

Informativo Técnico 01		
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 1/14

Breve discussão sobre defeitos em moldes, matrizes e ferramentas construídas em aços-ferramenta com impacto no tratamento térmico

João Carmo Vendramim, Eng.MSc

1. Introdução

A operação de tratamento térmico de uma ferramenta construída em aço da classe “aço-ferramenta” é, geralmente, a penúltima e, em alguns casos, poderá mesmo ser a última de uma seqüência de operações demoradas e dispendiosas, em termos de mão-de-obra especializada, tecnologia utilizada e matéria-prima.

Parte das falhas prematuras em ferramentas pode estar associada à execução incorreta do tratamento térmico que são apresentadas a seguir:

- Planejamento inadequado dos parâmetros de processo
- Equipamento obsoleto, ou impróprio, para aquecimento e resfriamento.
- Equipe técnica (*formação de pessoal*) sem treinamento.
- Manipulação incorreta dos parâmetros de processo, tais como: tempo, temperatura, resfriamento e a montagem de carga.
- Combinação dessas deficiências, em parte, ou total.

Entretanto, existem outras causas para a maioria das falhas prematuras em ferramentas que não estão associadas à etapa do tratamento térmico diretamente, mas tem neste um **agente** para potencializar a nucleação de falhas. O tratamento térmico, nesse caso, poderá alavancar uma falha anterior de maneira catastrófica, ou não, tornando-se **sujeito** destas. A observação dos processos de construção e utilização de ferramentas permite elencar alguns fatores fundamentais relacionadas à vida útil destas:

- 1- Projeto da Ferramenta (*canais de refrigeração, mudança de forma, etc*)
- 2- Seleção do aço: *adequado à aplicação*
- 3- Qualidade do aço: *microinclusões, homogeneidade*

Informativo Técnico 01		 ISOFLAMA tratamento térmico
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 2/14

- 4- Engenharia de usinagem: *rotas melhores, menor custo e risco*
- 5- Tratamento térmico: *utilização correta dos parâmetros para o aço*
- 6- Acabamento final: *eletroerosão, refítica, corte a fio e polimento*
- 7- Condições de utilização da ferramenta: *preaquecimento, alívio de tensão, condições adequadas da máquina; etc...*

Na falha de uma ferramenta esses fatores podem estar presentes de maneira combinada, com um, dois, ou três, predominando de forma contundente. A seguir, discute-se cada um desses fatores que devem ser objeto de atenção de todos na cadeia produtiva para a busca da máxima vida útil de uma ferramenta.

2. Fatores potenciais de falha

2.1 – Projeto

A criatividade, o bom senso, e a aguda observação dos aspectos constitucionais da ferramenta devem ser objetos do “*projetista*”. Nem sempre se consegue os melhores resultados em função das condições de utilização da ferramenta – equipamento, geometria, etc..-, mas o aspecto importante a ser salientado é encontrar a solução de compromisso entre a “*funcionalidade*” e “*dificuldades*” de construção da ferramenta. A definição de canais de refrigeração de um molde, ou matriz, por exemplo – onde, como, espessura de parede – é relevante no projeto da ferramenta e para o tratamento térmico. Alguns aspectos de projeto, no entanto, devem ser evitados, tais como:

- **“Cantos vivos”, arestas não arredondadas.**

A eliminação dos “*cantos vivos*” reduz o risco de desenvolvimento de trincas no tratamento térmico – aquecimento e, ou, resfriamento -, pois são pontos de concentração de tensões. Se os “*cantos vivos*” são necessários, estes poderiam ser construídos depois do tratamento térmico. Se a forma final da ferramenta exigir os “*cantos vivos*”, devem-se estudar alternativas de material – por exemplo, examinar

outros materiais, em termos de “*temperabilidade*” (capacidade de o aço adquirir dureza à profundidade) –; construção da ferramenta em múltiplas partes; e condições de tratamento térmico (resfriamento ao ar, por exemplo). A Figura 1 ilustra a situação de projetos de peças, ou ferramentas com cantos-vivos.



Figura 1 – Exemplo de projeto com e sem canto-vivo

- **Variações bruscas de seção**

A variação brusca de seção numa ferramenta concorre para a troca de calor muito diferenciada, e localizada, durante as etapas do tratamento térmico. Furos não vazados, ou depressões no desenho da ferramenta, podem acumular o líquido, ou gás de resfriamento, no interior e conduzir a uma troca de calor inadequada nas paredes internas com reflexo na dureza final. A variação de seção, principalmente nos casos bruscos, promove tensões flutuantes que podem ser de tração e, ou, compressão, e o resultado final é uma maior deformação, ou mesmo, nucleação de trinca. A Figura 2, abaixo, ilustra a situação descrita acima.

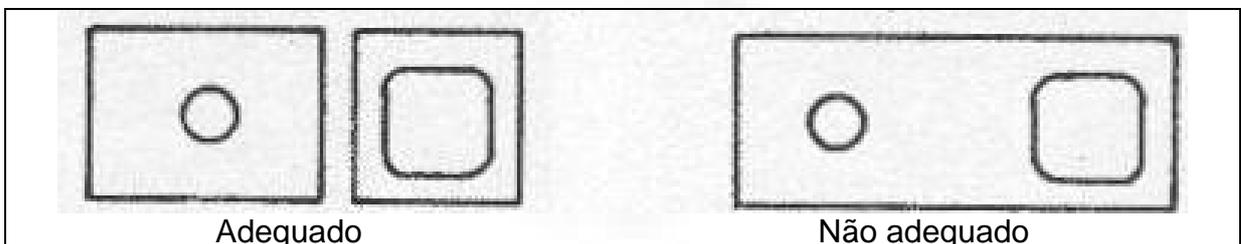


Figura 2 – Projeto com variação brusca de seção

- **Furo e rasgo de “chaveta”**

Furos na ferramenta também podem ser associados a uma variação brusca de seção dependendo do local onde se encontram e se vazados, ou não, como mostrados na Figura 3a. Para alguns casos, os furos poderiam ser preenchidos com aço de baixa liga, ou manta cerâmica, por exemplo, para conferir homogeneidade ao conjunto e, conseqüentemente, proporcionar uniformidade no aquecimento e resfriamento. Os furos dificultam a troca de calor e por se tratar de fonte de concentração de tensões é preferível não apresentar transformação microestrutural do que a presença de microestruturas mistas. Os rasgos de chaveta, Figura 3b, configuração comum em algumas ferramentas, são elementos de alta concentração de tensões e, em tese, devem ser evitados, pois tanto podem contribuir para a nucleação de trincas como causar fortes empenamentos (variação de seção). No caso de chavetas, recomenda-se eliminar os cantos vivos, preferencialmente construir a chaveta com o formato tipo “*meia cana*” e, também, preencher o espaço dela com aço carbono para conferir uniformidade geométrica ao conjunto. Para certas configurações de peças pode se utilizar “*manta cerâmica*” para preencher furos e rasgos, porém tomando-se o cuidado de proteger com tela de aço inox para evitar, no caso de forno a vácuo, a eliminação deste.

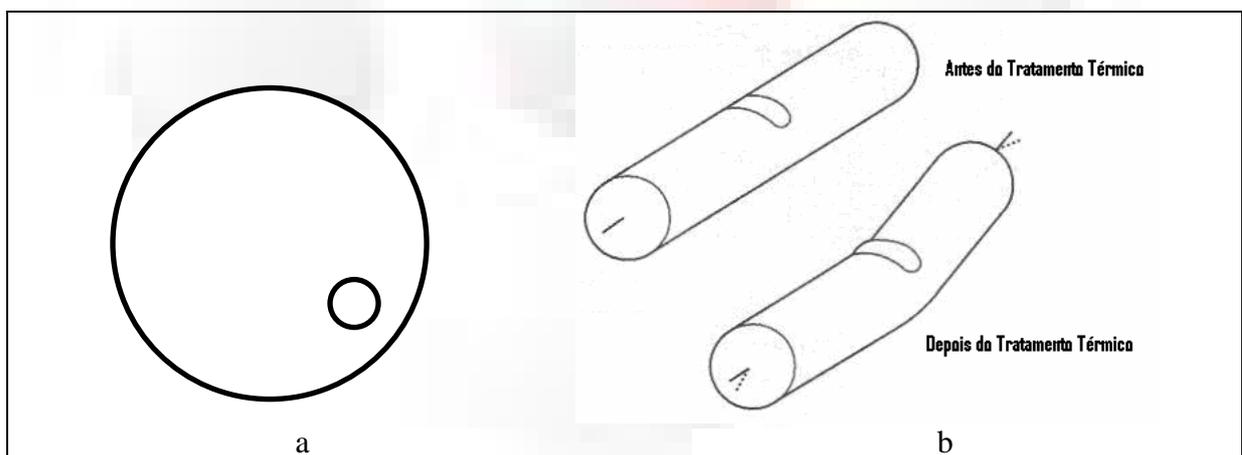


Figura 3 – a) Furos com seções finas e grossas; b) Barras com rasgo de chaveta

- **Esbelteza (*comprimento / largura / espessura - desfavorável*)**

As ferramentas esbeltas – relação comprimento / largura / espessura – são fortes candidatas ao empenamento de grande magnitude. A montagem de uma ferramenta

Informativo Técnico 01		
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 5/14

esbelta – longa e fina – é de difícil solução no tratamento térmico. A melhor posição de montagem, nesses casos, seria a vertical, porém isso dependeria do tipo de equipamento utilizado e, principalmente, das dimensões da ferramenta. A montagem dessas peças, quando possível, seria juntar de forma a reduzir uma das dimensões (comprimento ou espessura), porém isto deve ser feito sem comprometer o resultado final – uniformidade de dureza final.

- **Folgas inadequadas (por exemplo, entre o punção e a matriz).**

O tratamento térmico é uma operação de aquecimento, manutenção a uma dada temperatura (dependente do tipo de aço) e resfriamento (ar, água, óleo, ou nitrogênio sob pressão) que sempre envolve alteração dimensional e, por conta disso, as dimensões da ferramenta devem ser superiores para compensar eventual, e inevitável, empenamento. Para o caso do tratamento térmico em forno a vácuo é usual considerar, no mínimo, 0,50mm de sobremetal que será retirado, posteriormente, na operação de retífica, ou usinagem fina. Mesmo para o tratamento térmico em forno a vácuo o empenamento não é inevitável e quando isso não ocorrer apenas significaria que a somatória das tensões envolvidas – estado da matéria-prima, usinagem, manipulação no tratamento térmico, transformação microestrutural – resultou num “vetor resultante zero” para a variação dimensional. É bom salientar que o aço depois do tratamento térmico com a microestrutura martensita obtida na têmpera promove uma expansão volumétrica da ordem 4%.

2.2 - Matéria-Prima

Os aços-ferramenta são considerados materiais nobres dentro das classes das ligas ferrosas, porém isto não impede que o usuário receba um aço-ferramenta com defeitos não detectados no controle de qualidade do fabricante, ou mesmo evitar uma mistura de tipo de aço. Os defeitos mais comuns para os aços são:

- **Elevada segregação**

Informativo Técnico 01		
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 6/14

Os aços rápidos e aços de elevado teor em carbono, sem cromo, apresentam grandes quantidades de carbonetos, às vezes de grandes dimensões. Nos blocos brutos de fundição os carbonetos apresentam uma distribuição não uniforme formando grandes aglomerados nos limites do grão e, como consequência, conferindo fragilidade à microestrutura. O forjamento deve ser conduzido de forma intensa para atenuar a estrutura bruta de fusão. A segregação é uma descontinuidade que altera as propriedades mecânicas, sem contar que serve de cunha metalúrgica para nucleação de trincas no tratamento térmico. A segregação também traz sérios problemas para a qualidade da operação de polimento da superfície, principalmente naqueles casos de moldes de grandes dimensões onde o forjamento pouco alterou o núcleo do bloco e que será o local preferencial de trabalho.

- **Teor elevado de inclusões não metálicas**

As inclusões não-metálicas quando presentes acima do aceitável e não detectadas pelo controle de qualidade do fabricante do aço e dependendo da quantidade, morfologia e do local onde se apresentam também podem servir de cunha metalúrgica para a nucleação de trincas. As inclusões não metálicas em nível acima do permitido podem trazer complicações para a qualidade do polimento e reduzir o limite de resistência a fadiga em alto ciclo e fadiga térmica.

- **Trincas superficiais**

São trincas associadas à temperatura de forjamento muito baixa, ou resfriamento rápido depois da laminação ou forjamento. No caso dessas trincas não serem eliminadas no processo de usinagem – caso de pouca retirada de sobremetal nesse estágio de construção da ferramenta - as trincas remanescentes serão pontos preferenciais para a propagação da trinca no tratamento térmico.

- **Trincas internas provocadas pela presença de hidrogênio**

Informativo Técnico 01		
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 7/14

Essas trincas podem se desenvolver no processo de fabricação do aço se o tratamento denominado de *desidrogenização* não for adequadamente executado. Se presentes ainda no estado final de fornecimento do aço ao usuário, as trincas se desenvolverão durante o tratamento térmico de forma catastrófica e a sua origem dificilmente seria detectada mais tarde nas inspeções convencionais.

- **Microestrutura**

É fundamental o estado da microestrutura do aço-ferramenta na condição de fornecimento para o usuário. Para os aços-ferramenta da classe “*trabalho a quente*” existem categorias de microestruturas definidas como aceitáveis no estado de fornecimento do aço, pois o melhor resultado do tratamento térmico – uniformidade microestrutural e, por conseguinte, de propriedades mecânicas – será obtido quando atendidas estas condições.

- **Mistura de aço**

Utilizar matéria-prima incorreta devido a uma mistura deste na fase de fornecimento pode ser letal. Em muitos casos essa mistura somente será detectada depois de executado o tratamento térmico devido material não acusar a dureza desejada. Em algumas situações de usinagem um operador de torno experiente pode perceber não se tratar do aço especificado pelo desempenho da máquina, em termos das condições de corte, tamanho e forma de cavaco, mas isto é um evento sujeito a incidência de fatores casuais.

2.3 – Desbaste

O estágio de desbaste no processo de construção de uma ferramenta é de fundamental importância, pois todo o esforço desta etapa pode ser perdido no tratamento térmico que, neste caso, seria somente o “**agente potencializador de falhas**”. A operação de usinagem pode ser resumida como um processo de corte por cisalhamento, arrancamento de material acompanhada de deformação plástica e

Informativo Técnico 01		
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 8/14

encruamento com o surgimento de pequenas fissuras na superfície do aço. Essa operação de usinagem utilizando parâmetros de avanço, velocidade, e refrigeração inadequados pode provocar fissuras da ordem de 0,5 a 0,7 mm de profundidade e com um nível elevado de tensões residuais [1]. O calor gerado pela operação de usinagem em condições adversas pode levar a superfície até a temperatura de austenitização e a formação de estruturas martensíticas no resfriamento. A eliminação dessa superfície ocorre depois do tratamento térmico e, em muitos casos, somente nas regiões de trabalho da ferramenta. Enfim, com fissuras causadas no estágio da usinagem será inevitável a ferramenta apresentar empenamento de elevada proporção, ou mesmo trincas, logo após o tratamento térmico – depois da têmpera, ou do revenimento – ou então, manifestar uma trinca no estágio inicial de trabalho.

As tensões geradas pela usinagem intensa devem ser removidas, ou atenuadas, por um tratamento térmico posterior denominado de Alívio de Tensões, ou recozimento subcrítico, ou incorporado a um dos patamares do ciclo de preaquecimento do próprio ciclo de têmpera. A prática dessa operação tem recomendado que quando ocorre a retirada em torno de um terço (1/3) da massa total, em peso, do aço a operação de alívio de tensão deve ser efetuada. O alívio de tensão não elimina a trinca surgida pela usinagem intensa e mal conduzida.

Deformações plásticas realizadas na superfície da ferramenta agem como concentrador de tensões como, por exemplo, a inscrição de informações através de punções para identificação, ou endentação para inspeção de dureza, que podem gerar microfissuras, sobretudo nas situações de solicitações cíclicas (fadiga).

A eletroerosão é outra etapa da construção da ferramenta que deve ser executada com extremo cuidado para não formar uma “*camada branca*” (martensita não revenida) que, dependendo da espessura, age como cunha metalúrgica para nucleação de trincas no tratamento térmico. Depois da eletroerosão também é recomendável executar um tratamento térmico de alívio de tensões.

2.4 – Tratamento Térmico

Informativo Técnico 01		
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 9/14

Os defeitos associados ao tratamento térmico, de maneira geral, quase sempre se concentram nas operações de têmpera e revenimento. Com o objetivo de maximizar resultados, em termos de propriedades mecânicas, com o aço temperado e revenido sem trincas e mínimo empenamento, algumas regras devem ser obedecidas para cada tipo de aço-ferramenta, quais sejam:

- **Utilizar a temperatura de austenitização correta, conforme sugerido pelo fabricante do aço.**

A utilização de temperaturas de austenitização demasiadamente elevadas pode provocar crescimento excessivo do grão com influência na tenacidade do aço. A utilização de temperaturas de austenitização demasiadamente baixas pode trazer problemas para a microestrutura, pois além da dureza não ser atendida, formar um estado de tensões internas que estejam na origem de fissuras internas. O mesmo defeito pode ser produzido por um tempo de manutenção à temperatura de austenitização insuficiente.

- **Utilizar corretamente o meio de resfriamento (“Isothermal Quenching”)**

A escolha do meio de resfriamento será fundamental para garantir o melhor resultado, em termos de uniforme microestrutura final isenta de trincas e mínimo empenamento. Em situações de peças de grandes dimensões é interessante monitorar o resfriamento do núcleo e superfície da peça de maneira que a transformação microestrutural ocorra com a menor diferença de temperatura. Alguns fornos a vácuo disponibilizam a função denominada “*Isothermal Quenching*” para executar a operação de “*martempera*” que equivale a manter a peça numa temperatura pouco acima da temperatura de transformação martensítica (*Ms – martensitic start*) e num tempo suficiente para que a diferença de temperatura entre a superfície e o núcleo seja a menor possível antes da “entrada” na zona de transformação martensítica. Essa função proporciona a redução do risco de desenvolvimento de deformações acentuadas e de trincas e contribui para a formação de menores tensões de tração na superfície do aço.

Informativo Técnico 01		 ISOFLAMA tratamento térmico
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 10/14

- **Não permitir que a temperatura da ferramenta depois da têmpera alcance a temperatura ambiente antes da etapa de revenimento.**

Essa etapa deve ser cumprida com rigor para que o aço temperado, extremamente frágil, não desenvolva trincas. A endentação para inspeção da dureza não deve ser efetuada no aço-ferramenta apenas temperado.

- **Iniciar a etapa de revenimento imediatamente após a operação de têmpera.**

Promover o revenimento logo após a têmpera quando a ferramenta atingir a temperatura de 50 a 70 °C é o mais recomendável para a maioria dos aços-ferramenta. Quando a dureza final, e depois dos revenimentos, não for alcançada, o retratamento do aço exige que se realize o tratamento de recozimento. Não se poderá aquecer o aço para a têmpera sem antes realizar esse tratamento térmico em função de condições microestruturais que pode ser de concentração de tensão e de elevado potencial para o desenvolvimento de trincas.

2.5 – Retifica

Essa pode ser a última operação na construção de uma ferramenta em aço da classe aço-ferramenta depois do tratamento térmico de têmpera e revenimento.

A grande quantidade de calor gerado durante a retifica responde por transformações microestruturais do aço que, em função da deformação plástica e da variação de temperatura entre superfície e a sub-superfície, ou núcleo, gera um estado de tensões de tração nesta que poderia resultar em fissuras. Essas fissuras podem não ser visíveis a olho nu e há necessidade de se utilizar técnicas de detecção por métodos não destrutivos por partículas magnéticas ou líquidas fluorescentes.

As alterações estruturais provocadas pela retificação não podem ser totalmente evitadas, mas atenuadas até limites toleráveis usando de certas precauções, tais como:

Informativo Técnico 01		 ISOFLAMA tratamento térmico
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 11/14

- Utilizar “pedras” conforme tipo de aço
- Não utilizar “*pedras vitrificadas*”; a acumulação de material sobre a superfície pode provocar “empastamento” e não cortar o aço.
- Não aplicar avanços muito grandes e / ou velocidades periféricas excessivas;
- Utilizar lubrificante de corte que conduza ao menor aquecimento possível do material;

Não sujeitar à retificação peças com defeitos de tratamentos térmicos que sejam susceptíveis de aumentar os problemas de tensões internas do material, tais como: temperatura de austenitização demasiada alta; revenimento inadequado (martensita mal revenida); e austenita retida. As trincas de retifica podem ser removidas se a camada afetada for pouco profunda, sendo isto válido se:

- Não ocorreu propagação para uma maior profundidade
- A geometria final da peça é compatível com a remoção de material

2.6 – Polimento

A operação de polimento faz parte do acabamento final da superfície de ferramentas como moldes e matrizes. Trata-se de uma operação delicada que pode produzir defeitos como “*sobre polimento*” (longa duração do polimento) de dois tipos: “*casca de laranja*” e “*picagem*”. A “*pele de laranja*” consiste de uma superfície irregular de partículas muito duras que a matriz metálica que as envolve expostas em função de uma pressão de polimento excessiva e, ou, tempo de polimento longo demais. Esse defeito é agravado por dois fatores:

- Dispersão e dimensão dos carbonetos. Quanto mais grosseiros tanto maior o defeito tipo “*casca de laranja*”
- Diferença de dureza entre os carbonetos e a matriz metálica. Quanto mais macia for a matriz e mais duros os carbonetos mais facilmente o defeito se manifesta

Informativo Técnico 01		
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 12/14

Quando o defeito “*casca de laranja*” ocorrer o polimento deve ser interrompido e, neste caso, adotar os seguintes procedimentos:

- Remover uma fina camada superficial por retifica e recomeçar o polimento utilizando menor pressão
- Efetuar um tratamento de alívio de tensões à temperatura de 50° C abaixo da temperatura do último revenimento e, novamente, recomeçar o polimento também com menor pressão.

Caso o defeito ainda persistir deve-se utilizar de processos alternativos, tais como:

- Tratamento superficial, por exemplo, nitretação, ou revestimentos duros.
- Selecionar outro aço para trabalhar com maior dureza
- Estudar os parâmetros de tratamento térmico de têmpera visando alcançar maior dureza do aço, ou dispersão mais fina de carbonetos.

O defeito tipo “*picagem*” muito fino que ocorre durante o polimento está associado a presença de inclusões não metálicas na forma de partículas de óxidos muito duros e frágeis que podem ser arrancados da superfície. O arrancamento da partícula de óxido produz um buraco na superfície e pode deixar uma marca semelhante à de um “*cometa*” (arrancamento e escorregamento durante o polimento – desgaste abrasivo a três corpos). Podem-se citar algumas razões para esse defeito:

- Tempo e pressão elevada de polimento
- Nível elevado de inclusões do aço
- Ferramentas inadequadas de polimento

O mecanismo principal de geração desse defeito está associado com a grande diferença de dureza entre a matriz e a inclusão. No polimento a matriz é mais rapidamente removida e isto dá origem a um “*escavamento*” em torno da inclusão até a efetiva remoção desta. Pasta de abrasivo com granulometria inferior a 10um e

Informativo Técnico 01		
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 13/14

panos de feltro é mais susceptível a produzir esse defeito. A solução para eliminar o risco de gerar esse defeito seria a seleção de uma qualidade de aço “*mais limpo*” (menor teor em inclusões) e recomeçar o polimento depois de uma retifica fina. E durante o polimento devem ser adotadas as seguintes precauções: **a)** utilização de abrasivos em pasta de granulometria inferior a 10um deve se evitar o recurso de suportes de polimento macios; **b)** pressão de polimento reduzida e no menor tempo possível de aplicação e; **c)** evitar a utilização de pasta de alumina como abrasivo.

2.7 – Utilização em serviço da ferramenta

A etapa de utilização de uma ferramenta pode nuclear defeitos associados a incorreções anteriores como o processo de fabricação e tratamento térmico. Um primeiro problema é o da magnetização do aço devido a dispositivos de fixação magnéticos, ou incorreta desmagnetização na seqüência de ensaios com partículas magnéticas. Ferramentas magnetizadas atraem partículas de ferro (limalhas) que contribuem para o desgaste tipo abrasivo, ou age na redução das folgas.

Um outro defeito reportado pelas literaturas técnicas é o denominado “*heat checking*” para aços da classe trabalho a quente que consiste no surgimento de fissuras superficiais de reduzida extensão, estreitas, mas que crescem com a seqüência de trabalho. Esse tipo de defeito está relacionado a uma repetição intensiva de ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento da ferramenta (fadiga térmica), é inevitável e constitui, conjuntamente com a perda de abrasividade, a principal limitação da vida útil das ferramentas de trabalho a quente nas operações de forjamento, extrusão e injeção sob pressão. Embora não possa ser evitado, esse defeito pode ser minimizado, ou retardado o seu surgimento através de algumas medidas preventivas:

- Preaquecimento da ferramenta com processos adequados (indução, ou forno) antes da utilização.
- Alívio de tensão da ferramenta depois de cumprir algo em torno de 10% da vida útil
- Aços de maior pureza (microinclusões)

Informativo Técnico 01		 ISOFLAMA tratamento térmico
Revisão: 02	Data: 10/09/2007	Páginas: 14/14

- Adequada tenacidade e ductilidade

Referencias Bibliográficas

- 1- Failures Related to Heat Treating Operations – G.E.Totten & Associates, Inc.
- 2- Use of Vacuum Furnaces in Heat Treatment – Metal Science and Heat Treatment, Vol.46, Nos.11-12, 2004 – J.Oleinik (Seco/Warwick Lad, Poland)
- 3- Heat Treatment of Tool Steel – G.Roberts
- 4- Princípios de Ciências dos Materiais – L.Van Vlack – Ed.USP,1970
- 5- Tool Steel – G.Roberts, G.Krauss, R.Kennedy – ASM, Ed.5th. 1998