

# **A INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS DE ELETRO EROÇÃO NO RENDIMENTO DE FERRAMENTAS – PROBLEMAS E SOLUÇÕES**

**Eng. SHUN YOSHIDA  
Engenharia de Ferramentas  
BRASIMET COM.IND.S.A.**

**Agosto/2002**

## **Introdução**

O processo de Eletro Erosão, seja a Fio seja de Penetração, é largamente utilizado na indústria fabricante de ferramentas, principalmente por permitir usinagem após o processo de tempera, o que, em outros processos convencionais de usinagem, não é comumente possível.

Apesar das inegáveis vantagens deste processo, pelas suas características, ele introduz defeitos na superfície de ferramentas, que, se não forem reduzidas ou mesmo eliminadas, contribuirão para a sua falha prematura.

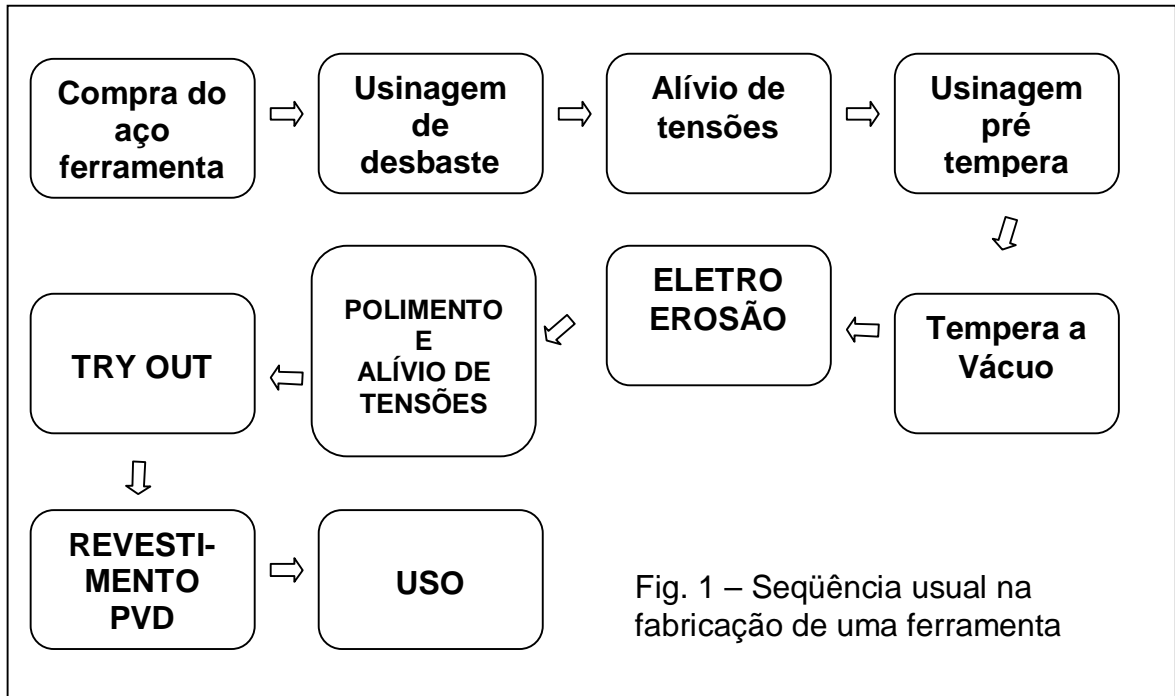
A compreensão dos fenômenos que regem o processo de Eletro Erosão é passo importante na prevenção destes problemas, e na procura pelas suas soluções.

## **CORRELAÇÃO DO PROCESSO DE ELETRO EROSÃO COM A TEMPERA DE FERRAMENTAS E PROCESSOS DE REVESTIMENTOS PVD**

De um modo geral, ambos os processos são conduzidos após a Tempera da ferramenta, portanto já encontram o aço ferramenta no estado endurecido.

Nos casos em que é aplicado o processo PVD, em geral com o objetivo de aumentar a resistência a desgaste, os processos são anteriores, e influenciam no rendimento das camadas aplicadas.

A figura a seguir ilustra uma seqüência usual de fabricação de ferramenta de estamparia.



## ELETRO EROSÃO

### Definição

O processo de Eletro Erosão é um método de usinagem (aqui entendido como remoção de material metálico de superfícies) que envolve descargas elétricas entre um ânodo (feito de cobre ou grafite) e um catodo (correspondendo à peça usinada), imersos num dielétrico.

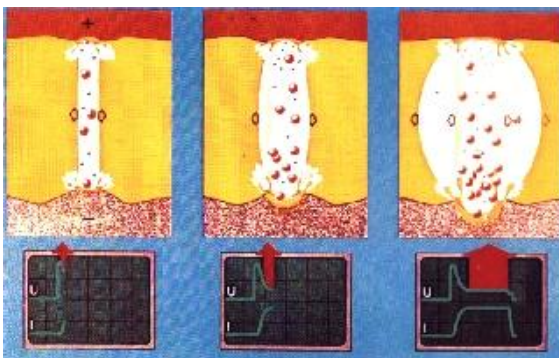


Fig. 2: esquemático do mecanismo de eletro erosão.

Sob tensão, ocorre descarga elétrica (“abre-se um arco”). Partículas eletricamente carregadas são arremessadas sobre a superfície da peça, ocorrendo a remoção do material.

(BOEHLER)

Como pode ser visto na figura, há três elementos participantes do processo: o anodo, correspondendo ao eletrodo, o catodo, correspondendo à peça e o dielétrico.

Este último tem a função de atuar como elemento que transmite as partículas eletricamente carregadas de um lado a outro. Além disso, age como fluido refrigerante, removendo calor.

O dielétrico também é importante no sentido de servir como meio para remoção de “gotas”, partículas que foram removidas do material.

Há dois processos básicos: ELETRO EROSÃO POR PENETRAÇÃO E A FIO.

No processo por penetração, um eletrodo usinado na geometria da superfície desejada desloca-se de encontro à superfície da peça, erodindo sua superfície e transferindo seu formato superficial para a peça, formando o contorno desejado.



Fig. 3 – exemplo de peça usinada por Eletro Erosão de Penetração.

(fonte: [www.mmsonline.com](http://www.mmsonline.com))

No processo a fio, utilizado principalmente para corte, um arame, ou uma lâmina (em geral feitos de ligas de cobre) “cortam” o material no formato desejado.



Fig. 4: exemplo de peças fabricadas por Eletro Erosão a Fio (fonte: [www.advanced-edm.com](http://www.advanced-edm.com))

Ambos os processos introduzem “defeitos” na superfície, que, de alguma forma vão influenciar na vida útil do ferramental se forem ignorados.

## FORMAÇÃO DE CAMADAS NA SUPERFÍCIE – DEFEITOS

As temperaturas na superfície da peça podem atingir valores entre 10 e 50.000 oC.

Lembrando que a temperatura de fusão dos aços gira em torno de 1560 oC e as temperaturas usualmente utilizadas na tempera dos aços situam-se abaixo dos 1200 oC, conclui-se que na superfície do aço em questão a temperatura reinante chega a vaporizar o metal.

Nessas condições, temos a formação de uma “camada” na superfície, que, numa analogia com o processo de soldagem, porém em escala microscópica, bem poderia ser chamada de “ZONA AFETADA PELO CALOR DA ELETRO EROSÃO”.

A figura a seguir ilustra o fenômeno.

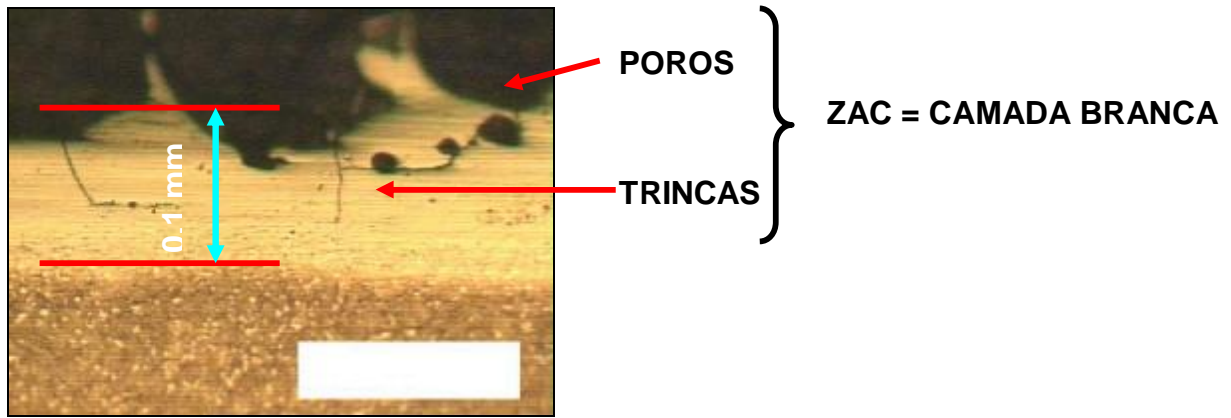


Fig. 5: ZONA AFETADA PELO CALOR DE ELETRO EROSÃO (ZAC).  
 Aço: AISI D6..  
 Estado temperado: 60/62 HRC..500x..(BRASIMET)

### ANÁLISE DA “ZAC” DE ELETRO EROSÃO

A ZAC é conhecida como “CAMADA BRANCA” e como tal será tratada neste texto.

Como pode ser observado na fig. 5, a Camada Branca além de, por si só ser um defeito, carrega consigo outros, como POROS e TRINCAS.

A figura 6 mostra a vista em corte da Camada Branca.

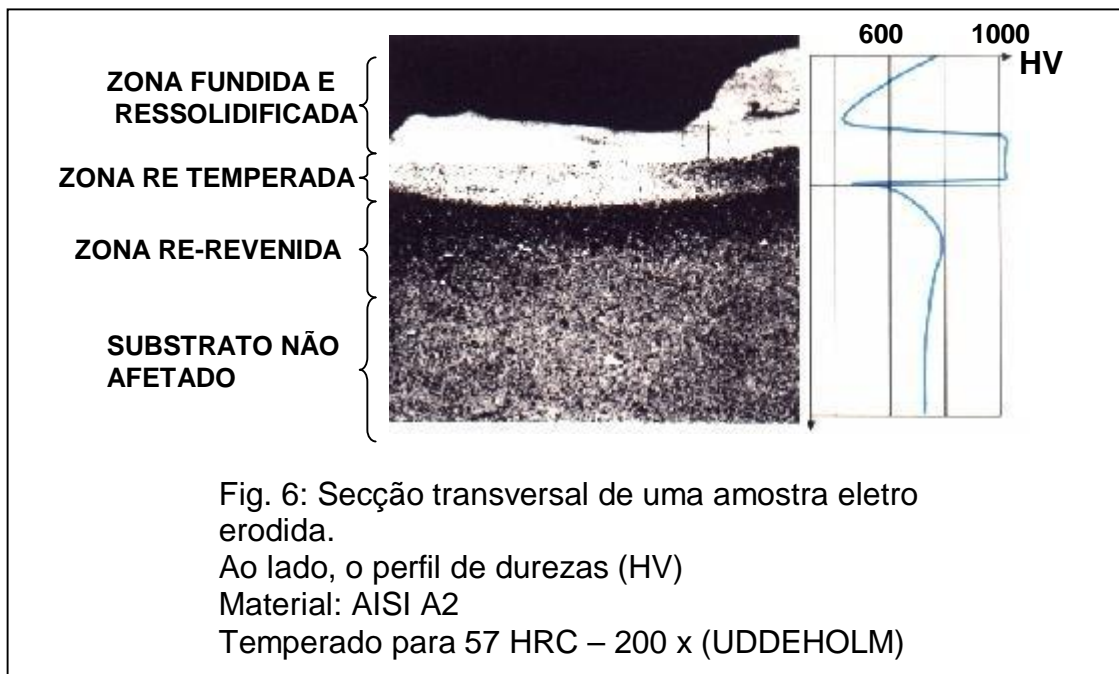


Fig. 6: Secção transversal de uma amostra eletro erodida.  
 Ao lado, o perfil de durezas (HV)  
 Material: AISI A2  
 Temperado para 57 HRC – 200 x (UDDEHOLM)

Observe que a Camada Branca, na realidade é constituída de três camadas justapostas designadas como segue, da superfície para o núcleo:

1. Zona Fundida e Ressolidificada: correspondendo à camada mais superficial, esta região é a que sofreu as mais altas temperaturas. O aço foi fundido, e ressolidificou-se por ação da extração de calor dada pelo dielétrico. Microestruturalmente, esta camada é BRUTA DE FUNDIÇÃO;
2. Zona Re Temperada: correspondendo à região que atingiu temperaturas superiores às de austenitização, temperando no subsequente resfriamento dado pelo dielétrico. Microestruturalmente, esta região é constituída de MARTENSITA GROSSEIRA, devido, principalmente às temperaturas mais elevadas que as utilizadas em Tratamento Térmico normal;
3. Zona Re Revenida: correspondendo às regiões mais internas da superfície, onde a temperatura superou a utilizada no revenimento normal. Microestruturalmente, esta região é constituída de MARTENSITA REVENIDA GROSSEIRA.

O perfil de durezas ao lado da figura evidencia claramente a natureza destas sub-camadas.

Evidentemente, esta camada é extremamente pobre em propriedades mecânicas, em contraste com o núcleo, temperado e revenido de forma correta.

A existência desta camada, por si só, já seria suficiente para explicar muitos dos problemas que ocorrem no uso de ferramentas que passaram por eletro erosão, mas além de possuir propriedades mecânicas inferiores às do substrato, ela também apresenta-se com trincas e porosidades (fig.5), que contribui para tornar ainda mais frágil a superfície da ferramenta.

A figura 7 a seguir, ilustra uma trinca pré existente na Camada Branca. Nestas condições, é provável que a ferramenta sofra fratura em uso rapidamente.

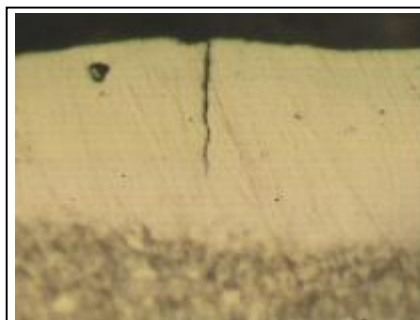


Fig. 7: Trinca pré existente na camada branca de eletro erosão.  
Material: BOEHLER K340  
Temperado p/: 60 HRC  
(BOEHLER)

### **ESPESSURA DA CAMADA E TRINCAS**

A espessura da camada branca e a freqüência de trincas é largamente dependente dos seguintes fatores:

1. Tipo de aço;
2. Estado do aço;
3. Taxa de remoção de material ( $t_i$ ).

## 1. TIPO DO AÇO

Aparentemente, o tipo de aço não tem grande influência na espessura da camada branca, mas sim na formação e propagação de trincas. A tabela 1 a seguir, ilustra as diferenças entre vários tipos de aço

	CAMADA BRANCA		
TIPO DO AÇO	ZONA FUNDIDA	ZONA RETEMPERADA	MATRIZ
AISI D2	20 - 50	2 - 10	0 - 5
AISI H13	10 - 40	2 - 5	0 - 2
AISI A2	10 - 30	0 - 5	0 - 2
AISI P20	0 - 5	0 - 2	0

Tab. 1: Frequência de trincas nas diversas regiões da camada branca, para diversos tipos de aço, sempre no estado temperado e revenido.

Observa-se que, para todos os tipos de aços, a maior frequência de trincas ocorre na Zona Fundida, onde tensões de solidificação estão presentes.

Os aços que apresentam, naturalmente menor tenacidade são os que tem maior frequência de trincas, fato coerente com os mecanismos de nucleação de fraturas. Aços de maior tenacidade a fratura tem menor propensão à formação de trincas.

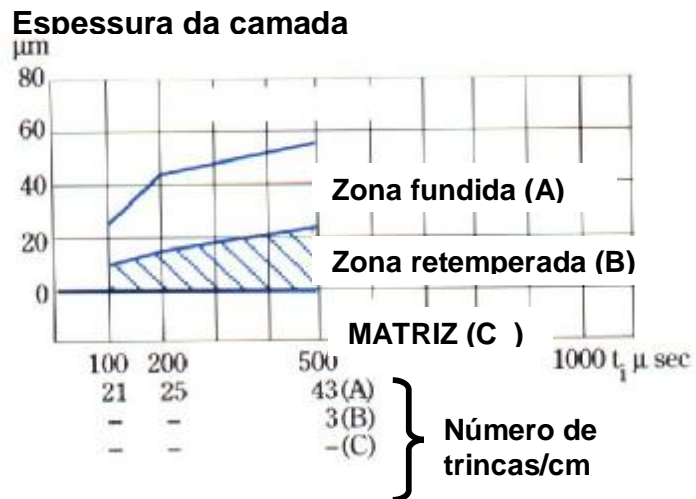
## 2. ESTADO DO AÇO

Pelo mesmo motivo acima, o mesmo aço, no estado recozido, deverá apresentar menor tendência a trincas do que no estado temperado, simplesmente porque tem, nesse estado, maior tenacidade.

A figuras 8a e 8b ilustram graficamente o fato.

Fig. 8a: espessura de camada branca e frequência de trincas em função da taxa de remoção.

Aço AISI H13  
Temperado e revenido para 52 HRC.  
(UDDEHOLM)



**Fig. 8b Data Table:**

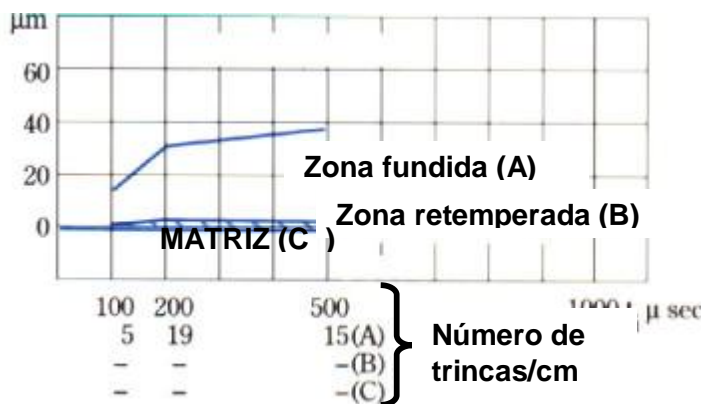


Fig. 8b: espessura de camada branca e frequência de trincas em função da taxa de remoção.

Aço AISI H13  
Recozido  
(UDDEHOLM)

Comparando os ensaios, para um valor de TAXA DE REMOÇÃO de 500 µsegundos, temos 43 trincas/cm na zona fundida no estado temperado, contra apenas 15/cm no estado recozido.

Nota-se também um redução sensível na espessura da camada, mostrando que, em termos de Camada Branca, o estado recozido é o ideal para trabalho.

Entretanto, o processo de Eletro Erosão é largamente utilizado, justamente por permitir usinagem no estado pós tempera, situação em que, para a maioria dos processos de usinagem convencionais não é possível.

Assim, não há grande sentido em visar menores problemas de camada branca usando o aço no estado recozido, pois, neste estado, há muitos outros processos mais baratos e rápidos do que a Eletro Erosão.

No sentido de preservar as vantagens do processo de Eletro Erosão, a melhor forma é prevenir o seu surgimento, ou, pelo menos, o seu crescimento, pelo controle efetivo da TAXA DE REMOÇÃO ( $t_i$ ) como veremos a seguir.

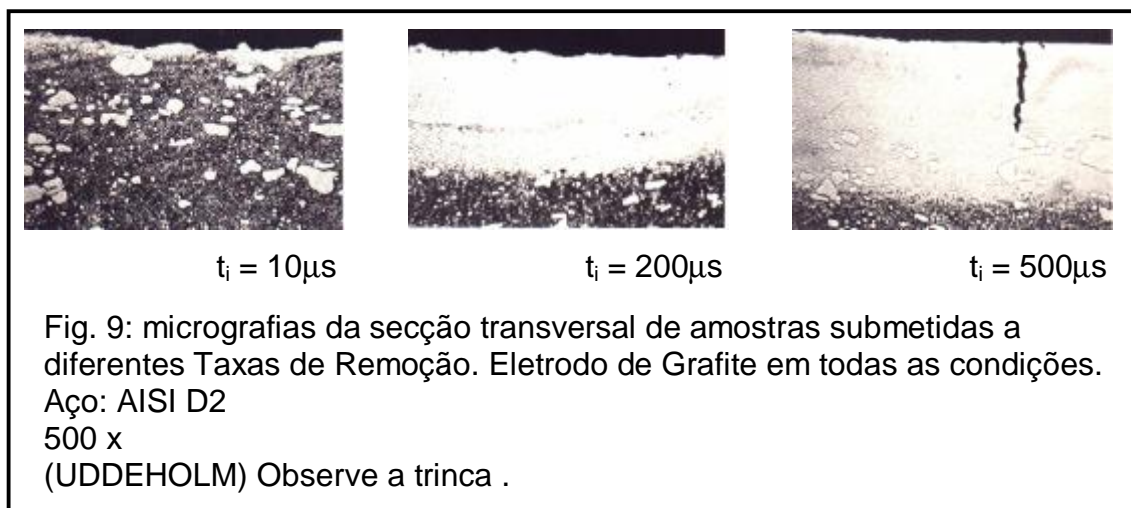
### 3. TAXA DE REMOÇÃO ( $t_i$ )

A TAXA DE REMOÇÃO está relacionada diretamente com a amperagem e a frequência elétrica impostas no processo. De modo geral, quanto maior a taxa de remoção, maior a amperagem utilizada para criar o arco, e, conseqüentemente, maior e mais profundo o calor gerado no processo.

Dessa forma, o ideal é utilizar-se das menores taxas de remoção possíveis (taxa de acabamento) ao invés de taxas elevadas (desbaste). Entretanto, é evidente que o processo ficará mais demorado, e portanto mais oneroso do ponto de vista econômico, cabendo ao projetista uma combinação ideal, que permita a menor Camada Branca, pelo menor custo de processamento.

As figuras 8 a e 8b observadas individualmente, ilustram o efeito da Taxa de Remoção sobre a espessura da camada branca. Observe-se, p.ex., a comparação de valores da ordem de 100  $\mu$ s contra 500  $\mu$ s, para um aço no estado temperado: a camada branca cresce de 20 para 60  $\mu$ m e o número de trincas na zona fundida, de 21 para 43 trincas/cm.

As micrografias abaixo ilustram o efeito comparativo de três valores de Taxas de Remoção, mantidas as demais condições.



De um modo geral, taxas de remoção menores do que 100  $\mu$ segundos podem ser considerados taxas de Acabamento, gerando camadas brancas da ordem de 7 a 13  $\mu$ m, valor considerado normal, com pequena geração de trincas, e perfeitamente passível de correção posterior (vide capítulo a seguir).

Valores maiores que 100  $\mu$ s são recomendáveis somente no desbaste, preferencialmente com o aço ferramenta no estado recozido.

Conclui-se portanto que, dos três fatores que mais influenciam a espessura da camada branca e o surgimento de trincas, o controle da Taxa de Remoção é o mais efetivo, sendo significativo que qualquer esforço no sentido de reduzir a Taxa deva ser considerado, para o máximo rendimento da ferramenta.

## **ELETRO EROSÃO A FIO**

Toda a discussão anterior tratando da Camada Branca é de suma importância para o processo de PENETRAÇÃO.

No processo A Fio, o problema existe, mas não tem a mesma influência, devido as potencias relativamente mais baixas, e por atingir superfícies de área comparativamente menor. Raramente a camada branca ultrapassa a marca de 10  $\mu\text{m}$  e a ocorrência de trincas não é normal.

Entretanto, é recomendável o mesmo cuidado e atenção, particularmente na questão do TIPO DO AÇO que passará pelo processo.

Um outro cuidado interessante e altamente recomendável para este processo é uma especial atenção na questão de simetria de usinagem. No caso de retirada de punções de blocos temperados, muito comuns principalmente na fabricação de ferramentas para estamparia, um cuidado especial na ordem de retirada dos punções, ajudará, em muito na prevenção de trincas no bloco.

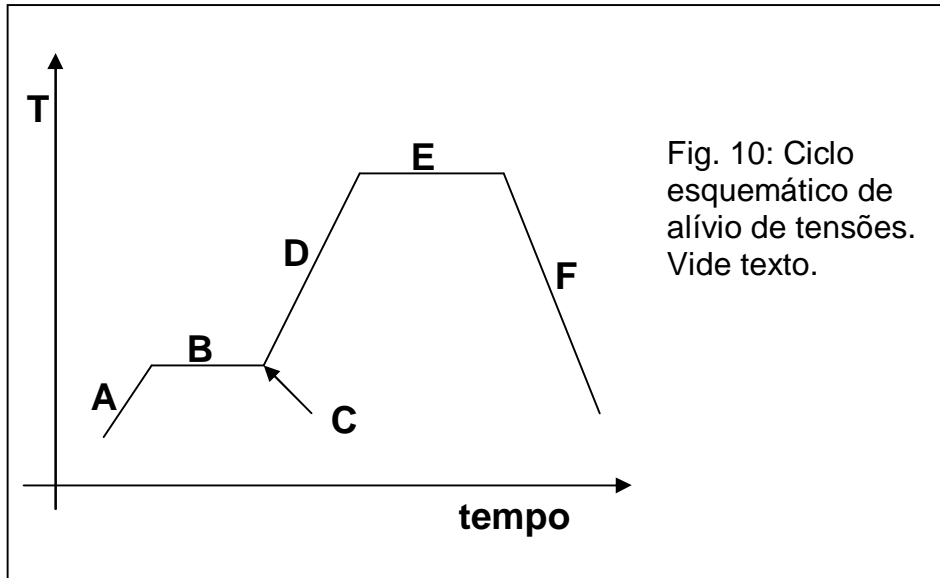
## **ELETRO EROSÃO – A MELHOR TÉCNICA**

Como visto, o meio mais efetivo através do qual pode-se prevenir os problemas com a eletro erosão, é o controle da Taxa de Remoção.

Entretanto, mesmo com o melhor controle a camada branca sempre vai existir, e, em muitos casos, atinge valores e, conseqüentemente apresenta trincas, acima do tolerado pela ferramenta, particularmente naquelas ferramentas que serão solicitadas a trações e compressões elevadas, como no caso de estamparia.

Assim, recomenda-se uma série de cuidados pós Eletro Erosão, como segue:

1. POLIMENTO – sempre que possível, recomenda-se um polimento em toda a superfície erodida (ou onde for possível), removendo-se mecanicamente pelo menos 10  $\mu\text{m}$ . Se este procedimento for possível em toda a extensão erodida, garante-se que toda a Zona Fundida foi removida, ficando apenas a Zona Retemperada e Re-revenida, que poderá ter os problemas minimizados com o procedimento a seguir;
2. ALÍVIO DE TENSÕES – após o polimento, recomenda-se aplicar um ciclo térmico de alívio de tensões, de modo a revenir, ainda que precariamente, a camada Re-temperada, e reduzir as tensões na camada Re-revenida. O ciclo recomendável é ilustrado na fig.10 a seguir.



A seguir a seqüência do ciclo:

- A – Aquecimento a partir da temperatura ambiente com forno vazio;
- B – Temperatura da ordem de 300 oC;
- C – Quando o forno estabilizar em 300 oC, carregar as peças;
- D – Retomar o aquecimento do forno, até temperatura de Alívio;
- E – Temperatura de alívio deve ser 30 a 50 oC menor que o último revenido aplicado, limitado a no mínimo 350 oC. Uma hora é suficiente;
- F – O resfriamento pode ser lento, dentro do forno, ou mesmo ao ar, lembrando que meios mais severos de resfriamento podem induzir tensões indesejáveis na ferramenta.

Recomenda-se o uso de fornos com atmosfera controlada, uma vez que, a temperatura de processo propicia oxidação, além de, em aços com elevado teor de carbono, haver o risco de alguma descarbonetação, afetando as propriedades superficiais da ferramenta.

Caso um forno com atmosfera controlada não esteja disponível, pode-se utilizar técnicas de proteção da superfície, seja através de “papel de aço inoxidável”, disponível no mercado atualmente, seja através de queima de cavacos de ferro fundido, dentro do forno, com o fim de constituir uma atmosfera redutora. Este último não se mostra muito eficiente.

O exposto vale tanto para Processo de Penetração como a Fio.

## SELEÇÃO DO AÇO MAIS ADEQUADO

A seleção do aço mais adequado para determinado fim representa passo fundamental para uma ferramenta com bom rendimento.

Como visto, aços de maior tenacidade no estado temperado devem ter preferência. Exemplificando, ferramentas de estampo, que em geral passam por etapa de Eletro Erosão na sua fabricação, usualmente são fabricadas em aços do tipo AISI D6 ou mesmo em aço AISI O1, no mercado nacional.

Estas escolhas são inadequadas, lembrando que o AISI D6, apesar de ser um aço ferramenta de elevada resistência a desgaste, é extremamente frágil, apresentando em sua microestrutura grandes quantidades de carbonetos massivos, de grande porte, (fig.11b) que vão influenciar negativamente no processo de Eletro Erosão, particularmente no caso do processo a fio.

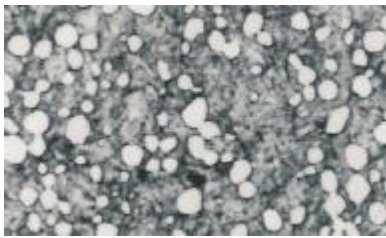


Fig. 11a: microestrutura do aço ASP 2030  
2500 x  
(ERASTEEL)

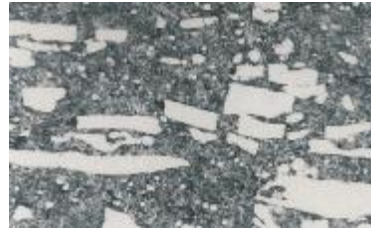
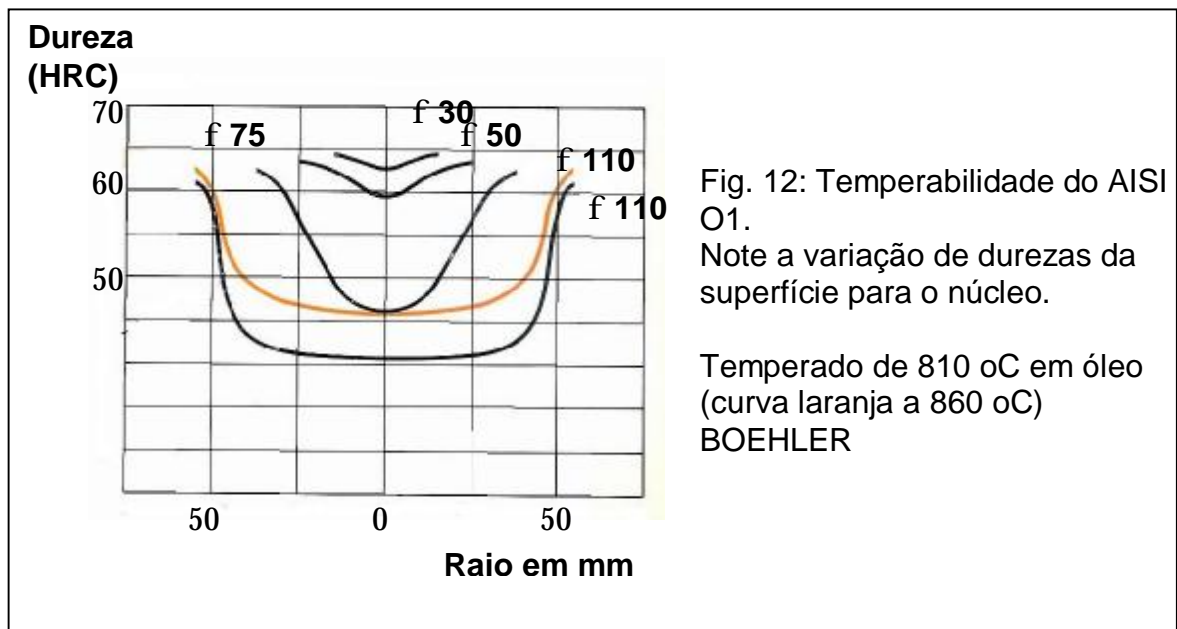


Fig. 11b: microestrutura do aço AISI D6  
500 x  
(ERASTEEL)

Comparação entre dois aços ferramenta. Observe que a microestrutura do AISI D6 é desfavorável ao processo de Eletro Erosão a Fio, enquanto que o ASP 2030, por ter microestrutura com carbonetos muito finos e bem distribuídos não apresentará problemas (ERASTEEL)

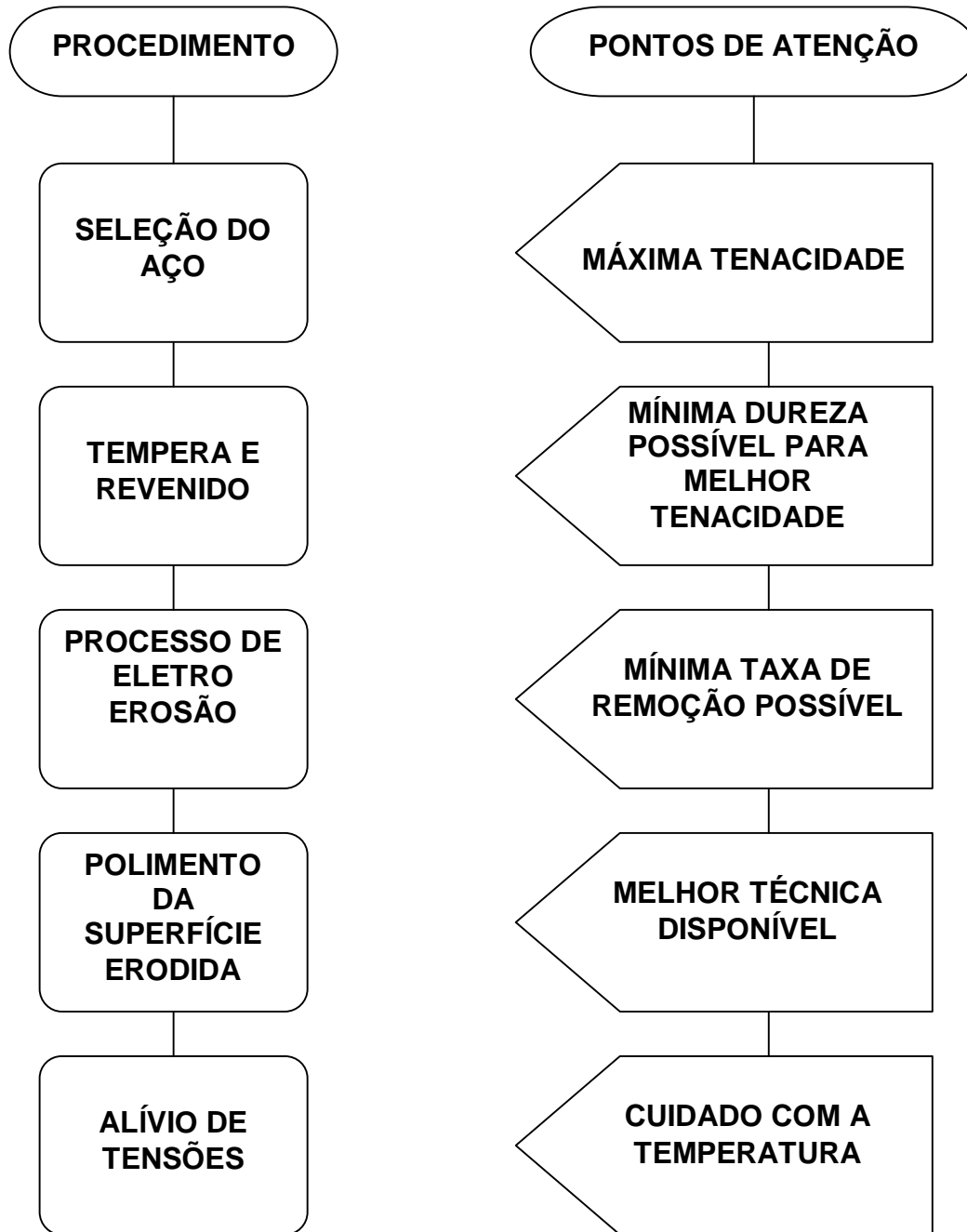
No caso do AISI O1, temos o problema da temperabilidade. Este aço apresenta variação de dureza significativa da superfície para o núcleo (num diâmetro de 100 mm, a variação pode chegar a 60 HRC na superfície, contra apenas 49 no centro), e, gerando produtos com durezas diferentes de ponto a ponto, o que contribuirá para a falha prematura em trabalho. Grandes blocos podem inclusive trincar durante o processo.



Além destes fatos negativos, ambos, usualmente empregados com durezas de 60/62 HRC, são revenidos a temperaturas baixas, da ordem de 160 a 200 oC, NÃO permitindo um alívio de tensões pós eletro erosão eficiente.

## CONCLUSÃO

A seqüência a seguir ilustra os procedimentos mais recomendáveis para obtenção de ferramentas que resultem máximo rendimento, no que se refere ao processo de eletro erosão.



## BIBLIOGRAFIA

1. MECHANICAL ENGINEER`S HANDBOOK, John Wiley & Sons, 1986.
2. YOSHIDA, Shun, Seleção de Aços, Tratamentos Térmico e Tratamentos de Superfície para Ferramentas de Confomação de metais, Congresso de Corte e Conformação 2001, OUT/2001, São Paulo, SP
3. EDM OF TOOL STEEL, UDDEHOLM, Informe Técnico
4. ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF TOOL STEELS, BOEHLER AG,Informe Técnico
5. ERASTEEL FRANCE, Informativo Técnico