



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Mecânica

ROGÉRIO DONIZETI CARVALHO

**Estudo da Recuperação por Soldagem e por Revestimentos
Superficiais na Vida de Matrizes de Forjamento a Quente**

**CAMPINAS
2017**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ROGÉRIO DONIZETI CARVALHO

**ESTUDO DA RECUPERAÇÃO POR SOLDAGEM E POR REVESTIMENTOS
SUPERFICIAIS NA VIDA DE MATRIZES DE FORJAMENTO A QUENTE**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais e Processos de Fabricação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO ROGÉRIO DONIZETI CARVALHO, E
ORIENTADO PELO PROF. DR SÉRGIO TONINI
BUTTON.

.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2017**

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C253e Carvalho, Rogério Donizeti, 1975-
Estudo da recuperação por soldagem e por revestimentos superficiais na vida de matrizes de forjamento a quente / Rogério Donizeti Carvalho. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Sérgio Tonini Button.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Engenharia metalúrgia. 2. Desgaste mecânico. 3. Aço-ferramenta. 4. Metais - Soldagem. I. Button, Sérgio Tonini, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Study of recovery by welding and surface coating in service life of hot forging dies

Palavras-chave em inglês:

Metallurgical engineering

Mechanical wear

Tool steel

Metal welding

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Sérgio Tonini Button [Orientador]

Anselmo Eduardo Diniz

Sérgio Delijaicov

Data de defesa: 14-06-2017

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MANUFATURA E DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**ESTUDO DA RECUPERAÇÃO POR SOLDAGEM E POR REVESTIMENTOS
SUPERFICIAIS NA VIDA DE MATRIZES DE FORJAMENTO A QUENTE**

Autor: Rogério Donizeti Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Sergio Tonini Button

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Sergio Tonini Button, Presidente
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Sergio Delijaicov
Centro Universitário FEI

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 14 de junho de 2017.

Dedico este trabalho a minha esposa Diolei, companheira dedicada, aos meus pais, e aos meus filhos Lucas e Livia, como incentivo para os seus futuros acadêmicos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus misericordioso que manteve suas bênçãos sobre a minha vida, me proporcionando esta oportunidade ímpar.

Agradeço a minha esposa que não poupou esforços para me ajudar a cumprir meu objetivo;

Aos meus filhos pela paciência e compreensão por não ter o pai disponível nas horas de lazer;

Aos professores desta instituição e em especial ao Prof. Sergio Tonini Button;

As pessoas que cooperaram Jose Martinho; Gustavo Pires; Gilberto Ranalli da empresa, pela gentileza da contribuição de informações para este trabalho;

Aos colegas Reinaldo Ramazotti, Rafael Spinassi e Cristian Madariaga que contribuíram de modo especial em processos para a realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho da empresa, pela participação direta ou indiretamente de cooperação nos testes;

“Se chamares experiências às tuas dificuldades e recordares que cada experiência te ajuda a amadurecer, vais crescer vigoroso e feliz, não importa quão adversas pareçam as circunstâncias”.

Henry Miller

RESUMO

Um dos principais componentes do custo de um produto metálico forjado a quente é a recuperação das matrizes degradadas por diversos mecanismos dentre os quais se destacam o desgaste por abrasão, a fadiga mecânica e a fadiga térmica. Assim, a escolha adequada do processo de recuperação das matrizes e do revestimento superficial é essencial para o aumento da vida útil dessas ferramentas, com conseqüente redução do custo final dos produtos. O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a reutilização de uma ferramenta de forjamento a quente pela sua recuperação parcial com solda e revestimento superficial visando um melhor aproveitamento da ferramenta e conseqüente redução de custos no processo de forjamento. Para avaliar a melhor combinação de processos que resultasse no menor desgaste, empregou-se a análise estatística da variância. Para tanto, foram selecionadas matrizes já utilizadas e que haviam atingido sua vida, as mesmas foram recuperadas por usinagem e posterior soldagem por dois processos distintos das regiões desgastadas. Além disto, essas matrizes também foram submetidas a processos de endurecimento superficial por nitretação e recobrimento PVD. A análise do desgaste foi realizada pela comparação do modelo CAD e a ferramenta desgastada medida pelo processo de varredura (do inglês scanner). Os resultados mostraram que o processo de PVD não foi eficiente para reduzir o desgaste, provavelmente devido à diferença de dilatação térmica entre o revestimento e o aço-ferramenta beneficiado, e que foi causada pela variação de temperatura durante os repetidos ciclos de forjamento a quente. Por outro lado, as matrizes nitretadas apresentaram significativa redução do desgaste. Também se concluiu que os processos de soldagem para recuperação das matrizes não influenciam significativamente o desgaste das ferramentas.

Palavras-chave: Metalurgia física. Mecanismos de desgaste. Aço-ferramenta.

ABSTRACT

One of the most important cost of a hot forged metal product is the cost to recover the degraded dies by several mechanisms, like abrasive wear, mechanical fatigue and thermal fatigue. Thus, the suitable choice for recovering and coating the dies surface is essential for increasing dies lives, with consequent reduction of the final cost of the product. The aim of this study was to evaluate the reuse of hot forging dies by partial recovery by welding and surface treatments to a better utilization of die in order to reduce wear and the consequent increase of die life. To evaluate the best combination of processes which would result in less wear, it was used the statistical analysis of variance. For this purpose, dies which had reached the die lives were selected, and were recovered by subsequent machining and welding. In addition, these dies were also subjected to surface hardening by nitriding and PVD coating. The wear analysis was performed by comparing CAD models of the dies with those wore after several forgings which had the surface measured by scanning. The results of such analysis showed that the PVD is not efficient to reduce wear, probably due to the different thermal expansion between the coating and the tool steel, which is caused by the variation of temperature during repeated hot forging cycles. On the other hand, the nitrided dies showed a significant reduction in wear. It was also found that recovering the dies by welding did not significantly influence the wear of the dies.

Keywords: Physical metallurgy. Wear mechanisms. Tool steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Temperatura da ferramenta durante um ciclo de forjamento.....	28
Figura 2.2 - Camada de lubrificante durante o forjamento incluindo a transferência de calor	29
Figura 2.3 - Diagrama de equilíbrio ferro e nitrogênio	31
Figura 2.4 - Camada de Nitretação	33
Figura 2.5 - Relação da estrutura, propriedades fundamentais e a performance de engenharia dos aços nitretados.....	34
Figura 2.6 - Estrutura de um aço nitretado e a deposição de nitrogênio	36
Figura 2.7 - Técnicas de processo de PVD.....	39
Figura 2.8 - Lugares e tipos de desgaste.....	46
Figura 2.9 - Causas de falhas de ferramentas de forjamento.....	47
Figura 2.10 - Interação das características de forjamento com o modo de falha	48
Figura 2.11 - Típico desgaste abrasivo de uma ferramenta de forjamento.....	49
Figura 2.12 - Diferentes mecanismos de desgaste abrasivo	50
Figura 2.13 - Mecanismo de desgaste adesivo	51
Figura 2.14 - Processo e soldagem e o de desgaste adesivo.....	53
Figura 2.15 - Camada oxidada da superfície da ferramenta de forjamento com 1850 peças ...	54
Figura 2.16 - Morfologia da seção da superfície de desgaste para o corpo de prova revenido a 600°C, sobre as condições a) temperatura ambiente b) 200°C e c) 400°C. Fonte: Cui <i>et al.</i> (2009, p. 1060)	56
Figura 2.17 - Desgaste e fadiga mecânica	58
Figura 2.18 - Esquema de interação dos parâmetros de forjamento e a quebra catastrófica....	58
Figura 2.19 - Rede de trincas termomecânicas de uma ferramenta com 550 peças forjadas ...	60
Figura 2.20 - Danos causados pelo desgaste e trincas térmicas	61
Figura 2.21 - Mudanças físicas na superfície da ferramenta que resulta na trinca térmica.....	63
Figura 2.22 - Mecanismo de dano por sistema duplex (nitretação + PVD)	66
Figura 2.23 - Deformação plástica em camada superficial de uma ferramenta de forjamento a quente após 1850 peças forjadas.Fonte: Gronostajski <i>et al.</i> (2014, p. 535)	68
Figura 3.1 - Produto forjado	72
Figura 3.2 - Punção desgastado,	72
Figura 3.3 - Punção com rebaixamento para preenchimento de solda	74
Figura 3.4 - Punção representando a solda 1 e 2	76

Figura 3.5 - Braço Romer Absolute 7535 SI/SE	79
Figura 3.6 - Análise da maior distância do punção com solda 1, nitretação com maior camada e com PVD.	80
Figura 3.7 – Análise da maior distância (0,605 mm, maior distância entre os modelos).....	80
Figura 3.8 - EDX Distribuição de temperatura na simulação de forjamento	82
Figura 3.9 - EDX Distribuição de desgaste (MPa x mm) na simulação de forjamento	82
Figura 3.10 - Distribuição de temperatura e desgaste na simulação de forjamento	83
Figura 3.11 - Gráfico de temperatura (°C) com diferentes temperaturas iniciais	83
Figura 3.12 - Gráfico de desgaste (MPa X mm) com diferentes temperaturas iniciais.....	84
Figura 4.1 - Gráfico de Pareto dos efeitos	86
Figura 4.2 - Gráfico dos efeitos principais para o desgaste.....	87
Figura 4.3 - Gráfico das interações de 2 ordem para os efeitos para o desgaste	88
Figura 4.4 - Gráfico de resíduos, Probabilidade Normal, Histograma, Resíduos X Ajustes; Resíduos X Ordem	89
Figura 4.5 - Corpo de prova 1 - Vista geral e <i>Layout</i> do ensaio metalográfico.	91
Figura 4.6 - Região 1: Camada nitretada.....	92
Figura 4.7 - Região 1: Camada nitretada, nitretos precipitados no contorno de grão e camada de PVD.	92
Figura 4.8 - Região 2: Camada soldada microestrutura martensítica fina e revenida.	93
Figura 4.9 - Região de fusão do material base com a solda caracterizada pelo tamanho de grão austenítico.....	93
Figura 4.10 - Material base da ferramenta.....	94
Figura 4.11 - Corpo de prova 2 - Vista geral e <i>Layout</i> do ensaio metalográfico	95
Figura 4.12 - Região 1: Camada nitretada.....	95
Figura 4.13 - Região 1: Camada nitretada, nitretos precipitados no contorno de grão e camada de PVD.	96
Figura 4.14 - Região 2: Camada soldada, microestrutura martensítica fina e revenida.	96
Figura 4.15 - Região 3: Local de fusão do material base com a solda caracterizada pelo tamanho de grão austenítico	97
Figura 4.16 - Material base da ferramenta martensita fina e revenida.	97
Figura 4.17 - Corpo de prova 3 - Vista geral e <i>Layout</i> do ensaio metalográfico.	98
Figura 4.18 - Região 1: camada nitretada.....	99

Figura 4.19 - Região 1: Camada nitretada, nitretos precipitados no contorno de grão e camada de PVD.	99
Figura 4.20 - Região 2: Camada soldada microestrutura martensítica fina e revenida.	100
Figura 4.21 - Região 3: Região de fusão do material base com a solda caracterizada pelo tamanho de grão austenítico.	100
Figura 4.22 – Região 4: Material base da ferramenta martensita fina e revenida.	101
Figura 4.23 - Corpo de prova 4 - Vista geral e <i>Layout</i> do ensaio metalográfico	102
Figura 4.24 – Região 1: camada nitretada	102
Figura 4.25 - Região 1: camada nitretada, nitretos precipitados no contorno de grão e camada de PVD.	103
Figura 4.26 - Região 2: Camada soldada microestrutura martensítica fina e revenida.	103
Figura 4.27 - Região 3: Região de fusão do material base com a solda caracterizada pelo tamanho de grão austenítico.	104
Figura 4.28 - Região 4: Material base da ferramenta martensita fina e revenida.	104
Figura 4.29 - Vista geral e <i>layout</i> das regiões analisadas (macroscópica)	107
Figura 4.30 - Região 1, Região 2 e Região 3.....	107
Figura 4.31 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito	107
Figura 4.32 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito	108
Figura 4.33 - Análises metalográficas - Ponta do punção	108
Figura 4.34 - Vista geral e <i>layout</i> das regiões analisadas (macroscópica)	110
Figura 4.35 - Região 1, Região 2 e Região 3.....	110
Figura 4.36 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito	111
Figura 4.37 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.	111
Figura 4.38 - Análises metalográficas - Ponta do punção	112
Figura 4.39 - Vista geral e <i>layout</i> das regiões analisadas (macroscópica)	114
Figura 4.40 - Região 1, Região 2 e Região 3.....	114
Figura 4.41 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito	115
Figura 4.42 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.	115
Figura 4.43 - Análises metalográficas - Ponta do punção	116
Figura 4.44 - Vista geral e <i>layout</i> das regiões analisadas (macroscópica)	118
Figura 4.45 - Região 1, Região 2 e Região 3.....	118
Figura 4.46 - Região 4.....	119
Figura 4.47 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito	120

Figura 4.48 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.	120
Figura 4.49 - Análises metalográficas - Ponta do punção	120
Figura 4.50 - Vista geral e <i>layout</i> das regiões analisadas (macroscópica)	123
Figura 4.51 - Região 1 e Região 2	123
Figura 4.52 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito	124
Figura 4.53 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.	124
Figura 4.54 - Análises metalográficas - Ponta do punção	125
Figura 4.55 - Vista geral e <i>layout</i> das regiões analisadas (macroscópica)	126
Figura 4.56 - Região 1, Região 2 e Região 3	127
Figura 4.57 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito	127
Figura 4.58 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.	128
Figura 4.59 - Análises metalográficas - Ponta do punção	128
Figura 4.60 - Vista geral e <i>layout</i> das regiões analisadas (macroscópica)	130
Figura 4.61 - Região 1, Região 2 e Região 3	130
Figura 4.62 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito	131
Figura 4.63 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito	131
Figura 4.64 - Análises metalográficas - Ponta do punção	131
Figura 4.65 - Vista geral e <i>layout</i> das regiões analisadas (macroscópica)	133
Figura 4.66 - Região 1, Região 2 e Região 3	133
Figura 4.67 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito	134
Figura 4.68 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito	134
Figura 4.69 - Análises metalográficas - Ponta do punção	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Requisitos do lubrificante de ferramenta.....	27
Tabela 2.2 - Dureza dos óxidos de aço	55
Tabela 3.1 - Dureza do material base	73
Tabela 3.2 - Combinações do delineamento de experimento	74
Tabela 3.3 - Composição química do material soldado.....	75
Tabela 3.4 - Composição química do material soldado.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Parâmetros utilizados para realizar a solda número 1	75
Quadro 3.2 - Parâmetros do processo utilizados para realizar a solda número 2.....	76
Quadro 3.3 - Parâmetros do processo de nitretação	78
Quadro 3.4 - Dados dos punções utilizados	81
Quadro 4.1 - Análise de variância do desgaste do punção	85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Corpo de prova 1: Região lateral, raio e ponta do punção.....	94
Gráfico 4.2 - Corpo de prova 2: Região lateral, raio e ponta do punção.....	98
Gráfico 4.3 - Corpo de prova 3: Região lateral, raio e ponta do punção.....	101
Gráfico 4.4 - Corpo de prova 4: Região lateral, raio e ponta do punção.....	105
Gráfico 4.5 - Ferramenta 1: Região lateral, raio e ponta do punção.....	109
Gráfico 4.6 - Ferramenta 2: Região lateral, raio e ponta do punção.....	112
Gráfico 4.7 - Ferramenta 3: Região lateral, raio e ponta do punção.....	116
Gráfico 4.8 - Ferramenta 4: Região lateral, raio e ponta do punção.....	121
Gráfico 4.9 - Ferramenta 5: Região lateral, raio e ponta do punção.....	125
Gráfico 4.10 - Ferramenta 6: Região lateral, raio e ponta do punção.....	128
Gráfico 4.11 - Ferramenta 7: Região lateral, raio e ponta do punção.....	132
Gráfico 4.12 - Ferramenta 8: Região lateral, raio e ponta do punção.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DIN	Deutsches Institut für Normung (Norma Alemã)
GPM	Golpes por minuto
PVD	Physical Vapour Deposition
2 D	2 Dimensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivo Geral	21
1.2	Objetivos Específicos	21
1.3	Estrutura do Trabalho	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Tribologia	23
2.2	Lubrificação	26
2.3	Tratamento Superficiais	30
2.3.1	Nitretação	30
2.3.2	PVD - Physical Vapor Deposition	38
2.3.2.1	Deposição a vácuo	39
2.3.2.2	Deposição a vácuo	40
2.3.2.3	Deposição por arco vapor	42
2.3.2.4	Deposição por vapor de íons.....	43
2.4	Principais Falhas de Ferramenta para Forjamento	44
2.4.1	Desgaste abrasivo	48
2.4.2	Desgaste adesivo	51
2.4.3	Oxidação	53
2.4.4	Trinca por fadiga mecânica	57
2.4.5	Fadiga térmica ou termomecânica	60
2.4.6	Deformação plástica	67
3	MATERIAIS E MÉTODOS	71
3.1	Escolha da Ferramenta	71
3.2	Preparação das Ferramentas	73
3.2.1	Atividades posteriores à soldagem	77
3.2	Medição do Desgaste	79
3.3	Simulação de Forjamento	81
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	85
4.1	Análise Estatística	85
4.2	Ensaio Metalográfico	90

4.2.1	Análise dos corpos de prova.....	91
4.2.2	Análise metalográfica das ferramentas utilizadas.....	106
5	CONCLUSÕES.....	137
	REFERÊNCIAS	139

1 INTRODUÇÃO

O forjamento a quente é um dos processos mais antigos que o homem conhece, utiliza e tem desenvolvido ao longo de sua história.

Um dos temas mais estudados acadêmica e industrialmente é a melhoria do desempenho das ferramentas utilizadas para o forjamento a quente, como por exemplo, pelo emprego de novos materiais para a fabricação das matrizes e para seu revestimento superficial, que sejam capazes de suportar as altas temperaturas inerentes a esse processo.

Atualmente, a vida das ferramentas de forjamento a quente é uma importante variável, componente do custo final dos produtos forjados, pois ferramentas com baixo desempenho em termos de vida geram horas de máquinas paradas, ineficiência, refugos, entre outras perdas durante o processo.

Com a alta competitividade nesse ramo industrial, a incansável busca pela redução de custos e pela menor geração de resíduos para o meio ambiente e por melhores condições de trabalho para os operadores, este processo tornou-se tema para diversos estudos nos campos acadêmico e industrial.

A escolha da ferramenta para este estudo não foi para a melhoria especificamente desta ferramenta, mas sim estudar os mecanismos de degradação desta ferramenta e aplicar os conhecimentos em ferramentas de geometria de construção mais complexa. Fatores como vida baixa, tamanho e peso e baixo custo contribuíram para a escolha desta ferramenta denominada “punção”.

Assim, os mecanismos de degradação relacionados com o desgaste por abrasão, por adesão e por oxidação, bem como as trincas por fadiga térmica e as trincas por fadiga mecânica, entre outros, são estudados neste trabalho para um melhor entendimento das causas que levam à redução da vida das matrizes de forjamento a quente.

Tendo como referência principal a obra de Gronostajski *et al.* (2014), estudam-se os diversos mecanismos de degradação que ocorrem no processo de forjamento. Outros trabalhos como o de Behrens *et al.* (2014) e de outros autores são citados ao longo deste trabalho por avaliarem os mecanismos de degradação que ocorrem especificamente no forjamento a quente.

Tão importante quanto estudar e entender os mecanismos de degradação que ocorrem nas ferramentas de forjamento a quente, é conhecer os processos atualmente disponíveis para

a redução do desgaste das ferramentas e assim, elevar sua vida útil. Dentre esses processos, neste trabalho foram aplicados e avaliados a nitretação, a soldagem e a deposição física de vapor ou PVD (do inglês Physical Vapour Deposition).

Este estudo teve como proposta avaliar a reutilização de uma ferramenta de forjamento a quente pela sua recuperação parcial com solda e revestimento superficial com os processos citados anteriormente, visando um melhor aproveitamento da ferramenta e consequente redução de custos no processo de forjamento.

O desempenho de cada procedimento de recuperação da ferramenta foi controlado pelo processo de varredura (do inglês scanning) dos resultados de desgaste em cada condição da ferramenta e, para tanto, foi utilizada a ferramenta estatística de análise de variância para determinar a combinação de processo de soldagem e de revestimento que apresentou o menor desgaste e consequentemente, o melhor desempenho.

1.1 Objetivo Geral

Este estudo teve como objetivo avaliar a reutilização de uma ferramenta de forjamento a quente pela sua recuperação parcial com solda e revestimento superficial com os processos citados anteriormente, visando um melhor aproveitamento da ferramenta e consequente redução de custos no processo de forjamento.

1.2 Objetivos Específicos

Avaliar o desempenho de cada combinação de solda com tratamentos superficiais utilizados;

Avaliar os mecanismos de desgaste decorrentes da utilização da ferramenta com os diferentes processos de fabricação.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado em quatro capítulos, contemplando o conteúdo conforme descrito a seguir:

Capítulo 1 – Contextualização do tema, objetivo geral e objetivos específicos;

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica, abordando conceitos e teorias sobre os modos de falhas que ocorrem nas ferramentas para o processo de forjamento a quente;

Capítulo 3 – Materiais e métodos, desdobrando-se na escolha da ferramenta e a preparação das ferramentas;

Capítulo 4 – Apresentação e análise de resultados, avaliando os resultados obtidos do procedimento experimental;

Capítulo 5 – Conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado à fundamentação teórica utilizada para a elaboração do procedimento experimental realizado neste trabalho.

2.1 Tribologia

Behrens e Mielke *et al.* (2014), fazem menção da DIN 50323-1 sobre a tribologia que é a ciência e engenharia da interação das superfícies em movimento relativo. Isto inclui o estudo e aplicação dos princípios do atrito, o processo de desgaste, lubrificação e também a interação correspondente dos limites superficiais entre os corpos sólidos, líquidos e entre os gases, todos estes componentes e suas propriedades envolvidas durante o carregamento tribológico são referidos como sistema tribológico ou tribosistema.

A tribologia é muito importante durante o processo de forjamento considerando a vida de ferramenta em operação e a demanda de energia, considerando que o forjamento ocorra a temperaturas acima de 1000°C, onde causa atrito intenso. Da perspectiva termodinâmica, todo o processo que ocorre atrito a maior parte da energia se transforma em calor que se dissipa para o meio ambiente, o processo é irreversível e representa uma grande perda. O processo de forjamento a quente ocorre em altas temperaturas para que seja reduzida a força e aumentada a deformação, porem processos nesta temperatura aumentam a força de atrito em até 300 %, conseqüentemente a energia requerida para o processo aumenta e este alto nível de energia e o atrito resulta em um aumento da pressão exercida sobre a ferramenta, além destas mudanças podem ocorrer nas propriedades mecânicas e sua distribuição na ferramenta.

Para Behrens, Mielke *et al.* (2014), as cargas podem ser subdivididas em quatro tipos conforme abaixo e normalmente elas ocorrem combinadas e levam a falha da ferramenta:

- Carga térmica;
- Carga mecânica;
- Carga química;
- Carga tribológica.

a) Cargas térmicas

Durante o processo de forjamento a quente ou a morno, um campo de temperatura de grande variação ocorre na ferramenta. Durante o tempo de contato a ferramenta aumenta sua temperatura em mais de 700°C na região próxima da superfície. A temperatura de recozimento é excedida nesta região e conseqüentemente a resistência mecânica diminui. Após o forjamento, com a retirada do produto, a região aquecida é absorvida à uma taxa de resfriamento que expõe a ferramenta em altas flutuações de temperatura.

Considerando a pressão, durante o tempo de contato, variações ocorrem, entre outros fatores importantes que influenciam nas tensões térmicas incluindo a temperatura do produto forjado, a condutividade térmica do aço ferramenta, também qualquer camada adicional intermediária.

Com a ajuda dos lubrificantes e refrigerantes a ferramenta é privada de uma grande proporção de energia térmica. Isto previne a redução das propriedades mecânicas e o desgaste da ferramenta. É resultado das tensões do ciclo térmico e a variação da temperatura local na ferramenta, tensões da ferramenta e mais tarde em trincas devido as flutuações térmicas.

A temperatura base que também é a média da temperatura da ferramenta, é o equilíbrio de energia introduzido na ferramenta em cada ciclo de trabalho entre as operações de forjamento pela condução de calor e a quantidade de calor que é removida pelo resfriamento. Este equilíbrio também depende da temperatura inicial, tempo de contato e especialmente é influenciado pelo tempo de espera de uma peça para outra, outro ponto a ferramenta inferior tem mais tempo de contato com o produto durante o forjamento. A temperatura em regiões próximas a superfícies durante o forjamento é influenciada por diversos fatores:

- Temperatura da peça a ser forjada;
- Lubrificante;
- Pressão de contato;
- Tempo de contato e;
- O movimento relativo entre a peça forjada e a ferramenta.

A flutuação térmica aumenta devido a constante mudanças entre alguns milissegundos de continuo e abrupto aquecimento da área durante o tempo de contato e subsequente resfriamento rápido relacionado a base do material fria abaixo da zona aquecida (BEHRENS; MIELKE; *et al.*, 2014).

b) Cargas mecânicas

Durante o processo de forjamento, as máquinas de forjamento fornecem trabalho para a peça em forma de energia. Esta energia é usada para ultrapassar a resistência a deformação do material inicial e manter a formação do produto. Isto resulta em altas pressões e tensões que também resulta em tensões mecânicas na ferramenta.

Existem altas tensões na superfície da ferramenta e estas tensões dependem da geometria da ferramenta. A tensão pode resultar em uma deformação plástica na ferramenta. Ela aumenta conforme ocorre o preenchimento da gravura e atinge o máximo no final da deformação como resultado do aumento da pressão.

Além de tensões puramente mecânicas tensões térmicas também podem ocorrer. Para reduzir as tensões mecânicas e térmicas a geometria da ferramenta e as propriedades do aço ferramenta como a expansão térmica, condutividade térmica e a estrutura da ferramenta devem ser levados em consideração (BEHRENS; MIELKE; *et al.*, 2014).

c) Cargas químicas

As altas temperaturas de forjamento também resultam em um aumento das reações químicas entre as superfícies da ferramenta o produto forjado. Os tipos de tensões químicas são por aditivos de lubrificantes incluindo processos de oxidação também reações químicas da superfície da ferramenta com a camada intermediária (BEHRENS; MIELKE; *et al.*, 2014).

d) Cargas tribológicas

O termo carga tribológica se refere à carga a que é submetido um corpo sólido pelo contato e movimento relativo com um outro corpo sólido, líquido ou gasoso. O contato e o movimento relativo que ocorre entre a superfície da ferramenta e a peça forjada a quente durante o processo são responsáveis pela carga tribológica. As áreas de contato causam os mecanismos de desgaste que incluem a abrasão, adesão, corrosão e a remoção de pequenos fragmentos do material da ferramenta que geram o desgaste.

As razões para um sistema tribológico desfavorável durante o forjamento a morno ou a quente em contraste para outros métodos de conformação do metal são os seguintes:

1 - A pressão de contato que ocorre durante o forjamento é muito alta, devido a tensão de escoamento do material a ser forjado deve ser alcançado, além de que tensões hidrostáticas devido a geometria ocorrem na ferramenta.

2- As carepas se desenvolvem sobre a superfície quando a peça ainda não forjada é aquecida até atingir a temperatura de forjamento, ela é muito dura e quebradiça que resulta em

desgaste abrasivo na superfície da ferramenta devido ao movimento relativo durante o forjamento entre a peça e a ferramenta.

3- A temperatura na área de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho é entre 600 e 900°C, nestas temperaturas ocorre a redução da resistência ao desgaste da ferramenta melhorando o processo adesivo.

A carga térmica é significativamente aumentada pelo material aquecido que vem de dentro do produto para a superfície durante o forjamento (BEHRENS; MIELKE; *et al.*, 2014).

2.2 Lubrificação

De acordo com Behrens e Mielke *et al.* (2014), a lubrificação é uma proteção passiva nas ferramentas, que contribuem para a redução do desgaste durante o processo de forjamento. Isto significa a aplicação de um lubrificante na ferramenta entre os vários ciclos de forjamento ou antes do processo se iniciar. Os lubrificantes se diferem principalmente pela sua composição e aplicação. Ele é escolhido baseado no processo de forjamento. No processo de forjamento a quente os lubrificantes líquidos são os mais utilizados.

Uma significativa contribuição para o aumento da vida da ferramenta de forjamento ocorre pela tecnologia de lubrificação pela melhoria das condições tribológicas na superfície da ferramenta. A lubrificação da ferramenta normalmente ocorre imediatamente na sequência da refrigeração.

Para aumentar a vida da ferramenta, uma decisão deve ser feita seguindo os parâmetros:

- Selecionar o tipo de lubrificante;
- Aplicar o lubrificante na ferramenta;
- Refrigerar a ferramenta.

O lubrificante tem diferentes funções durante o forjamento. Sua principal função é obter boa separação das superfícies em deslizamento para a redução do desgaste e atrito na ferramenta, além de refrigerar a ferramenta. Os requisitos mais comuns de um lubrificante são resumidos na Tabela 2.1.

Tabela 0.1 - Requisitos do lubrificante de ferramenta
 Fonte: Adaptado de Beherens *et al.* (2014, p. 221)

REQUISITOS DO LUBRIFICANTE DE FERRAMENTA		
Fatores que causam a redução do desgaste da ferramenta	Propriedades para o processo de produção	Mais requisitos
Separação dos defeitos	Uniformidade da espessura fina do lubrificante	Nenhuma reação química com a superfície da ferramenta e peça
Redução do atrito	Boa dispersão	Estabilidade térmica
Efeito de resfriamento	Baixo resíduo	Segurança e saúde
Redução da transferência de calor	Boa adesão	Economia
Efeito de sopragem	Boa molhabilidade	

Boas propriedades de lubrificantes são importantes para manter o escoamento do material e o preenchimento total da ferramenta, resumindo desgaste de ferramenta, pressão superficial e deformação da ferramenta podem ser reduzidas. Uma camada uniforme e fina de lubrificante tem efeito positivo reduzindo as forças de retirada da peça da ferramenta e minimiza travamentos da peça na ferramenta. A temperatura da ferramenta no processo de forjamento é em torno de 250°C ou mais, para reduzir o atrito uma refrigeração adequada é essencial devido as altas tensões térmicas isto aumenta a vida de ferramenta (BEHRENS; MIELKE; *et al.*, 2014).

Lubrificantes para ferramentas consistem em três principais componentes:

- Sólidos - É o principal componente do lubrificante solúvel em água, ele também pode ser aplicado sobre condições extremas. Eles diferem de acordo com o tipo o tamanho da partícula e a concentração;
- Lubrificantes - É utilizado para dispersar o lubrificante sólido, a reação do lubrificante depende da temperatura da superfície da ferramenta;
- Aditivos – Garantem a função da lubrificação da ferramenta, porque suportam ambos a dispersabilidade dos sólidos e a molhabilidade. Os aditivos são bactericidas, dispersantes, espessantes, aglomerantes.

No processo de forjamento vários métodos têm sido avaliados para se aplicar corretamente a lubrificação e refrigeração nas ferramentas para se evitar lubrificação excessiva nas áreas com alta capacidade de refrigeração. Durante a refrigeração da ferramenta um fator importante é a energia térmica extraída por unidade de tempo e área. Isto é definido pela densidade de fluxo de calor. Os parâmetros são determinados pela capacidade de refrigeração e o coeficiente de transferência de calor que define a influência do material, propriedades do refrigerante e as características de refrigeração média. O coeficiente térmico

define a relação entre a densidade de fluxo de calor, a superfície da ferramenta e o gradiente de temperatura do fluido refrigerante.

Existem três fases durante a dissipação de calor para a formação do filme:

- Convecção livre;
- Evaporação da bolha;
- Formação do filme.

Num primeiro momento, existe um fluxo de calor durante a convecção livre devido a diferença de temperatura. A segunda fase o coeficiente de condutividade térmica aumenta devido as bolhas que se formam. Essas bolhas aumentam a agitação da água, a assim tem-se a evaporação da bolha, que ocorre entre 106 e 130°C a densidade máxima de fluxo de calor é atingida. Este é o ponto de queima, neste ponto que o filme de grafite começa a se desenvolver e dependendo da temperatura a formação do filme se torna estável ou instável. O filme de grafite é interrompido pela agitação da água a temperatura acima de 200°C e torna a formação do filme instável. A formação do filme de grafite estável ocorre a temperaturas abaixo de 200°C (Temperatura de Leidenfrost). Com a formação do filme instável, o fluxo de calor é interrompido e conseqüentemente ocorre a redução da densidade do fluxo de calor que ocorre apenas por radiação (BEHRENS; MIELKE; *et al.*, 2014).

Na Figura 2.1, se representa as variações de temperatura de um ciclo de forjamento.

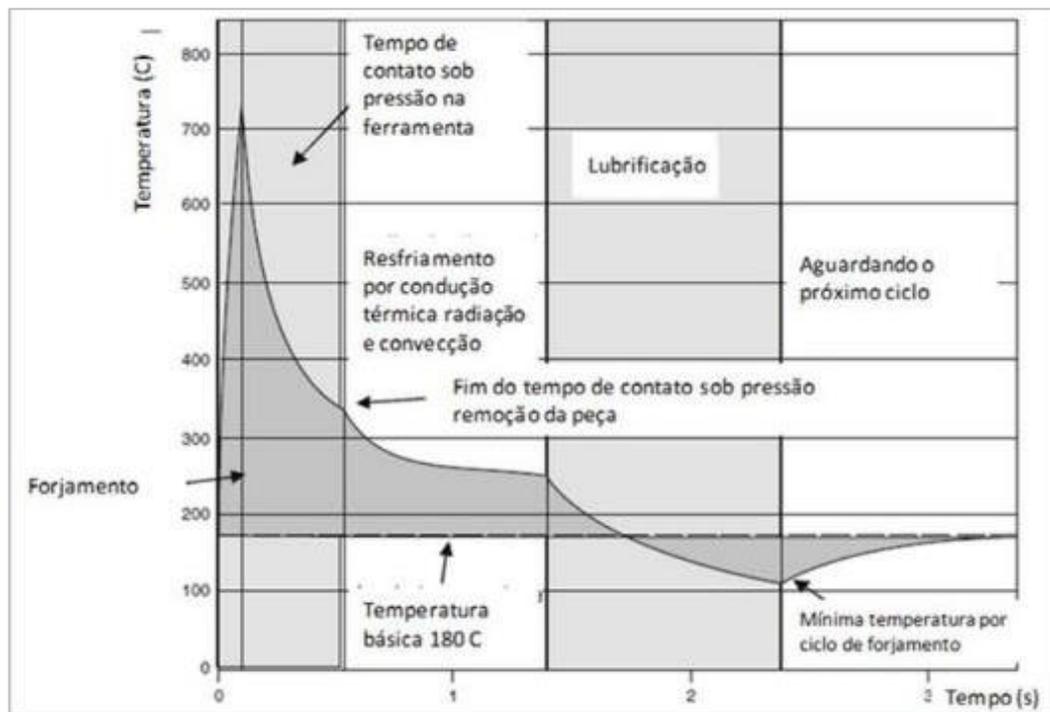


Figura 0.1 - Temperatura da ferramenta durante um ciclo de forjamento
Fonte: Behrens *et al.* (2014, p. 213)

Para Yang e Shivpuri (2006), no processo de forjamento as ferramentas são lubrificadas e refrigeradas por aspersão de lubrificantes diluídos em água sobre as superfícies quentes da ferramenta. Esta aspersão é produzida pela atomização do lubrificante em pequenas gotas usando dispositivos com ar pressurizado. O Lubrificante são normalmente finas partículas de grafite suspensas em água com aditivos que ajudam na formação e aderência do filme de grafite. O fenômeno da aspersão, a dispersão e a formação do filme são pouco entendidos, o lubrificante é normalmente aplicado em grandes quantidades que gera o resfriamento excessivo da superfície da ferramenta e excesso de grafite na cavidade e em sua atmosfera.

De acordo com Yang e Shivpuri (2006), alguns fatores são responsáveis pela deposição do grafite e podem ser categorizados em três grupos:

- Superfície da ferramenta quente: Temperatura inicial da superfície; rugosidade; geometria; tratamentos superficiais;
- Propriedades dos lubrificantes: Tensão superficial e viscosidade;
- Características da aspersão: Tamanho da gotícula; velocidade da gotícula; taxa de diluição e aspersão (cone; ângulo e bico altura).

A Figura 2.2 exemplifica a refrigeração da superfície da ferramenta.

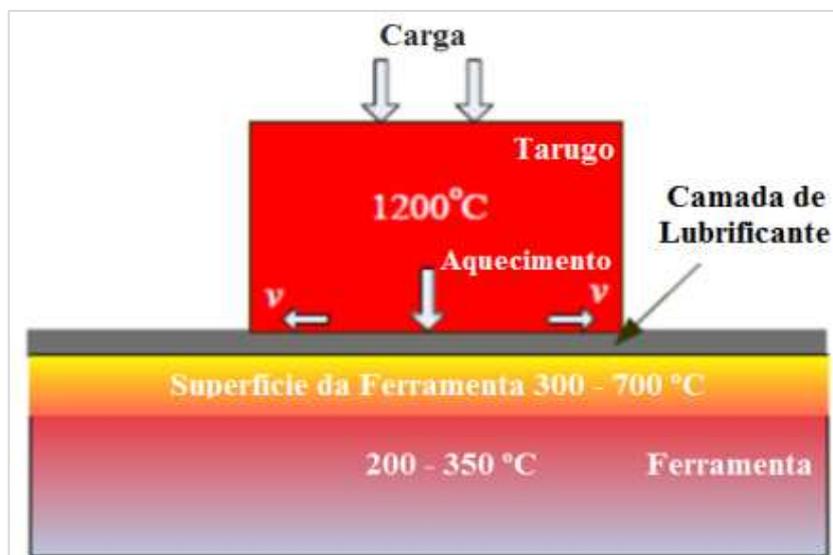


Figura 0.2 - Camada de lubrificante durante o forjamento incluindo a transferência de calor

Fonte: Yang e Shivpuri (2006, p. 2)

As funções de um filme lubrificante durante o forjamento a quente, reduzem o atrito entre a ferramenta e o metal em deformação, onde ocorre o desgaste do metal quente e da superfície do metal quente do produto forjado e da superfície da ferramenta que está mais fria facilitando assim, a extração da peça (YANG; SHIVPURI, 2006).

2.3 Tratamento Superficiais

De acordo com Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999), a engenharia da superfície em ferramentas, é um conjunto de técnicas e processos utilizado para modificar e garantir as propriedades superficiais, atribuindo maior resistência ao desgaste, corrosão e fadiga térmica. Estas técnicas não modificam o interior das ferramentas, sendo que, tais alterações ocorrem apenas na superfície da ferramenta.

Alguns exemplos de tipos de tratamentos superficiais, encontram-se descritos a seguir:

- Cementação;
- Nitretação;
- Carbonitretação;
- PVD;
- CVD;
- Soldagem superficial;
- Compósitos.

Além destes tipos de tratamentos superficiais, existem muitos outros, entretanto, para este trabalho, será apresentado apenas os processos de Nitretação e PVD.

2.3.1 Nitretação

A nitretação é um processo ferrítico termoquímico de difusão do nitrogênio na superfície dos aços e ferros fundidos. Esta difusão é baseada na solubilidade do nitrogênio no ferro (PYE, 2003).

A Figura 2.3 demonstra o diagrama de equilíbrio nitrogênio – aço.

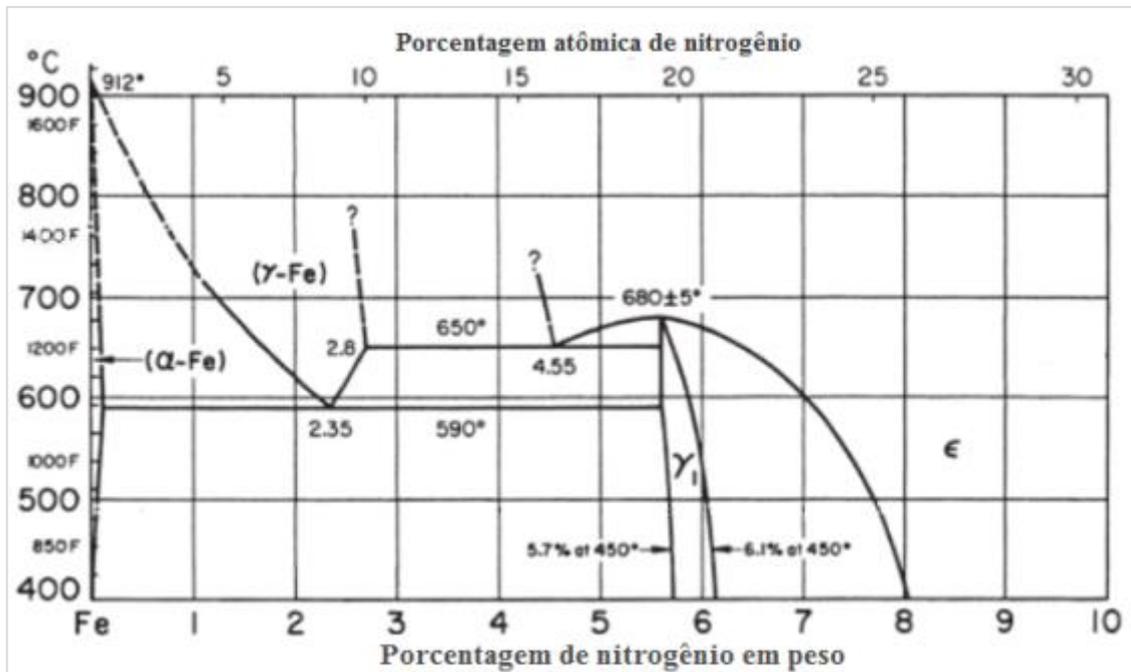


Figura 0.3 - Diagrama de equilíbrio ferro e nitrogênio

Fonte: Pye (2003)

O limite de solubilidade do nitrogênio no aço depende da temperatura, para a temperatura de 450°C o aço base absorverá de 5,7 a 6,1% de nitrogênio. Além deste valor a formação de fase superficial no aço tende a ser a fase (ϵ) épsilon. Esta fase é muito influenciada pela quantidade de carbono no aço, quanto maior a quantidade de carbono no aço maior será o potencial da fase a formar. Conforme aumenta a temperatura (490°C) a fase gama primária (γ') aparece, porém na temperatura de 680°C a solubilidade do nitrogênio começa a diminuir. O diagrama de equilíbrio mostra que o controle da difusão do nitrogênio é crítico para o processo (PYE, 2003).

O processo de nitretação não requer mudança de fase como da ferrita para a austenita ou da ferrita para a martensita em outras palavras o aço mantém a fase ferrita ou cementita dependendo da composição da liga.

O número de operações do processo e parâmetros devem ser controlados para garantir o sucesso no processo de nitretação. A maioria destes parâmetros podem ser controlados com instrumentação simples e métodos de trabalho. Se descreve a seguir, os parâmetros de processo para a nitretação a gás:

- Temperatura do forno;
- Tempo;

- Fluxo do gás;
- Controle de ativação do gás;
- Manutenção do processo na câmara.

Estes fatores contribuem para a redução da distorção do processo com exceção a tensão residual superficial. Outro benefício atua como um processo de estabilização, pois proporciona um revenimento adicional ao material processado.

Os controles dos parâmetros do processo são necessários para garantir a formação de uma aceitável estrutura metalúrgica. Sem controle a repetibilidade metalúrgica do processo não é garantida (PYE, 2003).

Os fatores de controle do processo são aqueles que irão garantir resultados aceitáveis.

- Total superfície a ser nitretada;
- Pressão interna do processo e câmara selada;
- Pressão de entrada do gás na câmara selada;
- Exaustão do gás na câmara selada;
- Controle do pré-aquecimento antes da nitretação;
- Qualidade e integridade da superfície do aço pré-limpeza antes da nitretação;
- Consistência química do aço para maximizar a nitretabilidade (PYE, 2003).

De acordo com Spies e Dalke (2014), a principal função da nitretação consiste na formação de camadas para uma estrutura definida. Baseado nisto a nitretabilidade pode ser definida como a resposta de um aço material nitretado caracterizado pela mudança na estrutura do material e em sua liga dependendo das condições de nitretação.

Baseado na definição de nitretabilidade, a validação da especificação da estrutura dos casos de nitretação devem ser avaliados como único. A caracterização da estrutura tem sido estabelecida por análise metalográfica, métodos micro analíticos e medições de dureza. Portanto, a dureza não é uma propriedade, mas sim, um indicador da mudança estrutural do material.

A nitretação tem sido usada na indústria por um longo tempo e uma grande melhoria na resistência ao desgaste, corrosão e resistência mecânica tem proporcionado. Comparado com outras tecnologias de engenharia da superfície ela é caracterizada pela inigualável variedade de aplicação baseado na grande quantidade de aços. A grande maioria dos aços são nitretados desde um aço fundido como um aço com baixa liga, alta liga, aço inoxidável e aços de alta liga produzidos por metalurgia do pó.

A nitretação na indústria atual é feita com uma faixa de temperatura de 400 a 650°C, mas preferencialmente é feito entre 500 a 590°C que é uma temperatura abaixo da linha Ac1 do diagrama nitrogênio aço, também conhecida como nitretação ferrítica. A linha Ac1 do diagrama nitrogênio aço pode ser considerado um valor de orientação. Dependendo da composição química do material esta linha pode ser alterada consideravelmente deste valor. Se for ultrapassada a linha Ac1 se formara a estrutura austenítica, portanto a estrutura será composta por austenita e nitrogênio isto resulta em camadas mais frágeis como martensita, bainita, austenita retida e outras que podem acontecer durante o resfriamento dependendo das condições que ocorre.

A Figura 2.4, mostra a camada de nitretação que pode ser formada, ela indica um aço ligado com outro com baixa liga respectivamente. Nesta figura é possível notar a camada branca que pode ser distinta da camada de difusão (SPIES; DALKE, 2014).

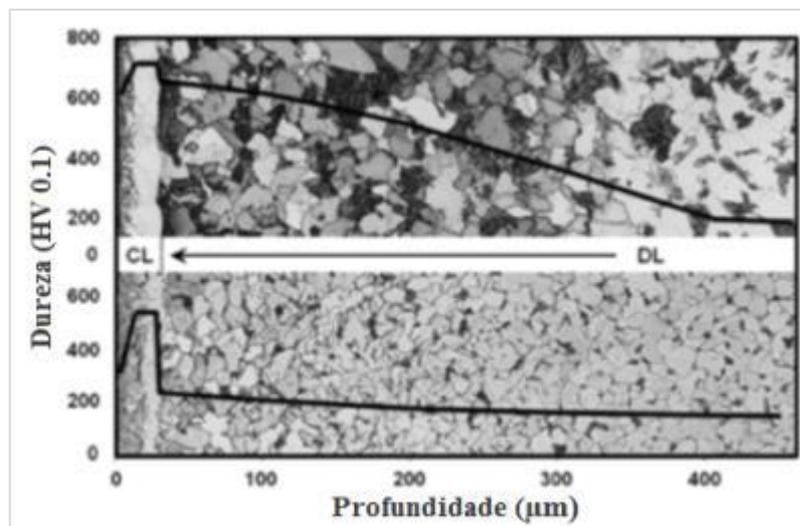


Figura 0.4 - Camada de Nitretação
Fonte: Spies e Dalke (2014, p. 440)

Ainda em Spies e Dalke (2014), a precipitação de nitretos e a supersaturação de nitretos na ferrita causa um aumento da dureza superficial e a geração de tensões residuais compressivas. A diferença entre os perfis de dureza do aço com baixa liga com o aço ligado é facilmente percebida na figura 2.4. As camadas formadas durante o processo de nitretação podem ser facilmente alteradas modificando as condições de nitretação.

A mudança da composição química e estrutural do material devido a nitretação causa modificações das propriedades químicas, mecânicas e físicas e também microformas geométricas na superfície do material.

A dureza da camada branca é definida pela quantidade, distribuição de poros e a sua fase estrutural. Em regiões livres de poros, a dureza pode atingir valores acima de 1200 HV, dependendo das condições de nitretação, composição química, condições de tratamento térmico do material base.

A relação entre a estrutura, as propriedades fundamentais e a performance de engenharia dos aços nitretados e é mostrado na Figura 2.5.

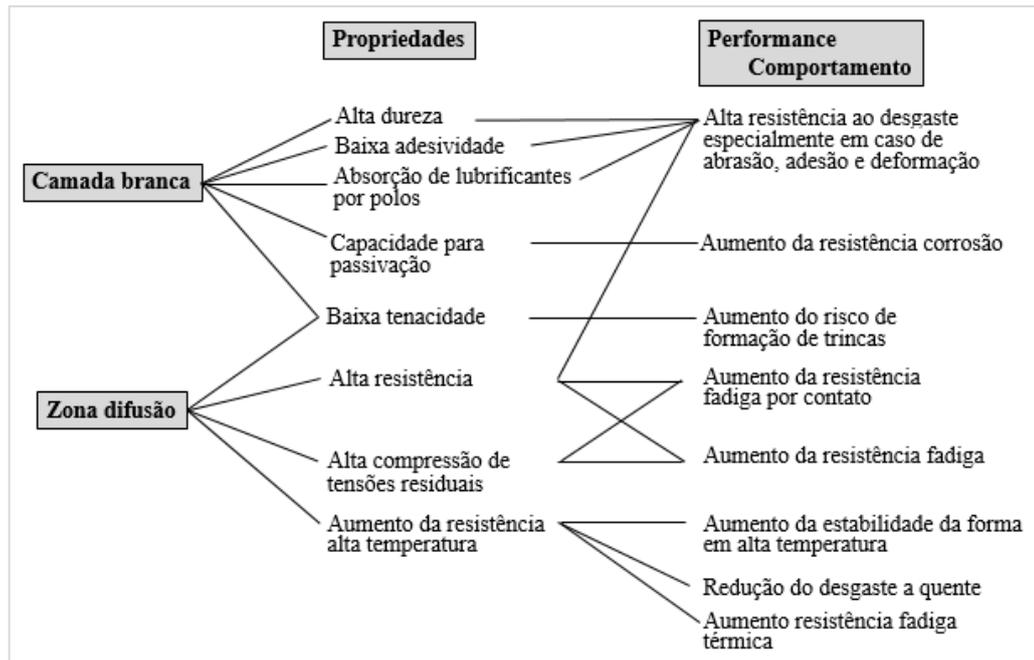


Figura 0.5 - Relação da estrutura, propriedades fundamentais e a performance de engenharia dos aços nitretados

Fonte: Spies e Dalke (2014, p. 454)

Pode ser visto que a sensibilidade dos aços nitretados para os ataques tribológicos, químicos e eletroquímicos são controlados principalmente pela camada branca. Por outro lado, os comportamentos sobre ciclos mecânicos e cargas térmicas dependem principalmente da camada de difusão. Obviamente que as características de desempenho como o comportamento do desgaste a iniciação de trincas comportamento sobre tensões mecânicas são definidas pela combinação da estrutura da camada branca e camada de difusão.

A alta dureza da camada branca e sua estrutura não metálica proporciona um aumento da resistência ao desgaste por abrasão e adesão. Tem sido provado que estruturas ϵ de nitretos tem maior resistência ao desgaste que γ' de nitretos devido a sua estrutura hexagonal e sua maior dureza.

Os aços nitretados podem ser acalmados e mostram um aumento a resistência contra soluções de sal, corrosão atmosférica e tribooxidação. Sua resistência a corrosão aumenta conforme a estrutura γ' de nitretos, ϵ de nitretos, ϵ de carbonitretos.

A precipitação de nitretos na camada de difusão causa aumento da resistência e formação de tensão residual. Através da nitretação é possível aumentar a resistência em profundidades > 0.5 mm em combinação com o aparecimento tensões residuais compressivas que aumentam significativamente resistência a fadiga e a resistência térmica (SPIES; DALKE, 2014).

Para Behrens *et al.* (2014), a nitretação é um dos métodos de tratamento superficial mais comuns usados em ferramentas de forjamento. Ela é baseada na difusão de nitrogênio atômico na superfície do aço. As reações químicas e o alojamento dos átomos de nitrogênio na estrutura cristalina aumentam a dureza superficial da ferramenta. Quanto maior o tempo de nitretação maior a profundidade da camada nitretada. Quanto maior a temperatura do processo de nitretação (a faixa de temperatura varia de 350 a 600°C) maior a profundidade que o nitrogênio pode penetrar no material com o mesmo tempo de processo. Normalmente a faixa de temperatura de nitretação varia em torno de 500 a 530°C. O aço sofre apenas uma pequena tensão térmica e nenhuma alteração estrutural é uma pequena distorção superficial de endurecimento do material.

A camada do aço nitretado pode ser dividido em duas. A camada externa que é relativamente homogênea se refere como camada branca e abaixo existe a zona de difusão que concentra a difusão do nitrogênio que conforme aumenta-se a profundidade a concentração de nitrogênio diminui. A camada superior que é próxima a superfície alcança espessura superiores de 30 μm e dependendo dos parâmetros de processo consiste em nitretos de aço que desenvolvem em duas diferentes fases que são ϵ - e γ fases. Aços nitretados na forma de Fe_2N e Fe_3N com estrutura cristalina hexagonal são referentes a ϵ - fase e resultam na camada superior. A estrutura Fe_4N (estrutura cristalina cubica de corpo centrado) é referente a γ fase ou camada de difusão. Outros nitretos podem ser desenvolvidos quando combinados com outras ligas, como o alumínio, cromo, titânio, molibdênio e vanádio. A camada branca para aços nitretados, possuem boa resistência química e tensões térmicas. Além de desenvolverem carbonitretos devido a incorporação de nitrogênio nos carbonetos de aço, juntos com o nitreto, ele resulta em uma superfície com maior resistência ao desgaste e termicamente estável, melhora também o atrito e aumenta a resistência a corrosão. A máxima dureza que pode ser atingida é aproximadamente 1200 HV e a profundidade pode ser maior que 1000 μm , devido ao alto tempo de processamento profundidades maiores que 300 μm são raramente usadas. A

dureza na zona de difusão pode alcançar até 1100 HV dependendo do material. Dependendo do material e a profundidade da camada nitretada, o tempo do processo de nitretação pode chegar até 160 horas (BEHRENS; *et al.*, 2014).

A Figura 2.6, ilustra a estrutura de um aço nitretado e a deposição de nitrogênio.

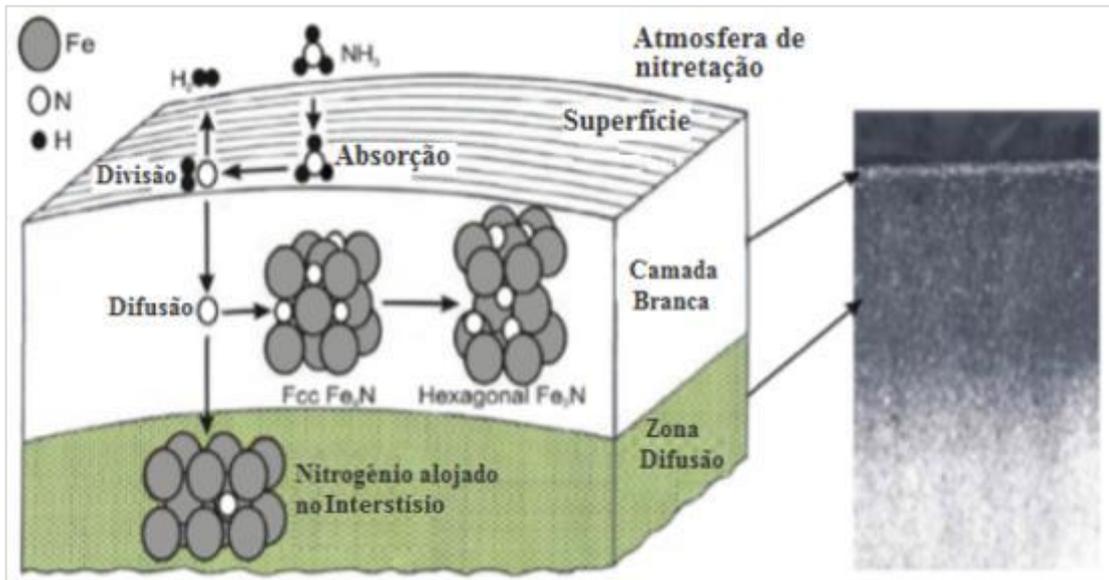


Figura 0.6 - Estrutura de um aço nitretado e a deposição de nitrogênio

Fonte: Behrens *et al.* (2014, p. 219)

As espessuras das camadas podem ser controladas pela correta seleção de materiais, tempo de nitretação e temperatura de nitretação. A concentração de nitrogênio e a correlação da diminuição da dureza da camada externa para a interna são de acordo com as leis da difusão, um fator chave que determina a dureza, espessura e a taxa de crescimento das camadas nitretadas e a formação dos elementos.

Os processos de nitretação mais comuns utilizados para ferramentas de forjamento são a nitretação banho de sal e a nitretação a gás, a nitretação a plasma também representa um dos processos de endurecimento superficial (BEHRENS; *et al.*, 2014).

Conforme Birol (2010a), testes são realizados para avaliar como a nitretação a plasma se comporta quando submetida a ciclos térmicos sucessivamente para isto, se confeccionam corpos de prova com o aço ferramenta (DIN 1.2365), o corpo de prova é submetido a nitretação a plasma onde, se obtém uma camada nitretada de aproximadamente 150 μm . Na sequência, o corpo de prova é submetido a ciclos térmicos que variaram de 450 a 750°C, para efeito de comparação, também é realizado o mesmo teste em um corpo de prova sem nitreto.

Nas experiências realizadas, os resultados indicaram que o corpo de prova nitretado falhou em oferecer qualquer melhoria na performance da fadiga térmica. O fator limitando

para a vida do corpo de prova nitretado foi a intensiva oxidação após algumas centenas de ciclos térmicos. O corpo de prova nitretado oxidou mais rapidamente que o corpo de prova sem nitreto, possivelmente devido aos defeitos gerados na superfície com a rápida difusão o que promove o rápido processo de oxidação. Outro problema seria a perda de dureza por revenimento que também ocorre como mecanismo de falha, a região endurecida pelo processo de nitretação a plasma foi totalmente eliminada. A estrutura martensítica revenida foi transformada em grãos ferríticos equiaxiais devido ao processo de recristalização durante os ciclos térmicos (BIROL, 2010a).

De acordo com Gangaraj *et al.* (2013), é avaliado o comportamento da nitretação em um material de alta resistência e baixa liga AISI 4340 o corpo de prova foi temperado e revenido, em seguida, o mesmo foi submetido a um severo jateamento (*shot peening*¹), o corpo de prova passou por um processo de nitretação de 7,5 horas em uma temperatura de 510°C, os resultados da microestrutura e a formação de camada, foram comparados com o processo industrial padrão de 15 horas de nitretação a 510°C, sem o jateamento.

Em experiências realizadas, os resultados apresentaram uma alteração na microestrutura, uma camada ultrafina de grãos foi gerada devido ao jateamento, esta estrutura facilitou a difusão de nitrogênio através da estrutura do material. Quando comparada a camada de difusão por 15 horas, a mesma é mais profunda que a com jateamento de 7.5 horas de nitretação. Isto porque o jateamento é capaz de refinar o grão apenas em uma determinada profundidade, não tendo efeito em região mais profunda do material.

Conforme Paschke *et al.* (2012), em um teste realizado, a nitretação a plasma em material para forjamento a quente (DIN 1.2343), cujos os parâmetros da nitretação foram a temperatura em duas faixas, a de 520 e 560°C com tempo de 16 horas, alterou também o percentual de nitrogênio 10 e 80%, fator de pulso $D = 0,17$ e $D = 0,25$ e pausa do pulso 100/300 e 100/500 /us. Na sequência, as ferramentas foram testadas em condições industriais e avaliadas quanto às suas condições com 750 e 1500 peças.

Os resultados apresentados indicaram que sobre altas cargas mecânicas e choques térmicos, que são as principais características do processo de forjamento a quente, as condições do processo de nitretação em diferentes condições, podem aumentar as condições da formação de trincas no aço ferramenta. O controle do processo de nitretação pela escolha correta dos parâmetros da concentração do nitrogênio e tempo de processo, são fatores

¹ *Shot Peening*: Processo industrial que visa induzir tensões de compressão de superfície em peças de metal, que são submetidos para aplicações repetidas de padrões de carga complexas, permitindo a modificação das propriedades mecânicas dos metais (SAE, 1997).

importantes. A temperatura de nitretação de 520°C, combinada com a baixa porcentagem de nitrogênio 10% e moderada intensidade do plasma $D = 0.17$, podem reduzir a formação de trincas significativamente (PASCHKE; *et al.*, 2012).

Como é possível notar, existem diversas formas de se utilizar o processo de nitretação para melhorias no processo de forjamento, bem como, outros processos em geral.

2.3.2 PVD - Physical Vapor Deposition

De acordo com Mattox (2010), o PVD (*Physical Vapor Deposition*), algumas vezes chamado de processos de filmes finos são processos de deposição atômica em que o material é vaporizado de uma fonte sólida ou líquida e em forma de átomo ou moléculas são transportados através de um ambiente a vácuo ou baixa pressão gasosa até o substrato onde é condensado.

O processo de PVD trabalha com espessura de filmes de alguns nanômetros até milhares de nanômetros.

As camadas podem ser feitas de forma de multicamadas alterando o material entre elas e também podem ser utilizados nas mais variadas formas de peça (MATTOX, 2010).

As principais categorias do processo de PVD são:

- Deposição a vácuo (evaporação a vácuo);
- Deposição por pulverização;
- Deposição por arco vapor;
- Deposição por vapor de íons.

As principais categorias do processo de PVD são demonstradas na Figura 2.7.

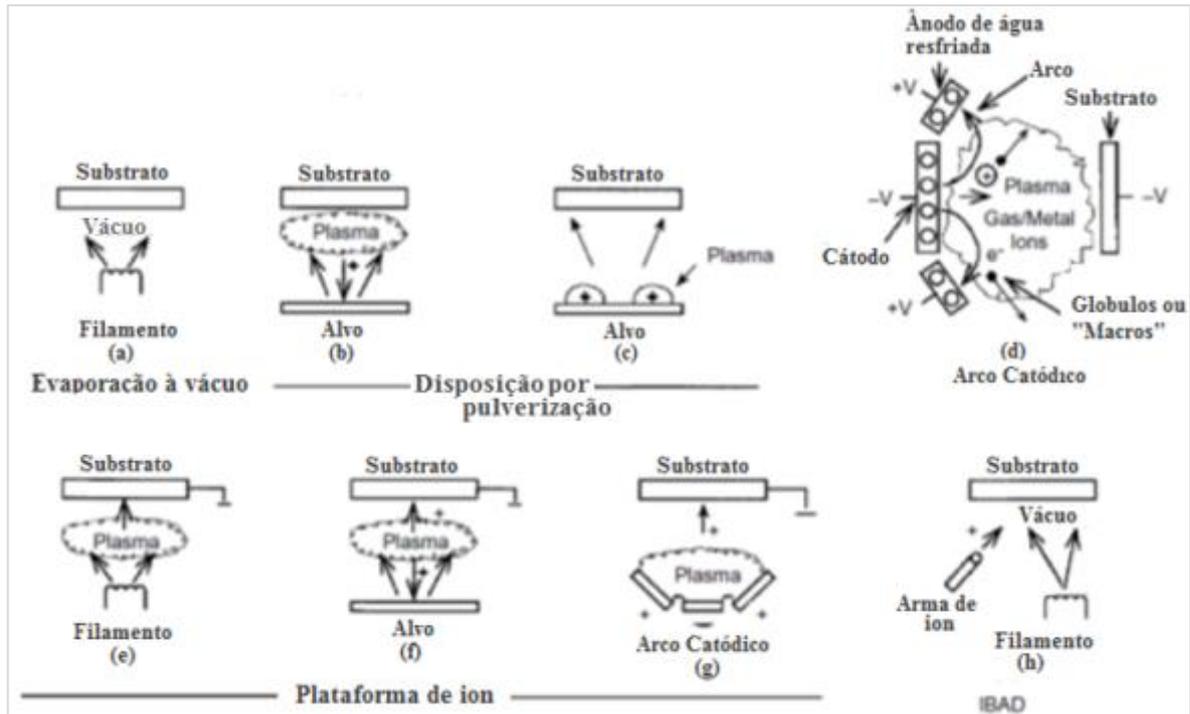


Figura 0.7 - Técnicas de processo de PVD
Fonte: Mattox (2010)

2.3.2.1 Deposição a vácuo

Conforme Mattox (2010), é o processo em que os átomos ou moléculas de uma fonte de vaporização térmica alcança o substrato sem colidir com moléculas de gás residual dentro do forno. O processo normalmente requer um vácuo melhor que 10^{-4} Torr para se ter um caminho livre de colisões. Nesta pressão, ainda existe uma grande quantidade de colisões sobre o substrato do indesejável gás residual que contamina o filme. Se a contaminação do filme é um problema, um alto vácuo 10^{-7} Torr ou ultra vácuo 10^{-9} Torr pode ser usado para produzir um filme com alto grau de pureza.

As principais variáveis na vaporização a vácuo são:

- Temperatura do substrato;
- Taxa de deposição;
- Meio do vácuo (pressão; tipo de gás);
- Ângulo de incidência de deposição do fluxo do átomo;
- Composição química e morfologia da superfície do substrato.

Vantagens em alguns casos:

- Linha de deposição permite o uso de mascarar para definir a áreas de deposição;
- Grandes fontes podem ser utilizadas para alguns materiais;
- Altas taxas de deposição podem ser obtidas;
- Monitoramento da taxa de deposição é relativamente fácil;
- As fontes de material para deposição são diversas, como pedaços, pó, arame;
- As fontes de material para vaporização são relativamente baratas;
- Filmes de alta pureza são facilmente depositados de fontes de material de alta pureza desde que o ambiente de deposição seja sem contaminação como é desejado;
- A técnica é relativamente barata comparada com outras técnicas de PVD.

Desvantagens em alguns casos:

- Baixa capacidade para depositar muitas ligas e compostos;
- Durante o processo altas cargas de calor radiante;
- Pobre utilização do material vaporizado;
- Poucas variáveis de processo disponíveis para controlar o filme (MATTOX, 2010).

2.3.2.2 Deposição a vácuo

De acordo com Mattox (2010), a deposição por pulverização é o processo que envolve a vaporização física (não térmica) dos átomos da superfície a transferência ocorre no momento do bombardeamento energético de partículas de tamanho atômico. Estas partículas energéticas são íons de material gasoso acelerado em um campo elétrico. Normalmente a distância da fonte para o substrato é pequena comparada com a deposição a vácuo. O processo pode ser realizado pelo bombardeamento energético de uma superfície sólida a vácuo utilizando uma arma de íons ou baixa pressão a plasma, onde as partículas pulverizadas sofrem pouco ou nenhuma colisão com os gases no caminho da deposição. Este processo também pode ser feito em alta pressão, onde partículas pulverizadas colidem com o gás antes de atingirem a superfície do substrato. O plasma usado na pulverização pode ficar confinado próximo da superfície de pulverização ou preencher a região entre fonte e o substrato. A fonte de pulverização pode ser um elemento, liga, mistura ou um composto.

Este processo possui variáveis que devem ser controladas para se obter reprodutibilidade do mesmo, sendo elas:

- Limpeza do substrato;
- Temperatura do substrato durante a deposição;
- Contaminação de gás permitida;
- Taxa de pulverização;
- Pressão de gás;
- Voltagem de pulverização;
- Uniformidade do plasma na pulverização;
- Geometria da peça;
- Condições de bombardeamento simultâneo sobre o crescimento do filme na superfície durante a deposição para deposição reativa;
- Densidade e uniformidade do gás reativo;
- Uniformidade para ativação do plasma.

As vantagens do sistema de pulverização catódica encontram-se descritas a seguir:

- Qualquer material pode sofrer o tratamento;
- O sistema permite uma estável fonte de vaporização;
- A pulverização é feita de uma superfície sólida e pode ser para cima baixo ou lados;
- Em algumas configurações a pulverização pode proporcionar pulverização de geometrias específicas;
- Existe pequena radiação de aquecimento se comparado ao processo de vaporização;
- No processo de deposição reativa, o material reativo pode ser ativado por plasma;
- Utilização da pulverização do material pode ser alta;
- A preparação da superfície é facilmente incorporada dentro do processo.

Do mesmo modo, as desvantagens do sistema de pulverização catódica encontram-se descritas a seguir:

- Em muitas configurações o padrão da ejeção da pulverização não é uniforme e especiais fixações, ferramentas ou geometria de fonte deve ser usado para depositar filmes com propriedades uniformes;
- A maioria da energia de pulverização vai para o aquecimento das fontes de material e estes devem ser refrigerados;

- As taxas de deposição são baixas comparadas com as taxas alcançadas pela vaporização térmica;
- A energia de pulverização não é eficiente;
- As fontes de material são caras;
- As fontes de pulverização, particularmente as de isolamento, são frágeis e fáceis de quebrar manualmente ou pelo aquecimento não uniforme;
- Utilização da fonte de material deve ser baixa;
- O aquecimento do substrato pelo bombardeamento dos elétrons deve ser alto em algumas configurações;
- Substratos e filmes devem ser bombardeados por ondas curtas de radiação e alta energia da partícula que são prejudiciais para sua performance;
- Gases contaminantes são ativados na pulverização a plasma e tornam-se mais efetivos em contaminação em filmes depositados;
- Quando se usa vapor químico as moléculas desassociam-se total ou parcial em plasma para gerar fuligem (MATTOX, 2010).

2.3.2.3 Deposição por arco vapor

Em Mattox (2010), este processo usa alta corrente e baixo arco de voltagem para vaporizar o eletrodo catódico ou o eletrodo anódico e depositar o material vaporizado no substrato. O material vaporizado é altamente ionizado e normalmente o substrato é tendenciado a acelerar os íons para a superfície do substrato.

As vantagens do processo de deposição por arco vapor encontram-se descritas a seguir:

- O processo proporciona maiores taxas de vaporização que a maioria das formas de pulverização, mas não tão maiores que as que podem ser obtidas pela vaporização térmica;
- A vaporização de superfícies sólidas permite fontes de arco catódico serem montadas em qualquer configuração;
- A baixa voltagem utilizada é um ponto positivo em termos de segurança (MATTOX, 2010).

2.3.2.4 Deposição por vapor de íons

De acordo com Mattox (2010), este processo utiliza bombardeamento corrente ou periódica deposição do filme, por partículas energéticas de tamanho atômico, para mudar ou controlar as propriedades da deposição do filme. Durante o processo a energia, o fluxo e a massa do tipo de bombardeamento com a taxa das partículas para a deposição são importantes variáveis do processo. As partículas energizadas normalmente usadas para o bombardeamento são íons de um gás inerte ou reativo, ou em alguns casos íons de uma condensação do material.

As principais vantagens são:

- Excelente cobertura sobre adequada condição;
- Facilidade na limpeza da superfície do substrato;
- Facilidade em obter boa adesão em muitos sistemas que são difíceis de obter;
- O equipamento é equivalente aos de deposição por pulverização;
- A fonte de deposição do material pode ser de vaporização térmica, pulverização, vaporização por arco;
- Garantia de um processo de deposição reativa – ativação dos gases reativos, reação química garantida por bombardeamento.

As principais desvantagens

- Muitos parâmetros do processo devem ser controlados;
- Contaminação é ativada por plasma e pode se transformar em importante variável do processo;
- Espécie do gás em bombardeamento pode ser incorporado na superfície do substrato e depositado no filme se alta energia de bombardeamento for utilizado;
- Aquecimento do substrato pode ser excessivo;
- Crescimento da tensão residual pode acontecer no filme (MATTOX, 2010).

De acordo com Dobrzański, Polok e Adamiak (2005), realizam-se testes de pino disco em material para forjamento a quente denominado X37CrMoV5-1, no qual, o aço é temperado e revenido e em seguida é realizado o tratamento termoquímico de PVD (CrN, TiN, TiN/(TiAl)N), durante o teste de pino disco foi variada a força aplicada (10 a 91 N) e também foi alterada a temperatura do teste (ambiente e 500°C).

Conclui-se então, que considerando as medições realizadas, o mais baixo desgaste sobre as condições de processo em ambas as temperaturas foi TiN monocamada, o que pode ter ligação com a boa aderência do substrato e com a mais alta dureza, por outro lado, o CrN monocamada demonstrou a pior resistência ao desgaste nas mesmas condições, muito provavelmente por causa da baixa dureza. Com relação ao TiN/(TiAl)N demonstrou um desgaste moderado (DOBRZAŃSKI; POLOK; ADAMIAK, 2005).

Em Birol e Isler (2011), se confeccionam corpos de prova onde o substrato é o aço para trabalho a quente DIN 1.2365 e se aplica PVD. As coberturas são AlTiN e AlTiON, o processo é por deposição a vapor. Com os corpos de prova prontos ele submete os mesmos a temperaturas de 450°C e 750°C para avaliar o comportamento sobre oxidação e a fadiga térmica do material. Ele nota que para oxidação a cobertura possui adequada proteção, porem para a fadiga térmica a cobertura falhou devido ao intenso revenimento que ocorre no substrato na ferramenta e a expansão térmica entre o aço ferramenta e as camadas nitretadas e oxi-nitretadas. Outro ponto foi uma ultradura camada sobre um substrato com menor dureza, sem obter suporte adequado.

2.4 Principais Falhas de Ferramenta para Forjamento

De acordo com Gronostajski *et al.* (2014), as ferramentas de forjamento representam a mais avançada técnica de forjamento usada na produção em massa de peças, o que traz vários benefícios, mas não evita inconvenientes, sendo o mais complexo, aquele associado à baixa durabilidade das ferramentas de forjamento a quente.

Os defeitos mais comuns que ocorrem no forjamento e que são causados pelo desgaste da ferramenta são os problemas de preenchimento das cavidades, como por exemplo a falta de preenchimento, as dobras, as rebarbas, as distorções geométricas, os sulcos, e as micro e macrotrincas.

A vida da ferramenta pode ser definida de diversas maneiras. Em termos de produção, a durabilidade de uma ferramenta é normalmente expressa pelo número de peças que podem ser produzidas com essa ferramenta, para obter produtos com a qualidade desejada. De acordo com esta definição, a durabilidade da ferramenta pode variar de 2000 a 20000 peças.

A durabilidade está associada com a degradação e assim é definida como a habilidade de suportar os fenômenos de degradação.

O grande número e variedade de tipos de degradação que influenciam a durabilidade das ferramentas, associados com o elevado número de fatores existentes durante o forjamento, tornam a análise dos problemas muito difícil (GRONOSTAJSKI; *et al.*, 2014).

De acordo com as estatísticas levantadas por diversos autores, as ferramentas são retiradas de serviço em proporção e motivos listados a seguir:

- 70% devido à perda de suas dimensões em função do desgaste abrasivo;
- 25% devido à deformação plástica;
- 5% devido à fadiga térmica e outros problemas (estrutural ou defeito do material, ou falha de aquecimento e de tratamento termomecânico).

Muitos destes fenômenos, normalmente ocorrem simultaneamente e a correlação entre eles depende, principalmente, do projeto da ferramenta, das condições em que ocorre o forjamento, do tratamento térmico da ferramenta, e da geometria da pré-forma ou tarugo.

Segundo Gronostajski *et al.*, (2014), durante o forjamento, as ferramentas são submetidas à ação de três mecanismos principais de degradação:

- Choques térmicos intensivos;
- Cargas mecânicas variáveis e cíclicas;
- Altas pressões em altas temperaturas.

Por outro lado, os mecanismos de degradação podem ser classificados como:

- Desgaste abrasivo;
- Fadiga termomecânica;
- Deformação plástica;
- Fadiga térmica;
- Desgaste adesivo;
- Oxidação.

A geometria da ferramenta determina o tempo de contato, a pressão, os caminhos que o material irá escoar, em função do atrito, e as mudanças de temperatura, todos diretamente relacionados com a taxa de ocorrência dos mecanismos de degradação.

A Figura 2.8 indica os locais da seção transversal de uma ferramenta de forjamento em que os mecanismos de degradação predominam.

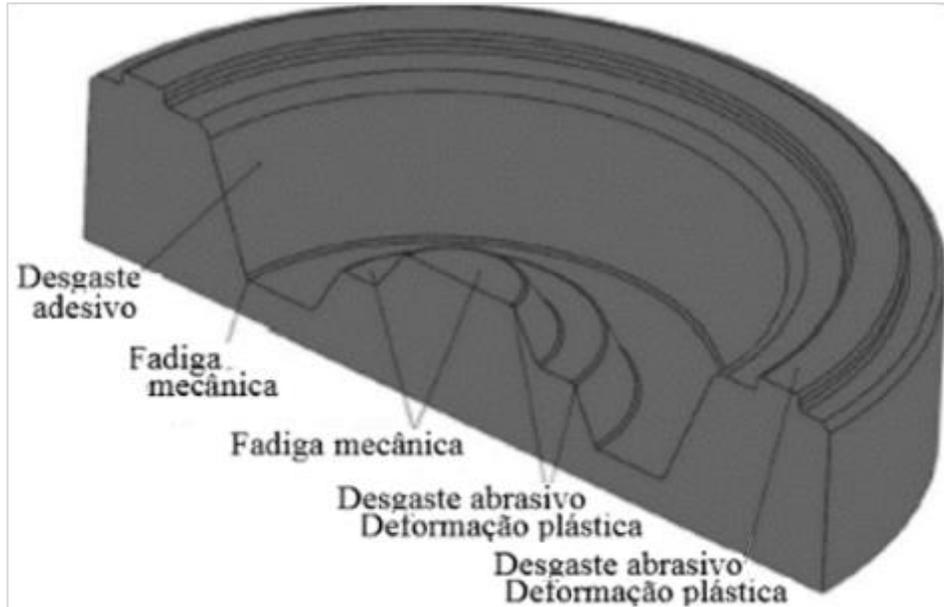


Figura 0.8 - Lugares e tipos de desgaste
 Fonte: Gronostajski *et al* (2014, p. 529)

As áreas planas, onde o tempo de contato entre o material quente e a ferramenta é mais longo, são áreas de grande pressão, e a fadiga termo mecânica é o mecanismo de degradação dominante.

Os raios internos são os lugares onde as tensões cíclicas ocorrem devido às cargas externas, aumentando conforme a peça é formada. Como resultado, micro trincas por fadiga se transformam em grandes trincas conforme se utiliza a ferramenta.

Os raios externos são regiões onde o material da ferramenta sofre altas temperaturas e sua tensão de escoamento é reduzida, resultando em deformação plástica.

O intenso escoamento do material forjado nessas áreas causa desgaste abrasivo que é intensificado por óxidos duros que atuam como material abrasivo e que são formados durante a oxidação das superfícies da ferramenta e do produto em alta temperatura (GRONOSTAJSKI; *et al.*, 2014).

De acordo com Behrens *et al.* (2014), interpreta-se na norma DIN 50323 que o desgaste é a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido como resultado de uma causa mecânica, por exemplo pelo contato e movimento relativo com a superfície de um outro corpo. O desgaste também pode ser definido como uma tensão tribológica. Segundo esses autores, os mecanismos de desgaste são classificados como:

- Desgaste adesivo;
- Desgaste abrasivo;

- Lascamento da superfície;
- Tribo-oxidação.

Os mecanismos de desgaste podem ocorrer simultaneamente ou separadamente, dependendo de outros fatores. No forjamento, o desgaste é o resultado de um sistema tribológico. Ele consiste de um corpo básico (ferramenta), um contra corpo (peça a ser forjada), uma camada intermediária e um meio circundante (BEHRENS; *et al.*, 2014).

Ainda segundo Behrens *et al.* (2014), a maior causa de desgaste é a perda de resistência mecânica. O desgaste ocorre em áreas em que grandes quantidades de material em alta velocidade, tocam um ao outro e ocorre transferência de calor, como por exemplo, nos cantos e bordas da gravura com raios convexos.

A Figura 2.9 apresenta os principais tipos de falhas em matrizes de forjamento a quente e a proporção encontradas industrialmente, entre elas.

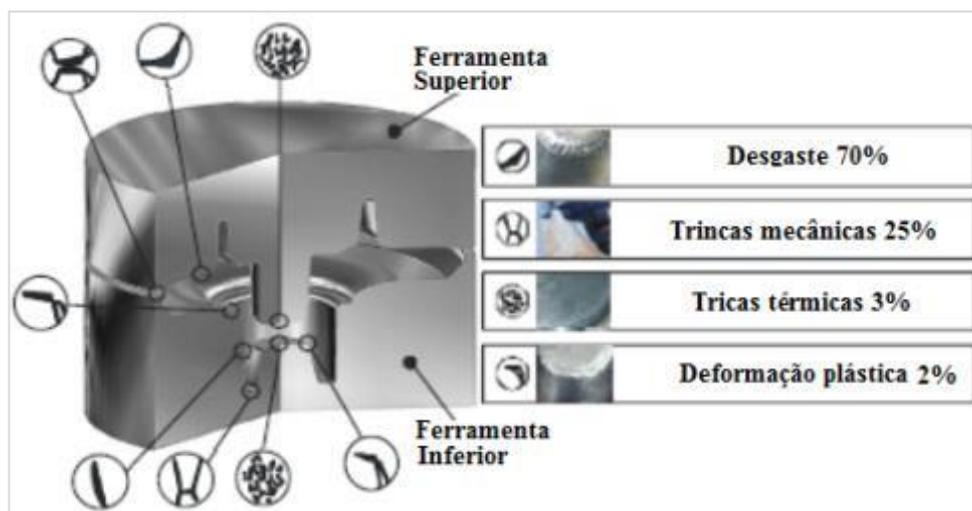


Figura 0.9 - Causas de falhas de ferramentas de forjamento
Fonte: Behrens *et al.* (2014, p. 215)

Para Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999), as falhas de forjamento dependem das condições do processo de forjamento, das características do material e das condições superficiais, portanto, pode se encontrar vários modos de falha para as ferramentas de forjamento. As principais falhas de ferramentas de forjamento, são descritas a seguir:

- Desgaste (abrasivo, adesivo e oxidação);
- Fadiga térmica ou trinca térmica;
- Fadiga mecânica;
- Deformação plástica.

O projeto da ferramenta de forjamento, a escolha do equipamento de aquecimento e forjamento, a seleção do material da ferramenta e os tratamentos superficiais utilizados, tem enorme efeito nas características do desgaste e estes fatores, afetam um ou mais fenômenos físicos de controle fundamental. Esta relação é ilustrada na Figura 2.10.

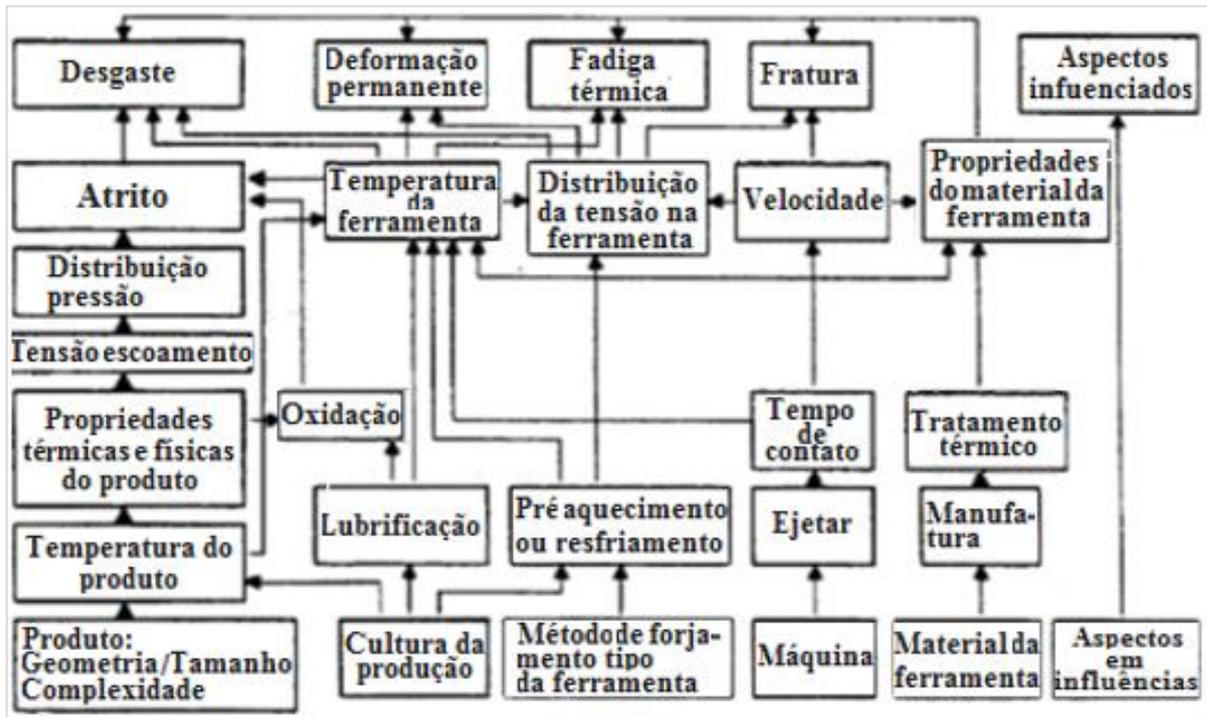


Figura 0.10 - Interação das características de forjamento com o modo de falha
Fonte: Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999, p. 15)

2.4.1 Desgaste abrasivo

Conforme Gronostajski *et al.* (2014), o desgaste abrasivo é o resultado da perda de material, principalmente pela separação do material da superfície. Isto ocorre quando existem partículas soltas ou fixas (formadas de material duro), sobre a superfície de interação das peças, como ocorre no forjamento a quente em que normalmente as ferramentas são mais duras que o material que está sendo forjado como demonstra a Figura 2.11.

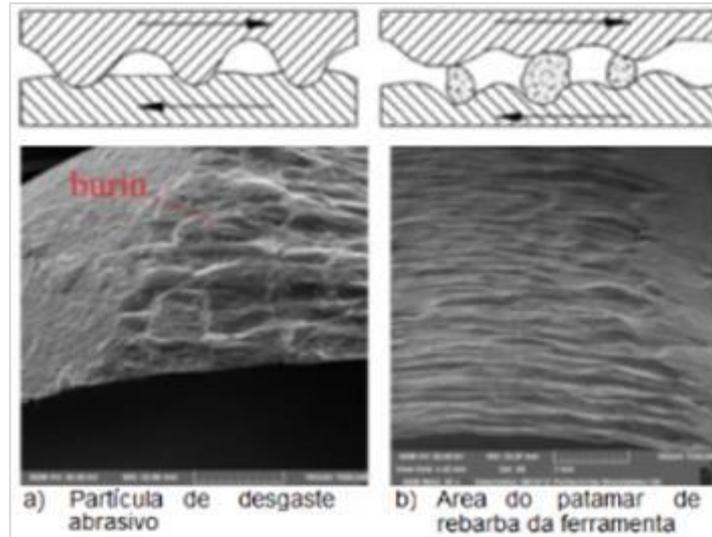


Figura 0.11 - Típico desgaste abrasivo de uma ferramenta de forjamento
 Fonte: Adaptado de Gronostajski *et al.* (2014, p. 530)

O desgaste abrasivo pode ser intensificado pela formação de óxidos duros durante a oxidação da superfície, devido à exposição a altas temperaturas durante o forjamento, que produz pequenas partículas duras que se soltam da ferramenta.

Como resultado desse mecanismo, ranhuras se formam ao longo da direção em que o material está sendo forjado, com profundidade e forma que dependem, principalmente, das condições de forjamento.

As estrias são particularmente suscetíveis à abrasão e são rapidamente removidas da superfície da ferramenta, que resulta na perda de material e na perda de geometria. Esse modo de falha é mais provável nos locais onde a distância de deslizamento do material é longa, e na maioria das vezes, ocorre em raios dentro da cavidade da ferramenta e no patamar da bacia de rebarba (GRONOSTAJSKI; *et al.*, 2014).

Behrens *et al.* (2014), baseando-se na norma DIN 50323, também afirmam que a abrasão é um mecanismo de desgaste com remoção do material pela formação de estrias ou ranhuras. Durante o forjamento, pequenos pedaços duros ou corpos estranhos presentes na superfície penetram na superfície mais macia. Normalmente, corpos ásperos, detritos na lubrificação e partículas tem um efeito abrasivo, gerando diversos defeitos superficiais na forma de ranhuras, vincos, buracos e veios.

Para Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999), o desgaste é a progressiva perda de substancia ocorrendo da superfície de um corpo, como resultado relativo do movimento na superfície e também devido a suas reações tribo químico.

O mecanismo de desgaste aumenta quando uma superfície dura, desliza contra uma superfície mais macia, buracos e uma serie de ranhuras e estrias aparecem. As estrias do material original normalmente são removidas na forma de perda de fragmentos ou na forma de estrias, ao longo de cada ranhura. O material da estria então, torna-se vulnerável para subsequente e completa remoção da superfície (STACHOWIAK, 1993 *apud* BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

Segundo Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999), as condições de forjamento e desgaste abrasivo, talvez seja composto pela presença de partículas duras de terceira fase. Estas partículas são os óxidos duros ou carepas, partículas contaminantes externas ou outras partículas duras, destacadas da superfície da ferramenta.

O desgaste abrasivo resulta do deslocamento de material da superfície da ferramenta. Isto normalmente é causado pela presença de partículas duras, entre a ferramenta e o material do produto, deformação ou protuberâncias provenientes do material a ser forjado. A dureza da partícula que causa as estrias iniciais, se apresenta igual ou maior que a dureza da ferramenta.

O desgaste abrasivo possui diferentes mecanismos presentes. A Figura 2.12, mostra os diversos mecanismos de desgastes produzidos nas superfícies (micro cortes - micro fraturas - micro fadigas e deslocamento).

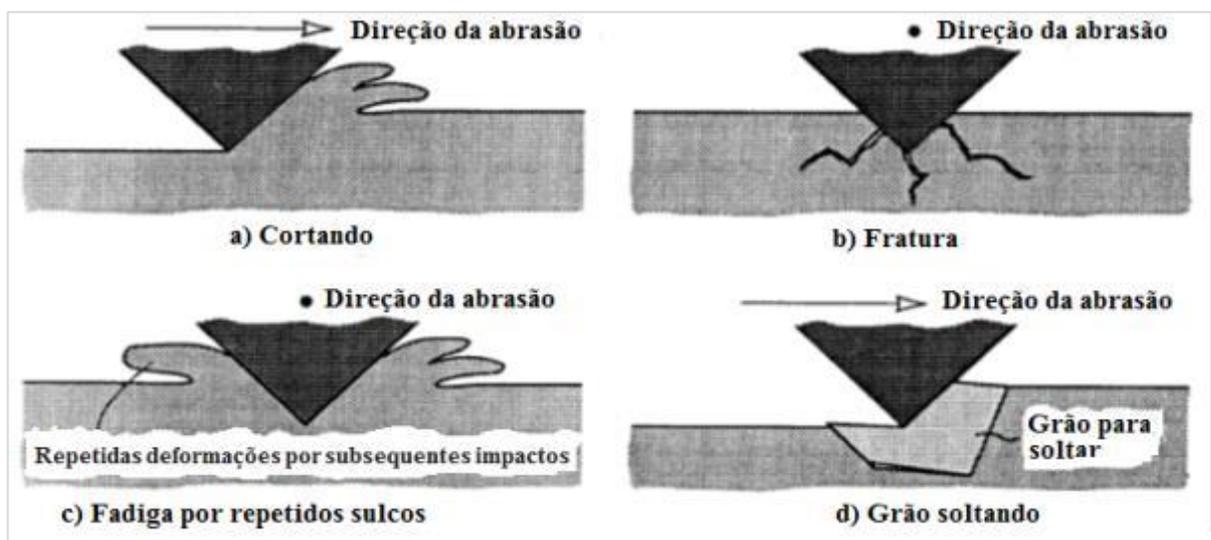


Figura 0.12 - Diferentes mecanismos de desgaste abrasivo
 Fonte: Stachowiak *apud* Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999, p. 99)

2.4.2 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo ocorre na camada superficial da ferramenta, especialmente, onde existem irregularidades na superfície. Normalmente, ocorre sobre alta pressão e relativa baixa velocidade, durante interação entre materiais similares ou materiais que apresentam alguma afinidade química, condições que são típicas do processo de forjamento a quente.

Sob alta pressão, o material que está sendo forjado remove a camada de óxido que cobre a superfície da ferramenta, mantendo a superfície limpa. Isto acontece principalmente em áreas de irregularidades superficiais (superfícies rugosas e picos). Quando os materiais se tocam nestas regiões, as forças interatômicas começam a agir, formando uma junção metálica entre as superfícies. O resultado é um deslocamento mútuo das superfícies e a destruição da união.

A deformação plástica da camada superficial na união também contribui para esse processo. A quebra da união resulta na separação das partículas metálicas, que tendem a se unir à superfície da ferramenta.

Assim, a perda de material acompanhada de desgaste adesivo é normalmente atribuído ao desgaste por adesão, representada na Figura 2.13 (GRONOSTAJSKI *et al.*, 2014).

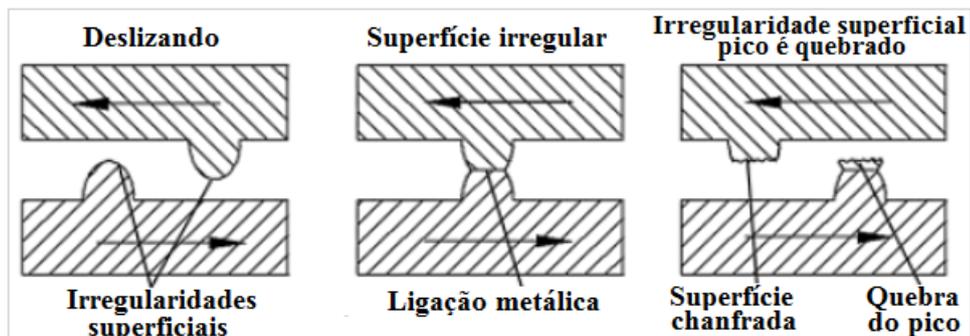


Figura 0.13 - Mecanismo de desgaste adesivo
 Fonte: Gronostajski *et al.* (2014, p. 531)

A intensidade da quebra das partículas depende, principalmente, dos parâmetros do processo de forjamento, das propriedades da camada superficial da ferramenta e do produto que se forja.

Conforme Behrens *et al.* (2014), sempre se baseando na norma DIN 50323, a adesão é a formação de um vínculo adesivo interfacial, que consiste de um adesivo químico, que pode ser tão forte e manter-se intacto durante o movimento relativo. Nesse caso, o material mais

macio se rompe por cisalhamento sub-superficialmente. A resistência da adesão é determinada principalmente, por dois fatores:

O tamanho e o número de microcontatos na superfície, que representam a superfície de contato e,

A magnitude da força na superfície dos microcontatos entre os corpos em atrito.

A formação e o tamanho das superfícies de micro contatos dependem da carga e da forjabilidade. A estrutura cristalina é, portanto, um importante fator, pelo qual o número de sistemas de deslizamentos é crucial em particular. A estrutura hexagonal possui apenas três sistemas de deslizamentos e, portanto, tende a aderir menos intensamente, que metais com estrutura cúbica de face centrada, que possuem doze sistemas de deslizamento.

A resistência do vínculo adesivo é influenciada pela camada de óxidos na superfície e pelos filmes contaminados que entram a adesão. Devido às tensões mecânicas, essas camadas podem quebrar ou raspar, e o resultado é o contato metálico.

As forças de adesão fortes ocorrem quando o atrito nas superfícies difere em sua configuração eletrônica, ou seja, uma das superfícies atua com um elétron doador e a outra, como receptor. Os materiais com um vínculo covalente não são capazes de formar um vínculo adesivo metálico. Assim, a resistência da adesão aumenta na seguinte ordem: metais de transição (Cr, Ni e Pd), metais nobres (Cu, Ag e Au), e metais do grupo B (exemplo: Zn e Sn) (BEHRENS; *et al.*, 2014).

A tendência de a superfície de contato aderir aumenta, quando existem forças atrativas entre os átomos da superfície e os dois materiais. Se as duas superfícies têm contato e então são separadas, por forças normais ou tangenciais, estas forças atrativas atuam de uma maneira a puxar o material de uma superfície ou de outra. De qualquer modo, o material é removido de sua superfície original, desta forma, um fragmento de desgaste adesivo é criado (RABINOWICZ *apud* BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

O desgaste adesivo ocorre entre duas superfícies deslizando e o material é transferido de uma superfície para outra, devido a um processo de soldagem em fase sólida. Os primeiros experimentos de desgaste adesivo foram realizados com metais, sendo que, o processo de adesão era referido como "soldagem", porém, em muitos casos era preferível usar o termo de desgaste adesivo, ao invés de soldagem (BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

A Figura 2.14, ilustra o processo e soldagem e o de desgaste adesivo.

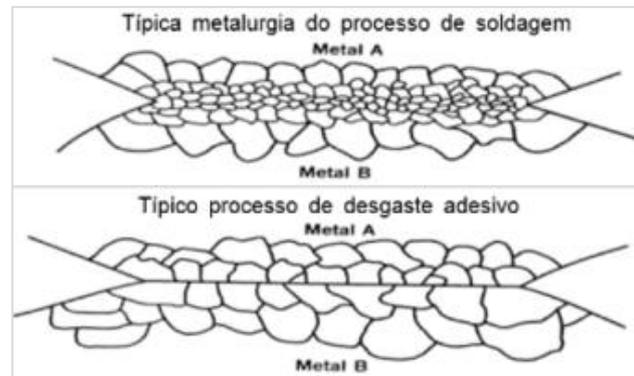


Figura 0.14 - Processo e soldagem e o de desgaste adesivo
 Fonte: Adaptado de Rabinowicz *apud* Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999, p. 100)

De acordo com Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999), o desgaste adesivo em forjamento a quente, pode ser muito parecido com o processo de soldagem, desde que as temperaturas de interface estejam tão altas quanto 1200°C. Este fenômeno é geralmente, manifestado em ferramenta que agarram porções de material do *billet* e é acelerado quando a superfície da ferramenta, tem contato direto com o material aquecido. Isto normalmente ocorre, após uma sequência de eventos, conforme descrito a seguir.

- A camada de lubrificante e a camada de oxidação de ambas as superfícies ferramenta e *billet* foram removidas por desgaste abrasivo;
- A base de metal do *billet* tem contato com a base de metal do aço ferramenta;
- A redução do deslizamento do material do *billet* com o material da ferramenta é mínimo, mas a pressão é muito alta;
- O pedaço é ejetado da ferramenta, ou uma porção do aço ferramenta é removido com o *billet* ou uma porção do material do *billet* é aderido na ferramenta. Esta segunda possibilidade é mais comum ocorrer, desde que o material da ferramenta seja mais resistente que o material do *billet*. (BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

2.4.3 Oxidação

Para Gronostajski *et al.* (2014) o desgaste por oxidação consiste na degradação da camada superficial do metal devido à separação das camadas de óxido, formadas como

resultado da absorção de oxigênio. A difusão do oxigênio toma partes do material em micro volumes, que são elásticas ou plasticamente deformadas, enquanto os filmes de solução sólida se formam.

O desgaste por oxidação ocorre quando a intensidade com que a camada de óxido se forma é maior que a degradação da superfície por abrasão. A Figura 2.15 mostra uma superfície oxidada de uma ferramenta de forjamento a quente depois de 1850 peças produzidas.

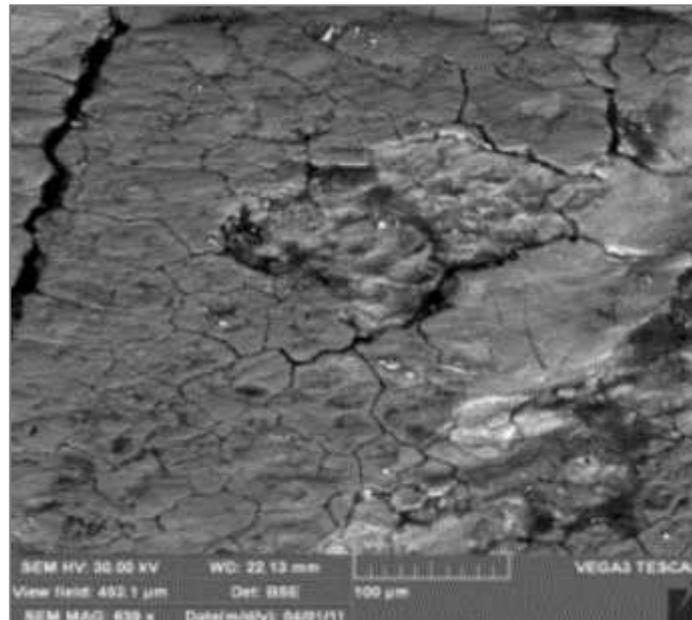


Figura 0.15 - Camada oxidada da superfície da ferramenta de forjamento com 1850 peças
Fonte: Gronostajski *et al.* (2014, p. 532)

Ainda segundo Gronostajski *et al.* (2014), no forjamento a quente, normalmente ocorre oxidação da superfície da ferramenta e carepas se formam sobre ela, com três tipos de óxido devido às altas temperaturas de forjamento:

- Wustita FeO ;
- Magnetita Fe_3O_4 ;
- Hematita Fe_2O_3 .

A maneira com que a superfície da peça interage com a ferramenta depende muito do grau de oxidação e das propriedades da carepa que dependem da temperatura de oxidação, pois gera diferentes tipos de óxidos.

Em temperaturas abaixo de 560°C , formam-se principalmente hematita dura (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), sendo que a Wustita (FeO) é mais instável nessas temperaturas. Durante o

forjamento, a carepa é separada da superfície da ferramenta e age como um material abrasivo, acelerando o desgaste da ferramenta.

Acima de 570°C as carepas com multicamadas se formam contendo os três tipos de óxidos de ferro.

Quando a temperatura aumenta para 700°C, a porcentagem de Wustita FeO aumenta, pois ela é mais macia que os outros dois óxidos.

Para a faixa de temperatura de 700 a 910°C, a carepa é composta basicamente de Wustita e pode trabalhar como um lubrificante sólido reduzindo o desgaste.

Acima de 910°C, hematita e magnetita reaparecerem na carepa. Na Tabela 2.2 apresenta-se a dureza dos óxidos formados nos aços.

Tabela 0.2 - Dureza dos óxidos de aço
Fonte: Adaptado de Gronostajski *et al.* (2014, p. 532)

DUREZA DOS ÓXIDOS DE AÇO			
Óxidos	FeO	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃
Dureza (HV)	270 - 300	420 - 500	1030

Sem se considerar as propriedades dos óxidos na carepa, a camada de óxido contribui para a ocorrência de trincas na ferramenta. A cinética da oxidação na superfície afeta a taxa de ocorrência de trincas e sua morfologia. As trincas na camada de óxido normalmente se propagam a partir da camada superficial da ferramenta. Além do mais, as trincas que aparecem na superfície são preenchidas com óxidos, que agem como uma cunha, acelerando a propagação das mesmas (GRONOSTAJSKI; *et al.*, 2014).

De acordo com Babu; Ribeiro; Shivpuri (1999), a oxidação pode afetar o desgaste em ferramentas para forjamento a quente, devido as seguintes razões:

- Trincas por fadiga térmica podem iniciar em pontos de oxidação e as trincas são preenchidas por óxidos;
- As ferramentas podem perder material por oxidação devido ao intervalo de temperatura em que a superfície da ferramenta trabalha.

O desgaste por corrosão ou oxidação, ocorre em uma grande variedade de situações, tanto superfícies lubrificadas, como não lubrificadas. O desgaste por oxidação é um desgaste de superfície seca, não lubrificada ou mesmo lubrificada, metal na presença de ar ou oxigênio. Quando existe filme grosso de oxido em uma superfície desgastada, um desgaste pequeno prevalece. Quando o filme de oxido está ausente ou quebra, um desgaste severo ocorre e o desgaste adesivo deve ser o mecanismo predominante de desgaste. A causa fundamental da

forma destes mecanismos de desgaste é uma reação química, entre o material desgastado e a média corrosão, que pode ser um reagente químico, lubrificante reativo ou ar (HOLMES, 1972; QUINN; SULLIVAN; *et al.* 1980; QUINN, 1983; QUINN, 1991 *apud* BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

No forjamento a quente o intervalo de temperatura forma filmes de oxido rapidamente e a superfície da ferramenta de um forjamento a quente, pode ser detectada visualmente, quando a ferramenta é submetida a trabalho. Considerando que um filme de oxido existe sobre a superfície da cavidade da ferramenta, isto pode ser favorável ou prejudicial para o desgaste.

O desgaste prejudicial ocorrerá quando esta camada de oxido é formada e removida a cada operação de forjamento, causando desgaste por oxidação. Este tipo de camada de oxido também permite adesão, embora a inter camada ferramenta oxido e *billet* ainda está presente.

O desgaste benéfico ocorrerá quando o oxido atua como uma camada isolante entre o *billet* e a ferramenta, prevenindo o desgaste adesivo.

Os autores realizaram o ensaio onde se percebe no pino disco, a formação de um filme de oxido que reduz a taxa de desgaste, isto é, de acordo com o esperado, pois, o filme da camada de oxido não permite que a adesão ocorra (BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

CUI *et al.* (2009), realizaram ensaios de pino-disco em diferentes temperaturas (temperatura ambiente, 200 e 400°C) com o aço para matriz de forjamento a quente H13, tratado termicamente com têmpera a 1040°C e diversas temperaturas de revenido entre 200 e 700°C.

Devido às diferentes temperaturas utilizadas para avaliar o desgaste com o ensaio pino-disco, observaram que a oxidação gerada juntamente com o amaciamento ou não do material base, alteraram o tipo de desgaste conforme mostra a Figura 2.16.

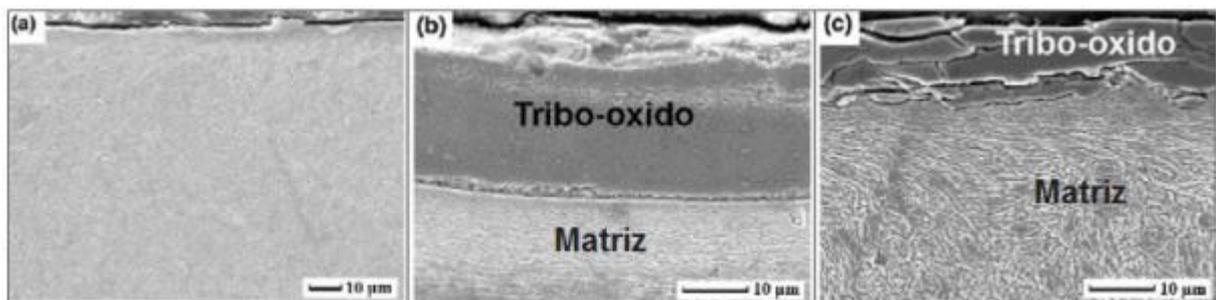


Figura 0.16 - Morfologia da seção da superfície de desgaste para o corpo de prova revenido a 600°C, sobre as condições a) temperatura ambiente b) 200°C e c) 400°C.

Fonte: Cui *et al.* (2009, p. 1060)

Nas três seções (a, b e c) da Figura 2.27 observa-se a morfologia descrita a seguir:

a) (Temperatura Ambiente): a camada de óxido formada é muito fina, não protegendo a superfície e predominando o desgaste adesivo, somado às tensões de deslizamento, ocorrendo o deslocamento de detritos (fratura) e gerando maior desgaste durante os ensaios;

b) (200 °C): a camada de óxido formada é suficiente para proteger a superfície, gerando um desgaste suave durante os ensaios. Os detritos formados são menos prejudiciais à ocorrência do desgaste;

c) (400 °C): a camada de óxido formada é maior e pode-se verificar a geração de trincas, gerando o deslocamento de micro pedaços da ferramenta, criando novas superfícies que serão oxidadas, formando novas trincas e deslocando sucessivamente.

Assim, esses autores concluíram que para a temperatura ambiente, o mecanismo predominante é o desgaste adesivo; a 200°C, o desgaste suave é predominante e, a 400°C, o desgaste é severo. Para a temperatura de 200°C, a taxa de desgaste é menos severa, devido à função de proteção dos óxidos formados nesta temperatura

2.4.4 Trinca por fadiga mecânica

A trinca por fadiga mecânica na ferramenta de forjamento ocorre devido ao acúmulo de deformações na superfície da ferramenta, causado pelas tensões cíclicas geradas pelas cargas externas que aumentam conforme a peça é forjada.

Como resultado, as trincas por fadiga aparecem em lugares de concentração de tensões, que irão determinar a vida da ferramenta. A resistência à formação de trincas depende da amplitude da deformação, pois quanto maior for essa amplitude, menor será a vida da ferramenta (GRONOSTAJSKI; *et al.*, 2014).

Danos como a fadiga ou sobrecarga podem ocorrer devido a cargas mecânicas (Figura 2.17). Esses tipos de fraturas são ocasionados por finas trincas sobre a superfície da ferramenta, devido a fatores térmicos e mecânicos. Quando o crescimento de uma trinca se estende por um longo período ou elevado número de ciclos de forjamento, a fratura é chamada de fratura mecânica. Por outro lado, quando a trinca ocorre apenas com um golpe, a falha é chamada de fratura por sobrecarga. As melhorias contínuas dos materiais empregados na fabricação das matrizes, dos tratamentos térmicos e dos processos de manufatura resultam em uma redução da fadiga ou fratura por sobrecarga (BEHRENS; *et al.*, 2014).

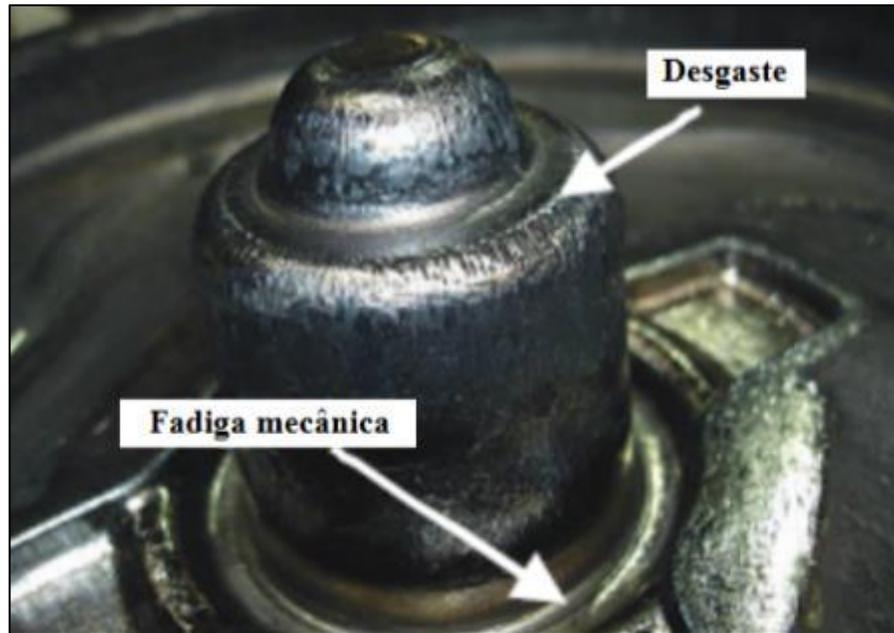


Figura 0.17 - Desgaste e fadiga mecânica
 Fonte: Behrens *et al.* (2014, p. 217)

Para Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999), vários fatores interagem em uma natureza muito complexa, para afetar a performance da ferramenta durante o processo de forjamento. Dois dos modos de falhas muito comuns para ferramentas de forjamento, são a fadiga mecânica e a quebra catastrófica. Na Figura 2.18, se demonstra um esquema com os principais fatores.

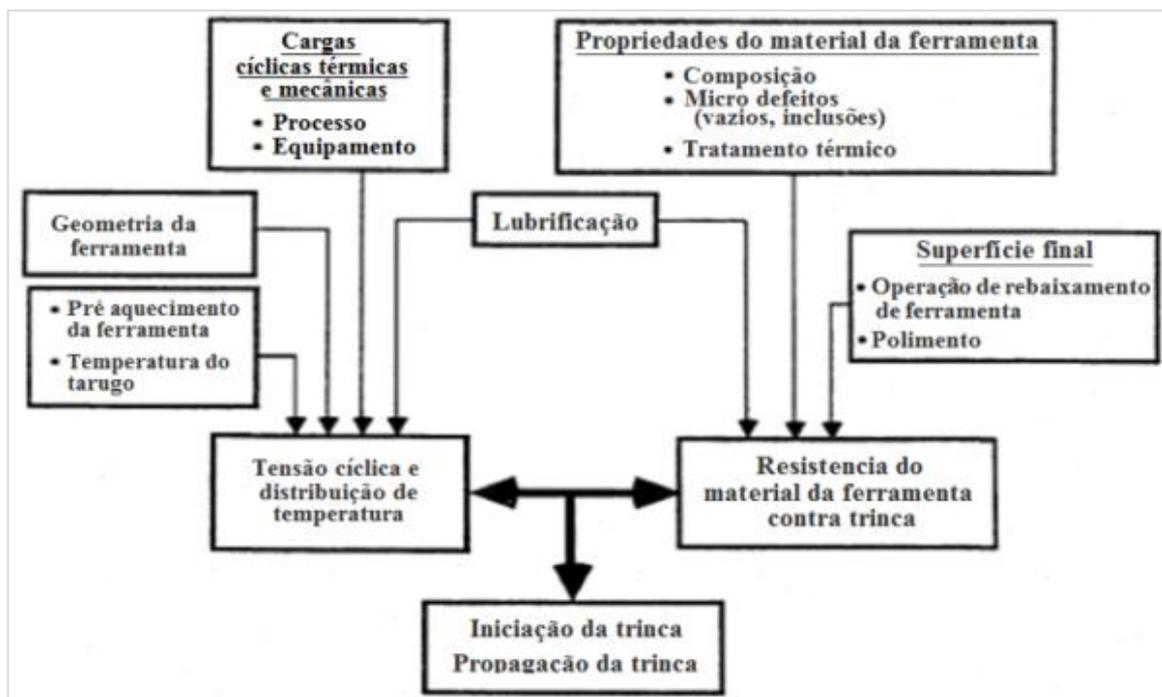


Figura 0.18 - Esquema de interação dos parâmetros de forjamento e a quebra catastrófica
 Fonte: Knorr (1993) *apud* Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999, p. 109)

O processo pode ser dividido em três passos, assim sendo:

- Início das trincas;
- Crescimento das trincas;
- Falha ou quebra catastrófica.

As ferramentas para forjamento estão sujeitas a altas pressões para poder preencher a cavidade da ferramenta. Em lotes de produção com alto volume de forjamento, as ferramentas estão sujeitas a repetidos carregamento e descarregamento de pressões para o forjamento.

Similar a fadiga térmica é a fadiga mecânica que é causada pela alternância de tensões, que causam trincas em regiões onde o limite plástico é excedido. Repetidos carregamentos sobre as trincas, resultam em um avanço ou propagação das trincas (BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

Para evitar falhas catastróficas, deve-se reduzir as tensões mecânicas induzidas na ferramenta durante o forjamento, aumentar a tenacidade do material e evitar processos de usinagem que induzam tensões residuais.

As características da peça e da ferramenta que aumentam as tensões também reduzem a vida da ferramenta por fadiga mecânica, como, por exemplo:

- Cantos e filetes agudos;
- Seções finas;
- Geometria da peça e da rebarba;
- Resistência mecânica do material forjado.

O aumento da tenacidade é geralmente associado com a redução da tensão de escoamento, que é função dos elementos de liga e da microestrutura. Como a tensão de escoamento é essencial para a resistência ao desgaste e à fadiga térmica, o aumento da resistência à fadiga mecânica irá prejudicar a resistência a outros modos de falha. Algumas ações que podem reduzir a fadiga mecânica da ferramenta são descritas a seguir (BABU *et al.*, 1999).

- Aumento dos raios de cantos, se possível;
- Utilização de insertos;
- Utilização do aço ferramenta tratado termicamente e corretamente, pois baixas taxas de resfriamento tendem a causar precipitação de carbonetos no contorno de grão, diminuindo a tenacidade. Os insertos também ajudam a reduzir seções para tratamento térmico;
- Utilização de tratamentos superficiais e revestimentos, permitindo ferramentas com alta tenacidade e com altas propriedades superficiais;

- Antes de iniciar o forjamento, utilizar o pré-aquecimento que também aumenta a tenacidade;
- Evitar sobrecarga na ferramenta devido as variações decorrentes do processo de forjamento.

2.4.5 Fadiga térmica ou termomecânica

De acordo com Gronostajski *et al.* (2014), a fadiga termomecânica é um tipo de desgaste em que a perda local de coesão e a perda de material são causadas pela fadiga do material, devido à ação cíclica de tensões na camada superficial da ferramenta de forjamento, gerada por gradientes de temperatura e pela alta pressão na interface devida às cargas mecânicas.

Devido a cargas térmicas cíclicas intensivas na superfície da ferramenta, produzidas pelo aquecimento e resfriamento alternado, o material é alternadamente tensionado e comprimido, elevando as tensões térmicas e resultando em uma rede de trincas.

Esse modo de falha é conhecido como fadiga térmica, que associada à presença de cargas cíclicas mecânicas, resultam em um processo de fadiga intenso, a tal ponto que as microtrincas causadas pela fadiga térmica transformam-se em macrotrincas. Os mecanismos de fadiga térmica e mecânica são mutuamente independentes, porém, são classificados como fadiga termomecânica representada na Figura 2.19 (GRONOSTAJSKI; *et al.* 2014).

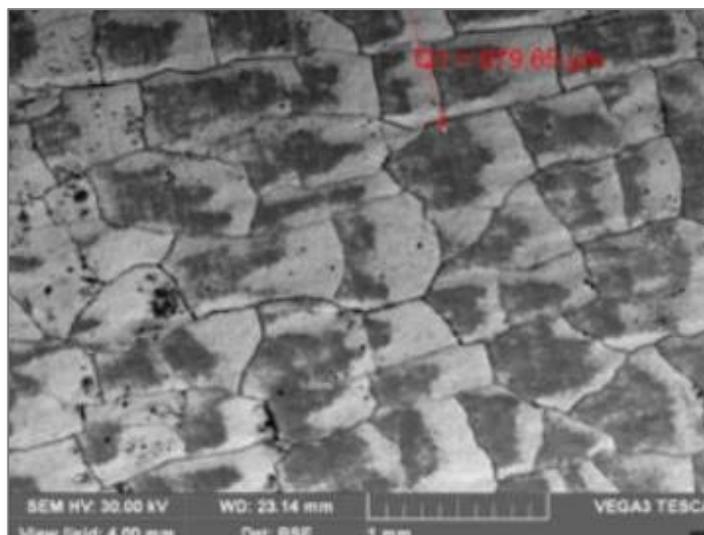


Figura 0.19 - Rede de trincas termomecânicas de uma ferramenta com 550 peças forjadas
Fonte: Gronostajski *et al.* (2014, p. 534)

Para Behrens *et al.* (2014), as fontes de cargas térmicas são duas. Na primeira, como resultado de altas temperaturas, as mudanças estruturais ocorrem em áreas próximas à superfície, que resultam em seu amaciamento ou endurecimento. Essas áreas são o início para outros tipos de danos na superfície.

Com a segunda fonte, as trincas se desenvolvem em áreas superficiais da ferramenta como resultado de flutuações de tensões térmicas. A razão para a formação de trincas é a alta tensão residual que ocorre no forjamento.

Devido à pressão no tempo de contato, a superfície da ferramenta é aquecida e quanto mais quente estiver esta área da ferramenta, maior será a tendência de expansão térmica que será impedida pelas camadas subjacentes da ferramenta, resultando em tensões compressivas nas camadas superficiais.

Durante a lubrificação subsequente, a superfície contrairá mais uma vez, devido às tensões de tração próximas à superfície da ferramenta. Essas flutuações de tensões de tração e compressão resultam na formação de trincas térmicas e com isso, as deformações superficiais são reduzidas, resultando numa fina rede de trincas na superfície da ferramenta.

Um exemplo de ferramenta com danos causados pelo desgaste e trincas térmicas é apresentado na Figura 2.20.

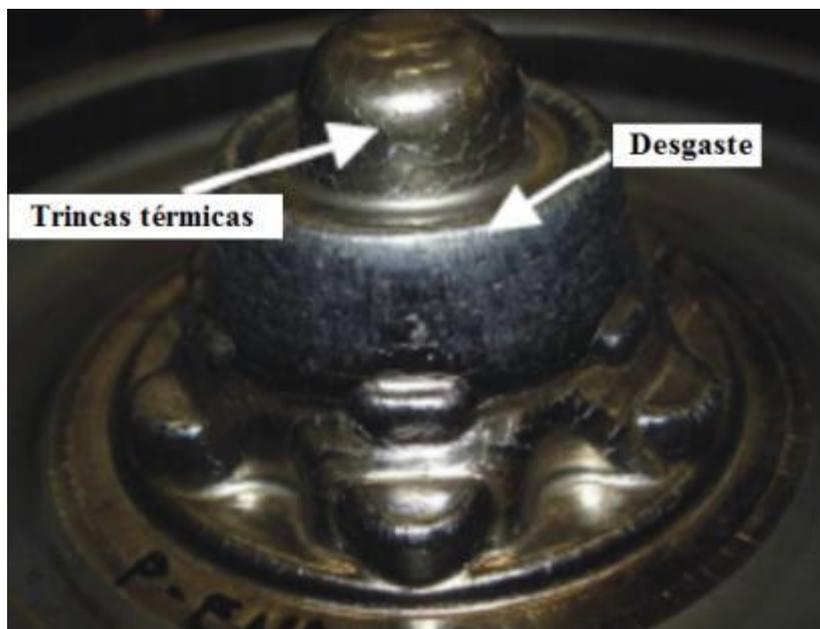


Figura 0.20 - Danos causados pelo desgaste e trincas térmicas
Fonte: Behrens *et al.* (2014, p. 217)

Behrens *et al.* (2014), definem o lascamento da superfície como sendo a formação ou crescimento de trincas e também o associam à quebra de partículas da superfície, todas

causadas por flutuações de tensões em micro áreas. Isto pode ocorrer devido a alterações de tensões mecânicas ou tensões térmicas de tração e compressão, e pela sua sobreposição. Os detritos, que são resultado do lascamento da superfície, podem ser ou não removidos do material durante a operação de forjamento, favorecendo a desgaste por abrasão e por adesão.

As reações termoquímicas decorrem da ativação térmica e mecânica e incluem reações entre as superfícies de contato em um meio específico. Os resultados dessas reações no contato metálico são normalmente camadas quebradiças, que até podem suportar as tensões mecânicas induzidas por um período de tempo limitado e fraturar em tensões mais altas.

Assim, uma perda de material ocorre progressivamente como resultado de uma reação química e as partículas soltas nesse desgaste favorecem o desgaste abrasivo. As camadas finas de óxidos que estão presentes, a princípio, devido às tensões de atrito, podem reduzir o desgaste.

Uma definição exata do mecanismo responsável pelo desgaste é difícil, porque os quatro mecanismos apresentados anteriormente se sobrepõem. Além do que, uma direta observação dos mecanismos de desgaste é geralmente impossível. Também a distinção de outras formas de dano não é fácil, pois as trincas microscópicas resultantes de tensões térmicas e mecânicas também podem ser geradas durante o processo de desgaste que é influenciado pelas variáveis de processo definidas a seguir:

- Temperaturas das ferramentas e da peça;
- Tensão normal de contato;
- Geometria das ferramentas e da peça;
- Lubrificação e refrigeração das ferramentas;
- Materiais da peça e das ferramentas;
- Outros fatores, como grau de deformação, taxa de deformação, pressão e tempo de contato, entre outros.

Diferentes técnicas podem ser utilizadas para reduzir o desgaste, o que pode ser o principal fator para aumento da vida de ferramenta, se o desgaste for a principal causa de falha das ferramentas (BEHRENS; *et al.* 2014).

De acordo com Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999), o aparecimento de uma fina rede de trincas em ferramentas para forjamento a morno e a quente é conhecido como fadiga térmica. Os processos de forjamento a quente e a morno, tem um ciclo típico que causa aquecimento e resfriamento da superfície da ferramenta. O tarugo em alta temperatura é comprimido dentro da ferramenta, causando um aumento drástico na temperatura superficial da ferramenta. A temperatura da ferramenta aumenta na superfície e causa sua expansão, ao mesmo tempo a

baixa temperatura do bloco da ferramenta, contrai a expansão gerando uma tensão compressiva.

Na sequência, a peça é retirada da ferramenta e a mesma é lubrificada. Durante o resfriamento e a lubrificação, o processo é revertido, causando tensões de tração. O ciclo térmico no forjamento a morno e a quente, pode resultar na expansão térmica, podendo alcançar os limites de deformação plástica. Quando as trincas são formadas por mudanças repetitivas na temperatura, o fenômeno é conhecido como fadiga térmica. A Figura 2.21, ilustra este fenômeno.

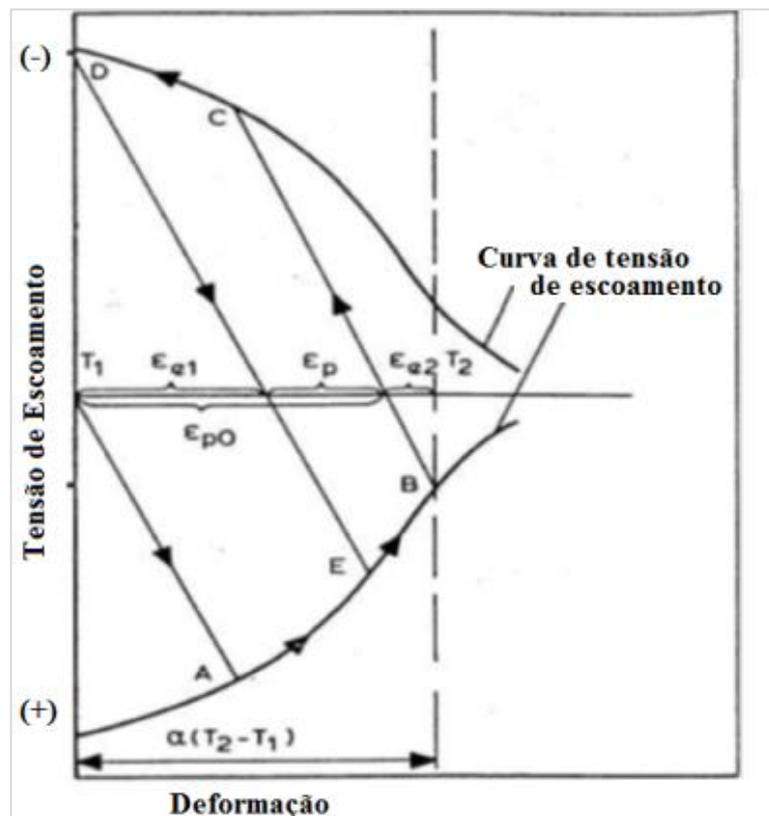


Figura 0.21 - Mudanças físicas na superfície da ferramenta que resulta na trinca térmica
 Fonte: Norstrom (1991) *apud* Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999, p. 103)

Quando a temperatura superficial da ferramenta começa a aumentar, o metal da ferramenta que ainda está frio, restringe a expansão térmica, resultando em tensões de compressão e conseqüentemente em deformação compressiva. Esta tensão compressiva é inicialmente um regime elástico (A). Se a diferença de temperatura é maior, as tensões se tornam plásticas, resultando em deformações compressivas permanentes na superfície da ferramenta. Este estado é indicado como região B na figura anterior. Após o forjamento as ferramentas são lubrificadas e devido a refrigeração, a superfície resfria mais rápido que o

interior, resultando no estágio C, onde as tensões superficiais se tornam trações e as deformações alcançam o limite elástico, além da região C, toda a deformação térmica induzida é plástica. A próxima peça produzida continua o ciclo térmico, resultando em baixa deterioração da superfície.

Os principais fatores que afetam a fadiga térmica, são: a temperatura de forjamento, as taxas de aquecimento e resfriamento, o histórico de tempo e temperatura, a resistência a quente do aço ferramenta, a resistência ao revenimento do aço ferramenta, a ductilidade e a dureza inicial do aço ferramenta, a tenacidade, a limpeza e a homogeneidade do aço ferramenta e seu tratamento térmico (BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

A temperatura é o principal parâmetro que controla a fadiga térmica. Existem diferentes maneiras, das quais, a temperatura influencia a fadiga térmica. Não é apenas o aumento do gradiente térmico que causa expansão térmica e tensões, mas também, reduz a resistência do material, causando transformações metalúrgicas. Altas temperaturas diminuem a tensão de escoamento e causa o amaciamento pelos efeitos do revenimento. Elas também tornam a superfície mais fraca e propensa para oxidação. Uma taxa de resfriamento drástica na ferramenta, pode levar a um excessivo estado de tensão, deformação e resultar em trincas grosseiras, por choque térmico.

A tensão de escoamento no ciclo de temperatura é diretamente proporcional a quantidade de deformação plástica na superfície da ferramenta, durante os ciclos térmicos e a deformação plástica é a causa das trincas térmicas. Se o material sofre amaciamento por efeito do revenimento, a deformação plástica aumentará na mesma proporção. Uma correta predição da vida da ferramenta, tem que considerar o amaciamento e usar as propriedades do material instantâneas ao longo do ciclo térmico.

Os valores mais altos de tensão de escoamento ou dureza, reduzirão a porcentagem de deformação plástica que é a causa final do dano. Consequentemente, as altas tensões de escoamento a quente, podem reduzir ou até mesmo, evitar fadiga térmica. Entretanto, para aplicação prática em ferramenta para forjamento a quente, o aumento da tensão de escoamento a quente é limitado, se acompanhado por: diminuição da ductilidade, tenacidade ou resistência térmica ao choque. Quando estas propriedades são baixas existe um risco de falha catastrófica ou trincas grosseiras, por choque térmico. O material precisa ser capaz de resistir a temperatura de pré-aquecimento e os ciclos de temperatura, sem a perda excessiva de dureza. O efeito do ciclo de temperatura é a soma dos tempos de ciclos no intervalo da temperatura máxima. Esta propriedade é representada pela curva de revenimento e por curvas

de fluência. Testes de fadiga térmica, confirmam que os materiais com maior resistência a temperatura, apresentam melhor resistência quando as outras propriedades são similares.

O início da trinca é diretamente proporcional com a ductilidade, como pode ser visto o item em modelos matemáticos, também influencia no crescimento da trinca. Outro aspecto é que se a ductilidade se torna muito baixa, isto pode causar o crescimento da trinca rapidamente, conduzindo a falha da ferramenta com poucos ciclos, com choque térmico ou trincas grosseiras.

O ensaio de impacto “*Charpy V*” é a maneira mais comum de medir a tenacidade, devido a sua simplicidade, existem muitas maneiras disponíveis. Outro teste é fratura por tenacidade ou K_{Ic} que possui diversos resultados disponíveis, devido a sua maior dificuldade para realizar o teste. Entretanto K_{Ic} tem a vantagem de ser usado de maneira quantitativa para validar falhas catastróficas. O conhecimento do K_{Ic} para as condições de trabalho permite calcular a combinação admissível de tensões e profundidade da trinca, que não causa a falha catastrófica.

A limpeza e a homogeneidade da composição química são os pontos mais comuns relacionados com melhorias nas propriedades e melhor performance no processo. As propriedades na direção transversal, tendem a ser mais baixas e as ferramentas sofrem esforços em todas as direções. As melhorias de propriedades na direção transversal produzirão diretamente efeitos benéficos na performance da ferramenta. O limite de ductilidade é uma propriedade crítica para a resistência da fadiga térmica, que pode ser melhorada pela limpeza e a homogeneidade do material. Outras propriedades melhoradas são a tenacidade relacionada com trincas grosseiras e trincas por choque térmico (BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

O foco de discussão sobre tratamento térmico de ferramentas é diretamente para seu efeito em resistência a fadiga térmica. A tensão de escoamento, a dureza e o limite de ductilidade são as variáveis para controlar a resistência a fadiga térmica, considerando o material como uma constante. A falta de tenacidade pode causar falhas na ferramenta por trincas grosseiras, a influência do tratamento térmico na tenacidade é também considerada. A ductilidade é primeiramente influenciada pela qualidade da manufatura do aço, enquanto a tenacidade é influenciada pelo final do tratamento térmico da ferramenta (taxas de resfriamento na têmpera).

A baixa taxa de resfriamento é o mais crítico parâmetro, que causa a baixa tenacidade e a baixa ductilidade. As baixas taxas de resfriamento podem ser o resultado de características operacionais de uma grande quantidade de fornos a vácuo, isto também contribui para

minimizar os riscos de choque térmico e geração de trincas na ferramenta. Existem dois problemas relacionados com baixas taxas de resfriamento como descrito a seguir:

- Precipitação no contorno de grão;
- Formação de bainita.

Finalmente as propriedades que enfatizam um material que resista a fadiga térmica são:

- Ter alta tensão de escoamento a quente (evitar ou reduzir a deformação plástica);
- Ter alta resistência ao revenimento (manter a dureza ao longo do trabalho);
- Ter alta ductilidade (resistir a deformação plástica) (BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

Pellizzari *et al.* (2002), em ensaios realizados com corpos de prova que foram revestidos superficialmente por um sistema duplex de nitretação e PVD e que foram aquecidos e resfriados para se analisar a fadiga térmica, variando-se diversos parâmetros.

Esses autores observaram que três tipos de danos ocorreram e interagiram: as trincas térmicas, a oxidação e o amaciamento devido à temperatura empregada nos ensaios, como mostrado na Figura 2.22.

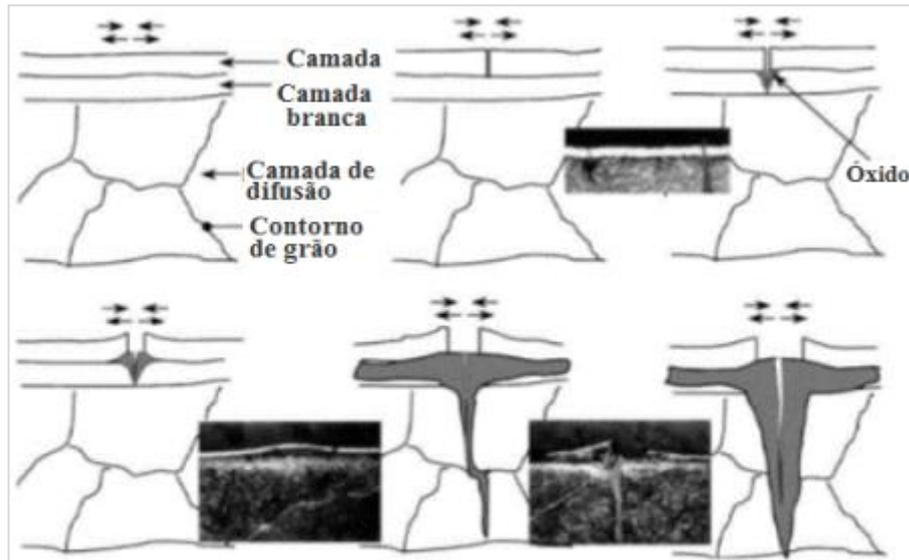


Figura 0.22 - Mecanismo de dano por sistema duplex (nitretação + PVD)
 Fonte: Pellizzari, Molinari e Straffelini (2002, p. 297)

Analisando-se a Figura 2.33, observa-se uma sequência de estágios decorrentes do dano:

Os sistemas duplex são expostos a um estado de tração e compressão alternado que pode causar a nucleação de trincas;

A origem destas trincas na camada de PVD dá-se em defeitos como cavidades, que representam sítios para a nucleação;

A propagação da trinca ocorre na camada branca subjacente, devido a sua natureza quebradiça por ser formada por nitretos cerâmicos;

A camada branca exposta com trincas na superfície é rapidamente oxidada pela atmosfera. A oxidação é reforçada pela porosidade da camada branca, onde a difusão do oxigênio ocorre mais facilmente;

A oxidação progressiva da camada branca causa uma brusca perda da adesão com as camadas subjacentes, o que resulta em desgaste;

A propagação da trinca é favorecida na camada de difusão da nitretação, sendo que após atingir a camada sem nitretos, a propagação torna-se mais lenta.

2.4.6 Deformação plástica

De acordo com Gronostajski *et al.* (2014), o enfraquecimento do material causado por contato em altas temperaturas resulta na redução do limite de tensão de escoamento do material, que combinado com as interações mecânicas conduz para a deformação plástica da ferramenta. Se a deformação plástica não ocorre, se deve ao fato de não ter excedido a tensão de escoamento do material da ferramenta em qualquer ponto.

No processo de forjamento a quente, a temperatura superficial da ferramenta pode alcançar até 800°C, enquanto que, as tensões geradas pela carga externa, podem ser maiores que 1000 MPa, o que indica que a deformação plástica provavelmente irá ocorrer.

Na Figura 2.23, é possível verificar o mecanismo de deformação plástica.

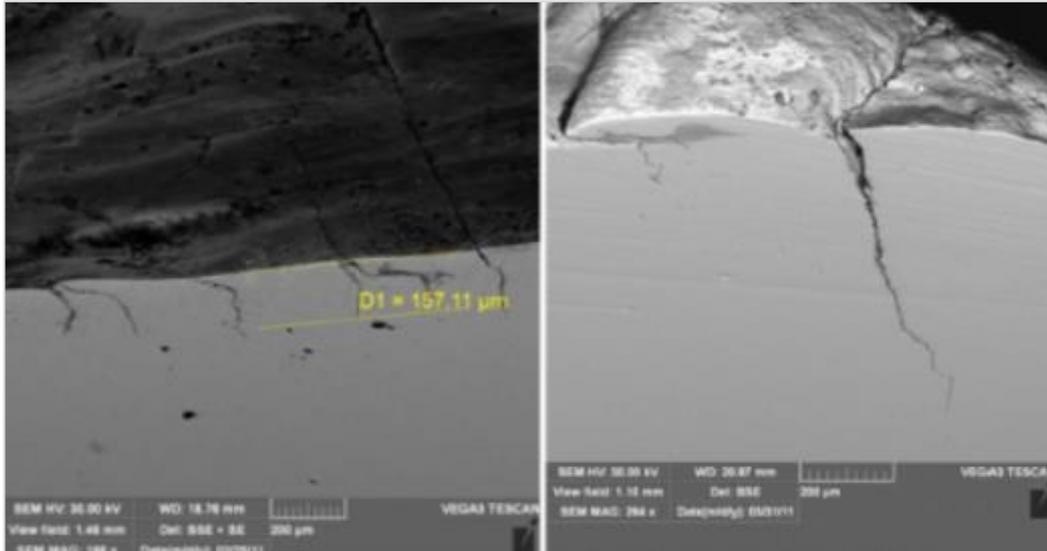


Figura 0.23 - Deformação plástica em camada superficial de uma ferramenta de forjamento a quente após 1850 peças forjadas. Fonte: Gronostajski *et al.* (2014, p. 535)

Ainda em Gronostajski *et al.* (2014), a facilidade da camada superficial da ferramenta para deformações plásticas, aumenta com sua vida de ferramenta e depende de sua dureza. Portanto, dados como a dureza da ferramenta, alterado pelo resultado do revenimento espontâneo que ocorre com o contato do material quente, são muito úteis para avaliar a possibilidade de deformações plásticas.

O mecanismo de revenimento depende da difusão do carbono e seus elementos de liga, o qual, se encontra interligado com a temperatura e tempo exposto da ferramenta ao calor.

Em condições reais de forjamento, as ferramentas são submetidas a altas temperaturas e expostas às ações de altas pressões, podendo contribuir para a redução da dureza, devido ao revenimento.

Os efeitos de cada fenômeno descrito na vida da ferramenta, são normalmente considerados separadamente e não existe nada que possa descrever fisicamente o processo de desgaste simultaneamente e a interação, entre cada um. Na realidade, o modo de falha ocorre simultaneamente e interage com cada um. O desgaste abrasivo é intensificado pela presença de óxidos duros, formados pelo resultado da oxidação da superfície da ferramenta. Além disso, os óxidos que preenchem as trincas por fadiga, aceleram seu desenvolvimento. A redução da dureza na camada superficial da ferramenta, causada pelo longo contato com o material aquecido, reduz a resistência ao desgaste abrasivo e aumenta facilidade para deformações plásticas e trincas termomecânicas.

A frequência de um modo de falha se altera, de acordo com que se alteram os parâmetros de processo. A maioria dos trabalhos de pesquisas sobre os mecanismos de

degradação em ferramentas para trabalho a quente, determina o desgaste abrasivo, como principal mecanismo de falha, porém os estudos indicam para a durabilidade da ferramenta de forjamento, que os mecanismos de degradação, possuem interações mutuas entre todos os fenômenos, como: desgaste abrasivo, fadiga termomecânica, deformação plástica, fadiga térmica, e oxidação, tornando a determinação do mecanismo predominante muito difícil.

No forjamento existem muitos parâmetros que influenciam na determinação da durabilidade da ferramenta e seu mecanismo de degradação como, forma da ferramenta, dureza, tempo de contato, distancia de deslizamento do material a ser forjado, material da ferramenta, temperatura do tarugo e lubrificação (GRONOSTAJSKI; *et al.* 2014).

Para Behrens *et al.* (2014), a deformação plástica ocorre na ferramenta, quando a tensão excede o limite de escoamento do material. As áreas de risco são aquelas expostas a altas tensões térmicas e mecânicas, desde que a energia térmica não dissipe facilmente, devido a geometria da ferramenta, isto resulta na expansão da gravura e a alteração da ferramenta.

Com conteúdo similar Babu, Ribeiro e Shivpuri (1999), reforça que a deformação plástica é um mecanismo de falha da ferramenta que ocorre em regiões da ferramenta que estão sujeitas a grandes pressões e temperaturas. Isto ocorre quando o resultado de uma tensão localizada na ferramenta, excede a tensão de escoamento do material da ferramenta. As áreas típicas da ferramenta, propensas a deformação plástica são os cantos pontiagudos e protuberâncias finas que aquecem facilmente durante o forjamento.

As pressões e temperaturas extremas causam este modo de falha, somando-se as tensões de forjamento, aumentam as possibilidades de ocorrer a deformação plástica. Conseqüentemente, a geometria da ferramenta e os critérios de processo que impactam tensões e temperaturas da ferramenta, tem um efeito sobre a deformação plástica das ferramentas. A temperatura de forjamento, tamanho e geometria do forjado, lubrificante utilizado, tempos de ciclo de forjamento, tipo de equipamento usado e tipo de forjamento (convencional ou sem rebarba), são os mais importantes fatores. Estes parâmetros aumentam a tensão localizada ou reduzem a resistência ao amaciamento térmico da ferramenta ou ambos.

Na teoria básica para o forjamento do metal, como é conhecida, a dureza do material é aproximadamente 3 vezes a tensão de escoamento do material. Entretanto, quando a espessura da placa se reduz, a dureza medida diminui para menos de 3 vezes a tensão de escoamento.

Para estas seções, a dureza medida pode ser tão baixa quanto 1,15 vezes a tensão de escoamento local.

Similarmente, em metais forjados, as características como: cantos pontiagudos e seções que são geometricamente finas e possuem menos rigidez, tendem a deformar plasticamente mais velozmente. Estas características tendem a aquecer rapidamente, por causa da alta exposição da área superficial, resultando em perda da dureza local. Simulações do processo de forjamento e análises de tensões das ferramentas, comparando os valores com a resistência a quente do material, é a maneira mais precisa de prever a deformação plástica (BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

Portanto, o processo de especificação e de seleção do aço ferramenta é muito importante. A resistência a quente ou a dureza a quente da ferramenta é uma das mais importantes propriedades, necessárias para resistir a deformação plástica. O aço ferramenta com alta resistência a quente, resiste a deformação plástica, melhor que aços cuja resistência se reduz drasticamente com a temperatura. Para ferramentas, onde o modo de falha é a deformação plástica em altas temperaturas, as superligas a base de níquel, podem ser uma boa opção.

A deformação plástica também se destaca em níveis microscópicos. A deformação plástica ocorre na interface da ferramenta e do tarugo. Devido as altas temperaturas, a interface do material da ferramenta, torna-se extremamente macio e maleável (BABU; RIBEIRO; SHIVPURI, 1999).

Considerando os conceitos associados ao desgaste de ferramentas de forjamento a quente observados na revisão bibliográfica, bem como os ensaios realizados por diversos autores a fim de avaliar como o desgaste é influenciado pelas diversas variáveis presentes nesse processo, propôs-se o procedimento experimental apresentado na seção a seguir.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo se apresenta todo o procedimento experimental realizado na execução para a preparação das ferramentas para a prática das atividades, com utilização do embasamento teórico pesquisado e elaborado no capítulo anterior.

3.1 Escolha da Ferramenta

Um dos motivos para a escolha desta ferramenta foi devido a algumas vantagens em se realizar as etapas preparatórias para a utilização da ferramenta nos experimentos que serão realizados.

Como o teste a ser realizado envolve 20 ferramentas as vantagens da escolha seguem:

Vida baixa: Facilidade em separar as ferramentas necessárias devido à grande quantidade em estoque e alta rotatividade de uso.

Tamanho e peso: Facilidade de manuseio da ferramenta, rapidez para realizar as atividades preparatórias e trocas rápidas durante o teste em forjamento.

Baixo custo: Facilidade em realizar os processos de preparação, pois não envolvem operações complexas na recuperação da ferramenta para sua reutilização.

A única desvantagem que para o procedimento também é uma vantagem é o baixo custo. Como se trata de uma ferramenta de baixo custo de recuperação este procedimento que se está sendo realizado neste trabalho não se aplica no dia a dia da indústria.

Para obter redução de custo nas ferramentas será necessário realizar o teste em outras ferramentas com processos de recuperação mais complexos.

O objeto de estudo deste trabalho foi a ferramenta de forjamento a quente denominada "punção" que realiza o pré furo de um cubo de roda produzido em uma prensa automática Hatebur modelo AMP 70.

O produto após execução de todas as operações do forjamento se apresenta conforme Figura 3.1.



Figura 3.1 - Produto forjado

O punção, para conformar o pré-furo deste produto, possui como modo de falha, os desgastes abrasivo, adesivo e por oxidação, somados à trincas térmicas e estrias. Esta ferramenta durante a produção apresenta em geral vida curta, sendo necessárias muitas paradas para sua troca.

A vida desta ferramenta é instável podendo forjar de 1000 a 9000 peças dependendo das variáveis de processo de forjamento que interagem com a ferramenta.

A Figura 3.2 demonstra o punção desgastado.



Figura 3.2 - Punção desgastado,

3.2 Preparação das Ferramentas

Para realizar o teste foram separadas 20 ferramentas que haviam sido utilizadas no forjamento em série. O material utilizado para confeccionar estas ferramentas foi o DIN 1.2365, sendo que as mesmas foram beneficiadas com uma dureza de 48 a 50 HRC e nitretadas com banho de sal por 3 horas a 580°C.

Após a utilização, as ferramentas escolhidas foram submetidas ao teste não destrutivo de dureza na região do corpo (fora da região de contato com a peça quente).

Este procedimento é necessário para que seja avaliado em que condição se encontra a dureza do material após ter sofrido o processo de nitretação e utilização do punção no forjamento de peças. Estes dois processos podem gerar perda de dureza do material base e afetar o desempenho do punção no estudo. O durômetro utilizado foi da marca Karl Frank, modelo GMBH.

A avaliação consistia em medir a dureza superficial, anotando os valores obtidos do material base, antes de ser aplicada a solda. A Tabela 3.1 demonstra.

Tabela 3.1 - Dureza do material base

DUREZA MATERIAL BASE			
Ferramenta	Dureza (HRC)	Ferramenta	Dureza (HRC)
1	50	9	50
2	50	10	49
3	50	11	48
4	49	12	49
5	49	13	49
6	50	14	48
7	49	15	48
8	49	16	50

Como pode ser observada, os valores de dureza do material base, encontradas nas 16 peças, variam de 48 a 50 HRC, sendo considerado aprovadas para o trabalho.

O estudo consistiu em realizar um delineamento de experimento de modo a analisar os tipos de materiais de solda; parâmetros de processo de nitretação e utilização do processo de PVD.

O delineamento de experimento é formado por 3 fatores e dois níveis, sendo:

- $2^3 = 8$ rodadas;
- Serão realizadas 2 réplicas totalizando 16 ferramentas;

Os fatores, são:

- Solda = Solda 1 e Solda 2;
- Nitretação = Maior camada e Menor camada;
- PVD = Com PVD e Sem PVD.

Para a realização do delineamento de experimento conforme já citado, foi utilizado o *software* Minitab. Na tabela 3.2, se apresenta as combinações do experimento.

Tabela 3.2 - Combinações do delineamento de experimento

DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS				
Ordem	Rodada	Solda	Nitretação	PVD
8	1	Solda 1	maior camada	Sem
7	6	Solda 2	maior camada	Sem
5	2	Solda 2	menor camada	Sem
6	5	Solda 1	menor camada	Sem
3	7	Solda 2	menor camada	Com
4	3	Solda 1	maior camada	Com
1	8	Solda 2	menor camada	Com
2	4	Solda 1	maior camada	Com

As ferramentas selecionadas foram submetidas ao processo de usinagem por torneamento para retirar a camada do punção, que obteve contato com o forjado e foi termicamente afetada. Este processo foi realizado pelo torno da marca Romi modelo I-40.

Este processo é necessário para que seja eliminado todo o material termicamente afetado cuja propriedades mecânicas foram perdidas, sem influenciar no resultado final do trabalho.

Foram usinados dois milímetros do diâmetro e topo do punção. Este rebaixamento será preenchido com material apropriado pelo processo de soldagem, restabelecendo as propriedades mecânicas do material. A Figura 3.3, ilustra a o rebaixamento na usinagem:



Figura 3.3 - Punção com rebaixamento para preenchimento de solda

Os punções usinados foram submetidos ao processo de soldagem, sendo que, os materiais escolhidos para a soldagem encontram-se descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição química do material soldado

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL SOLDADO									
	C	Si	Mn	Cr	W	V	Mo	Ti	Dureza
Solda 1	0,35	0,6	1 a 1,5	5 a 7,5			2 a 2,5	+	50 a 55 HRC
Solda 2	0,35	1	0,4	5	1,3	0,3	1,5		50 a 55 HRC

Antes de realizar a soldagem, os punções foram mantidos em uma estufa para pré aquecimento a uma temperatura de 400°C, durante um tempo de 3 horas, para posteriores soldagens conforme alíneas a seguir:

A solda tanto para o processo TIG quanto para o processo MAG foi realizada pela máquina modelo MigPulse 4001 DP.

a) Solda 1 - MAG

O processo utilizado para soldar o material número 1 foi o *Metal Active Gas* (MAG), este processo é caracterizado devido ao tipo de gás utilizado para proteger a poça de fusão, durante o processo de soldagem. Para obter uma proteção mais eficiente, foi aumentado a vazão do gás de 12 para 20 litros / min.

Com esse processo também se obtém um melhor controle e qualidade da solda gerada por exigir menor habilidade do operador. Ele também possui alta produtividade devido elevada taxa de deposição, alta velocidade de soldagem e alto fator de ocupação soldador/equipamento.

Os parâmetros do processo utilizados para realizar a solda número 1, encontra-se descrito no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Parâmetros utilizados para realizar a solda número 1

PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDA 1	
Diâmetro do eletrodo	1,2 mm
Tipo de processo	MAG
Polaridade	Positivo
Tensão de voltagem	17,3 v.
Tipo de gás	CO ₂ + O ₂ + Ar = 8% + 2% + 90% (Balanceado)
Vazão de gás	20 litros/min.
Quantidade de camadas a soldar	3 camadas no ø e 2 camadas no topo
Sentido da aplicação	Cordões verticais

Após a soldagem, foi realizado um alívio de tensões nas ferramentas com aquecimento a uma temperatura de 400°C, durante um tempo de 5 horas, para reduzir as tensões internas no material gerado pelo processo de soldagem.

b) Solda 2 – TIG

O processo utilizado para soldar o material número 2 foi o *Tungsten Inert Gas* (TIG), que é caracterizado por oferecer uma união dos materiais por um arco estabelecido entre um eletrodo de tungstênio e a peça. Com este processo se obtém soldas de alta qualidade, porém sua taxa de deposição é baixa.

Os parâmetros do processo utilizados para realizar a solda número 2, encontram-se descrito no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Parâmetros do processo utilizados para realizar a solda número 2.

PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDA 2	
Diâmetro do eletrodo	3,2 mm
Tipo de processo	TIG
Corrente (Amperagem)	90 A
Polaridade	Invertido
Tipo de gás	Argônio puro
Vazão de gás	10 litros/min.
Quantidade de camadas a soldar	4 camadas no \varnothing e 2 camadas no topo
Sentido da aplicação	Cordões verticais
Frequência da aplicação	Direta

Da mesma forma que a solda número 1, após a soldagem, foi realizado um alívio de tensões nas ferramentas com aquecimento a uma temperatura de 400°C, durante um tempo de 5 horas, para reduzir as tensões internas no material gerado pelo processo de soldagem.

Tanto a soldagem MAG (solda1) quanto a TIG (solda 2), apresentam um visual na região soldada conforme foto na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Punção representando a solda 1 e 2

3.2.1 Atividades posteriores à soldagem

Após a recuperação com solda nas ferramentas, algumas atividades são necessárias e ocorreram, conforme descrito a seguir:

- As ferramentas foram torneadas para retirar o excesso de solda. Este processo consiste em pré usinar a ferramenta de maneira que a geometria do punção se aproxime da geometria final. Este processo foi realizado em um torno da marca Romi, modelo I - 40;
- Reusinadas em torno CNC para retomarem às condições dimensionais de desenho, este processo consiste em retornar as condições dimensionais para forjamento. Este processo foi realizado em um torno CNC da marca Index, modelo G 300;
- Após o processo de torneamento, os punções são polidos manualmente para que obtivesse a especificação do acabamento superficial da região de estudo que é $Ra = 0,4$.

Foram realizados testes de dureza antes dos processos termoquímicos em corpos de prova. Isto se faz necessário para verificar como se encontra a dureza da solda. Na Tabela 3.4 se encontra os valores.

Tabela 3.4 - Composição química do material soldado

MEDIÇÃO DE DUREZA APÓS O PROCESSO DE SOLDAGEM					
Especificação de dureza: 50 a 55 HRC					
	Solda 1 (HRC)			Solda 2 (HRC)	
Medição	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2	Medição	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2
1	53	52	1	50	53
2	52	54	2	52	52
3	51	53	3	51	51
Média	52	53	Média	51	52

- Enviadas para o tratamento de nitretação gasosa. O processo de nitretação gasosa utilizado para os punções foi o “Floer” ou também conhecido como processo de duplo estágio, que visa diminuir a formação de camada branca para posterior revestimento com PVD.

Para a formação de espessuras de camada diferentes foram utilizados tempos diferentes de processo. O Quadro 3.3 apresenta os parâmetros do processo de nitretação.

Quadro 3.3 - Parâmetros do processo de nitretação

PARÂMETROS DO PROCESSO DE NITRETAÇÃO		
Camada	Menor	Maior
Forno	Nitrex BTQ-669	
Processo	Nitreg® Nitretação com Potencial de Nitrogênio controlado	
Tempo	03:00 hr	10:00 hr
Espessura camada	0,10 mm	0,13 mm

O tempo de 3 horas de nitretação foi escolhido pelo fato deste tempo ser o tempo utilizado no processo atual. O tempo de 10 horas foi determinado por se tratar de um tempo um pouco maior que 3X que o atual e ser ainda financeiramente possível de ser utilizado.

A nitretação é um processo de difusão, portanto tempos muito longos não aumentam significativamente a camada nitretada, existe um ponto de saturação do processo que não é aplicável devido ao custo do processo e a camada de difusão gerada.

O recobrimento de PVD escolhido para a época era um novo revestimento cerâmico, uma novidade entre os revestimentos nanocompostos, disponíveis no mercado.

O tipo de cobertura utilizado foi:

TiN+nACo+AlCrN+AlCrON.

As vantagens deste revestimento são descritas a seguir:

- Proteção ao desgaste por adesão e abrasão;
- Proteção contra oxidação evitando a difusão do oxigênio;
- Isolação química e térmica.

As características do revestimento seguem descritas a seguir:

- Taxa de nitrogênio e oxigênio N/O: 50/50% - 80/20%;
- Espessura da camada: 4 a 18 μm ;
- Modulo de elasticidade: 400 GPa.

Planejou-se então, a execução do teste de forjamento. O forjamento experimental ocorreu na prensa automática Hatebur modelo AMP 70, na qual foram fixados os parâmetros conforme descrito a seguir:

- O número de golpes por minuto, que é um indicativo da velocidade da máquina, foi fixado em 56 golpes por minutos (gpm). Este valor representa a condição normal de

forjamento. Isto se fez necessário para que o tempo de contato do produto com a ferramenta, bem como, a taxa de deformação, influencie na avaliação do desgaste;

- Os punções utilizados, foram retirados após o forjamento de 3000 peças. Este parâmetro foi fixado para que todos os punções estejam com o mesmo tempo de trabalho e sejam avaliados o seu desgaste com vida similar.

3.2 Medição do Desgaste

A medição do desgaste das ferramentas utilizadas para forjar as 3000 peças, foi realizada pelo processo de varredura (do inglês *scanner*) com um braço Romer Absolute, modelo 7535 SI/SE, com precisão volumétrica de +/- 0.081 mm, permitindo uma análise eficiente. Este equipamento encontra-se ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Braço Romer Absolute 7535 SI/SE

A medição por varredura consiste na produção de um feixe de laser, pelo braço, que ao entrar em contato com o objeto a ser medido captura cerca de 460.000 pontos por segundo e com um software de medição como o utilizado Polyworks 12.1.19 é gerada uma nuvem de pontos que já representa a peça a ser medida. São necessárias diversas passagens do feixe e a formação de diversas nuvens para a formação da forma do produto final a ser medido. Após toda a área a ser avaliada estiver representada em diversas nuvens de ponto sem nenhuma

falha ou furo é realizada a junção das várias nuvens de ponto em modelo geométrico 3D utilizando o software.

Com este modelo 3D obtido da medição por varredura é comparado com o seu padrão que no caso deste trabalho é o modelo 3D da ferramenta de forjamento.

Com o modelo 3D alinhado com o modelo obtido a partir das nuvens de ponto faz-se a medição do desgaste que para este trabalho foi considerada a maior distância obtida da diferença entre o modelo 3D e o modelo obtido com a nuvem de pontos.

A Figura 3.6 exemplifica a nuvem de pontos e a figura 3.7 exemplifica o corte no modelo no qual foi coletada a maior distância entre o modelo 3D e o modelo gerado pelas nuvens de ponto.

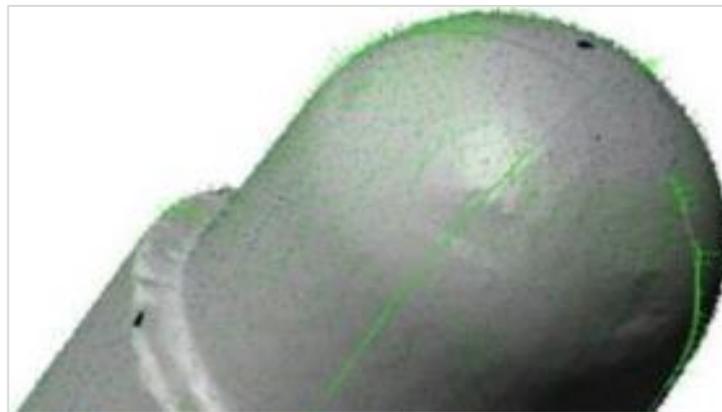


Figura 3.6 - Análise da maior distância do punção com solda 1, nitretação com maior camada e com PVD.

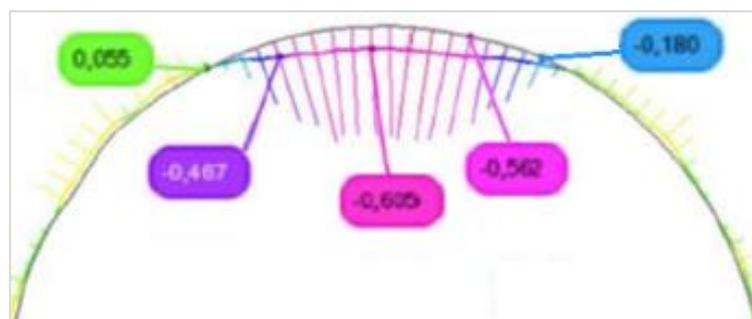


Figura 3.7 – Análise da maior distância (0,605 mm, maior distância entre os modelos)

Na figura 3.7, o modelo CAD é representado pela cor cinza às outras cores representam os desvios encontrados pela medição do desgaste. Estes desvios também estão representados numericamente em mm nos balões da figura.

Após medição dos punções utilizados, foram coletados os dados obtidos que se apresentam no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Dados dos punções utilizados

DADOS DOS PUNÇÕES UTILIZADOS						
Ordem	Ponto Central	Blocks	Solda	Nitretação	PVD	Maior Distância (mm)
1	1	1	Solda 2	menor camada	Sem	0,499
2	1	1	Solda 1	menor camada	Com	0,912
3	1	1	Solda 2	maior camada	Com	0,605
4	1	1	Solda 2	maior camada	Sem	0,244
5	1	1	Solda 1	menor camada	Sem	0,547
6	1	1	Solda 1	menor camada	Sem	0,565
7	1	1	Solda 1	maior camada	Sem	0,344
8	1	1	Solda 1	maior camada	Com	0,524
9	1	1	Solda 2	menor camada	Sem	0,527
10	1	1	Solda 2	menor camada	Com	0,930
11	1	1	Solda 2	maior camada	Com	0,598
12	1	1	Solda 1	menor camada	Com	0,898
13	1	1	Solda 1	maior camada	Com	0,560
14	1	1	Solda 2	maior camada	Sem	0,299
15	1	1	Solda 2	menor camada	Com	0,805
16	1	1	Solda 1	maior camada	Sem	0,324

3.3 Simulação de Forjamento

Para um melhor entendimento dos mecanismos de desgaste e o que ocorre durante o forjamento, foram realizadas simulações numéricas para isto foi utilizado o *software* Forge 2014 em 2 D.

Nas simulações, as regiões da ferramenta são diferenciadas por cores, representando assim, maior intensidade com cores quentes e menor intensidade com cores frias do item que está sendo avaliado.

Na simulação foram verificados os seguintes itens para avaliação do desgaste:

- Temperatura da ferramenta durante a simulação de forjamento;
- Perfil de desgaste do punção (MPa x mm).

O desgaste medido no simulador do *software* considera a região de maior tensão na ferramenta (MPa), e a região onde o ponto em estudo possui maior espaço percorrido (mm) gerando a unidade MPa x mm. Através destas considerações o *software* aponta a região na qual incide maior desgaste.

Na Figura 3.8, se demonstra a primeira simulação, a distribuição da temperatura na ferramenta que ocorre no forjamento.

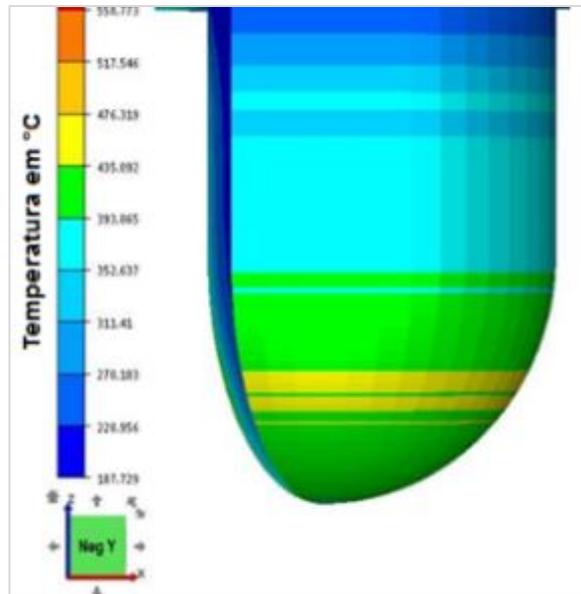


Figura 3.8 - EDX Distribuição de temperatura na simulação de forjamento

Na Figura 3.9, se demonstra a segunda simulação, a distribuição de desgaste (MPa x mm) na ferramenta que ocorre no forjamento.

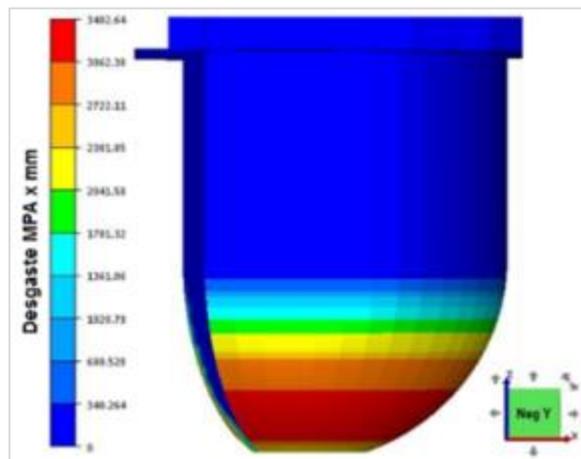


Figura 3.9 - EDX Distribuição de desgaste (MPa x mm) na simulação de forjamento

Na intercessão das duas simulações, tem-se a distribuição da temperatura e a distribuição de desgaste. Pode-se notar que a região de maior temperatura é próxima da região de maior desgaste, conforme demonstra a Figura 3.10.

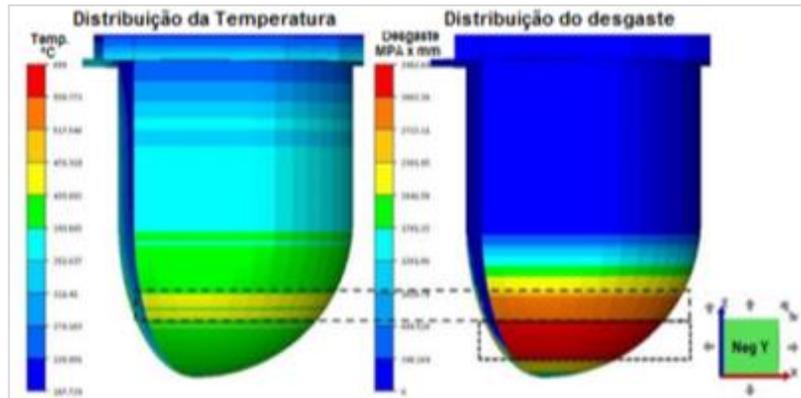


Figura 3.10 - Distribuição de temperatura e desgaste na simulação de forjamento

Na figura 3.10 nota-se regiões de intensidade de desgaste diferentes conforme segue:

- Região do raio como sendo a mais crítica.
- Região da lateral como sendo a menos crítica
- Região da ponta tendo um desgaste intermediário.

Na sequência foi simulado variando a temperatura sendo possível avaliar o perfil da superfície do punção com diferentes níveis de temperaturas iniciais, conforme Figura 3.11.

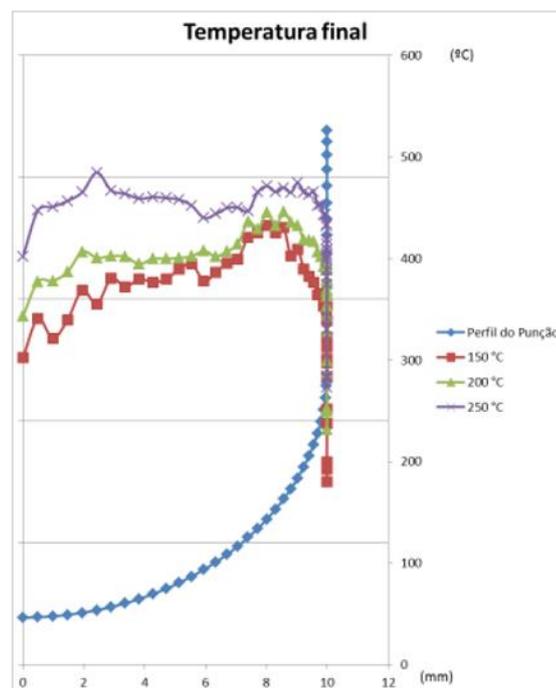


Figura 3.11 - Gráfico de temperatura (°C) com diferentes temperaturas iniciais

Através da figura 3.8 nota-se que a variação de temperatura inicial do punção, não altera a região que alcança a maior temperatura durante o final da conformação. O eixo X representa o diâmetro do punção em mm e o eixo Y a temperatura atingida em °C.

Noutra simulação foi possível avaliar o perfil de desgaste no punção com diferentes níveis de temperaturas do punção iniciais (150, 200 e 250 °C), conforme Figura 3.12.

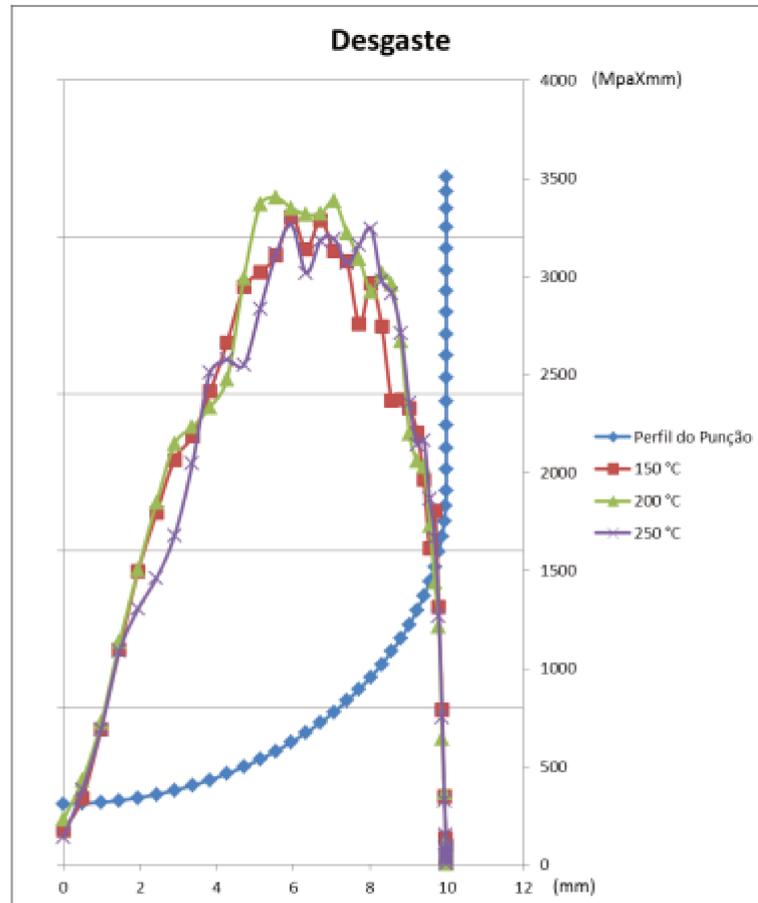


Figura 3.12 - Gráfico de desgaste (MPa X mm) com diferentes temperaturas iniciais

Na figura 3.12 se nota que a variação de temperatura inicial do punção não altera a região que alcança maior desgaste durante o final da conformação, não sendo crítica para identificar qual é a região que atinge maior desgaste no final do forjamento.

O eixo X representa o diâmetro do punção em mm e o eixo Y a desgaste em MpaXmm.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo se encontra as análises dos resultados do procedimento experimental realizado, com utilização do embasamento teórico pesquisado e elaborado no capítulo 2.

4.1 Análise Estatística

Para efetuar a avaliação estatística foi utilizado o *software* Minitab, versão 16, com o qual se realizou: Análise de variância; Gráfico de Pareto; Gráfico dos principais efeitos; Gráfico das interações; Gráfico de Resíduos; Histograma; Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, assim sendo:

a) Análise da variância:

O Quadro 4.1 mostra o resultado da análise de variância do desgaste do punção.

Análise de variância para o Desgaste						
Fonte	GL	SS	SS Ajust.	MS Ajust.	F	P-Value
Principais efeitos	3	0,685463	0,685463	0,228488	168,48	0,000
Tipo de Solda	1	0,001743	0,001743	0,001743	1,29	0,290
Nitretação	1	0,298389	0,298389	0,298389	220,02	0,000
PVD	1	0,385331	0,385331	0,385331	284,13	0,000
Interações de 2 ordem	3	0,012413	0,012413	0,004138	3,05	0,092
Solda*Nitretação	1	0,001502	0,001502	0,001502	1,11	0,323
Solda*PVD	1	0,004064	0,004064	0,004064	3,00	0,122
Nitretação*PVD	1	0,006848	0,006848	0,006848	5,05	0,055
Interações de 3 ordem	1	0,003393	0,003393	0,003393	2,50	0,152
Solda*Nitretação*PVD	1	0,003393	0,003393	0,003393	2,50	0,152
Erro Residual	8	0,010849	0,010849	0,001356		
Erro Puro	8	0,010849	0,010849	0,001356		
Total	15	0,712118				

Analisando a distribuição F, pode-se determinar a probabilidade da significância estatística para as variáveis de influencia:

Portanto se tem:

Valor de F tabelado = Grau de liberdade (GL) para cada fator = 1
Grau de liberdade para o Erro = 4
Significância = 5%
 $F_{0,05;1,4} = 7,71$

Quadro 4.1 - Análise de variância do desgaste do punção

A partir dos resultados obtidos na análise de variância que está representado no quadro 3.5, foram criados os gráficos de Pareto, principais efeitos e interações.

b) Gráfico de Pareto:

O gráfico de Pareto serve para determinar o grau de magnitude e de importância do efeito. O gráfico mostra o valor absoluto dos efeitos e desenha uma linha de referência sobre o gráfico. Qualquer efeito que sua extensão passar por esta linha é potencialmente importante. A Figura 4.1 apresenta o gráfico de Pareto dos efeitos.

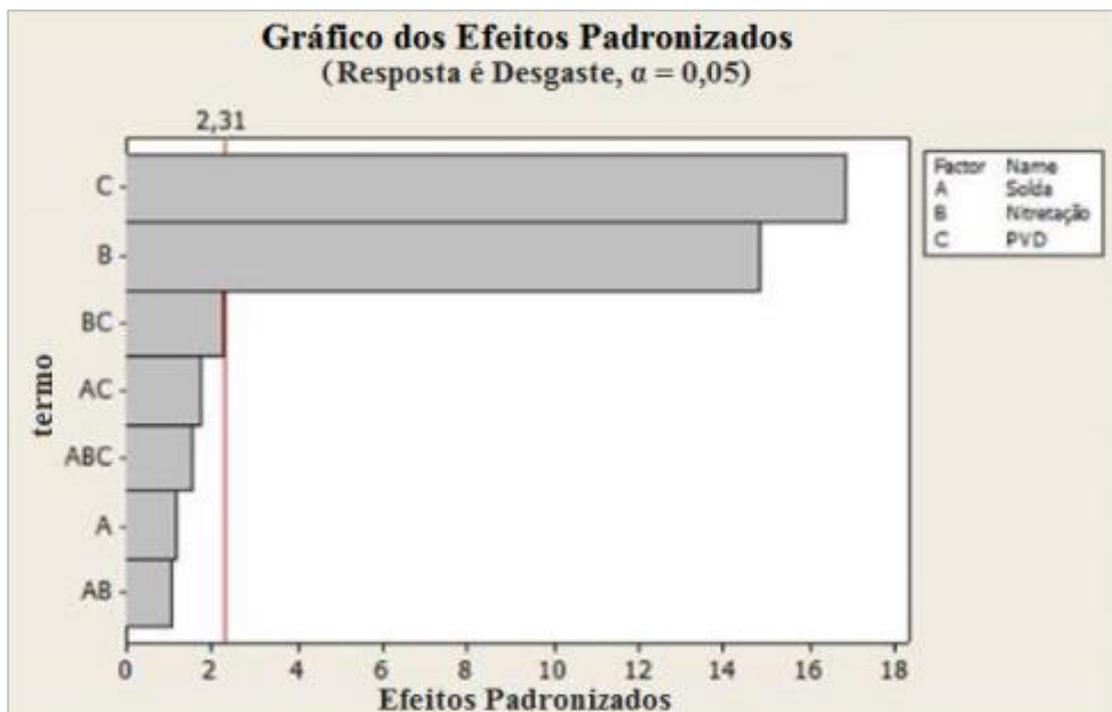


Figura 4.1 - Gráfico de Pareto dos efeitos

Para este experimento é possível notar no gráfico que o fator PVD e a nitretação tem significância estatística nos resultados dos experimentos utilizando-se uma confiança de 95%.

c) Gráfico dos principais efeitos:

Este gráfico é usado em conjunto com a análise de variância e planejamento de experimento para examinar a diferença entre níveis de um ou mais fatores. Um fator principal está presente, quando a diferença entre níveis afeta a resposta. Quanto mais inclinada à linha maior é a sua importância.

Os padrões a serem observados, são:

- Quando a linha está na horizontal (paralela ao eixo X), então não existe nenhum efeito principal. Cada nível dos fatores afeta a resposta de uma mesma maneira e a resposta é a mesma para todos os níveis dos fatores.
- Quando a linha não está na horizontal, então existe um efeito principal. Diferentes níveis dos fatores afetam a resposta diferentemente. Quanto maior a inclinação da linha, maior a magnitude do efeito.

Na Figura 4.2, se apresenta o gráfico mostrando os principais efeitos para o desgaste.

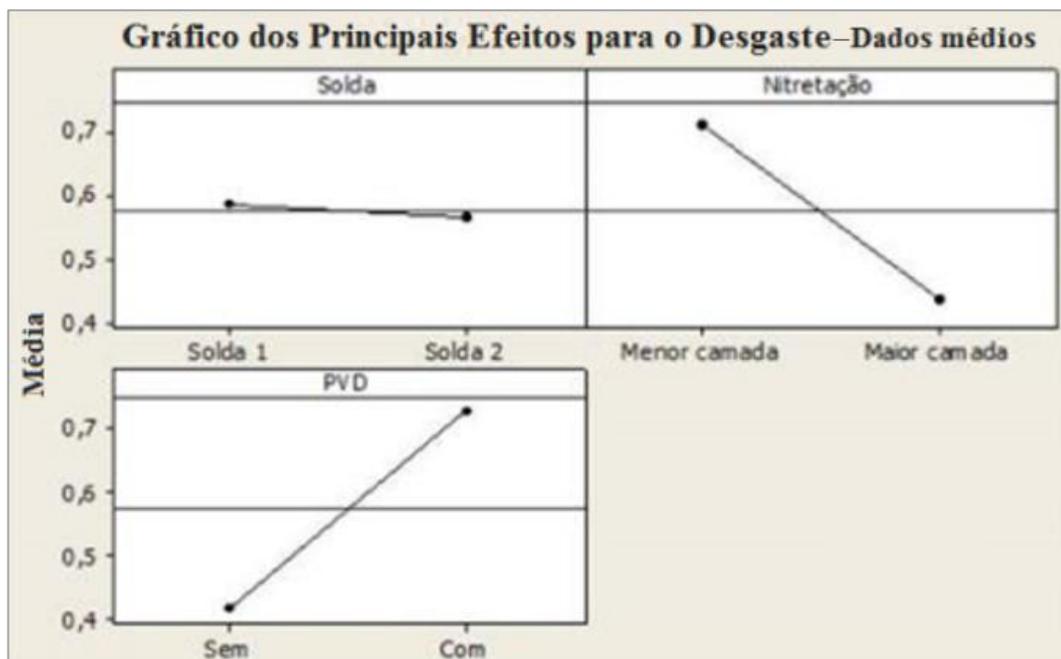


Figura 4.2 - Gráfico dos efeitos principais para o desgaste

O gráfico indica que para o tipo de solda não houve um efeito significativo no resultado do desgaste, porém, para o tipo de nitretação, o efeito já possui significância estatística. De acordo com o gráfico é possível notar que a nitretação com maior camada obteve menor desgaste. Para o tipo de PVD, o efeito também foi significativo no desgaste, indicando que as ferramentas sem PVD obtiveram menor desgaste.

d) Gráfico das interações:

O gráfico de interações gera um único gráfico para dois fatores, também pode ser uma matriz de gráficos de interação de três a nove fatores. Ele representa um gráfico de médias de cada nível de um fator com o nível do segundo fator mantido constante.

As interações estão presentes quando a resposta de um fator depende do nível do outro fator. Linhas paralelas indicam que não existe interação. Quanto maior for o afastamento das linhas do grau de paralelo, maior é o grau de interação.

A Figura 4.3, apresenta o gráfico indicando os tipos de interações para os efeitos em estudo com relação ao desgaste.

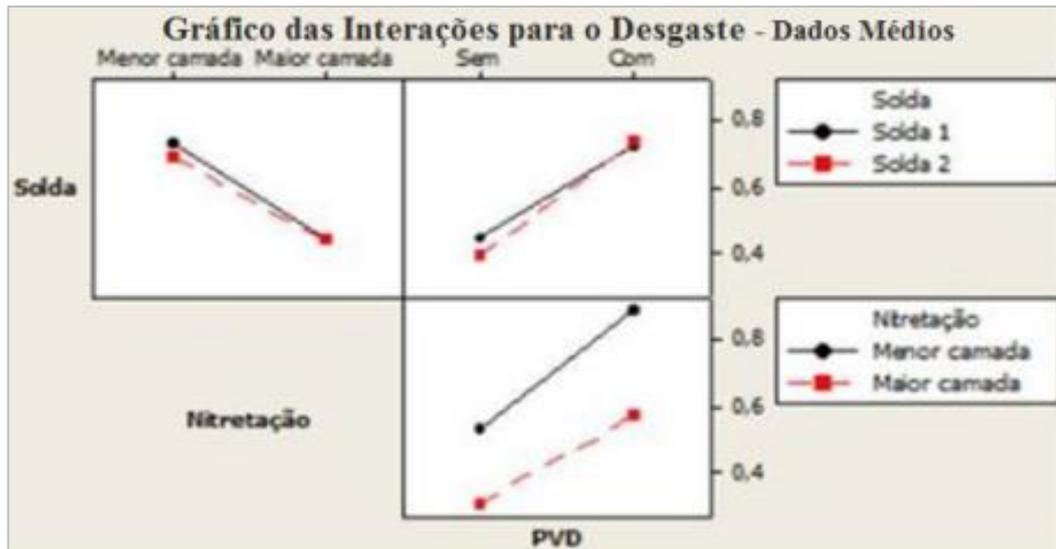


Figura 4.3 - Gráfico das interações de 2 ordem para os efeitos para o desgaste

Como é apresentado no gráfico anterior, não houve interações com significância estatística, pois em nenhum momento, as linhas apresentaram os efeitos cruzados.

Vale lembrar que não houve interações para os níveis dos fatores estudados.

e) Gráfico de Resíduos:

O gráfico residual serve para avaliar o quanto o seu modelo está ajustado ao processo, conforme Figura 4.4, onde o gráfico indica os resíduos para este trabalho.

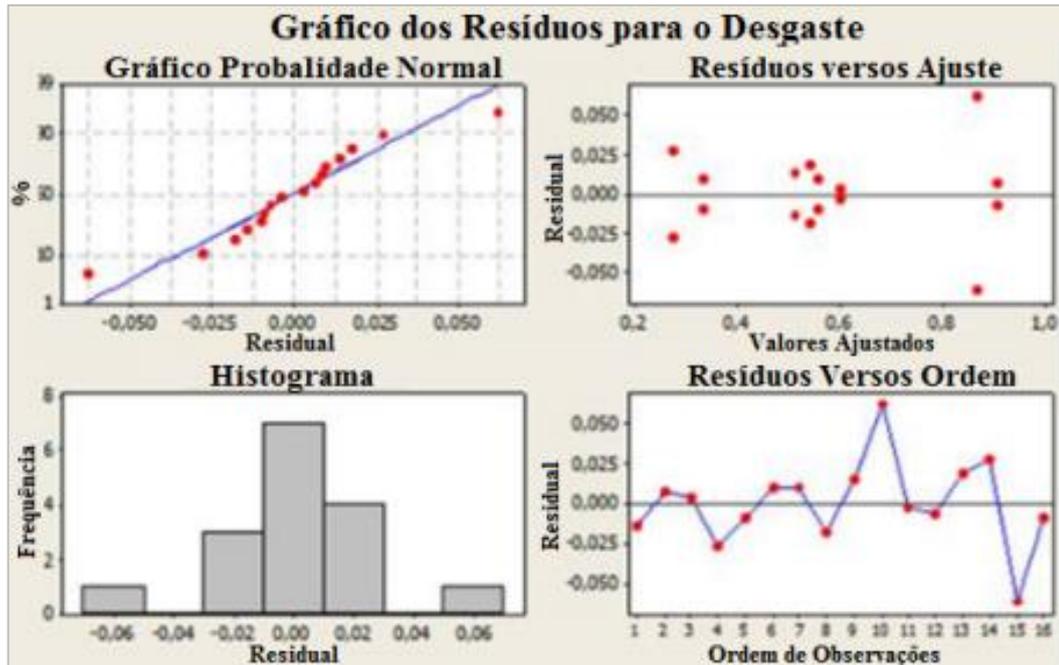


Figura 4.4 - Gráfico de resíduos, Probabilidade Normal, Histograma, Resíduos X Ajustes; Resíduos X Ordem

Na figura anterior tem-se os quatro gráficos, descritos conforme segue:

- Gráfico probabilidade normal dos resíduos: Os pontos neste gráfico devem normalmente formar uma linha reta se os resíduos são normalmente distribuídos. Se os pontos se afastarem da linha a suposição de normalidade pode ser inválida. Se os dados têm menos de 50 observações o gráfico pode apresentar uma curvatura nas caudas mesmo que os resíduos estejam normalmente distribuídos. A medida que o número de observações diminui o gráfico de probabilidade pode mostrar variação substancial da linearidade mesmo se os resíduos são normalmente distribuídos.

Os dados apresentados neste trabalho apresentam uma linha reta não indicando problemas de resíduos;

- Histograma: O histograma de residuais é uma ferramenta para mostrar as características gerais dos dados, valores típicos, dispersão ou variação e forma e os valores não usuais nos dados.

As caudas longas no gráfico indicam assimetria nos dados. Se uma ou duas barras estão longe uma da outra, estes pontos podem indicar pontos fora da curva, porque a aparência do gráfico muda, dependendo do número de intervalos usados para o grupo de dados.

O gráfico apresentado neste trabalho não indica problemas em seus resíduos.

- Resíduos versus ajustes: Este gráfico deve mostrar um padrão randomizado dos resíduos em ambos os lados. Se um ponto surgir fora da maioria dos pontos, ele é considerado

como um ponto fora da curva. Também não pode existir nenhum padrão reconhecível no gráfico. Os seguintes padrões indicam erro que não é randômico, assim sendo:

- Uma serie de pontos aumentando ou diminuindo;
- Uma predominância de resíduos negativos ou positivos;
- Padrões como resíduos aumentando com aumento dos ajustes.

Os dados apresentados e a forma do gráfico não indicam qualquer padrão de distribuição concluindo que não há problema de resíduos para este trabalho.

- Resíduos versus ordem: Este é o gráfico em que os dados coletados podem ser usados para descobrir erros não randômicos, especialmente relacionados há tempos. Uma correlação positiva é indicada pelo agrupamento de resíduos de mesmo sinal. Uma correlação negativa é indicada pela rápida mudança em sinais de resíduos consecutivos.

Os dados apresentados e a forma do gráfico, indicam um padrão de troca de sinal, portanto, conclui-se que não há problema de resíduos para este trabalho.

Discussões

Através da análise estatística os fatores “PVD” e “Nitretação” possuem influência nos resultados de desgaste obtidos através do experimento com um grau de confiança de 95%. Já o fator “Solda” não houve influência estatística nos resultados assim como as interações entre os fatores.

A utilização do PVD influenciou negativamente gerando um maior desgaste na ferramenta, assim como a nitretação com menor camada.

A combinação que obteve o menor desgaste foi a solda 2 com maior camada de nitretação e sem a utilização do processo de recobrimento PVD.

4.2 Ensaio Metalográfico

Para melhor entendimento dos fenômenos que ocorreram no desgaste dos punções, foi realizado ensaios e análise metalográfica dos corpos de prova e das ferramentas para algumas condições.

Ao longo da análise encontram-se apresentadas, as fotos dos corpos de prova, cada qual, com sua identificação da região da análise e, ao seu lado, uma vista ampliada com identificação dos pontos analisados.

Na sequência, encontram-se as imagens das regiões analisadas e suas características visuais.

Por fim, o gráfico do perfil de dureza, fechando a análise de cada condição dos corpos de prova.

4.2.1 *Análise dos corpos de prova*

Os corpos de prova foram construídos para que seja avaliado, qual foi o resultado dos diversos processos que foram aplicados para a recuperação da ferramenta em estudo. Como o ensaio metalográfico é um ensaio destrutivo, não seria possível avaliar os processos de recuperação e utiliza-los para o procedimento experimental.

Corpo de prova 1 - Condição: Preparado com Solda 2, menor camada, com PVD.

A Figura 4.5, apresenta à esquerda, a vista geral do corpo de prova e a direita, o *layout* do ensaio metalográfico do corpo de prova na condição indicada acima:

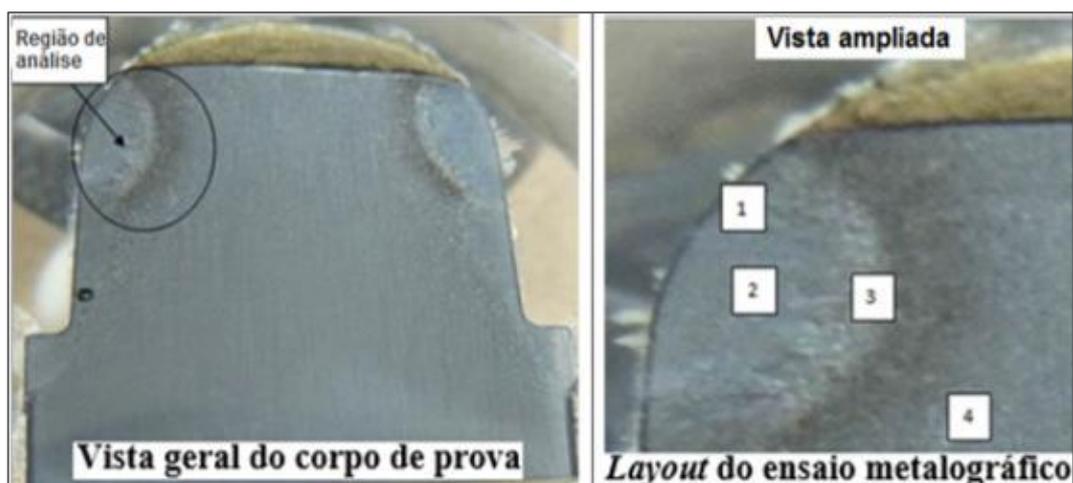


Figura 4.5 - Corpo de prova 1 - Vista geral e *Layout* do ensaio metalográfico.

Na Figura 4.6, se apresenta a região 1, na qual é possível verificar a região que recebeu o tratamento de nitretação.



Figura 4.6 - Região 1: Camada nitretada

A Figura 4.7 apresenta ainda a região 1, porém, com um aumento na ampliação. Nela pode-se ver a camada nitretada com maiores detalhes, com alguns precipitados de nitreto nos contornos de grão do material, possibilitando a verificação da camada de PVD na superfície da ferramenta.

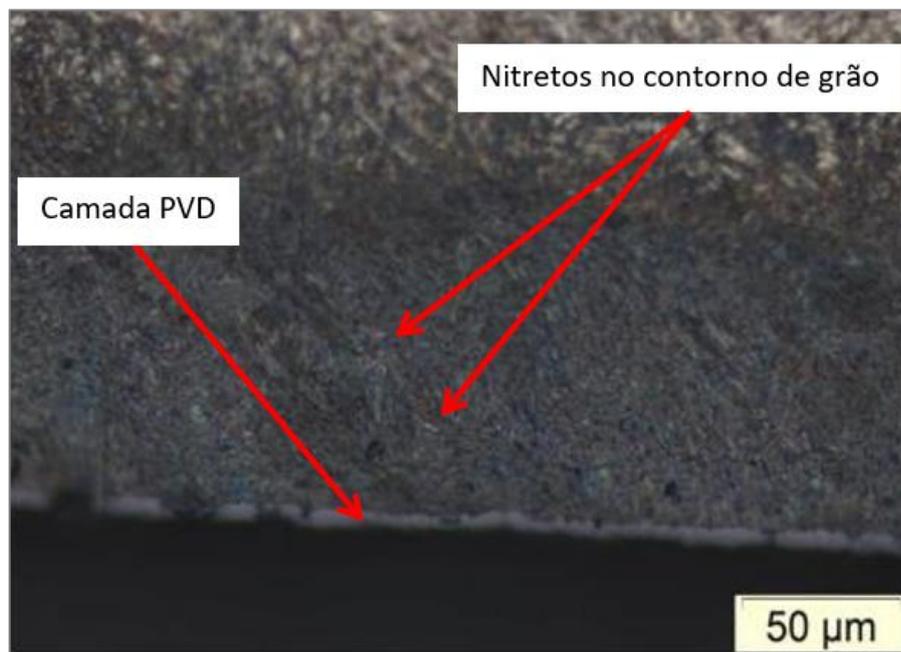


Figura 4.7 - Região 1: Camada nitretada, nitretos precipitados no contorno de grão e camada de PVD.

Na Figura 4.8, apresenta-se a região 2, mostrando a camada soldada com uma estrutura martensítica revenida.

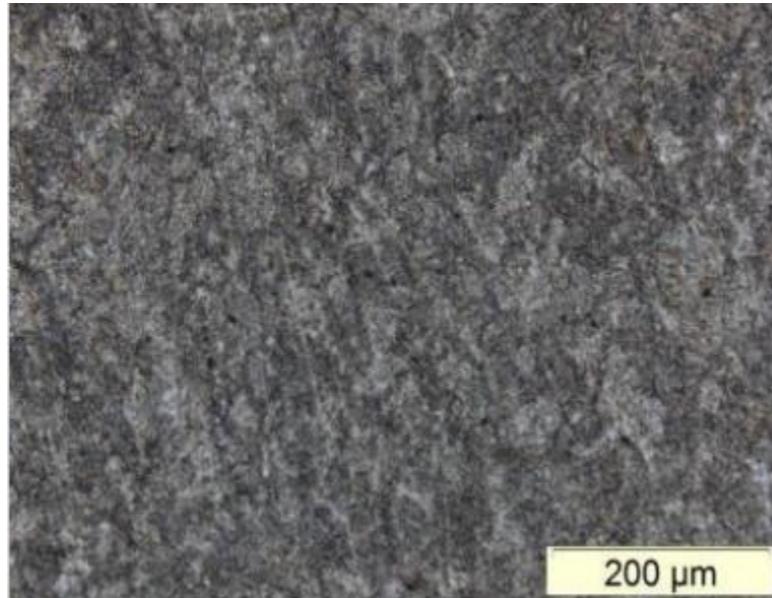


Figura 4.8 - Região 2: Camada soldada microestrutura martensítica fina e revenida.

Na Figura 4.9, apresenta-se a região 3, onde ocorre a fusão do material e com a temperatura muito elevada, sendo possível notar o crescimento de grão austenítico.

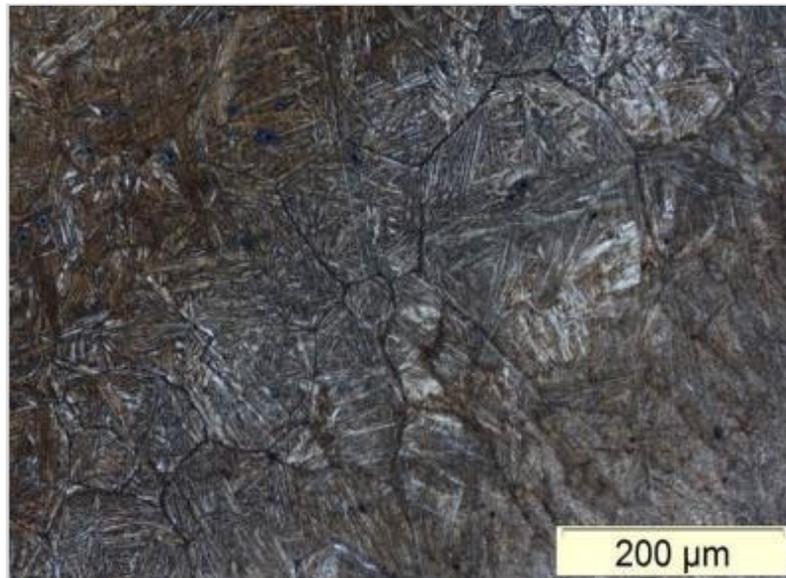


Figura 4.9 - Região de fusão do material base com a solda caracterizada pelo tamanho de grão austenítico.

Na Figura 4.10, se apresenta a região 4, na qual é possível notar o material base da ferramenta.

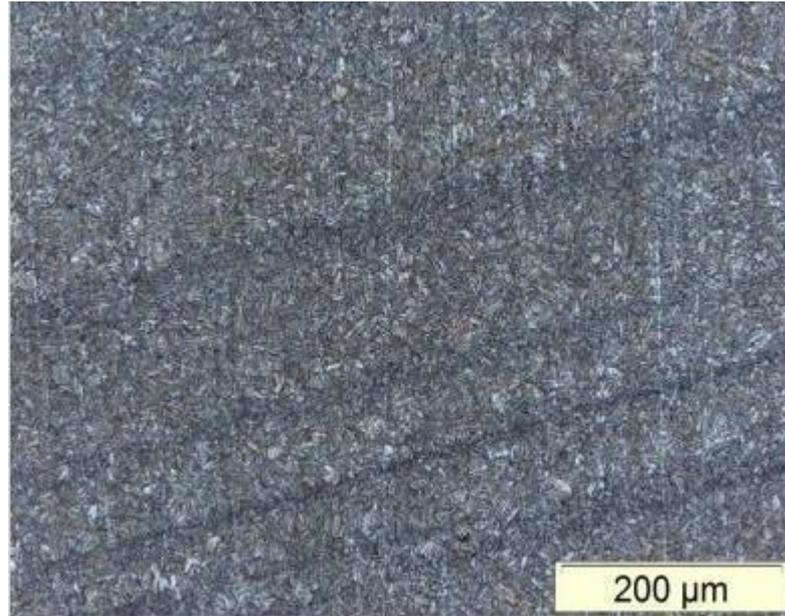


Figura 4.10 - Material base da ferramenta

O perfil de Dureza (HV) do corpo de prova 1 - Condição: preparado com Solda 2, menor camada, com PVD é mostrado no Gráfico 4.1.

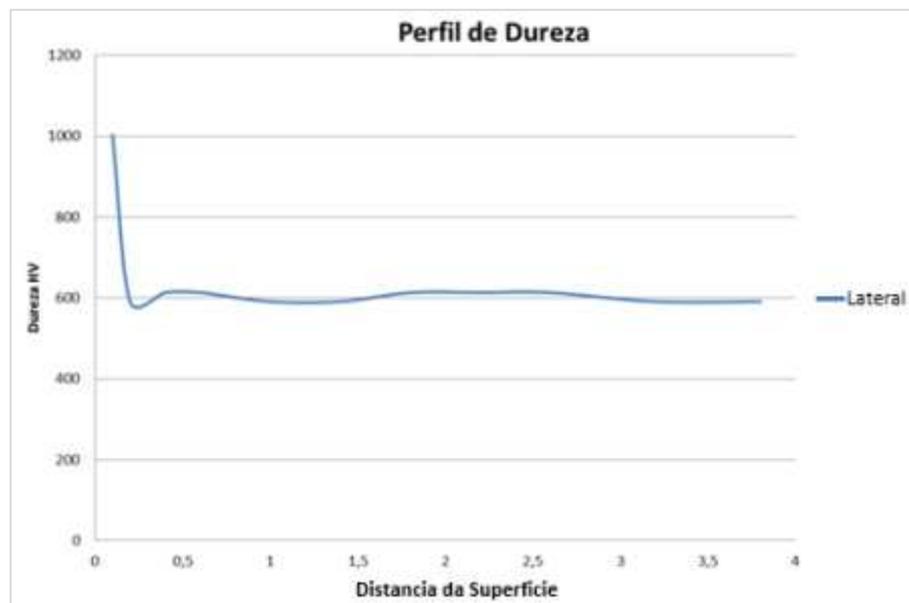


Gráfico 4.1 - Corpo de prova 1: Região lateral, raio e ponta do punção.

Corpo de prova 2 - Condição: Preparado com Solda 2, maior camada, com PVD.

A Figura 4.11 apresenta, à esquerda, a vista geral do corpo de prova, e a direita, o *layout* do ensaio metalográfico do corpo de prova na condição indicada acima:



Figura 4.11 - Corpo de prova 2 - Vista geral e *Layout* do ensaio metalográfico

Na Figura 4.12, apresenta-se a região 1, onde é possível verificar a região que recebeu o tratamento de nitretação.



Figura 4.12 - Região 1: Camada nitretada

Na Figura 4.13, ainda a região 1, porém, com um aumento na lente, onde se apresenta, a camada nitretada com maiores detalhes, sendo possível notar a camada de PVD na superfície da ferramenta e também a espessura da camada nitretada. Para este corpo de prova foi evidenciado a condição para o delineamento de experimento de “maior camada” na região

nitretada, indicando maior tempo do processo de nitretação, nota-se alguns precipitados de nitreto nos contornos de grão do material.

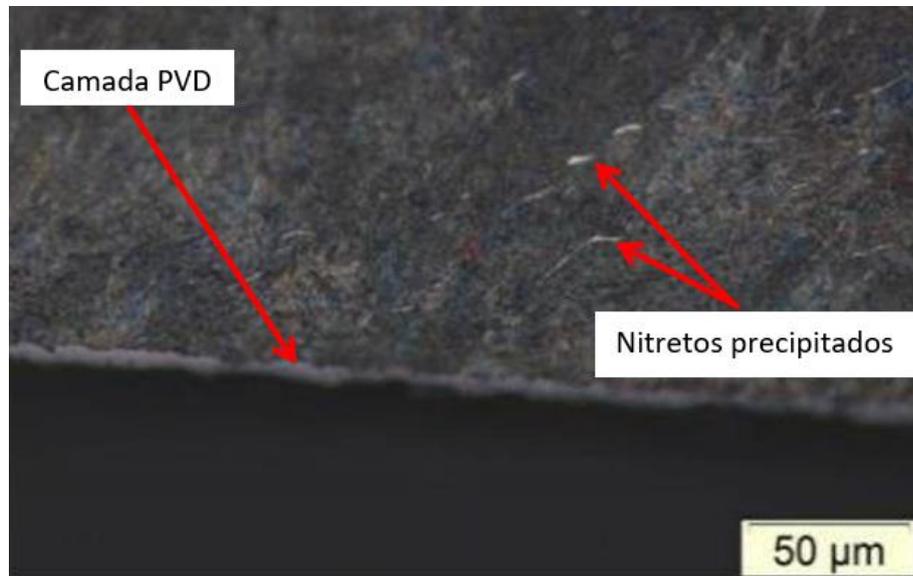


Figura 4.13 - Região 1: Camada nitretada, nitretos precipitados no contorno de grão e camada de PVD.

Na Figura 4.14, apresenta-se a região 2, mostrando a camada soldada, com uma estrutura martensítica revenida.

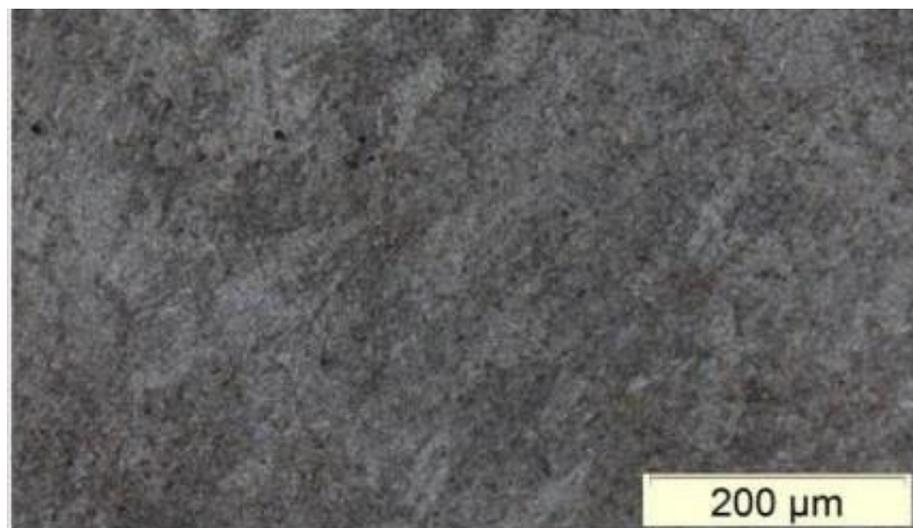


Figura 4.14 - Região 2: Camada soldada, microestrutura martensítica fina e revenida.

Na Figura 4.15, apresenta-se a região 3, mostrando a região onde ocorre a fusão do material em temperatura elevada, sendo possível observar, o crescimento de grão austenítico. De um lado o material soldado, de outro lado, o material base do aço ferramenta.

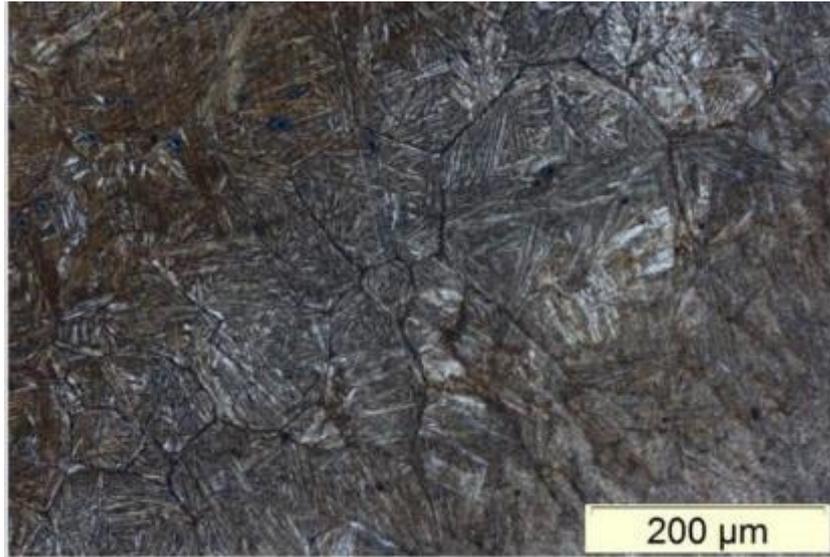


Figura 4.15 - Região 3: Local de fusão do material base com a solda caracterizada pelo tamanho de grão austenítico

Na Figura 4.16, apresenta-se a região 4, na qual é possível notar o material base da ferramenta.

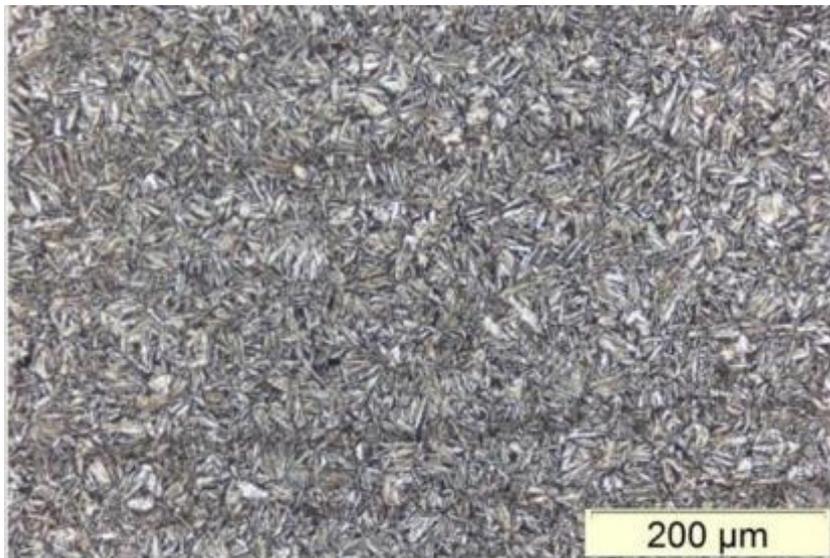


Figura 4.16 - Material base da ferramenta martensita fina e revenida.

O perfil de Dureza (HV) do corpo de prova 2 - Condição: Preparado com Solda 2, maior camada, com PVD é mostrado no Gráfico 4.2.

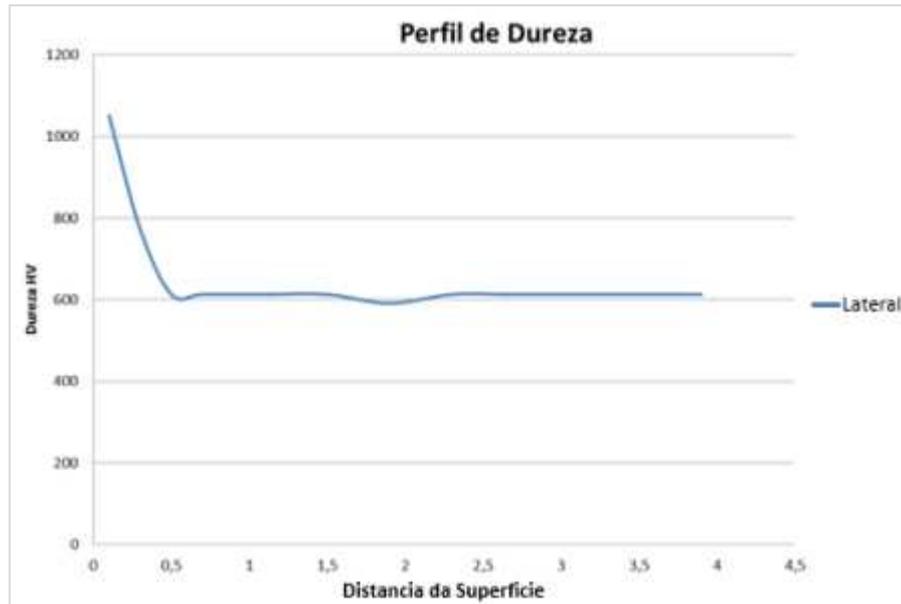


Gráfico 4.2 - Corpo de prova 2: Região lateral, raio e ponta do punção

Corpo de prova 3 - Condição: Preparado com Solda 1, menor camada, com PVD.

A Figura 4.17, apresenta à esquerda, a vista geral do corpo de prova e a direita, o *layout* do ensaio metalográfico do corpo de prova na condição indicada acima:

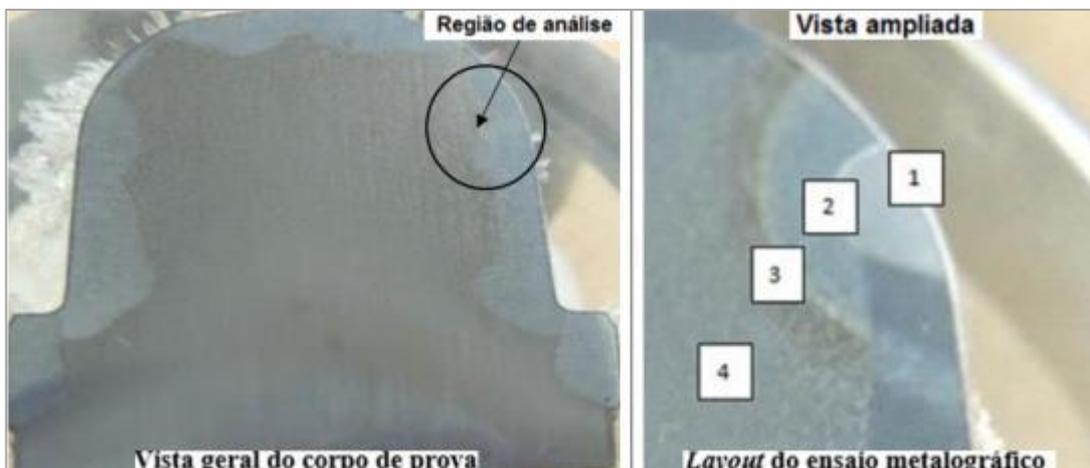


Figura 4.17 - Corpo de prova 3 - Vista geral e *Layout* do ensaio metalográfico.

Na Figura 4.18, apresenta-se a região 1, onde se nota a região que recebeu o tratamento de nitretação.



Figura 4.18 - Região 1: camada nitretada

Na Figura 4.19, ainda na região 1, porém com uma ampliação, encontra-se a camada nitretada com maiores detalhes, é possível notar a camada de PVD na superfície da ferramenta e também a espessura da camada nitretada menor para este corpo de prova.

Este corpo de prova evidencia a condição para o delineamento de experimento de menor camada na região nitretada, indicando menor tempo do processo de nitretação, nota-se alguns precipitados de nitreto nos contornos de grão do material.

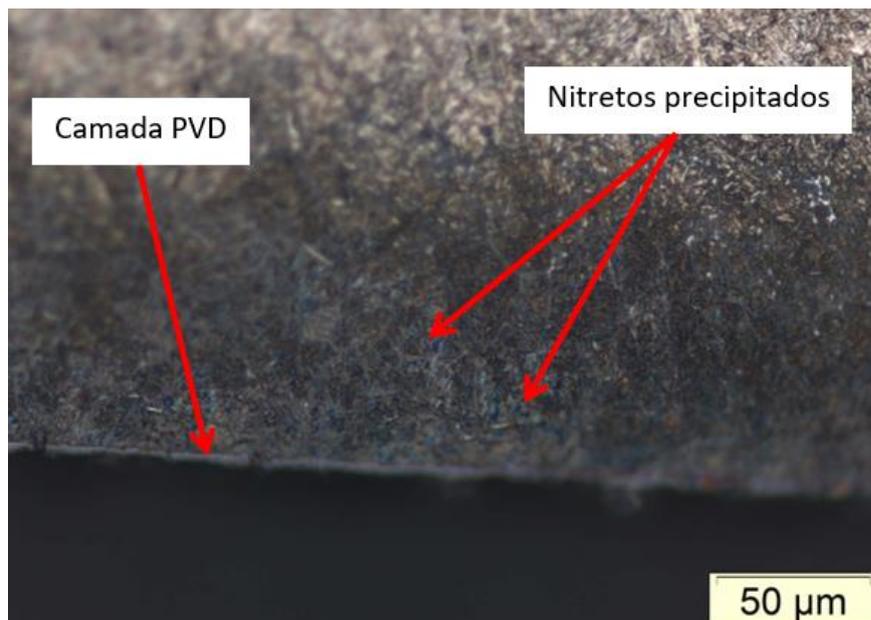


Figura 4.19 - Região 1: Camada nitretada, nitretos precipitados no contorno de grão e camada de PVD.

Na região 2, demonstrada na Figura 4.20, se encontra a camada soldada, com uma estrutura martensítica revenida e os pontos escuros são as inclusões do material da solda.

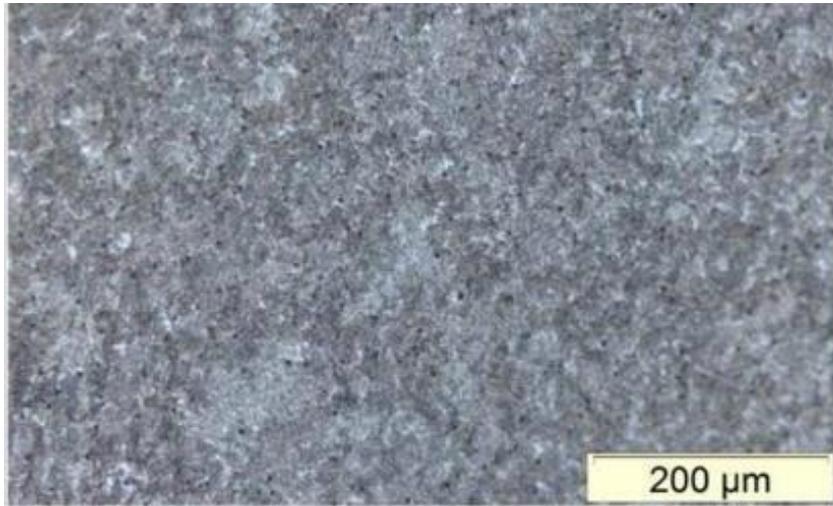


Figura 4.20 - Região 2: Camada soldada microestrutura martensítica fina e revenida.

Na região 3, demonstrada na Figura 4.21, encontra-se a região onde ocorre a fusão do material em uma temperatura muito elevada, sendo possível observar o crescimento de grão austenítico devido ao processo de solda. A estrutura bainítica está presente nesta região, de um lado, o material soldado, de outro lado, o material base do aço ferramenta, caracterizando-se a região mais frágil da solda.



Figura 4.21 - Região 3: Região de fusão do material base com a solda caracterizada pelo tamanho de grão austenítico.

Na Figura 4.22, apresenta-se a região 4, na qual é possível notar o material base da ferramenta

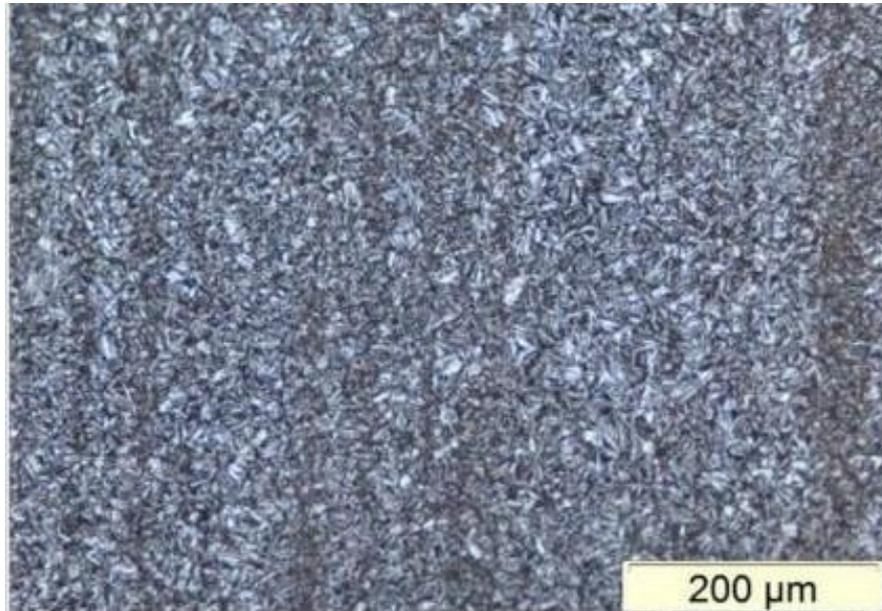


Figura 4.22 – Região 4: Material base da ferramenta martensita fina e revenida.

O perfil de Dureza (HV) do corpo de prova 3 - Condição: preparado com Solda 1, menor camada, com PVD é mostrado no Gráfico 4.3.

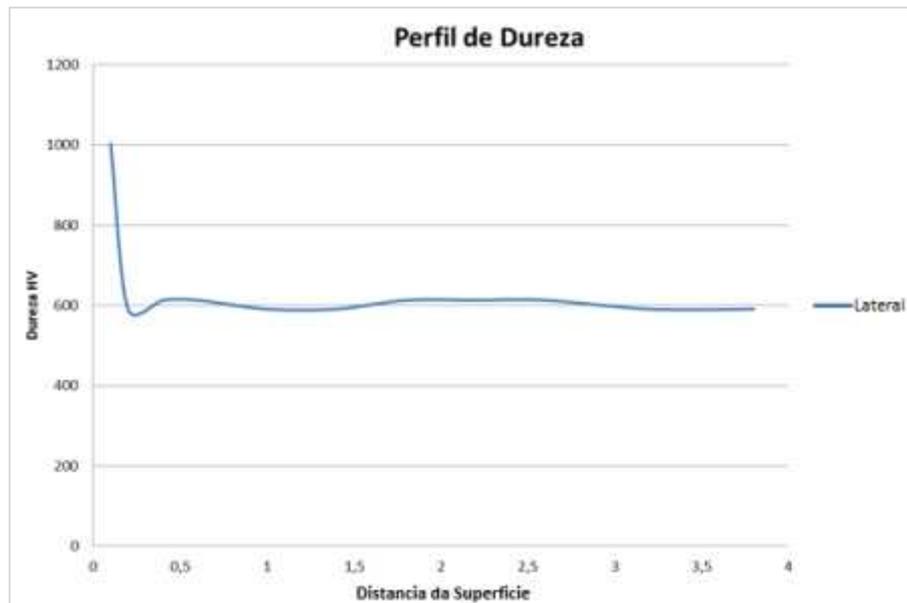


Gráfico 4.3 - Corpo de prova 3: Região lateral, raio e ponta do punção

Corpo de prova 4 - Condição: Preparado com Solda 1, maior camada, com PVD.

A Figura 4.23, apresenta à esquerda, a vista geral do corpo de prova e a direita, o *layout* do ensaio metalográfico do corpo de prova na condição indicada acima:

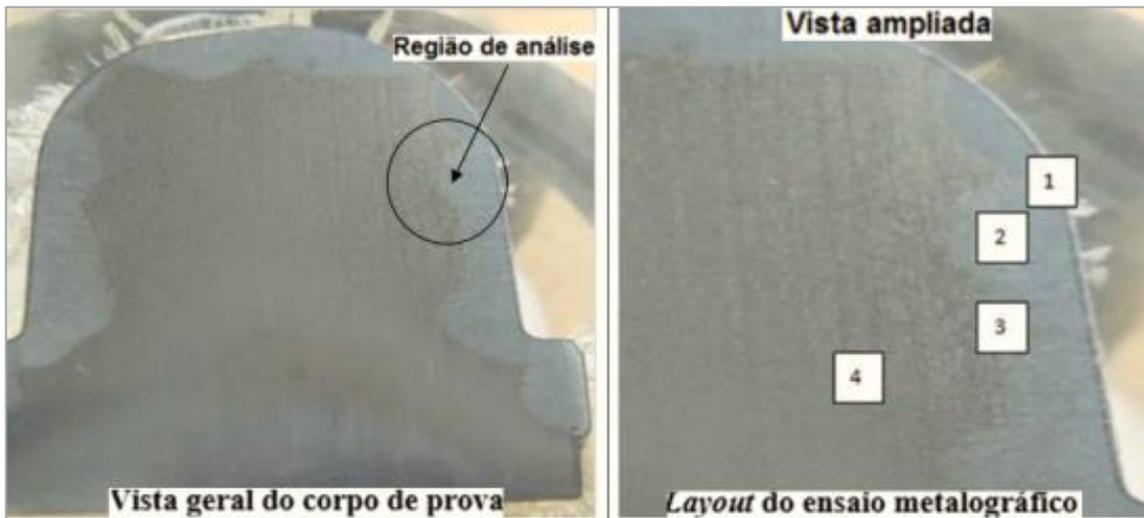


Figura 4.23 - Corpo de prova 4 - Vista geral e *Layout* do ensaio metalográfico

Na Figura 4.24, apresenta-se a região 1, na qual é possível verificar a região que recebeu a camada de nitretação.



Figura 4.24 – Região 1: camada nitretada

Na Figura 4.24, encontra-se ainda a região 1, porém, com uma ampliação, na qual está a camada nitretada com maiores detalhes, é possível notar a camada de PVD na superfície da ferramenta e também a espessura da camada nitretada maior para este corpo de prova.

A condição de nitretação com ciclo com tempo mais longo do delineamento de experimento é evidenciado. Ainda na figura 4.25 nota-se alguns precipitados de nitreto nos contornos de grão do material.



Figura 4.25 - Região 1: camada nitretada, nitretos precipitados no contorno de grão e camada de PVD.

Na região 2, demonstrada na Figura 4.26, encontra-se a camada soldada, a mesma possui a estrutura martensítica revenida.



Figura 4.26 - Região 2: Camada soldada microestrutura martensítica fina e revenida.

Na região 3, demonstrada na Figura 4.27, encontra-se a região onde ocorre a fusão do material a uma temperatura muito elevada, é possível notar o crescimento de grão austenítico devido ao processo de solda a estrutura bainítica está presente nesta região, de um lado o material soldado de outro lado o material base do aço ferramenta, esta é a região mais frágil da solda.



Figura 4.27 - Região 3: Região de fusão do material base com a solda caracterizada pelo tamanho de grão austenítico.

Na Figura 4.28, apresenta-se a região 4, na qual é possível notar o material base da ferramenta.

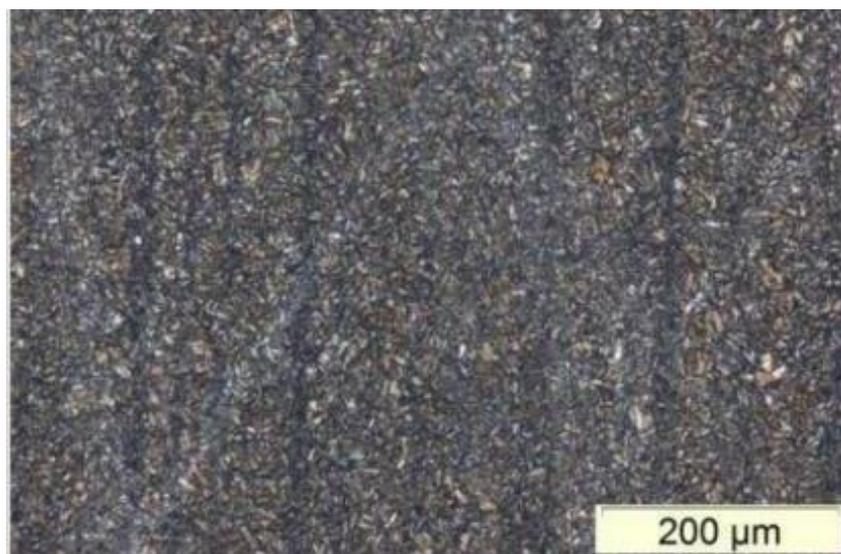


Figura 4.28 - Região 4: Material base da ferramenta martensita fina e revenida.

O perfil de Dureza (HV) do Corpo de prova 4 - Condição: preparado com Solda 1, maior camada, com PVD, é demonstrado no Gráfico 4.4.

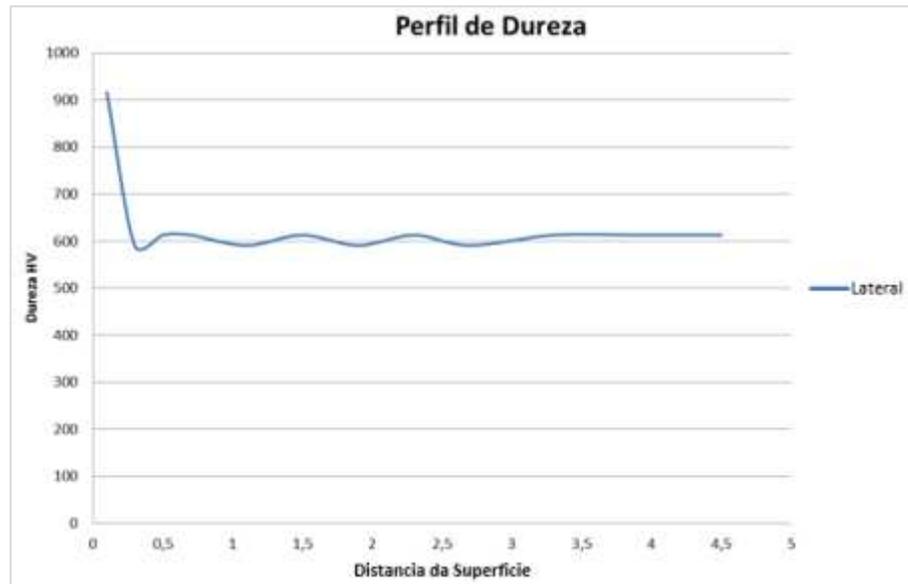


Gráfico 4.4 - Corpo de prova 4: Região lateral, raio e ponta do punção

Estes 4 corpos de prova foram confeccionados para caracterizar os processos que envolveram a recuperação dos punções, eles não foram utilizados no processo de forjamento.

Para todas as combinações, o processo de soldagem em relação a região 1, as estruturas metalúrgicas encontradas apresentaram boa concordância com a teoria representando, a área da solda mais próximo da superfície como estrutura martensítica fina e revenida.

Logo abaixo a região 3 de fusão entre a solda e o material base representando uma região com granulação grosseira, região bainítica, região mais frágil do processo de solda.

Mais abaixo na região 4 o material base com a estrutura martensítica fina e revenida indicando que o processo de soldagem não afetou esta região do punção, o que poderia influenciar no resultado do trabalho.

Para o processo de nitretação o ciclo com tempo mais longo obteve profundidade de camada nitretada de 0,10 mm e o ciclo com tempo menor obteve profundidade de camadas nitretadas de 0,13 mm.

4.2.2 Análise metalográfica das ferramentas utilizadas

A análise da microestrutura está dividida em três regiões sendo “lateral do punção” região de menor desgaste, “raio do punção” região de alto desgaste, “ponta do punção” região de desgaste moderado.

Para a análise da microestrutura foi utilizado o microscópio óptico Marca Olympus modelo BX 51 M.

Também para um melhor entendimento foi feito o perfil de dureza de cada punção analisado, nos três pontos ponta, raio e lateral do punção, pois a dureza é um dos fatores que afetam o desempenho de uma ferramenta de forjamento a quente quando avaliado o desgaste.

Estas análises se fazem necessária para entender melhor os mecanismos de degradação que ocorreram no processo em estudo.

Na sequência, se apresentam as condições em que as ferramentas saíram do processo de forjamento, seguida da análise microscópica de cada ferramenta.

As regiões do raio do punção e lateral do punção foram avaliadas os dois lados para analisar a simetria do desgaste.

Ferramenta 1 - Condição: Preparado com Solda 2, maior camada, sem PVD.

Nas Figuras 4.29 e 4.30, se apresentam as análises macroscópicas das condições que saíram as ferramentas após o forjamento na condição indicada acima.

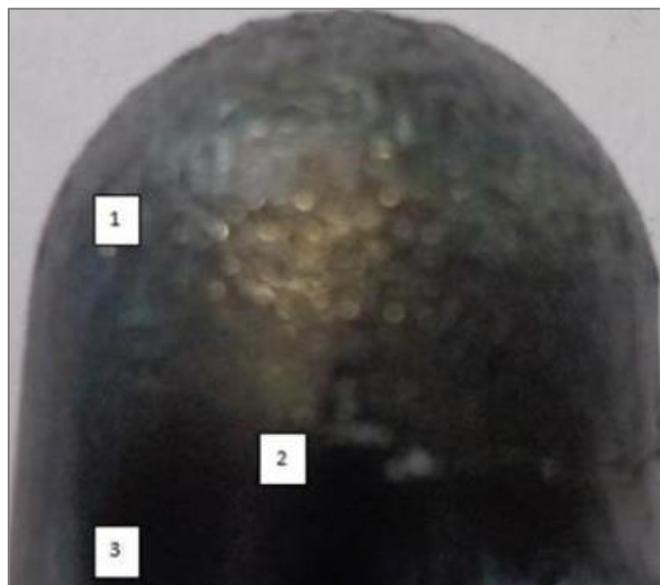


Figura 4.29 - Vista geral e *layout* das regiões analisadas (macroscópica)



Figura 4.30 - Região 1, Região 2 e Região 3

Na Figura 4.30, região 1 nota-se uma mistura entre o desgaste abrasivo e adesivo decorrente do trabalho a quente do processo de forjamento.

As setas indicam às estrias próximas a região do raio do punção que ocorre o desgaste abrasivo, esta região apresenta maior desgaste conforme indicado pela análise da simulação por elementos finitos.

As estrias geradas pelo desgaste abrasivo na região do raio aparentam ter uma profundidade menor se comparadas com as estrias das combinações com PVD, além das mesmas possuírem um aspecto mais suave em seus picos e vales.

A região da lateral do punção apresenta um desgaste adesivo é possível notar pequenos pedaços do produto a ser forjado que ficam presos na superfície da ferramenta, esta região apresenta um desgaste de baixa intensidade conforme a simulação numérica, porém, não se nota trincas térmicas.

Ainda na mesma figura, região 2, nota-se uma trinca que pelo seu tamanho e característica deve ter ocorrido devido a algum defeito no processo de soldagem.

Nas figuras 4.31 até 4.33, se apresentam as análises metalográficas vista no microscópio das regiões que na simulação obtiveram graus de desgaste diferenciados.

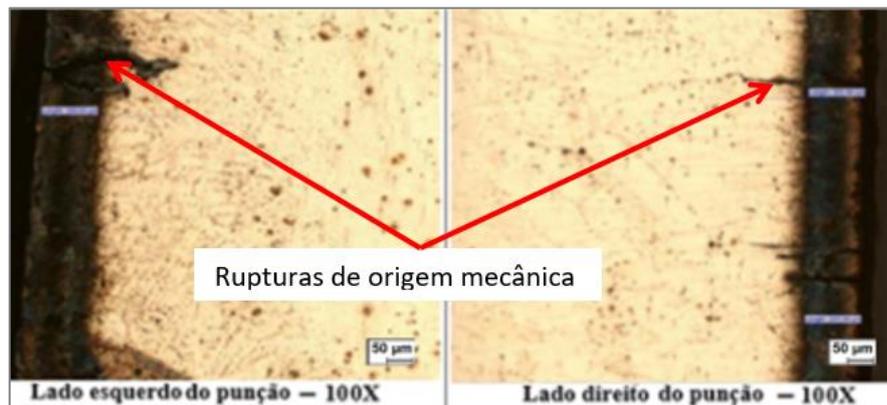


Figura 4.31 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito

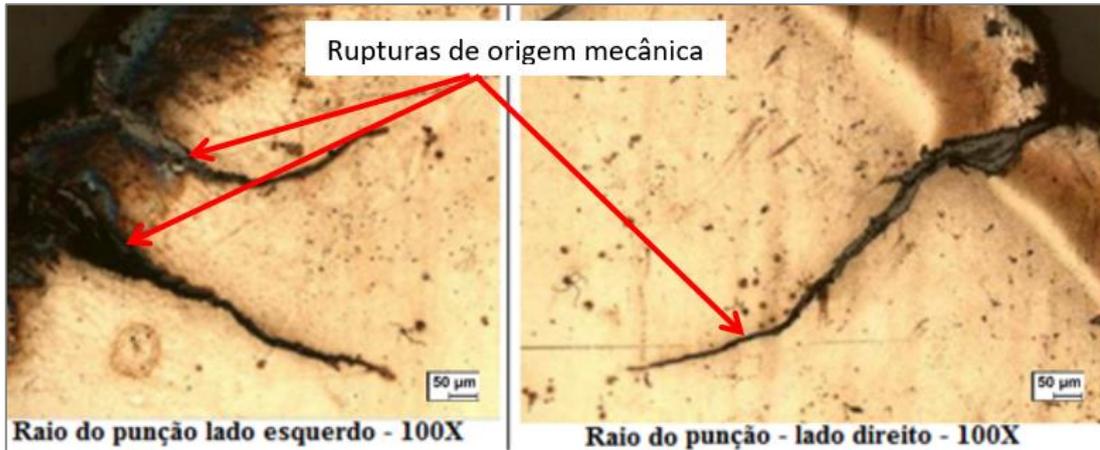


Figura 4.32 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito



Figura 4.33 - Análises metalográficas - Ponta do punção

O perfil de Dureza (HV) da ferramenta 1 - Condição: preparada com Solda 2, maior camada, sem PVD, encontra-se demonstrado no Gráfico 4.5.

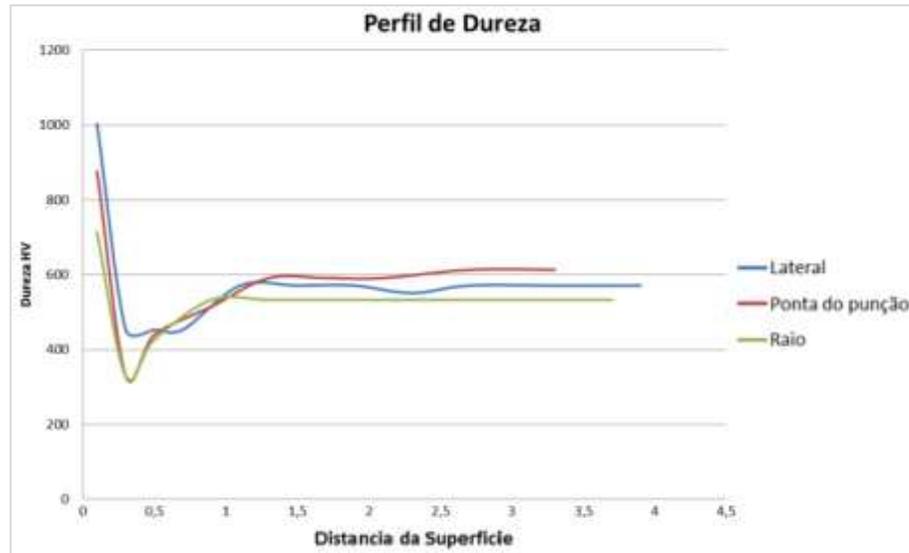


Gráfico 4.5 - Ferramenta 1: Região lateral, raio e ponta do punção

Esta combinação de fatores não utiliza o processo de recobrimento por PVD, este fator conforma avaliado pela análise estatística possui influência nos resultados encontrados pelo desgaste sendo esta combinação a que possui melhor desempenho com relação ao desgaste.

Nas figuras 4.32 e 4.33 é possível notar que existem rupturas no material provavelmente de origem mecânica, devido ao tamanho e profundidade das mesmas.

Avaliando o perfil de dureza no gráfico 4.5 nota-se que houve uma pequena perda de dureza não na superfície, porem alguns décimos de milímetros da superfície, portanto a dureza se manteve na região de difusão da nitretação.

Possivelmente esta perda de dureza deve estar associada ao contato do produto forjado com o punção durante o forjamento, uma vez que nos corpos de prova sem a utilização no forjamento não foi verificada esta perda de dureza.

Ainda avaliando o perfil de dureza no gráfico 4.5 a camada de nitretação não foi totalmente destruída devido ao fato da dureza na superfície para as três regiões estar na faixa de 700 a 100 HV.

Nas imagens da região lateral do punção é possível verificar o comprimento das rupturas menores, já nas regiões de maior sollicitação (raio e ponta), estes comprimentos aumentam devido a maior sollicitação conforme indicado na simulação para estas regiões.

As micrografias revelam que os raios do punção sofreram desgastes semelhantes indicando simetria do efeito.

A maior resistência ao desgaste deve estar associada à manutenção da dureza que deve ter ocorrido devido a não presença de trincas térmicas na região de trabalho do punção.

A presença de trincas térmicas faz com que a superfície apresente maior facilidade do produto prender no punção, durante o forjamento, uma vez que isto ocorra aumenta-se a temperatura na região de trabalho do punção e conseqüente perda de dureza.

Outro ponto a ser comentado seriam os detritos gerados pelo desgaste abrasivo durante o movimento relativo entre a ferramenta e o produto a ser forjado. Este detrito gerado para esta combinação provavelmente deve ter uma dureza menor se comparado com os detritos gerados na combinação com as ferramentas utilizadas pelo recobrimento por PVD diminuindo o desgaste para este tipo de combinação.

As camadas geradas pelo processo de recobrimento por PVD possuem dureza superior às camadas geradas pelo processo de nitretação.

Ferramenta 2 - Condição: Preparado com Solda 2, menor camada, com PVD.

Nas Figuras 4.34 e 4.35, se apresentam as análises macroscópicas das condições que saíram as ferramentas após o forjamento na condição indicada acima:



Figura 4.34 - Vista geral e *layout* das regiões analisadas (macroscópica)



Figura 4.35 - Região 1, Região 2 e Região 3

Na Figura 4.35, região 1, se nota uma mistura entre o desgaste abrasivo e adesivo decorrente do trabalho a quente do processo de forjamento.

Também se nota a predominância de trincas térmicas e em algumas regiões o deslocamento de material decorrente da junção das trincas térmicas provenientes das alterações de temperatura (quente / frio) durante trabalho a quente do processo de forjamento.

As setas indicam às estrias próximas a região do raio do punção que ocorre o desgaste abrasivo, esta região apresenta maior desgaste conforme indicado pela análise da simulação por elementos finitos.

As estrias geradas pelo desgaste abrasivo na região do raio aparentam ter uma profundidade maior se comparadas com as estrias das combinações sem PVD.

Na região 2 da figura 4.35, se nota uma espécie de degrau formada devido aos efeitos de degradação evidenciando a diferença de regimes de desgaste apresentada na simulação.

Nas Figuras 4.36 até 4.38, se apresentam as análises metalográficas vista no microscópio das regiões que na simulação obtiveram graus de desgaste diferenciados.

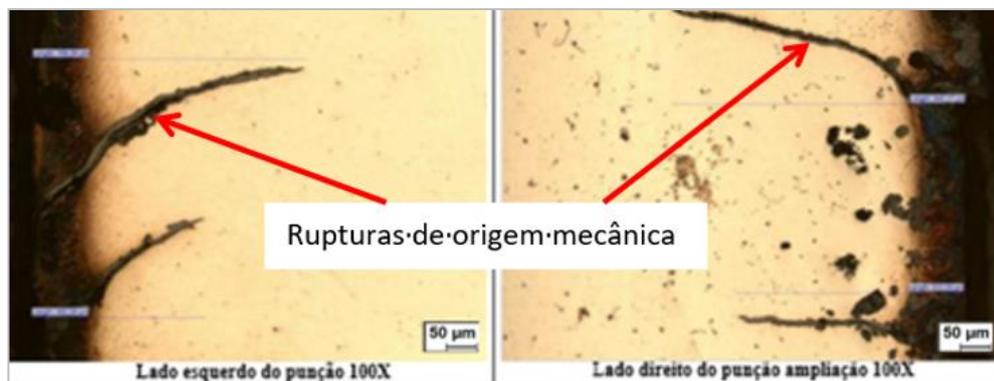


Figura 4.36 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito

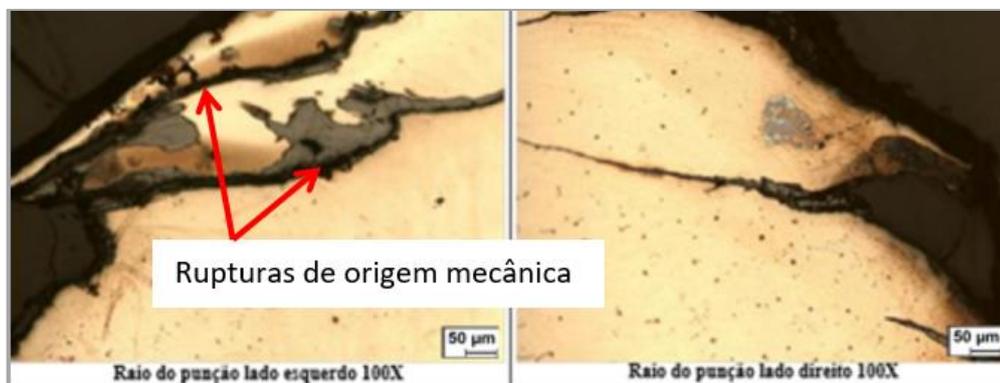


Figura 4.37 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.



Figura 4.38 - Análises metalográficas - Ponta do punção

O perfil de Dureza (HV) da ferramenta 2 - Condição: preparada com Solda 2, menor camada, com PVD, encontra-se demonstrado no Gráfico 4.6.

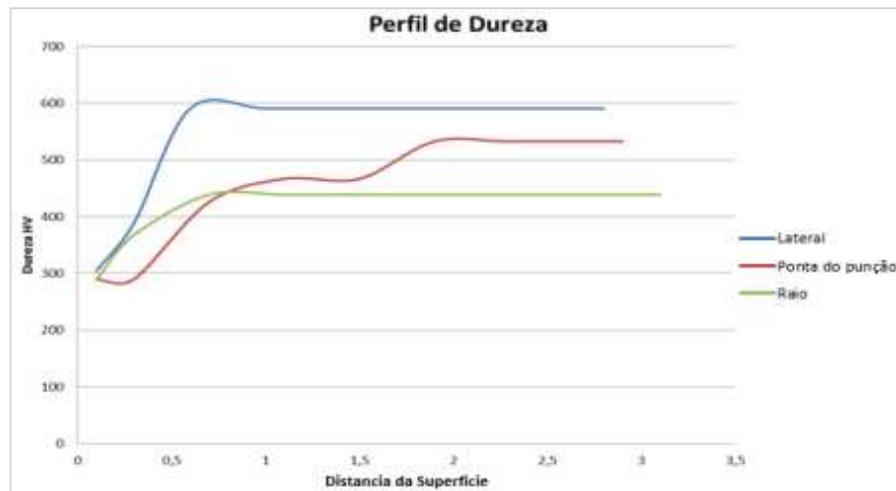


Gráfico 4.6 - Ferramenta 2: Região lateral, raio e ponta do punção

Esta combinação de fatores utiliza o processo de recobrimento por PVD, este fator conforme avaliado pela análise estatística possui influência nos resultados encontrados pelo desgaste sendo esta combinação a que possui pior desempenho com relação ao desgaste.

A nitretação utilizada é a com ciclo menor que também contribuiu para que o desgaste desta ferramenta possua um desempenho de resistência ao desgaste ruim.

Nas figuras 4.36 e 4.37 é possível notar que existem rupturas no material provavelmente de origem mecânica, devido ao tamanho e profundidade das mesmas.

Avaliando o perfil de dureza no gráfico 4.6 nota-se que houve uma perda de dureza significativa nas três regiões da ferramenta, indicando um recozimento nas regiões mais próximas da superfície.

Possivelmente esta perda de dureza deve estar associada ao contato do produto forjado com o punção durante o forjamento, uma vez que nos corpos de prova sem a utilização no forjamento não foi verificada esta perda de dureza.

Ainda analisando a perda de dureza significativa para esta combinação provavelmente estas rupturas de origem mecânica ocorreram com maior intensidade para esta combinação devido à falta de resistência mecânica na região de trabalho do punção.

A presença de trincas térmicas faz com que a superfície apresente maior facilidade do produto prender no punção, durante o forjamento, uma vez que isto ocorra aumenta-se a temperatura na região de trabalho do punção e consequente perda de dureza.

A nitretação com ciclo menor apresenta menor proteção da superfície quanto ao surgimento de trincas térmicas.

A utilização do processo de recobrimento por PVD devido à diferença de dilatação do material de recobrimento em relação ao material base, também acelera a propagação de trincas térmicas para esta combinação.

O trabalho de Birol; Isler (2011) indica que a aplicação de PVD em uma ferramenta que sofra constantes choques térmicos como é o caso do forjamento a quente propicia o surgimento de trincas térmicas no material isto ocorre devido à diferença da dilatação térmica do material base e da camada de PVD.

Com a perda de dureza também é possível que o processo de oxidação do material se apresenta com maior intensidade para esta combinação.

Outro ponto a ser comentado seriam os detritos gerados pelo desgaste abrasivo durante o movimento relativo entre a ferramenta e o produto a ser forjado. Este detrito gerado para esta combinação provavelmente deve ter uma dureza maior se comparado com os detritos gerados na combinação com as ferramentas utilizadas com o processo de nitretação aumentando o desgaste para este tipo de combinação.

As camadas geradas pelo processo de recobrimento por PVD possuem dureza superior às camadas geradas pelo processo de nitretação.

Ferramenta 3 - Condição: Preparado com Solda 1, maior camada, com PVD.

Nas Figuras 4.39 e 4.40, se apresentam as análises macroscópicas das condições que saíram as ferramentas após o forjamento na condição indicada acima:

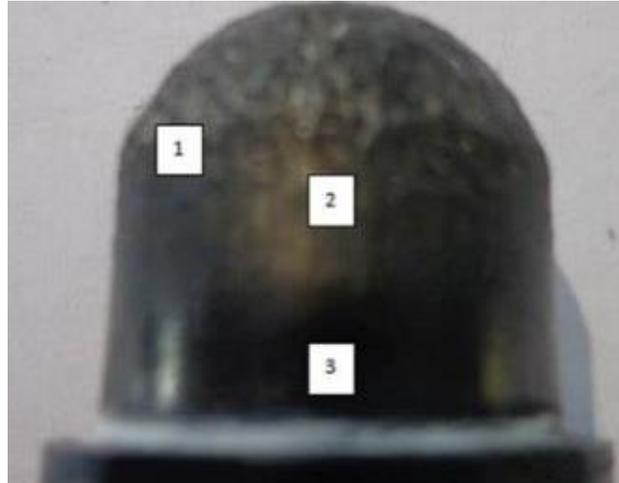


Figura 4.39 - Vista geral e *layout* das regiões analisadas (macroscópica)

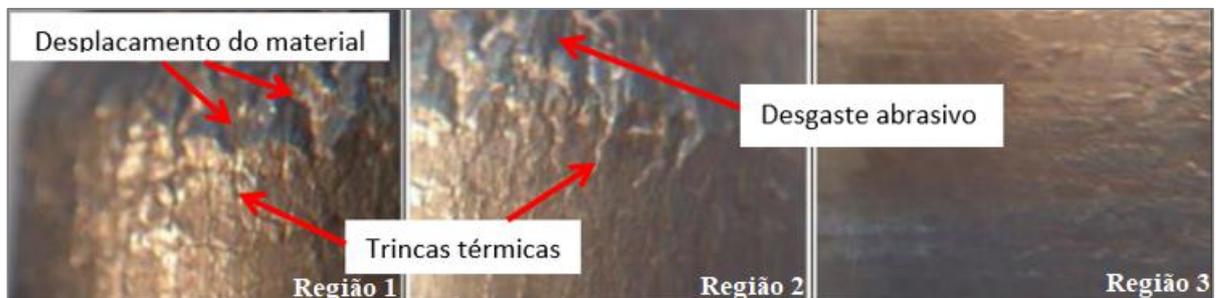


Figura 4.40 - Região 1, Região 2 e Região 3

Na Figura 4.40, regiões 1 e 2, da mesma forma, se nota a predominância de trincas térmicas e em algumas regiões principalmente na região final do raio e o início da lateral do punção.

Para esta combinação nota-se um maior deslocamento de material apenas na região do raio, região esta que apresenta maior desgaste conforme analisado nos resultados da simulação de forjamento.

Ainda na região do raio nota-se o desgaste abrasivo comum para esta região do punção, mais uma vez indicado pelos resultados da simulação como a região mais crítica a resistência ao desgaste.

As estrias geradas pelo desgaste abrasivo na região do raio aparentam ter uma profundidade maior se comparadas com as estrias das combinações sem PVD.

A menor incidência do deslocamento pode estar associada à camada de nitretação com maior espessura onde esta configuração possui maior proteção contra a fadiga térmica do material.

Nas Figuras 4.41 até 4.43, se apresentam as análises metalográficas vista no microscópio das regiões que na simulação obtiveram graus de desgaste diferenciados.

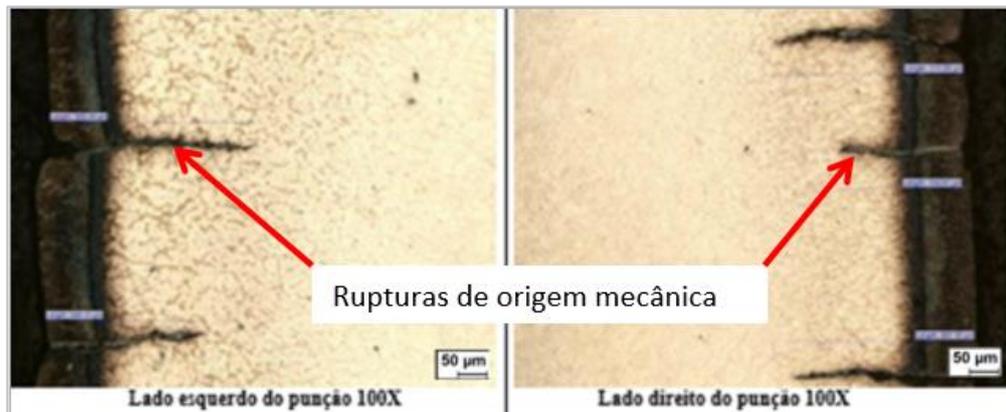


Figura 4.41 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito

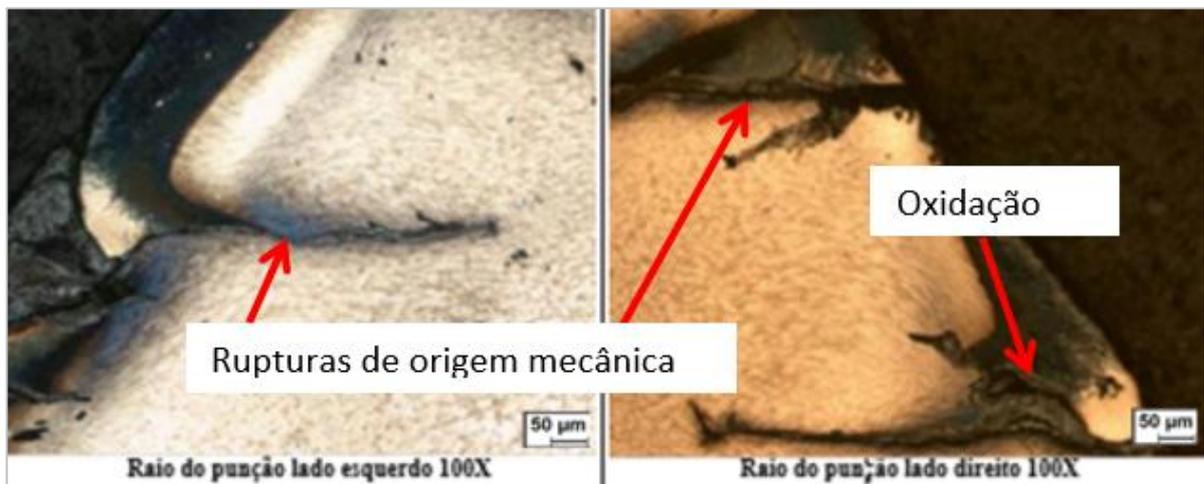


Figura 4.42 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.

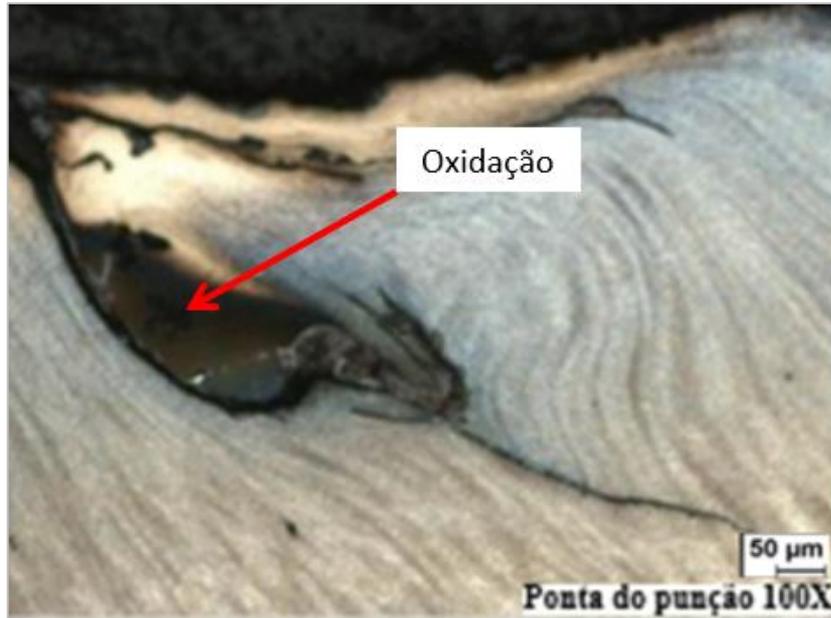


Figura 4.43 - Análises metalográficas - Ponta do punção

O perfil de Dureza (HV) da ferramenta 3 - Condição: preparada com Solda 1, maior camada, com PVD, encontra-se demonstrado no Gráfico 4.7.

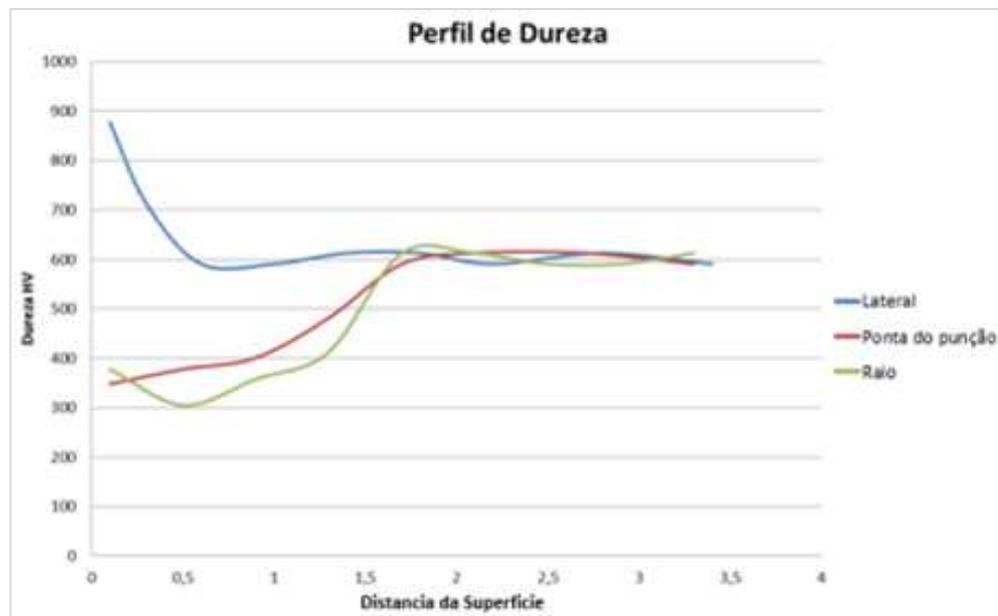


Gráfico 4.7 - Ferramenta 3: Região lateral, raio e ponta do punção

Esta combinação de fatores utiliza o processo de recobrimento por PVD, este fator conforme avaliado pela análise estatística possui influência nos resultados encontrados pelo desgaste.

A nitretação utilizada é com ciclo mais longo que contribuí para que o desgaste desta ferramenta possua um melhor desempenho de resistência ao desgaste.

Nas figuras 4.41 e 4.42 é possível notar que existem rupturas no material provavelmente de origem mecânica, devido ao tamanho e profundidade das mesmas.

Avaliando o perfil de dureza no gráfico 4.7 nota-se que houve uma perda de dureza significativa em duas regiões da ferramenta, no caso as regiões mais críticas a resistência ao desgaste indicada na simulação, indicando um recozimento nas regiões mais próximas da superfície.

De alguma maneira a região da lateral do punção não ocorreu uma perda de dureza significativa.

Possivelmente esta perda de dureza deve estar associada ao contato do produto forjado com o punção durante o forjamento, uma vez que nos corpos de prova sem a utilização no forjamento não foi verificada esta perda de dureza.

Ainda analisando a perda de dureza significativa para esta combinação provavelmente estas rupturas de origem mecânica ocorreram com maior intensidade para esta combinação devido à falta de resistência mecânica na região de trabalho do punção.

A presença de trincas térmicas faz com que a superfície apresente maior facilidade do produto prender no punção, durante o forjamento, uma vez que isto ocorra aumenta-se a temperatura na região de trabalho do punção e consequente perda de dureza.

A nitretação com ciclo mais longo apresenta maior proteção da superfície quanto ao surgimento de trincas térmicas, porém para esta combinação não foi o suficiente para que não houvesse a presença de trincas térmicas.

A utilização do processo de recobrimento por PVD devido à diferença de dilatação do material de recobrimento em relação ao material base, também acelera a propagação de trincas térmicas para esta combinação.

O trabalho de Birol; Isler (2011) indica que a aplicação de PVD em uma ferramenta que sofra constantes choques térmicos como é o caso do forjamento a quente propicia o surgimento de trincas térmicas no material isto ocorre devido à diferença da dilatação térmica do material base e da camada de PVD.

Com a perda de dureza também é possível que o processo de oxidação do material se apresenta com maior intensidade para esta combinação.

Outro ponto a ser comentado seriam os detritos gerados pelo desgaste abrasivo durante o movimento relativo entre a ferramenta e o produto a ser forjado. Este detrito gerado para esta combinação provavelmente deve ter uma dureza maior se comparado com os detritos

gerados na combinação com as ferramentas utilizadas pelo processo de nitretação aumentando o desgaste para este tipo de combinação.

As camadas geradas pelo processo de recobrimento por PVD possuem dureza superior às camadas geradas pelo processo de nitretação.

Ferramenta 4 - Condição: Preparado com Solda 2, maior camada, com PVD.

Nas Figuras 4.44 até 4.46, se apresentam as análises macroscópicas das condições que saíram as ferramentas após o forjamento na condição indicada acima.

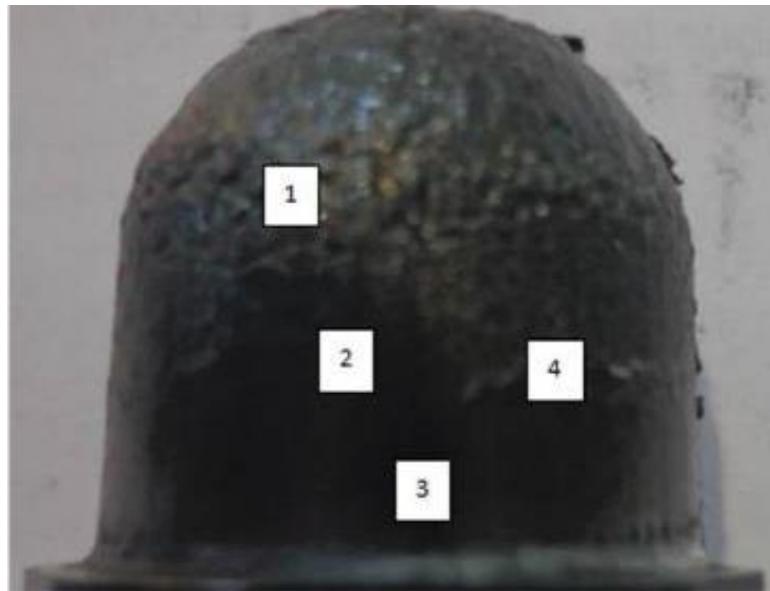


Figura 4.44 - Vista geral e *layout* das regiões analisadas (macroscópica)

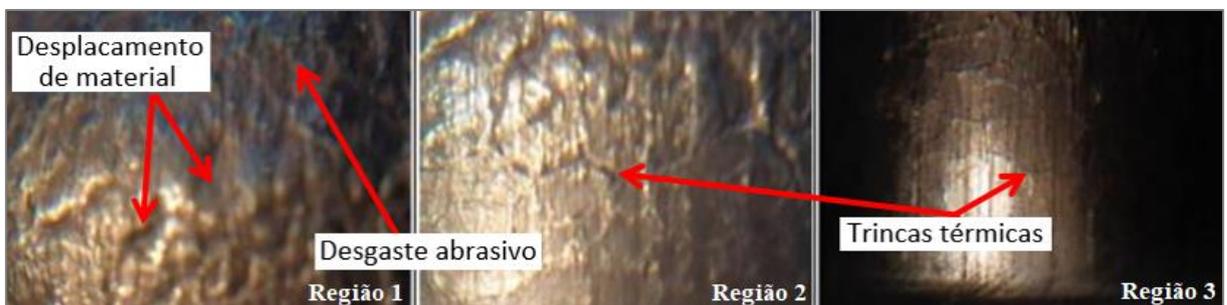


Figura 4.45 - Região 1, Região 2 e Região 3



Figura 4.46 - Região 4

Nas Figuras 4.45 e 4.46 da mesma forma, se nota a predominância de trincas térmicas e em algumas regiões principalmente na região final do raio e o início da lateral do punção.

Para esta combinação nota-se um maior deslocamento de material apenas na região do raio, região esta que apresenta maior desgaste conforme analisado nos resultados da simulação de forjamento.

Ainda na região do raio nota-se o desgaste abrasivo comum para esta região do punção, mais uma vez indicado pelos resultados da simulação como a região mais crítica a resistência ao desgaste.

As estrias geradas pelo desgaste abrasivo na região do raio aparentam ter uma profundidade maior se comparadas com as estrias das combinações sem PVD.

A menor incidência do deslocamento pode estar associada à camada de nitretação com maior espessura onde esta configuração possui maior proteção contra a fadiga térmica do material.

Na figura 4.46 se nota uma ruptura com maior extensão provavelmente proveniente de ligações da rede de trincas térmicas geradas na superfície do material.

Nas Figuras 4.47 até 4.49, se apresentam as análises metalográficas vista no microscópio das regiões que na simulação obtiveram graus de desgaste diferenciados.

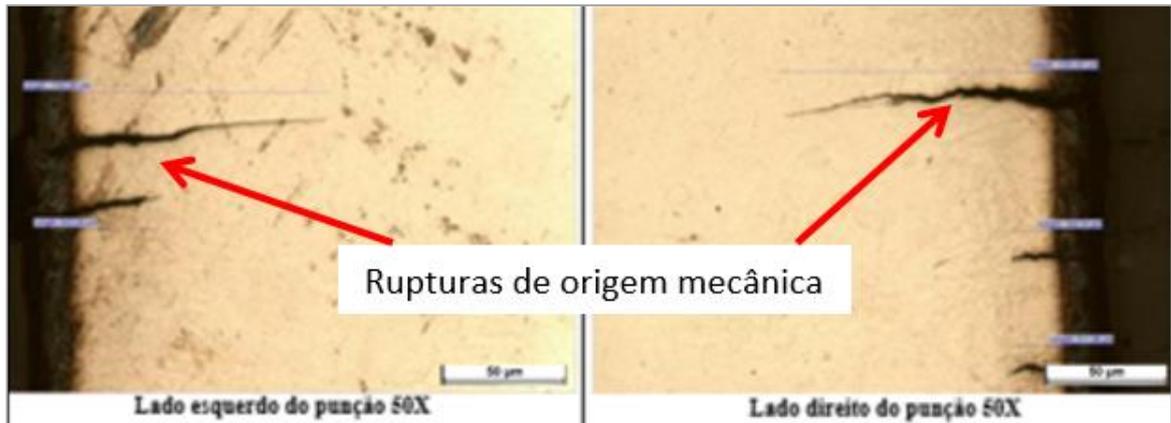


Figura 4.47 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito

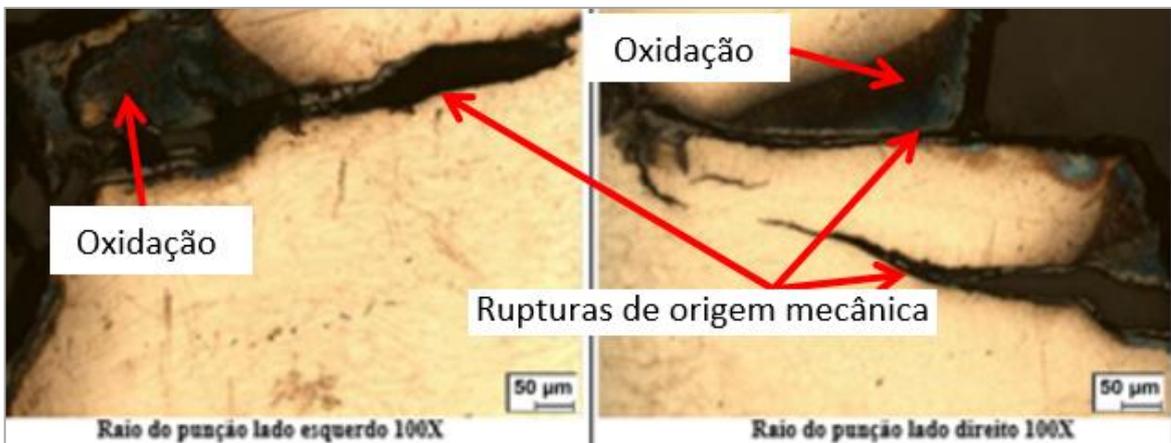


Figura 4.48 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.

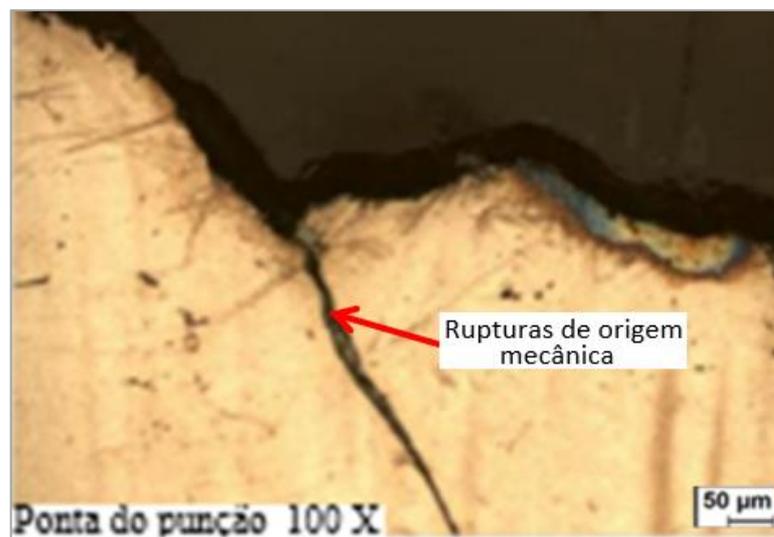


Figura 4.49 - Análises metalográficas - Ponta do punção

O perfil de Dureza (HV) da ferramenta 4 - Condição: preparada com Solda 2, maior camada, com PVD, encontra-se demonstrado no Gráfico 4.8.



Gráfico 4.8 - Ferramenta 4: Região lateral, raio e ponta do punção

Esta combinação de fatores utiliza o processo de recobrimento por PVD, este fator conforme avaliado pela análise estatística possui influência nos resultados encontrados pelo desgaste.

A nitretação utilizada é a com ciclo mais longo que contribuiu para que o desgaste desta ferramenta possua um melhor desempenho de resistência ao desgaste.

Nas figuras 4.47, 4.48 e 4.49 é possível notar que existem rupturas no material provavelmente de origem mecânica, devido ao tamanho e profundidade das mesmas.

Avaliando o perfil de dureza no gráfico 4.8 nota-se que houve uma perda de dureza significativa nas três regiões da ferramenta, indicando um recozimento nas regiões mais próximas da superfície.

Possivelmente esta perda de dureza deve estar associada ao contato do produto forjado com o punção durante o forjamento, uma vez que nos corpos de prova sem a utilização no forjamento não foi verificada esta perda de dureza.

Ainda analisando a perda de dureza significativa para esta combinação provavelmente estas rupturas de origem mecânica ocorreram com maior intensidade para esta combinação devido à falta de resistência mecânica na região de trabalho do punção.

A presença de trincas térmicas faz com que a superfície apresente maior facilidade do produto prender no punção, durante o forjamento, uma vez que isto ocorre aumenta-se a temperatura na região de trabalho do punção e conseqüente perda de dureza.

A nitretação com ciclo mais longo apresenta maior proteção da superfície quanto ao surgimento de trincas térmicas, porém para esta combinação não foi o suficiente para que não houvesse a presença de trincas térmicas.

A utilização do processo de recobrimento por PVD devido à diferença de dilatação do material de recobrimento em relação ao material base, também acelera a propagação de trincas térmicas para esta combinação.

O trabalho de Birol; Isler (2011) indica que a aplicação de PVD em uma ferramenta que sofra constantes choques térmicos como é o caso do forjamento a quente propicia o surgimento de trincas térmicas no material isto ocorre devido à diferença da dilatação térmica do material base e da camada de PVD.

Com a perda de dureza também é possível que o processo de oxidação do material se apresenta com maior intensidade para esta combinação, conforme indicado no gráfico 3.60.

Outro ponto a ser comentado seriam os detritos gerados pelo desgaste abrasivo durante o movimento relativo entre a ferramenta e o produto a ser forjado. Este detrito gerado para esta combinação provavelmente deve ter uma dureza maior se comparado com os detritos gerados na combinação com as ferramentas utilizadas pelo processo de nitretação aumentando o desgaste para este tipo de combinação.

As camadas geradas pelo processo de recobrimento por PVD possuem dureza superior às camadas geradas pelo processo de nitretação.

Ferramenta 5 - Condição: Preparado com Solda 1, menor camada, sem PVD.

Nas Figuras 4.50 e 4.51, se apresentam as análises macroscópicas das condições que saíram as ferramentas após o forjamento na condição indicada acima:



Figura 4.50 - Vista geral e *layout* das regiões analisadas (macroscópica)

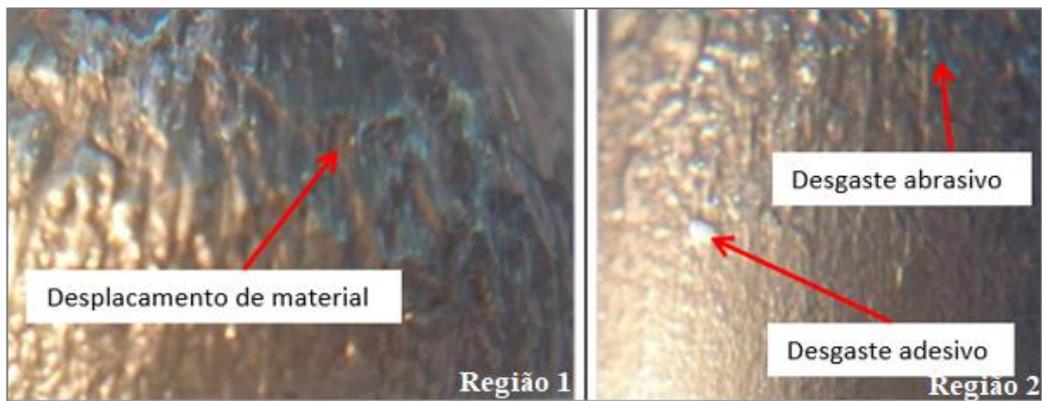


Figura 4.51 - Região 1 e Região 2

Na Figura 4.51, em ambas regiões se nota uma mistura entre o desgaste abrasivo e adesivo decorrente do trabalho a quente do processo de forjamento.

As setas indicam às estrias próximas a região do raio do punção que ocorre o desgaste abrasivo, esta região apresenta maior desgaste conforme indicado pela análise da simulação por elementos finitos.

As estrias geradas pelo desgaste abrasivo na região do raio aparentam ter uma profundidade menor se comparadas com as estrias das combinações com PVD.

A região da lateral do punção apresenta um desgaste adesivo é possível notar pequenos pedaços do produto a ser forjado que ficam presos na superfície da ferramenta, esta região apresenta um desgaste de baixa intensidade conforme a simulação numérica.

Na Figura 4.51, regiões 1 e 2, não é possível notar trincas térmicas nestas figuras, evidenciando que a não utilização do processo de recobrimento por PVD melhora a incidência de trincas térmicas para esta combinação.

Nas Figuras 4.52 até 4.54, se apresentam as análises metalográficas vista no microscópio das regiões que na simulação obtiveram graus de desgaste diferenciados.

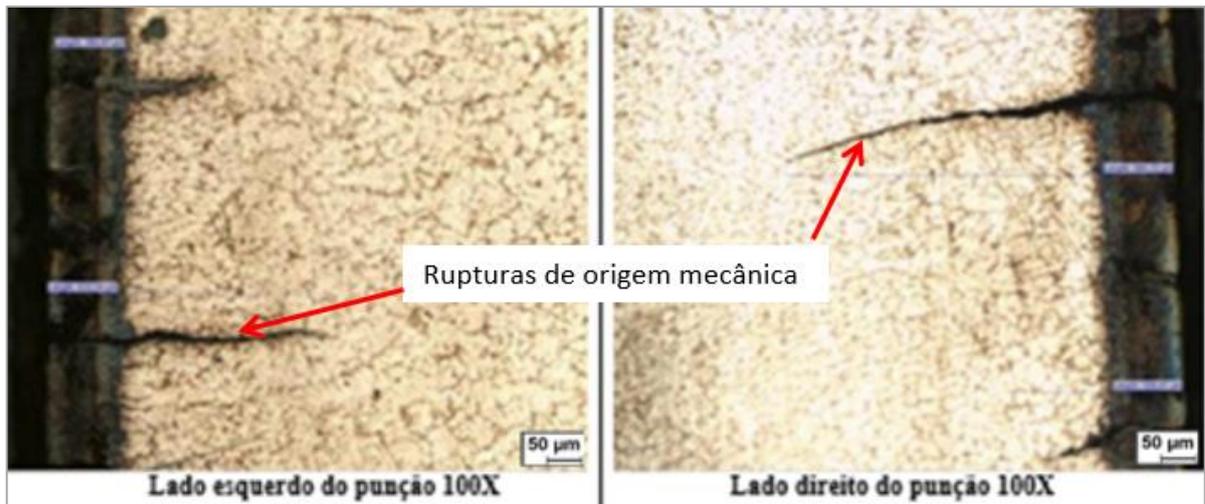


Figura 4.52 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito

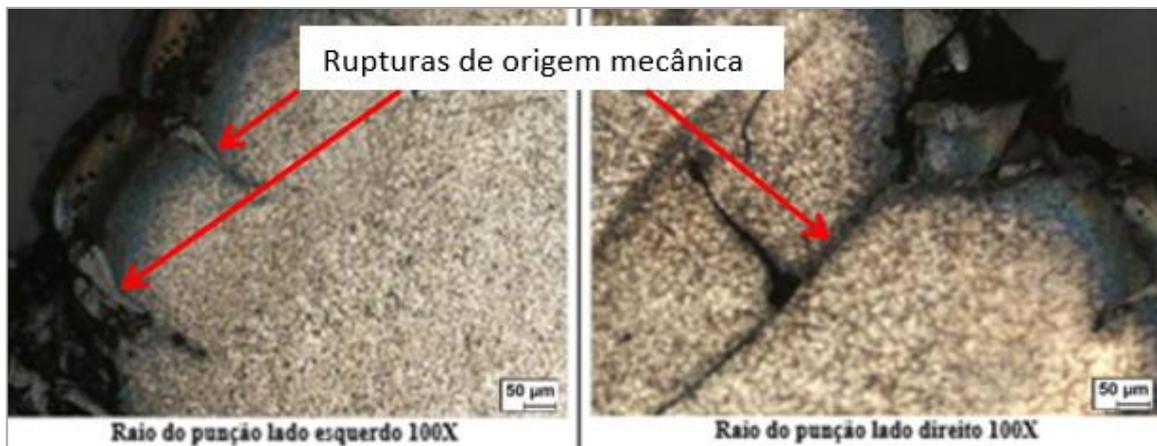


Figura 4.53 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.



Figura 4.54 - Análises metalográficas - Ponta do punção

O perfil de Dureza (HV) da ferramenta 5 - Condição: preparada com Solda 1, menor camada, sem PVD, encontra-se demonstrado no Gráfico 3.9.



Gráfico 4.9 - Ferramenta 5: Região lateral, raio e ponta do punção

Esta combinação de fatores não utiliza o processo de recobrimento por PVD, este fator conforme avaliado pela análise estatística possui influência nos resultados encontrados pelo desgaste.

Nas figuras 4.52, 4.53 e 4.54 é possível notar que existem rupturas no material provavelmente de origem mecânica, devido ao tamanho e profundidade das mesmas.

Ainda avaliando o perfil de dureza no gráfico 4.9 nota-se que houve perda de dureza na superfície do punção, porém esta perda de dureza ocorreu em menor profundidade se comparado com os punções que utilizaram o processo de recobrimento por PVD.

Possivelmente esta perda de dureza deve estar associada ao contato do produto forjado com o punção durante o forjamento, uma vez que nos corpos de prova sem a utilização no forjamento não foi verificada esta perda de dureza.

Nas imagens da região lateral do punção é possível verificar o comprimento das rupturas menores que nas regiões de maior sollicitação (raio e ponta), estes comprimentos aumentam devido a maior sollicitação conforme indicado na simulação para estas regiões.

As micrografias revelam que os raios do punção sofreram desgastes semelhantes indicando simetria do efeito.

Outro ponto a ser comentado seriam os detritos gerados pelo desgaste abrasivo durante o movimento relativo entre a ferramenta e o produto a ser forjado. Este detrito gerado para esta combinação provavelmente deve ter uma dureza menor se comparado com os detritos gerados na combinação com as ferramentas utilizadas pelo recobrimento por PVD diminuindo o desgaste para este tipo de combinação.

As camadas geradas pelo processo de recobrimento por PVD possuem dureza superior às camadas geradas pelo processo de nitretação.

Ferramenta 6 - Condição: Preparado com Solda 2, menor camada, sem PVD.

Nas Figuras 4.55 e 4.56, se apresentam as análises macroscópicas das condições que saíram as ferramentas após o forjamento na condição indicada acima:

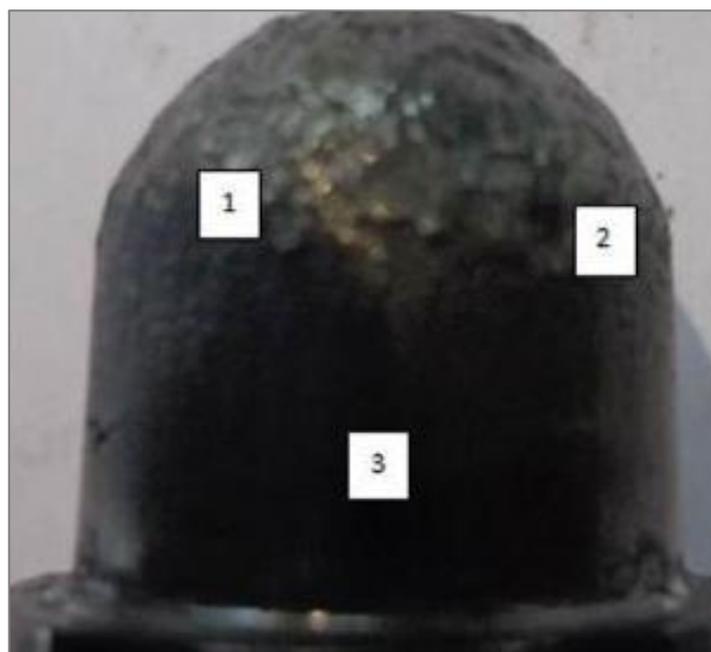


Figura 4.55 - Vista geral e *layout* das regiões analisadas (macroscópica)



Figura 4.56 - Região 1, Região 2 e Região 3

Na Figura 4.56, regiões 1, 2 e 3 se nota uma mistura entre o desgaste abrasivo e adesivo decorrente do trabalho a quente do processo de forjamento.

As setas indicam às estrias próximas a região do raio do punção que ocorre o desgaste abrasivo, esta região apresenta maior desgaste conforme indicado pela análise da simulação por elementos finitos.

As estrias geradas pelo desgaste abrasivo na região do raio aparentam ter uma profundidade menor se comparadas com as estrias das combinações com PVD.

A região da lateral do punção apresenta um desgaste adesivo é possível notar pequenos pedaços do produto a ser forjado que ficam presos na superfície da ferramenta, esta região apresenta um desgaste de baixa intensidade conforme a simulação numérica

Na Figura 4.56, regiões 1, 2 e 3 não é possível notar trincas térmicas nestas figuras, evidenciando que a não utilização do processo de recobrimento por PVD melhora a incidência de trincas térmicas para esta combinação.

Nas Figuras 4.57 até 4.59 se apresentam as análises metalográficas vista no microscópio das regiões que na simulação obtiveram graus de desgaste diferenciados.

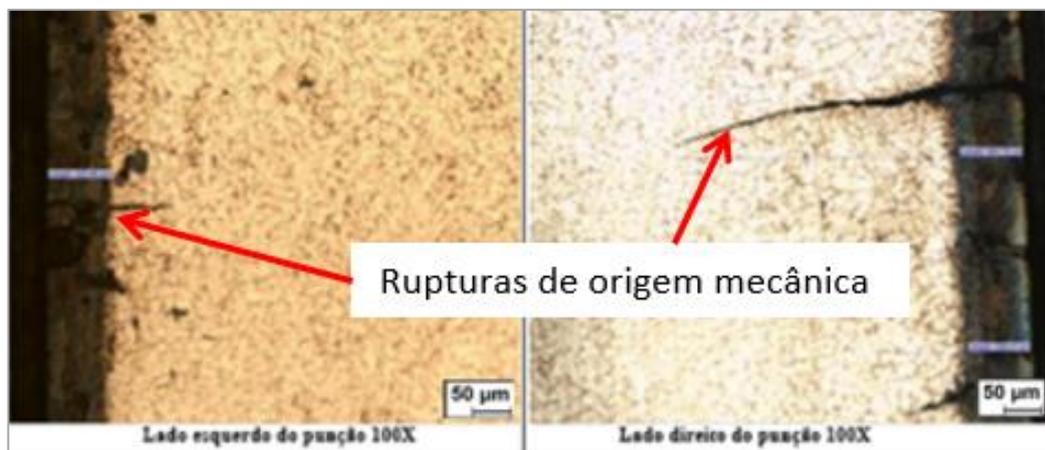


Figura 4.57 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito

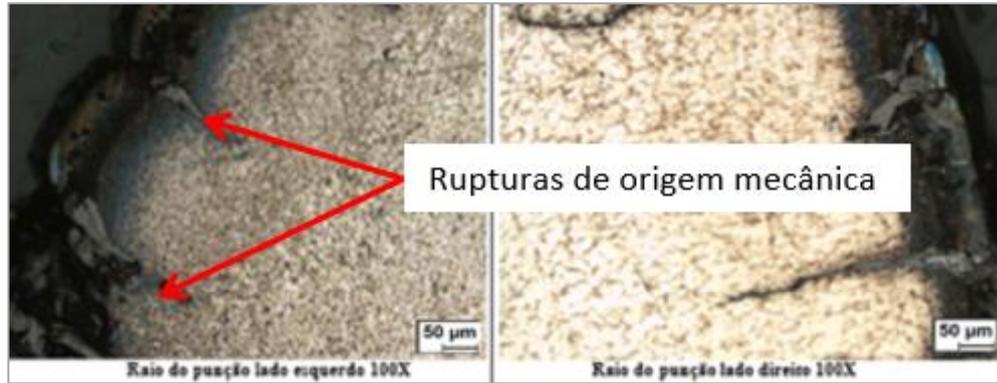


Figura 4.58 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito.



Figura 4.59 - Análises metalográficas - Ponta do punção

O perfil de Dureza (HV) da ferramenta 6 - Condição: preparada com Solda 2, menor camada, sem PVD, encontra-se demonstrado no Gráfico 4.10.

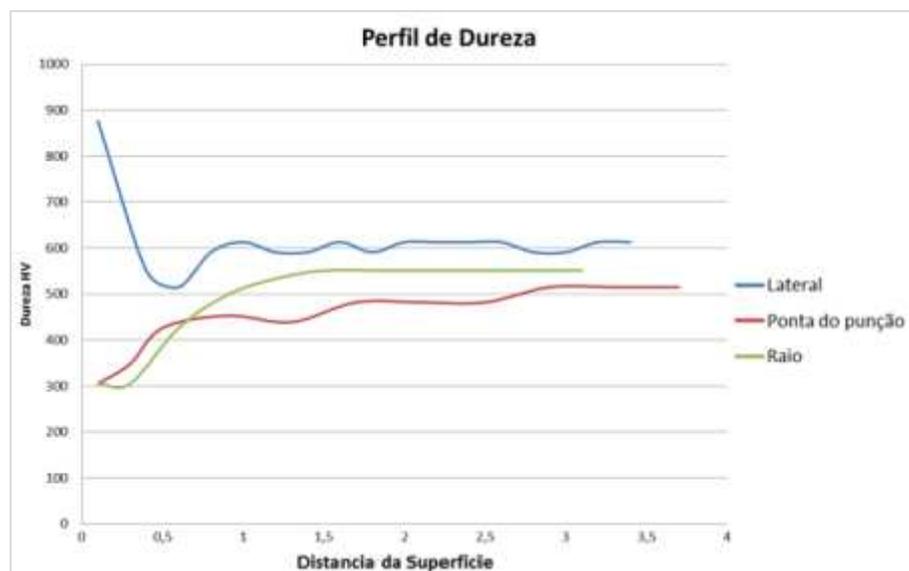


Gráfico 4.10 - Ferramenta 6: Região lateral, raio e ponta do punção

Esta combinação de fatores não utiliza o processo de recobrimento por PVD, este fator conforme avaliado pela análise estatística possuiu influência nos resultados encontrados pelo desgaste.

Nas figuras 4.58 e 4.59 é possível notar que existem rupturas no material provavelmente de origem mecânica, devido ao tamanho e profundidade das mesmas.

Avaliando o perfil de dureza no gráfico 3.10 nota-se que houve perda de dureza na superfície do punção, porém esta perda de dureza ocorreu em menor profundidade se comparado com os punções que utilizaram o processo de recobrimento por PVD.

De alguma maneira a região lateral do punção não sofreu a perda de dureza de mesma maneira que a região da ponta do punção e raio.

Possivelmente esta perda de dureza deve estar associada ao do produto forjado com o punção durante o forjamento, uma vez que nos corpos de prova sem a utilização no forjamento não foi verificada esta perda de dureza.

Nas imagens da região lateral do punção é possível verificar o comprimento das rupturas menores que nas região de maior sollicitação (raio e ponta), estes comprimentos aumentam devido a maior sollicitação conforme indicado na simulação para estas regiões.

As micrografias revelam que os raios do punção sofreram desgastes semelhantes indicando simetria do efeito.

Outro ponto a ser comentado seriam os detritos gerados pelo desgaste abrasivo durante o movimento relativo entre a ferramenta e o produto a ser forjado. Este detrito gerado para esta combinação provavelmente deve ter uma dureza menor se comparado com os detritos gerados na combinação com as ferramentas utilizadas pelo recobrimento por PVD diminuindo o desgaste para este tipo de combinação.

As camadas geradas pelo processo de recobrimento por PVD possuem dureza superior às camadas geradas pelo processo de nitretação.

Ferramenta 7 - Condição: Preparado com Solda 1, maior camada, sem PVD.

Nas Figuras 4.60 e 4.61, se apresentam as análises macroscópicas das condições que saíram as ferramentas após o forjamento na condição indicada acima:

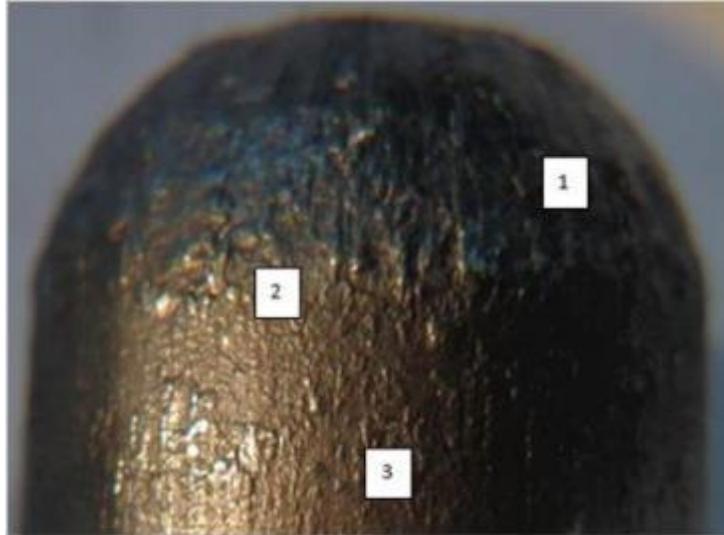


Figura 4.60 - Vista geral e *layout* das regiões analisadas (macroscópica)

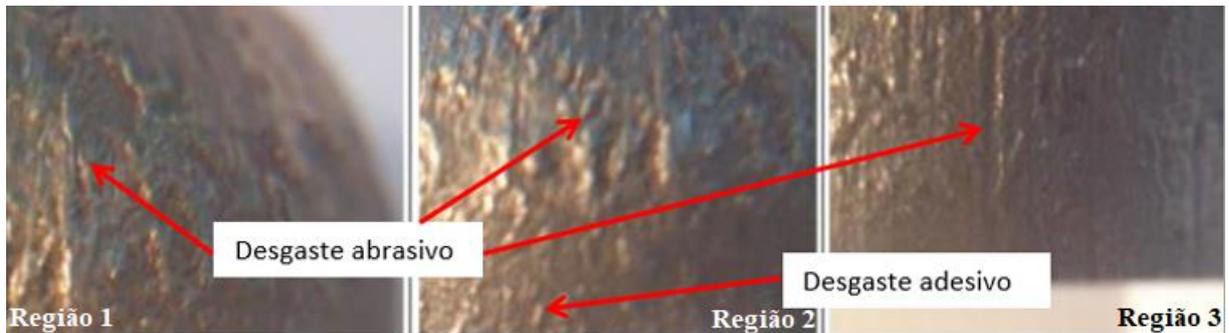


Figura 4.61 - Região 1, Região 2 e Região 3

Na Figura 4.61, regiões 1, 2 e 3 nota-se uma mistura entre o desgaste abrasivo e adesivo decorrente do trabalho a quente do processo de forjamento.

As setas indicam às estrias próximas a região do raio do punção que ocorre o desgaste abrasivo, esta região apresenta maior desgaste conforme indicado pela análise da simulação por elementos finitos.

As estrias geradas pelo desgaste abrasivo na região do raio aparentam ter uma profundidade menor se comparadas com as estrias das combinações com PVD.

A região da lateral do punção apresenta um desgaste adesivo é possível notar pequenos pedaços do produto a ser forjado que ficam presos na superfície da ferramenta, esta região apresenta um desgaste de baixa intensidade conforme a simulação numérica

Na figura 4.61, não é possível notar trincas térmicas nestas figuras, evidenciando que a não utilização do processo de recobrimento por PVD melhora a incidência de trincas térmicas para esta combinação.

Nas Figuras 4.62 até 4.64 se apresentam as análises metalográficas vista no microscópio das regiões que na simulação obtiveram graus de desgaste diferenciados.

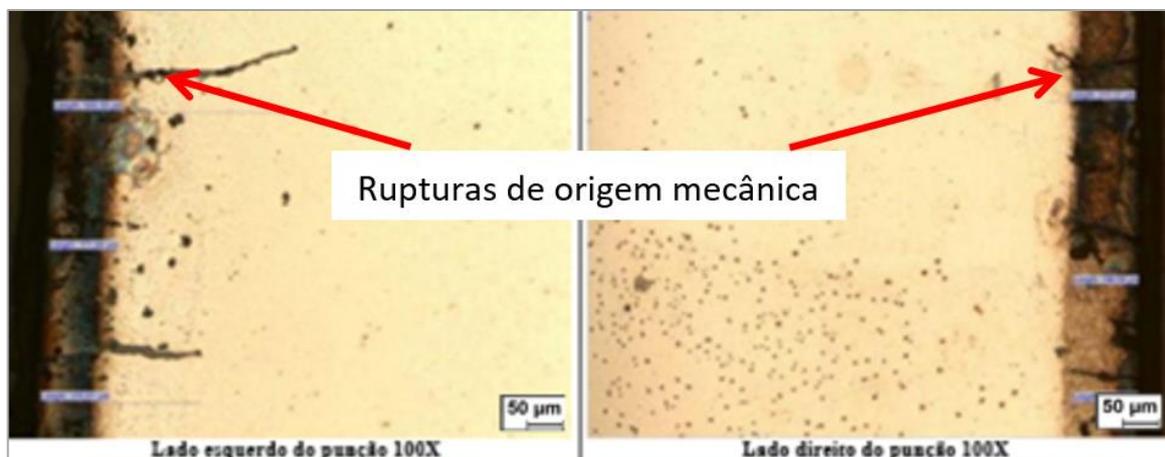


Figura 4.62 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito

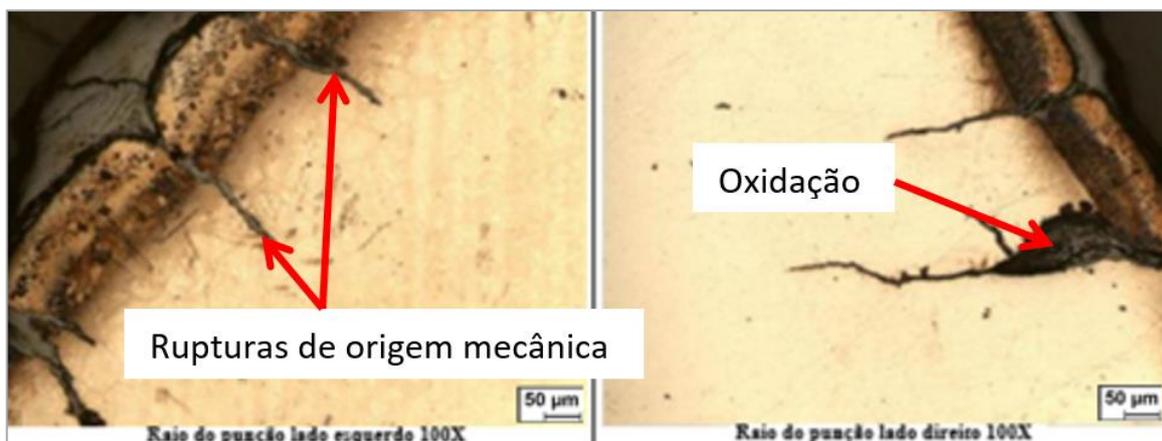


Figura 4.63 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito

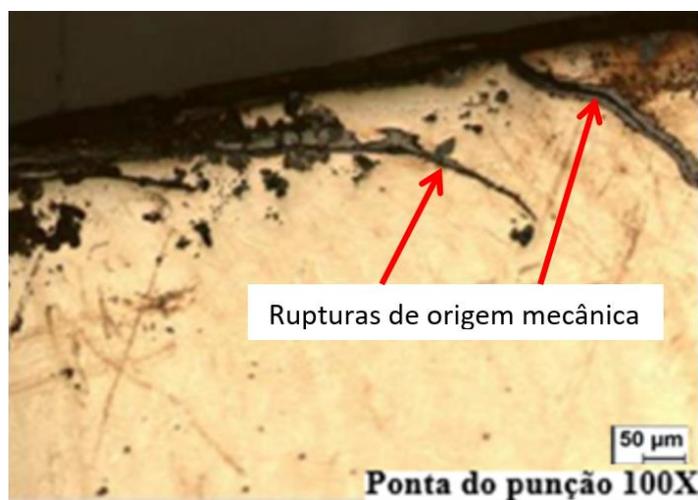


Figura 4.64 - Análises metalográficas - Ponta do punção

O perfil de Dureza (HV) da ferramenta 7 - Condição: preparada com Solda 1, maior camada, sem PVD, encontra-se demonstrado no Gráfico 4.11.

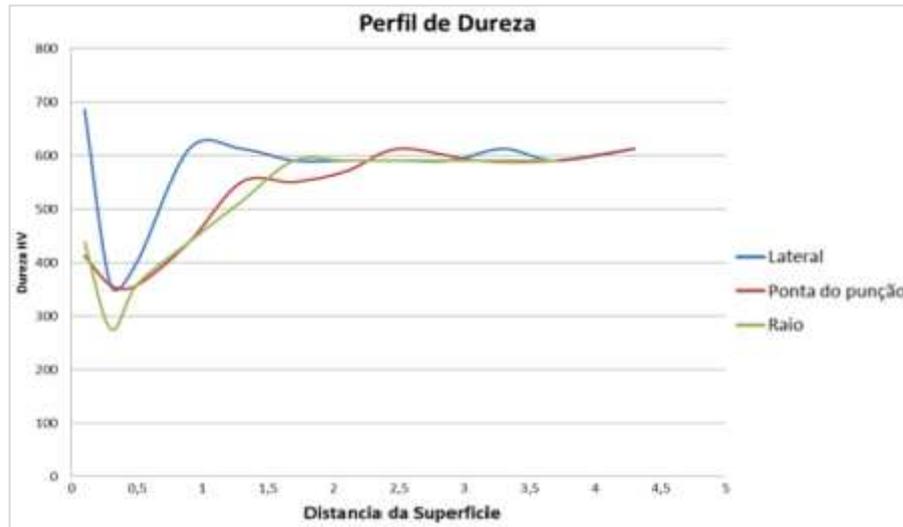


Gráfico 4.11 - Ferramenta 7: Região lateral, raio e ponta do punção

Esta combinação de fatores não utiliza o processo de recobrimento por PVD, este fator pela análise estatística possui influência nos resultados encontrados pelo desgaste sendo que esta combinação é a que possuiu melhor desempenho com relação à redução do desgaste.

Nas figuras 4.62, 4.63 e 4.64 é possível notar que existem rupturas no material provavelmente de origem mecânica, devido ao tamanho e profundidade das mesmas.

Avaliando o perfil de dureza nota-se que houve perda de dureza na superfície do punção, porém esta perda de dureza ocorreu em menor profundidade se comparado com os punções que utilizaram o processo de recobrimento por PVD.

Possivelmente esta perda de dureza deve estar associada ao contato do produto forjado com o punção durante o forjamento, uma vez que nos corpos de prova sem a utilização no forjamento não foi verificada esta perda de dureza.

Nas imagens da região lateral do punção é possível verificar o comprimento das rupturas menores que nas regiões de maior solicitação (raio e ponta), estes comprimentos aumentam devido a maior solicitação conforme indicado na simulação para estas regiões.

As micrografias revelam que os raios do punção sofreram desgastes semelhantes indicando simetria do efeito.

Outro ponto a ser comentado seriam os detritos gerados pelo desgaste abrasivo durante o movimento relativo entre a ferramenta e o produto a ser forjado. Este detrito gerado para esta combinação provavelmente deve ter uma dureza menor se comparado com os detritos

gerados na combinação com as ferramentas utilizadas pelo recobrimento por PVD diminuindo o desgaste para este tipo de combinação.

As camadas geradas pelo processo de recobrimento por PVD possuem dureza superior às camadas geradas pelo processo de nitretação.

Ferramenta 8 - Condição: Preparado com Solda 1, menor camada, com PVD.

Nas Figuras 4.65 e 4.66, se apresentam as análises macroscópica das condições que saíram as ferramentas após o forjamento na condição indicada acima:



Figura 4.65 - Vista geral e *layout* das regiões analisadas (macroscópica)



Figura 4.66 - Região 1, Região 2 e Região 3

Na Figura 4.66, regiões 1, 2 e 3 e da mesma forma, se nota a predominância de trincas térmicas e em algumas regiões principalmente na região final do raio e o início da lateral do punção.

Para esta combinação nota-se um maior deslocamento de material apenas na região do raio, região esta que apresenta maior desgaste conforme analisado os resultados da simulação de forjamento.

Ainda na região do raio nota-se o desgaste abrasivo comum para esta região do punção, mais uma vez indicado pelos resultados da simulação como a região mais crítica a resistência ao desgaste.

As estrias geradas pelo desgaste abrasivo na região do raio aparentam ter maior profundidade se comparadas com as estrias das combinações sem PVD.

Nas Figuras 4.67 até 4.69, se apresentam as análises metalográficas vista no microscópio das regiões que na simulação obtiveram graus de desgaste diferenciados.

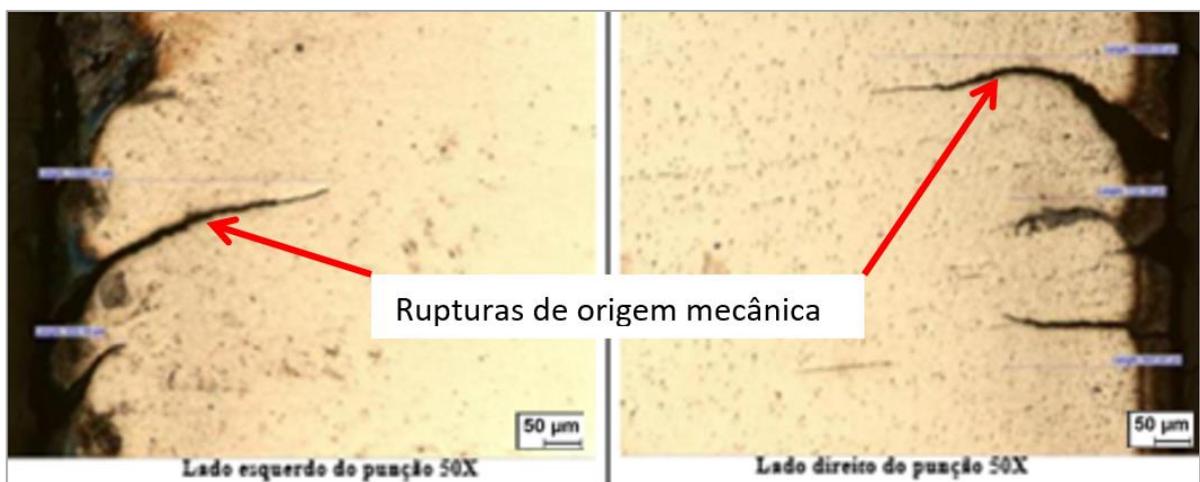


Figura 4.67 - Análises metalográficas - Lado esquerdo/direito

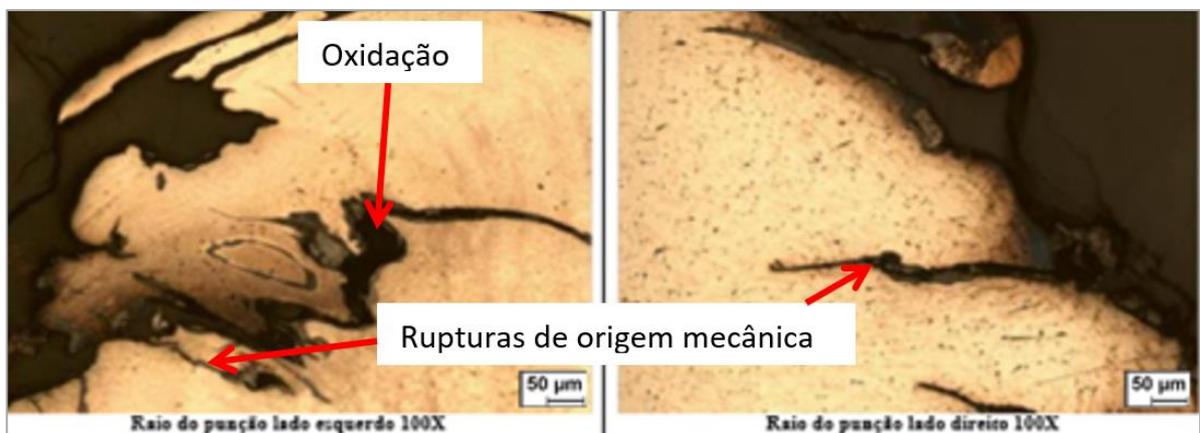


Figura 4.68 - Análises metalográficas - Raio do punção - Lado esquerdo/direito

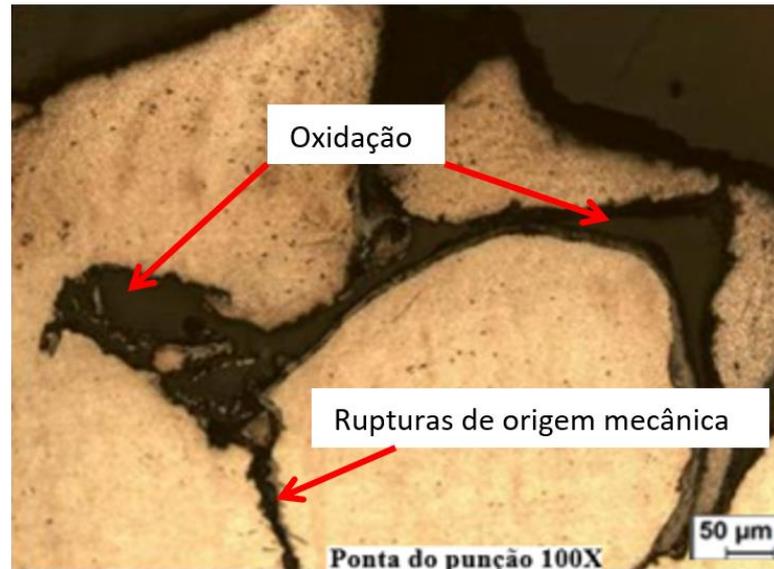


Figura 4.69 - Análises metalográficas - Ponta do punção

O perfil de Dureza (HV) da ferramenta 8 - Condição: preparada com Solda 1, menor camada, com PVD, encontra-se demonstrado no Gráfico 4.12.

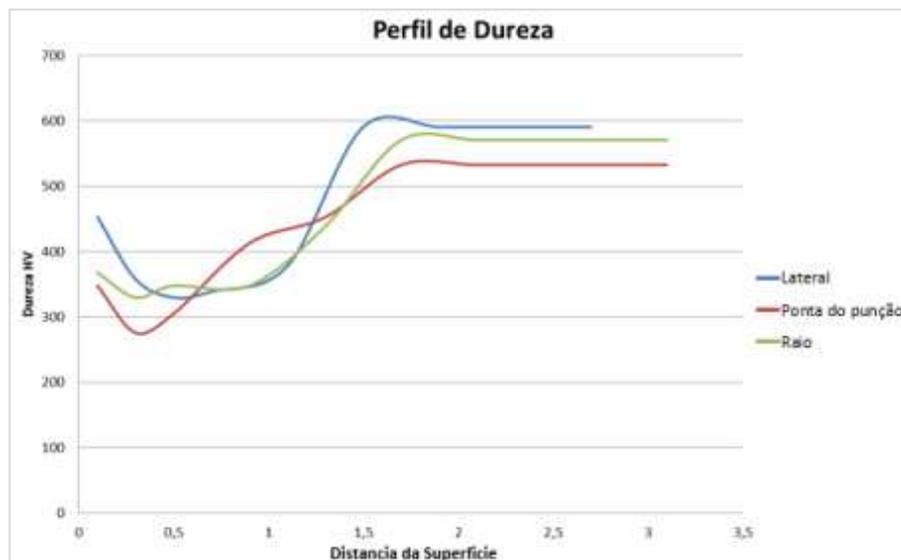


Gráfico 4.12 - Ferramenta 8: Região lateral, raio e ponta do punção

Esta combinação de fatores utiliza o processo de recobrimento por PVD, este fator conforme avaliado pela análise estatística possui influência nos resultados encontrados pelo desgaste sendo esta combinação é a que possui pior desempenho com relação ao desgaste.

A nitretação utilizada é a com menor ciclo que também contribuiu para que o desgaste desta ferramenta possua um desempenho de resistência ao desgaste ruim.

Nas figuras 4.67, 4.68 e 4.69 é possível notar que existem rupturas no material provavelmente de origem mecânica, devido ao tamanho e profundidade das mesmas.

Avaliando o perfil de dureza no gráfico 3.12 nota-se que houve uma perda de dureza significativa nas três regiões da ferramenta, indicando um recozimento nas regiões mais próximas da superfície.

Possivelmente esta perda de dureza deve estar associada ao contato do produto forjado com o punção durante o forjamento, uma vez que nos corpos de prova sem a utilização no forjamento não foi verificada esta perda de dureza.

Ainda analisando a perda de dureza significativa para esta combinação provavelmente estas rupturas de origem mecânica ocorreram com maior intensidade para esta combinação devido à falta de resistência mecânica na região de trabalho do punção.

A presença de trincas térmicas faz com que a superfície apresente maior facilidade do produto prender no punção, durante o forjamento, uma vez que isto ocorra aumenta-se a temperatura na região de trabalho do punção e consequente perda de dureza.

A nitretação com ciclo menor apresenta menor proteção da superfície quanto ao surgimento de trincas térmicas.

A utilização do processo de recobrimento por PVD devido à diferença de dilatação do material de recobrimento em relação ao material base, também acelera a propagação de trincas térmicas para esta combinação.

O trabalho de Birol; Isler (2011) indica que a aplicação de PVD em uma ferramenta que sofra constantes choques térmicos como é o caso do forjamento a quente propicia o surgimento de trincas térmicas no material isto ocorre devido à diferença da dilatação térmica do material base e da camada de PVD.

Com a perda de dureza também é possível que o processo de oxidação do material se apresenta com maior intensidade para esta combinação.

Outro ponto a ser comentado seriam os detritos gerados pelo desgaste abrasivo durante o movimento relativo entre a ferramenta e o produto a ser forjado. Este detrito gerado para esta combinação provavelmente deve ter uma dureza maior se comparado com os detritos gerados na combinação com as ferramentas utilizadas no processo de nitretação aumentando o desgaste para este tipo de combinação.

As camadas geradas pelo processo de recobrimento por PVD possuem dureza superior às camadas geradas pelo processo de nitretação.

5 CONCLUSÕES

Como já comentado por diversos autores é difícil identificar qual o mecanismo de degradação é mais importante, pois ocorre uma interação entre os diversos mecanismos de degradação, porém, é possível indicar que as ferramentas apresentaram um determinado padrão. As ferramentas que não receberam o tratamento PVD sofreram desgastes abrasivo e adesivo mais predominante e as ferramentas que foram aplicadas PVD possuíam um desgaste abrasivo mais intenso e trincas térmicas em maior presença nas ferramentas.

Para as ferramentas que foram aplicadas PVD também houve um processo de maior oxidação da ferramenta conforme indica as figuras das regiões do raio do punção deste grupo.

Todas as ferramentas que utilizaram o recobrimento de PVD apresentaram maior incidência de trincas térmicas, isto pelo fato de a diferença de dilatação térmica da camada do recobrimento com o material base.

A nitretação com maior espessura apresentou menor desgaste do grupo de ferramentas devido ao tratamento com ciclos mais longos que aumentam a espessura da camada que apresentam maior proteção contra a fadiga térmica e posterior desgaste.

O fator tipo de solda, solda 1 e solda 2, não teve influência significativa na redução de desgaste da ferramenta conforme análise estatística do gráfico de efeitos principais.

Os fatores PVD e nitretação tiveram influência significativa na redução de desgaste da ferramenta, conforme análise estatística pelo gráfico de efeitos principais.

A melhor combinação para a redução do desgaste apresentada pela análise estatística é tipo de solda 2 com pouca influência; nitretação com maior camada de espessura com influência estatística e sem a utilização do recobrimento de PVD.

A utilização do processo de recobrimento por PVD obteve pior desempenho com relação ao desgaste também pelo fato de sua camada ser mais dura que a camada de nitretação. Durante o processo de desgaste esta camada mais dura deve ter gerado detritos mais duros que aumentaram o desgaste quando ocorreu o forjamento devido ao movimento relativo entre a ferramenta e o produto a ser forjado.

Houve boa concordância da simulação numérica com as ferramentas, pois a região que apresentou maior desgaste raio da ferramenta foi a que após o forjamento apresentou também maior nível de desgaste. A região da ponta do punção apresentou um desgaste menos severo que a região do raio também evidenciado na simulação e pôr fim, a lateral que apresentou a

região de menor desgaste onde também foi evidenciado pequeno grau de desgaste pela simulação.

Conforme simulação nota-se uma região de transição de intensidade de desgaste nas ferramentas utilizadas especialmente da região do raio do punção para a lateral da ferramenta.

A região do raio foi à região da ferramenta que apresentou maior desgaste de ferramenta, como foi mostrado na simulação o maior escoamento do material somado a maior pressão de forjamento nesta região propiciou maior desgaste.

Tanto o processo MIG/MAG quanto o processo TIG apresentaram boa aderência do material soldado no material base evitando que o material soldado se desprendesse em grande quantidade do material base durante o forjamento.

Em função da complexidade do assunto e também, na medida em que se evoluiu nas pesquisas e experimentos, novas oportunidades e sugestões foram se aflorando, permitindo assim, a indicação de trabalhos futuros, como por exemplo, as atividades a seguir:

Avaliar o desgaste de ferramenta durante a sua utilização, monitorando o desgaste em várias quantidades de peças forjadas exemplo 500 peças; 1000 peças 2000 peças e 3000 peças;

Avaliar o desgaste variando a espessura da camada soldada e a quantidade de material soldado;

Avaliar o desgaste variando a quantidade de vezes de camadas soldadas.

REFERÊNCIAS

- BABU, S.; RIBEIRO, D.; SHIVPURI, R. **Material and Surface Engineering for Precision Forging Dies**. Ohio, 1999.
- BEHRENS B. A.; BOUGUECHA, A.; LUKEN, I.; KLASSEN, A.; ODENING, D. **Near-Net and Net Shape Forging**. An der Universitaet 2, Garbsen, Germany: Elsevier, 2014.
- _____.; MIELKE, J.; BRISTON, M. **Tribology in Hot Forging**. An der Universitaet 2, Garbsen, Germany: Elsevier, 2014.
- BIROL, Y. **Surface & Coatings Technology: Response to thermal cycling of plasma nitride hot work tool steel at elevated temperatures**. Elsevier: Turkey, 2010a.
- _____.; ISLER, D. **Materials Science and Engineering A: Thermal cycling of AlTiN - and AlTiON – coated hot work tool steels at elevated temperatures**. Elsevier: Turkey, 2011.
- CUI, X. H.; WANG, S. Q.; WEI, M. X.; YANG, Z. R. **Wear Characteristics and Mechanisms of H13 Steel with Various Tempered**. Journal of Materials Engineering and Performance, Republic of China, 2009.
- DOBZJAŃSKI, L. A.; POŁOK, M.; ADAMIAK, M. **Structure and properties of wear resistance PVD coatings deposited onto X37CrMoV5-1 type hot work steel**. Poland: Elsevier, 2005.
- GANGARAJ, S. M. H.; MORIDI, A.; GUAGLIANO, M.; GHIDINI, A. **Nitriding duration reduction without sacrificing mechanical characteristics and fatigue behavior: The beneficial effect of surface nano-crystallization by prior severe shot peening**. USA: Elsevier, 2013.
- GRONOSTAJSKI, Z.; KASZUBA, M.; HAWRYLUK, M.; ZWIERZCHOWSKI, M. **A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools**. Poland: Elsevier, 2014.
- MATTOX, D. M. **Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing**. 2. Ed., USA: Elsevier, 2010.

- PASCHKE, H.; WEBER, M.; BRAEUER, G.; YILKIRAN, T.; BEHRENS, B. A.; BRAND, H. **Optimized plasma nitriding processes for efficient wear reduction of forging dies.** Germany: Elsevier, 2012.
- PELLIZZARI, M.; MOLINARI, A.; STRAFFELINI, G. **Damage Mechanisms in Duplex Treated Hot Work Tool Steel under Thermal Cycling.** Surface, 2002, V. 18, p. 289-298.
- PYE, D. **Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing.** 1. Ed., Ohio: ASM International®, 2003.
- SAE - The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space INTERNATIONAL® AEROSPACE MATERIAL SPECIFICATION (AMS-S-13165). **Shot Peening of Metal Parts.** USA, 1997.
- SPIES, H. J.; DALKE, A. **Case Structure and Properties of Nitrided Steels.** Institute of Materials Engineering, Freiberg, Germany: Elsevier LTD, 2014.
- YANG, L.; SHIVPURI, R. **Sppreading Behavior of Water Based Graphite Lubricants on Hot Die Surfaces.** Ohio, USA, 2006.