



## Introdução

A utilização de equipamentos de eletro-erosão na produção de ferramentas de conformação para a moldagem de plásticos, fundição de metais, matrizes para forjamento, etc., tem se estabelecido firmemente em anos recentes.

Desenvolvimento de processos tem produzido significante refinamentos na técnica de operações, produtividade e precisão, embora possibilite uma vasta gama de versatilidade de processo.

O corte a fio tem surgido como uma alternativa eficiente e econômica em relação a usinagem convencional utilizado em diversos tipos de ferramentas, como matrizes de estampagem, matrizes de extrusão e para corte de figuras externas como punções.

Tipos especiais de máquinas podem agora ser utilizadas para polir cavidades, produzir sem parar furos cônicos utilizando eletrodos cilíndricos.

A usinagem por eletro erosão continua a crescer, entretanto, nas companhias que fabricam ferramentas a maioria usinam em iguais proporções materiais recozidos ou temperados.

A Uddeholm Tooling fornece toda a gama de aços para ferramentas notadamente com uma estrutura consistente. Este fator ligado com um nível muito baixo de inclusões de enxofre proporcionam uma performance da eletro-erosão bem consistente.

Esta brochura fornece informações sobre:

- **princípios básicos da eletro-erosão**
- **o efeito da eletro-erosão em aços ferramenta**
- **buscando a melhor performance da ferramenta.**

## Princípios básicos da eletro-erosão

A máquina de eletro-erosão (erosão por centelhamento) e um método envolvendo descargas elétricas entre o anodo (grafite ou cobre) e o catodo (aço ferramenta ou outro material que está sendo usinado) em um meio dielétrico. Esta descarga e controlada de tal maneira que a erosão da ferramenta ou peça de trabalho ocorra.

Durante a operação, o anodo (eletrodo) trabalha se mergulhando na peça de trabalho, o qual adquire a mesma forma do anodo em forma contrária. O dielétrico ou líquido limpante que também e assim chamado, fica ionizado durante as operações de descargas. Os íons com carga positiva chocam-se contra o catodo, imediatamente a temperatura da camada externa do aço atinge uma alta temperatura (10-50,000°C) que faz com que o aço no local derreta ou vaporize, formando pequenas gotas de metal fundido que são levadas como "cavacos" dentro do dielétrico. As crateras (e ocasionalmente cavacos que não tem sido separadas completamente) são facilmente reconhecidos nas seções cortadas da superfície . vide fig 1



Fig 1 Uma superfície desbastada via eletro erosão, seção cortada que mostra as crateras e os cavacos. Material ORVAR 2M microgranulado.

Quatro fatores principais devem ser levados em conta quando se consideram os parâmetros durante a operação de eletro erosão no aço ferramenta.:

- A velocidade de remoção
- O acabamento superficial resultante.
- Desgaste do eletrodo
- O efeito no aço ferramenta

A influencia da operação da eletro-erosão nas propriedades superficiais do material usinado, pode em circunstancias desfavoráveis colocar em risco a performance da ferramenta. Nestes casos será necessário subordinar os três primeiros fatores, quando se escolhe os parâmetros da máquina, para otimizar o quarto.

## O efeito do processo de eletro-erosão nos aços para ferramentas

A influencia da erosão por descarga elétrica sobre o material usinado é completamente diferente da do usinado pelo método convencional.

Como verificado, a superfície do aço e sujeitado a uma temperatura muito alta, causando a fundição ou vaporização do aço. O efeito sobre a superfície do aço tem sido estudado pela Uddeholm Tooling para permitir que o fabricante de ferramentas possa gozar dos muitos benefícios do processo de eletro erosão, produzindo uma ferramenta que terá uma vida produtiva satisfatória.

Na maioria dos casos, tem sido impossível traçar qualquer influencia perante todas as funções de trabalho na ferramenta erudida. Porém tem sido observado que nas ferramentas de rebarbar, por ex. tem se tornado mais resistente ao desgaste abrasivo, embora em alguns casos a falha da ferramenta tem ocorrido prematuramente ao se trocar a usinagem convencional pela eletro-erosão. Em outros casos, o fenômeno tem ocorrido durante o atual estagio da máquina de erosão que tenha causado defeitos inesperados na superfície da ferramenta. Isto e devido ao fato da usinagem ter sido realizada d e uma maneira inadequada.

## Tensionamento superficial um importante fator

Todas as transformações que ocorrem na camada superficial devido as enormes temperaturas atingidas foram observadas.

Na camada superficial, observou-se quatro principais fatores todos associados ao "tensionamento superficial" do aço que são afetadas por esta enorme temperatura:

- a microestrutura
- a dureza
- a condição de tensão
- percentual de carbono.

A fig. 2 mostra em corte uma superfície que foi submetida à erosão de desbaste normal, mostra uma mudança estrutural típica.

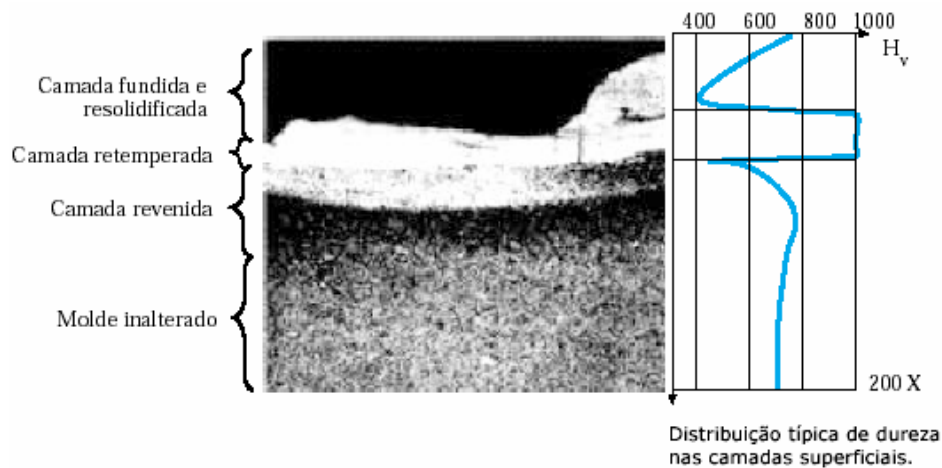


Fig. 2 seção de uma superfície usinada por centelhamento mostra a sua estrutura. Material; RIGOR, temperado para 57 HRC.

### Camada fundida e resolidificada

A **camada fundida e resolidificada** produzida durante o processo de erosão e também referida como “camada branca”, geralmente não se formam ataques nesta área durante a preparação metalográfica. Fig 3, apesar disto, mostra claramente que é uma camada que solidificou rapidamente, quando pilares de cristais longos tem crescido diretamente de fora para dentro da superfície durante a solidificação. A fratura ocorrida nesta camada invariavelmente mostra a direção dos cristais. Numa usinagem de desbaste normal, esta camada tem uma espessura de 15-30 microns.

O percentual de carbono da camada superficial também pode se alterar, por exemplo, pela carbonização do líquido lavante ou pelo eletrodo, mas também podem ocorrer descarbonetações.

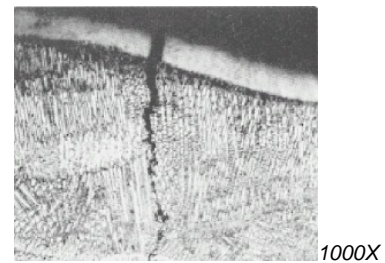


Fig 3 Pilares de cristais formados durante a resolidificação.

### Camada retemperada

Na **camada retemperada**, a temperatura atingiu acima da temperatura de tempera onde se formaram martensitas. Esta martensita é dura e quebradiça.

### Camada revenida

Na **camada revenida** a superfície não foi tão aquecida para atingir a temperatura de tempera e a única coisa que aconteceu foi o revenimento. O efeito naturalmente diminui a dureza em relação ao material base- ver a curva da figura 2.

A fim de estudar a mudança estrutural devido a diversas variáveis das máquinas, diferentes aços - ver tabela 1 - foram “usinagem de desbaste” e “usinagem fina” com eletrodos de grafite.

Material	AISI	Austenitização Tempo 20 min. Temperatura °C	Revenimento Tempo 2 x 30 min. Temperatura °C	Dureza	
				Temperado HRC	Recozido HB
ARNE	O1	810	220	60	190
CALMAX	-	960	200	58	200
RIGOR	A2	940	220	60	-
SVERKER 21	D2	1020	250	60	220
GRANE	(L6)	840	250	54	-
IMPAX SUPREME	P20	850	580	30	-
ORVAR SUPREME	H13	1025	560	50	180

Tabela 1. Os aços para ferramentas foram testados na condição de temperados e revenidos, e alguns deles na condição de recozidos.

**Nota:** como CORRAX e um aço que endurece por precipitação a camada superficial tem diferentes características. A “camada branca” consiste de material fundido e resolidificado com a dureza de aprox. 34HRC. Não terá outra importante zona afetada.

**Medindo os efeitos**

A **espessura** da zona afetada tem sido medido. A **dureza** desta zona também tem sido medida, como tem **freqüência de trincas** e **profundidade das trincas**. **Valores de tensões** tem sido obtidos durante os testes de dobramento.

A **espessura da camada** aparece bem independente de ambos qualidade de aço e do material do eletrodo. Por outro lado, existe uma diferença definida entre os corpos de prova que foram temperadas daquelas na forma de recozidos. Fig 4 mostra na forma de gráfico, a espessura da camada e as quantidades de fissuras com diferentes durações do pulso no ORVAR SUPREME. Na condição de material recozido, a zona e fina e com poucas fissuras. A camada dura e quebradiça quase não parece. (fig 4b).

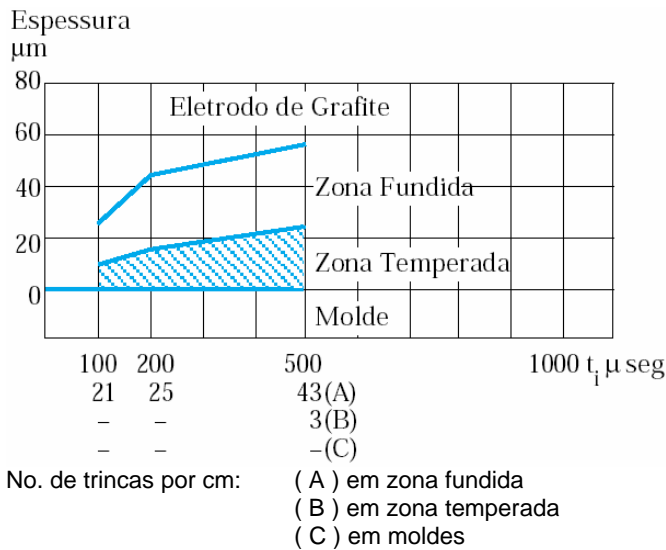


fig 4ª. espessura da camada e freqüência de fissuras na camada superficial de uma superfície usinada por eletro erosão do ORVAR SUPREME temperado (52HRC) com diferentes durações do pulso.

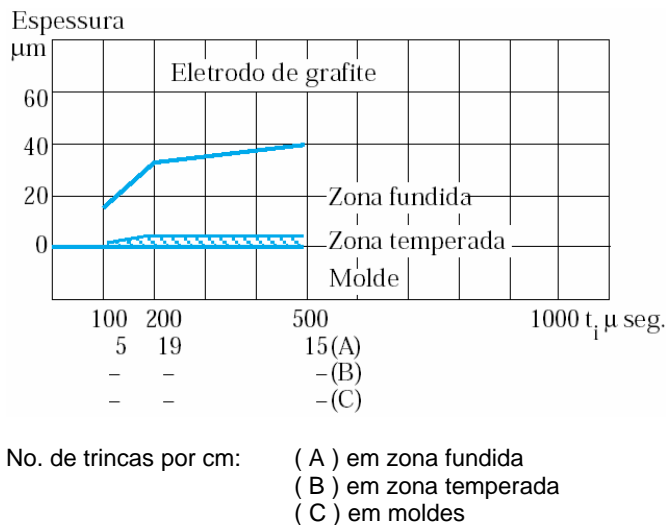


Fig 4b como acima, ORVAR SUPREME mas erosionado na condição de recozido.

A espessura da camada superficial pode variar consideravelmente, de 0 microns para o Maximo valor um pouco abaixo da rugosidade máxima especificada na direção da usinagem. Na estagio da usinagem de desbaste (t<sub>1</sub>>100 microsec.), a espessura da camada varia mais substancialmente do que no estagio de usinagem fina. A espessura de ambas camadas fundidas e zonas temperadas aumentam com a duração da descarga, que aparece como a mais importante e singular variável para controle. A figura abaixo mostra o efeito benéfico da "usinagem fina" isto e, que produz uma zona refundida e afetada pelo calor muito fina.

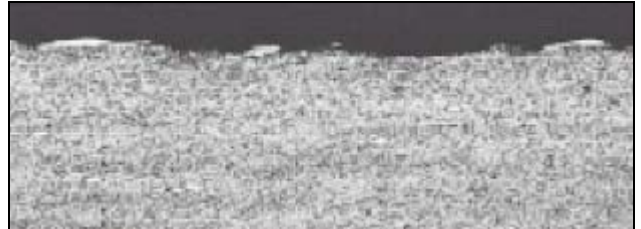


Fig 5 RIGOR com usinagem fina. Duração do pulso 10 microseg.

**Estruturas das camadas usinadas por descarga elétrica**

Com uma longa duração do pulso, o calor e conduzido mais profundamente para dentro do material. Altas intensidades das correntes e densidades (e portanto energia da descarga) fazem, levam a dar uma alta "quantidade de calor" na superfície, mas o tempo que se leva para o calor se difundir, apesar disto, parece que tem grande importância.. a fotos abaixo mostram como a superfície são modificadas no SVERKER 21 mediante diferentes durações de pulsos e materiais dos eletrodos.

Material: SVERKER 21 na condição de temperado e revenido.

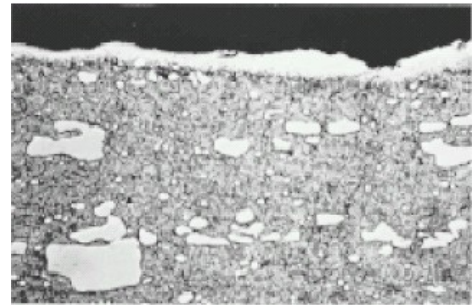


Fig 6a. Eletrodo de Cobre

t<sub>i</sub> = 10 µs. Aumento 500X

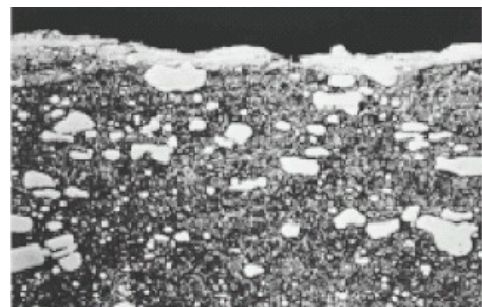


Fig 6b. Eletrodo de Grafite

t<sub>i</sub> = 10 µs. Aumento 500X



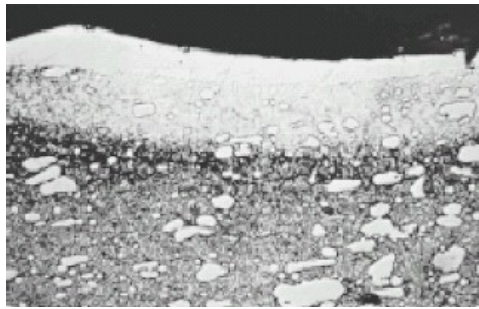


Fig 6c. Eletrodo de Grafite

$t_i = 100 \mu s$ . Aumento 500X

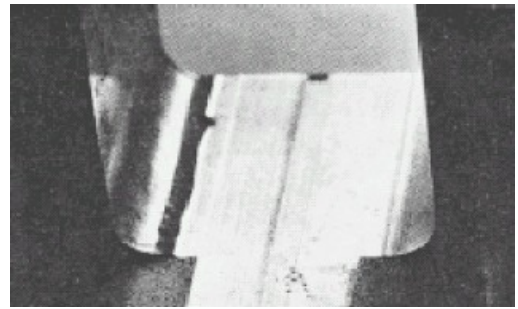


Fig7. Os "poros" suspeitos podem ser vistos na superfície da ferramenta.

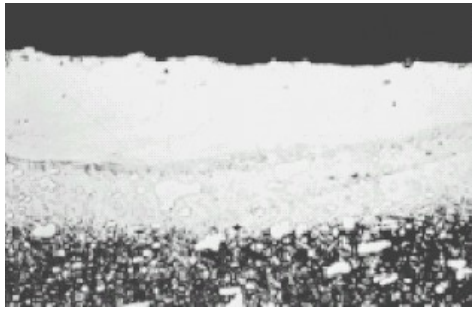


Fig 6d. Eletrodo de Cobre

$t_i = 200 \mu s$ . Aumento 500X

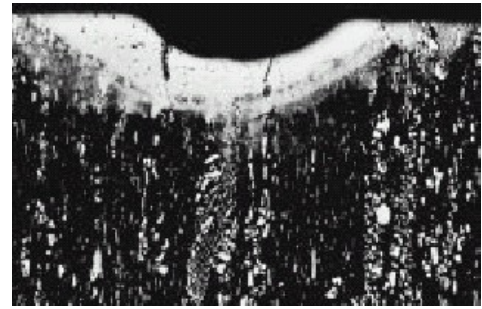


Fig8. Um corte da seção de um suposto "poro"



Fig 6d. Eletrodo de Grafite

$t_i = 500 \mu s$ . Aumento 500X

### A causa do "centelhamento"

Paradas curtas, ou tempos de pausas curtas, causam mais centelhamentos por unidade de tempo e inclusive mais remoção.

**Durante as paradas, o fluido dielétrico precisa ter tempo para se tornar dês ionizado.** Um tempo de parada muito breve pode resultar em duplo centelhamento o que leva a constante queima por arco entre o eletrodo e a peça de trabalho, resultando num serio defeito superficial. O risco do arco e aumentado se dificulta a condição do liquido limpante. Como resultado do arco, isto e a condição em que se formam arcos entre o eletrodo e o material trabalhado, são formadas na superfície grandes crateras ou "queimadas". Eles têm sido freqüentemente confundidos com inclusões de escória ou porosidade do material. Fig 7 e 8 mostra mostra uma seção da superfície da ferramenta com uma das suspeitas "porosidades".

Uma das primarias causas deste tipo de defeito e a limpeza inadequada, ou usinagem em furos profundos, etc., resultando em cavacos e outras partículas perdidas que formam uma ponte entre o eletrodo e a peça de trabalho. O mesmo efeito pode ser obtido com um eletrodo de grafite que carrega traços de outros materiais. Em máquinas de fabricações modernas a chamada **controle de corrente adaptativa**, elimina o risco do arco.

### A freqüência das fissuras também aumenta com a duração do pulso

Em tempos acima de 100 microssegundos, todos os aços apresentam trincas severas na camada refundida. Aços com alto carbono e/ou aços temperáveis ao ar mostram altas freqüências de fissuras. Corpos de prova recozidos não apresentam trincas na matriz (estrutura).

A quantidade de trincas que continuam adentrando na zona temperada e de aproximadamente 20%, embora somente uma pequena quantidade de trincas penetra na matriz (estrutura). Na matriz, a profundidade e um pouco maior do que algumas dezenas de microns. Aqui também, aplica-se que as trincas na matriz são encontradas principalmente em aços de alta liga para trabalho a frio.

A tabela seguinte mostra um rateio da quantidade de fissuras nos aços testados.

	Zona fundida	Zona Temperada	Molde
Alta liga			
Aço para trabalho a frio tipo <b>SVERKER</b>	20 – 50	2 – 10	0 – 5
Aço para trabalho a quente tipo <b>ORVAR</b>	10 – 40	2 – 5	0 – 2
Aços para trabalho a frio <b>RIGOR</b> <b>ARNE</b>	10 – 30	0 – 5	0 – 2
Aços para moldes plásticos <b>IMPAX SUPREME</b>	0 – 5	0 – 2	0

A diferença na quantidade da **proporção de remoção** e de no Maximo 15% entre as diferentes qualidades de aços na mesma condição de usinagem.

As **durezas** das diferentes camadas também podem variar consideravelmente, mas a princípio ocorrem superfícies de ataque parecidas em todas as ligas. Fig. 9 mostra uma distribuição de dureza típica. A diferença na dureza e volume entre as camadas aumentam as tensões que, medidos, tem sido encontrados nas mesmas profundidades como as das superfícies afetadas.

Estas tensões podem ser substancialmente reduzidas por uma operação de tratamento térmico.

Re-revenindo (235°C, 30 min.) o corpo de prova da figura abaixo resultou na diminuição da dureza conforme a curva tracejada.

Eletrodo de Grafite  
 $t_i = 200 \mu \text{ seg.}$

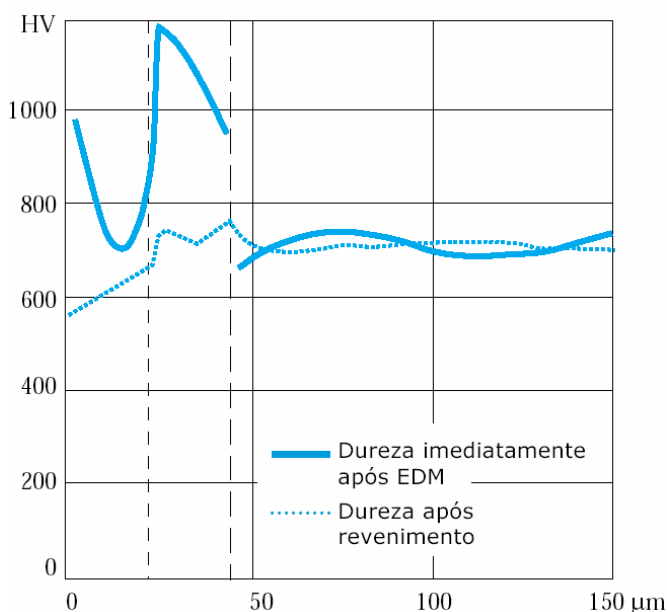


Fig 9. Típica distribuição de dureza no SVERKER 21 imediatamente após a eletro-erosão e depois após o revenimento.

Se a eletro erosão for perfeitamente executada com um estagio final de usinagem fina, os defeitos superficiais são amplamente eliminados. Se isto não for possível por qualquer razão, ou se for necessário para eliminar todos os defeitos, algumas operações diferentes podem ser utilizadas.:

- **revenimento para alívio de tensões** com a temperatura de revenimento cerca de 15 graus abaixo da temperatura de revenimento previamente utilizado, diminuirá a dureza superficial sem influenciar a dureza da matriz.
- **Retificação ou polimento** removerá ambas as estruturas superficiais e trincas, dependendo de qual profundo serão realizados (aprox. 5-10 microns em usinagem fina).

### Teste de dobramento

Para avaliar o efeito da camada refundida, irregularidades superficiais e trincas produzidas no processo de eletro erosão na resistência da ferramenta, foram realizadas testes de dobramento. Varias combinações das superfícies erosionadas e tratamentos posteriores ex. alívio de tensões/polimento, foram testadas sobre corpos de prova de 5mm quadrados de RIGOR com 57 HRC. Os corpos de prova foram erosionadas numa das faces em diferentes situações de erosão e dobrados severamente, com a superfície erosionada para o lado de fora da dobra.

A fig 10 mostra que o corpo de prova com o **acabamento de usinagem fina e que foi posteriormente polido teve o melhor resultado**. O corpo de prova com a usinagem de desbaste, sem nenhum tratamento posterior, teve o menor resultado no teste de dobramento.

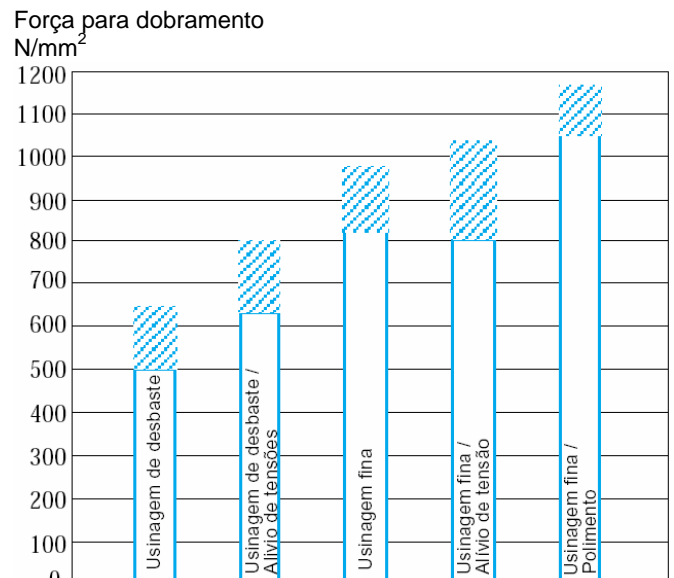


Fig10. Força para dobramento perante diferentes tipos de acabamento de eletro-erosão e operações subseqüentes. Material RIGOR 57 HRC. As áreas sombreadas mostram os picos de dispersão do resultado.

### Histórico do resultado do teste de dobramento

As camadas duras, resolidificadas retemperadas causam, no primeiro momento, estas trincas que são formadas sem a aplicação da carga e na segunda instancia estando presentes agem como iniciadores de falhas na matriz. A 57 HRC, a matriz e tenaz o suficiente para parar a trinca antes do crescimento e consequentemente a falha ocorre após a deformação plástica iniciar na curva da carga. Normalmente, deve ter uma certa quantidade de deformação plástica no corpo de prova deste material.

## A busca da melhor performance da ferramenta

### Eletro-erosão utilizando eletrodos sólidos (cobre/grafite)

Como verificado, na maioria dos casos quando o processo de eletro erosão tem sido cuidadosamente realizado não se observaram efeitos adversos na performance da ferramenta. Como medida de precaução, porém, recomendamos as seguintes precauções.:

#### Eletro erosão em material temperado e revenido

- A usinagem com maquina convencional
- B temperar e revenir
- C Iniciar a erosão, evitar a formação do arco e remoção excessiva de material. Terminar com a regulagem em usinagem fina isto e baixa corrente e alta freqüência.
- D (i) retificar ou polir a superfície erosionada
- Ou D(ii) revenir a ferramenta a 15 graus menor do que a temperatura de revenimento original
- Ou D(iii) escolha uma dureza de partida baixa para a

ferramenta e melhore a tenacidade total.

**Eletro-erosão no material recozido**

A usinagem com maquina convencional  
B iniciar a erosão conforme C acima  
C retificar ou polir a superfície erosionada. Isto reduz a formação da trinca durante o aquecimento e resfriamento. Aqueça lentamente, em estágios ate a temperatura de tempera recomendada.

**Nota:**

- Quando se erosiona o CORRAX na condição solubilizada, nada ocorre.
- Quando a erosão e efetuada após envelhecimento pode reduzir a tenacidade.
- E recomendado remover a camada branca pelo polimento, retificação ou lixamento.

**Corte a fio (erosão a fio)**

As observações feitas sobre as superfícies erosionadas nas paginas anteriores são na maioria também aplicáveis no processo de corte a fio. Porem a superfície afetada, e relativamente fina (<10microns) e pode ser comparada mais para a usinagem fina da eletro-erosão. Normalmente não existem trincas observáveis após o corte a fio. Mas em certos casos outros problemas têm sido constatados.

Após tratamento térmico de um aço para tempera total à parte que contem uma alta tensão (quanto maior as temperaturas de revenimento menor serão as tensões). Estas tensões tomam a forma das tensões de tração na área superficial e de tensões de compressão no centro e estão em oposição um contra o outro. Durante o processo de corte a fio uma quantidade maior ou menor são removidas da parte temperada. Quando e removido um grande volume, isto pode algumas vezes conduzir a distorção ou eventualmente a trincar a parte. A razão e porque o balanço da tensão dentro da parte e distribuída e tenta chegar ao equilíbrio de novo. O problema da formação da trinca usualmente e encontrado somente em seções relativamente grossas por ex. acima de 50mm de espessura. Com esta seção tão pesada, a correta tempera e o duplo revenimento é importantes.

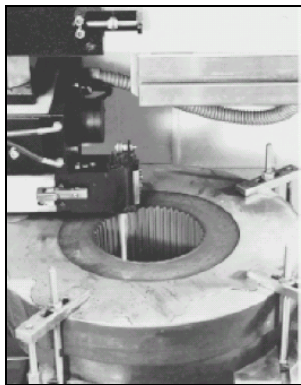


Fig11. Corte a fio de um aço ferramenta para estampagem.



Fig12. Este bloco de aço D2 de aprox. 50 x 50 x 50 mm trincou durante o corte a fio.

Em certos casos o risco pode ser reduzido através de diferentes precauções.

1: Diminua em parte toda o nível de tensões revenindo a altas temperaturas. Isto implica em utilizar qualidades de aços com altas temperaturas de revenimento.

2: Abrindo diversos furos na área que será removida conectando-os com o corte a serra, antes de temperar e revenir. Quaisquer tensões serão aliviadas pelas área furadas e cortadas, reduzindo ou eliminando o risco da distorção ou trinca durante o corte a fio. Fig13 ilustra como este pré-corte pode ser realizado.

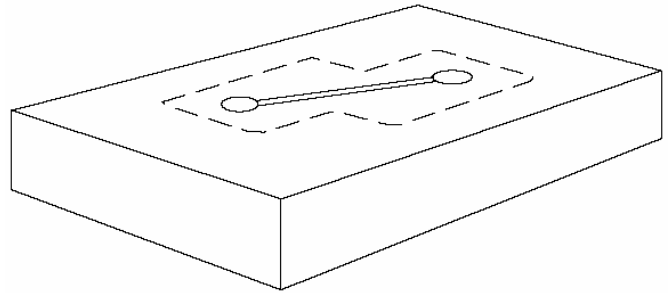


Fig13. Furos pré-usinados conectados pelo corte a serra, antes de temperar e revenir, ajudarão a prevenir distorções ou trincas quando se corta a fio seções grossas.

**Corte a fio de punções de corte**

Quando se fabrica punções de corte pelo corte a fio, recomenda-se (como na usinagem convencional) cortar na direção das fibras do aço para ferramentas na direção da ação do corte. Isto não e tão importante quando se utiliza aços fabricados pela metalurgia do pó devido a não exigência de direção de fibras.

**Polindo utilizando-se a eletro-erosão**

Atualmente alguns fabricantes de equipamentos para eletro erosão oferecem, através de uma técnica especial, a possibilidade de erodir uma superfície com um acabamento muito fino. E possível atingir acabamentos superficiais da ordem de 0,2 a 0,3 microns. Este acabamento e suficiente para a maioria das aplicações. A grande vantagem e quando são envolvidas cavidades complicadas. Tais cavidades que são complicadas, consomem tempo e com um alto custo de polimento manual, mas pode convenientemente ser realizado pela maquina de eletro erosão durante a noite, por exemplo.

Análises realizadas nas nossas qualidades IMPAX SUPREME, ORVAR SUPREME, STAVAX ESR e RIGOR mostram que a camada branca e refundida dura produzida e muito fina e iguais nestas qualidades. As espessuras são aproximadamente 2-4 microns. Desde que não existem sinais de nenhuma camada afetada pelo calor, a influencia da eletro-erosão nas propriedade mecânica e negligenciável..



Fig 14. Este inserto em Stavax ESR foi acabado através de EDM "polimento".

## RESUMO

Resumindo pode se dizer que a eletro erosão executada de acordo com a instrução do fabricante, utilizando-se a usinagem de desbaste e a usinagem fina, elimina-se os defeitos superficiais ocorridos durante a usinagem de desbaste. Naturalmente certos efeitos estruturais permanecerão sempre., mas na vasta maioria dos casos eles são insignificantes, como obtidas pelos processos de usinagens normais. Efeitos estruturais, adicionalmente, não necessariamente precisam ser consideradas inteiramente negativas. Em certos casos de estruturas, por ex. camada retemperada, tem devido a sua alta dureza melhorado a resistência da ferramenta ao desgaste abrasivo. Em outros casos as superfícies com crateras é viável para reter lubrificantes do que uma superfície convencional, resultando em uma vida longa de serviços. Porém, Se dificuldades na conexão da performance de trabalho com a usinagem por erosão surgir, existem algumas soluções extra relativamente simples que podem ser empregadas, como indicadas abaixo.

Uma leve aparência descascada tem sido relatado em materiais ricos em carbonetos, como aços de alto carbono para trabalho a frio e aços rápidos. Nas quais existem certas quantidades de segregação de carbonetos ou em materiais com alto percentual de enxofre.

A diferença no teste de dobramento entre os corpos de provas com acabamento de erosão de desbaste e erosão fina e amplamente devido a distribuição de trincas e devido a presença de pontos distribuídos na camada branca da amostra com erosão fina. A superfície de acabamento grosseiro do corpo de prova com a erosão de desbaste não tem sido realmente significativa. Desconsiderando as circunstâncias estas irregularidades são relativamente ruins como iniciador de trincas comparado com trincas solidificadas. Quando o polimento da superfície do corpo de prova com a erosão fina é realizado a espessura da camada refundida e retemperada é superficialmente reduzida e não é completamente eliminada.

Polimentos posteriores e totais podem provavelmente resultar na completa restauração da resistência ao dobramento.

Partes altamente tencionado das ferramentas e ferramentas por ex. seções muito finas são mais sensíveis ao dobramento e devem ter um acabamento extra fino.

Quanto menor a dureza da matriz menos sensível será o material e terá efeitos adversos na resistência como resultado da eletro-erosão. Durezas menores em ferramentas poderão ser uma alternativa.

Traduzido do original "EDM OF TOOL STEEL"  
Editado pela Uddeholm Tooling – Suécia 02.95,

Traduzido por Eng. Hirohide Kamada  
Aços Bohler-Uddeholm do Brasil Ltda – Div. Uddeholm  
Tel.: (11) 4393 4560 / Fax.: (11) 4393 4561

*As informações são baseadas no conhecimento atual e tem como objetivo fornecer dados dos produtos e suas aplicações. No entanto, não é uma garantia de uma propriedade específica de um produto descrito ou a garantia para uma aplicação particular.*

**Edição Revisada – Abril de 2005**