

ESTUDOS DE MELHORIA DE VIDA DE FERRAMENTAS DE FORJAMENTO A QUENTE ¹

Bidá, A. G. ²
Silva, I. B. ³

Resumo

Este trabalho apresenta alguns estudos de melhoria de vida de ferramentas de forjamento a quente, conduzidos na forjaria da Eaton Ltda. - Divisão Transmissões. Tais estudos concentraram-se em engrenagens forjadas sem rebarba ("flash less"), em prensas mecânicas, e em eixos forjados em recaladoras. O estudo realizado observou a aplicação de ferramentas "seis sigma" na condução do projeto como um todo e a análise tradicional de vida de ferramentas de forjamento. Ambas as metodologias suportaram a análise das variáveis do processo de forjamento bem como a interpretação dos resultados obtidos.

Os resultados desta melhoria são expressivos, da ordem de 2 a 20 vezes da condição original, em termos de peças produzidas, reforçando a necessidade do entendimento de toda a cadeia produtiva de uma ferramenta para a obtenção do desempenho ideal de ferramentas de forjamento a quente.

Palavras-chave: vida de ferramenta; forjamento a quente; análise de falha; seis sigma.

1) *2.º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes.*

2) *Eng. ° Metalurgista, M.Sc. – Engenharia da Forjaria, Eaton Ltda. – Div. Transmissões.*

3) *Eng. ° Mecânico, Dr. – Engenharia da Forjaria, Eaton Ltda. – Div. Transmissões.*

1. Introdução

Forjados para a indústria automotiva são utilizados em peças que requerem resistência adequada para aplicações específicas, tais como motores, chassis, e sistemas de transmissão de potência, produzidos, em sua grande maioria, por forjamento a quente.

Considerando o custo deste tipo de forjado, mão de obra e matéria-prima são os componentes de maior peso no custo fixo, os gastos com ferramentas tornam-se os principais insumos administráveis em uma forjaria. Assim, a utilização racional deste recurso é fundamental para garantir a competitividade necessária em um mercado globalizado. A principal ação para a redução de custos em uma forjaria é o aumento da vida útil das ferramentas.

A análise de falhas tradicional envolve o ajuste das condições de forjamento, dos materiais utilizados e de seu processamento, e de melhorias dos projetos das ferramentas. A importância deste tipo de estudo pode ser bem observada no trabalho de Babu, Ribeiro e Shivpuri ^[1], que recentemente revisaram a análise da engenharia de materiais e de superfície aplicada a ferramentas de forjamento de precisão.

A análise destas técnicas tradicionais baseia-se em tentativas e erros nos ajustes das variáveis de processo de forjamento, de projeto e da manufatura das ferramentas. Porém, mesmo com os recentes desenvolvimentos da tecnologia de CAE na previsão de vida de uma ferramenta de forjamento ^[2], tal tecnologia ainda não está totalmente consolidada e disponível para as forjarias no momento da concepção de uma ferramenta.

Neste trabalho descrevem-se casos de melhoria de vida de ferramenta através da análise tradicional das variáveis de forjamento. Porém, tal análise é orientada através de ferramentas “seis sigma”, o que permitiu uma redução de custo mais agressiva, uma vez que tal metodologia de gestão permitiu orientar as análises de falhas de ferramentas, otimizando a metodologia de análise tradicional.

2. Revisão e Técnica Experimental

2.1. A Metodologia “Seis Sigma”

Dentro da filosofia “Lean Manufacturing”, a ferramenta “Seis Sigma”, para análise e solução de problemas, tem-se consolidado como um importante método na condução de projetos focados em problemas específicos de manufatura.

Esta ferramenta foi desenvolvida na Motorola por Bill Smith em 1986, para padronizar a análise de rejeições. Com a premiação da Motorola com o Malcom Baldrige Quality Award, em 1988, esta metodologia difundiu-se rapidamente desde grandes corporações até pequenas empresas.

O “seis sigma” baseia-se no método estatístico tradicional de análise de dados, somando-se a uma análise sistemática de projetos conhecida por DMAIC (“Define, Measure, Analyze, Improve and Control”). Discussões a respeito desta metodologia podem ser fartamente observadas tanto em artigos técnicos como na internet, onde um ponto de partida básico é o “site” da própria Motorola. ^[3]

2.2. A análise de falhas de ferramentas

O modo de falha de uma ferramenta de forjamento a quente depende das suas condições de utilização, isto é, do processo de forjamento, e das características do material, processamento e superfície da ferramenta. Os principais modos de falha são;

- Desgaste (abrasivo, adesivo ou por oxidação);
- Fadiga térmica (“heat checking”);
- Fadiga mecânica;
- Deformação Plástica.

Estes modos de falha em uma ferramenta comum de forjamento a quente podem ser visualizados na Figura 1.

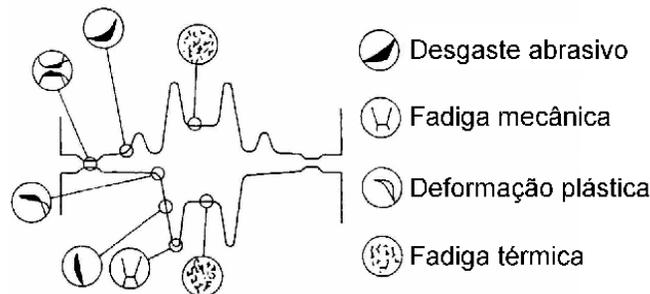


Figura 01: Modos de falhas característicos de ferramentas de forjamento a quente. [4]

Estes modos de falha foram descritos por Lange, Cser, Geiger e Kals [5], os quais foram analisados em termos dos diversos parâmetros de forjamento que interagem na determinação da causa específica da falha de uma ferramenta. A Figura 2 apresenta a complexa interação dos parâmetros de forjamento.

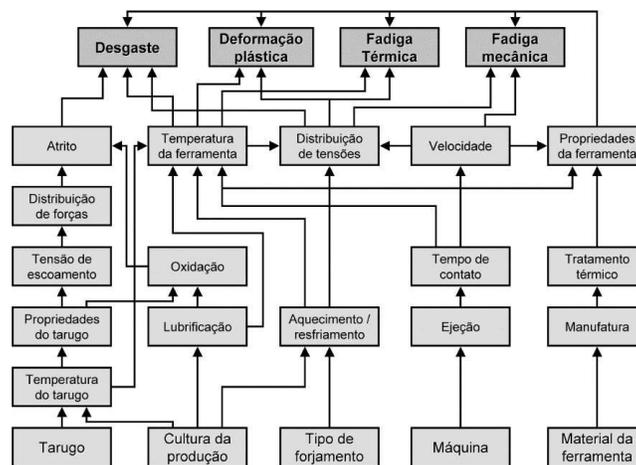


Figura 02: Interação dos parâmetros de forjamento e dos modos de falha de ferramentas. [5]

Esses mesmos autores destacam algumas importantes variáveis de projeto relacionadas aos modos de falha por fratura (fadiga mecânica) e desgaste:

- Tarugo: tolerâncias e rugosidade superficial;

- Material do tarugo: tensão de escoamento;
- Projeto da ferramenta: elementos ativos, de suporte e de tensionamento;
- Geometria das ferramentas: ângulos, raios de canto e filete, deformação e qualidade superficial;
- Superfície da ferramenta: tipo de tratamento e de recobrimento;
- Material da ferramenta: dureza, resistência e tenacidade a fratura;
- Interface ferramenta/tarugo: lubrificação
- Fabricação da ferramenta: método de usinagem e tratamento térmico.

De uma forma geral pode-se separar os fatores que afetam a vida da ferramenta em três grupos ^[1]: Problemas com ferramentas (seleção da matéria prima, tratamento térmico, engenharia de superfície, manufatura da ferramenta e projeto); Problemas com tarugos (preparação do tarugo e tipo do aço) e Problemas com processo (temperatura de forjamento, tipo e aplicação de lubrificante, tempo de ciclo e outras práticas de forjamento).

3. Resultados e Discussão

3.1 Definição (“Definition”)

Nesta etapa, foram definidos os membros da equipe envolvidos com o projeto. Basicamente esta equipe é formada pela engenharia da forjaria, pela produção (forjadores) e por funcionários do quarto de ferramentas da forjaria.

Em seguida foi definido o escopo das atividades: eliminar a falha precoce de ferramentas. Por falha precoce entende-se que a vida da ferramenta foi menor que o lote de forjamento.

3.2 Medição (“Measure”)

Durante a etapa de medição, a primeira atividade foi o levantamento de todas as falhas de ferramentas da forjaria durante um período específico, neste caso, de um mês. A Figura 3 apresenta os resultados do “benchmark” das falhas da forjaria da Eaton Ltda., comparados com a análise disponível na literatura. ^[5]

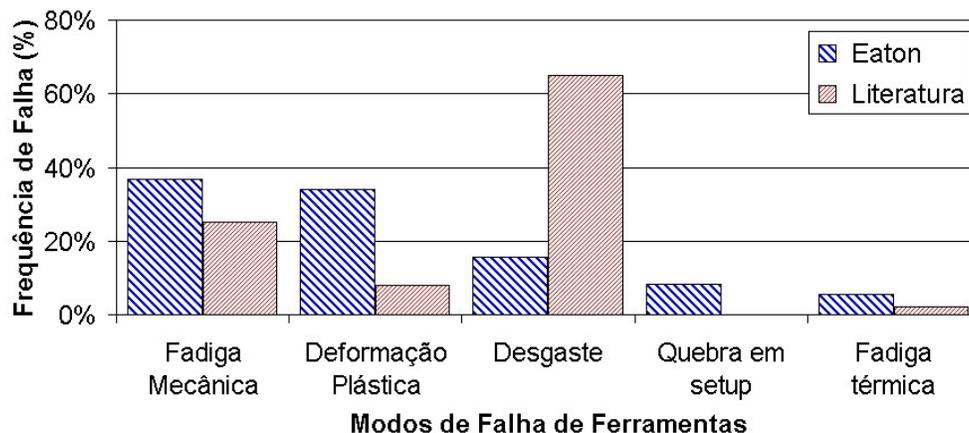


Figura 03: “Benchmark” comparativo do modo de falha das ferramentas da forjaria da Eaton Ltda, em comparação com os dados ^[5] de literatura.

A partir destes dados foi possível observar que a utilização das ferramentas de forjamento na Eaton Ltda. apresentava problemas diretamente relacionados à fadiga mecânica e a deformação plástica, o que limitava o uso por falhas prematuras, confirmando as expectativas iniciais. A determinação dos modos de falha principais foi possível, com o auxílio da Figura 2, avaliando-se as principais variáveis “de entrada” para cada caso de falha de ferramenta.

3.3 Análise (“Analyze”)

Na etapa de análise foi montada uma lista das falhas prematuras, considerando uma “análise de Pareto” para cada uma destas falhas. Assim, as diversas falhas puderam ser classificadas, orientando a foco das ações sobre as variáveis de entrada. A Figura 4 apresenta parte da listagem obtida.

Forging	Die	D	Machine	Proc	Batch	Life	Demand	Failure	Input Variables
9702620311F	300200231-7	4	HAS3150	Hot	2000	500	4,0	Mech Fatigue	Stress Distribution and Tool Manufacturing
9702621012F	300200232-9	4	HAS3150	Hot	2000	500	4,0	Mech Fatigue	Stress Distribution and Tool Manufacturing
9722620034F	300200252-5	3	HAS3150	Hot	2000	800	2,5	Mech Fatigue	Stress Distribution and Forging Geometry
9702621534F	300200249-6	3	HAS3150	Hot	1500	700	2,1	Mech Fatigue	Stress Distribution and Forging Geometry
3347109	300200261-6	4	HAS3150	Hot	700	500	1,4	Mech Fatigue	Stress Distribution
3346645	300200169-8	4	HAS3150	Hot	1200	1000	1,2	Mech Fatigue	Stress Distribution
9722620405F	300460106-2	10	UP6"	Hot	1700	300	5,7	Thermal Fatigue	Forging Process and Tool Material Properties
9722620605F	300460108-6	10	UP6"	Hot	800	200	4,0	Thermal Fatigue	Forging Process and Tool Material Properties

Figura 04: Exemplo de listagem das falhas prematuras destacando a demanda, o modo de falha e a variável de entrada.

Nesta listagem podem-se observar detalhes como o modo de falha, as variáveis principais (relacionadas diretamente como a causa da falha) e a relação vida de ferramenta/lote (o que determinava a demanda de ferramentas).

3.4 Melhorias (“Improve”)

Durante a execução das melhorias, focando-se as ações diretamente nas variáveis de entrada, pôde-se observar os resultados relacionados à melhoria de vida da ferramenta. A seguir são apresentados alguns destes casos:

- Fadiga mecânica em ferramentas de forjamento a quente em prensa “flash less” com canal de óleo;
- Fadiga térmica em punções profundos de recalçadora;
- Fadiga mecânica em ferramentas de recalçadora com grande diferença de diâmetro (\emptyset);

3.4.1 Fadiga mecânica em ferramentas de forjamento a quente em prensa “flash less” com canal de óleo

A fadiga mecânica observada estava diretamente relacionada ao projeto da ferramenta, que implicava na utilização de eletroerosão como modo de manufatura em uma região crítica desta (raio de canto). As geometrias do produto forjado e da

ferramenta foram revisadas de modo a eliminar tal problema. A Figura 5 apresenta uma composição com o projeto original do forjado, a falha observada ^[6] na ferramenta (após forjamento de 500 peças) e a microestrutura típica ^[7] do processo de erosão na região do canto de 45° do produto.

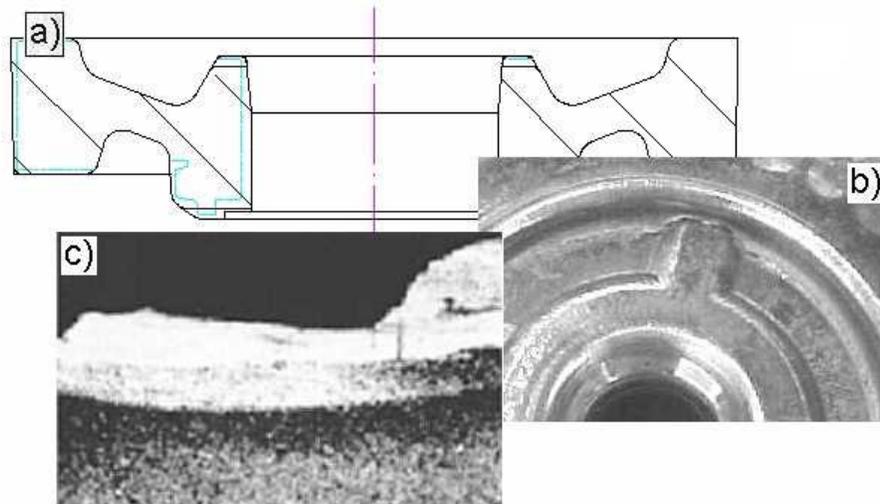


Figura 05: Projeto original do forjado (a), com detalhe para a trinca observada na ferramenta (b) ^[6] e a microestrutura característica de erosão (c) ^[7] na região do “raio” de canto da ferramenta.

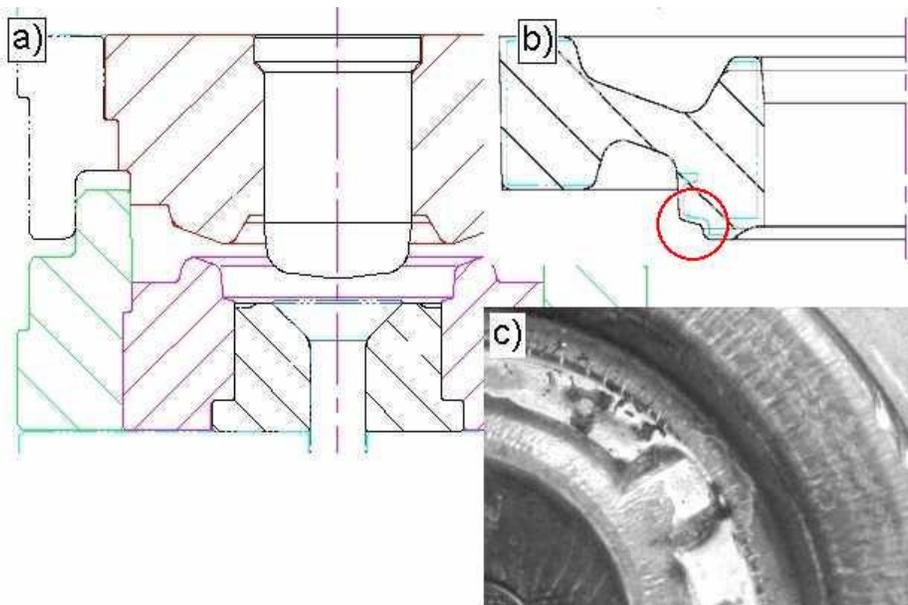


Figura 06: Geometria da ferramenta (a) e do forjado (b) após a modificação e detalhe da ferramenta (c) nesta nova condição após o forjamento de 2000 peças.

A Figura 6 apresenta a geometria modificada da ferramenta com detalhe para o aspecto dela após o forjamento de 2000 peças. É importante destacar a alteração do modo de falha: fadiga mecânica, na Figuras 5 (b) e desgaste com fadiga térmica, na Figura 6 (c).

3.4.2 Fadiga térmica em punções profundos de recaladora

A análise das ferramentas [8], indicou a presença de uma fadiga térmica severa, acompanhada de problemas microestruturais do material da ferramenta, neste caso DIN 56NiCrMoV7, W.Nr. 1.2714. A Figura 7 apresenta uma vista geral da falha da ferramenta e das trincas de fadiga térmica (“heat checking”), analisadas com auxílio de líquido penetrante, e o aspecto da fratura com detalhe para a região de início da fratura por fadiga.

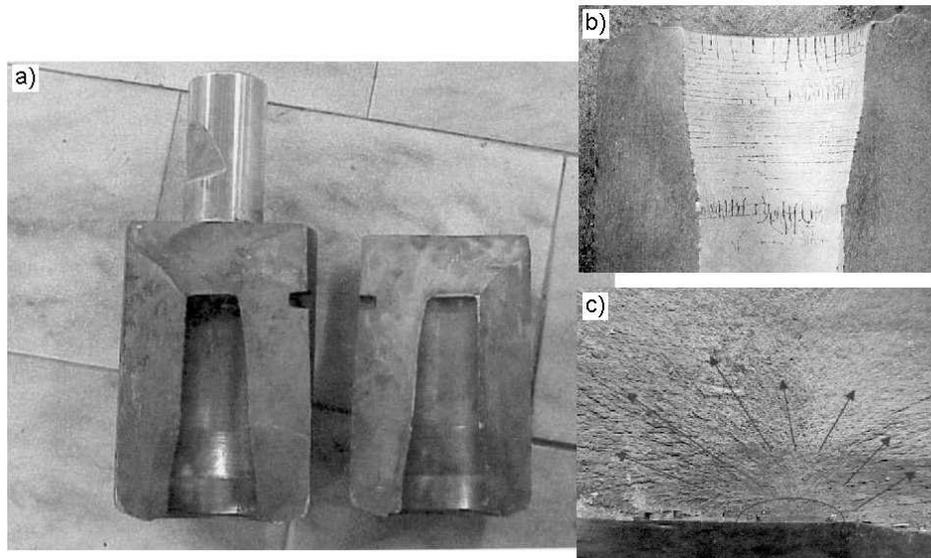


Figura 07: Vista geral da falha da ferramenta (a), com detalhe para as trincas de fadiga térmica (b) e detalhe da região de início da fratura por fadiga (c).

A Figura 8 evidenciou a presença de filmes de óxidos em contorno de grão, provavelmente provenientes do processo de fabricação do aço ou do método de tratamento térmico da ferramenta.

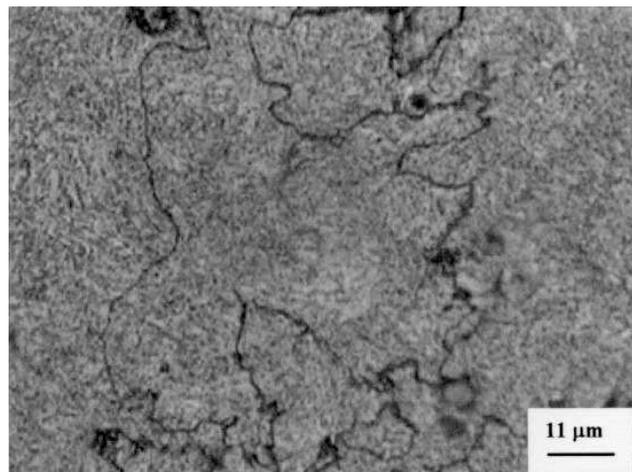


Figura 08: Micrografia de uma seção transversal da ferramenta fabricada com o aço DIN 56NiCrMoV7 (ataque: nital).

As ações relativas a esta falha prematura incluíram:

- Substituição do aço DIN 56NiCrMoV7 (que era normalmente adquirido de distribuidores locais) por aço AISI H13 (com certificação de origem);
- Alteração da faixa de dureza de 42 – 46 HRc para 46 – 48 HRc;
- Substituição do tratamento em banho de sal por têmpera a vácuo, seguida de nitretação a gás, com controle de camada branca.

Com estas ações, a vida de forjamento deste tipo de ferramenta, que se situava na faixa de 300 a 500 peças forjadas, passou para 7000 a 10000 peças forjadas.

3.4.3 Fadiga mecânica em ferramentas de recalçadora com grande diferença de diâmetro (\emptyset)

A fratura das ferramentas indicava a presença de fadiga mecânica, devido ao conceito de geometria da ferramenta, acompanhado de uma leve fadiga térmica. A Figura 9 apresenta a forma da trinca originalmente observada (após o forjamento de 500 peças) e o novo conceito de projeto proposto. Além desta revisão de projeto de ferramenta, ocorreu a substituição do material da ferramenta de DIN 56NiCrMoV7, tratado para uma faixa de 42 – 46 HRc, para AISI H13, tratado para 46 – 48 HRc.

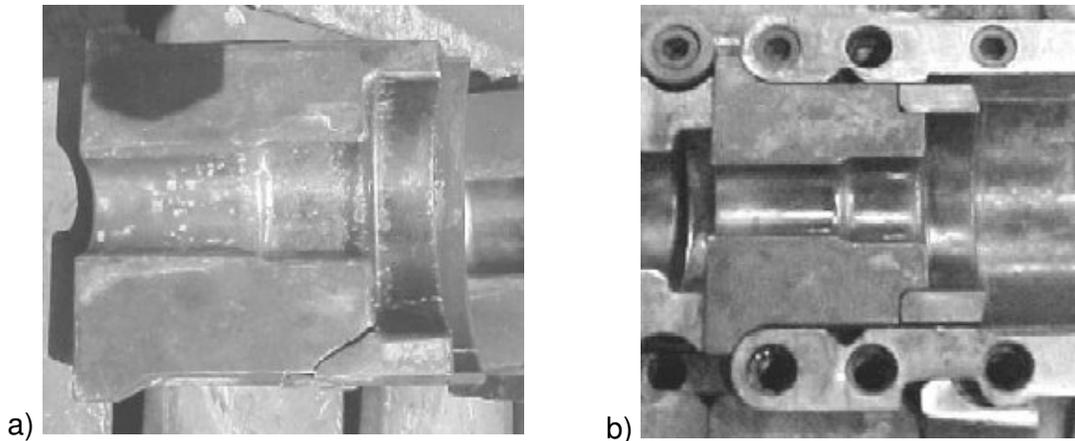


Figura 09: Trinca observada na ferramenta original (a) e o novo conceito de montagem desenvolvido (b).

3.4.4 Resumo dos resultados

A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os três casos apresentados neste trabalho:

Tabela 01: Resumo dos resultados de melhoria de vida de ferramenta.

Forjado	Lote (peças)	Modo de Falha Anterior	Modo de falha Atual	Vida Original	Vida Atual
Engrenagem	2000	Fadiga mecânica	Desgaste	500 a 700	2.000 a 3.000
Eixo principal	2500	Fadiga térmica	Fadiga mecânica	300 a 500	7.000 a 10.000
Eixo piloto	1500	Fadiga mecânica	Desgaste	500 a 700	Maior que 5.000

3.5 Controle (“Control”)

A última atividade, e talvez mais importante, em um projeto utilizando a metodologia “seis sigma” é o controle dos resultados após a melhoria. Uma vez que este trabalho abrangeu um grande número de ferramentas (aproximadamente 10% de todos os forjados), optou-se pela implementação um sistema de controle “visual” das falhas de ferramentas. A Figura 10 apresenta o sistema utilizado na forjaria da Eaton Ltda. com detalhe para a etiqueta de controle desenvolvida.

EATON	
CONTROLE DE FERRAMENTAS - FORJARIA	
N.º FERRAMENTA	DET. SÉRIE
30015.0420-2	3 -
N.º DO CHECK LIST	
TURNOS: 1.º <input checked="" type="checkbox"/> 2.º <input type="checkbox"/> 3.º <input type="checkbox"/>	
QUANT. PRODUZIDA	
DATA DA QUEBRA	
OPERADOR (CHAPA)	
MÁQUINA:	
<input type="checkbox"/> SMG (1493-1)	<input type="checkbox"/> PEDDINGHAUS (1188-1)
<input type="checkbox"/> MP 1000 1 (8838-0)	<input type="checkbox"/> PEDDINGHAUS (5521-4)
<input checked="" type="checkbox"/> MP 1000 2 (8839-9)	<input type="checkbox"/> PEDDINGHAUS (5524-5)
<input type="checkbox"/> MP 2000 (8835-7)	<input type="checkbox"/> ERFURT (8163-0)
<input type="checkbox"/> HAS3190 (1448-4)	<input type="checkbox"/> CROSS ROLLING (8818-2)
OCORRÊNCIA:	
<input type="checkbox"/> QUEBRA NO SETUP	
<input type="checkbox"/> QUEBRA DURANTE FORJAMENTO	
<input checked="" type="checkbox"/> DESGASTE	
<input type="checkbox"/> DEFORMAÇÃO (AMASSADA OU TORTA)	
<input type="checkbox"/> TRINCA	
PREENCHIMENTO DO ANALISTA	
<input type="checkbox"/> REGRAVAR	<input type="checkbox"/> SCRAP CÓDIGO
<input type="checkbox"/> SOLDAR	
<input checked="" type="checkbox"/> LIXAR	



Figura 10: Sistema de controle “visual” de falha de ferramentas de forjamento: Etiqueta de controle de falha (à esquerda) e quadro de falha por célula de produção.

4. Conclusão

A redução das falhas precoces de ferramentas atingiu os objetivos inicialmente estabelecidos, destacando-se os seguintes resultados:

- Aumento da vida de forjamento para valores superiores ao lote de forjamento. O aumento registrado variou de 4 até 20 vezes a vida original.
- Redução do custo de ferramentas de forjamento por peça forjada.
- Satisfação do cliente interno, o próprio forjador, evitando as paradas desnecessárias por falhas prematuras de ferramentas.

5. Referências bibliográficas

- [1] BABU, S.; RIBEIRO, D.; SHIVPURI, R. **Material and Surface Engineering for Precision Forging Dies**. Prepared for: Precision Forging Consortium, Ohio Aerospace Institute and National Center for Manufacturing Sciences. Ohio: The Ohio State University, June 1999.
- [2] SUZUKI, T.; AKASHI, T.; SUGIYAMA, S.; WATANABE, A.; TSUCHIYA, Y.; NAKANISHI, K.; TANAKA, T.; MATSUI, M. Development of CAE System for Prediction of Hot Forging Die Life, **TOYOTA Technical Review**, v. 52, n. 2, March 2003.
- [3] Motorola, Inc. **Motorola Univerity: Overview**. Disponível em: <http://mu.motorola.com/index.shtml> Acesso em 30 de abril de 2004.
- [4] KANNAPPAN, A. Wear in Forging Dies: A Review of World Experience I, **Metal Forming**, v. 36, n. 12, p. 335 – 343, December, 1969; Wear in Forging Dies: A Review of World Experience II, **Metal Forming** v. 37, p. 6 – 14, January 1970.
- [5] LANGE, K.; CSER, L.; GEIGER, M. ; KALS, J. A. G. Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming. Keynote Papers, **Annals of the CIRP**, vol. 41, n. 2, p. 667 – 676, 1992.
- [6] Eaton Ltda.; São Paulo, SP, Brasil, 2003.
- [7] Uddeholm Tooling AB, **EDM of Tool Steel**. Disponível em: http://utab.uddeholm.com/files/EDM-ENGLISH_000402.zip Acesso em 30 de abril de 2004.
- [8] CANCELIERI, H. A. **Relatório de Análise n.º 139.0734.03-I**. LABMAT Análises e Ensaios de Materiais Ltda., Junho de 2003.

Abstract

Cases of die life improvement developed at Eaton Valinhos Forge Shop were presented, with special attempting to hot forging tools.

The main goal was improve the life of forging toolings of flashless gears, produced in mechanical presses, and hot upsetting tool, used to produce large shafts. The methodology used to the overall project control was the "six sigma" and the traditional analysis was used in the analysis of each case of tooling failure. Both methodologies supported the forging variables analysis, as well, the results verified at the overall project.

Improvement results are expressive, about 2 a 20 times the original condition, regarding forgings produced per tooling shape. These results show the importance of the knowledge about the productive chain of tooling manufacturing to achieve the best behavior of hot forging dies.

Key words: die life; hot forging; failure analysis; six sigma.