

# DESGASTE DO PUNÇÃO DE FORJAMENTO A QUENTE – MECANISMOS DE DESGASTE

Márcio Henrique Pereira <sup>1,2</sup>, Roberto Martins de Souza <sup>1</sup>, Thales Sardinha Garcia Souza <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Fenômenos de Superfície – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

<sup>2</sup> Neumayer Tekfor Automotive Brasil Ltda.

[marcio.pereira@amtektekfor.com](mailto:marcio.pereira@amtektekfor.com), [robertosouza@usp.br](mailto:robertosouza@usp.br),  
[thales.souza@amtektekfor.com](mailto:thales.souza@amtektekfor.com)

## RESUMO

A indústria automobilística é responsável pelo consumo por cerca de 60 % de todos os produtos forjados. Desenvolvido a milhares de anos, o forjamento passou por inúmeras melhorias e aperfeiçoamentos até tornar-se um processo de fabricação moderno e capaz de agregar inúmeras características importantes para os produtos de diversas aplicações. A demanda crescente por produtos forjados fomentou a busca por processos mais robustos nos quais as ferramentas de forjamento desempenham um papel relevante para o atingimento de lotes de produção maiores sem que haja detrimento da qualidade do produto. Este trabalho buscou identificar os modos de desgaste existentes em uma ferramenta de forjamento a quente, um punção, utilizada em uma prensa mecânica de acionamento excêntrico horizontal de múltiplos estágios destinada à fabricação de produtos para a indústria automobilística. Foi selecionada uma porca de roda forjada em aço SAE 1045 que possui demanda anual elevada e consequente necessidade de ferramentas. Utilizou-se dois punções no forjamento, os quais foram fabricados em aço H-10 tratado termicamente para atingir dureza de 50-52 HRC. Esta análise possibilitou identificar os modos de desgaste nas diferentes regiões de uma ferramenta de forjamento a quente utilizada em prensa mecânica excêntrica horizontal de múltiplos estágios.

## INTRODUÇÃO

Dados recentes mostram que os maiores países produtores de veículos são China, Estados Unidos, Japão, Alemanha, Coreia do Sul, Índia, México e Brasil, respectivamente em ordem decrescente de produção. Juntos, estes países produziram mais de 65 milhões de veículos em 2014 [1]. Um estudo realizado pela

Euroforge<sup>1</sup>, mostrou que o maior consumidor de produtos forjados é a indústria automobilística, com uma necessidade anual de 58% de tudo o que é produzido [2].

Para atender a demanda crescente de produtos forjados, são necessárias ferramentas que suportem os esforços mecânicos, o desgaste e a fadiga durante toda a sua utilização na produção. Ferramentas com desempenho satisfatório devem atender os requisitos anteriores e também ter o uso otimizado para contribuir com o aumento da produtividade e com a redução dos tempos de paradas de máquina para substituição delas [3, 4, 6, 7, 8].

Muitos trabalhos conduzidos ao longo dos últimos anos apontam para o desgaste de ferramentas como causador de cerca de 70% dos danos nas ferramentas [6, 7, 8, 12]. Porém, estudos conduzidos recentemente apontam para a fadiga térmica como o modo de desgaste mais encontrado em ferramentas de forjamento a quente [14, 15, 16]. No forjamento, o desgaste é resultado de uma interação complexa de variáveis que formam o tribossistema<sup>2</sup> típico do forjamento a quente [3, 4, 8, 12, 13, 14, 15, 16].

A alteração nas características originais da superfície e a consequente perda, ou não, de material da superfície devido ao movimento relativo entre duas ou mais superfícies que estão em contato é denominado desgaste [4, 6, 7, 10, 12]. No forjamento a quente os modos de desgaste que mais se destacam são abrasão, adesão e fadiga térmica [3, 4, 13, 14, 15, 16]. A diferença entre os tipos de desgaste está diretamente ligada à intensidade de desgaste e quantidade de material removida da superfície [4, 8, 10, 12].

Este trabalho focou na identificação dos tipos de desgaste existentes em uma ferramenta de forjamento a quente utilizada em prensa mecânica excêntrica horizontal de múltiplos estágios onde são produzidos elementos de fixação de veículos comerciais leves e pesados.

## **1. EXPERIMENTAL**

O procedimento experimental foi realizado em uma indústria de produtos forjados destinados às aplicações automobilísticas. Parte das análises de laboratórios foram feitas na indústria e outra parte conduzida no Laboratório de Fenômenos de Superfícies da Escola Politécnica da USP, em São Paulo.

A porca de roda, Figura 1, selecionada é um produto de aplicação indispensável na fixação das rodas aos cubos de roda. Geralmente, são utilizadas entre 8 e 12 porcas em cada roda, logo conclui-se que é um produto de elevada produção anual.

---

<sup>1</sup> Euroforge – Associação dos Fabricantes de Produtos Forjados da Europa [2]

<sup>2</sup> Tribossistema é a interface formada entre as superfícies em contato, o meio interfacial e a atmosfera na qual as superfícies estão inseridas [11, 12].

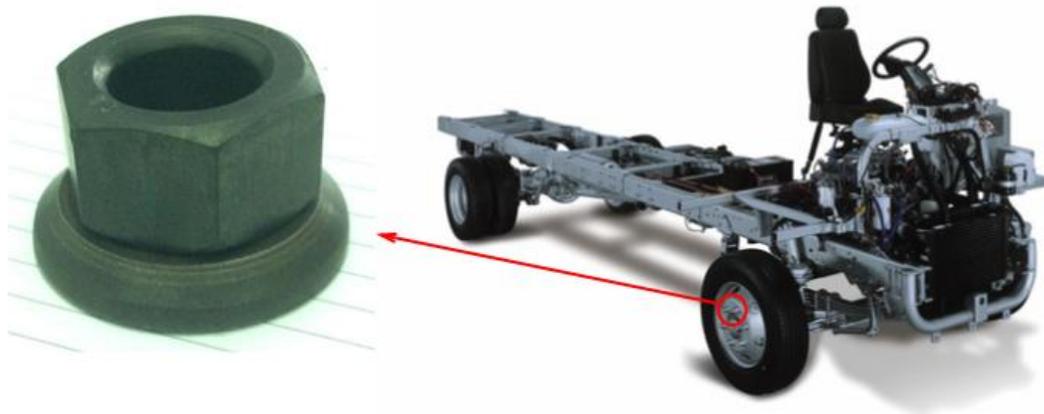


Figura 1 - Porca de roda - Aplicação em veículos comerciais leves e pesados

Baseado em levantamentos anteriores, foi selecionada a ferramenta com o maior consumo durante um lote de fabricação, que apresentasse o maior desgaste dentre todas as ferramentas utilizadas no forjamento e que fosse responsável pelo maior número de paradas de máquina. O resultado levou à seleção do punção apresentado na Figura 2. Ele é responsável por preparar a geometria interna da porca para garantir a operação posterior, de furação, e assegurar a precisão dimensional do furo da porca, onde será feita a rosca.



Figura 2 - Punção de forjamento

## 1.1. Forjado – Porca de Roda

A porca de roda selecionada é obtida pelo processo de forjamento a quente. O aço utilizado na fabricação é o SAE 1045. A sua função é unir as rodas aos cubos de roda e garantir que o conjunto fique fixado corretamente. A sequência de forjamento na prensa é precedida pelo aquecimento e corte dos tarugos, na etapa seguinte a ferramenta é alimentada, logo após é feito um recalque para retirar a oxidação superficial<sup>3</sup> formada durante o aquecimento. Em penúltimo é feito o forjamento onde é obtida as dimensões finais e, por fim, na última etapa é feita a furação. Após o forjamento e o tratamento térmico, a porca é montada sobre uma arruela, também forjada em aço. A Figura 3 mostra, em (a) a porca de roda montada com a arruela. Em (b), a porca é mostrada por cima com destaque para o furo e o sextavado. Em (c), a porca está apresentada de perfil onde observa-se a transição entre o sextavado e o colar da porca.

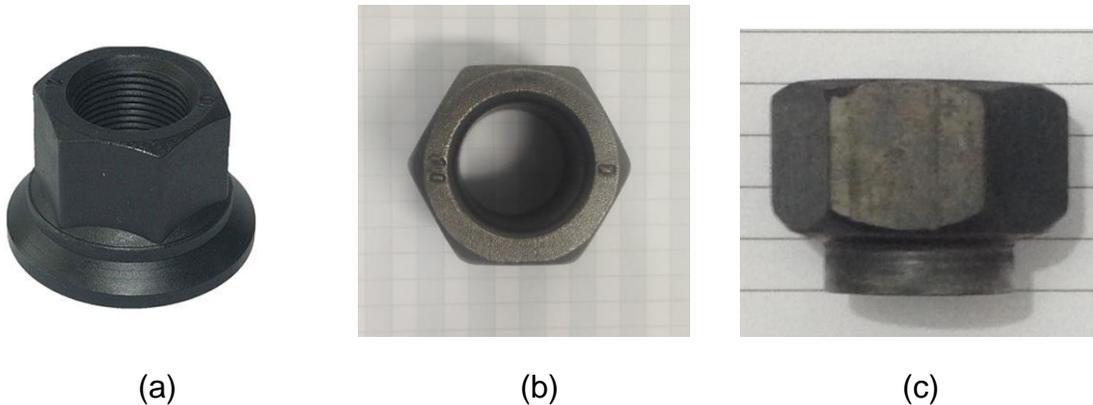


Figura 3 - Porca forjada a quente em aço SAE 1045. (a) Porca de roda montada com arruela; (b) Vista superior da porca sem arruela; (c) Perfil da porca de roda sem arruela.

O aço utilizado no forjamento é fornecido pela aciaria no formato de barras. Essas barras são obtidas por laminação a quente e são entregues no comprimento de 10 m. A temperatura de forjamento utilizada para forjar o aço SAE 1045 foi de  $1200^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ . A composição química do aço SAE 1045 utilizada no forjamento da porca segue a Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 1045 utilizado no forjamento

C	Si	Mn	P	S
0,43 - 0,50	0,15 - 0,35	0,60 - 0,90	$\leq 0,030$	$\leq 0,050$

## 1.2. Prensa

O forjamento foi realizado em uma prensa mecânica de acionamento excêntrico horizontal modelo Hatebur AMP20 [5]. Este equipamento é de elevada produtividade e forja automaticamente cerca de 6000 peças por hora [5]. A alimentação das barras

<sup>3</sup> A oxidação superficial formada na camada mais externa da matéria-prima é conhecida, vulgarmente, como “carepa”.

de matéria-prima, o transporte entre as 3 estações de forjamento e a esteira de saída de peças acabadas é totalmente automático e sem intervenção humana.

### 1.3. Ferramenta

O aço utilizado na fabricação dos punções foi o H-10. Esta liga de aço ferramenta foi desenvolvida para a utilização em prensas que utilizam refrigeração forçada por água e, conseqüentemente, operam em um ambiente com altas variações térmicas [9]. Foram construídos dois punções, No001 e No002, conforme a composição química nominal indicada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química nominal do aço H-10 utilizado na fabricação dos punções [9]

C	Mn	Si	Cr	S	V	Mo
0,32	0,30	0,30	2,85	< 0,003	0,50	2,80

O tratamento térmico aplicado à ferramenta foi a têmpera e o revenimento para auferir dureza a dureza desejada entre 50-52 HRC. O aço H-10 é da série de aços ligados ao cromo – Cr. O punção No001 foi utilizado apenas para o mapeamento de dureza que foi feito em um microdurômetro UHL VMHT com carga de 500 gf e velocidade de ensaio de 50  $\mu\text{m/s}$ . O segundo punção, No002, foi utilizado no forjamento de 10.000 porcas. O procedimento de mapeamento da dureza feito no punção No001 foi repetido para o punção No002, após o forjamento de 10.000 porcas. Ambos os punções tiveram as medidas de dureza levantadas conforme a distribuição de pontos apresentada na Figura 4, a seguir.

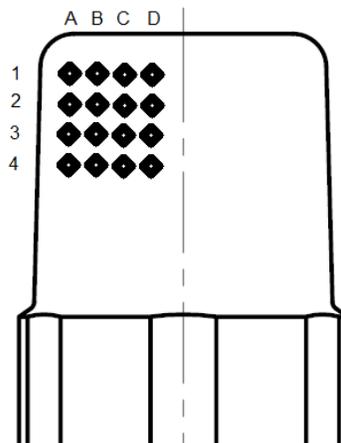


Figura 4 - Pontos de medição da dureza dos punções

A rugosidade da região de contato da ferramenta com o material da porca foi medido em um rugosímetro linear Mitutoyo SJ210. A Figura 5 mostra as regiões escolhidas para serem feitas as medições da rugosidade, tanto antes quanto após o forjamento. Para cada ponto do punção foram feitas quatro medições equidistantes a 90°, iniciando a primeira medição a 45° da linha centro do punção.

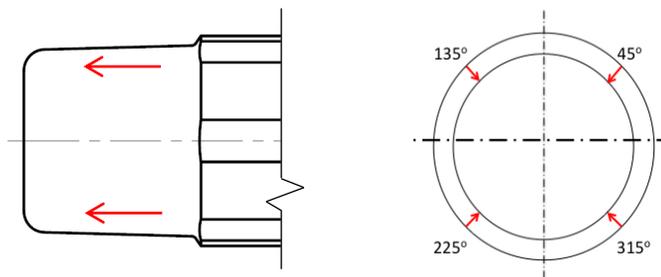


Figura 5 – Regiões para medição da rugosidade na ponta dos punções

Ambos os punções foram analisados em um microscópio eletrônico de varredura – MEV Jeol JSM-IT100 para ser feita a caracterização das superfícies. No MEV foram utilizados elétrons retroespalhados – BSE e elétrons secundários – SE, de forma a possibilitar a identificação dos materiais presentes na superfície do punção e a topografia da superfície, respectivamente, antes e após o forjamento. No MEV também foi possível avaliar os mecanismos de desgaste encontrados nas diferentes regiões do punção No002.

## 2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para comparação, as superfícies do punção novo e do punção após o forjamento foram colocadas lado a lado a fim de possibilitar a caracterização do aspecto geral de cada uma. A Figura 6 apresenta, com aumento de 2x, a alteração da superfície. Em (a), observa-se a superfície do punção No001, antes de ser utilizada no forjamento, com as linhas características de usinagem causadas pelo avanço e pela profundidade de corte da pastilha utilizada no torneamento. Em (b), apresenta-se a superfície do punção No002 com a nítida alteração na aspecto geral. Estão destacados dois riscos circunferenciais indicados pelas setas, além de protuberâncias em toda a superfície que se assemelha à material aderido.



(a)



(b)

Figura 6 - Comparação das superfícies do punção. Em (a) antes do forjamento e em (b) após o forjamento de 10.000 porcas.

Esse padrão de superfície se assemelha ao encontrado em diversos trabalhos publicados. Nesses trabalhos, as superfícies com aspecto semelhante são tratadas como resultado do desgaste abrasivo e adesivo [7, 8, 13, 14, 15, 16].

## 2.1. Análise da Microestrutura do Punção

A análise metalográfica do aço-ferramenta H-10 mostrou a presença de microestrutura composta por martensita revenida, conforme indicado em ambas as imagens da Figura 7. Em (a) é apresentada a microestrutura do punção No001 novo utilizado somente para os testes de laboratório. Em (b), é possível observar a microestrutura do punção No002, após o forjamento de 10.000 porcas. Nota-se que não houve alteração significativa na microestrutura do punção No002 quando comparada com o punção No001. Mesmo não efetuando a análise da microestrutura dos dois punções, adotou-se que as microestruturas são as mesmas para ambos os punções baseado no processo de fabricação, no mesmo material, H-10, mesma regulagem de máquina de usinagem e o mesmo tratamento térmico de têmpera e revenimento.



(a)

(b)

Figura 7 – Microestrutura martensítica do aço H10 utilizado no punção. Em (a) está mostrada a microestrutura do punção antes do forjamento. Em (b) é a microestrutura do punção após o forjamento a quente de 10.000 porcas

## 2.2. Mapeamento da Dureza do Punção

O resultado da dureza obtida para a ferramenta logo após a fabricação mostrou, no punção No001, que a variação foi de 50 pontos Vickers, o que foi equivalente a aproximadamente 2 HRC. A Tabela 3 mostra os valores médios obtidos para cada ponto de medição feito no punção No001.

Tabela 3 - Mapeamento de dureza do punção No001 antes do forjamento

	A	B	C	D
1	618 HV	602 HV	602 HV	586 HV
2	635 HV	585 HV	602 HV	618 HV
3	618 HV	602 HV	635 HV	618 HV
4	635 HV	602 HV	602 HV	602 HV

Para verificar se a exposição à temperatura de forjamento provocaria uma redução na dureza do punção, a verificação da dureza foi feita também no punção No002. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Mapeamento da dureza do punção No002 após forjamento de 10.000 porcas.

	A	B	C	D
1	592 HV	592 HV	593 HV	604 HV
2	618 HV	602 HV	613 HV	591 HV
3	599 HV	535 HV	551 HV	590 HV
4	583 HV	568 HV	560 HV	594 HV

Para verificar a possível variação de dureza entre o punção No001 e o punção No002 foi construída a Tabela 5 com intuito de evidenciar a perda de dureza por amaciamento entre o punção novo e o punção após a sua utilização no forjamento a quente.

Tabela 5 – Diferença da dureza média entre o punção novo e punção usado

	A	B	C	D
1	- 26 HV	- 10 HV	- 9 HV	+ 18 HV
2	- 17 HV	+ 17 HV	+ 11 HV	- 27 HV
3	- 19 HV	- 67 HV	- 84 HV	- 28 HV
4	- 52 HV	- 34 HV	- 42 HV	- 8 HV

O resultado do mapeamento da dureza não apresentou uma variação significativa de dureza. Entretanto, a diferença encontrada no ponto de medição C3 foi de 84 pontos Vickers, o que representa cerca de 4 pontos HRC. O segundo valor com maior variação foi observado no ponto B3, o qual sofreu uma redução na dureza de 67 pontos Vickers, cerca de 3 pontos HRC. Esperava-se encontrar um redução maior na dureza devido à exposição a alta temperatura do forjamento da porca, em média 1200° C, e devido a temperatura da superfície atingir valores próximos a 600° C, ou seja superior à temperatura de revenimento utilizada para o tratamento térmico das ferramentas [9, 13, 14].

### 2.3. Análise da Superfície do Punção

O forjamento a quente das 10.000 porcas gerou uma alteração acentuada no perfil da rugosidade do punção No002. A Figura 8 apresenta a comparação da seção transversal da ponta dos punções, No001 e No002, onde é possível observar, em (a), destacada pela curva vermelha, a ondulação gerada durante a usinagem do punção No001 e, em (b), a linha reta que acompanha a superfície lateral da seção do punção No002 não mostra o mesmo padrão de rugosidade.



(a)

(b)

Figura 8 - Comparação da seção transversal da superfície dos punções. Em (a), superfície do punção No001 antes do forjamento; em (b), o punção No002 após o forjamento.

A Tabela 6 mostra os valores de rugosidade obtidas para os punções. Esta alteração na superfície pode ter sido provocada por mecanismos de desgaste de corte gerado por asperezas mais duras durante o movimento relativo da ferramenta em relação ao material da porca. Existe ainda a possibilidade de haver adesão de material da porca, aço SAE 1045, sobre o aço H-10 do punção.

Tabela 6 - Rugosidade nos quatro pontos de medição dos punções novos

Pré-furo	45°		135°		225°		315°	
	Ra (µm)	Rz (µm)						
No001	2,02	10,59	1,88	9,45	1,93	9,88	1,95	10,54
No002	2,40	15,04	2,27	10,89	2,16	10,27	1,92	9,95

Com alteração perceptível no aspecto geral da superfície do punção, esperava-se uma rugosidade diferente do punção novo em relação ao punção usado, evidenciado pela alteração do perfil da rugosidade, pela formação de riscos ou sulcos, pela presença de protuberâncias e trincas. Após o forjamento das 10.000 porcas, houve a mudança na rugosidade da ponta do punção porém não suficiente para determinar qual tipo de desgaste foi responsável pela alteração. A Tabela 7 mostra o resultado, em parâmetros  $R_a$  e  $R_z$ , para o punção No002 após ter sido utilizado no forjamento.

Tabela 7 - Resultado da medição da rugosidade na ponta do punção No 002 após o forjamento de 10.000 porcas

Punção Usado	45°		135°		225°		315°	
	Ra (µm)	Rz (µm)						
No002	4,98	22,64	7,48	34,89	4,14	18,65	6,80	31,62

A comparação das superfícies, antes e após o forjamento, mostra uma perda dos picos da rugosidade da ferramenta, o que levaria à expectativa de uma rugosidade menor, mais “lisa” conforme comparado na figura 8. No entanto, foram encontrados valores superiores, tanto para valores  $R_a$ , quanto para valores  $R_z$ . Este aumento na rugosidade pode ser explicado pela aparente adesão desorganizada de material na superfície da ponta do punção.

A Figura 9 compara as superfícies do punção No001, antes do forjamento e do punção No002 após o forjamento. No MEV foi utilizado o filtro para captar os elétrons retroespalhados – BEC. Em (a), a superfície do punção No001 é vista ainda com marcas da usinagem. Em (b), na superfície do punção No002, verifica-se a perda do padrão de rugosidade. Em (c), foi feita uma imagem da superfície com aumento de 100x e nenhuma alteração na superfície foi verificada. Em (d), ficou evidente a presença de um sulco na superfície lateral do punção e de trincas pequenas.

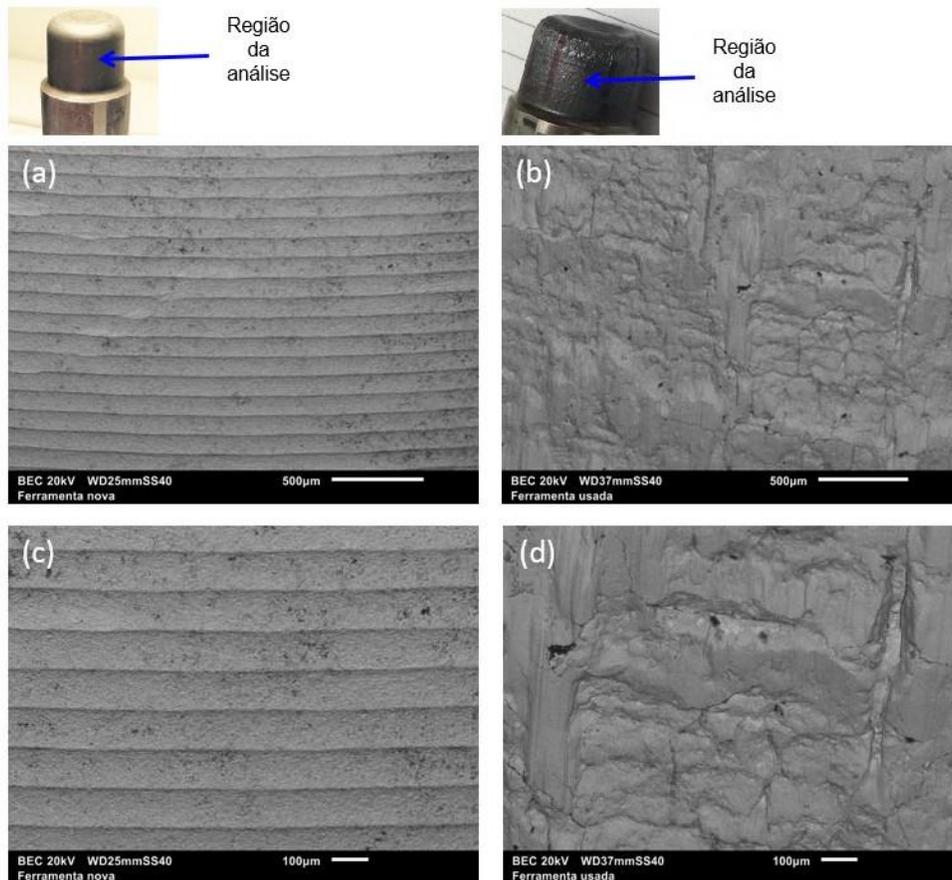


Figura 9 - Análise da superfície do punção no MEV. (a) superfície do punção No001 com aumento de 20x sem nenhuma marca que pudesse sugerir início de dano. (b) superfície do punção No002 após o forjamento perdeu as marcas de usinagem e apresenta deterioração do padrão de rugosidade. Em (c), aumento de 100x não evidencia nada anormal no padrão de rugosidade. Em (d), com aumento de 100x é possível verificar a formação de trincas e sulcos na superfície do punção No002.

Na mesma região do punção foi feita uma análise no MEV utilizando-se elétrons secundários – SE a fim de verificar-se a topografia da superfície do punção. A Figura 10 mostra em detalhe um sulco formado na lateral da ferramenta. Em (a), com aumento de 200x, o sulco fica evidente ao se comparar a região nas adjacências. A direção da deformação do sulco é a mesma da direção do movimento do punção durante o forjamento e tem sentido contrário ao movimento de avanço da ferramenta. Este aspecto evidência que a deformação ocorreu durante o forjamento. Em (b), com um aumento de 500x, focou-se nos riscos e sulcos encontrados dentro do sulco maior. Nota-se que dentro do sulco maior, não existe um padrão no alinhamento do

sentido. Existem sulcos e riscos nos dois sentidos, contrário e a favor do movimento do punção durante o forjamento.

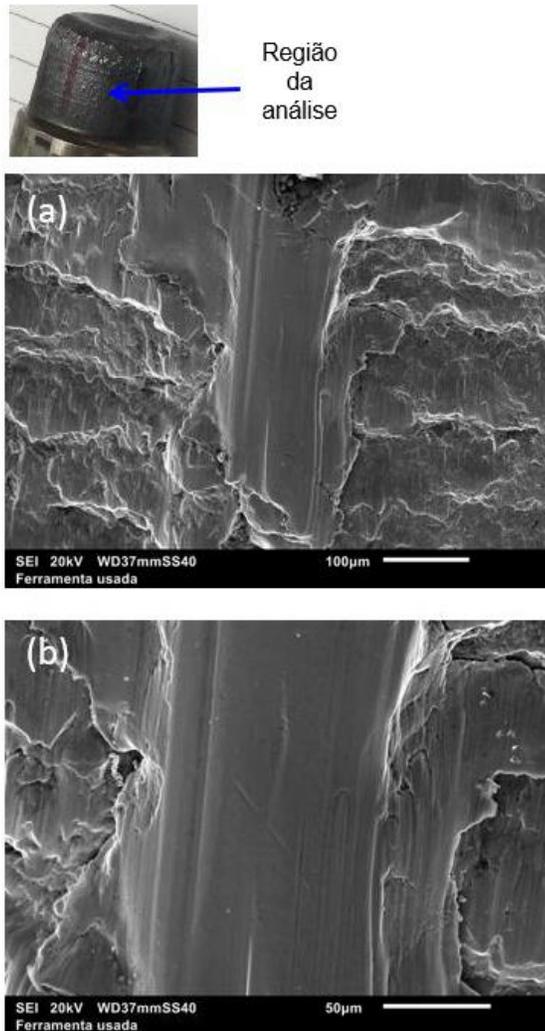
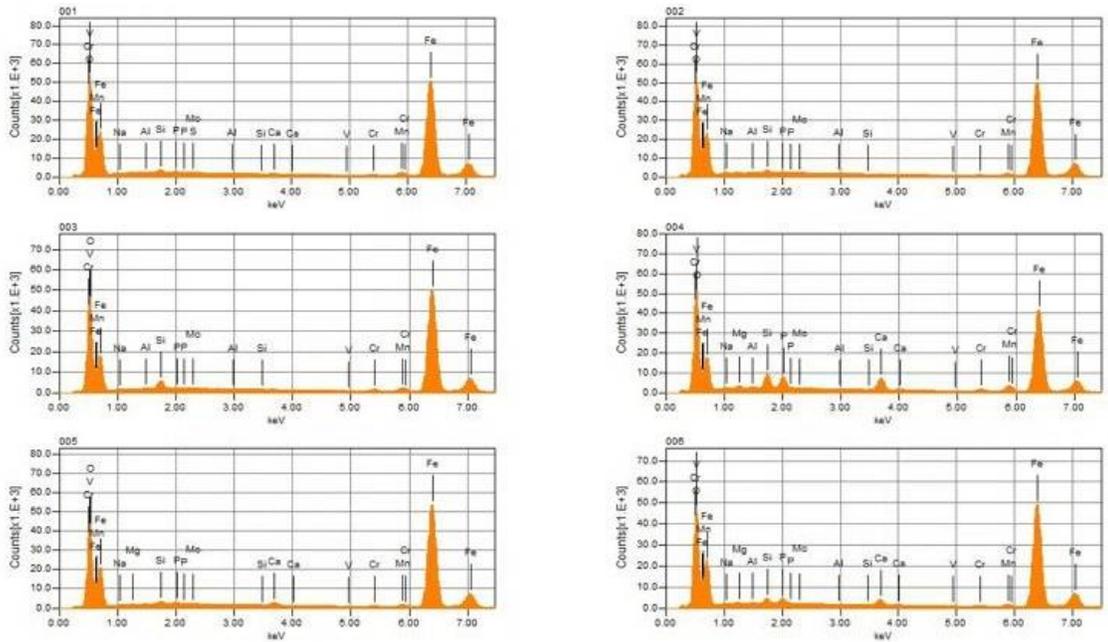
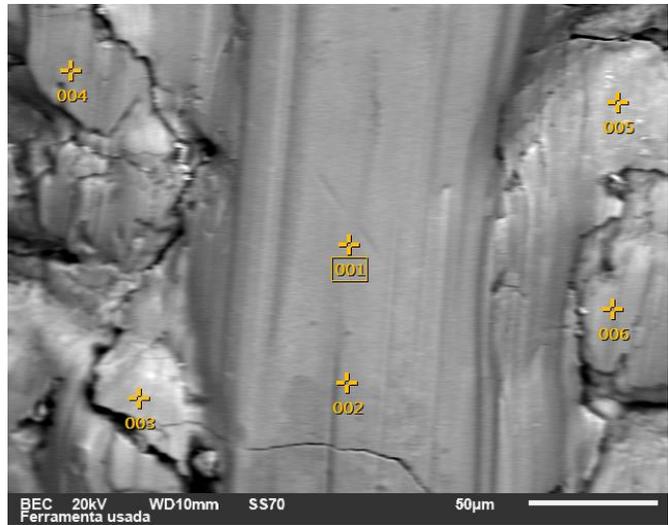


Figura 10 – Análise da topografia da lateral do punção No002. Em (a), a deformação causada na superfície do punção está na mesma direção, porém em sentido oposto. Em (b) destacou-se os riscos e os sulcos encontrados dentro do sulco maior.

Para conhecer a formação do sulco encontrado verificou-se com o MEV a composição química desta região do punção No002. Seis pontos foram escolhidos ao redor do sulco para avaliar, utilizando-se a espectrometria de raios x dispersos – EDS, qual a composição química e quais materiais estariam nesta região. A Figura 11 apresenta a disposição dos seis pontos de análise bem como os gráficos de energia dos raios x dissipados.



	P	Fe	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	V	Cr	Mn	Mo	
001	0.24	76.46	19.77	0.16		0.12	0.49	nd	0.18	0.00	0.46	2.02	0.09	
002	0.14	76.99	20.18	0.37		0.08	0.39			0.03	0.29	1.46	0.06	
003	0.19	77.14	18.10	0.12		0.16	1.37			0.01	0.68	2.19	0.04	
004	2.44	63.38	22.96	0.44	0.55	0.27	2.39		2.72	nd	0.91	3.72	0.22	
005	0.40	79.97	16.40	0.19	0.15		0.40		0.66	0.04	0.43	1.29	0.06	
006	0.93	75.11	19.30	0.21	0.28	0.10	0.85		1.19	0.06	0.45	1.47	0.04	
Average	0.72	74.84	19.45	0.25	0.33	0.15	0.98	0.00	1.19	0.03	0.54	2.02	0.09	
Standard deviation	0.09		0.11	0.06	0.02	0.03	0.02	0.05		0.00	0.01	0.03	0.23	0.02

Figura 11 – Análise da composição química da região do sulco formado na lateral do punção No002

Os resultados apresentados mostraram uma baixa energia dos elementos cromo - Cr, molibdênio - Mo e vanádio - V em todos os pontos escolhidos. Há baixa energia destes elementos indica que ocorreu adesão na lateral da ferramenta e o aço do forjado, SAE 1045, ficou aderida sobre a superfície do punção fabricado em aço ferramenta, H10. Não houve uma diferença suficientemente grande entre os seis pontos escolhidos, porém os valores encontrados são bastante diferentes do esperado para o aço H-10 utilizado na fabricação do punção

Verificou-se também a região do raio inferior do punção. O raio é importante na geometria da ferramenta para evitar a falha mecânica da ferramenta por ser um ponto de concentração de tensão e também para auferir à porca a geometria correta para que na operação posterior. A Figura 12 apresenta a região do raio inferior, destacado pela seta.

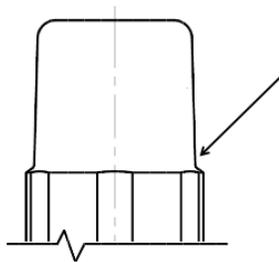


Figura 12 - Ilustração da região do raio inferior do punção

Esta região do punção é uma região onde o movimento relativo, entre a superfície e a porca forjada, é pequeno. Logo espera-se pouco dano ao punção devido à abrasão. A pressão de contato nesta região é menor que nas demais regiões do punção, o que não favorece a formação de junções e, portanto, não favorece a adesão. Esta parte da ferramenta também fica menos tempo em contato com a porca. Logo a pequena exposição a alta temperatura do forjado gera a expectativa de pouco dano térmico na superfície.

A Figura 13, foi feita a partir da análise pelo MEV utilizando-se elétrons secundários para verificar a topografia nesta região do punção. Na imagem (a), com aumento de 50x, verificou-se uma sutil mudança na topografia à medida que chega-se mais próximo ao raio inferior. Nesta região deixa-se de ter adesão gradualmente. Verificou-se também a presença trincas circunferenciais no punção. Em (b), com aumento de 100x, é possível verificar trincas em direções distintas, inclusive com oxidação no interior delas. Também é possível verificar ainda a presença de algumas marcas de usinagem na ferramenta, o que mostra que houve pouco ou nenhum desgaste nesta região abrasivo. Em (c), com aumento de 500x, focou-se uma região com diferentes tipos de desgaste e fadiga térmica bastante evidente. Nesta imagem é possível verificar uma região onde há adesão e, sobre a adesão, são observados riscos e sulcos. A fadiga térmica fica evidente quando observa-se o aspecto quadriculado da superfície, assemelhando-se ao leito de um rio seco [8, 14, 15, 16].

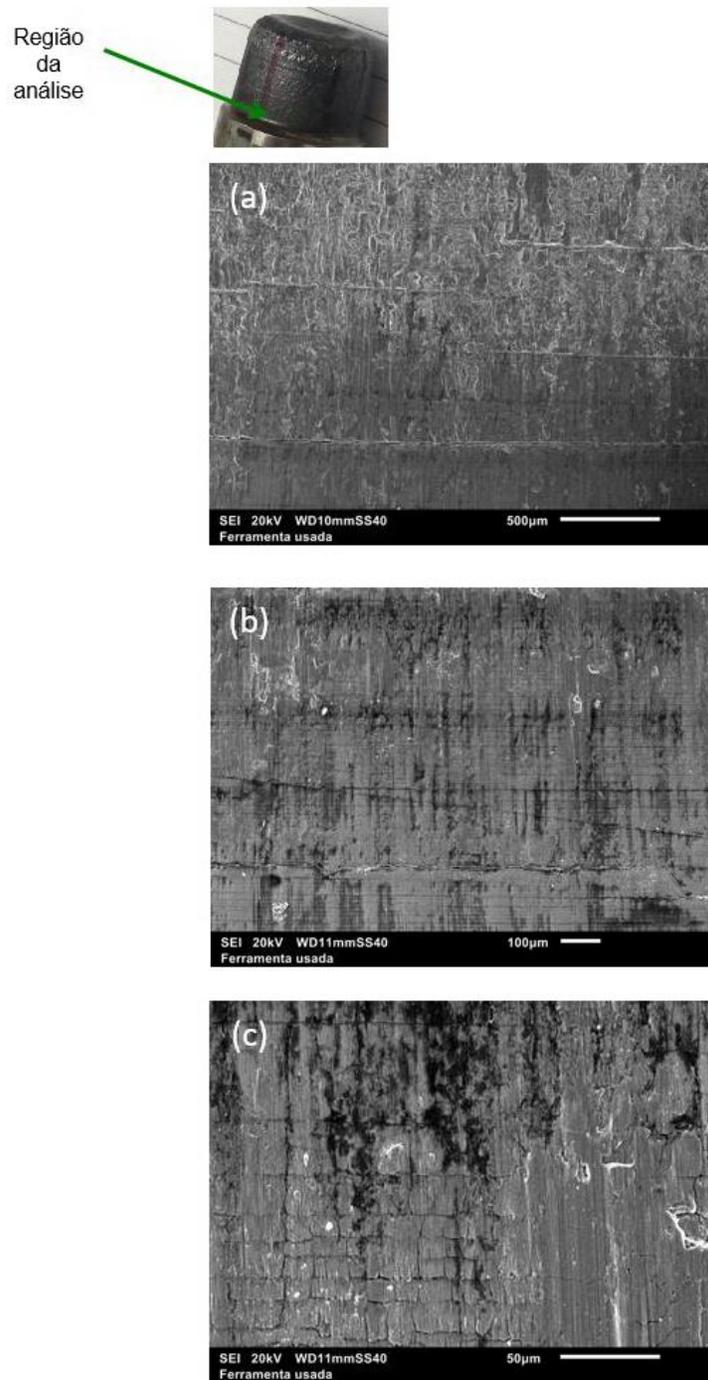
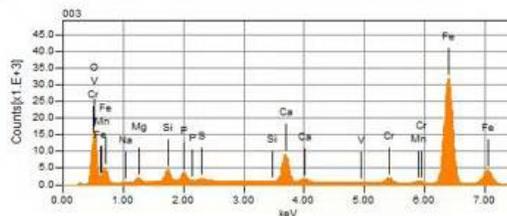
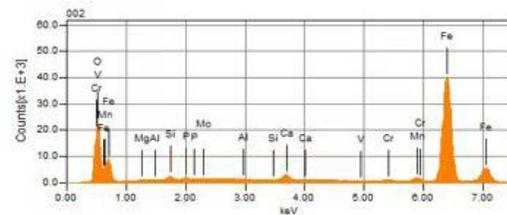
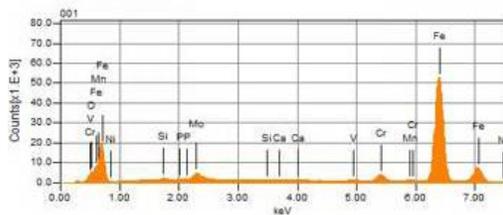
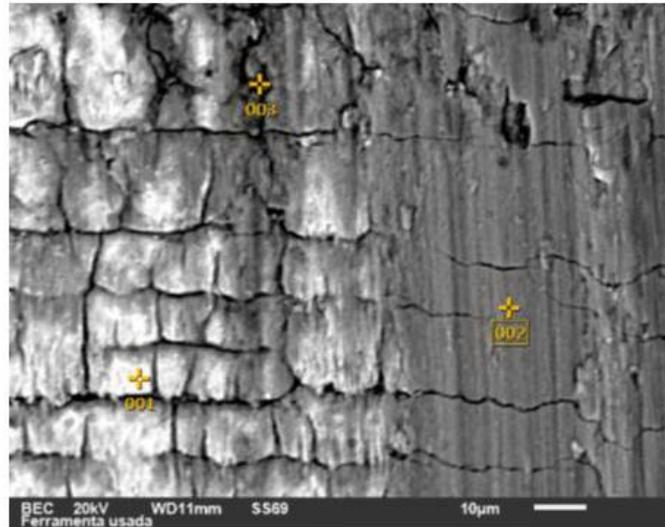


Figura 13 – Análise do raio inferior do punção No002. Em (a), verifica-se a transição entre tipos de desgaste nas regiões do punção. Em (b), verificam-se as trincas em direções distintas e as marcas de usinagem ainda no punção. Em (c), observa-se a fadiga térmica e a adesão.

Foi feita a análise por elétrons retroespalhados – BEC para identificar a ocorrência de adesão na superfície do punção. A figura 14 mostra a seleção dos três pontos de análise por EDS e os respectivos resultados de concentração de energia.

Região da análise



	P	Fe	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	V	Cr	Mn	Ni	Mo	
001	0.04	90.24	1.55				0.28		0.06	0.44	2.97	0.68	0.26	3.47	
002	0.37	81.42	13.35		0.13	0.07	0.59		1.15	0.04	0.63	2.15		0.11	
003	1.63	72.47	13.73	0.32	1.12		1.80	0.33	5.49	0.28	1.87	0.95			
Average	0.68	81.37	9.54	0.32	0.63	0.07	0.89	0.33	2.24	0.25	1.83	1.26	0.26	1.79	
Standard deviation	0.55		5.14	2.42	0.00	0.35	0.00	0.53	0.00	1.88	0.02	0.03	0.18	0.00	1.19

Figura 14 – Análise EDS do punção No002 na região próximo ao raio inferior.

Os três pontos escolhidos, 001, 002 e 003, foram posicionados sobre uma região que acreditava-se que houvesse adesão e onde não houvesse esse padrão de material aderido. Os resultados para os pontos 001 e 003 mostraram a presença de Cr e Mo em teores próximos ao do valor nominal do aço ferramenta H-10. Já o ponto 002, apresentou baixo teor destes elementos. Logo, é possível afirmar que na região do ponto 002 houve adesão sobre a superfície do punção.

## CONCLUSÃO

A utilização do ambiente industrial favoreceu o estudo do desgaste da ferramenta de forjamento a quente no tribossistema real em que ela é utilizada. A tentativa de estudar o desgaste do punção sem reproduzi-lo em laboratório apresenta a vantagem de ser real. Sem possíveis interferências e simplificações adotadas na tentativa de representar o processo. No entanto, o controle de inúmeras variáveis que não fizeram parte do estudo e foram adotadas como conhecidas, podem influenciar no resultado.

Contudo, este estudo conseguiu identificar e comparar com a literatura os tipos de desgaste encontrado no punção fabricado em aço H-10 e utilizado em uma prensa horizontal de múltiplos estágios. Embora o processo seja o mesmo, o forjamento a quente, o material encontrado na literatura é ligeiramente diferente do que foi encontrado neste estudo. Verificou-se que neste processo de forjamento, onde há a refrigeração forçada das ferramentas o desgaste é menos acentuado. Ou seja, as ferramentas tem durabilidade maior se comparadas com o processo de forjamento a quente em prensas verticais, onde não há refrigeração das ferramentas. Outra possível razão para a diferença encontrada é a utilização do aço H-10 que apresenta comportamento ligeiramente diferente do aço H-13, mais comum em forjamento a quente em prensas verticais.

O estudo do desgaste do punção mostrou que existe adesão e este modo de desgaste pode preceder outros mecanismo de desgaste. Os riscos e sulcos encontrados na superfície do punção No002 são característicos da abrasão. No entanto, a abrasão ocorreu sobre o material aderido ao punção e não sobre o material da ferramenta, aço H-10. Existe uma parcela maior de abrasão no material aderido do que na própria superfície do punção. Mesmo com um tempo menor de contato que as demais regiões da ferramenta, a região do raio inferior do punção apresentou padrão de fadiga térmica mais acentuado. Este padrão não era esperado e pode ser explicado pela pelo menor movimento relativo nesta área e por, talvez, ser o primeiro modo de desgaste e durante o forjamento foi sobreposto por adesão e abrasão.

A fotografia da avaliação do desgaste de ferramenta feita exclusivamente após a vida útil total pode ocultar alguns tipos de desgaste e seus respectivos mecanismos. A análise feita nesta condição é suficiente para afirmar que houve desgaste e que, naquele momento, havia indícios de determinados tipos de desgaste.

O melhor entendimento da evolução do desgaste deve ser feito com acompanhamento periódico inferior à vida útil da ferramenta para não negligenciar o histórico de desgaste da ferramenta.

## REFERÊNCIAS

- [1] ANFAVEA – **Anuário da Indústria Automobilística**, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2015, p.58
- [2] EUROFORGE – **Global Trends**, disponível em <[www.euroforge.org](http://www.euroforge.org)>, site acessado em 05 de Maio de 2016
- [3] ASM, **ASM Handobook** – Forming and Forging Vol. 14, 9. Ed., American Society for Metals – ASM, 1993
- [4] LANGE, K. – **Handbook of Metal Forming**, 1. Ed., Society of Manufacturing Engineers – SME, 1985
- [5] HATEBUR – **Portifólio de Produtos a Quente**, disponível em <[www.hatebur.com/hatebur-en/products](http://www.hatebur.com/hatebur-en/products)>, site acessado em 23 de Maio de 2016
- [6] MAGRI, M. L. – **Influência da Topografia Superficial na Vida da Matriz de Forjamento a Quente**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004
- [7] BÖRDER, C. – **Análise do Coeficiente de Atrito do Anel para o Forjamento a Quente**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005
- [8] SANTAELLA, M. L. – **Fatores que Influenciam no Desgaste de Matrizes de Forjamento a Quente de Bielas Automotivas**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009
- [9] VILLARES METALS, **Aços Ferramenta** – Aços para Trabalho a Quente
- [10] HUTCHINGS, I. M. – **Tribology** – Friction and Wear of Engineering Materials, 1992
- [11] STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W., – **Engineering Tribology – Tribology** Series Vol. 24, Austrália, Butterworth Heinemann, 1993
- [12] SUMMERVILLE, E.; VENKATESAN, K.; SUBRAMANIAN, C. – **Wear Processes in Hot Forging Press Tool**, Materials & Design, Vol. 16, Number 5, Austrália, 1995, p.289-p.294
- [13] ABACHI, S. – **Wear Analysis of Hot Forging Dies**, Master's Dissertation, The Graduate School of Natural and Applied Sciences The Middle East Technical University, 2004
- [14] SJÖSTRÖM, J.; BERGSTRÖM, J. – **Thermal Fatigue in Hot-Working Tools**, Scandinavian Journal of Metallurgy, Vol. 34, 2005, p.221-p.231
- [15] BERGSTRÖM, J.; RÉZAI-ARIA, F. – **High Temperature Fatigue of Tool Steels**, 7th International Tooling Conference, 2004, p.545-p.554
- [16] ENGLUND, D.; FORSSTRÖM, D. – **Investigation Into the Failure of Hot Forming Tools and Their Tribological Behaviour**, Master Dissertation, Luleå University of Technology, 2010