



## Resistência ao Riscamento do Aço AISI H13 Nitretado Avaliada Em Ensaio de Esclerometria Pendular

Priscila de França Monteiro<sup>1</sup>, José Costa de Macedo Neto<sup>2</sup>, José Luiz Sansone<sup>3</sup>, Sandro Lino Moreira de Queiroga<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduanda em Tecnologia em Mecatrônica Industrial – IFAM. e-mail: priscilaf.mont@gmail.com

<sup>2</sup>Professor da Universidade Estadual do Amazonas – UEA. e-mail: jotamateriais@yahoo.com.br

<sup>3</sup>Professor da Universidade Estadual do Amazonas – UEA. e-mail: jlsansone@yahoo.com.br

<sup>4</sup>Professor do Instituto Federal do Amazonas – IFAM. e-mail: linoqueiroga@ifam.edu.br

**Resumo:** O aço AISI H13 é amplamente utilizado na confecção de moldes para injeção de plástico e alumínio. Este estudo visa analisar a resistência ao riscamento deste aço após Eletroerosão e Nitretação a Plasma. Três conjuntos de corpos de prova foram produzidos: a primeira série denominada de referência é composta pelo aço apenas nitretado após a têmpera e revenido; na segunda série as amostras foram nitretadas após eletroerosão e finalmente, na terceira série após a eletroerosão as amostras foram retificadas e polidas antes da nitretação. Os parâmetros da nitretação foram selecionados para obtenção somente de uma camada de difusão, utilizando-se de uma atmosfera com 5% de N, 75% de H e 20% de Ar, numa temperatura de 520°C. Comparou-se a microestrutura resultante, o perfil de microdureza, parâmetros de rugosidade antes da esclerometria pendular e a resistência ao desgaste abrasivo. A observação microscópica da seção transversal das amostras após o processo de eletroerosão, mostrou que na superfície ocorreu nucleação de microtrincas, as quais atingiam até o substrato. Nos ensaios de esclerometria pendular de um único risco a série que foi nitretada após retífica e polimento apresentou um desgaste menor. O maior desgaste ocorreu na série em que o aço foi nitretado após a eletroerosão, evidenciando a nucleação das microtrincas. Quanto aos mecanismos de desgaste, uma maior tendência de adesão do aço para a ferramenta de metal duro ocorreu na segunda série.

**Palavras-chave:** aço AISI H13, eletroerosão, esclerometria pendular, nitretação a plasma

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de injeção de alumínio é caracterizado por exigências de desempenho elevado de moldes e matrizes. A submissão a ciclos de trabalho sob alta temperatura faz com que haja um elevado desgaste das matrizes e moldes. Isto tem impulsionando pesquisas no sentido de minimizar esta fadiga térmica. Um dos aços mais utilizados para fazer estes moldes é o AISI H13, aço ferramenta de trabalho a quente que, apesar de ter uma boa resistência ao choque térmico, poderia obter benefício de tratamentos que prolongam a sua vida útil. As soluções que foram adotadas, ao longo do tempo, para aumentar as propriedades deste aço incluem o tratamento térmico, a nitretação, e por fim o revestimento com filme PVD (FRANCO JR et Al, 2005 e CASTANHO J. M. e VIEIRA, M. T., 2003). O tratamento térmico é a submissão do aço à têmpera e ao revenimento para que haja uma modificação de sua estrutura, em condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e resfriamento. Assim diversas propriedades são melhoradas, tais como a dureza, a usinabilidade, a resistência ao desgaste e à corrosão. (YOSHIDA, 2002, LIMA e CORREA, 2006). No contato entre o aço ferramenta do molde com a liga fundida de alumínio, a superfície do ferramental está submetida além das pressões transmitidas pelo material líquido, também a um choque térmico representado pela alta temperatura da liga no estado líquido e a refrigeração do mesmo para a solidificação e retirada da peça moldada. Este ciclo térmico e também as pressões, dão origem ao aparecimento de tensões no molde que promove a nucleação de microtrincas na superfície do molde, além da erosão e mecanismos de adesão. O ciclo de fabricação de moldes em aço AISI H13 temperado e revenido com dureza da ordem de 48 HRC mostra que só pode ser usinado por eletroerosão (EDM) com acabamentos posteriores que incluem retífica e polimento do aço para nitretação subsequente (YOSHIDA, 2002). O

teste de risco único da esclerometria pendular pode ser utilizado para verificar a microestrutura, a nucleação de microtrincas na camada do substrato com a Eletroerosão e Nitretação.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 mostra um fluxograma de fabricação dos processos usados para gerar três conjuntos de amostras.

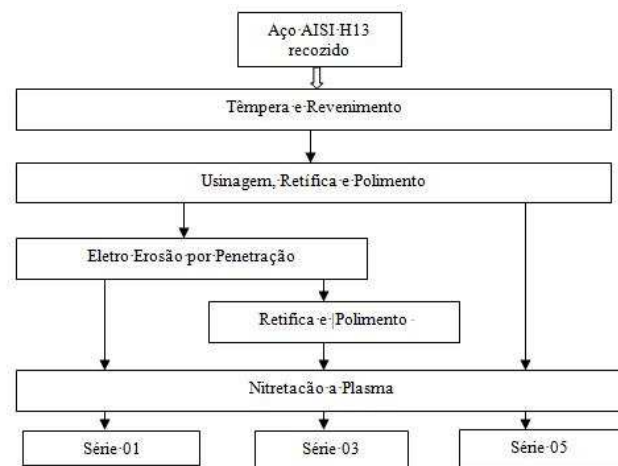


Figura 1 - Fluxograma dos processos de manufatura do aço AISIH13 para as amostras

### 2.1. Material do Substrato

As amostras do aço AISIH13 foram fabricadas a partir de uma barra retangular com 160 mm x 60 mm x 15 mm. A Tabela 1 apresenta a sua composição química

Tabela 1 - Aço AISIH13 Composição Química em % de massa.

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Cr</i>	<i>V</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Al</i>
0,38	0,28	0,92	0,10	1,25	5,13	0,8	0,019	0,001	0,25	0,02	0,03

### 2.2. Tratamento Térmico

As amostras do aço AISIH13 foram temperadas e revenidas. A austenitização ocorreu a 1040°C durante 20 minutos com resfriamento subsequente em banho de sais. Após esta fase de tratamento, o revenido duplo foi realizado, a 600°C durante 2 horas, com resfriamento ao ar. A dureza das amostras após o tratamento ficou entre 48 e 50 HRC.

### 2.3. Corte e Usinagem das Amostras

O corte das amostras foi realizado em um cortador metalográfico. As amostras do aço AISI H13 foram cortadas nas medidas de 60 mm x 13 mm x 15 mm. Após o corte, as amostras foram retificadas e polidas. Após estes processos, a dimensão das amostras foi de 55 mm x 11,7 mm x 9 mm e uma superfície de rugosidade Ra de 0,06 µm.

### 2.4. Usinagem de Eletroerosão por Penetração

Antes do processo de Eletroerosão, as amostras foram codificadas como mostrado na Tabela 2.



Tabela 2 - Codificação das amostras.

Nitretação do Aço AISI H13	Codificação das Amostras
somente Eletroerosão	Series 01
Eletroerosão, retificada e polida	Series 03
somente retificada e polida (referencia)	Series 05

As amostras foram usinadas numa máquina de Eletroerosão por Penetração Engemac modelo 440NC. Sendo que 08 amostras foram usinadas com os seguintes parâmetros mostrados na Tabela 3. Os parâmetros foram selecionados com base no trabalho desenvolvido por OLINIKI et al, (2009).

Tabela 3 - Parâmetros da Eletroerosão por Penetração.

Ton	27 $\mu$ s
Toff	9 $\mu$ s
DT- Tempo de pausa (Ton / Ton+Toff x100)	75%
Corrente	8 A / cm <sup>3</sup>
Voltagem	100 Volts
Vw – volume de erosão/min	23 mm <sup>3</sup> /min
Tabela da Engemac 440-40A	Eletrodo- Cobre Eletrolítico
Ts- números de transistores	2 TS
Tempo de Remoção	43.82 min
Gap	Automatico
Dieletrico	Hidrocarboneto (Arclean)

Dois eletrodos-ferramenta de cobre eletrolítico foram usinados na dimensão de 60 mm x 13 mm x 22 mm. A cada duas usinagem fez-se a centragem da ferramenta eletrodo com relógio comparador para não haver diferença na penetração da ferramenta nas amostras usinadas, tanto no sentido longitudinal como transversal. A média de desgaste do eletrodo-ferramenta foi de 1,54 mm em cada usinagem com a eletroerosão, e não foram observadas nas amostras nenhuma marca dos eletrodos-ferramenta. As dimensões das amostras após a eletroerosão ficaram com 55 mm x 10,3 mm x 9 mm, correspondendo a uma remoção de 1,4 mm. Os parâmetros utilizados na retifica de acabamento após a Eletroerosão são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros da Retífica das Amostras antes da Nitretação.

Rebolo (Fab. ICDER)	Model AA80K6V2 Ø355x31,8mm
Velocidade Máxima	2050 rpm
Velocidade Longitudinal	5 x 0,005 mm
Velocidade Transversal	0,02 mm
Fluido de Refrigeração	Arclean

Com o intuito de obter uma integridade de superfície para a nitretação à plasma, as amostras da séries 03 e 05 após a retífica ficaram com as dimensões de 55 mm x 9,8 mm x 9 mm, com 500  $\mu$ m removidos de material. Todas as amostras da séria 03 e 05 posteriormente foram polidas até terminar com uma superfície com acabamento equivalente a 1  $\mu$ m, obtida utilizando-se pasta de diamante.

## 2.5. Nitretação a plasma

Os parâmetros da nitretação por plasma foram selecionados para produzir camada de difusão apenas, porque a camada de compostos pode ter um comportamento quebradiço FRANCO (2003). Tabela 5 mostra os parâmetros de nitretação por plasma.

Tabela 5 - Parâmetros usados na Nitretação por Plasma.

Tempo (horas)	3
Composição do gás da mistura	5% vol N <sub>2</sub> + 75% vol H <sub>2</sub> + 20% vol Ar
Temperatura	520°C
Pressão	844 Pa ( 6,75 Torr )
Voltagem entre eletrodos	500 V

## 2.6. Teste de Esclerometria Pendular

O Ensaio de Esclerometria Pendular (Scratch Test) foi realizado no Laboratório de Superfícies da USP no Equipamento de Impacto Charpy modificado sendo os corpos de prova retangulares nas medidas (55x 9,0x 9,0mm) polido para o teste de arranhão unico com valor maximo de 35 J.

Para realização do teste de risco único foi utilizado uma ponta de carboneto de tungstênio sinterizado com base piramidal de 408 ângulo de ápice, com um 0,5 x 0,5 mm<sup>2</sup> de topo plano. A altura do pêndulo inicial foi fixada para acumular uma Energia potencial de 35 J, resultando em uma velocidade 4 m/s. Um único risco foi feito em cada uma das três amostras obtidas para cada condição de tratamento. Esse equipamento permite que a altura inicial de lançamento do pêndulo seja ajustada para trabalhar com uma energia acumulada de até 35 J, resultando em uma velocidade de risco, de 4 m/s (Figura 2). A energia absorvida (E) é medida com uma precisão de 0,01 J. A remoção de massa (W) é medido em uma balança eletrônica, portanto mediu-se as amostras antes e depois do teste. A profundidade do risco pode ser controlada por um ajuste vertical do suporte de amostra com uma precisão de 0,001 mm.

Como penetrador de risco único foi utilizada ferramenta de metal duro de carboneto de tungstênio com a forma piramidal de base quadrada. Ele tem um ângulo de semi-interno de 40 graus, com largura de 0,50 ± 0,01 milímetros no lado da face de truncado (Figura 3).



Figura 2 - Equipamento de Esclerometria Pendular



Figura 3 - Ferramenta de Carboneto de Tungstênio

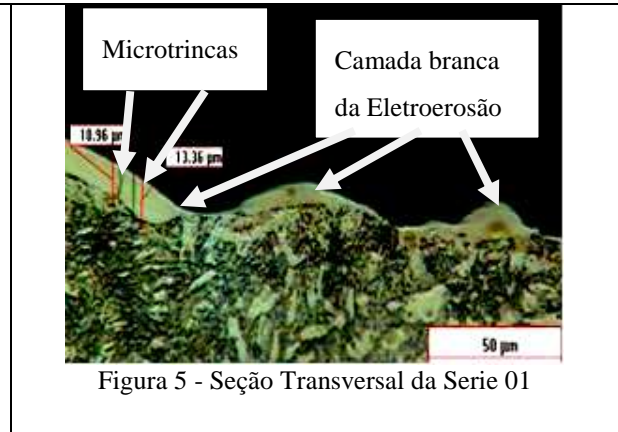
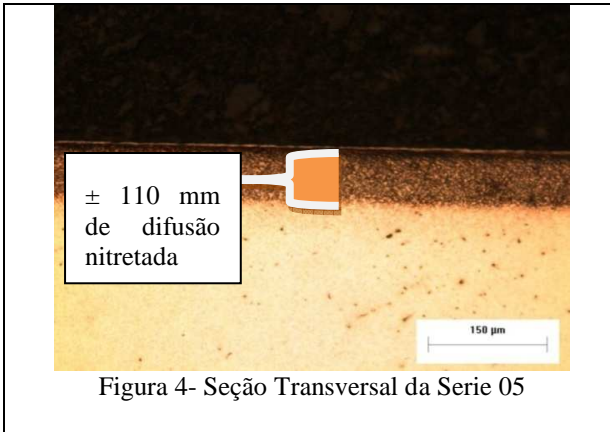
Todas as amostras foram pesadas numa balança digital com uma resolução de 0,0001 g para verificar a perda de massa após o ensaio de esclerometria. Para calcular o coeficiente de desgaste o valor de  $q = 0,574$  foi usado, obtido para o Aço AISI1080 (VELEZ- RESTREPO, 1997). A profundidade dos riscos foi fixada em 136  $\mu\text{m}$ , um valor adequado, quando comparado com a profundidade da camada nitretada. As superfícies riscadas foram reveladas usando microscópio eletrônico de varredura.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

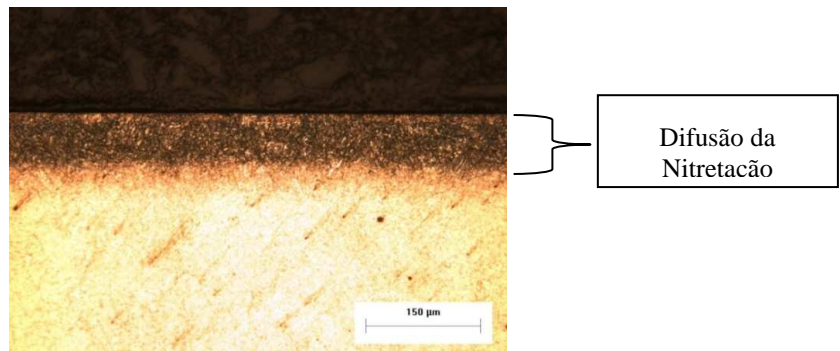
### 3.1 Análises Microestrutural

Na Figura 4 observa-se a microestrutura da seção transversal do aço AISI13 da série 05. Após têmpera e revenido, a superfície permanece sem microtrincas, mesmo no substrato. É observada uma camada nitretada de 110  $\mu\text{m}$  de profundidade e rugosidade de 5,17  $\mu\text{m}$ . A Figura 5 mostra uma seção

transversal de uma amostra de série 01. Algumas microtrincas são observadas, e estão dentro dos limites da camada de compostos (branca) e camada de difusão de nitretação.



O processo de retífica foi aplicado com intuito de eliminar micro trincas e eliminar a camada de compostos (branca), anteriormente revelado. Aproximadamente 500 μm foram removidos, como mostrado na figura 6. A camada nitretada permaneceu sem qualquer dano, e não há evidências de microtrincas.



### 3.1 Perfil de Microdureza

Os perfis de micro dureza para cada série de amostras são mostrados na Figura 7.

- Legenda: Série 1: AISIH13, Eletroerosão e nitretação  
 Série 3: AISIH13, Eletroerosão, retífica, polimento e nitretação  
 Série 5: AISIH13, retífica, polimento e nitretação

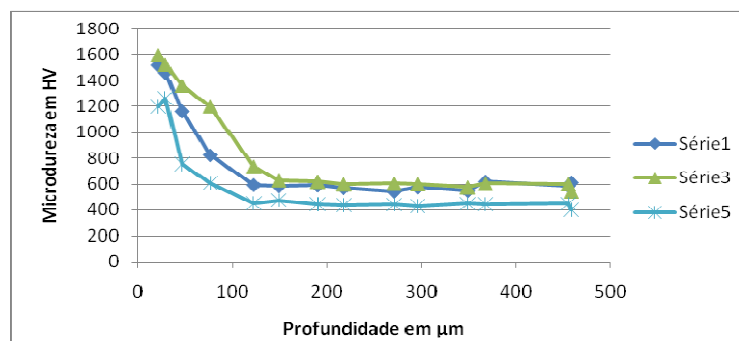


Figura 7 - Variação da microdureza em função da profundidade

A Figura 7 mostra que a microdureza determinada para a nitretação do AISIH13 (Série 05) foi de aproximadamente 1200 HV. Este valor de dureza está de acordo com o descrito na literatura para o aço AISIH13, temperado, revenido e nitretado (FRANCO JR A. R., 2003). Na profundidade de aproximadamente 110  $\mu\text{m}$  é possível associar o perfil de dureza à presença de uma camada de difusão, uma vez que se observa uma diminuição constante até 420 HV, que se estende até 480 $\mu\text{m}$ , de profundidade. A dureza maior na superfície de todas as três séries de amostras de 1598 HV corresponde para o aço AISIH13 da Série 03, onde eletroerosão, retífica, polimento e nitretação foram aplicados. A partir de uma profundidade de 150  $\mu\text{m}$ , observa-se que a dureza decresce para 600 HV, onde está localizada a camada de difusão de nitretação. A Série 01 com eletroerosão e nitretação observa-se valores de dureza de superfície da ordem de 1500 HV e a partir de 125 $\mu\text{m}$  fica estável até 480  $\mu\text{m}$  de profundidade com valores de 600 HV.

### 3.3. Teste de Esclerometria Pendular

Os resultados apresentados nos Testes de Esclerometria Pendular estão na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores obtidos nos testes de Esclerometria Pendular.

Código de Amostras	Perda de peso(mg), W	Energia consumida(J)	Energia específica (J/mg)	$K = e(W)/W(q-1)$ Coeficiente de desgaste
<b>Series</b>	3.71	16.45	4.43	
<b>05</b>	3.39	15.76	4.64	
	3.19	17.06	5.34	
<b>Média</b>	3.43	16.42	4.78	<b>2.77</b>
<b>Series</b>	3.8	18.38	4.83	
<b>01</b>	3.15	17.11	5.43	
	2.84	19.76	6.95	
<b>Média</b>	3.26	18.41	5.64	<b>3.04</b>
<b>Series</b>	2.01	16.7	8.30	
<b>03</b>	2.06	16.83	8.16	
	3.37	19.13	5.68	
<b>Média</b>	2.48	17.55	7.08	<b>2.58</b>

Os resultados da Tabela 6 mostram que:

O menor coeficiente de desgaste foi observado para o aço da Série 03 com a eletroerosão, retífica, polimento e nitretação, e o maior valor do coeficiente de desgaste foi do Aço AISIH13 da Série 01 com eletroerosão e nitretado. Esta diferença indica novamente que os processos de retífica e polimento são capazes de interferir na resistência mecânica do aço submetida aos processos de injeção nos moldes. Os efeitos esperados de compensação das tensões diretas de eletroerosão através da nitretação não foram suficientes para minimizar o coeficiente de desgaste do aço AISIH13.

Então os mecanismos de desgaste resultantes de testes são apresentados nas imagens de MEV. A Figura 8 mostra aparência da superfície da ferramenta, após o teste de aço de amostras da Série 01 (Eletroerosão seguido por nitretação diretamente). É possível observar nesta figura a adesão de aço na ferramenta do carboneto. Isto implica, em um aumento do coeficiente de atrito, e implicando também num aumento do coeficiente de desgaste (VELEZ-RESTREPO, 1997). Para comparação, a Figura 9

mostra o carboneto de aparência da superfície da ferramenta, após um ensaio da amostra da Série 3 (Eletroerosão, retífica, polimento e nitretação).

Para o cálculo do coeficiente de desgaste abrasivo utilizou-se de valores de  $q = 0,574$  sendo  $q-1 = -0,426$  adimensional que foi obtido do aço 1080 nos experimentos de Velez- Restrepo, 1997. A escolha dos coeficientes  $q$  e  $q-1$  do aço 1080, também foi em função da resistência a tração como também o seu coeficiente de desgaste abrasivo ficou aproximado ao aço AISIH13.

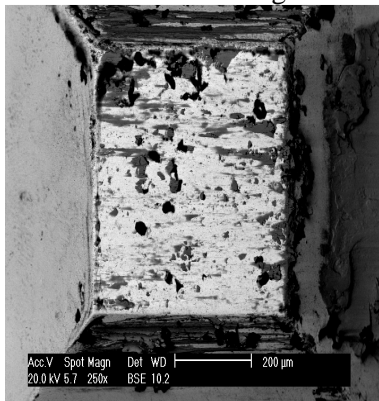


Figura 8 - Aderência de aço na Ferramenta com a amostra da Série 01 maior desgaste MEV

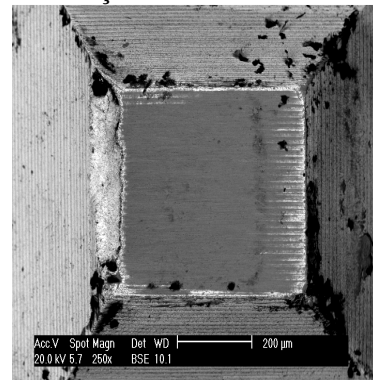


Figura 9 - Pouca aderência do aço na Série 03 nota-se menor coeficiente de desgaste MEV.

Pode-se observar que neste caso a aderência na ferramenta é significativamente reduzida, o que deveria ter conduzido a um coeficiente de atrito inferior e consequentemente, reduzir o coeficiente de desgaste. Por conseguinte, os valores de coeficiente de desgaste calculados e apresentados na Tabela 6 são consistentes com os mecanismos observados em ferramentas de corte. Finalmente, é apresentado um detalhe da ranhura depois destes testes na Figura 10. É visível nesta figura apenas deformação plástica no fundo do risco, sem evidência de microtrincas nesta situação. Observa-se que existem microtrincas nas bordas, um intenso efeito de endurecimento nesta região. A Figura 11 mostra o efeito da retirada de material intenso de AISIH13, devido à passagem de metal duro com média de  $136 \mu\text{m}$  de profundidade na região e as microtrincas nucleadas observadas nessa região a partir da Eletroerosão de penetração atingiu um nível de  $63 \mu\text{m}$ , permanecendo dentro da área de nitretação (substrato).

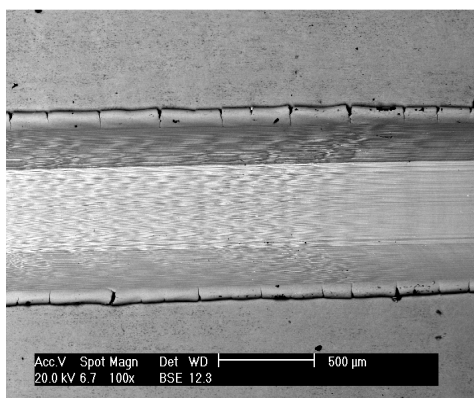


Figura 10 - Detalhes da intensa deformação plástica do risco da ferramenta de carboneto de tungstênio na Série 03 do Aço AISIH13 MEV.

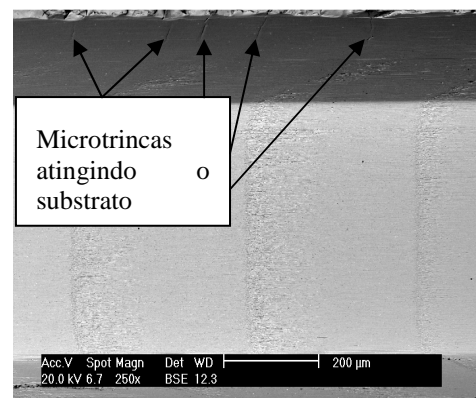


Figura 11- Detalhes da Amostra da Série 01 do Aço AISIH13 com as micro trincas evidentes nas laterais MEV.

#### 4. CONCLUSÕES

O efeito de diferentes processos de fabricação de moldes para injeção de alumínio foi realizada através deste estudo utilizando o Aço AISI H13 como material de referência. Assim, verificou-se que:



Os processos de retífica e o polimento podem alterar a dureza e influenciam significativamente a resistência ao desgaste abrasivo, determinada por testes de esclerometria pêndular.

A diferença de desempenho para a resistência ao risco único pode estar relacionada com o nível de adesão da ferramenta de corte de aço. Quanto maior nível de adesão, menor é o desempenho do material testado.

A análise de imagens com MEV após Eletroerosão encontra evidências de camada branca e microtrincas e que apenas através da melhoria da integridade da superfície (com remoção da camada de branca e microtrincas), retífica e polimento é possível ter uma superfície adequada para receber o endurecimento de nitretação do plasma.

Medições de perfis de micro dureza são observadas, sendo consistente com os resultados obtidos nestas experiências, mas quando submetido a altas pressões de pressão de injeção sobre alumínio cria tipo casca de ovo quebrada, devido à natureza microestrutura pobre após a eletroerosão.

Para moldagem por injeção, de alumínio, reduzindo a resistência ao impacto sobre a superfície pode levar a uma ruptura prematura quando associado com pré-existentes defeitos.

No julgamento do teste só se tornou evidente que a eletroerosão carrega as microtrincas até o substrato que define, segundo a qual, a microestrutura é comprometida e determina uma condição desfavorável para a vida útil de moldes de injeção.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a: UTFPR, IFAM e FAPEAM.

## REFERÊNCIAS

CASTANHO, J.M. VIEIRA, M.T., **Effect of ductile layers in mechanical behavior of TiAlN thin coatings**, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 143, pp. 352–357, 2003

FRANCO JR, A. R., **Obtenção de Revestimentos Duplex por nitretação a Plasma PVD e TiN em aços AISID2 e AISIH13**, Tese de Doutorado, USP, 2003.

FRANCO JR, A.R, PINEDO C., TSCHIPTSCHIN A. P., Influência do Tratamento Prévio de Nitretação sob Plasma no desempenho de Superfícies Dúplex Revestidas com TiN, 2005, 3º Encontro da Cadeia de Ferramentas Moldes e Matrizes, ABM, São Paulo/SP.

LEE, H.T., Tai, T.Y., Relationship between EDM parameters and surface crack formation, Journal of Materials Processing Technology. 2003

LIMA, F., CORRÊA, M., **Efeitos da eletroerosão sobre a superfície de peças usinadas**, Revista da Tecnologia, Vol. 27, n. 1, pp. 26-33, 2006.

OLINIKI, R., Influência da combinação entre os parâmetros de usinagem por eletroerosão na integridade superficial do aço AISIH13 temperado e revenido, no: 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brasil, 2009.

VELEZ, R. J. M., **Estudo da Resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos nodulares austemperados e temperados e revenidos utilizando um Esclerometro Pendular**. Tese de doutorado, USP, 1997.

YOSHIDA, S., A influência dos processos de eletroerosão no rendimento de ferramentas”, Problemas e Soluções. Pesquisa realizada pela Engenharia de Ferramentas Brasimet Com.Ind.S.A., SP. Brasil. 2002