

AVALIAÇÃO DO DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO A QUENTE*

Alexandre Gonçalves¹
Douglas Mamoru Yamanaka²
Luiz Gustavo del Bianchi da Silva Lima³
Ana Paola Villalva Braga⁴
Roberto Martins de Souza⁵
Mário Boccalini Jr.⁶

Resumo

O artigo apresenta um estudo do desgaste de aços-ferramenta utilizados em processos de laminação e forjamento a quente. A superfície das ferramentas, cilindros de laminação e matrizes de forjamento, foi investigada ao longo dos ciclos de trabalho para avaliação do dano sofrido e quantificação da perda de massa. Os valores experimentais obtidos foram comparados com modelo numérico pelo método de elementos finitos (MEF) de cada processo, com boa correlação entre os resultados. A perfilometria das superfícies das ferramentas por máquina de medição por coordenadas (MMC) e o método de análise empregado permitiram a composição de superfícies que tornaram quantitativa a análise da assimetria no desgaste, além de evidenciar o comportamento distinto dos aços empregados sob as mesmas condições.

Palavras-chave: Desgaste; Laminação a quente; Forjamento a quente.

EVALUATION OF WEAR ON HOT FORMING TOOLS

Abstract

The work presents a study of the wear of hot work tool steels used in rolling and forging processes. The surface of work rolls and forging dies was investigated throughout the work cycles to evaluate the damage suffered and to quantify the mass loss. The experimental values obtained were compared with the numerical model by the finite element method (FEM) of each process, with good agreement between the results. The profilometry of the tool surfaces using the coordinate measuring technique (CMT) and the analysis method employed allowed the composition of surfaces that made quantitative the analysis of the asymmetry in the wear, besides evidencing the distinct behavior of the steels used under the same operation conditions.

Keywords: Wear; Hot rolling; Hot Forging.

¹ Físico, Pesquisador assistente, Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, São Paulo, Brasil.

² Físico, Pesquisador assistente, Centro de Metrologia Elétrica, Mecânica e de Fluidos, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, São Paulo, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Mestre, Pesquisador, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

⁴ Engenheira de materiais, Doutora, Pesquisadora, Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, São Paulo, Brasil.

⁵ Engenheiro Mecânico, Professor Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

⁶ Engenheiro Metalurgista, Doutor, Pesquisador/ Diretor, Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O desgaste prematuro de ferramentas de conformação no setor de transformação mecânica é tema recorrente de investigação e de interesse da indústria, que tem como objetivo reduzir custos de produção e os intervalos de troca de ferramenta, além de melhorar a qualidade de seus produtos. Segundo [1], o custo de cilindros de laminação pode chegar a 15% do custo total de produção. No caso dos produtos siderúrgicos forjados, este valor pode chegar a 30% [2]. Modernas plantas de forjamento têm dado cada vez mais importância ao uso de técnicas melhores e mais precisas de medição da geometria das ferramentas, seguindo a crescente demanda por peças de alta qualidade por clientes como a indústria automotiva e aeronáutica [3]. Neste sentido, o desenvolvimento deste trabalho deu especial atenção à topografia obtida através dos perfis medidos ao longo da utilização das ferramentas, o que permitiu um melhor entendimento das regiões afetadas pelo processo e maior precisão na estimativa o volume líquido removido.

Existem diversos fenômenos de desgaste que ocorrem nas superfícies de ferramentas de conformação de forma isolada ou combinada. Tais fenômenos são influenciados por fatores como temperatura, taxa de deformação, força aplicada, dureza, coeficiente de atrito, acabamento superficial e geometria das ferramentas. Sobre este último, a Figura 1 apresenta como exemplo uma matriz de forjamento genérica e modos de desgaste típicos em diferentes regiões da superfície.

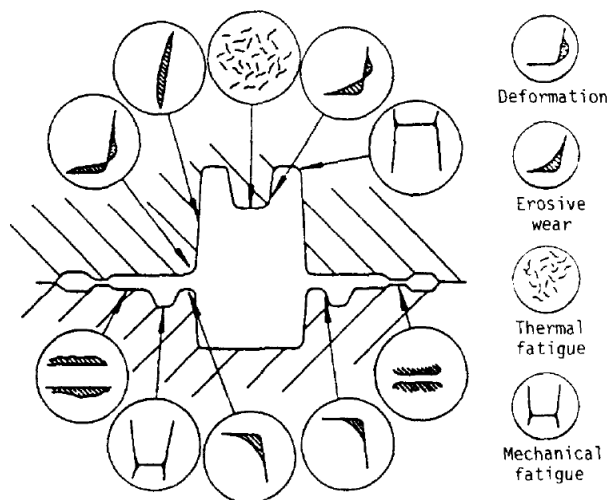


Figura 1. Modos de falha típicos em ferramenta de forjamento a quente (p.104 [4]).

O presente trabalho é parte de um projeto maior [5] desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT) em parceria com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e Gerdau, com financiamento do BNDES. Este projeto teve como objetivo a concepção de um sistema computacional para *design alloy* de aços mais resistentes ao desgaste considerando a modelagem computacional da microestrutura com respostas e condições provenientes de ensaios em escala piloto, estes últimos realizados no IPT – os dados obtidos nos ensaios serviram para alimentação e calibração do modelo numérico.

2 DESENVOLVIMENTO

Foram comparados três aços-ferramenta quanto ao seu desempenho na laminação e dois no forjamento, conforme **Tabela 1**. As ferramentas produzidas em um dado material foram submetidas ao ciclo de tratamento térmico daquele material para atingir a dureza especificada, independentemente do processo. As ferramentas não tiveram nenhum tipo de recobrimento.

O aço Liga 1 é comumente empregado para construção de matrizes de forjamento a quente e combina boas propriedades de dureza e resistência a fratura, além de boa usinabilidade. O aço Liga 2 refere-se a uma liga de aço-ferramenta não comercial desenvolvida no IPT, que possui carbonetos de Nb dispersos por sobre uma matriz semelhante a do aço Liga 1. O Liga 3 trata-se de aço ferramenta comercial empregado na construção de cilindros de laminação a quente com alta resistência ao desgaste.

Tabela 1. Materiais e processos em que foram empregados

Material	Dureza inicial	Processo	
		Laminação	Forjamento
Liga 1	46 HRC	X	X
Liga 2	55 HRC	X	X
Liga 3	60 HRC	X	---

Os resultados experimentais do projeto são baseados na análise da superfície das ferramentas após determinado número de ciclos através de ensaios de líquido penetrante, partícula magnética, medidas de dureza, perfilometria táctil por máquina de medição por coordenadas (MMC), fotos macro, micrografias e fotos por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2.1 Laminação

Os ensaios de laminação foram realizados numa célula piloto composta por um laminador duo-reversível Stanat TA-315 2/4 Hi, utilizado sem cilindros de backup (configuração 2 high); um sistema de alimentação e descarte automático de placas; e um forno de indução para pré-aquecimento das placas [6]. O laminador opera com cilindros de trabalho de dimensão nominal Ø5"×8" (dimensões da mesa), conforme mostrado na Figura 2. A região da mesa do cilindro de laminação que efetivamente faz contato com a tira quente é chamada de área de trabalho, e corresponde aproximadamente a largura do laminado, perfazendo uma faixa ao redor do cilindro. Esta área se revela de forma clara durante as campanhas de laminação por apresentar maior quantidade de trincas e por marcas de oxidação em suas extremidades.

Duas células de carga faziam a leitura da força de laminação. O acompanhamento da temperatura da placa foi feito com um pirômetro ótico localizado na entrada do laminador. A cada passe, os cilindros foram refrigerados com jatos d'água (aspersão através de bicos de spray, "nozzles") localizados em ambos os lados dos cilindros superior e inferior, acionados alternadamente, sempre no sentido contrário ao da entrada da placa. O arrefecimento foi feito utilizando-se água da rede de abastecimento convencional.

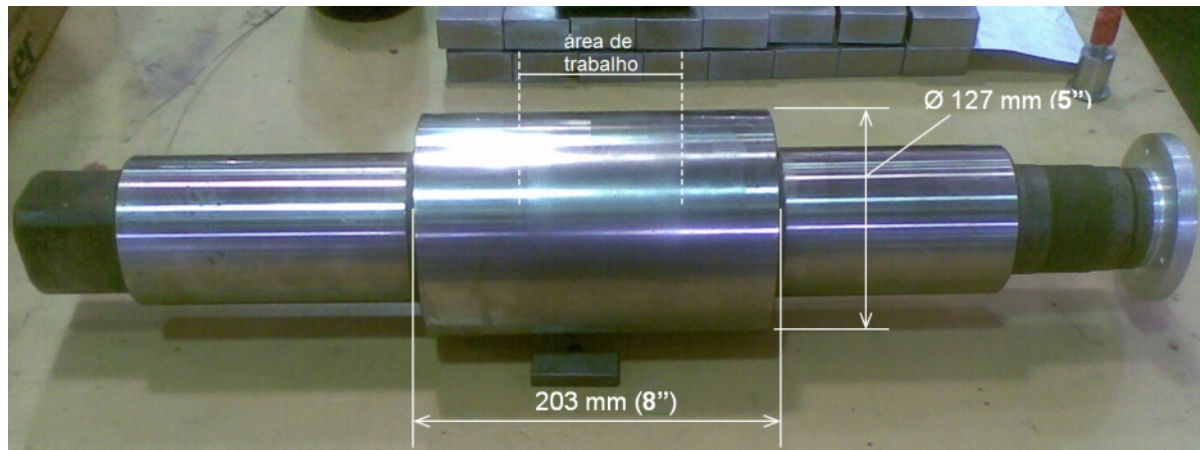


Figura 2. Cilindro de laminação.

Com cada cilindro foram laminadas aproximadamente 2000 placas de aço AISI 1045, dimensões 19×92×291 mm. As placas foram pré-aquecidas entre 1230 °C e 1290 °C durante 120 s para início da laminação e não foram reaquecidas no decorrer do processo. Foram dados 5 passes de laminação, com redução média de 13% a cada passe, levando a uma dimensão final da placa de 9,70×93×555 mm. A frequência de rotação dos cilindros foi de 27 rpm, o que, considerando-se o raio de 2 ½" (63,5 mm), implica numa velocidade tangencial de laminação 0,18 m/s. O tempo médio de contato entre placa e cilindro foi estimado em 91 ms. A quantidade total de placas laminadas foi alcançada através de 5 campanhas de laminação, com a laminação de 400 placas a cada campanha, aproximadamente.

A remoção de material do cilindro foi quantificada através de medições num circularímetro, MMC específica para medição de desvio de forma de superfícies com simetria cilíndrica. Foram obtidos 38 perfis de circularidade, igualmente espaçados de 5 mm cada, ao longo de toda a mesa do cilindro (dentro e fora da área de trabalho), descontando-se aproximadamente 10 mm em cada extremidade da região da mesa, conforme indicado esquematicamente na Figura 3. Antes da medição, os cilindros foram mantidos em sala a temperatura de 20 °C para estabilização de sua geometria por pelo menos 24 h. O equipamento utilizado permitia apenas medição táctil, de modo que foi utilizado apalpador de esfera de rubi Ø2,0 mm. A incerteza expandida de medição foi estimada em ±0,05 µm.

Dos perfis obtidos, o software de aquisição e processamento dos dados calculou o raio médio de cada circularidade, o que dá uma ideia do diâmetro da peça a medida em que vai sendo desgastada e permite uma estimativa do desgaste ao longo das campanhas. Foi possível também a composição da superfície desenvolvida do cilindro utilizando-se o software Matlab® R2017a, o que permitiu uma avaliação mais completa do desgaste em diferentes regiões da área de trabalho.

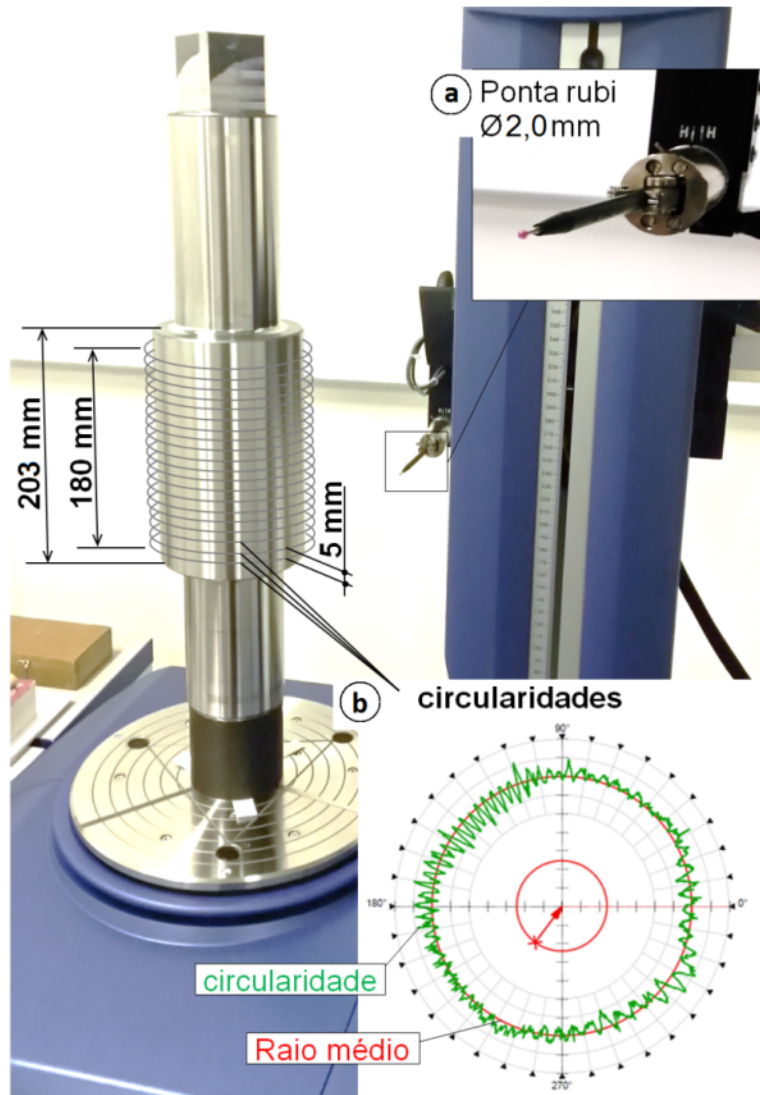


Figura 3. Medição de circularidade para avaliação da perda de massa nos cilindros de laminação. a) Detalhe do apalpador utilizado; b) Exemplo dos dados obtidos: circularidade (curva verde) e raio médio (círculo vermelho).

2.2 Forjamento

Os ensaios de forjamento a quente foram realizados em uma célula automatizada composta por uma prensa mecânica tipo “H” com capacidade máxima de 300 tf, um alimentador automático de “billets”, um pequeno forno de indução e um robô para alimentação da prensa e descarte do forjado. A prensa tem velocidade de 100 GPM (golpes por minuto), o que implica num tempo de 0,6 s por golpe. O tempo de cada ciclo de forjamento (aquecimento, alimentação, golpe e descarte) foi de 30 s. O tempo de contato entre matriz e peça durante o forjamento foi estimado em 140 ms. O forjamento foi em matriz fechada com rebarba. O projeto da matriz superior, baseado em [7, 8 e 9], onde foi feito o acompanhamento do desgaste, é apresentado na Figura 4. Foram confeccionadas matrizes de aço ferramenta Liga 1 e Liga 2, como citado, temperado e revenido para as mesmas durezas dos cilindros de laminação (46 e 55 HRC), sem nenhum tipo de recobrimento superficial. Os “billets” são de aço AISI 1045, mesmo material das placas laminadas, com dimensões $\text{Ø}28,6$ ($1\frac{1}{8}$) \times 44 mm, e foram pré-aquecidos por indução até uma temperatura média de 1150 °C.

Obs.: sem escala

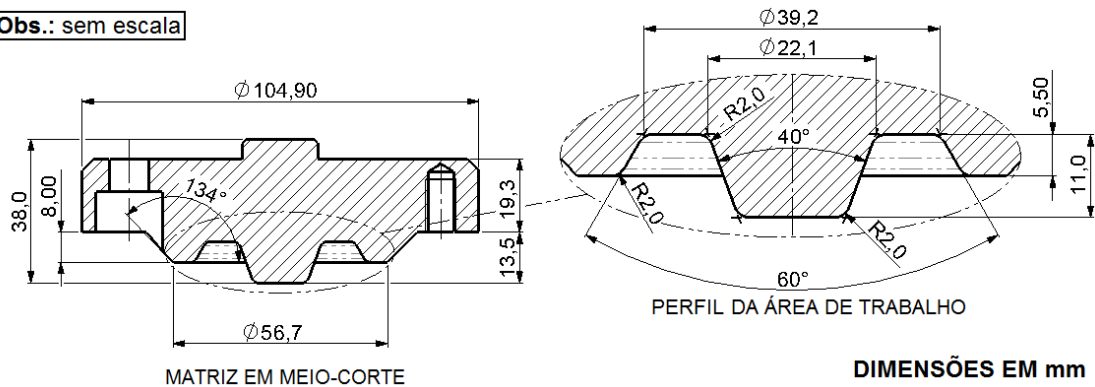


Figura 4. Projeto da matriz de forjamento.

A força de forjamento foi calculada com base na leitura de um sensor de pressão instalado na rede da mesa hidráulica contra sobrecarga (dispositivo de segurança que previne o comprometimento da estrutura em caso de operação acima do limite de carga para o qual a prensa foi projetada). A temperatura do “billet” imediatamente antes do forjamento foi obtida por um pirômetro ótico fixo. A refrigeração das matrizes foi feita após cada golpe através de 4 “nozzles”: 2 apontados para a matriz superior e 2, para a matriz inferior. Neste processo utilizou-se como lubrificante uma solução a base de polímero diluída em água, específica para a aplicação. A refrigeração compreende 1 s de aspersão de ar para remoção de carepa, 1 s de aplicação de desmoldante e 1 s para eliminação do excesso e secagem.

Baseado numa quantidade típica de literatura de 1000 golpes, foram programadas 5 campanhas de forjamento com as seguintes quantidades de forjados: 50, 50, 100, 300, 500, tendo a primeira campanha sido dividida em duas etapas: a primeira com forjamento de 1 peça e a segunda com o forjamento das 49 peças restantes (1 golpe = 1 peça). Ao término de cada etapa ou campanha a matriz superior foi completamente caracterizada seguindo os ensaios para análise de superfície anteriormente citados (líquido penetrante, partícula magnética, etc.).

A topografia da área de trabalho das ferramentas foi obtida com o uso de MMC convencional, com medição tátil através de apalpador com ponta esférica de rubi $\varnothing 1,5$ mm. As matrizes foram, como os cilindros, mantidas em sala a temperatura de 20 °C para estabilização da geometria por pelo menos 6 h antes da medição. A incerteza expandida de cada medida foi estimada em ± 9 μ m.

Os dados da matriz foram também analisados em Matlab®, o que permitiu tanto a obtenção de perfis bidimensionais de desgaste quanto a composição de uma superfície de desgaste, proporcionando uma visão global das diferentes intensidades do dano por sobre a ferramenta. Foram obtidos 73 perfis em sentido anti-horário ao longo de toda a área de trabalho, conforme apresentado esquematicamente na Figura 5a. A rotina de aquisição dos perfis foi repetida 5 vezes, e a média aritmética das 5 medidas foi calculada. O primeiro (1°) e o último (73°) perfis obtidos são coincidentes, de modo que uma média simples também foi aplicada neste caso para fechamento da superfície. Dessa forma, tem-se no final 72 perfis para análise.

Para início das medições de topografia, o que se convencionou chamar de perfilometria, foi determinado um sistema de coordenadas sobre a matriz, atrelado ao seu posicionamento no equipamento de medição, de modo que as medidas obtidas pudessem ser sobrepostas ao término de cada campanha. Esse sistema de referência tem como base marcações no flange e regiões que não sofrem desgaste ao longo do processo.

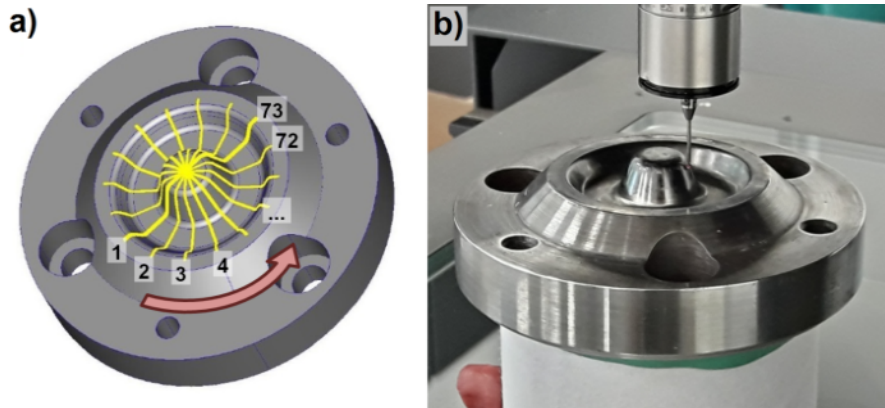


Figura 5. Medição da topografia da matriz ("perfilometria"): a) Esquema dos perfis obtidos; b) Medição na MMC.

Os perfis dispostos ao longo da matriz, obtidos ao término da primeira etapa de forjamento e após cada campanha, são subtraídos daqueles obtidos da matriz quando nova (caracterização inicial), tendo como resultado 72 curvas de desgaste, de onde se calcula uma média geral e de onde se pode obter, por meio da interpolação linear dos perfis, uma superfície que representa o desgaste nas diferentes regiões da ferramenta. O detalhamento do método empregado para análise dos dados da medição é apresentado em [10].

3 RESULTADOS

3.1 Laminação

Perfis de dureza obtidos ao longo das campanhas, dentro da área de trabalho, são apresentados na Figura 6. As medidas foram obtidas com microdurômetro portátil Vickers, carga 10 kg. Percebe-se um aumento gradativo da dureza, ao menos da segunda para a última campanha, em todos os cilindros.

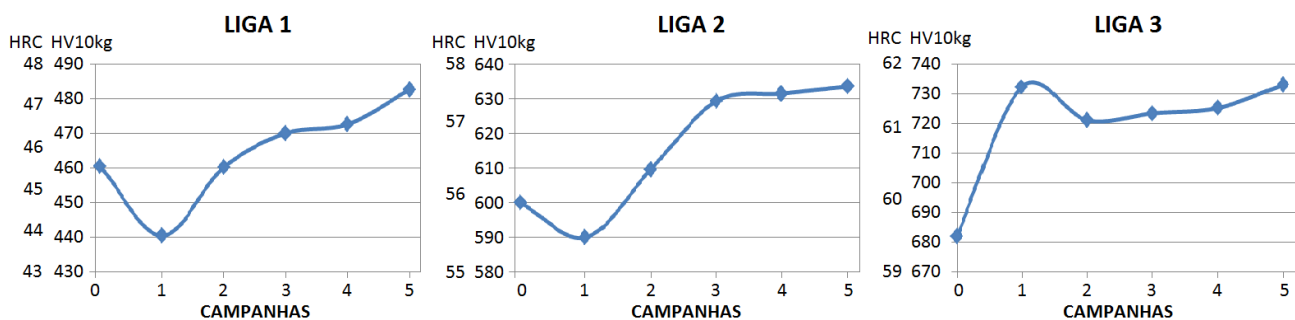


Figura 6. Dureza média obtida dos cilindros ao longo das campanhas de laminação.

Imagens dos ensaios de líquido penetrante realizados em cada um dos cilindros ao longo das campanhas de laminação são apresentadas na Figura 7. A concentração de trincas profundas numa faixa específica da superfície do cilindro Liga 3 após a quinta campanha pode ser vista na foto – esta faixa será posteriormente identificada na análise da topografia. Nas fotos, é possível observar o surgimento de uma malha de trincas desde a primeira campanha no cilindro de Liga 3, e no entanto este cilindro apresentou, como esperado, a menor perda de material por desgaste.

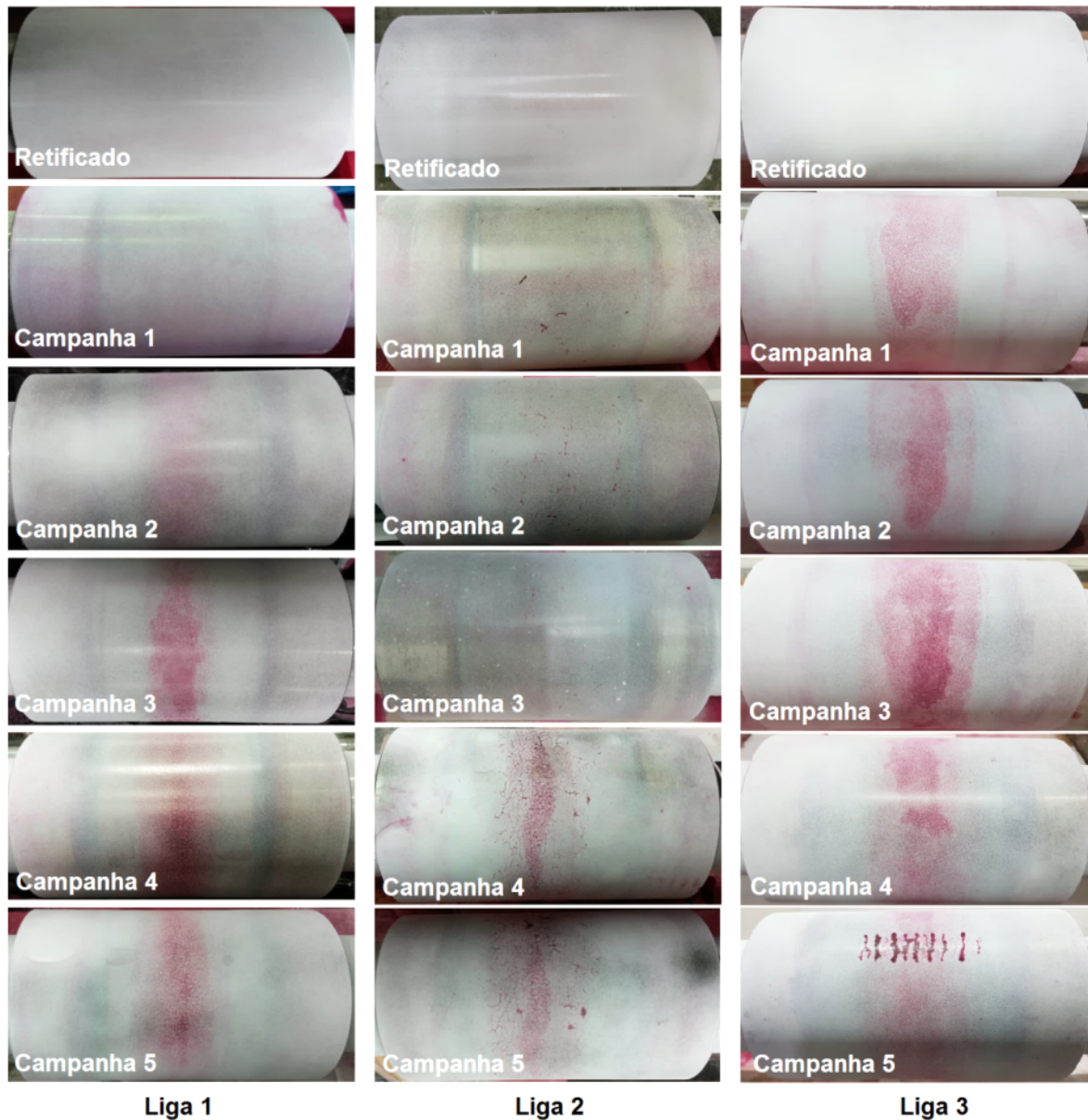


Figura 7. Fotos do ensaio de líquido penetrante.

Os perfis de desgaste obtidos pelo circularímetro são apresentados na Figura 8. A cada campanha (numeradas de 1 a 5) os cilindros laminaram aproximadamente 400 placas, o que leva a uma determinada distância percorrida em quilômetros, conforme indicado nas legendas.

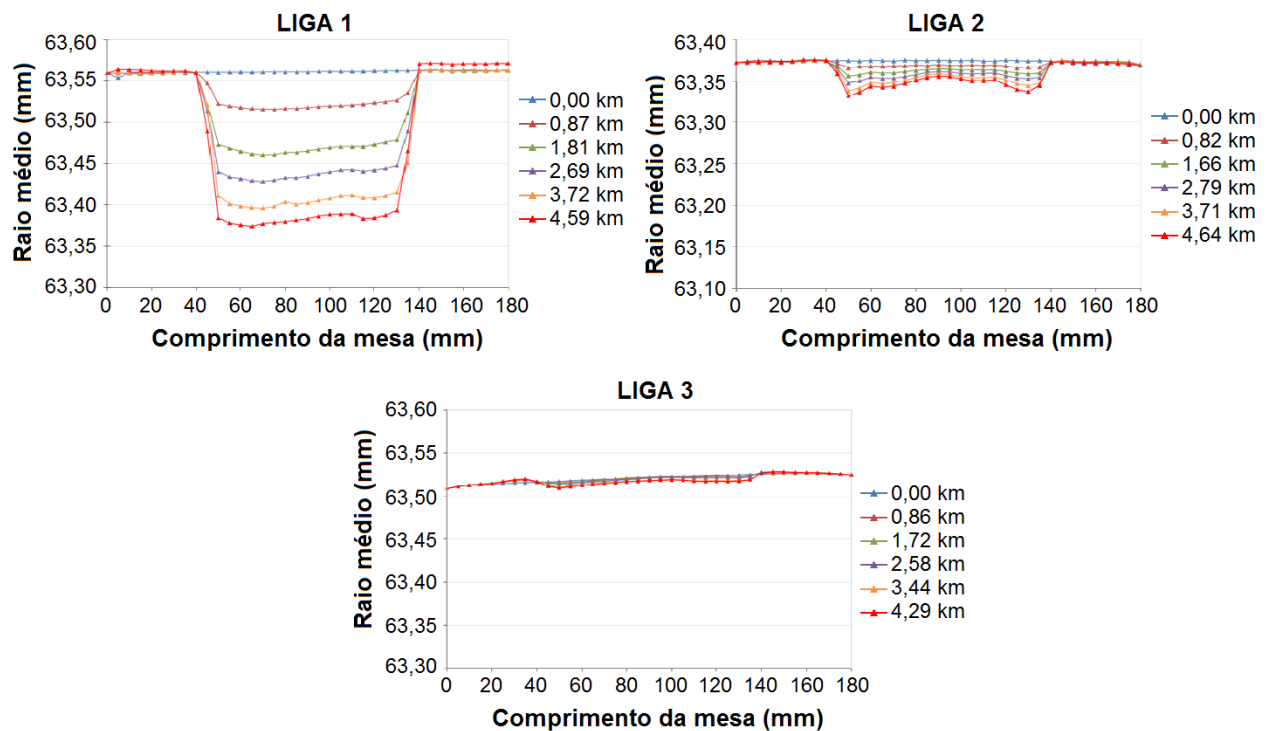


Figura 8. Curvas de raio médio obtidas do circularímetro.

A Figura 9a apresenta a superfície desenvolvida do cilindro de laminação e, logo abaixo, um detalhe desta superfície apresentando a deformação acima da média de uma região específica. Os dados plotados pelo software do circularímetro estão na Figura 9b, onde nota-se uma mancha no centro da área de trabalho. Ambas as figuras revelam a região com trincas profundas mostrada em ensaio de líquido penetrante, Figura 9c. Não há correlação entre o surgimento das trincas e alguma intercorrência durante a laminação, como parada de chapa, por exemplo.

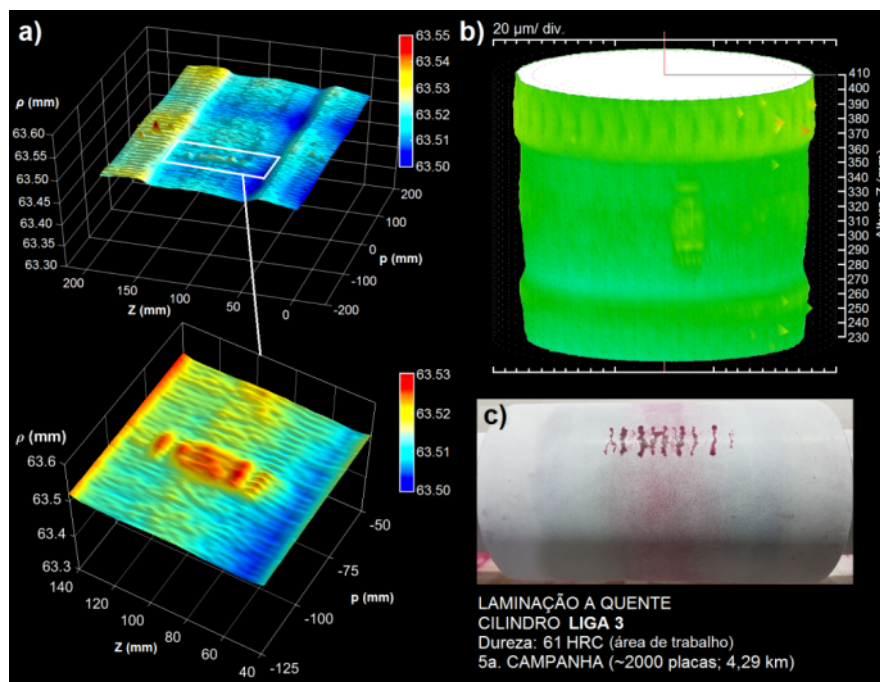


Figura 9. Análise da superfície após última campanha do cilindro de aço Liga 3: a) superfície desenvolvida do cilindro de laminação em Matlab®; b) superfície obtida no software do circularímetro; c) ensaio de líquido penetrante.

3.1.1 Resultados numéricos

Resultados foram obtidos do modelo numérico de desgaste no processo de laminação desenvolvido pela EPUSP. Foram simulados cilindros de aço Liga 1 e Liga 2, sob as mesmas condições de operação dos cilindros piloto. Os resultados são apresentados na Figura 10.

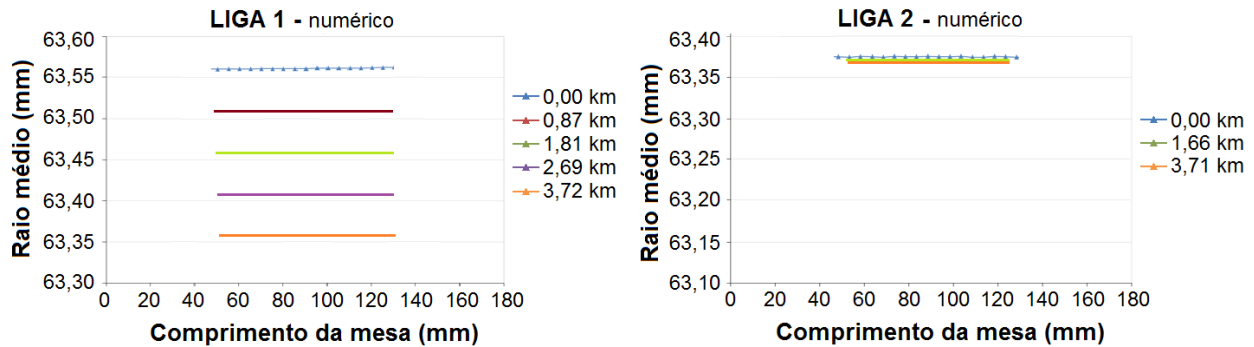


Figura 10. Desgaste numérico na laminação com cilindros de aço Liga 1 e Liga 2.

Nota-se uma razoável concordância entre esses gráficos e os da Figura 8, para os mesmos materiais. Os valores numéricos são apresentados como constantes visto que o modelo considera um desgaste homogêneo por sobre toda a área de trabalho.

3.2 Forjamento

No presente trabalho, a caracterização das matrizes de forjamento considerou a divisão do perfil em 9 regiões distintas, identificadas de A (região central) até I (região de formação de rebarba), conforme apresentado na Figura 11.

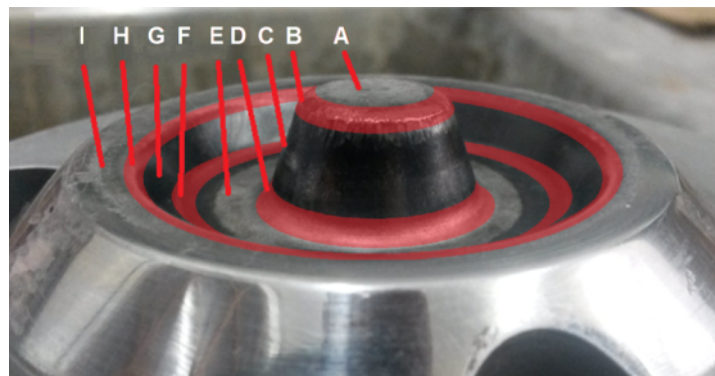


Figura 11. Identificação sobre foto das regiões do perfil da matriz.

3.2.1 Matriz Liga 1

A matriz de aço Liga 1 teve todas as campanhas concluídas, totalizando 1000 golpes. A caracterização revelou um desgaste acentuado nas regiões A e B, que sofrem solicitações severas durante o processo. A Figura 12 apresenta imagens do ensaio de líquido penetrante onde se pode acompanhar a formação gradual de trincas nas regiões A, B e H.

ENSAIO DE LÍQUIDO
PENETRANTE
MATRIZ LIGA 1

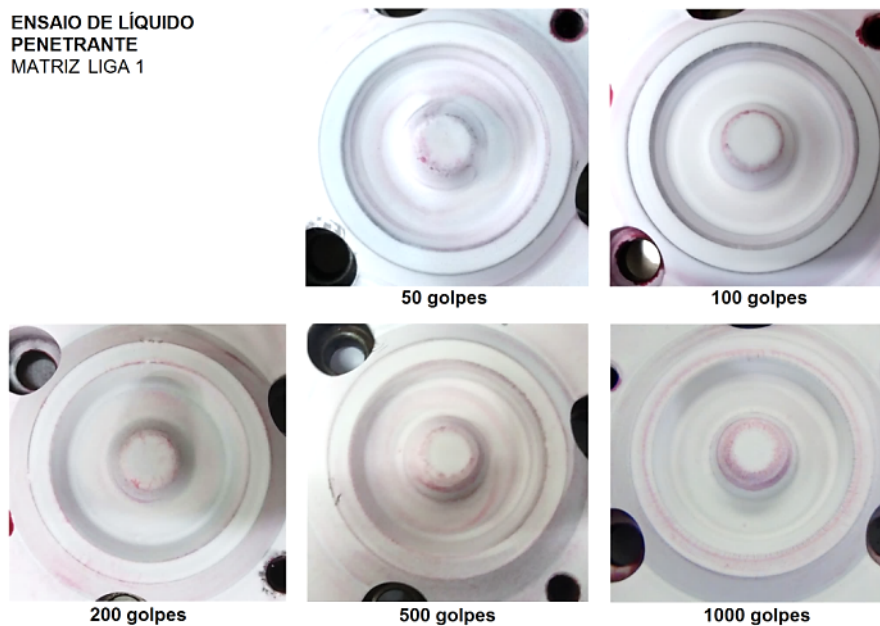


Figura 12. Imagens do ensaio de líquido penetrante.

A média geral das 72 curvas de desgaste (resultantes da subtração do perfil inicial com o perfil após determinado número de ciclos) obtidas da matriz de Liga 1 é apresentada na Figura 13.

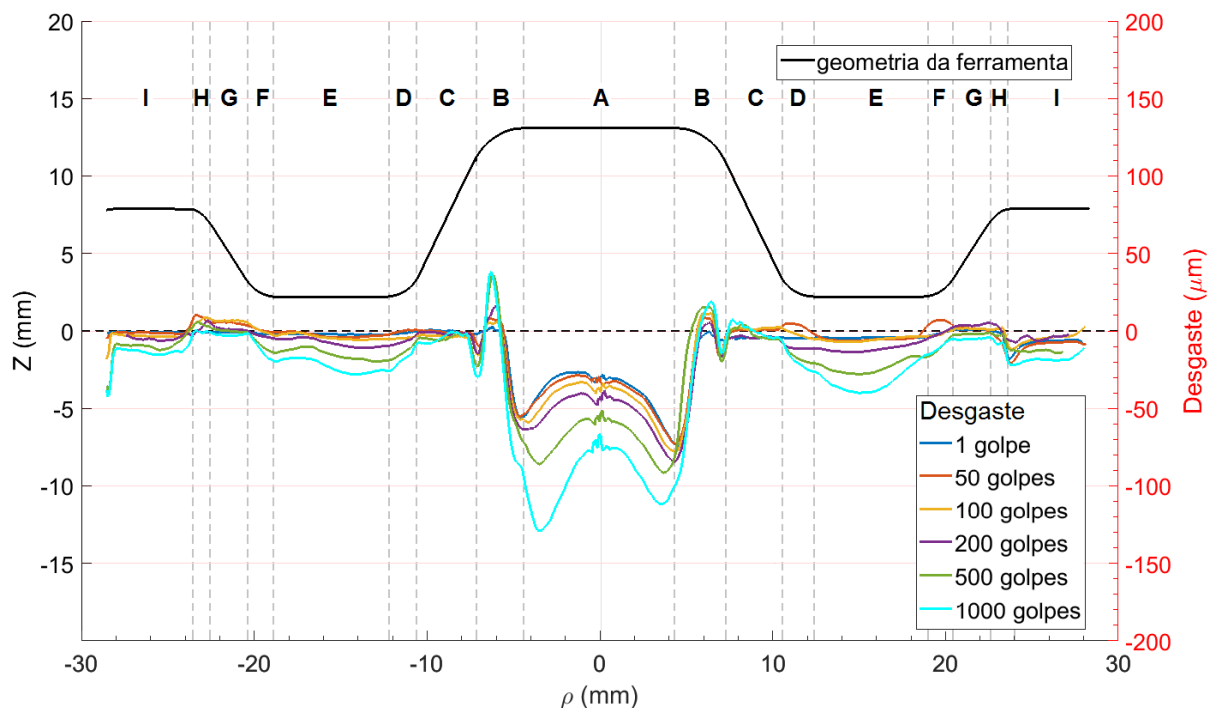


Figura 13. Médias das curvas de desgaste da matriz de forjamento de Liga 1 e identificação de cada região.

Um estudo mais detalhado da topografia da ferramenta foi possível com a composição de superfícies através da interpolação das 72 curvas de desgaste. A Figura 14 traz as superfícies de desgaste do pino central e suas imediações (regiões A, B, C, D e E, esta última parcialmente) após determinado número de golpes.

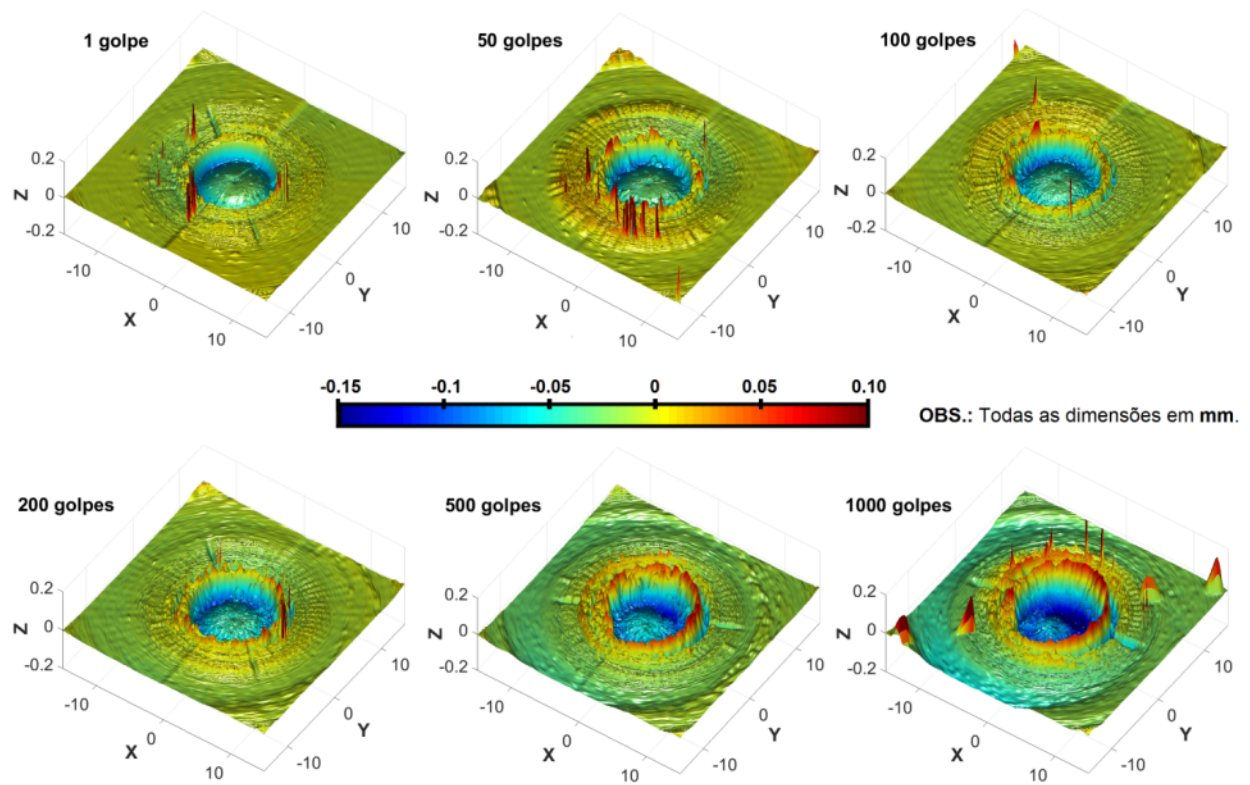


Figura 14. Superfícies de desgaste da matriz de Liga 1 após cada campanha.

Nas duas últimas figuras, nota-se que houve desgaste acentuado nas regiões A e B. Nesta última, nota-se que parte do material da região central pode ter sido deslocada por deformação plástica as bordas do raio ($R = 2 \text{ mm}$), levando a uma deformação “positiva” (acima do plano $Z = 0$) da superfície.

Fotografias macro da região do pino central, regiões A, B e C, são apresentadas na Figura 15. Estas imagens revelam a deformação medida na região do raio (B).

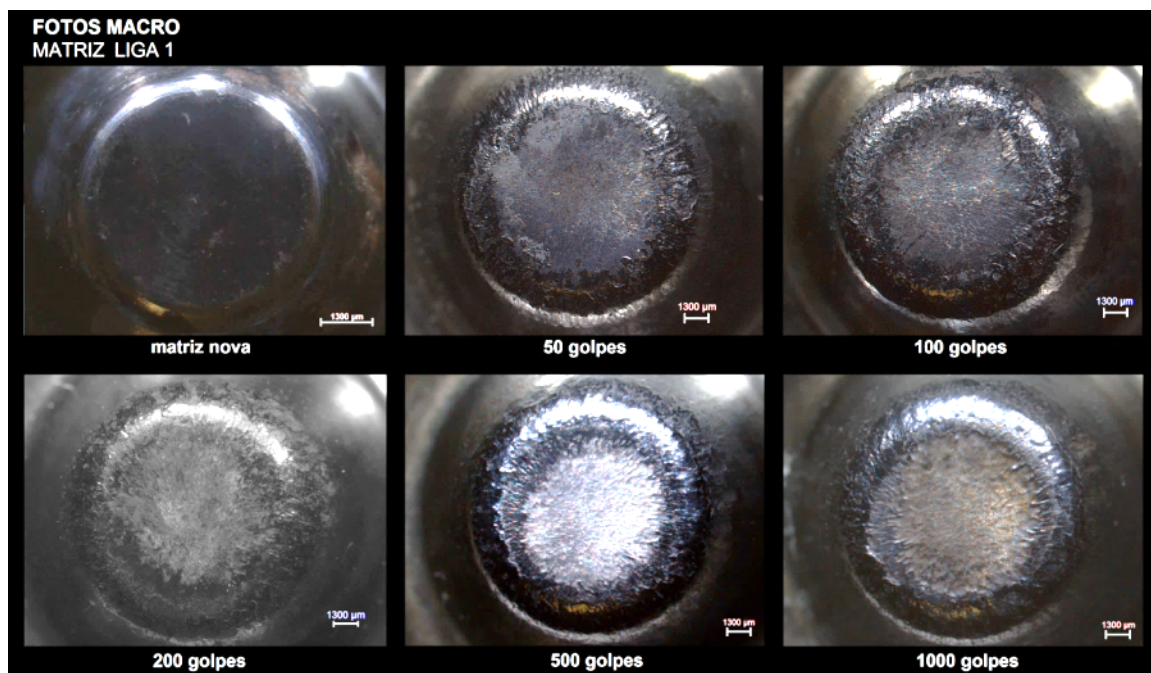


Figura 15. Fotos macro: acompanhamento do desgaste no pino central (regiões A, B e C).

O processo de forjamento em prensas excêntricas geralmente leva a assimetrias no forjado e, conseqüentemente, a um desgaste assimétrico da ferramenta. Tais assimetrias são reveladas nas superfícies compostas pelos perfis medidos. Um exemplo é apresentado na Figura 16, onde uma marca de desgaste na região E é quantificada na superfície de desgaste da ferramenta após o forjamento de 1000 peças. Uma análise detalhada da superfície ao longo das campanhas revela o aparecimento gradual desta marca em particular. As marcas ao longo de dois perfis indicados pelas setas verdes são *outliers* nos raios e na parede de saída do material, e podem ser desprezados.

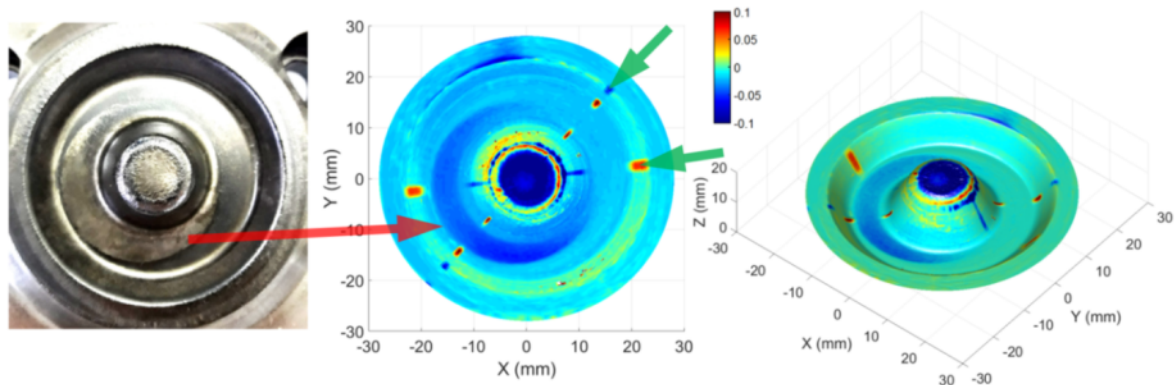


Figura 16. Marca de desgaste revelada após 1000 golpes nas superfícies compostas com os perfis medidos. A superfície vista de topo (planta) no centro da figura trata-se da superfície de desgaste. A superfície a direita traz a projeção da escala de cores da superfície de desgaste por sobre a topografia da matriz após 1000 golpes.

Uma integração numérica da superfície (integração trapezoidal no Matlab®, “trapz”) permitiu uma estimativa inicial do volume removido. Esta quantidade permite o cálculo do coeficiente de desgaste adimensional K do material, baseado na equação de desgaste de Archard [11], Equação 1:

$$w = K \times \frac{F_N}{H} \Rightarrow K = \frac{H \times w}{F_N} \quad (1)$$

onde w é o volume removido por distância percorrida (mm^3/mm), F_N (N) é a normal ao contato e H (Pa) é a dureza de indentação da superfície.

A Figura 17 traz o gráfico do volume removido pelo número de ciclos (golpes). Trata-se de uma estimativa inicial, pois a resposta da integração numérica é altamente dependente do alinhamento entre as superfícies, para o que ainda não se tem estabelecido um algoritmo que realize a tarefa de forma automática.

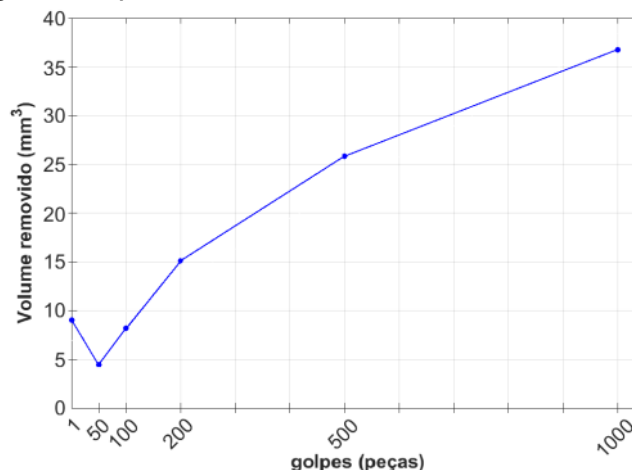


Figura 17. Primeira estimativa de volume total removido.

As constatações experimentais permitiram a identificação dos modos de desgaste indicados na Figura 18.

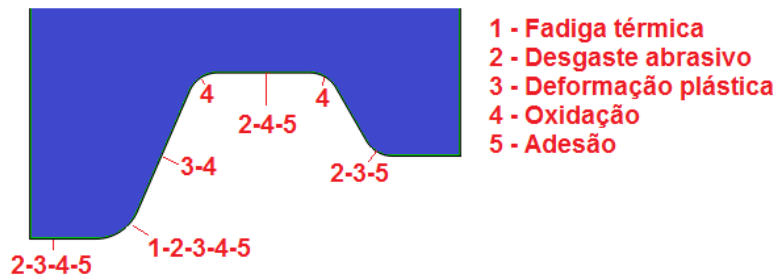


Figura 18. Modos de falha identificados no perfil da matriz de forjamento.

3.2.1.1 Resultado numérico

O modelo numérico do processo permitiu a estimativa do perfil de desgaste após o forjamento de 50 peças, conforme apresentado na Figura 19. Ainda que exista correlação entre estas duas últimas curvas, são necessários ajustes no modelo para que reproduza de forma mais assertiva o desgaste na superfície da ferramenta.

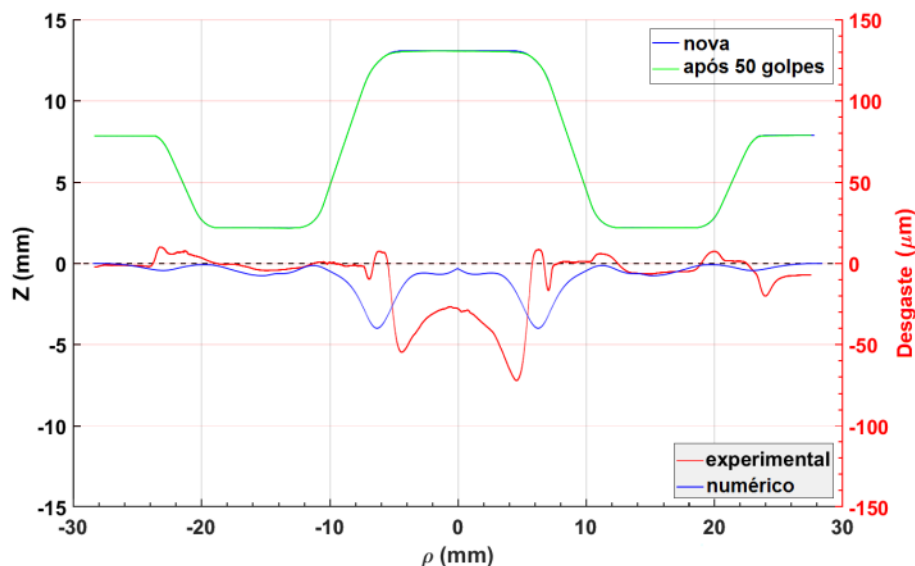


Figura 19. Comparação dos perfis numérico e experimental após forjamento de 50 peças.

3.2.2 Matriz Liga 2

A matriz de aço Liga 2 passou até o momento pela primeira campanha, com o forjamento de 50 peças. A média dos perfis de desgaste em comparação com o obtido no mesmo estágio para a matriz de Liga 1 é apresentada na Figura 20.

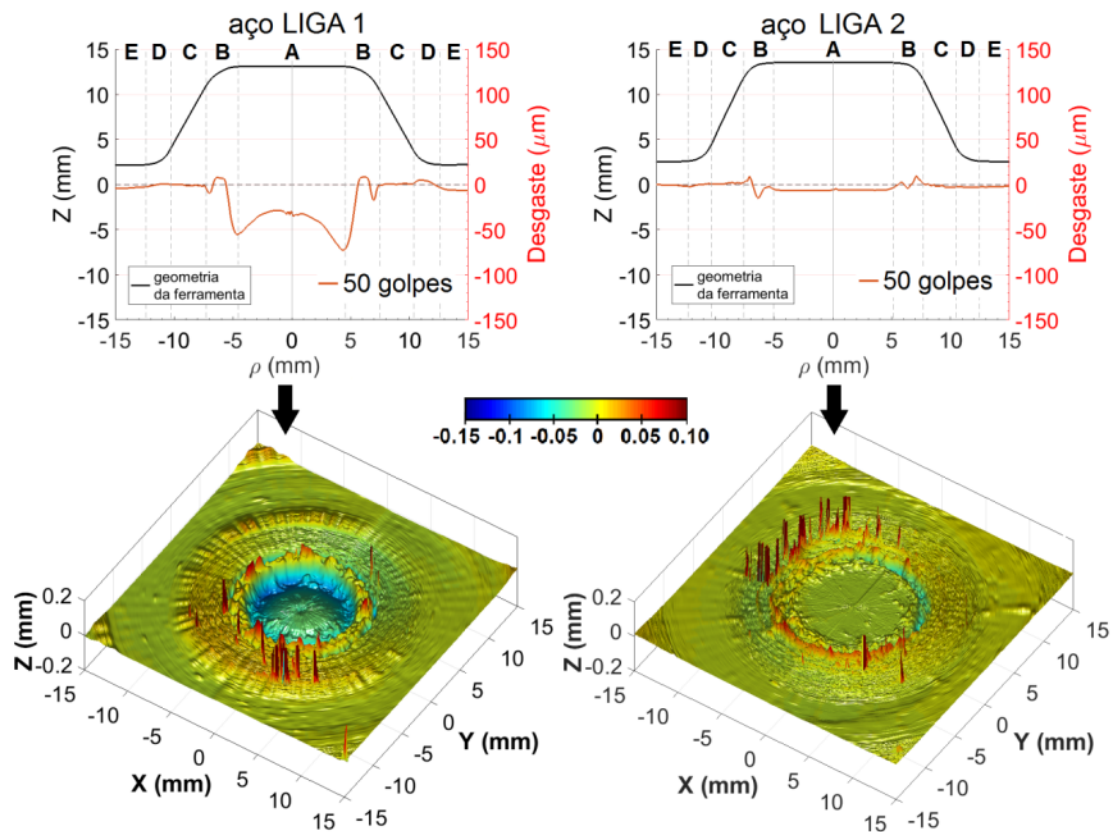


Figura 20. Média dos perfis e superfície de desgaste das matrizes de Liga 1 e Liga 2 após 50 golpes.

3.2.3 Próximas etapas

As demais campanhas com a matriz de Liga 2 serão realizadas, o que permitirá a comparação do desempenho das duas matrizes até 1000 forjados. A estimativa do coeficiente de desgaste de Archard deve levar a uma superfície de coeficientes de desgaste, o que dará subsídios para o desenvolvimento de um modelo numérico que represente de forma mais adequada a complexidade do processo. Essa estimativa, embora deva ser levada a cabo inicialmente para o processo de forjamento, deve ser estendida à laminação para aprimoramento do atual modelo. Além disso, esforços estão sendo empregados para simulação de microestrutura representativa do aço Liga 3 na laminação.

4 CONCLUSÃO

O estudo permitiu avaliar e quantificar o dano nas ferramentas, o que possibilita uma análise de desempenho de cada material. A precisão das medidas de geometria permitiu a reconstrução da topografia das ferramentas e pode levar a uma discussão e a um entendimento mais profundos sobre como os esforços do processo agem sob microestruturas distintas, e sobre como operam os diferentes mecanismos de desgaste.

Agradecimentos

Os autores agradecem o BNDES e a Gerdau pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 Bocalini Jr. M, Sinatora A. Microstructure and wear resistance of high speed steels for rolling mill rolls. Proceedings of 6th International Tooling Conference (TOOL), 2002; 509-524
- 2 Rahn R, Schruff I. Improved tool performance and cost control in the forging industry – a challenge for innovative tool steels. Proceedings of 8th International Tooling Conference (TOOL), 2009; 213-224
- 3 Hawryluk M, Ziemia J, Sadowski P. A review of current and new measurement techniques used in hot die forging processes. Measurement and Control, 2017; 50:74-86
- 4 Kohopää J, Hakonen H, Kivivuori S. Wear resistance of hot forging tools surfaced by welding. Wear, 1989; 130:103-112
- 5 Bocalini Jr. M, Souza RM, Machado IF, Serantoni CR, Fukumasu NK, Bortoleto EM, Seriacopi V, Braga APV, Tertuliano AJO, Lima LGBS, Gonçalves A. Sistema avançado para projeto de ligas aplicadas em ferramentas de conformação a quente. Apresentação de pôster. 71° Congresso anual da ABM – ABM Week 2016, Rio de Janeiro, RJ.
- 6 Braga APV, Gonçalves A, Bocalini Jr. M, Souza RM, Serantoni CR. Modernização do laminador de tiras a quente do IPT. 51° Seminário de laminação – processos e produtos laminados e revestidos. ABM, 2014.
- 7 Walter S, Haferkamp H, Niemeyer M, Bach Fr.-W, Henze A. Material failure mechanisms of forging dies. Proceedings of 5th International Tooling Conference (TOOL), 1999; 215-222
- 8 Doege E, Andreis G, Gulde M. Improving tool life in hot massive forming by coating. Proceedings of 5th International Tooling Conference (TOOL), 1999; 335-343
- 9 Andreis G, Fuchs K-D, Schruff I. The wear behaviour of hot-work tool steels used in forging processes. Proceedings of 5th International Tooling Conference (TOOL), 1999; 593-600
- 10 Gonçalves A, Lima LGBS, Braga APV, Bocalini Jr. M, Souza RM. Coupled experimental-numerical analysis of wear of forging dies in pilot scale. 1st International Conference on Surface Engineering in Material Forming, 37th SENAFOR, 2017.
- 11 Archard JF, Hirst W. The wear of metals under unlubricated conditions. Proc R Soc Ser A 1956; 236:397-410