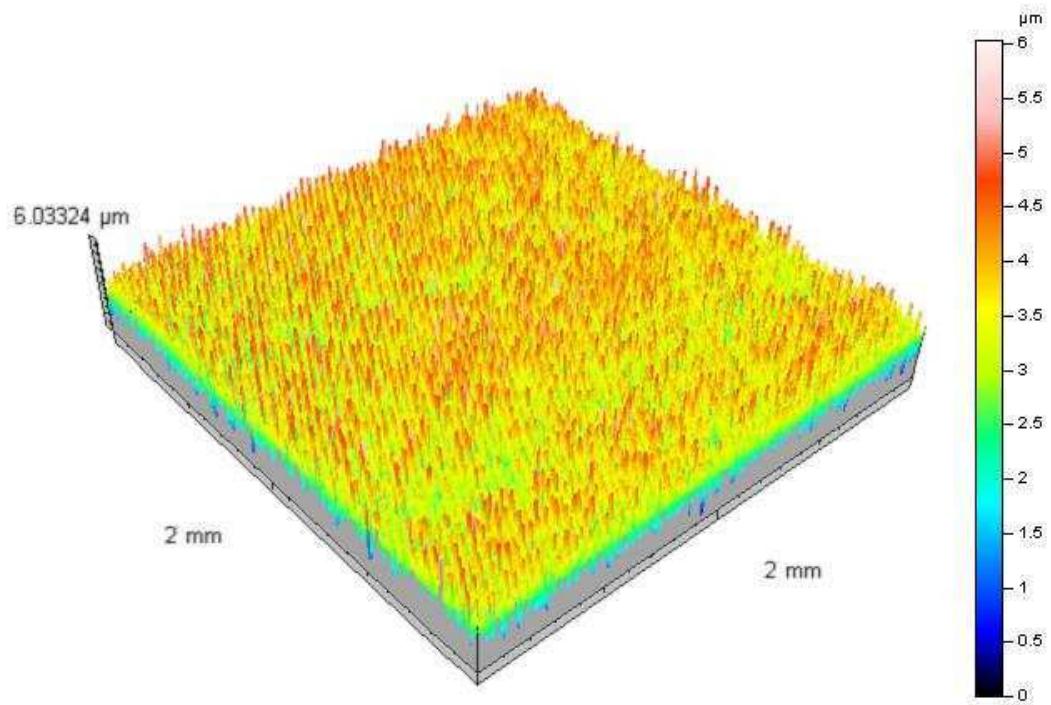


Figura 4.45 - Perfilometria 3D da rugosidade do substrato sem revestimento modificado por laser.

As Figuras 4.46 e 4.47 mostram a foto simulação por perfilometria 3D das texturas superficiais dos substratos modificados por jateamento e laser. Por meio da Figura 4.46 observa-se que o feixe de laser cria realmente uma textura direcional no substrato de metal duro.

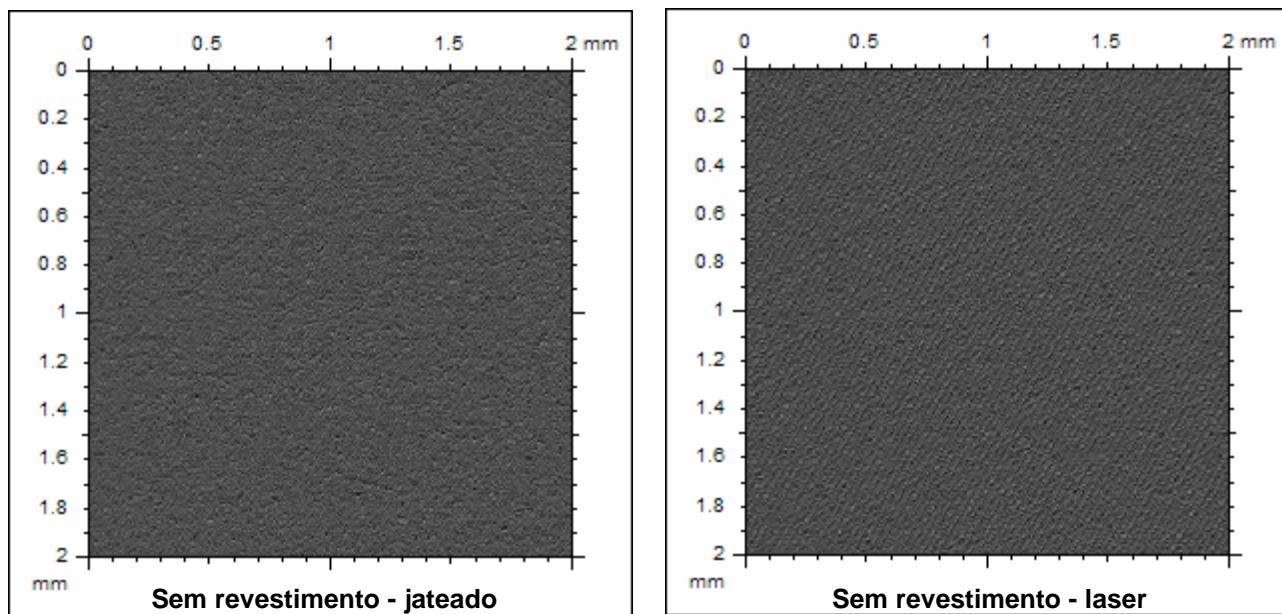


Figura 4.46 - Foto simulação por perfilometria 3D da textura superficial dos substratos jateado e laser sem revestimento.

Pela Figura 4.47 observa-se que mesmo após o processo de deposição dos revestimentos a “direcionalidade” da textura do substrato modificado por laser é mantida.

As imagens em perfilometria 3D, Figs. 4.44 e 4.45, deixam claro que o processo de jateamento gera uma textura superficial desordenada, sem uma orientação, ou seja, uma textura um tanto mais isotrópica do que a textura direcional provocada pelo feixe de laser.

O grau de isotropia e “direcionalidade” das texturas jateada e laser podem ser comparados por meio de gráficos polares, como indicados nas Figs. 4.48 e 4.49.

A textura de uma superfície é considerada isotrópica quando ela apresenta características idênticas, independente da direção de medida (Blateyron, 2006). Este é o caso de superfícies com uma textura aleatória, como são as superfícies geradas por jateamento ou tratadas quimicamente, que não apresentam nenhuma textura destacada. A textura superficial que apresenta uma orientação periódica é dada como anisotrópica.

Uma maneira de determinar e quantificar a isotropia de uma superfície é por meio da aplicação da transformada de Fourier. Com a FFT é possível construir um parâmetro espacial que será um indicador da isotropia de uma superfície. Esse parâmetro é a relação de aspecto da textura ou razão da textura superficial, Str.

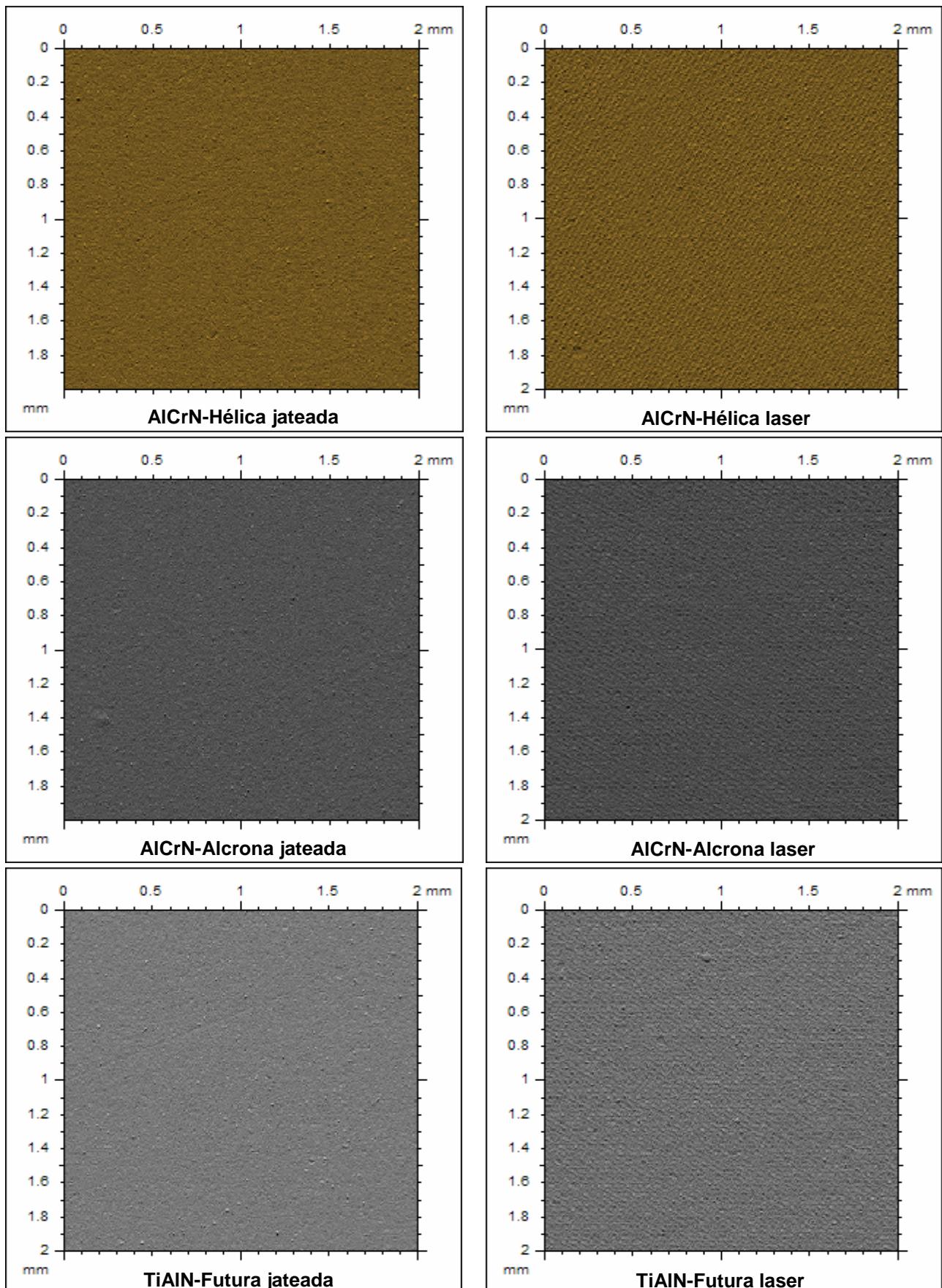


Figura 4.47 - Foto simulação por perfilometria 3D da textura superficial dos substratos jateado e laser revestidos.

O parâmetro Str comprehende um valor entre 0 e 1, sem unidade. Ele também pode ser expresso como uma porcentagem entre 0 e 100 %. Uma superfície isotrópica tem Str próximo de 1 (100 %), enquanto uma superfície fortemente anisotrópica terá Str próximo de 0.

As Figuras 4.48 e 4.49 mostram, respectivamente, que a superfície do substrato de metal duro após o jateamento apresenta uma isotropia de 75,4 %, enquanto que a superfície do substrato de metal duro após a modificação por feixe de laser apresenta uma isotropia de 38,7 %. Esses resultados são a indicação de que realmente o feixe de laser provoca uma maior direcionalidade da textura superficial do substrato em relação ao jateamento. Além disso, com os gráficos polares é possível determinar as direções preferenciais da textura, por meio dos espectros mais intensos.

No caso da textura jateada, Fig. 4.48, as direções preferenciais indicadas são de 1° e 179° mostrando uma superfície com direcionalidade aleatória. Para a textura laser as direções preferenciais são 25° e 54,5° indicando uma direcionalidade da textura próxima dos ângulos de interação do feixe de laser com o substrato, ângulos de 30° e 60°.

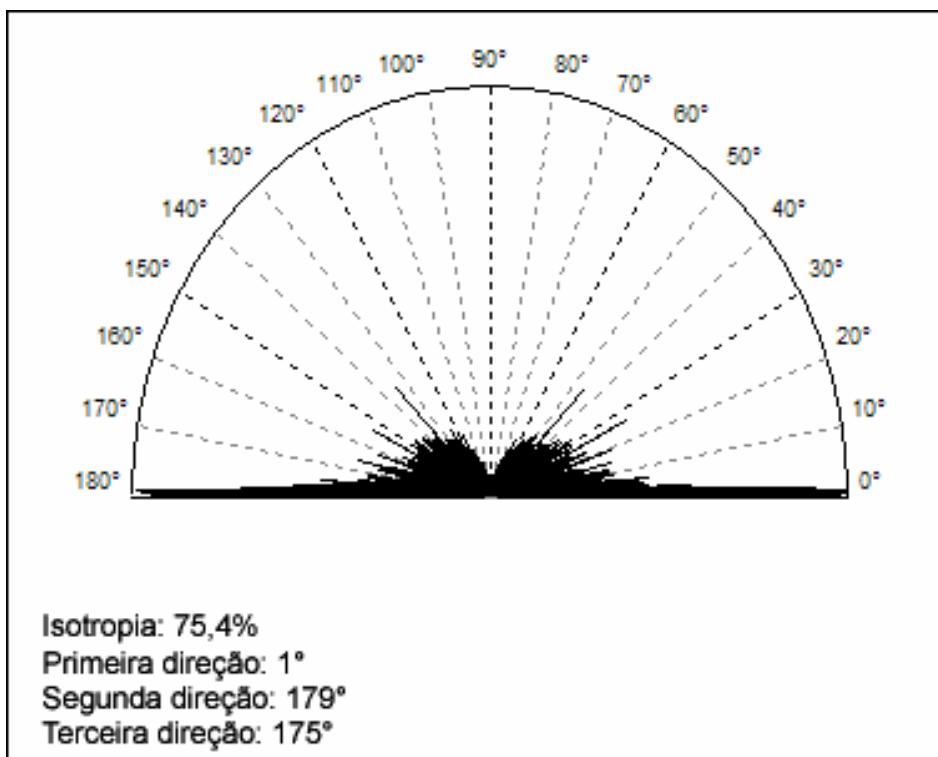


Figura 4.48 - Gráfico polar da indicação da textura para o substrato SR-jateada.

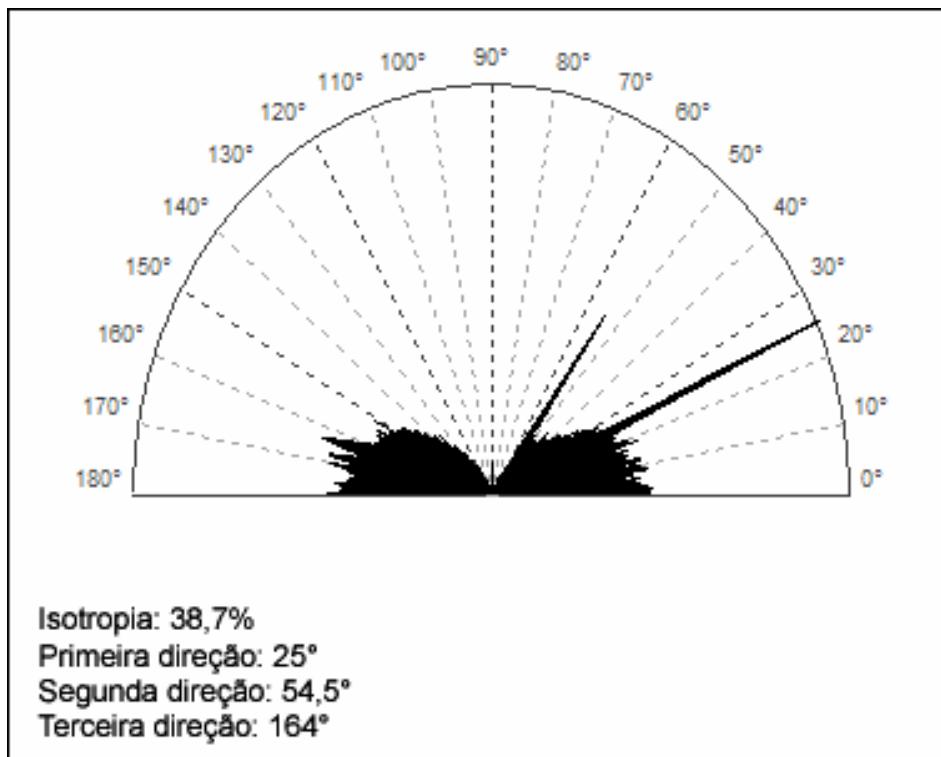


Figura 4.49 - Gráfico polar da indicação da textura para o substrato SR-laser.

Os resultados obtidos e discutidos neste item mostram as diferenças entre as texturas dos substratos de metal duro modificadas por jateamento e laser, baseadas principalmente na topografia de cada textura, em que a textura jateada é caracterizada pelo seu aspecto randômico e a textura laser caracterizada pela distribuição semiordenada de picos e vales.

Os aspectos das duas texturas pode ser um diferencial na adesividade dos revestimentos posteriormente depositados.

Numa relação direta dos parâmetros topográficos de amplitude analisados neste item, pode-se dizer que o aumento da rugosidade nas ferramentas texturizadas a laser é um indicativo para uma melhor adesividade dos revestimentos, e posteriormente pelo melhor desempenho médio destas ferramentas no ensaios de vida no fresamento frontal de ferro fundido vermicular.

O item seguinte averigua por meio de ensaios de indentação estática e dinâmica, se a mudança proposital e ordenada da textura do substrato pode melhorar o ancoramento do revestimento. Além disso, o item seguinte dá continuidade na discussão das características morfológicas das texturas.

## 4.4. Avaliação da Adesividade dos Revestimentos

### 4.4.1. Ensaio de Indentação Rockwell

As indentações mecânicas com penetrador Rockwell e cargas estáticas de 30, 60 e 100 kgf foram realizadas na superfície de saída das ferramentas de metal duro, como mostrado na Fig. 3.11. Para as cargas de 60 e 100 kgf, tanto nas ferramentas com textura jateada quanto nas ferramentas com textura laser ocorreu delaminação dos revestimentos. No entanto, as ferramentas com textura jateada apresentaram maiores áreas de delaminação do revestimento ao redor das indentações, como pode ser verificado na Fig. 4.50.

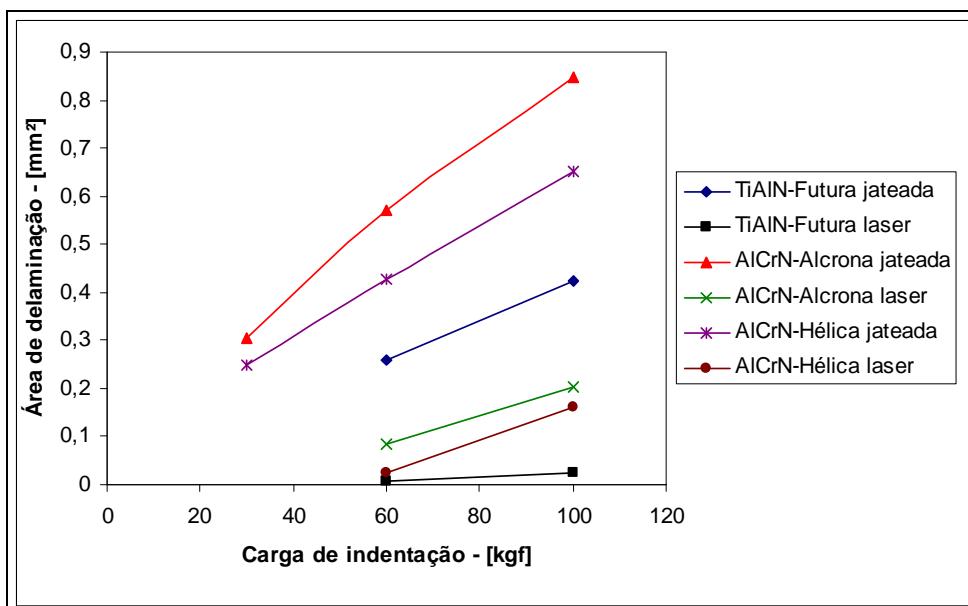


Figura 4.50 - Área de delaminação dos revestimentos para as ferramentas com textura jateada e laser após indentação estática com cargas de 30, 60 e 100 kgf.

As Figuras 4.51 a 4.53 mostram as indentações com carga de 100 kgf na superfície de saída das ferramentas. Na Figura 4.51 observa-se uma grande área de delaminação do revestimento AlCrN-Hélica depositado sobre a ferramenta jateada, expondo o substrato de metal duro na cor cinza clara. Na ferramenta com textura laser também se constata a delaminação do AlCrN-Hélica, porém, a área de delaminação é efetivamente menor, e descontínua. As Figuras 4.52 e 4.53 indicam o mesmo aspecto de delaminação dos conjugados revestimento/substrato da Fig. 4.51. Os aumentos das Figs. 4.51 a 4.53 nas ferramentas jateadas e texturizadas a laser foram diferenciados, para evidenciar a maior área de delaminação dos revestimentos depositados sobre os substratos jateados.

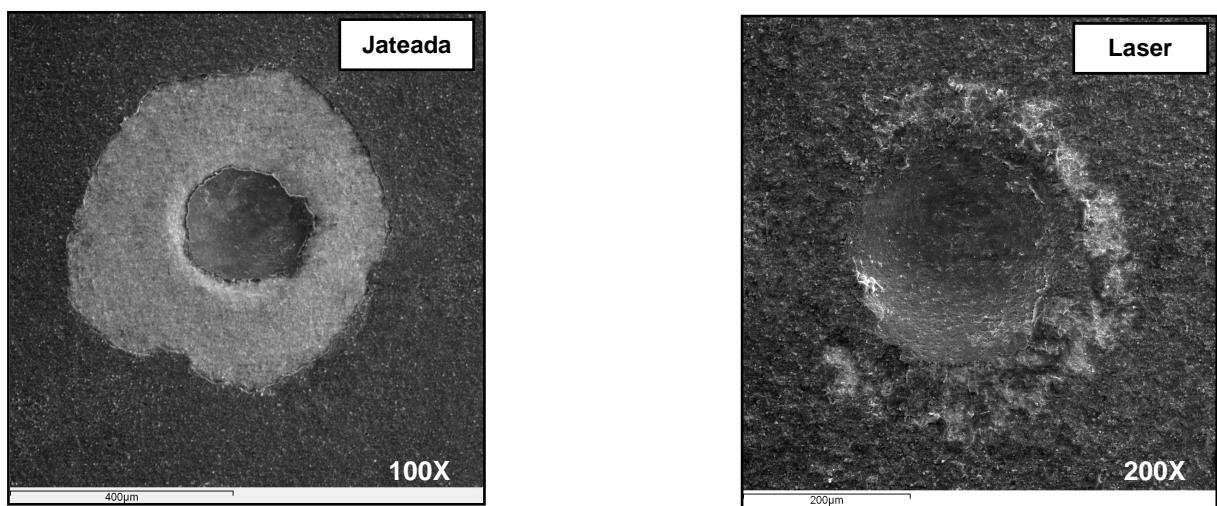


Figura 4.51 - Indentação com carga de 100 kgf para o revestimento AlCrN-Hélica.

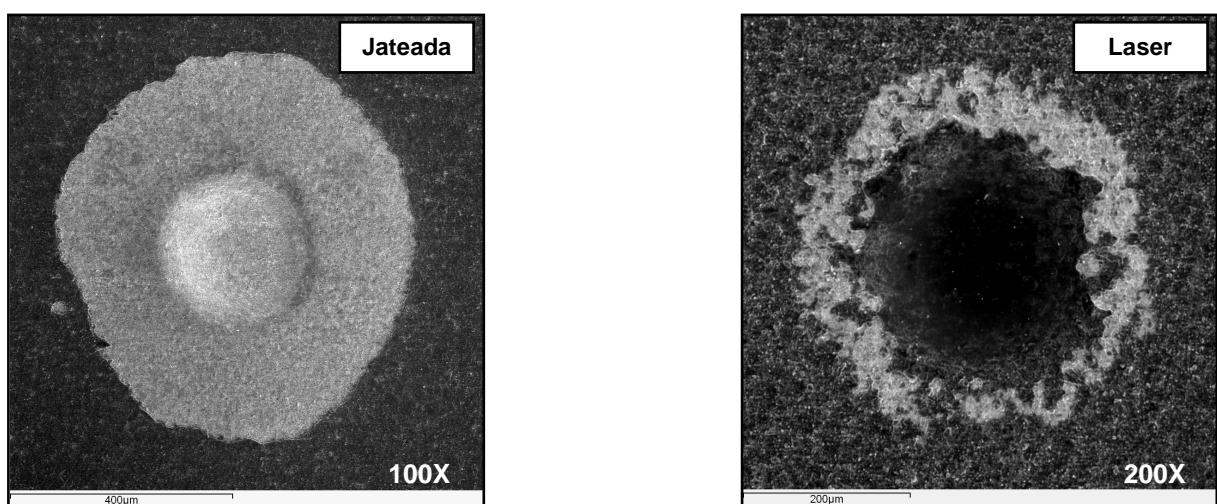


Figura 4.52 - Indentação com carga de 100 kgf para o revestimento AlCrN-Alcrona.

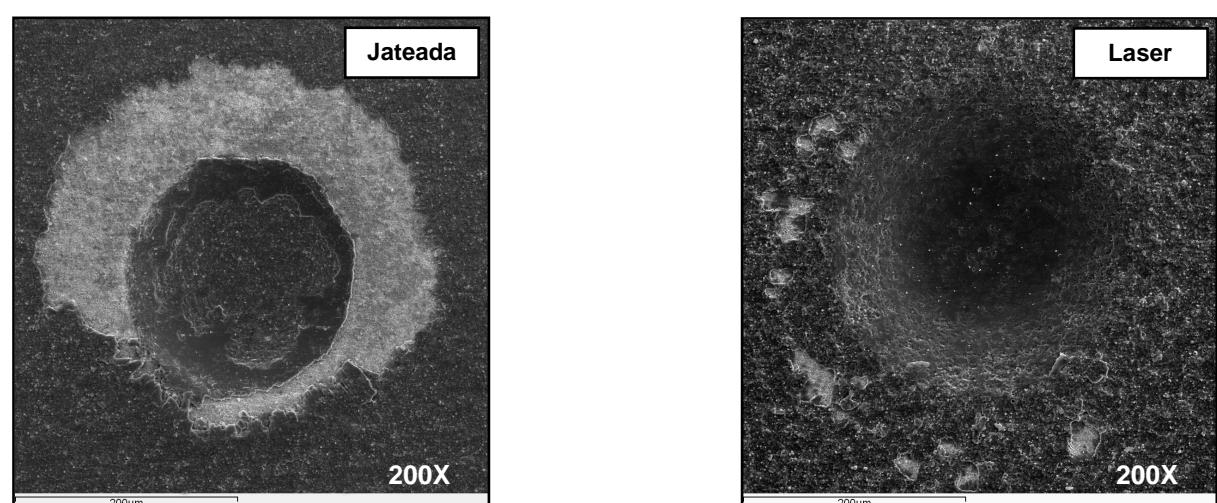


Figura 4.53 - Indentação com carga de 100 kgf para o revestimento TiAlN-Futura.