

ANÁLISE DE FALHAS EM MOLDES E MATRIZES¹

Rafael A. Mesquita²

Resumo

Um dos principais fatores que diferenciam os moldes e matrizes dos demais aços especiais é que, com exceção dos moldes para plásticos, são empregados até a falha. Portanto, a discussão dos aspectos de falha e dos mecanismos envolvidos permite definir os principais pontos de melhoria do processo e redução do custo do ferramental. Neste sentido, o presente trabalho discute vários exemplos de falhas em aços para trabalho a quente e trabalho a frio, mas também com alguns dados sobre aços para moldes. Casos reais de falhas são utilizados e caracterizados em termos de técnicas laboratoriais usuais, em especial a microscopia ótica e ensaios mecânicos. Em seguida, os resultados são comparados aos modelos metalúrgicos, especialmente em relação a metalurgia física e aspectos teóricos de tratamentos térmicos. Assim, a causa da falha pode ser precisamente indicada e opções para retardar a falha podem ser definidas. Em relação aos aços para trabalho a frio, vários resultados mostram que são especialmente sensíveis a falhas por três modos: projeto incorreto, com excesso concentradores de tensão, camada branca após eletroerosão, sobreaquecimento e queima por retífica. Nos aços para trabalho a quente, por outro lado, a três fatores são destacados: resfriamento lento durante a têmpera, dureza excessivamente elevada, aquecimento durante o processo e problemas de nitretação. Finalmente, para os moldes de plásticos, as questões mais críticas relacionam-se aos danos à superfície do molde, por solda, eletroerosão ou corrosão.

Palavras-chave: Aços ferramenta; Análise de falhas; Tratamento térmico; Trincas; Desempenho.

FAILURE ANALYSIS IN MOLDS AND DIES

Abstract

With exception to plastic molds, one of the important characteristics of tool steels is their application until the failure is observed. In this context, the present paper aimed to discuss several examples in hot work and cold work tooling, but also adding some examples of plastic molds. Real cases are taken under consideration and characterized with usual experimental techniques, especially optical microscopy and mechanical tests. In addition, the results are compared to metallurgical models, especially with regards to physical metallurgy and heat treatment theory. Therefore, the root cause of a given failure is precisely determined and the options to retard it may thus be defined. In relation to cold work steels, they are especially prone to 3 kinds of failures: improper design, with stress risers regions, white layer after electro-discharge machining (EDM) and burning during grinding operations. In hot work tools, the main failure causes are: slow cooling during quenching, excessively high hardness, excessive heating during tools use and nitriding problems. And for plastic moulds, damages to mold surface are the most undesirable issues: EDM, welding and corrosion.

Key-words: Tool steels; Failure analysis; Heat treating; Cracks; Performance.

¹ Contribuição técnica ao 8º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 11 e 12 de agosto de 2010, São Paulo, SP.

² Universidade Nove de Julho (UNINOVE), São Paulo, Brasil, rafael.mesquita@uninove.br



1 INTRODUÇÃO

Ferramentas de corte e conformação, moldes e matrizes são dispositivos mecânicos utilizados em processos de produção de materiais, em diversos processos a frio ou em temperaturas elevadas.⁽¹⁾ Alguns exemplos são as ferramentas utilizadas em matrizes de corte e conformação de chapas, matrizes para forjamento, fundição ou extrusão a quente e moldes para injeção de plásticos. Devido às condições críticas de trabalho, a ocorrência de falhas é frequentemente observada, sendo este um aspecto que diferencia as ferramentas de outras aplicações de engenharia. Portanto, tornam-se importantes os trabalhos de melhoria de desempenho de ferramentas, de modo não inibir a falha, mas estender a vida da ferramenta.

Também são importantes os casos de falhas prematuras, ou seja, uma vida útil inferior ao esperado. Este fator é crítico, pois o custo total do ferramental deverá ser diluído por uma quantidade menor de peças do que o previsto.⁽²⁾ Conseqüentemente, o custo de cada peça produzida torna-se maior, muitas vezes inviabilizando seu mercado.

Portanto, dois principais motivadores da análise de falhas em ferramentas moldes e matrizes podem ser indicados: a possibilidade de melhoria de vida útil e a definição das causas de falhas inesperadas. Desta forma, o presente trabalho foi delineado, para expor diversos exemplos e, principalmente, mecanismos de identificação dos fatores metalúrgicos relacionados à falhas de ferramentas. Os resultados são principalmente baseados em Mesquita e Barbosa,⁽³⁾ que descrevem mais extensamente as discussões aqui apresentadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A maioria dos exemplos de análise de falhas aqui apresentados baseiam-se em análises microestruturais, sendo em alguns casos apresentados ensaios mecânicos complementares (tenacidade em impacto e dureza).

O objetivo em todas as avaliações foi identificar parâmetros microestruturais que, uma vez relacionados com o modo de falha, permitam definir seu mecanismo. Em outras palavras, se, por exemplo, a falha observada resultava de trincas foram buscados parâmetros microestruturais (ou ensaios mecânicos) que confirmassem uma menor tenacidade do material. Os exemplos mostrados a seguir permitirão uma visualização mais clara desta metodologia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Falhas em Aços Ferramenta para Trabalho a Frio

Antes de considerar as possibilidades de falha dos aços para trabalho a frio, é importante entender as características intrínsecas destes materiais. Para resistir adequadamente ao desgaste, normalmente possuem elevada dureza, grande quantidade de carbonetos e elevado teor de carbono – fatores que ambos relacionam-se aos exemplos mostrados nas Figuras 1 a 4.

Primeiramente, os aços para trabalho a frio após têmpera e revenimento possuem fragilidade intrínseca, resultante em sensibilidade a concentradores de tensão e regiões com diferenças de secção que, durante a têmpera, promovam tensões. Quando tais cuidados não são observados, falhas como as mostradas na Figura 1 podem ser identificadas.

Por outro lado, apenas camadas e dezenas de microns a alguns milímetros da região da superfície dos aços para trabalho a frio pode tornar-se frágeis, se processos de eletroerosão ou retífica forem aplicados. Esses processos tendem a aquecer a superfície (retífica) ou mesmo gerar sua fusão (eletroerosão), e no resfriamento tem-se a conversão em martensita bruta – uma microestrutura muito frágil. Camadas com aparência clara ao microscópio óptico resultam disto, denominadas camadas brancas. Em casos extremos estas camadas podem possuir defeitos como pré-trincas. Portanto, a Figura 2 mostra alguns exemplos de falhas por camada branca excessivamente alta, gerada por retífica ou eletroerosão.

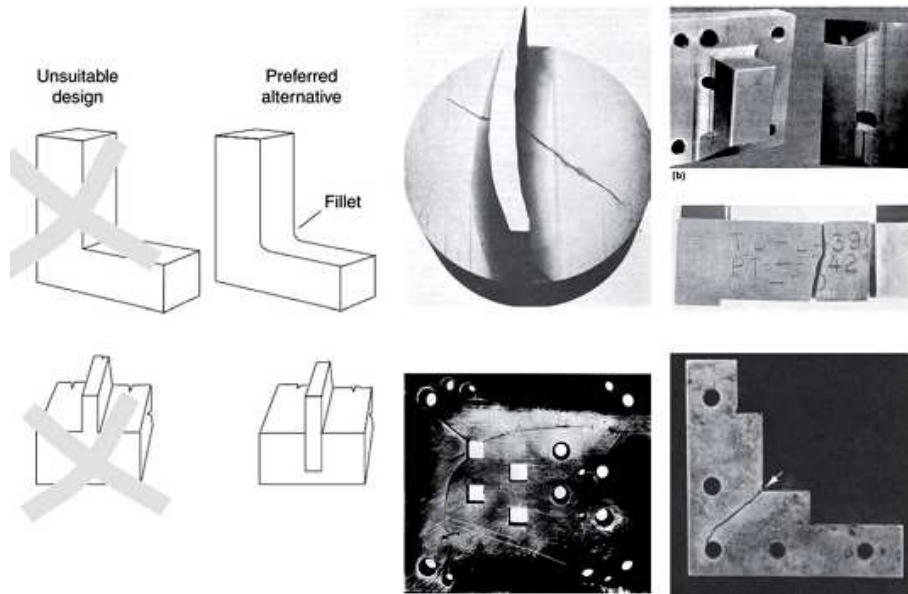


Figura 1: Exemplos de falha em trabalho a frio, por projeto incorreto.⁽³⁾

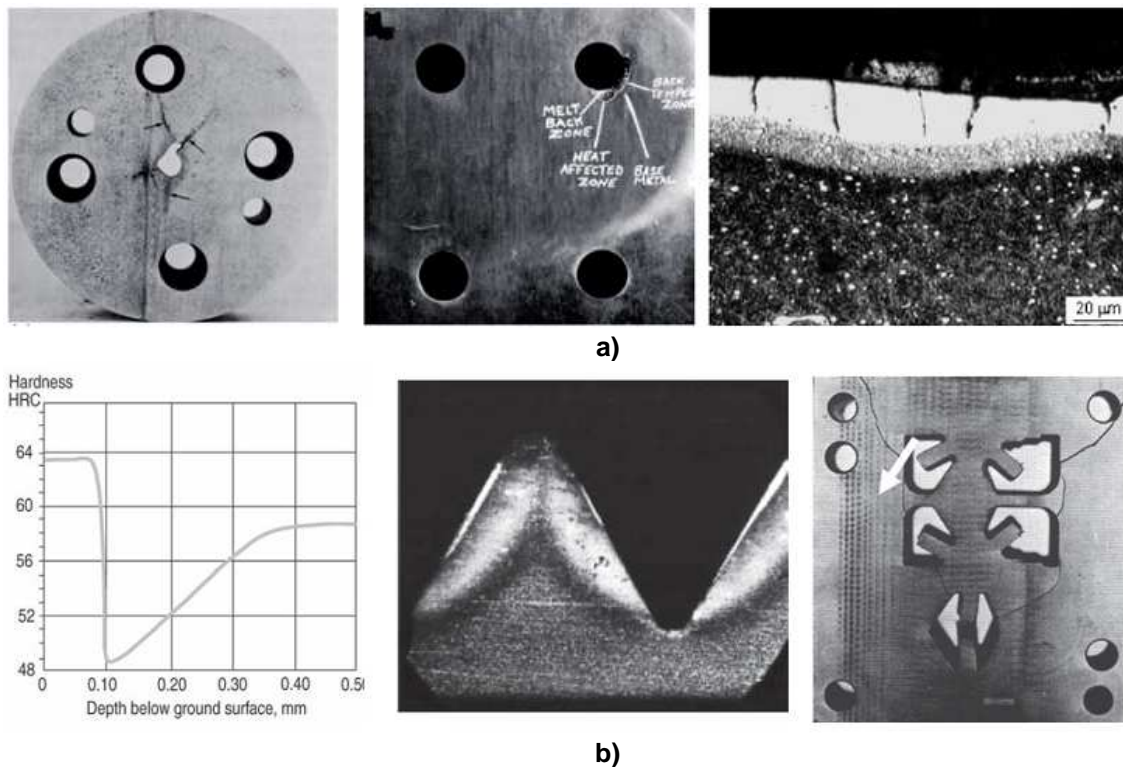


Figura 2: Falha de matrizes por procedimentos incorretos de a) eletroerosão e b) retífica.⁽³⁾

As curvas de revenido dos aços para trabalho a frio, normalmente, possuem pequeno pico secundário e, assim, estes materiais são revenidos em baixa temperatura. Devido a pouca variação de dureza durante o revenimento (em relação ao estado temperado) e pela dificuldade de troca de calor (entre peça e forno) em temperaturas abaixo de 300°C muitos, casos são observados de revenimento curto ou inexistente (Figura 3). As temperaturas baixas de revenido também promovem pouca ou nenhuma transformação de austenita retida, que quando em excesso (por exemplo, devido à têmpera incorreta) pode causar trincas ou instabilidade dimensional (Figura 4).

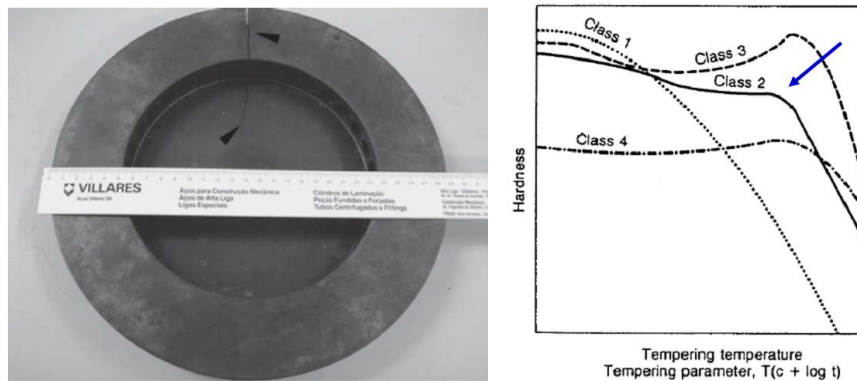


Figura 3: Falha de matrizes por revenimento curto ou inexistente. À direita são mostradas curvas de revenido de vários tipos de aços ferramenta, sendo apontada pela seta uma curva típica de aço para trabalho a frio.⁽³⁾

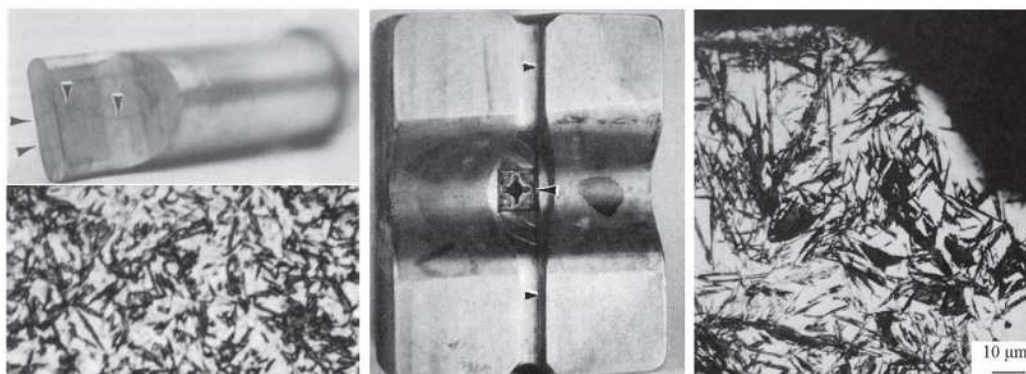


Figura 4: excesso de austenita retida em aços para trabalho a frio e falhas relacionadas.⁽³⁾

3.2 Falhas em Aços Ferramenta para Trabalho a Quente

Em relação aos aços típicos de conformação a quente, os mecanismos de falha descritos no item anterior (projeto, eletroerosão, retífica, revenimento insuficiente e austenita retida) também podem ocorrer. Porém, não são típicos, pois os aços para trabalho a quente possuem menor teor de carbono e, em geral, tenacidade muito superior. Esta diferença surge justamente pela maior tendência à trincas nas aplicações destes materiais, sendo assim possíveis outros tipos de falhas, como discutido nas Figuras 5 a 8.

Primeiramente, deve ser considerado um mecanismo comum de falha prematura em aços para trabalho a quente, relacionado à dureza empregada. Enquanto podem atingir dureza de até 55 HRC (em alguns casos até 60 HRC), tais materiais não são empregados nestes níveis, devido à tenacidade insuficiente para resistir à aplicação. Mesmo assim, várias aplicações, buscando erroneamente

máximo desempenho, voltam-se à durezas elevadas e, assim, aceleram mecanismos de falha relativos à trincas – alguns exemplos mostrados na Figura 5. Com efeito, a faixa de dureza acima de 52 HRC em aços da série AISI H deve ser evitada,⁽⁴⁾ devido à mecanismos de fragilidade observados.



Figura 5: Diversas falhas em matrizes, devido à dureza excessivamente alta.⁽³⁾

Por outro lado, causas de falha diversas podem ocorrer na faixa correta. Um exemplo típico é mostrado na Figura 6, gerado pela perda de tenacidade quando a ferramenta é austenitizada e temperada utilizando baixa taxa de resfriamento. Estas condições promovem precipitação de carbonetos em contornos de grão que, por sua vez, facilitam a propagação de trincas nestas regiões e diminuem expressivamente a tenacidade. No exemplo mostrado, o retratamento da ferramenta promove aumento de até 6 vezes na tenacidade.

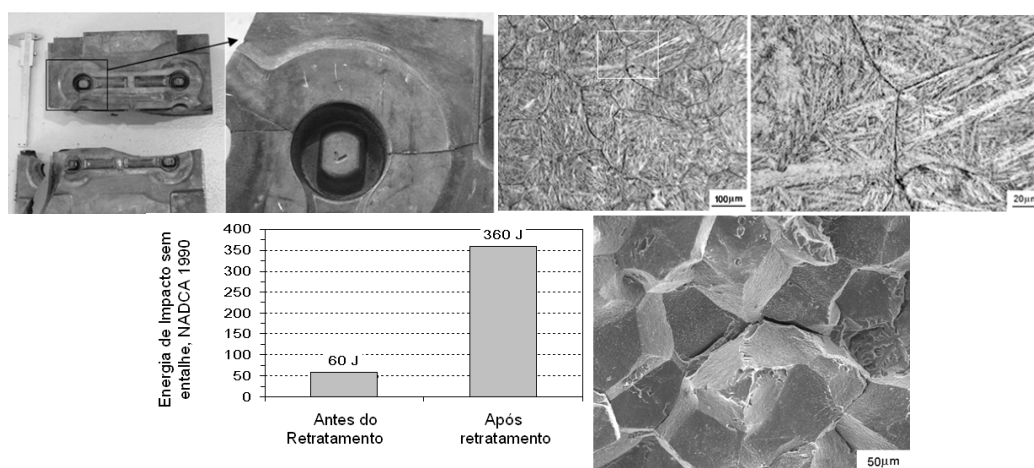


Figura 6: Falhas em matriz de trabalho a quente causada por resfriamento lento após têmpera.⁽³⁾

Obviamente, resfriamentos rápidos na têmpera de ferramentas grandes (acima e 100 mm de espessura) são difíceis ou impossíveis de ser obtidos. Neste sentido, existem recomendações de taxa de resfriamento mínimo, ou mesmo de métodos de têmpera interrompida para não geração de distorções ou trincas em condições de rápido resfriamento. Detalhes a este respeito podem ser obtidos na Nadca.⁽⁵⁾

Um outro exemplo deve ser considerado, relacionado à condições de falha em que o processo de trabalho da ferramenta é o fator fundamental – ou seja, aquecimento excessivo em uso (Figura 7). Apesar de possuírem capacidade de retenção de dureza em altas temperaturas, determinada pela resistência ao revenido do material, temperaturas excessivamente altas (acima de 650°C) causarão expressiva perda em dureza nas ferramentas. Isto é comum em aplicações nas quais o tempo de contato entre a ferramenta e a peça conformada são longos e a temperatura desta última alta (acima de 650°C). Neste caso, a troca do material ou tratamento térmico pode surtir pouco efeito, sendo recomendada a variação do processo, ou seja, trabalho com meios refrigerantes (normalmente, os mesmos utilizados para lubrificação ou desmoldagem).

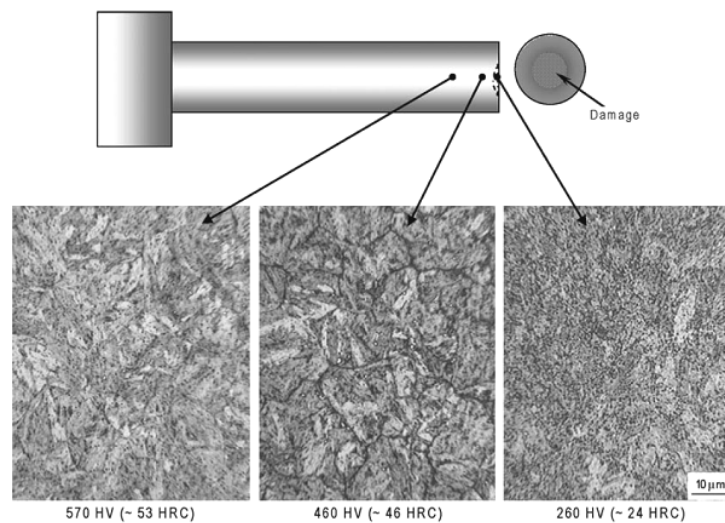


Figura 7: Falhas em matriz de trabalho a quente causada por aquecimento excessivo durante o processo.⁽³⁾

A necessidade de alta dureza, porém a fragilidade intrínseca torna interessante o uso de tratamentos superficiais, sendo a nitretação muito empregada pela elevada dureza promovida e estabilidade térmica em trabalho a quente. Porém, as condições de nitretação podem promover filmes de nitretos em contornos de grão, responsáveis pela falha prematura da ferramenta. Em alguns casos, estes filmes estão acompanhados de camada branca espessa. Alguns exemplos destas falhas são mostrados na Figura 8 e para sua solução sugere-se sempre nitretação sem nitretos em rede.⁽⁸⁾

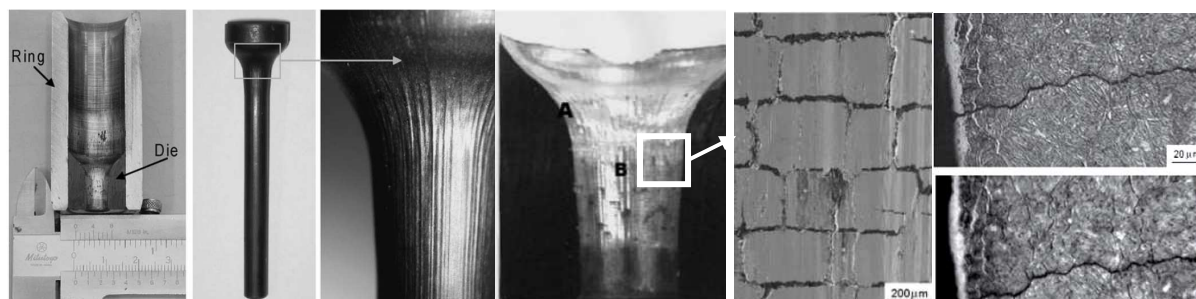


Figura 8: Nitretos em rede facilitando a propagação de trincas e matriz para forjamento de válvulas.⁽³⁾

3.3 Falhas em Moldes para Injeção de Plásticos

Os moldes para injeção de polímeros plásticos podem ser considerados específicos dentro da classe de ferramentas de corte e conformação devido à diversos aspectos. Primeiro, as menores solicitações em trabalho, resultante das menores temperaturas envolvidas em relação às matrizes de trabalho a quente ou às menores tensões em relação às matrizes de conformação a frio. O segundo aspecto que diferencia os moldes para plásticos são os requisitos de qualidade superficial, em termos de polimento ou texturização. Desta forma, é frequente que o projeto do molde tenha como discussão principal os aspectos finais da superfície, mas não as propriedades mecânicas dos materiais como um todo. Terceiro, em relação ao alto valor agregado, pela complexidade de usinagem e acabamento, sendo os moldes as aplicações em que o valor do aço ferramenta encontra-se mais “diluído” no custo final, em relação às outras ferramentas (exceção apenas as ferramentas de fundição sob pressão, que possuem custos expressivos de manufatura). A combinação destes aspectos gera uma quarta característica típica, em termos da longa vida útil dos moldes. Isto faz com que, nas aplicações comuns – injeção de polipropileno ou polietileno sem carga ou com pouca carga, o molde é apenas substituído quando o projeto da peça não é mais importante.

Devido à estas características especiais, falhas em aplicações de moldes para plástico são extremamente críticas, sendo usualmente falhas inesperadas. E, na sua maioria, estão relacionadas a condições relativas à superfície dos moldes. Alguns exemplos neste sentido são mostrados na Figura 9, que apresenta falhas por eletroerosão, corrosão ou solda.

Em termos de eletroerosão (Figura 9a), o processo deve ser controlado, para gerar o menor número de porosidades e trincas possível. Em especial, as últimas etapas do processo devem ter uma remoção de material pequena, de modo a gerar a menor camada branca possível que, assim, poderá ser removida nos processos subsequentes de lixamento e polimento.

Para as falhas mostradas na Figura 9b, as condições de armazenagem dos moldes são as fundamentais. Apesar de possuírem elementos de liga, os aços para moldes (especialmente da classe do AISI P20 ou DIN 1.2738 e 1.2311) não são inoxidáveis, sendo os teores de Cr e outros elementos adicionadas para promover temperabilidade, mas não para inoxidabilidade. Assim, corrosão eletroquímica, na temperatura ambiente em contato com umidade, pode ocorrer com facilidade (Figura 9b). E, para evitá-la, devem ser tomados os cuidados específicos, em termos de evitar armazenagem em locais com tendência à corrosão (úmidos ou próximo de locais salinos) e meios protetivos, como óleos ou outros compostos contra a corrosão. Caso tais aspectos não sejam possíveis, sugere-se o uso de aços inoxidáveis (AISI 420 ou outros desenvolvimentos de cada fornecedor) ou emprego de coberturas (cromeação e niquelação), sendo a mudança do aço ainda o mais garantido.

Uma última falha importante diz respeito às aplicações de solda, muito empregadas em moldes para pequenas alterações de projetos ou desvios ocorridos durante a usinagem. Devido à alta temperabilidade*, os aços para molde tendem a temperar e gerar camadas duras após solda; em casos extremos podem surgir trincas (Figura 9c) ou defeitos nas regiões após texturização. Para evitar tais aspectos, pré-aquecimento são extremamente recomendados. Um novo tratamento

* que garante a homogeneidade após têmpera, sendo esta normalmente conduzida pelo fabricante do aço

térmico de revenimento em temperatura 50°C inferior ao último revenimento deve ser aplicado, para reduzir as diferenças microestruturais e de dureza entre as regiões da solda e regiões adjacentes, reduzindo assim a tendência a trincas ou problemas de texturização e polimento. Para recomendações específicas, recomenda-se o catálogo Welding of Tool Steel.⁽⁶⁾ O uso de aços para moldes com menor teor de carbono também auxilia na soldabilidade, existindo no mercado novos desenvolvimentos neste sentido.⁽⁷⁾

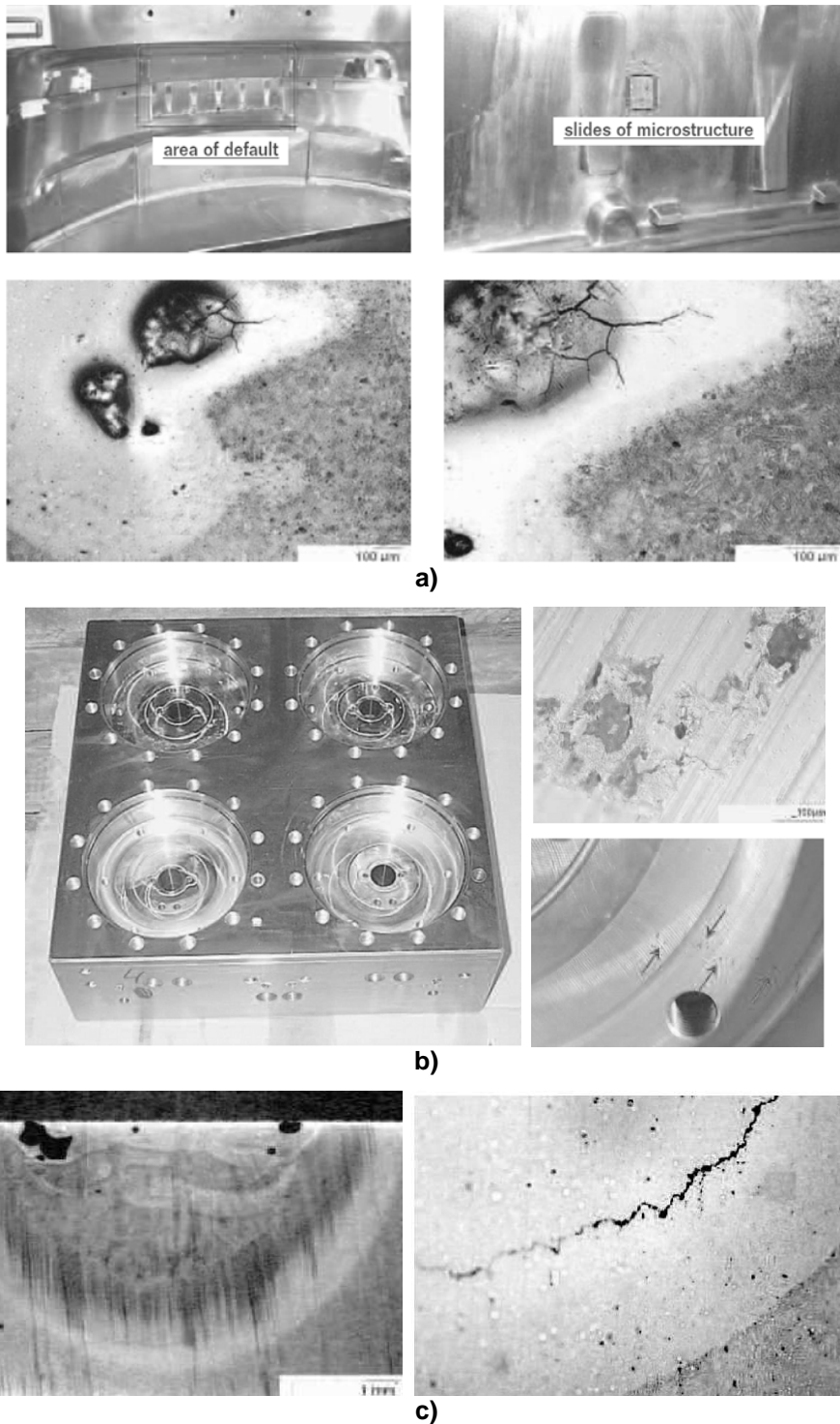


Figura 9: Falhas em moldes devido à problemas superficiais de: **a)** eletroerosão, **b)** corrosão e **c)** defeitos de solda.⁽³⁾

4 CONCLUSÕES

Os resultados descritos no presente trabalho promovem uma discussão sobre análises de falhas em ferramentas, moldes e matrizes, que podem ser resumidas nos pontos a seguir:

- Em aços para trabalho a frio, as principais falhas relacionam-se a trincas ou redução na resistência ao desgaste.
- Em trabalho a quente, o aquecimento tem também grande influência, porém as questões de trincas são igualmente importantes.
- Para moldes de plásticos, os aspectos de superfície são os mais importantes, especialmente em termos de eletro-erosão, corrosão e soldagem.
- Na maioria das situações, o procedimento correto de tratamento térmico é a única garantia de resultados adequados.
- Em resumo: A análise de falhas pode ser empregada como melhoria do desempenho de ferramentas, moldes e matrizes.

REFERÊNCIAS

- 1 ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool Steels**. 5. ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1998. p. 1-123; p. 219-250.
- 2 MESQUITA, R. A. O Controle Da Qualidade no Tratamento Térmico de Aços Ferramenta. A ser apresentado no ENEGEP 2010, UFSCar, Agosto, 2010.
- 3 MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. Failure Analysis in Tool Steels. **Failure Analysis of Heat Treated Steel Components**. Ohio: Material Park - ASM, 2008, p. 311-355.
- 4 THELNING, K-E. **Steel and Its Heat Treatment**. 2nd ed, London: Butterworth, 1984, 309 p.
- 5 NADCA no 229/2006 – Special **Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies**, Ed. North American Die Casting Association, Holbrook Wheeling, Illinois, 2006, 33p.
- 6 Catálogo: **Welding of Tool Steel**, Uddeholm Tooling, Hagfors, Sweden, 2002.
- 7 MESQUITA, R. A.; CAPPUCION, G. V.; BARBOSA, C. A. Propriedades do Aço Ferramenta VP100, Aplicado em Moldes para Plásticos. In: 7º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes – Moldes 2009, São Paulo: ABM 2009, CDROM.