ALEXANDRE GONÇALVES

**EFEITO DAS CONDIÇÕES LOCAIS NOS MODOS DE DESGASTE EM
MATRIZES DE FORJAMENTO A QUENTE**

São Paulo
2020

ALEXANDRE GONÇALVES

**Efeito das condições locais nos modos de desgaste em matrizes de
forjamento a quente**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia
Mecânica – Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Roberto Martins de
Souza

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Gonçalves, Alexandre

Efeito das condições locais nos modos de desgaste em matrizes de forjamento a quente / A. Gonçalves -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
118 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Forjamento 2.Desgaste 3.Tribologia 4.Método dos elementos finitos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

*Para Bruna, meu amor, minha
querida, força dos meus dias e
luz da minha estrada.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Roberto Martins por aceitar me orientar e pelas minuciosas revisões do texto, e ao IPT, pela infraestrutura e incentivo na formação acadêmica de seu corpo profissional.

Aos meus pais, Milton e Isabel, pela força com que sempre mantiveram a nossa família, e à minha irmã, Adrielle, pela sua dedicação, força e bom exemplo em casa, o que me inspira a seguir sempre em frente.

À Bruna, minha querida esposa e amiga, pelo incentivo e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À Douglas Yamanaka e Diogo César Borges, da área de metrologia do IPT, pelas medições da topografia das matrizes de forjamento após cada campanha.

À Vitor Luiz Reis, que revisou e realizou a primeira rodada do modelo ABAQUS desenvolvido por Luiz Lima. Obrigado pelas discussões e pelo tempo empregados em me auxiliar na interpretação do modelo.

Todas as imagens dos ensaios metalográficos foram obtidas e tratadas por Sandra Munarim. Muito obrigado.

Aos colegas que me suportam no dia-a-dia do IPT, em especial Paola e Felipe.

Ao Dr. Mário Boccalini Jr. e à Profa. Dra. Erika Prados por aceitarem fazer parte da banca e darem contribuições fundamentais para estrutura adequada do texto.

Ao Dr. Eduardo Albertin e ao Prof. Dr. Amilton Sinatora pelas discussões e dicas para abordagem do estudo do desgaste.

Por fim, agradeço aos meus bons, velhos amigos, que têm me ajudado a superar esse ano, aos meus demais familiares, e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

*“O Brasil é uma República
Federativa cheia de árvores e
de gente dizendo adeus.”*

Oswald de Andrade

RESUMO

O entendimento do desgaste em ferramentas de conformação mecânica a quente permite a redução do custo de produtos conformados, uma vez que tal custo é significativamente afetado pelo das ferramentas e equipamentos utilizados, além de proporcionar um aumento de sua qualidade dimensional. Esses fatores mantêm o interesse sobre o estudo do desgaste, tema constante de pesquisa e desenvolvimento. No forjamento a quente, as ferramentas utilizadas (matrizes de forjamento) são submetidas a um carregamento termomecânico cíclico que compromete seu acabamento superficial e sua geometria ao longo do tempo, levando muitas vezes à falha prematura. No presente trabalho, condições industriais de operação foram reproduzidas em escala piloto numa célula de forjamento automatizada para estudo do comportamento de matrizes fabricadas em dois aços-ferramenta distintos. Matrizes instrumentadas permitiram a medição do perfil de temperatura durante o processo, enquanto matrizes sem instrumentação, submetidas a um maior número de ciclos com paradas regulares, permitiram acompanhar a evolução gradual do dano nas superfícies das ferramentas. Este acompanhamento foi realizado através de diversos ensaios para caracterização das superfícies, dentre os quais foram incluídas medições da topografia. Partindo dos parâmetros de processo e de dados experimentais, simulações numéricas com uso do método de elementos finitos (MEF) foram realizadas com o objetivo de extrair informações como pressões de contato (P), velocidades de deslizamento (V) e temperaturas (T) em pontos específicos da superfície da matriz, para construção de um mapa tipo $P \times V \times T$, sobre o qual foram identificados os diferentes modos de desgaste observados na caracterização. Este mapa tem como intuito servir de apoio ao projeto de novas ferramentas de trabalho a quente e de ligas mais resistentes ao desgaste.

Palavras-chave: forjamento a quente, topografia, elementos finitos, mapa de desgaste

ABSTRACT

The understanding of the wear of hot forming tools allows the reduction of the cost of forged products, since this cost is significantly affected by those of the tools and equipment used, and increases their dimensional quality. These factors maintain the interest in the study of wear, a constant theme of research and development. In hot forging, the tools used (forging dies) are subjected to a cyclic thermomechanical loading that compromises their surface finish and geometry over time, often leading to premature failure. In the present work, industrial operational conditions were reproduced on pilot scale in an automated forging cell to study the behavior of dies manufactured in two different tool steels. Instrumented forging dies allowed the measurement of the temperature profile during the process, while non-instrumented ones, submitted to a larger number of cycles with regular stops, allowed the analysis of the gradual evolution of the damage on the surface of the tools. This monitoring took place through several tests to characterize the surfaces, including topography measurements. Numerical simulations using the finite element method (FEM) were conducted to extract information such as contact pressures (P), sliding velocities (V) and temperatures (T) at specific points on the die surface, to construct a three-dimensional map (e.g.: $P \times V \times T$) on which the different wear modes observed in the characterization were identified. This map is intended to support the design of new hot work tools and wear resistant alloys.

Keywords: hot forging, topography, finite element analysis, wear map

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modos e mecanismos de desgaste fundamentais.....	29
Figura 2.2 – Modos de desgaste típicos em matrizes de forjamento a quente.	31
Figura 2.3 – Mapa de desgaste proposto por Lim, Ashby e Brunton (22), em vista perspectiva (esquemática) para ilustração das regiões de transição entre regimes severo e moderado.	31
Figura 2.4 – Observações na superfície do pino em função da temperatura do disco no ensaio pino-disco (39).	39
Figura 2.5 – Esquema de perfil de temperatura típico na superfície de uma matriz de forjamento durante um ciclo.	42
Figura 4.1 - <i>Billet</i> de aço AISI 1045 antes e após forjado.	48
Figura 4.2 – Célula de forjamento automatizada: a) Vista geral; b) Prensa de forjamento; c) Robô manipulador; d) Forno de indução e alimentador automático. ..	49
Figura 4.3 – Esquema do curso das matrizes	50
Figura 4.4 – Projeto das ferramentas de forjamento (matrizes instaladas no porta-ferramentas).....	51
Figura 4.5 – Dimensões da matriz superior de forjamento.	52
Figura 4.6 – Regiões do perfil da matriz identificadas sobre foto.	53
Figura 4.7 – Projeto e instalação da matriz de forjamento superior instrumentada, Tipo A (dimensões em mm)	54
Figura 4.8 – Medição da topografia da matriz (“perfilometria”): a) Esquema dos perfis obtidos; b) Medição na MMC.....	57
Figura 4.9 – Referenciamento das matrizes para medição: a) Desenho esquemático; b) Identificação sobre foto.	58
Figura 4.10 – Considerações para o alinhamento dos pontos obtidos no “plano ideal” do perfil (figura esquemática).	59
Figura 4.11 – Procedimento para quantificação do desgaste (esquemático).....	60
Figura 4.12 – Método usado para reduzir a distorção causada pela subtração dos perfis na vertical em trechos inclinados do perfil (como nas regiões C e G, que serão apresentadas adiante).....	60
Figura 4.13 – Dimensões de projeto (mm, quando não indicado) do termopar utilizado para leitura da temperatura na superfície.....	62

Figura 4.14 – Esquema de instalação do termopar para leitura na superfície da matriz superior (dimensões em mm).....	63
Figura 4.15 – Síntese do objetivo do trabalho.	64
Figura 4.16 – Curvas Tensão-Deformação do aço AISI 1045 para diferentes temperaturas.....	66
Figura 4.17 – Modelo ABAQUS.	67
Figura 4.18 – Velocidade aplicada à matriz superior em função do tempo.	68
Figura 4.19 – Esquema de cores adotado para diferenciação das regiões do perfil da matriz.	69
Figura 5.1 – Imagens do ensaio de líquido penetrante – matriz Liga_1 N°.17-B.....	71
Figura 5.2 – Imagens do ensaio de partículas magnéticas – matriz Liga_1 N°.17-B.	71
Figura 5.3 – Médias das curvas de desgaste da matriz de forjamento de aço Liga_1 com identificação de cada região.	72
Figura 5.4 – Superfícies de desgaste da matriz de aço Liga_1 após cada campanha de forjamento (dimensões em mm).	73
Figura 5.5 – Exames macrográficos da matriz de aço Liga_1: acompanhamento do desgaste superficial no pino central (regiões A, B e C).	73
Figura 5.6 – Marca de desgaste revelada na matriz de aço Liga_1, após 1000 golpes, nas superfícies compostas com os perfis medidos (marca indicada pela seta vermelha).....	74
Figura 5.7 – Micrografias das regiões A, B, D, E, F, H e I da matriz de aço Liga_1 após 1 golpe.	75
Figura 5.8 – Exame micrográfico da região B da matriz de aço Liga_1 (AISI H13) após 1 golpe.	76
Figura 5.9 – Micrografias das regiões A, B, D, E, F, H e I e réplica metalográfica da região C da matriz de aço Liga_1 após 1000 golpes.	78
Figura 5.10 – Topografia da matriz de aço Liga_1 (AISI H13) após 1000 golpes, (regiões A, B, C e D).....	79
Figura 5.11 – Imagens do ensaio de líquido penetrante – matriz Liga_2 N°.7-B.....	81
Figura 5.12 – Imagens do ensaio de partículas magnéticas – matriz Liga_2 N°.7-B.	81
Figura 5.13 – Exames macrográficos da matriz de aço Liga_2: acompanhamento do desgaste superficial no pino central (regiões A, B e C).	82
Figura 5.14 – Micrografias das regiões A, B, D, E, F, H e I da matriz de aço Liga_2 após 1 golpe.	83

Figura 5.15 – Micrografias das regiões A, B, D, E, F, H e I e réplica metalográfica da região C da matriz de aço Liga_2 após 100 golpes.	84
Figura 5.16 – Exame micrográfico; matriz aço Liga_2 (“C99”) após 1 golpe, região B.	85
Figura 5.17 – Média das curvas de desgaste das matrizes após determinado número de ciclos: a) Matriz de aço Liga_1 N°.17-B; b) Matriz aço Liga_2 N°.7-B.....	87
Figura 5.18 – Média dos perfis e superfície de desgaste após 100 golpes das matrizes de aço Liga_1 N°.17-B e aço Liga_2 N°.7-B.....	88
Figura 5.19 – Comparação das superfícies de desgaste: a) Matriz N°.17-B, Liga 1 (Figura 5.5); b) Matriz N°.7-B, Liga_2.....	89
Figura 5.20 – Estimativa do volume total removido.....	90
Figura 5.21 – Visão geral dos perfis de temperatura, matriz N°.15-A (Liga_1): acima: total de ciclos do ensaio; abaixo: ampliação de região representativa do regime estacionário.	93
Figura 5.22 – Excerto com 4 ciclos de forjamento no regime estacionário (acima) e ampliação de um único ciclo (abaixo) com identificação das etapas de forjamento (Liga_1)	94
Figura 5.23 – Visão geral dos perfis de temperatura, matriz N°.11-A (Liga_2): acima: total de ciclos do ensaio; abaixo: ampliação de região representativa do regime estacionário.	95
Figura 5.24 – Excerto com 4 ciclos de forjamento no regime estacionário (acima) e ampliação de um único ciclo (abaixo) com identificação das etapas de forjamento (Liga_2)	96
Figura 5.25 – Comparação das curvas de temperatura para cada material, por região: r0: região central (A); r1: região 1 (D); r2: região 2 (G); r3: região 3 (I).	98
Figura 5.26 – Perfil médio de desgaste medido na ferramenta de material Liga_1 após 1000 golpes (gráfico superior) e perfis de temperatura na superfície da matriz após 1 golpe, obtidos de modelo numérico.....	99
Figura 5.27 – Etapas de 1 ciclo de forjamento na simulação, com distribuição de valores de temperatura (<i>step forja</i> ; incrementos (<i>frames</i>) indicados na figura).....	100
Figura 5.28 – Nós correspondentes à posição da ponta dos termopares.	101
Figura 5.29 – Perfis de temperatura obtidos dos 3 golpes: a) Experimental; b) Numérico.....	102
Figura 5.30 – Perfil de temperatura para 1 golpe: a) Experimental; b) Numérico....	103
Figura 5.31 – Variáveis obtidas da simulação na superfície da matriz durante o período de 1 ciclo de forjamento.	105

Figura 5.32 – Temperatura na superfície da matriz (em °C) ao longo do <i>step forja2</i> obtida na simulação (ABAQUS).....	106
Figura 5.33 – Valores máximos da pressão de contato (em Pa) sobre a superfície da matriz superior durante 1 ciclo.....	107
Figura 5.34 – Valores máximos da velocidade de deslizamento (em m/s) durante 1 ciclo.....	107
Figura 5.35 – Grupos identificados sobre mapa das variáveis.	108
Figura 5.36 – Mapa de desgaste.	110

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Modos de desgaste em processos de conformação.	30
Tabela 2.2 – Tipos gerais de causas de falhas em matrizes de forjamento.....	36
Tabela 2.3 – Fatores de influência no desgaste abrasivo e na fadiga térmica.	37
Tabela 4.1 – Parâmetros dos ensaios de forjamento.	51
Tabela 4.2 – Materiais empregados na confecção das matrizes de forjamento.....	53
Tabela 4.3 – Matriz de ensaios com acompanhamento de desgaste.....	55
Tabela 4.4 – Ensaios com acompanhamento de temperatura.	61
Tabela 4.5 – Propriedades térmicas e mecânicas gerais dos materiais utilizadas nos modelos em QForm [®] e DEFORM [®]	65
Tabela 4.6 – Algumas propriedades térmicas e mecânicas do aço Liga_1 utilizadas no modelo ABAQUS.....	67
Tabela 5.1 – Termopares utilizados na instrumentação da matriz de forjamento.	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Contexto do projeto.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 Tribologia	26
2.2 Modos de desgaste.....	28
2.2.1 Classificação.....	28
2.2.1.1 Abrasão	32
2.2.1.2 Adesão	32
2.2.1.3 Deformação plástica.....	33
2.2.1.4 Fadiga	33
2.2.1.5 Oxidação	35
2.2.2 Fatores que afetam a vida útil das matrizes	36
2.3 Análise e medição do desgaste	40
2.4 Instrumentação e medição de temperatura	41
2.5 Simulação numérica	44
3 OBJETIVO	47
4 MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1 Processo.....	48
4.2 Especificação das matrizes de forjamento.....	51
4.3 Acompanhamento do desgaste	55
4.3.1 Quantificação do desgaste	57
4.4 Medição de temperatura	61
4.5 Simulação numérica	63
4.5.1 Mapa de desgaste	63
4.5.2 Modelos	64

5	RESULTADOS	70
5.1	Desgaste	70
5.1.1	Matriz de aço Liga_1	70
5.1.2	Matriz de aço Liga_2	80
5.1.3	Comparação dos resultados de perfilometria	86
5.2	Perfil experimental de temperaturas.....	91
5.3	Resultados de simulação	99
5.3.1	Modelos preliminares	99
5.3.2	Modelo ABAQUS.....	100
5.3.2.1	Perfil numérico de temperaturas	101
5.3.2.2	Variáveis do mapa	104
5.4	Mapa de desgaste	108
6	CONCLUSÃO	111
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	112
8	REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO

A falha prematura de ferramentas de conformação na indústria de transformação é um tema de interesse recorrente em pesquisa. Frequentemente, o objetivo é reduzir os custos de produção e aumentar o intervalo de troca de ferramentas, bem como aumentar a qualidade dos produtos. No caso específico do forjamento a quente, o custo das matrizes pode chegar a 30% do custo total de produção (1) e a maior influência na falha destas matrizes (cerca de 70%) é atribuída ao desgaste (2,3). Um estudo com cerca de 120 formatos de cavidade de 20 diferentes forjarias mostrou que o desgaste abrasivo é predominante (responsável por mais de 70% de todas as falhas), seguido da fadiga mecânica e falha catastrófica (mais de 25%), enquanto a fadiga térmica e deformação plástica responderiam pelo restante (4). O principal mecanismo de falha, contudo, depende principalmente das condições de operação da ferramenta, e pode mudar no decorrer do processo (5). Disto, plantas de forjamento modernas têm dado maior importância ao uso de ferramentas de medição da integridade da superfície, seguindo a crescente demanda dos clientes por peças de alta qualidade, principalmente das indústrias automotiva e aeronáutica (6,7).

O dano em matrizes de forjamento a quente deve-se ao severo gradiente térmico e aos choques mecânicos a que essas ferramentas são submetidas durante o processo, o que reduz sua vida útil e compromete o acabamento superficial do forjado. Frequentemente, assume-se que a durabilidade da ferramenta é expressa pelo número de operações que podem ser realizadas com esta ferramenta para obtenção de forjados com a qualidade desejada. Do ponto de vista da ferramenta em si, a durabilidade estaria associada à resistência a fatores que levam à sua degradação durante a operação, como, no caso do forjamento a quente, choques térmicos, variação cíclica de cargas mecânicas e desgaste (8,9).

No forjamento a quente a temperatura é fator que tem grande influência no desgaste das ferramentas (10). Ao longo dos anos, diversas técnicas, invasivas ou não, têm sido desenvolvidas para sua medição. O uso de termopares, câmera termográfica, pirômetros óticos de radiação, fibra ótica, materiais com ponto de fusão conhecido e alterações na microestrutura em função da temperatura no caso de ferramentas de aço rápido são exemplos de técnicas empregadas na indústria (11,12). Medições de temperatura diretamente na superfície da ferramenta, no

entanto, são dificultadas por características inerentes ao processo (13), o que constitui um desafio na instrumentação.

Resultados experimentais de desgaste e temperatura nas matrizes são importantes para entendimento das diferentes formas de dano. Embora exista uma série de trabalhos sobre o tema, conforme será apresentado no decorrer do texto, ainda há campo para contribuições que ampliem o conhecimento sobre desgaste, sobretudo com resultados experimentais originais.

A combinação de resultados experimentais com simulações numéricas do processo de forjamento também leva a uma melhor compreensão dos efeitos dos diferentes fatores de influência no dano, sobretudo daqueles que não se consegue medir diretamente (5). Modelos numéricos deste processo são desenvolvidos cobrindo desde o uso de elementos finitos (EF) (5,14–21) até o uso de redes neurais (1,2).

Uma forma gráfica de se correlacionar tais fatores de influência é através da composição de mapas de desgaste, como o desenvolvido em (22). Trabalhos recentes (23,24) têm feito uso deste recurso, citado como uma poderosa ferramenta de engenharia para análise de mecanismos de dano.

O presente trabalho congrega dados experimentais com resultados de simulação numérica para criação de um mapa no qual possam ser identificados diferentes modos de desgaste, com o intuito de fornecer subsídios para estudo dos fenômenos e para o projeto de ligas que aumentem a vida útil das ferramentas.

1.1 Contexto do projeto

O Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) tem trabalhado nas últimas duas décadas em parceria com o Laboratório de Processos Metalúrgicos (LPM) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) no desenvolvimento de ligas resistentes ao desgaste para utilização em ferramentas de conformação a quente. Ao longo deste desenvolvimento, dados experimentais da topografia da superfície de matrizes de forjamento e perfis de temperatura durante o processo foram adquiridos e revelaram a contribuição de diversas formas de desgaste da ferramenta. As capacitações do LPM e do LFS permitem a investigação do comportamento do

material frente às solicitações típicas do processo, como nos ensaios realizados em uma célula piloto de forjamento, onde se pôde reproduzir o desgaste observado nas ferramentas industriais.

O projeto de mestrado foi desenvolvido no âmbito do projeto de capacitação IPT N°. 5003.03.A (Tutor: Ana Paola Villalva Braga). Considerou-se dentro do escopo do projeto a possibilidade de comparação dos resultados experimentais com respostas de modelo numérico desenvolvido no projeto “Sistema avançado para projeto de ligas aplicadas em ferramentas de conformação a quente”, IPT N°. 3777.02.A (25), realizado entre 2012 e 2016 nas instalações do IPT e da EPUSP, com financiamento BNDES, tendo a Gerdau como empresa interveniente. Este último projeto teve continuidade internamente no IPT sob forma do projeto de capacitação N°. 5003.75.A, no período de setembro de 2017 a junho de 2018.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A operação de forjamento consiste na transformação mecânica de um material pela aplicação de uma deformação predominantemente compressiva que o leva de sua forma original até a forma de uma peça desejada. No caso do forjamento em matriz fechada, a forma final é determinada pela matriz de forjamento (molde da peça). Para aços, este processo pode ocorrer a quente, sendo o material a ser forjado (peça de trabalho ou “*workpiece*”) previamente aquecido a uma temperatura normalmente acima de sua temperatura de recristalização. Em termos da temperatura homóloga (escala de temperatura que assume a temperatura de fusão T_f do material como 1,0) o trabalho a quente é definido como aquele executado com material aquecido a temperaturas acima de $0,5 T_f$ (26).

Embora os efeitos metalúrgicos mais proeminentes dessa transformação sejam os que ocorrem no forjado, efeitos são induzidos também na matriz de forjamento, devido ao ciclo térmico ao qual esta é submetida durante o processo. Isto pode levar à alterações nas condições de contato e, conseqüentemente, afetar as características do "sistema tribológico".

2.1 Tribologia

A tribologia é definida como o ramo da ciência e tecnologia que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo, o que inclui tópicos de estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação (27–29). Os componentes envolvidos num carregamento tribológico, e suas respectivas propriedades, compõem o que se chama de "sistema tribológico" ou "tribossistema" (30). Tais componentes se referem aos corpos cujas superfícies estão em movimento relativo, elementos interfaciais (lubrificantes, debris de desgaste, etc.) e ao meio em que estão inseridos (atmosfera, vácuo, etc.). São igualmente parte do tribossistema as forças e velocidades relativas presentes no contato.

O estudo do atrito entre corpos remonta a pesquisas desenvolvidas por Leonardo da Vinci (1452-1519) (31). As leis elencadas por da Vinci foram revisitadas e reescritas por Guillaume Amontons (1663-1706), que as divulgou em sua obra de 1699 “*De la resistance causée dans le machines*” (“Da resistência causada em

máquinas”, em tradução livre) (32). As leis propostas por Amontons foram posteriormente complementadas por Charles Augustin Coulomb (1736-1806), constituindo as três **Leis do Atrito** (27):

1. A força de atrito é proporcional à força normal;
2. A força de atrito é independente da área de contato;
3. A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

A primeira lei sugere um coeficiente de proporcionalidade, o coeficiente de atrito μ , e pode ser expressa como (Equação (2.1)):

$$F = \mu \cdot F_N \quad (2.1)$$

onde F representa a força de atrito e F_N , a força normal. Diferentemente de Amontons, o foco dos trabalhos produzidos por Coulomb estava na mecânica e na resistência dos materiais (32). Com base em seu trabalho, é possível reescrever a primeira lei considerando as tensões de cisalhamento e a tensão normal no material, conforme Equação (2.2):

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \sigma_N \quad (2.2)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento no material devido à força externa (corpo em contato), τ_0 é uma tensão pré-existente no material numa situação de ausência de carga externa, σ_N é a tensão normal numa dada seção e μ é o coeficiente de atrito. Esta última expressão é conhecida como modelo de atrito de Coulomb-Amontons.

Outro tópico importante do comportamento tribológico dos materiais é o desgaste. Em 1956, Archard e Hirst (33) propuseram, com base em ensaios experimentais de deslizamento entre metais sem lubrificação, um modelo para quantificação do volume removido W , que relaciona a distância percorrida no deslizamento relativo entre os corpos L , a força normal aplicada F_N , a dureza H do material mais mole e uma constante K de proporcionalidade, relacionada à probabilidade de produção de uma partícula de desgaste, como apresentado na Equação (2.3).

$$W = K \cdot \frac{L \cdot F_N}{H} \quad (2.3)$$

Além dos fatores da expressão, o desgaste tem ainda como influência características próprias dos materiais em contato (corpo/ contra-corpo), alterações nas propriedades das superfícies durante o contato, a temperatura e a ocorrência ou não de um elemento interfacial.

2.2 Modos de desgaste

2.2.1 Classificação

Uma possível classificação do desgaste leva em conta sua severidade, baseada no tamanho, forma e composição dos debris de desgaste, aparência das superfícies de desgaste e taxa de desgaste (34). Tal classificação indica o regime como *moderado* ou *severo*, e Hutchings (27) mostra que a transição entre estes regimes em determinados tipos de materiais resulta de uma mudança na natureza do contato, estando fortemente relacionada à taxa de formação e remoção de filmes de óxido da superfície. Esta classificação do desgaste foi originalmente proposta por Archard e Hirst (33). No forjamento a quente, as cargas, e correspondentes pressões, apontam o processo como uma fonte de desgaste severo (1,35).

Em (1), a análise da superfície de desgaste de um punção para forjamento a quente revelou três modos de desgaste que competem entre si: adesão, abrasão e oxidação. Estes modos são frequentemente subdivididos em mecanismos secundários. A adesão, por exemplo, pode ocorrer na forma de: *scuffing*, quando o contato entre superfícies sem lubrificação suficiente leva a mudanças macroscópicas em sua rugosidade, com marcas alinhadas com a direção de movimento relativo, geralmente classificado como um mecanismo de desgaste moderado (36); *scoring*, que envolve a formação de sulcos e riscos na direção de deslizamento e pode também implicar no riscamento por partículas abrasivas, e; *galling*, que representa uma forma mais severa de *scuffing* devido à solda localizada, sendo associado ao dano superficial grosseiro (27). O *galling* frequentemente se refere ao dano resultante do contato não-lubrificado sob baixa velocidade de deslizamento e altas

pressões de contato, caracterizado pelo aumento severo da rugosidade das superfícies e pela transferência ou deslocamento de grandes fragmentos de material, podendo ocorrer em sistemas lubrificados em regiões onde houve quebra de filme lubrificante.

Embora muitos trabalhos concordem entre si na nomenclatura do desgaste, não existe uma classificação única. Zum Gahr (37) classifica como *modo de desgaste* o movimento relativo entre as partes, enquanto *mecanismo de desgaste* estaria relacionado ao processo pelo qual a superfície perde material. A Figura 2.1 apresenta a classificação conforme proposto pelo autor.

Figura 2.1 – Modos e mecanismos de desgaste fundamentais.

Fonte: adaptado de (34,37).

Diferentemente do proposto pelo autor, podemos tratar por *modo de desgaste* a forma com que se apresenta (como desgaste adesivo, desgaste abrasivo, fadiga de contato, etc.), deixando reservada a expressão *mecanismo* para a maneira como esse desgaste efetivamente ocorre (como por microsulcamento, por exemplo, no caso de desgaste abrasivo).

Processos de conformação mecânica apresentam diferentes modos de desgaste. No forjamento a quente, além da abrasão, adesão e oxidação citados, ocorre também deformação plástica, fadiga mecânica e fadiga térmica. A Tabela 2.1 apresenta modos de desgaste típicos para alguns processos. Nota-se que laminação e forjamento apresentam todos os modos elencados.

Tabela 2.1 – Modos de desgaste em processos de conformação.

Modo Processo	abrasão	adesão	fadiga de baixo ciclo	fadiga de alto ciclo	fadiga térmica*	corrosão	deformação plástica
Estampagem	●	●	●	●			●
Repuxo	●	●					
Laminação	●	●	●	●	●	●	●
Extrusão	●	●	●	●	●		●
Forjamento	●	●	●	●	●	●	●
Injeção	●	●			●	●	

*Válido para processos a elevadas temperaturas.

Fonte: adaptado de Podgornik e Leskovšek (7). Traduzido pelo autor.

Os diferentes modos de desgaste costumam aparecer de forma combinada nas superfícies de um dado par de corpos em contato. Alguns desses modos, no entanto, podem predominar em determinadas regiões. A Figura 2.2 (30,38) apresenta alguns modos típicos em diferentes regiões da superfície de uma matriz de forjamento a quente.

No trabalho desenvolvido por Lim, Ashby e Brunton (22), a classificação entre desgaste severo e moderado proposta por Archard e Hirst (33) é utilizada em mapas que correlacionam parâmetros característicos do processo como velocidade de deslizamento e pressão de contato ao modo de desgaste dominante e à taxa de desgaste. Tal correlação foi utilizada para classificação do desgaste no contato metal-metal de corpos submetidos a ensaios de deslizamento pino-disco unidirecional, sem lubrificação, sob várias condições de deslizamento – esta classificação congrega efeitos físicos e metalúrgicos do desgaste nos corpos. A Figura 2.3 apresenta uma versão em perspectiva do mapa proposto, a fim de

evidenciar as regiões de transição entre regimes (o patamar indica a área de ocorrência de desgaste severo, e a base, de desgaste moderado).

Figura 2.2 – Modos de desgaste típicos em matrizes de forjamento a quente.

Fonte: adaptado de (30,38).

Figura 2.3 – Mapa de desgaste proposto por Lim, Ashby e Brunton (22), em vista perspectiva (esquemática) para ilustração das regiões de transição entre regimes severo e moderado.

Fonte: adaptado de (22). Traduzido pelo autor.

2.2.1.1 Abrasão

A abrasão é uma das formas mais recorrentes de desgaste em matrizes de forjamento a quente. Este modo é caracterizado por sulcos na direção de escorregamento (1,5,8,39,40), e para materiais que apresentam deformação plástica pode ser subdividido em 3 diferentes mecanismos: microsulcamento (*“ploughing”*), formação de proa (*“wedge formation”*) e microcorte (*“cutting”*) (41), dependendo do grau de penetração da partícula abrasiva. O microsulcamento descreve um sulco (resultante de uma deformação plástica no contato com corpo abrasivo de maior dureza) sem evidência de perda significativa de material. Na formação de proa, o material deformado plasticamente durante o contato acumula-se na frente do abrasivo, sendo destacado a medida que este acúmulo atinge um volume crítico, dando origem a pequenos debris de desgaste. No microcorte, material é removido em forma de tiras de cavaco, e há aqui portanto expressiva perda de massa. Do primeiro para o terceiro mecanismos, aumenta-se o grau de penetração da partícula abrasiva, sendo este grau função da carga aplicada, de características geométricas e dos materiais. O aumento na carga pode levar à transição de um regime de desgaste moderado (caracterizado pelo microsulcamento) para severo (caracterizado pelo microcorte). (22,41)

O desgaste abrasivo normalmente ocorre pela *abrasão entre 2 corpos*, quando o atrito se dá diretamente entre as superfícies de um corpo e de um contra-corpo, e *entre 3 corpos*, quando um terceiro corpo se interpõe às superfícies.

2.2.1.2 Adesão

Adesão refere-se à transferência de material de uma superfície de contato para outra. Altas pressões e temperaturas fazem com que ocorra deformação plástica de asperezas no contato entre duas superfícies metálicas sob movimento relativo, unindo pequenas áreas destas superfícies (1,36) e levando ao arrancamento de porções do material. No forjamento a quente, pequenas porções removidas (*spalling pits* (1,5)), observadas em imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), são normalmente encontradas em regiões da

superfície da ferramenta submetidas a altas pressões e baixas velocidades de deslizamento.

2.2.1.3 Deformação plástica

A deformação plástica está presente em uma série de modos de desgaste, como na abrasão, adesão, fadiga mecânica, etc.. O advento de altas temperaturas durante a conformação reduzem a tensão de escoamento do material, o que o torna mais susceptível a deformações permanentes (42). A deformação plástica é uma forma efetiva de desgaste, principalmente quando o material é submetido a ciclos de esforços que causem fadiga mecânica, o que por sua vez leva à perda de material por quebra.

2.2.1.4 Fadiga

A fadiga no processo de forjamento é determinada pela condição de carregamento dinâmico cíclico ao qual a ferramenta é submetida. Uma classificação usual considera o número de ciclos N suportado por uma ferramenta até que apresente sinais de fadiga, caracterizada fundamentalmente pelo aparecimento de trincas no material, ou por sua falha catastrófica: para um número N inferior a 10^3 ~ 10^4 ciclos tem-se a fadiga de baixo ciclo, onde a vida é determinada pelo acúmulo de deformação plástica por ciclo, e no qual o processo de forjamento a quente é normalmente classificado. Williams (43) apresenta as diferentes formas de resposta de uma estrutura a carregamentos cíclicos: perfeitamente elástico; *shakedown* elástico; *shakedown* plástico ou plasticidade cíclica e colapso incremental ou *ratchetting*. Os regimes de *shakedown* são basicamente determinados por um primeiro ciclo com deformação plástica, e ciclos subsequentes onde, para a mesma carga aplicada, se estabelece um regime cíclico totalmente elástico (*shakedown* elástico) ou ciclicamente plástico (*shakedown* plástico). A última forma elencada (*ratchetting*) está relacionada ao acúmulo incremental de dano por deformações plásticas sucessivas, o que leva ao esgotamento plástico (frequentemente com perda de material, neste caso devido à quebra).

Gronostajski *et al.* (8) observaram que trincas de fadiga aparecem em regiões onde há concentração de tensão na superfície da matriz de forjamento, como em raios de concordância, e se desenvolvem ao longo do uso da ferramenta. Quando ocorrer, a deformação plástica nessas regiões pode ser utilizada para estimativa do número de ciclos para falha através da fórmula de Coffin-Manson (44), Equação (2.4):

$$N_f^n \varepsilon_p = C \varepsilon_f \quad (2.4)$$

onde N_f é o número de ciclos para falha, ε_p corresponde à deformação plástica por ciclo, ε_f é um coeficiente de resistência à fadiga, definido como a deformação do material necessária para que ocorra falha num único ciclo, e C e n são constantes do material. A deformação plástica ε_p é a mesma descrita no regime de fadiga de baixo ciclo, e que aparece nas definições de *shakedown*.

Diversos trabalhos discutem os fatores de influência na vida em fadiga de ferramentas submetidas a ciclos térmicos. Em Oudin* (apud Oudin (45)), os autores propõem uma lei de potência fenomenológica para predição da TMF em função da temperatura máxima do ciclo T_{max} , Equação (2.5), baseada em resultados de fadiga termo-mecânica (TMF, na sigla em inglês). O intuito foi contribuir para um modelo de predição numérico mais completo, uma vez que os softwares comerciais de simulação de conformação consideram basicamente as ferramentas com comportamento termoelástico e termoplástico.

$$\Delta \varepsilon_m = K(T_{max}) \cdot N_f^{\alpha(T_{max})} \quad (2.5)$$

Na expressão, $\Delta \varepsilon_m$ representa a amplitude de deformação mecânica e K e α são constantes dependentes da temperatura máxima. Os autores citam ainda que a dependência drástica em T_{max} pode ser explicada pelo fato de que, em altas temperaturas, a deformação inelástica e evoluções da microestrutura (movimentação de discordâncias, aniquilação e rearranjo, crescimento de carbonetos, etc.) são fenômenos termomecanicamente ativados. Sob a condição de um carregamento cíclico constante, Vlasov, Biba e Stebunov (21) citam que apenas

* OUDIN, A.; PENAZZI, L.; RÉZAI-ARIA, F. *Matériaux & Techniques*, N° Hors Série, 67.

o primeiro ciclo deveria experimentar deformação plástica, enquanto os demais ficariam dentro do limite elástico devido ao encruamento do material (*shakedown* elástico). Entretanto, esta conclusão é válida para uma situação de encruamento isotrópico, de modo que deformações plásticas podem ser acumuladas sob condições de encruamento cinemático ou misto.

Os fenômenos de *pitting* e *spalling* são associados à fadiga de contato (46). Diferentemente dos *spalling pits* citados na adesão, neste caso não há necessariamente transferência de material de uma superfície para outra, mas há perda de material pela propagação de trincas subsuperficiais que se conectam com o passar dos ciclos, levando ao seu destacamento. *Pitting* refere-se ao destacamento de pequenos fragmentos, para trincas que se conectam a uma profundidade de até 10 μm da superfície, ao passo em que *spalling* leva a fragmentos de tamanho da ordem de 20-100 μm (42,46).

2.2.1.5 Oxidação

A oxidação é classificada como um modo associado à reação triboquímica da superfície de desgaste com o meio. Para duas superfícies que deslizam uma sobre a outra sob efeito de carga, devido ao calor externo e ao calor gerado pelo atrito, a superfície poderá ser oxidada e o filme de óxido crescerá lentamente durante o processo. Esta camada de óxido é resultado da adsorção de oxigênio nas áreas de contato e da difusão de oxigênio para o interior de microvolumes do metal deformados plástica e elasticamente, acompanhadas pela formação de filmes de solução sólida (1,5). Atingindo um valor crítico, esta camada cerâmica é removida, passando a atuar como um terceiro corpo do tribossistema. O fenômeno de oxidação é estabelecido como agente de desgaste durante o contato quando a taxa de formação do filme é maior que a de sua remoção.

A camada oxidada pode, até certo ponto, atuar como um revestimento que protege a superfície metálica do desgaste, como um lubrificante. Um exemplo foi o observado por Pereira (47) na análise do desgaste em punções de forjamento a quente. No trabalho, abrasão e fadiga térmica foram modos observados apenas na camada oxidada, tendo o desgaste na superfície metálica propriamente dita ocorrido por adesão.

2.2.2 Fatores que afetam a vida útil das matrizes

Na breve revisão apresentada por Chander e Chawla (4), os tipos gerais de causas de falhas em matrizes de forjamento a quente podem ser classificados como “catastrófica”, “devida à manufatura”, e “operacional”, como apresentado na Tabela 2.2. Destes três, o operacional se apresentou como responsável direto por falha nas matrizes, relacionada às condições de operação como temperatura, carregamento mecânico, aquecimento e resfriamento contínuos e integridade do forjado.

Tabela 2.2 – Tipos gerais de causas de falhas em matrizes de forjamento.

Catastrófica	Devida à manufatura	Operacional
<ul style="list-style-type: none"> • Falha no projeto • Falhas devidas à condições alheias ao controle (“força maior”) • Acondicionamento inadequado • Manuseio inadequado durante transporte 	<ul style="list-style-type: none"> • Material defeituoso • Falha no processo de manufatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições de carregamento • Manuseio do material • Recondicionamento

Fonte: Chander e Chawla (4). Traduzido pelo autor.

Lange *et al.* (3) apresentam uma visão geral de fatores que afetam a vida útil de matrizes de forjamento, indicando como restrições à continuidade de sua operação: a fratura, ocorrência típica em processos de forjamento a frio, a deformação plástica e o desgaste, presente no forjamento a morno e a quente. Os autores citam ainda que materiais ideais para aplicação em forjamento seriam aqueles com alta dureza e alta tenacidade à fratura. O desgaste, por sua vez, tem como fatores de influência temperatura, carga, velocidade, vibração, atmosfera, propriedades dos materiais, lubrificação, distância de deslizamento, área de contato, acabamento, forma e tipo de movimento. Fatores de influência no desgaste abrasivo e na fadiga térmica são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Fatores de influência no desgaste abrasivo e na fadiga térmica.

Modo de desgaste	Propriedade	Fatores de influência
Desgaste abrasivo	Propriedades do abrasivo	tamanho da partícula formato da partícula dureza limite de resistência propriedades da fratura concentração
	Propriedades do material	dureza limite de resistência módulo elástico ductilidade tenacidade características de encruamento tenacidade à fratura microestrutura resistência à corrosão
Fadiga térmica	Ciclo de temperatura da matriz	temperatura de pré-aquecimento temperatura da superfície da matriz tempo de permanência na temperatura de pico taxa de resfriamento
	Propriedades básicas do material da matriz	coeficiente de expansão térmica condutividade térmica limite de resistência à quente dureza à quente resistência ao <i>creep</i> (fluência) ductilidade
	Concentradores de tensão	raios, furos e cantos rugosidade superficial

Fonte: adaptado de (4). Traduzido pelo autor.

Rooks, Singh e Tobias (48) discutem, por meio da análise de matrizes em martelo de recalque de alta velocidade, a influência do gradiente de temperatura, do tempo de contato e do uso de lubrificante no desgaste das matrizes, relacionando-os à microestrutura do material. No trabalho observou-se que, para um tempo de contato mais longo entre matriz e peça conformada e com a utilização de lubrificante (suspensão coloidal de grafite em água), a matriz se manteve num ciclo térmico com início numa temperatura abaixo da de transformação martensítica (M_s) e com pico

acima da de austenitização (Ac1). Como efeito metalúrgico, tem-se que este gradiente levou a formação de “camada branca” em região circular em torno do centro da matriz, onde foram constatadas trincas de fadiga.

A ocorrência de camada branca é relatada em diversos trabalhos na análise de superfícies de atrito (3,10,18,22,39,42,49–51). Trata-se fundamentalmente de martensita “fresca” ou não-revenida, formada pela austenitização do material durante o contato, por período que permita tal transformação, seguido de resfriamento rápido, onde, abaixo de Ms, ocorre a transformação martensítica (48,51). A formação da camada branca está relacionada à temperatura (devido inclusive a altas temperaturas *flash*[†] (22)), à taxa de resfriamento, à carga (51), ao tempo de contato (48) e à velocidade de deslizamento (52), sendo tanto mais provável seu surgimento quanto maiores forem os valores destas variáveis.

A influência da lubrificação no desgaste de matrizes é especificamente discutida por Hawryluk *et al.* em (53). O trabalho aponta a influência, além da escolha do lubrificante, da frequência de exposição à dose e precisa seleção do volume administrado nas superfícies das ferramentas. O excesso de lubrificação no processo de forjamento pode levar ao chamado “efeito diesel”, quando bolhas de ar presentes no óleo mineral são comprimidas a altas velocidades e aquecidas, levando à auto-ignição da mistura ar-gás, o que acarreta danos às superfícies da ferramenta e do forjado (30,49). Com relação a formação de camada branca, trabalhos divergem quanto a influência da lubrificação: em (48), os autores observam a formação de camada branca em matrizes de recalque com alto tempo de contato e sob lubrificação, enquanto em (10) foram os punções sem lubrificação que apresentaram a maior espessura de camada. A formação da camada, de qualquer forma, depende das demais condições do processo.

Os mecanismos de desgaste observados numa superfície têm sua origem em determinadas condições de contato. Barrau *et al.* (39) descrevem os vários estágios do comportamento do tribossistema, identificados pela análise das superfícies dos corpos num ensaio pino-disco. A Figura 2.4 ilustra as observações feitas na superfície do pino em função da temperatura do disco. Foram utilizados para fabricação do pino o aço ferramenta AISI H11 (X38CrMoV5) e, do disco, o aço carbono ferrítico-perlítico AISI 1018 (XC18). Os pinos foram tratados termicamente

[†] Temperaturas *flash* são picos locais de temperatura no contato entre asperezas (27).

para dureza inicial de 42 HRC e 47 HRC. Os discos foram pré-aquecidos a temperaturas de (20, 200, 500, 700, 800 e 950) °C, para execução dos ensaios, e o contato com o pino se deu sob aplicação de uma carga de 20 N, com os discos mantidos a uma rotação de 100 rpm (velocidade linear de 0,167 m/s) durante 1 h (3600 s). Nenhuma diferença nos fenômenos de superfície foi observada entre os pinos de diferentes durezas na mesma temperatura de teste.

Figura 2.4 – Observações na superfície do pino em função da temperatura do disco no ensaio pino-disco (39).

Fonte: autoria própria.

Como conclusão, temos que a diversidade dos fatores de influência no desgaste de matrizes de forjamento agrega complexidade ao estudo do tema. A ação combinada destes diversos fatores, que diminuem a vida útil das ferramentas, é uma característica intrínseca do processo, cabendo à engenharia das matrizes o papel de fazer com que resistam por mais tempo à demanda severa da operação. É notável a influência da temperatura no desgaste, visto contribuir tanto para formação da camada de óxido (que em determinado momento atua como agente que colabora com o aumento da taxa de desgaste) quanto para a diminuição da tensão de escoamento do material, o que promove sua deformação plástica. O advento da ciclagem térmica surge também como fator importante, sendo responsável pelo surgimentos de tensões trativas e compressivas na interface entre a matriz e a

camada de óxido que agem para a formação de malha de trincas, fenômeno conhecido por “*heat checking*”.

2.3 Análise e medição do desgaste

A quantificação do desgaste é possível, entre outras formas, por intermédio da medição da topografia das superfícies. Uma técnica bem estabelecida na indústria para medição de geometrias é a de medição tridimensional, que faz uso de uma máquina de medição por coordenadas (MMC). Nessa técnica, um elemento sensor, normalmente de contato (apalpador), toca a peça em determinados pontos e registra as coordenadas espaciais XYZ destes pontos. A saída ao término da medição é uma nuvem de pontos que podem ser numericamente interpolados para composição de uma superfície contínua que reproduza a geometria do corpo.

Para medições em maior detalhe, onde se pretende a investigação de efeitos da rugosidade, a técnica de medição por interferometria é amplamente empregada. Neste caso, a medição é feita sem contato, através da análise de padrões de interferência criados por um feixe de luz refletido pela superfície. Marek Hawryluk tem publicado trabalhos sobre o tema, especificamente sobre a medição de matrizes de forjamento a quente, como descrito a seguir.

Em (54), Hawryluk e Ziemba propõem a quantificação do desgaste da ferramenta através da medição da topografia do forjado, e não das matrizes, como usual, técnica que chamaram de “*scanning reverso*”. Para tanto, foram empregados *scanners a laser* (técnica de medição tridimensional sem contato) para medição da topografia das matrizes e dos forjados, e os resultados foram correlacionados para avaliação de sua compatibilidade. Os autores citam que os danos mais frequentes encontrados nos forjados são: subpreenchimento da cavidade (pela ausência de cantos ou por *efeito Rebinder*[‡]); trincamento da superfície (laceração); trincas subsuperficiais; e descarbonetação. Nas matrizes, os tipos de dano mais comuns são: desgaste abrasivo; malha de trinca termomecânica; deformação plástica; fadiga mecânica; e fratura frágil. Já em (53), Hawryluk *et al.* descrevem que a assimetria no desgaste das ferramentas foi quantificada através de medição tridimensional, em

[‡] O efeito Rebinder refere-se a fragilização de um sólido sob tensão pela adsorção de um meio líquido ou gasoso com o qual esteja em contato, e com o qual tenha similaridade química (72).

artigo que discute a influência da lubrificação da ferramenta no desgaste. Estes mesmos temas discutidos por Hawryluk (“*scanning* reverso” e lubrificação) são também encontrados em (55).

O trabalho de Abachi, Akkök e Gökler (15), baseado na dissertação de Abachi (14), analisa a superfície de uma matriz no último estágio de forjamento. Um modelo numérico para simulação por método de volumes finitos (FVM, na sigla em inglês) foi concebido com uso do software MSC.SuperforgeTM e os perfis de desgaste resultantes do modelo foram comparados com os perfis do projeto original da ferramenta (CAD) e com os perfis obtidos por máquina de medição por coordenadas (MMC). A comparação com o perfil do projeto da ferramenta identificou as regiões com ocorrência de deformação plástica. Três regiões da ferramenta foram analisadas: perfil longitudinal, perfil transversal e região de formação da rebarba. A pesquisa concluiu, dentre outros pontos, que regiões que sofrem altas tensões efetivas estão susceptíveis a deformação plástica e que temperatura de operação (T), pressão de contato (P), velocidade de deslizamento (V) e tempo de contato são fatores que exercem grande influência na profundidade do desgaste, embora não apresente explicitamente uma quantificação do efeito de cada uma destas variáveis. O comportamento destas variáveis, extraído de um modelo numérico (EF) de um punção para forjamento de cubo de roda, é apresentado em (1), através de gráficos de P , V e T em função do tempo, durante 1 ciclo, tomados de um único ponto de controle no raio do punção.

2.4 Instrumentação e medição de temperatura

Um dos principais fatores de influência no desgaste em matrizes de forjamento é a temperatura (56). As cargas térmicas nas ferramentas são devidas basicamente à radiação térmica do material a ser forjado, ao calor gerado no atrito entre os corpos e à deformação plástica (48). A matriz superior aquece por radiação do *billet* em sua aproximação e condução durante o contato, e perde calor por radiação com o meio, condução para o porta-ferramentas e convecção por meio do lubrificante. Os valores de temperatura que alcançam as diferentes regiões da superfície da ferramenta e a ocorrência de temperaturas *flash* durante o contato são

responsáveis pela redução local da dureza superficial, o que tem impacto na resistência mecânica do material.

A medição de temperatura em ferramentas de conformação a quente é tema recorrente de investigação, mas se depara com dificuldades operacionais inerentes ao processo. Especificamente no forjamento, as altas pressões, a temperatura e o atrito são fatores que dificultam a instrumentação de matrizes. Terčelj *et al.* (13) citam que termopares instalados diretamente entre duas superfícies dinâmicas sob alta pressão dificilmente suportariam o primeiro golpe e, dessa forma, esta abordagem não teria significado prático. Um esquema de curva típica de temperatura na superfície da matriz durante um ciclo de forjamento é apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Esquema de perfil de temperatura típico na superfície de uma matriz de forjamento durante um ciclo.

Fonte: adaptado de Luig[§] (apud (30)).

[§] LUIG, H. **Einfluss von Verschleißschutzschichten und Rohteilverzunderung auf den Verschleiß beim Schmieden**. *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, Grund- und Werkstoffe*, Nr. 315. PhD Thesis, Universität Hannover, 1993.

O trabalho de Kellow *et al.* (52) apresenta a construção de um termopar de superfície numa matriz de forjamento. Este termopar foi confeccionado com um fio de constantan e um fio de aço carbono, e a junta quente do sensor foi formada por polimento da união entre estes fios, montados dentro de um inserto de aço, de modo que ficasse localizada na superfície da ferramenta. O fio de constantan foi isolado do corpo do inserto até a ponta por um esmalte vítreo. Abaixo da superfície foram instalados termopares tipo K convencionais, de isolamento mineral. O trabalho discute fatores de influência na temperatura da superfície da ferramenta, como efeito da velocidade de impacto e presença de camada oxidada. A velocidade de impacto contribui para um aumento na temperatura superficial da ferramenta pois, quanto maior, aumenta o atrito interfacial entre ferramenta e *billet*. A camada de óxido, no entanto, tenderia a diminuir a temperatura superficial, na medida em que se torna tanto mais isolante quanto mais espessa. Foram registradas temperaturas na faixa de 650 °C à ~1000 °C.

Bariani *et al.* (16) apresentam a instrumentação de um par de matrizes de forjamento com 10 termopares tipo K, 5 na matriz superior a 2 mm de profundidade da superfície e 5 na matriz inferior a 1 mm de profundidade. Os dados obtidos serviram para estimativa do coeficiente de transferência de calor (HTC, na sigla em inglês), em diferentes regiões da matriz. Análises numéricas por MEF foram conduzidas para comparação com as temperaturas medidas e o HTC em diferentes pontos da superfície da ferramenta foi estimado por meio de análise inversa – neste caso, o método foi enunciado no trabalho como um problema de otimização, no qual se procurou obter o conjunto de HTC's que minimizasse a diferença entre as temperaturas calculadas por elementos finitos (T^{cal}) e os valores de temperatura experimentalmente obtidos (T^{exp}).

Em (13), a temperatura na superfície foi estimada através de MEF implícito. As temperaturas em nós localizados na superfície e abaixo da superfície foram obtidas pelas Equações (2.6) e (2.7) (57, p. 338), respectivamente:

$$(1 + 2Fo + 2Fo.Bi)T_0^{p+1} - 2 \times 2Fo.T_1^{p+1} = 2Fo.Bi.T_\infty + T_0^p \quad (2.6)$$

$$(1 + 2Fo)T_m^{p+1} - Fo(T_{m-1}^{p+1} + T_{m+1}^{p+1}) = T_m^p \quad (2.7)$$

onde Bi (número de Biot) $= \alpha \cdot \Delta x / \lambda$, $Fo = a \cdot \Delta t / \Delta x^2$, com $a = \lambda / (c_p \cdot \rho)$, α é o HTC, λ é a condutividade térmica, ρ é a densidade do material, c_p é o calor específico, t é o tempo e x , a distância. As medidas de temperatura foram obtidas num punção de aço AISI H13 instrumentado com dois termopares tipo K (NiCr-Ni), um localizado no centro a 0,1 mm de distância da superfície e outro localizado no raio de concordância, a 0,25 mm da superfície. O forjamento foi realizado num simulador físico de ensaios termo-mecânicos Gleeble® 1500. As temperaturas calculadas na superfície estiveram na faixa de 600 °C a 750 °C (aprox.).

2.5 Simulação numérica

Existem diversas contribuições sobre modelos matemáticos para descrição dos fenômenos de desgaste em matrizes de forjamento a quente, e muitas destas contribuições estão centradas no modelo de desgaste de Archard (Equação (2.3)).

O trabalho de Stemler *et al.* (20) apresenta a análise do desgaste de um par de matrizes de forjamento através de uma variante do modelo de Archard, presente como padrão de cálculo de desgaste na biblioteca do software DEFORM®, Equação (2.8):

$$W = \int K \frac{p^a \cdot v_{rel}^b}{H^c} dt \quad (2.8)$$

onde, baseando-se na Eq. 2.3, a força F_N passa a ser representada pela pressão p e o deslocamento L , pela velocidade de deslizamento relativa v_{rel} . Os índices a , b e c prestam-se a conferir flexibilidade de ajuste ao modelo, sendo portanto parâmetros empíricos utilizados para calibração.

Bernd-Arno Behrens tem desenvolvido trabalhos sobre a modelagem por EF do processo (17,18,30). O modelo tomado por base em seus artigos é descrito pela Equação (2.9):

$$\Delta w = \frac{k}{H(t, T)} \sum_{inc=1} \sigma_N \cdot v_{rel} \cdot \Delta t \quad (2.9)$$

onde k representa um coeficiente de desgaste dependente do processo, σ_N representa a tensão normal, v_{rel} , a velocidade de deslizamento relativa e Δt é o intervalo de tempo do incremento atual. Neste modelo, a dureza H é considerada como função do tempo t e da temperatura T , com o objetivo de reproduzir tanto os efeitos da perda de dureza por revenimento quanto do ganho pela formação de camada branca, embora esta última seja descrita como tendo seu surgimento restrito aos 10 primeiros ciclos de forjamento. Em (18), o autor monitora a deformação plástica no raio de concordância da ferramenta, que se revela acentuada nos primeiros ciclos, mas que é minimizada com o aumento do número de ciclos de trabalho. No artigo, o modelo numérico, desenvolvido no software MSC.SuperFormTM, não contempla a deformação plástica do material. Enquanto em (18) o autor considera um coeficiente de atrito constante, em (30) implementa-se um modelo que associa a abordagem do atrito pela tensão de cisalhamento, descrita pelo modelo de Coulomb-Amontons (Equação (2.2)), com o modelo de fator de atrito.

Biglari e Zamani (58), baseados no trabalho desenvolvido por Ståhlberg e Hallström (59), desenvolveram dois modelos distintos para previsão do desgaste e aplicaram para o caso de forjamento a quente em matriz fechada de um flange: o primeiro modelo (modelo 1), baseado na equação de Archard, considera que o desgaste é proporcional à pressão de contato e à distância de deslizamento, e um segundo modelo (modelo 2), assume que o desgaste é dependente da energia dissipada na interface ferramenta/ *billet*, o que pode ser chamado de um “trabalho do atrito”. A comparação entre as respostas dos dois modelos apresentou boa correlação, mas ambos consideraram a dureza constante.

A abordagem proposta por Terčelj, Peruš e Turk (2) foi a única referência consultada que conseguiu prever tanto o desgaste quanto a deformação plástica que ocorre no raio de concordância do pino central de uma matriz de forjamento. Para tanto, dois métodos de análise foram combinados: MEF e rede neural por estimativa de média condicional (CAE NN, na sigla em inglês). A rede foi treinada com dados

de processo. As curvas de desgaste obtidas da combinação dos métodos apresentam boa correlação com os valores medidos na ferramenta.

3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo a análise do desgaste em matrizes de forjamento a quente por meio da correlação entre resultados experimentais, relacionados à caracterização de suas superfícies e ao carregamento térmico cíclico a que são submetidas, e pressões de contato (P), velocidades (V) e temperaturas (T) localizadas, obtidas através de simulações numéricas. Os resultados experimentais compreendem exames metalográficos, medidas do volume desgastado e perfis de temperatura medidos nas matrizes durante processo. A correlação permite a construção de um mapa de desgaste tridimensional tipo $P \times V \times T$ e a identificação dos efeitos destas variáveis locais nos modos de desgaste.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Processo

O forjamento foi realizado em matriz fechada. Foram forjados, a quente, *billets* de aço AISI 1045, com $\varnothing 28,6$ mm ($\varnothing 1 \frac{1}{8}$ ") $\times$ 44 mm. A Figura 4.1 traz imagens do *billet* antes e após forjamento.

Figura 4.1 - *Billet* de aço AISI 1045 antes e após forjado.

Fonte: arquivo IPT.

Os ensaios de forjamento foram realizados em uma célula automatizada composta por uma prensa mecânica tipo "H" com capacidade máxima de 300 tf (fabricante: Luxor), um braço manipulador (robô) para alimentação da prensa e descarte do forjado, um alimentador automático de *billets* e um pequeno forno de indução, Figura 4.2. 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, considerando-se o tempo de ciclo, a geometria dos corpos e os perfis de temperatura obtidos. Cada peça foi forjada com um único golpe. Cada *billet* foi pré-aquecido durante 29 s para o forjamento, atingindo uma temperatura média de 1150 °C – a temperatura do *billet*

imediatamente antes do forjamento foi obtida através de um pirômetro ótico fixo, com emissividade ajustada em 0,80 (para aço oxidado).

Figura 4.2 – Célula de forjamento automatizada: a) Vista geral; b) Prensa de forjamento; c) Robô manipulador; d) Forno de indução e alimentador automático.

Fonte: arquivo IPT.

A distância entre o PMS (ponto morto superior) e o PMI (ponto morto inferior) foi regulada de modo a se obter o melhor preenchimento possível da cavidade. A Figura 4.3 apresenta o curso da ferramenta e o deslocamento do martelo em função da posição angular do eixo excêntrico, gráfico obtido com uso da razão entre a excentricidade do eixo e o raio da biela, $\sim 0,17$, calculada com base nas dimensões de projeto do equipamento. A mesa móvel da prensa, onde foi instalada a matriz superior, tem uma única conexão com a biela, o que classifica a prensa como de ação *single point* (ou de ponto único). As matrizes foram pré-aquecidas com lâmpadas de infravermelho antes do primeiro golpe – o valor de temperatura exato

no início dos ciclos de forjamento, no entanto, foi de $\sim 60^\circ\text{C}$, conforme será discutido na **Seção 5.2**.

Figura 4.3 – Esquema do curso das matrizes: a) Indicação das posições inicial e final da matriz superior e dimensões básicas do forjado (em mm); b) Deslocamento do martelo em função da posição angular da biela.

Fonte: autoria própria.

A força de forjamento (aproximadamente 200 tf em todas as campanhas) foi estimada 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 refrigeração das matrizes foi feita após cada golpe através de 4 bicos de aspersão (*nozzles*): 2 apontados para a matriz superior e 2, para a matriz inferior. Utilizou-se como lubrificante uma solução a base de polímero diluída em água, específica para forjamento (desmoldante FORGE EASE 956 BR, Fuchs Lubritech). 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 de lubrificante e secagem. A Tabela 4.1 resume alguns parâmetros utilizados nos ensaios de forjamento. O projeto de instalação das matrizes no porta-ferramentas é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Projeto das ferramentas de forjamento (matrizes instaladas no porta-ferramentas).

Fonte: autoria própria.

Tabela 4.1 – Parâmetros dos ensaios de forjamento.

Temp. inicial do <i>billet</i>	Temp. da matriz no início do ciclo	Vel. linear máx. do curso da matriz superior	tempo de contato matriz/ <i>billet</i> durante um ciclo	Força média	tempos do ciclo de lubrificação (ar-lub.-ar)
~1150 °C	~60 °C	0,6 m/s	140 ms	~200 tf	1 s–1 s–1 s

Fonte: autoria própria.

4.2 Especificação das matrizes de forjamento

O projeto da matriz superior, onde foram feitas todas as análises e medidas do presente trabalho, é apresentado na Figura 4.5 – a geometria é baseada nos trabalhos apresentados em (60,61,62). Tal geometria promove diferentes causas de desgaste na ferramenta, a fim de servir como amostra do observado em ferramentas industriais, incluindo as de geometria mais complexa.

Figura 4.5 – Dimensões da matriz superior de forjamento.

Fonte: autoria própria.

A área compreendida no interior do $\varnothing 56,7$ mm na Figura 4.5 será aqui chamada de “área de trabalho”, visto encerrar a porção da superfície que estará efetivamente em contato com o *billet*. Os furos de $\varnothing 10,50$ com alojamento no flange servem para fixação no porta-ferramenta. As roscas M8 são recursos utilizados apenas para auxiliar na montagem e desmontagem da ferramenta. A área de trabalho de todas as matrizes foi polida ao brilho, não tendo sido especificado um valor de rugosidade para o acabamento.

Foram confeccionadas matrizes de dois aços ferramenta distintos, denominados “Liga_1” e “Liga_2”, com composição nominal apresentada na Tabela 4.2. O aço Liga_1 (AISI H13, forjado) é um material comumente empregado para construção de matrizes de forjamento a quente, combinando boas propriedades de dureza e resistência à fratura, além de boa usinabilidade. O aço Liga_2 refere-se a uma liga fundida, não comercial, desenvolvida no IPT no âmbito de um projeto de doutorado (63), que possui carbonetos de Nb dispersos em uma matriz semelhante à da Liga_1. Os materiais foram tratados termicamente por têmpera e duplo revenimento e não possuem recobrimento superficial.

Tabela 4.2 – Materiais empregados na confecção das matrizes de forjamento.

Material	Composição nominal	Dureza inicial
Liga_1	Fe; 5%Cr; 1%V; 1,30%Mo; 0,4%C; 0,4%Mn; 1%Si	46 HRC
Liga_2	Fe; 3%Cr; 1%V; 1%Mo; 1%W; 3%Nb; 1%C	55 HRC

Fonte: autoria própria.

Dois diferentes tipos de matrizes foram fabricados: um para acompanhamento do desgaste (denominada “Tipo B”) e outro para acompanhamento de temperatura (denominada “Tipo A”). Embora possuam a mesma geometria do perfil da área de trabalho (Figura 4.5), as matrizes Tipo B não contam com furos para instrumentação, uma vez que tais furos podem prejudicar a vida útil das ferramentas. As matrizes para acompanhamento do desgaste foram submetidas a um número maior de ciclos de trabalho.

As matrizes Tipo B tiveram sua superfície caracterizada através dos ensaios apresentados na próxima seção (**Seção 4.3**). Tal caracterização considerou a divisão do perfil superficial em 9 regiões de análise, identificadas de **A** (região central) até **I** (região de formação de rebarba), conforme apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Regiões do perfil da matriz identificadas sobre foto.

Fonte: arquivo IPT.

Nas matrizes superiores Tipo A foram usinados furos para instalação de termopares de isolamento mineral tipo K, num total de 7: um primeiro localizado no centro, com a ponta nivelada na superfície, e os demais escalonados abaixo da superfície em 3 regiões distintas, conforme apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Projeto e instalação da matriz de forjamento superior instrumentada, Tipo A (dimensões em mm): a) Profundidade dos furos para instalação dos termopares. No detalhe (box), os furos foram projetados num mesmo plano para melhor compreensão das regiões de medição; b) Imagens esquemáticas e fotos da instalação.

Fonte: autoria própria.

Para fins de identificação, as matrizes de forjamento receberam um código sequencial, com terminação "A" para as utilizadas no monitoramento da temperatura e "B", nas utilizadas para o acompanhamento do desgaste. Resultados foram obtidos das matrizes superiores N°.15-A e N°.17-B, fabricadas em Liga_1, e das matrizes N°.11-A e N°.7-B, fabricadas em Liga_2. A numeração refere-se meramente a um número sequencial de uso – diversas outras matrizes foram ensaiadas para efeito de testes, mas não foram incluídas neste trabalho.

A metodologia descrita a seguir está relacionada ao acompanhamento do desgaste por meio de medições e caracterizações da superfície da matriz superior de forjamento, à medição de temperatura e à análise de modelos numéricos.

4.3 Acompanhamento do desgaste

Baseado numa quantidade típica de literatura de 1000 golpes (48), foram programadas 5 campanhas de forjamento com as seguintes quantidades de forjados por campanha: 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). A caracterização após 1 peça foi incorporada ao método após observar-se que as primeiras alterações da superfície, como eliminação de rugosidades de usinagem e oxidação, ocorriam desde o primeiro ciclo de trabalho. A matriz N°.7-B (Liga_2) completou apenas as campanhas 1 e 2, tendo sofrido uma falha que impossibilitou a continuidade da operação ao término desta última. A matriz de ensaios de desgaste é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Matriz de ensaios com acompanhamento de desgaste.

Campanha	Código matriz superior	Material	Quantidade parcial de forjados	Quantidade total de forjados
1	17-B	Liga_1	1	1
			49	50
2			50	100
3			100	200
4			300	500
5			500	1000
1	7-B	Liga_2	1	1
			49	50
2			50	100

Fonte: autoria própria.

Ao término de cada campanha as matrizes tiveram suas superfícies caracterizadas através de ensaios de líquido penetrante, partícula magnética, perfilometria tátil em máquina de medição por coordenadas (MMC), exames macrográficos e micrográficos e réplicas metalográficas.

Os ensaios de líquido penetrante e partícula magnética foram aplicados para revelar trincas como as de fadiga térmica e fadiga termomecânica. No primeiro, uma tinta spray com alta penetração em reentrâncias é aplicada por toda a superfície da ferramenta. Após alguns instantes, aplica-se um segundo spray para revelar apenas a tinta aderida nas reentrâncias. O ensaio de partícula magnética foi realizado em equipamento MAGNAFLUX[®]. Nesta técnica, uma solução líquida com partículas ferromagnéticas fluorescentes à luz ultravioleta é primeiramente aspergida sobre a superfície que é alvo da análise. Em seguida, a peça é colocada no interior de uma bobina de indução que, uma vez energizada, deflagra um campo magnético que percorre o material, levando as partículas ferromagnéticas a se depositarem nas reentrâncias da superfície, notadamente trincas que criam dipolos e levam à formação de um campo de fuga magnético (64). O uso de luminárias de luz ultravioleta revela as regiões com acúmulo de partículas, e por conseguinte trincas e marcas na superfície.

Exames macrográficos das superfícies das ferramentas, realizados com câmera digital convencional de alta definição (HD), revelaram seu desgaste global. Tal desgaste foi revelado com mais detalhes por meio de exames micrográficos, tanto diretamente na ferramenta quanto nas réplicas metalográficas, através de microscópio óptico. A técnica de réplica metalográfica consiste, em linhas gerais, numa metalografia de campo não-destrutiva na qual uma massa plástica depositada sobre a superfície da ferramenta, após a cura, revela detalhes da topografia passíveis de serem analisados por microscópio (65).

Medidas de dureza foram realizadas em durômetro metalográfico de bancada com ponta de diamante método Rockwell (HR) Wilson, IPT N°.10479. A fim de não se gerar nenhum intensificador de tensões que pudesse dar origem a uma falha na superfície da matriz, as indentações foram obtidas de regiões fora da área de trabalho, o que impossibilitou uma correlação entre estas medidas, o perfil de desgaste e a malha de trincas.

4.3.1 Quantificação do desgaste

A metodologia para quantificação do desgaste é a seguir reproduzida tal como apresentada em (19). A topografia da área de trabalho das ferramentas foi obtida com o uso de MMC convencional Werth modelo VideoCheck® IP, com medição através de apalpador com ponta esférica de rubi Ø1,5 mm, fabricante Renishaw®, modelo SP25M. As matrizes tiveram suas superfícies limpas com álcool isopropílico e foram mantidas em sala à 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 $\pm 9 \mu\text{m}$.

Os dados da matriz foram tratados 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 sobre a ferramenta. Foram obtidos 73 perfis em sentido anti-horário ao longo de toda a área de trabalho, conforme apresentado esquematicamente na Figura 4.8a. 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.

Figura 4.8 – Medição da topografia da matriz (“perfilometria”): a) Esquema dos perfis obtidos; b) Medição na MMC.

Fonte: arquivo IPT.

Para início das medições, foi determinado um sistema de coordenadas sobre a matriz, atrelado ao seu posicionamento no equipamento de medição, de modo que as medidas em posições correspondentes pudessem ser sobrepostas para comparação ao término de cada campanha. O sistema de referência, Figura 4.9, tem como base a gravação do código (número) da matriz na lateral do flange da ferramenta e o plano deste flange, que não sofre desgaste ao longo do processo.

Figura 4.9 – Referenciamento das matrizes para medição: a) Desenho esquemático; b) Identificação sobre foto.

Fonte: autoria própria.

Os perfis obtidos ao longo da matriz após cada campanha são subtraídos daqueles obtidos da matriz quando nova (caracterização inicial), tendo como resultado as 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, como citado. A subtração de perfis medidos antes e depois do trabalho foi realizada em Matlab®, através de uma interpolação que permitiu a subtração de pontos na direção vertical. Para subtração numérica dos perfis, seria primeiramente importante deixar todos os pontos de um mesmo perfil, numa dada posição angular, exatamente no mesmo plano, e inserir nesse plano também os demais perfis medidos ao longo das campanhas, correspondentes àquela posição angular. Para eliminação dos pequenos desvios observados entre os pontos de cada perfil de seu plano “ideal”

(plano onde todos os pontos deste perfil, numa determinada posição angular, deveriam estar completamente contidos), cada coordenada cartesiana (X , Y) foi levada para um sistema de coordenadas cilíndricas ($\Delta\theta$, r), como mostrado na Figura 4.10, e considerou-se a aproximação de que o ponto desalinhado poderia ser projetado para o plano ideal desprezando-se o ângulo formado entre o ponto e o plano, por ser muito pequeno considerando-se a distância de um perfil a outro ($\delta_i \ll 1$, o que leva a $\sin(\delta_i) \approx 0$, $\cos(\delta_i) \approx 1$).

Figura 4.10 – Considerações para o alinhamento dos pontos obtidos no “plano ideal” do perfil (figura esquemática): a) Pontos em coordenadas cartesianas espalhados no plano X-Y (vista de topo); b) Expressão dos pontos em coordenadas cilíndricas ($\Delta\theta$, r), onde $\Delta\theta \equiv \delta_i = \Theta^d - \theta$, com Θ^d o ângulo do plano ideal e θ o ângulo formado entre r_i e a abscissa (r_i : vetor determinado pela origem e pelo ponto medido); c) Aproximação considerada: $\delta_i \ll 1$.

Fonte: autoria própria.

Tendo-se todos os pontos medidos num mesmo plano fez-se a subtração vertical (eixo Z) dos perfis, como mostra a Figura 4.11. Para tanto, realiza-se uma interpolação linear dos pontos medidos na superfície da matriz quando nova com uso da função `interp1`, utilizando-se como *query points* (pontos de consulta) as

abscissas dos pontos medidos após determinado número de ciclos. Uma vez encontradas as coordenadas interpoladas (r_{q_0} , z_{q_0}) pôde-se proceder com a subtração em Z, $d_i = z_{q_0} - z_1$, que representa ganho ou perda de material naquela região específica, dependendo do sinal de d_i . Tal perda ou ganho pode ser decorrente de uma deformação plástica do material ou estar relacionada à adesão, abrasão, oxidação, ou ainda a outros modos de desgaste.

Figura 4.11 – Procedimento para quantificação do desgaste (esquemático): a) Dispersão dos pontos medidos; b) Constatação do desalinhamento vertical; c) Interpolação linear dos pontos medidos na superfície nova (sem uso), utilizando como *query points* as abscissas dos pontos medidos na superfície após certo número de ciclos.

Fonte: autoria própria.

Figura 4.12 – Método usado para reduzir a distorção causada pela subtração dos perfis na vertical em trechos inclinados do perfil (como nas regiões C e G, que serão apresentadas adiante).

$$\cos \alpha = \frac{r_{i+1} - r_i}{\sqrt{(z_{i+1} - z_i)^2 + (r_{i+1} - r_i)^2}}$$

$$d_{icorr} = d_i \cdot \cos \alpha$$

Fonte: autoria própria.

Tendo sido a subtração entre os perfis feita apenas na direção vertical (Z), uma correção na diferença entre os pontos foi aplicada, d_{icorr} , Figura 4.12. O objetivo dessa correção foi obter um valor mais próximo da diferença real, especialmente nas regiões inclinadas do perfil. Os perfis de desgaste foram, assim, finalmente obtidos, e um filtro média móvel foi aplicado para a eliminação de ruídos remanescentes.

4.4 Medição de temperatura

O objetivo da medição de temperatura nas matrizes está relacionado a uma necessidade de calibração do modelo numérico. As matrizes utilizadas para tal foram submetidas a uma quantidade menor de ciclos de forjamento, de 50 peças, Tabela 4.4. O entendimento foi de que a manutenção dos parâmetros do processo em todos os ensaios levaria ao mesmo ciclo de carregamento térmico. A utilização destas ferramentas em uma quantidade muito grande de ciclos poderia levar à falha devido à concentração de tensões imposta pelos furos para instalação dos termopares. Além disso, o acompanhamento de desgaste nestas ferramentas, principalmente no centro da matriz, seria também comprometido pela existência do furo passante do termopar de superfície.

Tabela 4.4 – Ensaios com acompanhamento de temperatura.

Código matriz superior	Material	Quantidade de forjados
15-A	Liga_1	50
11-A	Liga_2	50

Fonte: autoria própria.

Os dados de temperatura medidos na superfície da ferramenta foram obtidos com o uso de termopar comercial tipo K (NiCr-Ni) não especificamente projetado para a aplicação, marca SAWI, modelo SW142X1, Figura 4.13. Este termopar possui bainha em aço inox com $\varnothing_{ext}$ 1,0 mm, e foi desenvolvido para leitura de temperatura na superfície de moldes para a indústria plástica. A ponta deste termopar pode ser retificada em conjunto com a superfície da ferramenta até 0,45 mm, uma vez que a junta quente é aterrada na bainha. A Figura 4.14 apresenta uma imagem

esquemática da instalação. Uma pequena porca que acompanha o sensor é responsável por sua fixação em um furo roscado na ferramenta. O desvio padrão deste sensor, indicado em catálogo, para medição na faixa de +375 °C até 1000 °C, equivale a 0,4% do valor da temperatura medida.

Figura 4.13 – Dimensões de projeto (mm, quando não indicado) do termopar utilizado para leitura da temperatura na superfície.

Fonte: Catálogo SAWI (66).

Os termopares instalados abaixo da superfície da ferramenta são também do tipo K, com isolamento mineral, aterrados, sem pote, bainha aço inox $\varnothing 1,50 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (comp.) + 1 m de cabo de extensão. Os cabos de extensão de todos os termopares passaram por furos no porta-ferramenta, um dos quais é apresentado na Figura 4.4. A incerteza deste sensor é estimada pelo fabricante em $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

As regiões de instalação dos termopares (Figura 4.7) guardam correspondência com as regiões em que a matriz foi subdividida para análise do desgaste (Figura 4.6), sendo a região central (r0) correspondente ao centro da região **A**, a região 1 correspondente à **D**, a região 2 correspondente à **G** e a região 3 correspondente à **I**. Deve-se naturalmente considerar a distância da junta de medição dos termopares da superfície de cada região.

Figura 4.14 – Esquema de instalação do termopar para leitura na superfície da matriz superior (dimensões em mm).

Fonte: autoria própria.

Os 7 termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados (DAQ) HBM, em módulo específico para conexão de termopares tipo K (MX-1609), através de mini-conectores padrão compensados. O módulo foi por sua vez conectado a um notebook, onde foram armazenados os dados. Utilizou-se uma taxa de aquisição de 600 Hz, o que, considerando o tempo médio de contato entre ferramenta e *billet* de 140 ms, permitiria a tomada de ~84 pontos durante este intervalo. Deve-se ponderar na análise dos resultados o tempo de resposta dos sensores, fator que influencia o pico de temperatura medido.

4.5 Simulação numérica

4.5.1 Mapa de desgaste

O presente trabalho propõe a composição de um mapa de desgaste semelhante ao de Lim, Ashby e Brunton (22), que correlacione informações como cargas termomecânicas na superfície da ferramenta e a velocidade relativa de pontos dessa superfície com modos de desgaste identificados na caracterização das matrizes. Neste trabalho, contudo, partiu-se da análise de um caso específico, no intuito de encontrar relação com o caso geral (obtido a partir de uma série de diferentes condições de ensaio) descrito pelos autores. A Figura 4.15 traz uma síntese desse objetivo. A figura apresenta um mapa $P \times V \times T$, onde P representa a

pressão no contato, V a velocidade relativa de deslizamento e T a temperatura, sendo estas variáveis obtidas do modelo numérico do processo.

Figura 4.15 – Síntese do objetivo do trabalho.

Fonte: autoria própria.

4.5.2 Modelos

Modelos numéricos do processo foram criados para avaliação de P , V e T nas operações de forjamento com uso do método dos elementos finitos (MEF). Softwares como ABAQUS, QForm[®] e DEFORM[®] foram utilizados a fim de se obter informações do processo além das obtidas experimentalmente, tendo sido o modelo em ABAQUS o mais completo desenvolvido.

Foram simulados modelos 2D axissimétricos do processo. Tais modelos consideram a simetria radial das matrizes, de modo que tem-se para análise apenas a metade da seção transversal da peça (vide Figura 4.17) – o software interpreta tal seção como parte de um todo que revoluciona ao redor de um eixo de simetria. Algumas propriedades dos materiais utilizados nos modelos em QForm[®] e DEFORM[®] são apresentadas na Tabela 4.2 e na Tabela 4.5. Os resultados de

simulação numérica foram obtidos apenas para simulação do processo com matriz de material Liga_1 (aço AISI H13) – as diferentes propriedades das fases da microestrutura do material Liga_2 dificultariam a obtenção de um modelo representativo de seu comportamento.

Tabela 4.5 – Propriedades térmicas e mecânicas gerais dos materiais utilizadas nos modelos em QForm[®] e DEFORM[®].

Propriedade	matriz		billet	
	Liga_1		AISI 1045	
	25 °C	450 °C	800 °C	1400 °C
Módulo de Young, E (GPa)	214,7	181,8	101,3	68
Coeficiente de Poisson, ν	0,3	0,3	0,3	0,3
Densidade, ρ (kg/ m ³)	7830	7701	7800	7800
Calor específico, c (J/ kg.K)	460	626	627	551
Coef. de expansão térmica, α ($\mu\text{m}/ \text{m.K}$)	11	12,88	13,5	13,5
Condutividade térmica, κ (W/ m.K)	23,9	27,9	24,7	29

Fonte: Relatórios/ planilhas do projeto IPT N°. 3777.02.A (fonte confidencial).

Um primeiro modelo 2D axissimétrico simulado em QForm[®] (software comercial de elementos finitos específico para simulação de processos de conformação) permitiu a obtenção de perfis de temperatura ao longo do perfil superficial da ferramenta após um único golpe, partindo de duas temperaturas iniciais distintas: $T_0 = 150\text{ °C}$ e $T_0 = 52,5\text{ °C}$ (temperatura de regime estacionário no interior da ferramenta). O modelo contém 3 corpos: matriz superior, matriz inferior e *billet*.

O segundo modelo foi concebido em conjunto com uma empresa prestadora de serviços na área de simulação por elementos finitos. Esta empresa utiliza o software DEFORM[®], além de um programa para extração de propriedades mecânicas de materiais com base em sua microestrutura, JMatPro[®]. Resultados preliminares foram apresentados pela empresa mas não foram suficientemente conclusivos para apresentação no presente trabalho.

A metodologia empregada para simulação em ABAQUS é, em grande parte, descrita em (19). Por conta da velocidade do evento, o modelo numérico foi criado utilizando análise explícita. Para simulação foram considerados os mesmos 3 corpos

do modelo anterior. Os corpos foram discretizados através de elementos de malha 2D axissimétricos (CAX4RT e CAX3T, na biblioteca de elementos do ABAQUS). As curvas tensão-deformação do aço AISI 1045 foram expressas como função da temperatura, conforme especificado pelo fornecedor do material, Figura 4.16.

Figura 4.16 – Curvas Tensão-Deformação do aço AISI 1045 para diferentes temperaturas.

Fonte: curvas cedidas pelo fornecedor da matéria-prima (confidencial).

Algumas propriedades do aço Liga_1 utilizadas neste modelo são apresentadas, também em função da temperatura, na Tabela 4.6. A tabela apresenta apenas alguns pontos das propriedades – no software as propriedades são expressas em tabelas mais completas. As propriedades do aço Liga_1 neste modelo são ligeiramente distintas dos modelos anteriormente citados, por terem sido herdadas do modelo desenvolvido em projeto de pesquisa anterior (“Sistema avançado para projeto de ligas aplicadas em ferramentas de conformação a quente”, IPT N°. 3777.02.A (25)). As propriedades do aço AISI 1045 são as mesmas apresentadas na Tabela 4.5.

A Figura 4.17 apresenta a malha gerada para as ferramentas e para o *billet*. Um refino maior foi considerado próximo à interface de contato da matriz superior, visto ser a penetração do calor muito rasa devido ao curto tempo de contato durante o forjamento. Além disso, para o *billet*, um algoritmo de malha adaptativa foi ativado, mantendo as opções *default* do software, apenas para permitir uma melhor razão de

aspecto quando o processo de conformação se aproxima de seu estágio final (matriz superior no PMI).

Tabela 4.6 – Algumas propriedades térmicas e mecânicas do aço Liga_1 utilizadas no modelo ABAQUS.

Propriedade	Liga_1	
Módulo de Young, E (GPa)	207 (20 °C)	195,6 (450 °C)
Limite de escoamento*, σ (MPa)	1095 (450 °C)	450 (700 °C)
Coeficiente de Poisson, ν	0,3	
Densidade, ρ (kg/ m ³)	7761	
Calor específico, c (J/ kg.K)	430 (20 °C)	621 (400 °C)
Coef. de expansão térmica, α (µm/ m.K)	11 (95 °C)	12,4 (540 °C)
Condutividade térmica, κ (W/ m.K)	17,6 (27 °C)	25,1 (427 °C)

**tensão necessária para produzir uma deformação plástica de 0,2%.*

Fonte: Dados do modelo ABAQUS prévio/ Relatórios do projeto IPT N°. 3777.02.A (fonte confidencial).

Figura 4.17 – Modelo ABAQUS: a) Malhas geradas para as ferramentas e para o *billet* no modelo axissimétrico; b) Região de imposição da velocidade no topo da matriz superior e de fixação da matriz inferior (regiões indicadas em vermelho).

Fonte: adaptado de Gonçalves *et al.* (19).

Com relação ao contato entre as ferramentas e o *billet*, propriedades termomecânicas foram fornecidas para o software. Um coeficiente de atrito de 0,3 foi considerado, assumindo o modelo de Coulomb, e um coeficiente de transferência de calor (HTC) de $37.500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ foi aplicado na interface de contato – tais condições foram obtidas de modelos anteriores (25). Os 3 corpos foram configurados para que se permitisse a perda de calor para o ambiente, com os principais mecanismos sendo a convecção das ferramentas com o ar (determinado por um coeficiente de $40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, assumindo ar à temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$) e a radiação do *billet* (que considerou uma emissividade de 0,7). Assumiu-se que as ferramentas partiriam de uma temperatura inicial de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e o *billet*, de uma temperatura inicial de $1.150 \text{ }^\circ\text{C}$.

No modelo, o processo de forjamento é definido pela aplicação de uma velocidade predeterminada no topo da matriz superior, como mostra a Figura 4.17b, dada em função do tempo, de acordo com a Figura 4.18. Tendo-se fixado a matriz inferior nas regiões também indicadas na Figura 4.17b temos que o material a ser conformado tem sua movimentação restrita à região entre as duas matrizes, caracterizando a conformação.

Figura 4.18 – Velocidade aplicada à matriz superior em função do tempo.

Fonte: autoria própria.

A simulação considerou três ciclos de forjamento, com a matriz superior seguindo o regime de velocidades apresentado na Figura 4.18. No modelo, uma

série de *steps* de simulação foram criados, que correspondem a cada uma das fases de cada um dos ciclos de forjamento, a saber: aproximação (*aprox*, *aprox2* e *aprox3*), forjamento (*forja*, *forja2* e *forja3*), afastamento (*afast*, *afast2* e *afast3*) e espera (*esper*, *esper2* e *esper3*). Cada *step*, por sua vez, é constituído por incrementos, resultado do cálculo em determinado instante de tempo.

Para composição do mapa foram consideradas as seguintes variáveis de saída (*outputs*) da simulação: CPRESS (*contact pressure*) para pressão de contato P , FSLIPR (*contact slip rate*) para velocidades de deslizamento V e NT11 (*nodal temperature*) para a temperatura T , todas obtidas na superfície da ferramenta. As variáveis foram obtidas de 4 nós, pertencentes a 3 elementos, seleccionados no centro de cada uma das regiões da matriz, conforme apresentado na Figura 4.17b. Tabelas com os valores destas variáveis em função do tempo foram exportadas do ABAQUS para tratamento em Matlab®. O mapa foi obtido com os valores máximos de cada variável em cada região ao longo do tempo dos *steps* de forjamento (*forja*, *forja1* e *forja2*), que compreendem o intervalo entre o instante em que a matriz superior está prestes a tocar o *billet* até o instante em que atinge o ponto morto inferior (PMI), quando o forjado preencheu por completo o espaço entre as matrizes.

Uma escala de cores foi atribuída para cada região específica da matriz superior (vide Figura 4.6) para sua identificação nos gráficos, conforme apresentado na Figura 4.19. Os resultados do modelo numérico são apresentados na **Seção 5.3.2**.

Figura 4.19 – Esquema de cores adotado para diferenciação das regiões do perfil da matriz.

Fonte: autoria própria.

5 RESULTADOS

Os resultados são basicamente divididos entre: (i) análise do desgaste, obtido das matrizes utilizadas para esse fim (tipo B); (ii) perfis de temperatura, obtidos com matrizes instrumentadas (tipo A); (iii) resultados de simulação numérica, e; (iv) mapa de desgaste, obtido da correlação entre os resultados anteriores.

5.1 Desgaste

No presente trabalho, as matrizes iniciaram o forjamento com acabamento superficial polido ao brilho, o que, de acordo com (67), não seria a melhor condição para evitar um desgaste prematuro da ferramenta, devido à sua reduzida capacidade de retenção de lubrificante – na referência, Magri *et al.* mostram a correlação entre diferentes tipos de acabamento superficial de uma matriz de forjamento e os modos de desgaste predominantes em cada tipo. Embora polidas ao brilho antes do início da operação, as superfícies ainda apresentavam marcas de usinagem, circularmente dispostas sobre a matriz, características de torneamento.

5.1.1 Matriz de aço Liga_1

A caracterização da matriz de aço Liga_1 (AISI H13) N°.17-B revelou um desgaste acentuado nas regiões **A** e **B**, que sofrem solicitações severas durante o processo. A Figura 5.1 apresenta imagens do ensaio de líquido penetrante, onde se pode acompanhar a formação gradual de trincas nas regiões **A**, **B** e **H**. Os ensaios de partícula magnética, Figura 5.2, por sua vez, revelaram também a formação de trincas na região **D**. Essas últimas podem se tratar de trincas subsuperficiais rasas, passíveis de serem reveladas pelo ensaio de partículas magnéticas, mas indetectáveis no ensaio de líquido penetrante. A dureza da matriz, medida fora da área de trabalho, esteve entre 45,5 HRC e 47 HRC.

Figura 5.1 – Imagens do ensaio de líquido penetrante – matriz Liga_1 N°.17-B.

Fonte: arquivo IPT.

Figura 5.2 – Imagens do ensaio de partículas magnéticas – matriz Liga_1 N°.17-B.

Fonte: arquivo IPT.

Como citado, a topografia da superfície de trabalho da ferramenta foi obtida com o uso de MMC (tridimensional). A metodologia seguiu o procedimento descrito na **Seção 4.3.1**. A média geral das 72 curvas de desgaste (resultantes da subtração do perfil inicial com o perfil após determinado número de ciclos) é apresentada na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Médias das curvas de desgaste da matriz de forjamento de aço Liga_1 com identificação de cada região.

Fonte: autoria própria.

Uma visão mais clara da topografia da ferramenta foi possível com a composição de superfícies através da interpolação das 72 curvas de desgaste. A Figura 5.4 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. Nas imagens, é possível notar que houve desgaste acentuado nas regiões **A** e **B** e, nesta última, que parte do material da região central sofreu deformação plástica, tendo sido movimentado para as bordas do raio ($R = 2\text{ mm}$), o que é indicado pela deformação “positiva” (acima do plano $Z = 0$) da superfície.

Exames macrográficos da região do pino central, regiões **A**, **B** e **C**, são apresentadas na Figura 5.5. Estas imagens revelam a deformação medida na região do raio (**B**).

Figura 5.4 – Superfícies de desgaste da matriz de aço Liga_1 após cada campanha de forjamento (dimensões em mm).

Fonte: autoria própria.

Figura 5.5 – Exames macrográficos da matriz de aço Liga_1: acompanhamento do desgaste superficial no pino central (regiões A, B e C).

Fonte: arquivo IPT.

Assimetrias no desgaste, típicas do processo de forjamento em prensas excêntricas de único ponto, como citado por Otsuka** (apud (68)), são reveladas nas superfícies compostas pelos perfis medidos. Um exemplo claro é apresentado na Figura 5.6, onde uma marca de desgaste na região **E** é quantificada na medição da superfície da ferramenta após o forjamento de 1000 peças. Uma análise detalhada da superfície revela o aparecimento gradual desta marca em particular. As marcas ao longo dos perfis indicados pelas setas verdes são *outliers* nos raios e na parede de saída do material, e podem ser desprezados.

Figura 5.6 – Marca de desgaste revelada na matriz de aço Liga_1, após 1000 golpes, nas superfícies compostas com os perfis medidos (marca indicada pela seta vermelha). A superfície de topo (acima, à direita) é a superfície de desgaste. A superfície em vista isométrica (abaixo) representa a projeção da escala de cores da superfície de desgaste sobre a topografia medida após 1000 golpes.

Fonte: autoria própria/ arquivo IPT.

** OTSUKA, K. **Design of press, automation and tooling for cold extrusion products.** ASTM Paper MF69-545

Figura 5.7 – Micrografias das regiões A, B, D, E, F, H e I da matriz de aço Liga_1 após 1 golpe.

Fonte: arquivo IPT.

Exames micrográficos das regiões **A**, **B**, **D**, **E**, **F**, **H** e **I** da matriz de aço Liga_1 após o forjamento de 1 peça são apresentados na Figura 5.7.

No centro da região **A**, após 1 único golpe, não são percebidas marcas que caracterizem abrasão, mas a superfície parece ter sofrido com a perda de pequenos fragmentos de material (*spalling pits*). Os ensaios de líquido penetrante e partícula magnética após 1 golpe não permitem conclusões mais aprofundadas, tendo, portanto, sido omitidos. O desgaste mais acentuado na superfície da ferramenta é localizado na borda desta região, desde o primeiro golpe.

Na região **B** (raio convexo), notam-se sulcos na direção de escorregamento do material – estes sulcos ficam mais aparentes na imagem com ampliação de 100x, Figura 5.8. Tais sulcos parecem gerados por mecanismos de microcorte e formação de proa, tendo como aparência o efeito conhecido por *comet tail* (calda de cometa), caracterizado por um risco que vai se tornando cada vez mais profundo ao longo de sua sessão longitudinal (69). Notam-se também indícios de oxidação (regiões escuras) nesta região, provavelmente com origem em um mal acondicionamento da ferramenta, e não devido ao uso propriamente dito.

Figura 5.8 – Exame micrográfico da região B da matriz de aço Liga_1 (AISI H13) após 1 golpe.

Fonte: arquivo IPT.

Na região **D** (raio côncavo) notam-se *spalling pits* e marcas típicas de usinagem na direção circular. Os sulcos tipo *comet tail* na imagem já pertencem à região **E** – percebe-se uma concentração de riscos no centro desta área. Estes riscos seriam responsáveis pelo elevado desgaste nesta última região ao longo das campanhas.

A região **F** (raio côncavo) apresenta pouco escorregamento, sendo ainda claras marcas de usinagem na ferramenta.

H (raio convexo) e **I** são regiões onde ocorre um aumento na velocidade de escorregamento do forjado. Assim, notam-se riscos de abrasão na direção de escorregamento. Marcas de usinagem na região **I** podem contribuir para o arrancamento de material do *billet* para o forjado, embora não se tenha medido material aderido a essa região.

Para análise da evolução do dano, a Figura 5.9 traz imagens destas mesmas regiões, acrescidas da região **C**, obtidas após o forjamento de 1000 peças. Por se tratar de um perfil inclinado, e portanto de difícil acesso para o microscópio, a imagem da região **C** foi obtida de sua réplica metalográfica.

Após 1000 golpes, a região **A** apresenta indícios de *spalling pits*, semelhante ao observado em (5) devido à baixa velocidade de deslizamento e longo tempo de contato, e deformação plástica na direção de deslizamento do material. O grande desgaste medido nessa região da matriz concorda com o que se observa: que houve tanto perda quanto transposição de massa do centro para o raio do pino (região **B**), Figuras 5.3 e 5.10b.

A imagem da região **B** mostra a deformação excessiva da superfície e revela, em maior detalhe, o que se observa na superfície de desgaste após 1000 golpes (Figura 5.4), com desgaste na região central e protrusão nas bordas do raio, representada por uma deformação “positiva” da superfície. A forma desse desgaste medido no raio é comparável ao observado em (2) e (18). Em (2), análises por microscopia ótica revelaram que o comprimento do deslizamento aumenta na primeira porção do raio e decresce rapidamente na segunda porção, onde há um baixo valor de deslizamento relativo entre a ferramenta e o forjado. Isso explicaria porque a remoção (desgaste) ocorre na primeira porção e porque uma espécie de deposição de material pode ser observada na segunda, o que poderia se assemelhar a uma dobra no material.

Figura 5.9 – Micrografias das regiões A, B, D, E, F, H e I e réplica metalográfica da região C da matriz de aço Liga_1 após 1000 golpes.

Fonte: arquivo IPT.

Figura 5.10 – Topografia da matriz de aço Liga_1 (AISI H13) após 1000 golpes, (regiões A, B, C e D): a) Exame macrográfico; b) Projeção da escala de cores da superfície de desgaste na superfície da ferramenta após 1000 golpes.

Fonte: autoria própria/ arquivo IPT.

Após 1000 golpes, percebe-se na região **C** uma acentuada deformação plástica da superfície, e riscos na direção de escorregamento. Esta é a região que apresenta em média a maior velocidade de deslizamento do material, a uma pressão relativamente baixa.

Na região do raio **D**, novamente, não se percebem marcas de abrasão. A ausência de marcas do gênero e o surgimento de trincas especificamente nesta região após 1000 golpes, reveladas no ensaio de partícula magnética (Figura 5.2), sugerem que o modo dominante é resultante de fadiga de contato e fadiga térmica, ou, em termos gerais, de fadiga termomecânica.

Na região **E**, os riscos passam a formar um padrão após 1000 golpes, o que é combinado com a deformação plástica da superfície, produzindo uma ondulação. Não se percebe na matriz de aço AISI H13 após 1000 golpes a presença de camada de óxido, isto porque a camada formada na superfície deste material específico é muito fina e tem baixa aderência, sendo destacada ao longo dos ciclos de forjamento. Placas de óxido destacadas podem ser cominuidas ao longo do contato e passar a agir como um terceiro corpo, contribuindo para intensificar a abrasão e a adesão.

A região **F**, tal como a região **D**, trata-se de um raio côncavo. A aparência do desgaste é semelhante ao desta região (**D**), com ausência de marcas de abrasão.

As regiões **H** e **I** apresentam uma intensificação das marcas de abrasão surgidas após 1 golpe. O raio **H** apresenta também indícios de arrancamento de material por adesão ou *pitting*, o que classifica a região como submetida a um modo de desgaste severo. A queda da pressão de contato na região **I**, devido à superfície livre, por outro lado, indica essa região como submetida a uma abrasão moderada.

5.1.2 Matriz de aço Liga_2

A matriz N°.7-B, de aço Liga_2 (aço ferramenta fundido com carbonetos de Nb), passou pelos ciclos de forjamento de 1 a 100, quando uma trinca profunda impediu o prosseguimento dos ensaios. A Figura 5.11 mostra imagens do ensaio de líquido penetrante que revelam malha de trincas após os ciclos de operação, além da caracterização quando nova. Estas trincas são ainda melhor reveladas pelo ensaio de partículas magnéticas, Figura 5.12. Nas fotos após 100 ciclos indica-se com uma seta um trecho da falha que levou à suspensão dos ensaios. Exames macrográficos da região do pino central (**A**, **B** e **C**) são apresentados na Figura 5.13.

De maneira geral, muitas marcas na superfície deste material são oriundas de defeitos de fundição ou marcas de usinagem. A superfície deste aço após polimento revela claramente os carbonetos NbC dispersos na matriz. Estes carbonetos são responsáveis diretos pela resistência à abrasão do material.

Figura 5.11 – Imagens do ensaio de líquido penetrante – matriz Liga_2 N°.7-B.

Fonte: arquivo IPT.

Figura 5.12 – Imagens do ensaio de partículas magnéticas – matriz Liga_2 N°.7-B.

Fonte: arquivo IPT.

Figura 5.13 – Exames macrográficos da matriz de aço Liga_2: acompanhamento do desgaste superficial no pino central (regiões A, B e C).

Fonte: arquivo IPT.

Exames micrográficos das mesmas regiões **A**, **B**, **D**, **E**, **F**, **H** e **I** da matriz de aço Liga_2 após o forjamento de 1 peça são apresentadas na Figura 5.14. Micrografias das mesmas regiões, acrescidas de imagem da região **C** obtida por réplica metalográfica, após 100 golpes, são mostradas na Figura 5.15.

Na região **A**, após 1 golpe, notam-se pequenos riscos na direção de deslizamento do material. Após 100 golpes os riscos já não são claramente percebidos, e a baixa velocidade de deslizamento e alta pressão sugerem a perda de material por adesão (como se pode notar por pequenos vazios na superfície).

Após 1 golpe, na região **B** nota-se abrasão, com marcas aparentemente mais relacionadas à microsulcamento do que à microcorte – tal resistência pode ser devida a maior dureza do material. Em algumas regiões, após 1 golpe, surgem também trincas, como se observa na Figura 5.16.

Figura 5.14 – Micrografias das regiões A, B, D, E, F, H e I da matriz de aço Liga_2 após 1 golpe.

Fonte: arquivo IPT.

Figura 5.15 – Micrografias das regiões A, B, D, E, F, H e I e réplica metalográfica da região C da matriz de aço Liga_2 após 100 golpes.

Fonte: arquivo IPT.

Figura 5.16 – Exame micrográfico; matriz aço Liga_2 (“C99”) após 1 golpe, região B.

Fonte: arquivo IPT.

Na imagem da região **B** após 100 golpes pode-se observar abrasão com arrancamento de material. Tal arrancamento pode também ter sofrido influência dos carbonetos (NbC) da matriz, pela interconexão de trincas causada por fadiga de contato (*spalling*).

Na região **C**, após 100 golpes, notam-se algumas poucas trincas, provavelmente devidas mais à fadiga de contato ou fadiga mecânica do que à fadiga térmica, e poucas marcas de abrasão.

A região **D**, após 1 golpe, não apresenta marcas relevantes de qualquer natureza. Após 100 golpes, são notáveis trincas de fadiga térmica, provavelmente também oriundas de fadiga de contato, como na matriz de aço Liga_1. Como discutido adiante (**Seção 5.3.2**), nesta região não há escorregamento significativo de material, sendo a carga termomecânica decorrente do contato da superfície da ferramenta com o *billet* nos últimos instantes de preenchimento da cavidade, quando a prensa se aproxima do PMI e a velocidade vertical de descida do martelo vai a zero.

A região **E** é caracterizada por deslizamento de material até certo ponto, e rolamento de material deste ponto em diante. O rolamento de material pode fazer

com que regiões mais internas do forjado (que até então não tinham tocado a superfície da ferramenta, e portanto não trocaram calor com a ferramenta) passem a tocá-la, aumentando a temperatura naqueles pontos. Alguns “vazios” ou pequenos “buracos” na superfície estão associados a defeitos de fundição. A ausência de marcas de riscos nesta superfície chama atenção, principalmente se comparada a mesma região da matriz de aço AISI H13 (Liga_1). Isto pode ser devido a uma baixa pressão de contato nesta região associada a uma maior dureza superficial desta matriz.

Como a região **D**, a região **F** apresenta velocidade de deslizamento praticamente nula. Disto, temos que os principais modos estariam associados à pressão de contato e a carga térmica deste contato. Após 100 golpes percebe-se a formação de camadas de óxidos que, diferentemente das formadas na superfície da matriz de aço AISI H13, são mais espessas e têm maior aderência à superfície.

A região **H** apresenta poucos riscos e marcas após um único golpe. Após 100 golpes, contudo, percebe-se um efeito combinado de fadiga térmica e abrasão. O movimento de abertura que causa o material sendo forjado ao passar por esta região pode também induzir à fadiga mecânica na ferramenta.

A região **I** após 1 golpe também apresenta poucos riscos. É uma região que também apresenta considerável velocidade de deslizamento, sendo o local de saída de material (formação de rebarba). Após 100 golpes a abrasão no sentido de fluxo do material é evidente, e notam-se também algumas trincas nessa região. Novamente, como na análise da mesma região na matriz de aço Liga_1, as baixas cargas geradas pela superfície livre reduzem a severidade da abrasão, colocando a região como dentro de um regime de desgaste moderado.

5.1.3 Comparação dos resultados de perfilometria

Para observação do efeito dos dois diferentes materiais no desgaste, os resultados de perfilometria foram comparados. Na Figura 5.17, a média das curvas de desgaste da matriz de aço Liga_1 N°.17-B são apresentadas acima das da matriz de aço Liga_2 N°.7-B após 100 ciclos.

Figura 5.17 – Média das curvas de desgaste das matrizes após determinado número de ciclos: a) Matriz de aço Liga_1 N°.17-B; b) Matriz aço Liga_2 N°.7-B.

Fonte: autoria própria.

Nota-se na curva de desgaste da região central das matrizes um comportamento distinto entre os materiais. A resistência ao desgaste observada no aço Liga_2 pode ser atribuída à presença dos carbonetos de Nb dispersos na matriz, que contribuem para um aumento da dureza do material. Embora mais resistente

neste sentido, esta mesma microestrutura torna a matriz também menos dúctil, e portanto mais frágil ou menos resistente ao impacto, o que justificaria a falha (trinca) prematura após as últimas peças forjadas e o que encerrou a vida da ferramenta com 100 golpes. A comparação entre o desgaste da região central dessas matrizes após 100 ciclos é apresentada na Figura 5.18. A evolução das superfícies de desgaste é mostrada na Figura 5.19.

Figura 5.18 – Média dos perfis e superfície de desgaste após 100 golpes das matrizes de aço Liga_1 N°.17-B e aço Liga_2 N°.7-B.

Fonte: autoria própria.

Figura 5.19 – Comparação das superfícies de desgaste: a) Matriz N°.17-B, Liga 1 (Figura 5.4); b) Matriz N°.7-B, Liga_2.

Fonte: autoria própria.

Uma integração numérica da superfície (integração trapezoidal no Matlab®, função `trapz`) permitiu uma estimativa inicial do volume removido. Esta quantidade permitiria o cálculo do coeficiente de desgaste K do material, baseado na equação de desgaste de Archard (33), Equação (5.1):

$$K = \frac{H \cdot W}{F_N} \quad (5.1)$$

onde W é o volume removido por distância percorrida (mm^3/mm), F_N (N) é a força normal ao contato e H (Pa) é a dureza do material desgastado.

A Figura 5.20 traz o gráfico do volume removido em função do número de ciclos (golpes). Trata-se de uma estimativa, visto que a resposta da integração numérica depende do alinhamento entre as superfícies, para o que não se estabeleceu um algoritmo que realize a tarefa de forma automática. O gráfico apresenta o volume líquido removido, obtido da integração da superfície de desgaste. A convergência das curvas após 100 golpes pode parecer estranha se comparada aos perfis de desgaste da Figura 5.18. Deve-se considerar que estes perfis representam uma

média de toda a superfície, de modo que atenua-se ali a influência de vales locais que contribuem para o aumento do valor numérico do volume desgastado na matriz de aço Liga_2. Mesmo com esta consideração, os dados na Figura 5.17 ainda parecem sugerir um desgaste maior para a Liga_1 na condição de 100 golpes e estudos adicionais devem ser realizados para um melhor entendimento destes dados.

Figura 5.20 – Estimativa do volume total removido.

Fonte: autoria própria.

A estimativa do valor de K seria possível conhecendo-se a distância líquida percorrida durante o contato entre a superfície da matriz e a superfície do forjado. Para se conhecer o valor líquido, no entanto, seria necessário conhecer a distância relativa percorrida por cada ponto da superfície da matriz ao longo de um ciclo. Neste caso, conhecidas também a força normal e a dureza em cada ponto, seria possível o cálculo de um K local. Associar o volume removido a um valor de K , portanto, seria associar tal volume a um valor médio dessa variável – entende-se, disto, que o K não é um valor constante para estes resultados. As expressões (2.3), (2.8) e (2.9), que fazem uso de K para estimativa do volume desgastado, teriam, dessa forma, validade local, visto que cada um dos parâmetros varia em cada ponto da superfície. Do cálculo, poderia-se compor uma superfície de valores locais de K , o que daria uma visão da influência de cada um dos fatores na perda de massa da superfície.

5.2 Perfil experimental de temperaturas

Perfis de temperatura durante o processo foram obtidos com as matrizes N°.15-A (Liga_1) e N°.11-A (Liga_2), como consta na Tabela 4.4. Os termopares foram identificados por código sequencial e para cada um atribuiu-se um canal no sistema de aquisição de dados (DAQ), apresentado na Tabela 5.1. Aqui deve-se notar que as profundidades dos termopares são valores aproximados por tolerâncias, visto a dificuldade de medição precisa, aliada à de usinagem das peças, principalmente da matriz usinada em aço Liga_2.

Tabela 5.1 – Termopares utilizados na instrumentação da matriz de forjamento.

Região	Cód. termopar	Tipo de termopar	Profundidade com relação a superfície (mm)	Canal no sistema de aquisição de dados (DAQ)
Centro (A)	k7 (superfície)	Termopar ponta usinável	$0 \pm 0,05$	Ch7
1 (D)	k5	Termopar de isolamento mineral ECIL	$0,3 + 0,3 / - 0,1$	Ch5
	k3		$0,5 + 0,1 / - 0$	Ch3
	k2		$0,7 \pm 0,1$	Ch2
2 (G)	k6		$1,1 \pm 0,1$	Ch6
	k4		$2,5 + 0,4 / - 0,5$	Ch4
3 (I)	k1		$0,5 + 0 / - 0,1$	Ch1

Fonte: autoria própria.

Foram forjadas 50 peças com cada matriz. As matrizes foram pré-aquecidas antes do forjamento com utilização de lâmpadas halógenas, no intuito de atingirem uma temperatura em torno de 150 °C. Embora se tenha realizado este aquecimento prévio, observou-se que a temperatura efetiva de início dos ciclos ficou entre 60 °C e 70 °C, uma vez que a perda de calor da matriz por radiação com o meio e por contato com o porta-ferramenta é muito intensa entre a retirada da fonte de aquecimento e o início da operação.

A Figura 5.21 apresenta uma visão geral dos ensaios com matriz N°.15-A (material Liga_1). No gráfico, temos que o pico de pré-aquecimento esteve entre 130~140 °C mas, como citado, discute-se a eficiência do método ao se considerar a temperatura efetiva de início dos ciclos de operação. Os picos de temperatura na superfície da região 0, centro da matriz, estiveram durante o processo

predominantemente entre 400 °C e 450 °C. Na figura, um excerto do gráfico com o total de ciclos do ensaio é ampliado, tendo sido escolhido como representativo do ciclo em regime estacionário. Na Figura 5.22 uma nova ampliação é realizada, desta vez para enfoque em um único ciclo, onde podem ser identificadas as diferentes etapas do forjamento.

A Figura 5.23 traz uma visão geral para os ciclos de forjamento com a matriz N°.11-A (Liga_2), onde tem-se um pico de pré-aquecimento em torno de 180 °C. Os picos de temperatura estiveram predominantemente dentro da mesma faixa da matriz de Liga_1. Da mesma forma que para as curvas anteriores, uma nova ampliação foi realizada para melhor leitura dos dados, Figura 5.24. Nas Figuras 5.22 e 5.24 as etapas de 1 a 4 referem-se à: 1) início do contato entre matriz superior e *billet*; 2) término do contato; 3) completo afastamento entre os corpos, e; 4) aplicação do lubrificante.

Figura 5.21 – Visão geral dos perfis de temperatura, matriz N°.15-A (Liga_1): acima: total de ciclos do ensaio; abaixo: ampliação de região representativa do regime estacionário.

Fonte: autoria própria.

Figura 5.22 – Excerto com 4 ciclos de forjamento no regime estacionário (acima) e ampliação de um único ciclo (abaixo) com identificação das etapas de forjamento (Liga_1):
 1 – Início do contato entre matriz superior e *billet*; 2 – Término do contato; 3 – completo afastamento entre os corpos, e; 4 – Aplicação do lubrificante.

Fonte: autoria própria.

Figura 5.23 – Visão geral dos perfis de temperatura, matriz N°.11-A (Liga_2): acima: total de ciclos do ensaio; abaixo: ampliação de região representativa do regime estacionário.

Fonte: autoria própria.

Figura 5.24 – Excerto com 4 ciclos de forjamento no regime estacionário (acima) e ampliação de um único ciclo (abaixo) com identificação das etapas de forjamento (Liga_2):
 1 – Início do contato entre matriz superior e *billet*; 2 – Término do contato; 3 – completo afastamento entre os corpos, e; 4 – Aplicação do lubrificante.

Fonte: autoria própria.

Uma comparação entre os perfis de temperatura obtidos em cada matriz é apresentada na Figura 5.25. As curvas estão separadas por região, conforme indicado na Tabela 5.1. As curvas não apresentam diferenças expressivas, exceto pela região 2, onde a localização do ponto exato de medição em extremos dos limites de tolerância pode ter sido responsável pela variação observada.

Termopares do mesmo modelo utilizado para leitura da temperatura na superfície da matriz (vide **Seção 4.4**), instalados em cilindros de laminação (escala piloto), suscitaram dúvidas quanto à sua acurácia. Isto porque, na superfície dos cilindros, com o decorrer das campanhas de laminação, foi revelada uma malha de trincas característica de fadiga térmica que seria incompatível com o gradiente de temperatura medido. Esta incompatibilidade estaria fundamentalmente associada à temperatura máxima medida na superfície, sensivelmente menor que a relatada pela literatura (70). Uma menor temperatura na superfície, e consequentemente um menor gradiente térmico, não seriam suficientes para gerar tensões que ultrapassassem o limite de escoamento do material, e levar dessa forma à deformações plásticas que resultassem numa malha de trincas. Por outro lado, ensaios de fadiga térmica realizados em corpos de prova de material semelhante mostraram que concentradores locais de tensão na superfície podem causar tensões trativas que excedam esse limite, sob condição de fadiga de baixo ciclo (71). Além disso, a perda gradual de dureza na superfície do material ao longo dos ciclos de carregamento térmico degrada consideravelmente os limites de escoamento iniciais do material. No caso específico da matriz de forjamento deve-se considerar, também, que a temperatura varia ao longo do perfil da matriz, e a medição na superfície ocorreu apenas no centro da região **A** (Figura 4.6). Disto, temos que o perfil de temperatura obtido experimentalmente presta-se mais como parâmetro para uma análise qualitativa do formato do evento térmico durante o ciclo do que para uma análise quantitativa, principalmente se comparado aos valores numéricos obtidos, como será discutido adiante.

Figura 5.25 – Comparação das curvas de temperatura para cada material, por região:
r0: região central (A); r1: região 1 (D); r2: região 2 (G); r3: região 3 (I).

Fonte: autoria própria.

5.3 Resultados de simulação

5.3.1 Modelos preliminares

Resultados do perfil de temperatura na superfície da ferramenta foram obtidos através do software QForm[®]. Os perfis são apresentados na Figura 5.26, que traz também o perfil de desgaste da matriz superior após 1000 golpes. Este modelo, contudo, precisa de melhorias quanto à especificação do lubrificante e propriedades dos materiais. Para efeito de comparação, neste gráfico foi também lançado o perfil de temperatura superficial obtido pela simulação em ABAQUS após 1 golpe (*step forja*). Nesta última, as ferramentas partiram de uma temperatura inicial $T_0 = 60\text{ °C}$.

Figura 5.26 – Perfil médio de desgaste medido na ferramenta de material Liga_1 após 1000 golpes (gráfico superior) e perfis de temperatura na superfície da matriz após 1 golpe, obtidos de modelo numérico, considerando duas diferentes temperaturas de partida (150 °C e 52,5 °C); indica-se também o perfil de temperatura obtido pelo modelo ABAQUS e a temperatura média medida no centro da matriz (experimental).

Fonte: autoria própria.

5.3.2 Modelo ABAQUS

O modelo com resultados mais promissores foi o desenvolvido em ABAQUS. Este software permite a personalização de diversas propriedades dos materiais, obtidas através de ensaios ou disponíveis na literatura. As propriedades dos materiais utilizados são descritas na **Seção 4.5.2** e, como citado, a simulação foi baseada em uma matriz de aço AISI H13.

Algumas fases do ciclo de forjamento na simulação são apresentadas na Figura 5.27.

Figura 5.27 – Etapas de 1 ciclo de forjamento na simulação, com distribuição de valores de temperatura (*step forja*; incrementos (*frames*) indicados na figura).

Fonte: autoria própria.

Na sequência de incrementos (*frames*) percebe-se que, a medida em que a matriz desce, diferentes partes do *billet* tocam a ferramenta em momentos distintos. Em $f: 60$, nota-se que a borda do *billet* toca a região **E** antes do forjado tocar a região **D**. Isso induz o surgimento de uma dobra, indicada em $f: 100$, que pode ou não ser eliminada até o término forjamento. É possível constatar esse efeito na imagem do forjado da Figura 4.1 (seta vermelha).

5.3.2.1 Perfil numérico de temperaturas

Os perfis de temperatura no modelo ABAQUS foram obtidos de nós localizados em posições correspondentes às dimensões nominais de posicionamento da ponta dos termopares, Figura 5.28. As curvas obtidas em função do tempo são apresentadas nas Figuras 5.29 e 5.30.

Figura 5.28 – Nós correspondentes à posição da ponta dos termopares.

Fonte: autoria própria.

As curvas de temperatura podem ser comparadas qualitativamente. A simulação segue o mesmo tempo de contato entre ferramenta e *billet*, 140 ms, indicando um pico de temperatura de $\sim 590\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante este curto espaço de tempo.

Figura 5.29 – Perfis de temperatura obtidos dos 3 golpes: a) Experimental; b) Numérico.

Fonte: autoria própria.

Figura 5.30 – Perfil de temperatura para 1 golpe: a) Experimental; b) Numérico.

Fonte: autoria própria.

A diferença entre as curvas pode ser explicada por uma série de fatores, tanto experimentais quanto da concepção do modelo. Com relação a fatores experimentais, além da imprecisão na posição da ponta dos sensores e a discussão

acerca de sua medição na **Seção 5.2**, deve-se considerar também a influência da resistência de contato e de seu tempo de resposta, principalmente do modelo de termopar instalado abaixo da superfície. Parâmetros utilizados na simulação como a condutividade térmica (κ) ou o coeficiente de transferência de calor (HTC) estão de acordo com a literatura e com ensaios prévios realizados, de modo que a divergência nas curvas deve ser devida mais aos sensores, visto que nenhum modelo terá acurácia de acerto total. Como citado, o tempo de ciclo da simulação é igual ao do processo real, e a diferença na escala de tempo entre os gráficos da Figura 5.30 foi apenas uma forma de mostrar que os picos de temperatura medidos pelos termopares abaixo da superfície são atingidos muito após os indicados pela simulação.

5.3.2.2 Variáveis do mapa

As variáveis CPRESS (P), NT11 (T) e FSLIPR (V), como citado, foram obtidas de 4 nós, pertencentes a 3 elementos, selecionados no centro de cada região na superfície da matriz, como ilustrado na Figura 4.17b. Gráficos com essas variáveis expressas em função do intervalo de tempo do *step forja*, que corresponde a 1 ciclo de forjamento (da aproximação do *billet* ao PMI), são apresentados na Figura 5.31. As curvas foram obtidas através da média aritmética dos valores dos nós para cada região da matriz, em cada golpe, indicadas pela coordenada X do centro de cada região. Um filtro média móvel foi aplicado em CPRESS e FSLIPR apenas para melhor delineamento da tendência das curvas.

Figura 5.31 – Variáveis obtidas da simulação na superfície da matriz durante o período de 1 ciclo de forjamento.

Fonte: autoria própria.

As curvas trazem informações importantes sobre o contato entre as superfícies, que ajudarão na composição do mapa de desgaste. Uma primeira observação revela que os menores picos de temperatura no último incremento de tempo (plano $t = 0,3$ s) correspondem às regiões onde houve pouco escorregamento de material (**D**, **F** e **G**), com excessão da região **I**, onde o material já chega mais frio (região de formação de rebarba), o que ilustra o acréscimo de temperatura por efeito do atrito interfacial – o aumento de temperatura por efeito da deformação plástica é também contemplado no modelo. As curvas obtidas na região **B** são comparáveis às obtidas por Xu, Li e Wang (1, p. 87), que tomaram um ponto de monitoramento em região equivalente no punção utilizado. No trabalho, os valores também foram obtidos de modelo do processo por elementos finitos.

A evolução da temperatura ao longo de 1 ciclo de forjamento (*step forja2*) é apresentado na Figura 5.32. A visualização 3D foi possível com o uso do recurso *sweep*, que revoluciona a superfície 2D pelo seu centro de simetria.

Figura 5.32 – Temperatura na superfície da matriz (em °C) ao longo do *step forja2* obtida na simulação (ABAQUS).

Fonte: autoria própria.

A Figura 5.33 apresenta os incrementos onde se encontram os picos de pressão de contato durante 1 ciclo de forjamento (*step forja2*). Na figura, a maior pressão está concentrada na região central do pino, o que, considerando que o limite de escoamento é reduzido com o aumento da temperatura (Tabela 4.6), justificaria a deformação plástica experimentada nesta região (Figuras 5.3 e 5.4) –

segundo a simulação a pressão de contato pode alcançar valores de até 1000 MPa. A esta deformação plástica está ainda associada a abrasão, influenciada por altas velocidades de deslizamento, como mostrado na Figura 5.34. Os picos de FSLIPR estão concentrados nas regiões **B**, **C**, **H** e **I**, seguindo as curvas da Figura 5.31.

Figura 5.33 – Valores máximos da pressão de contato (em Pa) sobre a superfície da matriz superior durante 1 ciclo.

Fonte: autoria própria.

Figura 5.34 – Valores máximos da velocidade de deslizamento (em m/s) durante 1 ciclo.

Fonte: autoria própria.

5.4 Mapa de desgaste

A caracterização das ferramentas permite a correlação entre os modos de desgaste identificados e as condições experimentadas pela superfície durante o processo, obtidas da simulação. Na análise do mapa de desgaste pode-se considerar que as variáveis P , V e T , uma vez obtidas apenas na superfície da matriz, são representativas de uma operação genérica de forjamento.

A Figura 5.35 apresenta mapa com os valores máximos de cada variável por região da matriz, para cada golpe (cada ponto corresponde ao valor máximo da variável durante 1 golpe no modelo numérico). O valores assim dispostos permitem a identificação de 6 grupos submetidos à condições semelhantes de processo. A identificação desses grupos é mais nítida quando feita sobre os pontos dispersos no espaço tridimensional.

Figura 5.35 – Grupos identificados sobre mapa das variáveis.

Fonte: autoria própria.

Traçando-se um paralelo entre cada grupo e a caracterização da superfície da ferramenta, temos:

O *grupo 1* (região **A**) é caracterizado por altas pressões e baixas velocidades de deslizamento. Da análise do desgaste nesta região, temos como modo predominante a adesão e a deformação plástica, esta última responsável pela transposição de material para a região do raio **B**.

O *grupo 2* (região **B**) é caracterizado por altas velocidades de deslizamento e altas temperaturas – o pico de temperatura reportado se encontra nessa região. Percebe-se um incremento de temperatura nessa região devido à intensidade do atrito. Nesta região predominam a abrasão e a deformação plástica.

O *grupo 3* (região **C**) é caracterizado pelas mais altas velocidades de deslizamento e baixas pressões de contato. Embora se notem riscos de abrasão nas imagens das superfícies, as baixas pressões levam à um desgaste leve da superfície, de modo que há no grupo o predomínio de uma abrasão moderada.

O *grupo 4* é caracterizado por baixíssimas velocidades de deslizamento e baixas pressões de contato. Este grupo é composto pelas regiões de raio côncavo **D** e **F**, além da parede inclinada já próxima a saída de material, **G**. O contato do material forjado com essas regiões fica restrito aos instantes finais do forjamento, quando o material termina de preencher a cavidade pelas regiões **D** e **F** e inicia-se a formação de rebarba – estes raios parecem marcar uma transição entre regimes de desgaste de moderado para severo (**D**→**E**) e de severo para moderado (**E**→**F**). Nestes raios, devido à baixa abrasão, ocorre também a formação de camadas de óxido sobre a superfície. O modo de desgaste predominante neste caso pode ser indicado como devido à fadiga termomecânica e oxidação.

O *grupo 5* é caracterizado por condições intermediárias de pressão, velocidade e temperatura. Trata-se do grupo compreendido pelas regiões **E** e **H**. A região **E** é a área plana onde encosta primeiro a borda do *billet* durante o forjamento (Figura 5.27, *frame* 60), com escorregamento de material até certo ponto (próximo ao pino central) e rolamento do material daí em diante, com marcas que se assemelham ao padrão de desgaste observado em (48) na análise da superfície de matrizes de recalque. A região **H** corresponde ao raio convexo anterior à saída do material (rebarba). Nesta região predomina também a abrasão, como no raio convexo **B**, mas sob temperaturas inferiores. Percebe-se também um acréscimo na

temperatura devido ao atrito, quando comparada àquela predominante no *grupo 4* (faixa entre 420 °C e 450 °C contra 475 °C e 500 °C no *grupo 5*).

O *grupo 6* (região I) é caracterizado por baixas temperaturas, devido ao contato do forjado com o meio externo às matrizes. Esta região apresenta também riscos de abrasão – frente a classificação das demais regiões, pode-se dizer que nesta predomina uma abrasão moderada.

O mapa tridimensional com indicação dos modos de desgaste é apresentado na Figura 5.36.

Figura 5.36 – Mapa de desgaste.

Fonte: autoria própria.

6 CONCLUSÃO

Da análise dos resultados da medição da topografia das superfícies, e sua comparação com resultados da literatura, o método empregado permitiu um bom panorama de seu desgaste, o que, por sua vez, forneceu subsídios para identificação dos modos de desgaste. Percebeu-se também a notável influência da geometria da ferramenta no desgaste, bem como da microestrutura, embora não seja escopo deste trabalho o aprofundamento da discussão sobre esta última.

A medição de temperatura nas ferramentas não permitiu a calibração do modelo como esperado, embora uma avaliação qualitativa das curvas tenha sido possível.

A partir da análise do mapa de desgaste, foi possível constatar que:

- existem, na superfície, regiões de desgaste severo e moderado, associados à condições específicas de pressão, velocidade de deslizamento e temperatura. O raio do pino central, em particular, é a região que se destaca em todas as análises como região de ocorrência de desgaste severo;
- nos raios convexos **B** e **H** é notável o aumento de temperatura por efeito do atrito – o grupo 5, que envolve as regiões **E** e **H**, exemplifica este efeito;
- os raios côncavos **D** e **G** são regiões onde é propícia a manutenção de camada de óxido, resultado de pouco escorregamento de material durante a conformação;
- a melhor abordagem para visualização dos diferentes modos de desgaste frente às variáveis é por meio do gráfico tridimensional, uma vez que isto evita uma eventual sobreposição das regiões. Tal sobreposição, que ocorre no gráfico 2D, dá um efeito de intersecção inexistente quando se tem como intuito considerar todas as variáveis simultaneamente.

Como consideração final, temos que a proposta do trabalho, relacionada à construção de um mapa de desgaste, foi atingida, e os *outputs* de simulação, relacionados aos parâmetros P , V e T , corroboram com os danos observados na superfície das ferramentas, o que confere confiança ao modelo.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A obtenção de mais pontos no gráfico, que podem ser obtidos do modelo existente (com a inclusão de melhorias que o tornem ainda mais robusto) ou de novos modelos, permitiria uma maior densificação do gráfico e um delineamento das fronteiras de cada região, a exemplo do mapa proposto por Lim, Ashby e Brunton (22).

Uma reavaliação dos métodos e dos sensores utilizados para instrumentação da ferramenta poderia também contribuir para melhor compreensão do perfil térmico das ferramentas durante processo e efetiva validação do modelo com estes dados.

8 REFERÊNCIAS

- 1 XU, W.; LI, W.; WANG, Y. Experimental and theoretical analysis of wear mechanism in hot-forging die and optimal design of die geometry. **Wear**, v. 318, 2014. p. 78-88.
- 2 TERČELJ, M.; PERUŠ, I.; TURK, R. Predicting of tool wear for hot metal forging – an overview and suggested new approach. **RMZ – Materials and Geoenvironment**, v. 50, n. 3, 2003. p. 589-605.
- 3 LANGE, K. et al. Tool life and tool quality in bulk metal forming. **CIRP Ann. Manuf. Technol.**, v. 41, p. 667-675, 1992.
- 4 CHANDER, S.; VIKAS, C. Failure of hot forging dies - an update perspective. **Materials Today: Proceedings**, v.4, 2017. p.1147-1157.
- 5 GRONOSTAJSKI, Z. et al. The failure mechanisms of hot forging dies. **Materials Science and Engineering A**, v. 657, 2016. p. 147-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.030>.
- 6 HAWRYLUK, M.; ZIEMBA, J.; SADOWSKI, P. A review of current and new measurement techniques used in hot die forging processes. **Measurement and Control**, v. 50, 2017. p. 74-86.
- 7 PODGORNIK, B.; LESKOVŠEK, V. Wear mechanisms and surface engineering of forming tools. **Materials and Technology**, v. 49, n. 3, 2015. p. 313-324. doi:10.17222/mit.2015.005.
- 8 GRONOSTAJSKI, Z. et al. A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 14, 2014. p. 528-539. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2014.07.002>.
- 9 GRONOSTAJSKI, Z. et al. Selected effective methods of increasing the durability of forging tools in hot forging processes. **Procedia Manufacturing**, v. 27, 2019. p. 124-129.
- 10 BEHRENS, B.-A. et al. Influence of heat pipe cooling on the wear of hot forging dies. **Prod. Eng. Res. Devel.**, v. 10, 2016. p. 599-606. DOI 10.1007/s11740-016-0698-z.
- 11 KOMANDURI, R.; HOU, Z. B. A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology. **Tribology International**, v. 34, 2001. p. 653-682.
- 12 CHILDS, P. R. N.; GREENWOOD, J. R.; LONG, C. A. Review of temperature measurement. **Rev. Sci. Instrum.**, v. 71, n. 8, 2000. p. 2959-2978. doi: 10.1063/1.1305516.
- 13 TERČELJ, M.; TURK, R.; KNAP, M. Assessment of temperature on the die surface in laboratory hot metal forming. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, 2003. p. 113-125.

- 14 ABACHI, S. **Wear analysis of hot forging dies**. Dissertação de mestrado. The Middle East Technical University. Ankara, Turquia. 2004.
- 15 ABACHI, S.; AKKÖK, M.; GÖKLER, M. Wear analysis of hot forging dies. **Tribology International**, v. 43, 2010. p. 467-473.
- 16 BARIANI, P. F. et al. Experimental evaluation and FE simulation of thermal conditions at tool surface during cooling and deformation phases in hot forging operations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1, 2002. p. 219-222.
- 17 BEHRENS, B.-A. Finite element analysis of die wear in hot forging processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, 2008. p. 305-308. doi:10.1016/j.cirp.2008.03.087.
- 18 BEHRENS, B.-A.; SCHAEFER, F. Prediction of wear in hot forging tools by means of finite-element-analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 167, 2005. p. 309-315. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.06.057.
- 19 GONÇALVES, A. et al. **Coupled experimental-numerical analysis of wear of forging dies in pilot scale**. Proceedings of 37th SENAFOR, 1st International Conference on Surface Engineering in Material Forming. Porto Alegre, Brasil: [s.n.]. 2017.
- 20 STEMLER, P. M. A. et al. **Influência das variáveis de processo no desgaste de matrizes de forjamento a quente utilizando-se método dos elementos finitos**. Proceedings of 38th SENAFOR, 22nd International Forging Conference. Porto Alegre, Brasil: [s.n.]. 2018. p. 10.
- 21 VLASOV, A.; BIBA, N.; STEBUNOV, S. Elastic-plastic thermomechanical fatigue analysis of forging dies. **Key Engineering Materials**, v. 716, 2016. p. 667-676. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.716.667>.
- 22 LIM, S. C.; ASHBY, M. F.; BRUNTON, J. H. Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms. **Acta Metallurgica**, v. 35, n. 6, p. 1343-1348, 1987. doi:10.1016/0001-6160(87)90016-2.
- 23 STACHOWIAK, A.; TYCZEWSKI, P.; ZWIERZYCKI, W. The application of wear maps for analyzing the results of research into tribocorrosion. **Wear**, v. 352-353, 2016. p. 146-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.02.009>.
- 24 SAHOO, B. N.; PANIGRAHI, S. K. Development of wear maps of in-situ TiC+TiB2 reinforced AZ91 Mg matrix composite with varying microstructural conditions. **Tribology International**, v. 135, 2019. p. 463-477. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.029>.
- 25 IPT - INST. DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SP. **Sistema avançado para projeto de ligas aplicadas em ferramentas de conformação a quente**. IPT. São Paulo, p. 141. 2013. (1320236-205).

- 26 CIMM. **Centro de Informação Metal Mecânica**. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6469-aspectos-de-temperatura-na-conformacao#.XUsST_JKhpg>. Acesso em: 07 ago. 2019.
- 27 HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P. **Tribology - friction and wear of engineering materials**. 2nd. ed. [S.l.]: Elsevier/ Butterworth-Heinemann, 2017. 412 p.
- 28 Designation G40: Standard terminology relating to wear and erosion. ASTM International. [S.l.], p. 9. 2017. (G40-17). doi:10.1520/G0040-17.
- 29 CZICHOS, H. **Tribology - a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear**. 1a. ed. [S.l.]: Elsevier, v. 1 (Tribology Series), 1978. ISBN 0-444-41676-5.
- 30 BEHRENS, B.-A. et al. Tribology in hot forging. In: _____ **Comprehensive Materials Processing**. [S.l.]: Elsevier Ltd., v. 5, 2014. Cap. 5.11, p. 211-234. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00538-0>.
- 31 SINATORA, A.; TANAKA, D. K. As leis do atrito: da Vinci, Amontons ou Coulomb? **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 31-34, 2007. ISSN 0100-7386. Disponível em: http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/milan/materiais/SINATORA__TANAKA__As_leis_do_atrito.pdf.
- 32 POPOVA, E.; POPOV, V. L. The research works of Coulomb and Amontons and generalized laws of friction. **Friction**, v. 3, n. 2, 2015. 183-190. doi: 10.1007/s40544-015-0074-6. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/81791735.pdf>.
- 33 ARCHARD, J. F.; HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions. **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering**, v. 236, 1956. p. 397-410.
- 34 OBARA, R. B. **Avaliação do desgaste em cilindros de motores de combustão interna - mapeamento de mecanismos e quantificação do desgaste**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 18. 2018.
- 35 ALTAN, T.; DESHPANDE, M.; GROSECLOSE, A. **Selection of die materials and surface treatments for increasing die life in hot and warm forging**. Proceedings of the FIATECH Technology Conference & Showcase, Paper N°. 644-FIA. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1-32. Disponível em: https://ercnsm.osu.edu/sites/ercnsm.osu.edu/files/uploads/F_equiptooling/644.pdf.
- 36 SCOTT, R. Basic wear modes in lubricated systems. **Machinery Lubrication**, v. 7, 2008. Disponível em: www.machinerylubrication.com/Read/1375/wear-modes-lubricated. Acesso em 08 ago. 2019.
- 37 GAHR, K.-H. Z. **Microstructure and wear of materials**. 1a. ed. [S.l.]: Elsevier, v. 10 (Tribology Series), 1987. ISBN 0-444-42754-6.
- 38 KOHOPÄÄ, J.; HAKONEN, H.; KIVIVUORI, S. Wear resistance of hot forging tools surfaced by welding. **Wear**, v. 130, 1989. p. 103-112.

- 39 BARRAU, O. et al. Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging. **Wear**, v. 255, 2003. p. 1444-1454. doi:10.1016/S0043-1648(03)00280-1.
- 40 HAWRYLUK, M. et al. Phenomena and degradation mechanisms in the surface layer of die inserts used in the hot forging processes. **Engineering Failure Analysis**, v. 79, 2017. p. 313-329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.04.036>.
- 41 HOKKIRIGAWA, K.; KATO, K. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. **Tribology International**, v. 21, n. 1, 1988. p. 51-57.
- 42 SUMMERVILLE, E.; VENKATESAN, K.; SUBRAMANIAN, C. Wear processes in hot forging press tools. **Materials & Design**, v. 16, n. 5, 1995. 289-294.
- 43 WILLIAMS, J. A. The influence of repeated loading, residual stresses and shakedown on the behaviour of tribological contacts. **Tribology International**, v. 38, 2005. p. 786-797.
- 44 MANSON, S. **Behaviour of materials under condition of thermal stress**. Lewis Flight Propulsion Laboratory. Cleveland, EUA. 1954. (Relatório Técnico N°.1170).
- 45 OUDIN, A. et al. Thermochemical fatigue behaviour and life assessment of hot work tools steels. **European Structural Integrity Society**, v. 29, 2002. p. 195-201. [https://doi.org/10.1016/S1566-1369\(02\)80076-0](https://doi.org/10.1016/S1566-1369(02)80076-0).
- 46 DING, Y.; RIEGER, N. F. Spalling formation mechanism for gears. **Wear**, v. 254, 2003. p. 1307-1317. doi:10.1016/S0043-1648(03)00126-1.
- 47 PEREIRA, M. H. **Caracterização do desgaste em punção de forjamento a quente em prensa horizontal automática de múltiplos estágios**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 2017.
- 48 ROOKS, B. W.; SINGH, A. K.; TOBIAS, S. A. Temperature effects in hot forging dies. **Metals Technology**, v.1, n. 1, 1974. p. 449-455.
- 49 FELDER, E.; MONTAGUT, J. L. Friction and wear during the hot forging of steels. **Tribology International**, 1980. 61-68.
- 50 SINGH, A. K.; ROOKS, B. W.; TOBIAS, S. A. Factors affecting die wear. **Wear**, v. 25, 1973. p. 271-279.
- 51 CHO, D.-H.; LEE, S.-A.; LEE, Y.-Z. Mechanical properties and wear behavior of the white layer. **Tribology Letters**, v. 45, 2012. p. 123-129. DOI 10.1007/s11249-011-9869-4.
- 52 KELLOW, M. A.; BRAMLEY, A. N.; BANNISTER, F. K. The measurement of temperature in forging dies. **Int. J. Mach. Tool Des. Res.**, 9, 1969. 239-260.
- 53 HAWRYLUK, M. et al. Analysis of the influence of lubrication conditions on tool wear used in hot die forging processes. **Eksplotacja i Niezawodność** –

Maintenance and Reliability, v.20, n. 2, 2018. p. 169-176.
<http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.2.01>.

54 HAWRYLUK, M.; ZIEMBA, J. The possibility of applying reverse scanning techniques to analyse the wear of forging tools and forging defects. **Inżynieria Materiałowa – Materials Engineering**, v. 226, n. 6, 2018. p. 215-222. doi:10.15199/28.2018.6.3.

55 HAWRYLUK, M. et al. Wear analysis of forging tools used in the hot forging processes using 3D reverse scanning techniques and cooling-lubricating system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, 2018. p. 2009-2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2066-y>.

56 DOEGE, E.; DREYER, G.; RUESCH, S. Metal forming: close die forging. In: _____ **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. [S.I.]: Elsevier Science Ltd., 2001. p. 5390-5394. ISBN 0-08-0431526. doi:10.1016/b0-08-043152-6/00940-2.

57 BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7th edition. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2011. 1050 p. ISBN 13 978-0470-50197-9.

58 BIGLARI, F. M.; ZAMANI, M. **Die wear profile investigation in hot forging**. Proceedings of the World Congress on Engineering - WCE. London, UK: [s.n.]. 2008. p. 3-7.

59 STÅHLBERG, U.; HALLSTRÖM, J. A comparison between two wear models. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 87, n. 1-3, 1999. p. 223-229. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00354-9).

60 ANDREIS, G.; FUCHS, K. -D.; SCHRUFF, I. **The wear behaviour of hot-work tool steels used in forging processes**. 5th International Conference on Tooling. Leoben, Austria: University of Leoben. 1999. p. 593-600.

61 WALTER, S. et al. **Material failure mechanisms on forging dies**. 5th International Conference on Tooling. Leoben, Austria: University of Leoben. 1999. p. 215-222.

62 DOEGE, E.; ANDREIS, G.; GULDE, M. **Improving tool life in hot massive forming by coating**. 5th International Conference on Tooling. Leoben, Austria: University of Leoben. 1999. p. 335-343.

63 SILVA, P. F. **Desgaste e fadiga térmica de ligas (aço matriz + NbC)**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da USP. São Paulo. 2006.

64 ANDREUCCI, R. **Ensaio por partículas magnéticas**. Andreucci Ass. e Serv. Tecnológicos. São Paulo, p. 66. 2009. Disponível em: www.infosolda.com.br/artigos/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/260-particulas-magneticas.

65 DAHMAN, J. Replication metallography: a non-destructive solution. **Element**, 29 jun. 2016. Disponível em: <<https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/replication-metallography-a-non-destructive-solution>>. Acesso em: 04 jan. 2018.

- 66 SAWI product catalogue. **sawi.ch**, 2019. Disponivel em: <https://www.sawi.ch/produkte_e/katalog_gesamt_e/sawi-Katalog_EN.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2019.
- 67 MAGRI, M. L.; DINIZ, A. E.; BUTTON, S. T. Influence of surface topography on the wear of hot forging dies. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 65, 2013. p. 459-471.
- 68 ALTAN, T.; HENNING, H. J.; SABROFF, A. M. **A study of the mechanics of closed die forging - important factors in selection and use of equipment for forging**. DTIC, Battelle Memorial Institute. [S.l.], p. 36. 1969.
- 69 UDDEHOLM. **Uddeholm defect chart**, Outubro 2017. Disponivel em: <<https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/44/2018/11/Tech-Uddeholm-Defect-Chart-EN.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- 70 WEIDLICH, F. et al. The influence of rolling mill process parameters on roll thermal fatigue. **Intl. J. Adv. Manuf. Technol.**, 102, 2019. 2159-2171. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03293-1>.
- 71 PERSSON, A.; HOGMARK, S.; BERGSTRÖM, J. Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels. **Surface & Coatings Technology**, v. 191, 2005. p. 216-227. doi:10.1016/j.surfcoat.2004.04.053.
72. **The Great Soviet Encyclopedia**, 3rd. Edition (1970-1979). "Rebinder Effect". © 2010 The Gale Group, Inc. Disponivel em: <<https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Rebinder+Effect>>. Acesso em: 22 maio 2019.