Este ex definitiv	empla va da	r corr Tese	esp de	oonde à ve Doutorade	rsão o de
Daniel	Villas	Boa	s,	defendida	em
22/05/2	2009.	a	11	·	
Sauton					

Sérgio Tonini Button, orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Uma Contribuição ao Estudo do Forjamento a Frio de Engrenagens Helicoidais

Autor: Msc. Daniel Villas Boas Orientador: Prof. Dr. Sergio Tonini Button

05/09

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

Uma Contribuição ao Estudo do Forjamento a Frio de Engrenagens Helicoidais

Autor: Msc. Daniel Villas Boas Orientador: Prof. Dr. Sergio Tonini Button

Curso: Engenharia Mecânica Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

> Campinas, 2009 S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B63c	Bôas, Daniel Villas Uma contribuição ao estudo de forjamento a frio de engrenagens helicoidais / Daniel Villas Bôas Campinas, SP: [s.n.], 2009.
	Orientador: Sérgio Tonini Button. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
	1. Conformação de metais. 2. Forjamento. 3. Simulação por computador. 4. Analise numerica. 5. Metalurgia. I. Button, Sérgio Tonini. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: A Contribution to the study on cold forging of steel helical gears Palavras-chave em Inglês: Metal forming, Forming, Computer simulation, Numerical analysis, Metallurgy Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica Banca examinadora: Amauri Hassui, Fernando de Azevedo Silva, Iris Bento da Silva, Jonas de Carvalho Data da defesa: 22/05/2009 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 MATERIAIS

TESE DE DOUTORADO

Uma Contribuição ao Estudo do Forjamento a Frio de Engrenagens Helicoidais

Autor: Msc. Daniel Villas Bôas

Orientador: Prof. Dr. Sergio Tonini Button

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Sérgio Tonini Button (Presidente) DEMA-FEM-UNICAMP

Prof. Dr. Iris Bento da Silva DEF-FEM-UNICAMP

Prof. Dr. Amauri Hassui DEF-FEM-UNICAMP

Prof. Dr. Jonas de Carvalho DEM-EESC-USP

Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva DEM-FEG-UNESP

Shiffon .
Ind al
annonn
putil. ///
I Franch L M.h.

Campinas, 22 de maio de 2009.

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha querida Silvana, que durante todo o período de vida acadêmica, profissional do ensino, profissional industrial e mesmo nos momentos mais difíceis, foi esposa, companheira e professora, dando apoio escolar e boa educação ao nosso querido filho Guilherme. A meus pais (*in memoriam*) muitas saudades e carinho. Eu consegui, "meus velhos"!

Agradecimentos

Eu direciono meus agradecimentos e homenagens as pessoas mencionadas abaixo e, a instituição, pela realização deste trabalho.

Ao professor Sérgio Tonini Button pela dedicação, atribuição de conhecimento e orientação em todas as fases do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), entidade científica fundamental ao país.

À empresa Techforge, pela realização do trabalho prático, experimental e pela motivação nas buscas de novas tecnologias do processo de forjamento a frio. Em especial, à diretoria, por acreditar no desenvolvimento tecnológico nacional e ainda, à gerência, pela experiência e contribuição técnica. Não poderia esquecer-me dos funcionários envolvidos no projeto, que contribuíram na ferramentaria, no planejamento técnico, na qualidade, na produção e pela colaboração e tempo cedido na realização deste.

Numa questão muito particular quero colocar meus agradecimentos a Eaton - Divisão Transmissão, pelo apoio técnico e consultivo da engenharia, na fabricação do eletrodo para geração dos dentes na matriz, e na análise dimensional da engrenagem helicoidal.

Aos colegas, funcionários e professores dos Departamentos de Engenharia de Materiais e de Fabricação da FEM-UNICAMP pela amizade, contribuição e atenção durante o Curso de Doutorado.

A Deus, pela oportunidade, saúde e amparo concedidos, a fim de que eu me mantivesse disposto e preparado para tal.

Os grandes vencedores sempre superam grandes obstáculos. A vitória não é gratuita.

Resumo

BÔAS, Daniel Villas, Uma Contribuição ao Estudo do Forjamento a Frio de Engrenagens Helicoidais, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 162 p. Tese (Doutorado).

Os processos de forjamento se caracterizam por forjamento a quente, a morno e a frio e são processos que geralmente necessitam de algumas operações de usinagem para que se obtenha o produto final na qualidade especificada. O forjamento a frio merece uma atenção especial na fabricação de peças com geometrias complexas, pois existem limitações no grau de deformação da matéria prima trabalhada, bem como limitações da própria ferramenta, quando solicitada mecanicamente. Nessas ferramentas altas tensões imperam a todo instante, e é de extrema importância reduzi-las, buscando operações que auxiliem a melhor o modo de escoamento do material durante o processo. A extrusão lateral possui essa característica e com o auxilio da simulação numérica pelos Métodos dos Elementos Finitos e dos Volumes Finitos, torna-se possível o desenvolvimento de pecas assimétricas, com geometria complexa e próxima da peca quase acabada. Esses recursos somados a grande experiência de uma forjaria nacional, com forte atuação no segmento de forjados a frio, permitiu desenvolver um processo de forjamento a frio de engrenagens helicoidais por extrusão lateral. O trabalho teve como finalidade todo o desenvolvimento do processo, o projeto do ferramental e a viabilização experimental do processo. Os resultados obtidos na análise numérica e no procedimento experimental demonstraram que o processo proposto neste trabalho é capaz de produzir engrenagens helicoidais com qualidade geral próxima daquelas obtidas no processo convencional de usinagem a partir de uma engrenagem forjada.

Palavras-chave:

Conformação de metais, forjamento, simulação por computador, análise numérica, metalurgia.

Abstract

BÔAS, Daniel Villas, A Contribution to the Study on Cold Forging of Steel Helical Gears, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 162 p. Thesis (Doctorate).

The forging processes are classified in hot forging, warm forging, and cold forging, that usually provide products that need some further machining operations to achieve manufactured part specifications. Cold forging asks for a special attention when manufacturing complex geometry parts, because its limitation with the forgeability of the workpiece material, as the limitation of tooling strength under mechanical loads. In the tools, high stresses are present during all forming process, and therefore it is very important to reduce it, through a better performance of material flow. Lateral extrusion presents these characteristics and with the aid of the numerical simulation of the process, by Finites Element Method and Finite Volume Method, it is possible the manufacturing of near net shape asymmetric parts with complex geometry. These sources added to the large experience of a forging industry with strong presence in the segment of cold forging, allowed to design and develop a new process of cold forging helical gears by lateral extrusion. This work had as objectives all the development of the process, the design of the tools and all the analysis of the cold forging of helical gears. Results from the numerical and experimental analysis show that the new process proposed in this work is capable of manufacturing helical gears with overall quality near to that typical of the machining process from hot forged blanks commonly used in industry.

Keywords:

Metal forming, forging, computer simulation, numerical analysis, metallurgy

Índice

Lista de Figuras		xiii
Lista de Tabelas		xviii
Nomenclatura		XX
Capítulo 1 – Introdução		1
1.1	Justificativas e Objetivos	1
Capítul	o 2 - O Processo de Forjamento	6
2.1	Aspectos Gerais dos Processos de Forjamento	6
2.2	Forjamento a Frio de Aços	9
2.3	Tipos de Processos	13
2.4	Extrusão Lateral	15
2.4.1	Descrição do Processo	16
2.4.2	Limites do Processo de Extrusão Lateral	17
2.4.3	Materiais Utilizados na Extrusão Lateral	18
2.4.4	Preparação do Tarugo	18
2.4.5	Tratamento Térmico	18
2.4.6	Lubrificação	19
2.4.7	Etapas do Planejamento de Processo	19
2.4.8	Tipos de Produtos	20
2.4.9	Defeitos Característicos do Processo	21
2.4.10	Materiais para Ferramentas	23
2.4.11	Projeto de Matrizes	24
2.4.12	Recuperação Elástica em Matrizes	26
2.4.13	Mecânica do Processo para Ação Simples de Ferramenta Flutuante	27

2.4.14	Mecânica do Processo para Ação Dupla de Ferramentas Flutuantes	27
2.5	Engrenagens Cilíndricas Helicoidais	29
2.5.1	Manufatura de Engrenagens Helicoidais	30
2.5.2	Acabamento dos Dentes	32
2.6	Requisitos para Prensas Utilizadas na Extrusão Lateral	33
2.7	Acumulador de Pressão	34
2.8	A Simulação Numérica do Processo de Forjamento	35
2.8.1	Criação de Geometrias	36
2.8.2	Simulação (ou Solver)	39
2.8.3	Processamento	39
2.8.4	Pré-processamento	40
2.9	Aplicação Industrial	43
2.9.1	Conjunto de Ferramentas com Cavidades Fechadas	45
2.9.2	Projeto Alternativo de Matriz para Forjamento da Engrenagem	46
2.9.3	Formação dos Dentes	49
2.9.4	Cargas de Forjamento	51
2.10	Ensaios de forjamento	53
Capítul	o 3 – Materiais e Métodos	58
3.1	Materiais Utilizados	58
3.1.1	Eletrodo	58
3.1.2	Ferramental	59
3.1.3	Tarugo de Alumínio como Material de Partida	60
3.1.4	Tarugo de Aço como Material de Partida	61
3.2	Métodos Utilizados	61
3.2.1	Projeto da Engrenagem Forjada a Frio	61
3.2.2	Elaboração dos Modelos das Ferramentas	63
3.2.3	Simulação do Processo da Engrenagem Helicoidal	63
3.2.4	Planejamento Experimental	66
3.2.5	Conceito de Extração da Peça	66
3.2.6	Fabricação e Montagem do Ferramental	70
3.2.7	Preparação das Amostras	74

3.2.8	Avaliação do Grau de Deformação	75
3.2.9	Análise do Diâmetro Externo da Engrenagem Forjada	76
3.2.10	Análise da Direção de Fibramento	77
3.2.11	Análise da Dureza	77
3.2.12	Monitoramento da Carga de Forjamento	78
3.2.13	Análise de Microestrutura	80
3.2.14	Análise da Deflexão Elástica da Peça Forjada	80
3.2.15	Análise da Rugosidade Superficial	90
3.2.16	Análise do Tempo de Processo	90
Capítulo	4 – Apresentação e Análise dos Resultados	91
4.1	Análise da Capacidade da Força de Prensagem	91
4.1.1	Análise de Tensões na Montagem do Ferramental	93
4.1.2	Análise da Simulação Numérica do Forjamento a Frio da Engrenagem	95
	Helicoidal	
4.1.3	Análise de Tensões na Peça Forjada	95
4.2	Grau de Deformação entre Sequências de Prensagem	100
4.2.1	Análise do Diâmetro Externo da Engrenagem	104
4.2.2	Análise da Dureza nas Faces da Engrenagem	106
4.2.3	Análise do Fibramento	109
4.2.4	Análise da Dureza nas Faces dos Dentes	109
4.2.5	Análise de Cargas de Forjamento	112
4.2.6	Análise de Microestrutura	115
4.2.7	Análise da Deflexão Elástica da Engrenagem	131
4.2.8	Análise do Tempo de Processo	137
4.2.9	Análise da Quantidade de Material	138
4.10	Acabamento Superficial nos Flancos dos Dentes	139
Capítulo	5 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	140
5.1	Conclusões	140
5.2	Propostas para Trabalhos Futuros	142
Referênci	ias Bibliográficas	143
Anexos		148

Anexo 1	Gráfico de erro acumulado para todos os dentes - eletrodo	149
Anexo 2	Gráfico da excentricidade radial - eletrodo	150
Anexo 3	Gráfico de proporção do desvio do passo para determinados dentes – eletrodo	151
Anexo 4	Gráfico de proporção do desvio do passo para 1 dente - eletrodo	152
Anexo 5	Gráfico da proporção do desvio na envolvente para determinados dentes – eletrodo	153
Anexo 6	Gráfico da proporção do desvio na envolvente para 1 dente – eletrodo	154
Anexo 7	Gráfico do Controle de Perfil da Hélice para determinados dentes - matriz	155
Anexo 8	Gráfico de controle da divisão e concentricidade - matriz	156
Anexo 9	Gráfico de erro acumulado para todos os dentes – engrenagem	157
Anexo 10	Gráfico da excentricidade radial - engrenagem	158
Anexo 11	Gráfico de proporção do desvio do passo para determinados dentes - engrenagem	159
Anexo 12	Gráfico de proporção do desvio do passo para 1 dente – engrenagem	160
Anexo 13	Gráfico da proporção do desvio na envolvente para determinados dentes –engrenagem	161
Anexo 14	Gráfico da proporção do desvio na envolvente para 1 dente – engrenagem	162

Lista de Figuras

Classificação dos processos de produção usados em conformação de acordo	8
com a DIN 8582	
Tensão de escoamento, escala de conformação e avaliação do grau de	10
deformação (forjabilidade) em função da temperatura	
Comparação entre processo de usinagem e forjamento a frio	12
Exemplos da variedade geométrica de peças metálicas produzidas por forjamento	13
a frio	
Representação esquemática das operações do processo de extrusão a frio	14
Esquema do processo de extrusão lateral	16
Esquema para limitação do processo de extrusão lateral	17
Fluxograma típico do processo de forjamento a frio	20
Exemplos de Extrusão Lateral.	22
Tipos de produtos obtidos no processo de forjamento a frio cortesia	22
Esquema de ferramenta com ação simples de mola	25
Esquema de ferramenta com ação dupla de mola	28
Engrenagens helicoidais	29
Processos de Fabricação de Engrenagens Helicoidais	32
Processo de acabamento dos dentes por shaving	33
Esquema de acionamento de prensas hidráulicas	34
Esquema de acionamento do acumulador de pressão	35
Criação de geometrias - software comercial eesy-Form 2.	36
Geometrias concluídas - software comercial eesy-form 2	37
Peça simulada com software tridimensional	37
	Classificação dos processos de produção usados em conformação de acordo com a DIN 8582 Tensão de escoamento, escala de conformação e avaliação do grau de deformação (forjabilidade) em função da temperatura Comparação entre processo de usinagem e forjamento a frio Exemplos da variedade geométrica de peças metálicas produzidas por forjamento a frio Representação esquemática das operações do processo de extrusão a frio Esquema do processo de extrusão lateral Esquema para limitação do processo de extrusão lateral Fluxograma típico do processo de forjamento a frio Exemplos de Extrusão Lateral. Tipos de produtos obtidos no processo de forjamento a frio cortesia Esquema de ferramenta com ação simples de mola Esquema de ferramenta com ação dupla de mola Engrenagens helicoidais Processos de Fabricação de Engrenagens Helicoidais Processos de acabamento dos dentes por shaving Esquema de acionamento de prensas hidráulicas Esquema de acionamento do acumulador de pressão Criação de geometrias - <i>software</i> comercial <i>eesy-Form 2</i> . Geometrias concluídas - <i>software</i> comercial <i>eesy-form 2</i> Peça simulada com software tridimensional

2.20	Parâmetros importantes do processo de forjamento	38
2.21	Análise das Linhas de Escoamento	40
2.22	Análise da Força de Forjamento	41
2.23	Análise da Tensão Equivalente na peça	42
2.24	Análise da Tensão Equivalente no Inserto	42
2.25	Análise da Interferência no Inserto	43
2.26	Elementos de uma ferramenta para forjamento de peças cilíndricas	46
2.27	Pré-forma para forjamento e engrenagem cilíndrica de dentes retos	47
2.28	Esquema do projeto de ferramenta para forjamento de engrenagem com	
	punção e contra punção de superfície plana. (a) I: a matriz é elasticamente	47
	fixada a máquina; (b) II: a matriz é rigidamente fixada a máquina	
2.29	Esquema do projeto da ferramenta para forjamento de engrenagem com	
	punção e contra punção chanfrados. (a) III: a matriz é elasticamente fixada a	49
	máquina; (b) IV: a matriz é rigidamente fixada a máquina.	
2.30	Formação de dentes usando dois projetos de matrizes com punções planos: (a)	
	matriz fixa; (b) matriz móvel. Figura 3.15 - Formação dos dentes usando dois	50
	projetos de matrizes com punções chanfrados: (a) matriz fixa; (b) matriz	
	móvel.	
2.31	Cargas de forjamento usando diferentes projetos de matrizes	52
2.32	Cargas no punção e contra punção no forjamento da engrenagem: (a) matriz	53
	fixa e punção chanfrado; (b) matriz móvel e punção chanfrado.	
2.33	Conjunto de matriz de forjamento da engrenagem (matriz móvel e punção	54
	chanfrado)	
2.34	Predição de cargas de forjamento pelo MEF (matriz móvel e punções	55
	chanfrados)	
2.35	Formação dos dentes no processo de forjamento da engrenagem (matriz móvel	55
	e punção chanfrado) (a) teste de forjamento (b) FE predição.	
2.36	Efeitos do atrito na formação dos dentes (matriz móvel e punções chanfrados):	57
	(a) coeficiente de atrito m= 0; (b) coeficiente de atrito m= $0,1$; (c) coeficiente	
	de atrito $m=0,2$	
3.1	Engrenagem helicoidal	62

xiv

Dimensionais dos componentes para simulação (a) blank, (b) matriz e (c)	64
punção.	
Sólidos de revolução gerados para entrada de dados no simulador (a) punção, (b)	65
blank e (c) matriz.	
Esquema do ferramental para extração	67
Otimização de interferência e montagem	69
Montagem da matriz	70
Dimensional do eletrodo utilizado na usinagem dos dentes da engrenagem	71
Configuração do ferramental	72
Montagem do ferramental e do acumulador hidráulico na prensa	73
Esquema da montagem do ferramental	74
Representação da coleta de dados	75
Representação do corpo de prova para análise de fibramento	77
Representação das regiões de análise	78
Esquema da célula de carga	79
Sistema de monitoramento do processo e acumulador hidráulico.	79
Exemplos de aplicação da nomenclatura para análise microestrutural.	80
Ressalto no pé do dente	81
Riscos no pé do dente	82
Ausência do raio na raiz dos dentes	82
Geração correta do diâmetro da raiz	82
Representação da origem da análise gráfica do perfil do dente	83
Representação da origem da análise gráfica do perfil do flanco direito e	83
esquerdo	
Representação da origem da análise gráfica ao longo do perfil do dente	84
Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice	84
Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice no flanco	85
direito e esquerdo	
Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice em 80% da	85
largura do dente	
Esquema de medição da excentricidade	86
	Dimensionais dos componentes para simulação (a) blank, (b) matriz e (c) punção. Sólidos de revolução gerados para entrada de dados no simulador (a) punção, (b) blank e (c) matriz. Esquema do ferramental para extração Otimização de interferência e montagem Montagem da matriz Dimensional do eletrodo utilizado na usinagem dos dentes da engrenagem Configuração do ferramental Montagem do ferramental e do acumulador hidráulico na prensa Esquema da montagem do ferramental Representação da coleta de dados Representação da coleta de dados Representação do corpo de prova para análise de fibramento Representação das regiões de análise Esquema da emonitoramento do processo e acumulador hidráulico. Exemplos de aplicação da nomenclatura para análise microestrutural. Ressalto no pé do dente Riscos no pé do dente Representação da origem da análise gráfica do perfil do dente Representação da origem da análise gráfica do perfil do dente Representação da origem da análise gráfica do perfil do dente Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice no flanco direito e esquerdo Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice no flanco direito e esquerdo

3.27	Análise do erro de excentricidade	87
3.28	Erro de excentricidade na variação dos desvios do ângulo de pressão	87
3.29	Medição de espaçamento no flanco esquerdo dos dentes	88
3.30	Erro de espaçamento dente a dente (fp)	88
3.31 (a)	Erro de espaçamento acumulado (Fp)	89
3.31 (b)	Representação do erro de espaçamento acumulado (Fp)	89
3.32	Operações de acabamento de engrenagem similar forjada a quente.	90
4.1 (a)	Gráfico de força x deslocamento – amostra de aço.	92
4.1 (b)	Gráfico de força x deslocamento – amostra de alumínio.	92
4.2	Solicitação de tensões inserto-anéis	93
4.3	Passos da simulação da operação de forjamento	95
4.4	Tensão equivalente da peça	97
4.5	Deformação plástica equivalente da peça	98
4.6	Distância entre a peça e matriz	98
4.7	Pressão de contato entre peça e matriz	99
4.8	Taxa de deformação efetiva da peça	99
4.9	Escoamento do material	100
4.10	Análise do grau de deformação - amostras de alumínio	101
4.11	Sequência de ensaios - amostras de alumínio	102
4.12	Análise do grau de deformação: amostras de aço	103
4.13	Sequência de ensaios: amostras de aço	103
4.14	Variação dimensional do diâmetro externo - amostras de alumínio	105
4.15	Variação dimensional do diâmetro externo – amostras de aço	106
4.16	Análise de dureza entre faces – amostras de alumínio	107
4.17	Análise de dureza entre faces - amostras de aço	108
4.18	Representação do fibramento	109
4.19	Análise de dureza no flanco do dente; amostras de alumínio	110
4.20	Análise de dureza no flanco do dente: amostras de aço	111
4.21	Carga de forjamento - amostra de alumínio	112
4.22	Carga para forjamento das amostras de aço	113
4.23	Carga para forjamento das amostras de aço mais representativas	114

4.24	Carga de forjamento - amostra de aço.	114
4.25	Microestrutura da engrenagem de alumínio (aumento 200x)	115
4.26	Amostra e região de análise preforma	115
4.27	Análise de microestrutura por região da pré-forma	117
4.28	Amostra 2 e região de análise	118
4.29	Gráfico de força da amostra 2	118
4.30	Análise de microestrutura por região da amostra 2	119
4.31	Amostra 3 e região de análise	120
4.32	Gráfico de força da amostra 3	120
4.33	Análise de microestrutura por região da amostra 3	121
4.34	Amostra 4 e região de análise	122
4.35	Gráfico de força da amostra 4	122
4.36	Análise de microestrutura por região da amostra 4	123
4.37	Amostra 5 e região de análise	124
4.38	Gráfico de força da amostra 5	124
4.39	Análise de microestrutura por região da amostra 5	125
4.40	Amostra 8 e região de análise	126
4.41	Gráfico de força da amostra 8	126
4.42	Análise de microestrutura por região da amostra 8	127
4.43	Amostra 14 e região de análise	128
4.44	Gráfico de força da amostra 14	128
4.45	Análise de microestrutura por região da amostra 14	129
4.46	Visão geral do grau de encruamento em relação à força	130
4.47	Sequência das operações de usinagem de uma engrenagem similar	137
4.48	Comparação entre peso da preforma, engrenagem usinada e engrenagem	138
	forjada	

Lista de Tabelas

2.1	Valores comparativos dos processos de forjamento					
2.2	Limites importantes do Processo de Extrusão a Frio de acordo com a Vida	15				
	Econômica da Ferramenta					
2.3	Aços ferramentas utilizados no processo de forjamento a frio	23				
3.1	Composição química do aço ABNT M2 (% em peso)	59				
3.2	Composição química do aço SINTER 23 (% em peso)	59				
3.3	Composição química do aço DIN 1.2721 (%)	60				
3.4	Composição química do alumínio liga ABNT 6351 (% em peso)	60				
3.5	Composição química do aço DIN 16 Mn Cr5 (% em peso)	61				
3.6	Dados para projeto e fabricação da engrenagem	62				
3.7	Dados utilizados na programação	66				
3.8	Sequência utilizada na preparação das amostras	75				
3.9	Plano de análise do grau de deformação para amostras de alumínio	76				
3.10	Plano de análise do grau de deformação para amostras de aço	76				
3.11	Nomenclatura das amostras	80				
4.1	Resultados das análises de tensões	94				
4.2	Distância entre faces: amostras de alumínio	101				
4.3	Distância entre faces: amostras de aço	102				
4.4	Análise dimensional do diâmetro externo das amostras de alumínio	104				
4.5	Análise dimensional do diâmetro externo das amostras aço	105				
4.6	Análise de dureza nas faces – amostras de alumínio	106				
4.7	Análise de dureza nas faces - amostras de aço	107				
4.8	Análise de dureza no flanco do dente: amostras de alumínio	110				

4.9	Análise de dureza no flanco do dente: amostras de aço	110
4.10	Análise dimensional do erro acumulado para todos os dentes	131
4.11	Resultado da análise dimensional do eletrodo para a proporção do desvio da excentricidade - eletrodo	132
4.12	Resultado da análise dimensional do eletrodo para a proporção do desvio de passo	132
4.13	Resultado da análise dimensional do eletrodo para a proporção do desvio na envolvente	133
4.14	Resultado da análise dimensional da engrenagem do erro acumulado para todos os dentes (DIN 3962)	135
4.15	Resultado da análise dimensional da engrenagem para a proporção do desvio da excentricidade	135
4.16	Resultado da análise dimensional da matriz para a proporção do desvio de passo	136
4.17	Resultado da análise dimensional da matriz para a proporção do desvio na envolvente	137

Nomenclatura

- ALE Formulação lagrangiana-euleriana arbitrária
- CAD Projeto assistido por computador
 - Taxa de deformação verdadeira
- φ
- ε_{Amax} Redução de área máxima possível
- ε_{Amin} Redução de área mínima possível
- φ_{max} Deformação máxima
- Kf Resistência ao escoamento
- D_a Diâmetro externo
- d₀ Diâmetro inicial
- D₁ Diâmetro final
- D_i Diâmetro interno
- FEM Método dos Elementos Finitos
- h_0/d_0 Relação da altura inicial com o diâmetro inicial
 - P_i Pressão interna
 - f Espaçamento entre todos os dentes
 - fp Erro de espaçamento dente a dente
- Fp Erro de espaçamento acumulado
- r Raio
- μ Coeficiente de atrito
- $\mathcal{E}(\%)$ Porcentagem de redução de área
 - σ_{E} Tensão de escoamento

Capítulo 1

Introdução

1.1 Justificativas e Objetivos

Atualmente, percebe-se que a Indústria de Forjamento necessita de um enfoque direcionado mais especificamente às mudanças tecnológicas para que haja adequação à competição global, e assim faz-se necessário que se busquem novas tecnologias a partir de pesquisas, parcerias e aprendizagens constantes.

Durante as duas últimas décadas, o desenvolvimento de tecnologia vem se tornando um fator preponderante para a diferenciação entre as indústrias do setor metal-mecânico. A acirrada disputa pelo mercado mundial estimula a busca, cada vez maior, da produção de componentes com menor custo, melhor qualidade final e maior valor agregado ao produto em cada etapa do trabalho (SANTOS *et al.*, 2001).

As novas tecnologias são adquiridas em universidades internacionais de primeira linha, as quais se destacam no campo da conformação mecânica. As parcerias são realizadas com cientistas desses países, bem como com indústrias nacionais do mesmo ramo de atividade (DEAN, 2000). Já as aprendizagens constantes ocorrem diariamente por meio de cursos e aplicações práticas.

A indústria de forjamento sempre reuniu peças em escala padrão, mas a concorrência gerou um conjunto de exigências e adequações para a sobrevivência no mercado. Portanto, apesar de seguirem na mesma área de atuação, as empresas voltaram-se para uma análise interna do seu ambiente organizacional para que se possam identificar riscos e oportunidades presentes e futuras.

Como exemplo de um caso no Brasil, uma forjaria que passou por esse processo de adequação, escolheu uma parte específica do mercado para sua atuação, direcionada à fabricação de peças de precisão forjadas a frio, em pequenos lotes com quantidade variando entre 1000 a 5000 peças, e com geometria complexa. Essa escolha deveu-se às seguintes condições:

- Grande experiência com forjamento a frio, resultado do tempo de atuação na área;
- Equipamentos apropriados;
- Possuir clientes especiais e fiéis, cujas necessidades foram se modificando e deveriam ser sempre satisfeitas.

Tendo em vista essa necessidade de adequação tecnológica, este trabalho foi proposto e realizado em conjunto com essa forjaria nacional, de forte atuação no ramo de peças automobilísticas, forjadas a frio e a morno. Essas peças podem ser acabadas ou quase acabadas, em função da necessidade do cliente, e no caso de quase acabadas, sua finalização é obtida por operações de usinagem com pequena remoção de sobremetal.

De acordo com os objetivos dessa empresa na busca do conhecimento de novas tecnologias e aquisição de novos produtos e processos, lançou-se o seguinte desafio tecnológico para o desenvolvimento desta tese:

- Conhecer a tecnologia do processo de fabricação de uma engrenagem helicoidal forjada a frio;
- Analisar as condições metalúrgicas da peça trabalhada;
- Analisar o escoamento do material trabalhado;
- Determinar as tensões atuantes no material trabalhado e nas ferramentas;
- Determinar as forças necessárias para formação da engrenagem helicoidal;
- Determinar os desvios dimensionais nos dentes da engrenagem devido ao forjamento;

• Obter o tempo de fabricação no forjamento a frio, considerando-se o ciclo de forjamento em uma operação, quando se deseja um produto acabado, e comparar com o processo normalmente utilizado para desbaste, e acabamento de uma engrenagem helicoidal forjada a quente.

O forjamento de engrenagens em comparação com o processo de usinagem tem a vantagem da ótima taxa de utilização de matéria-prima, produtos com propriedades mecânicas controladas, e alta produtividade. Apesar desses aspectos econômicos positivos, a proposta para a fabricação de engrenagens helicoidais por processos de usinagem ainda é a mais viável para atender a capacidade de fabricação de caixas de transmissão automotiva, devido à falta de conhecimento tecnológico na fabricação por forjamento a frio.

Dependendo de suas características geométricas, engrenagens de dentes retos e algumas engrenagens de dentes helicoidais podem ser forjadas a frio, porém diversas geometrias de engrenagens usadas em caixas de transmissão de potência, ainda impedem a fabricação pelos métodos convencionais de forjamento a frio.

Um método que torna possível a manufatura dessas engrenagens é o forjamento em matrizes com cavidades completamente fechadas, que garantem a qualidade contínua da peça trabalhada e evitam possíveis danos por operações de usinagem ou furação. Uma das variações desse processo de forjamento é denominada extrusão lateral, e seu estudo e aplicação é o principal objetivo deste trabalho.

Esse conceito de processo ganhou impulso com o advento do desenvolvimento de *softwares* de simulação numérica, desenvolvidos por pesquisadores em laboratórios de grandes centros universitários internacionais.

No entanto, quando se deseja desenvolver um novo processo de forjamento, a partir de sua simulação, deve-se ter em mente os principais parâmetros a serem estudados e quais programas de simulação apresentam as melhores condições de análise.

A obtenção de resultados confiáveis na simulação só é possível com o uso de métodos numéricos para solução de equações relacionadas com a plasticidade e o comportamento mecânico das ligas metálicas. Dentre os métodos mais utilizados destacam-se o Método dos Elementos Finitos e o Método dos Volumes Finitos. Nesse contexto, fica evidente a crescente importância da utilização dos recursos computacionais atualmente disponíveis.

Esta tese divide-se nos seguintes capítulos:

- 1) Introdução, com os objetivos e justificativas do trabalho realizado;
- Revisão Bibliográfica sobre os processos de conformação mecânica, com ênfase ao processo de forjamento a frio, especialmente o processo de extrusão lateral, e à simulação numérica e suas aplicações na forjaria;
- Materiais e Métodos, no qual se descrevem os materiais utilizados no processo e na fabricação das ferramentas, e se apresentam os métodos utilizados na simulação numérica e no planejamento experimental;
- 4) Análise e Discussão dos Resultados obtidos pela simulação e nos ensaios;
- 5) Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.

Referências bibliográficas

Anexos

Os resultados obtidos nesta tese permitiram a publicação de um artigo em periódico especializado internacional e a apresentação dos seguintes trabalhos em congressos nacionais:

A contribution on the study of cold forging of steel helical gears, Int. Journal **of** Mechatronics and Manufacturing Systems, 2008, v. 1, nos. 2 e 3, pp. 243-253.

Metodologia de Projeto Aplicado a Ferramentas Críticas no Processo de Forjamento a Frio, 3ª. Conferência Internacional de Forjamento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, outubro de 2003 Uma Nova Proposta para o Projeto e Fabricação de Ferramentas em Forjamento a Frio, 1^o. Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, São Paulo – SP, outubro de 2003.

Metodologia para Melhoria da Vida Útil de Ferramentas Utilizadas na Fabricação de Peças Forjadas a Frio, 5^a. Conferência Internacional de Forjamento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, outubro de 2005.

Uma Contribuição para o Estudo de Forjamento a Frio de Engrenagens Helicoidais de Aço, 7^a.Conferência Internacional de Forjamento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, outubro de 2007.

Capítulo 2

O Processo de Forjamento

2.1 Aspectos Gerais dos Processos de Forjamento

Os processos de manufatura de produtos metálicos são classificados dentro de seis principais grupos: fundição, conformação mecânica, usinagem, soldagem, tratamento térmico e tratamento superficial.

Dentre esses processos, destaca-se o grupo de conformação mecânica no qual um componente simples como um tarugo ou uma chapa metálica, por exemplo, é plasticamente conformado entre as ferramentas (matriz ou estampo) para que se obtenha a configuração final desejada. Em outras palavras, um componente de geometria simples é transformado num outro complexo, conformado por ferramentas que guardam a geometria desejada e aplicam pressão ao material metálico deformando-o (BRESCIANI *et al.*, 1991).

O processo de conformação dos metais comumente produz pouca ou nenhuma sobra, e a geometria final do componente é obtida num curto período de tempo, normalmente, com um ou poucos golpes de uma prensa ou martelo.

Como resultado final, a conformação de metais apresenta um elevado potencial para a economia de energia e de matéria-prima, especialmente em médios e grandes lotes, em que o custo do ferramental pode ser facilmente amortizado. Além disso, para um dado peso, componentes produzidos por conformação exibem melhores propriedades mecânicas e

características metalúrgicas, além de maior confiabilidade estrutural com relação àqueles produzidos por fundição ou usinagem. Vale lembrar que a conformação plástica altera a estrutura interna de uma liga metálica, portanto, deve-se esperar que também altere significativamente suas propriedades mecânicas (VAN VLACK, 1978).

Os profissionais ligados praticamente ao campo da conformação defendem a idéia de que essa tecnologia é orientada basicamente pela experiência, devida à grande quantidade de conhecimentos práticos acumulados nesse campo, na sua maioria, resultados de diversas tentativas e erros. Apesar desse conhecimento profundamente empírico, a indústria de conformação de metais tem sido capaz de fornecer produtos sofisticados fabricados dentro das mais rígidas normas, usando ligas recentemente desenvolvidas e difíceis de conformar.

As técnicas de conformação listadas a seguir e representadas na figura 2.1 são classificadas de acordo com a direção principal da tensão aplicada: (SCHULER, 1998)

- Conformação sob condições compressivas;
- Conformação sob tensões combinadas e condições compressivas;
- Conformação sob condições trativas;
- Conformação por flexão;
- Conformação sob condições de cisalhamento.

Os fenômenos físicos que descrevem uma operação de conformação são difíceis de serem expressos por relações quantitativas. Fenômenos como o escoamento de metais, o atrito na interface ferramenta-peça, a geração e a transferência de calor durante o escoamento plástico do metal e seu relacionamento com a microestrutura, propriedades e as condições de processo, apresentam dificuldades de previsão e análise. (ALTAN, 1999).

Freqüentemente, quando se produzem componentes discretos, várias operações intermediárias de conformação (pré-conformação) são necessárias para transformar a geometria inicial simples em uma complexa, sem que se causem danos ao material ou se prejudique suas propriedades.



Figura 2.1 – Classificação dos processos de produção, usados em conformação. Modificado de SCHULER (1998).

O principal objetivo de qualquer método de análise que considere os fenômenos anteriormente descritos é auxiliar o projeto de conformação e envolve essencialmente as seguintes etapas:

- a) Estabelecer as relações cinemáticas (forma, velocidades, taxas de deformações) entre a parte conformada e a parte sem conformação, a fim de prever o escoamento metálico.
- b) Estabelecer o limite de conformabilidade, a fim de determinar se é ou não possível a conformação da peça metálica sem a geração de falhas internas ou superficiais.
- c) Prever as forças e tensões necessárias para efetuar a operação de conformação, a fim de que o ferramental e equipamento possam ser projetados ou selecionados.

BRESCIANI *et al.* (1991), destaca que na conformação dos metais um dos processos mais estudados é o forjamento que pode ser classificado em função da temperatura de trabalho, como sendo a quente, a morno ou a frio.

O forjamento a frio é realizado abaixo da temperatura de recristalização, já o morno ocorre em temperaturas intermediárias entre o forjamento a frio e a quente que é realizado sempre bem acima da temperatura de recristalização. Na figura 2.2 há uma representação esquemática das faixas de temperatura de realização desses processos e a avaliação da taxa de deformação verdadeira ($\overset{*}{\varphi}$) em função da temperatura para os aços representados sobre as linhas.

Uma comparação de vários aspectos dos processos de forjamento a frio, a morno e a quente é apresentada por HIRCHVOGEL E DOMMELEN (1992) na tabela 2.1.

Vale ressaltar que os valores da tabela 2.1 são apenas referências para apontar tendências e não devem ser tomados como valores absolutos, pois a fabricação de cada tipo de peça é uma situação particular.

2.2 Forjamento a Frio de Aços

O forjamento a frio ou extrusão a frio é um tipo especial de processo de forjamento, no qual o metal à temperatura ambiente é forçado a escoar, plasticamente, sob uma força compressiva para uma variedade de formas ou perfis. Estes perfis são usualmente simétricos, com pequenas assimetrias, e sem rebarbas (ALTAN, 1999).



Figura 2.2 – Tensão de escoamento, carepa formada, e avaliação do grau de deformação (forjabilidade) em função da temperatura - modificada de SCHULER (1998).

O forjamento a frio é realizado sem pré-aquecimento da matéria-prima ou das ferramentas, que se aquecer durante o processo de conformação, dependendo da modificação de forma, da velocidade de deformação e de outros parâmetros de processamento. No trabalho a frio, por definição, os mecanismos de recristalização não são atuantes. Neste caso, à medida que o metal é conformado, ocorre o encruamento, sua resistência aumenta e a ductilidade diminui. (BILLIGMANN, 1979).

Se, por um lado, ensaios de laboratório mostram que acompanhando o aumento da dureza, também se elevam os limites de escoamento e de resistência, por outro lado, o encruamento reduz a ductilidade, pois parte do alongamento possível é consumida durante a conformação a frio. Como a ductilidade diminui com o progresso da deformação, podem ocorrer falhas por ruptura antes de se atingir as dimensões finais desejadas, caso a deformação seja excessiva.

Para que se evitem essas dificuldades, as operações de conformação a frio em geral, são realizadas em etapas, com operações de recozimento intermediárias. Apesar do aumento de custo envolvido, tais operações permitem uma maior flexibilidade, à medida que possibilitam a obtenção

de produtos com diversos graus de encruamento e consequentemente, diferentes propriedades mecânicas (DIETER, 1986).

	Forjamento a quente	Forjamento a frio	Forjamento a morno		
Tolerância	IT 12 - IT 16	IT 7 - IT 11	IT 9 - IT 12		
Peso das peças	5g - 1500kg	1g - 50kg	100g - 50kg		
conformadas					
Lotes econômicos (peso	min. 500 peças	min. 3000 peças	min. 1000 peças		
de 1kg)					
		aços de baixa liga	aços com teores de elementos de liga		
Aços conformáveis	todos	(C<0,45%; outros	<10%)		
		elementos <3%)			
Formas	todas sem reentrâncias	principalmente	axissimétricas são desejáveis, sem		
		axissimétricas sem	reentrâncias		
		reentrâncias			
			razão de deformação φ>1,6 (limite		
Conformabilidade (ϕ)	normalmente não há	razão de deformação	superior depende da composição do		
	limite	φ<1,6	aço e da temperatura)		
Qualidade superficial	>100µm	≈10µm	<50µm		
Possibilidade de	limitada	Adequada	Vantajosa		
automação					
Tratamento superficial	não é necessário	recozimento,	normalmente não há tratamento		
		fosfatização	superficial		
Tratamento intermediário	não é necessário	recozimento,	normalmente não é necessário		
		fosfatização			
Vida da matriz	2000-5000 peças	20000-50000 peças	10000-20000 peças		
Custos para					
desenvolvimento e	baixo	médio	alto		
construção de ferramentas					

Tabela 2.1 - Valores comparativos dos processos de forjamento (HIRCHVOGEL E DOMMELEN, 1992)

Assim, os produtos forjados a frio apresentam-se encruados com nível de resistência mecânica elevado, e como a capacidade plástica do metal (conformabilidade) é reduzida, diminui-se também a possibilidade de grandes reduções de área ou a obtenção de geometrias complexas. Portanto, o

forjamento a frio é normalmente empregado para a fabricação de peças similares a sólidos de revolução, com dimensões e pesos relativamente reduzidos.

Muitas vezes, é possível que se dispense um beneficiamento da peça após o forjamento, ao programarem-se adequadamente os vários estágios de conformação nos lugares indicados da peça a ser forjada, obtendo-se diferentes valores de resistência, alta dureza, e direção de fibramento, aliados à boa resistência mecânica, tolerâncias fechadas e boa qualidade superficial. A relação custo-benefício das técnicas de processo utilizadas no forjamento pode ser considerável, mas não depende especificamente da peça, e tão pouco do método de produção previamente utilizado.

Quando comparado a outros processos, o forjamento a frio apresenta as seguintes vantagens (MEIDERT, 2000).

• Grande economia de matéria-prima (às vezes até 75%), como mostra a figura 2.3;

• Possibilidade de produzir peças de geometria complexa, com tempo reduzido de processo (figura 2.4);

- Grande precisão de medidas e geometrias, com elevada qualidade superficial;
- Melhoramento das características mecânicas das peças forjadas a frio, mediante aproveitamento do aumento de dureza e do fibramento mecânico favorável.

O forjamento a frio é um processo para a produção em série de peças, de modo que, quanto maior a quantidade de peças, mais econômica torna-se sua aplicação, de acordo com as instalações fabris disponíveis.



Figura 2.3 – Comparação entre o processo de usinagem e o forjamento a frio (SCHULER, 1998).



Figura 2.4 – Exemplos da variedade geométrica de peças metálicas produzidas por forjamento a frio (Fonte KOWOO Co.,Ltd.)

2.3 Tipos de Processos

Os processos básicos que envolvem extrusão a frio são classificados de acordo com as direções de escoamento do material como a extrusão direta, a inversa e a lateral, e ainda, em função do formato final da peça, como a extrusão de tarugos, a de tubos e a de copos. Tratando-se de produção de peças sólidas, as operações clássicas da tecnologia de extrusão são suplementadas por processos como recalque e estiramento e limitadas conforme tabela 2.2.

A seguir, a legenda auxilia a representação ao discriminar cada item da figura 2.5 para as referidas operações.

- I. Antes do forjamento
- II. Depois do forjamento
 - a) Punção;
 - b) Inserto;
 - c) Material trabalhado;
 - d) Extrator;
 - e) Contra-punção;
 - f) Mandril;
 - g) Matriz superior;
 - h) Matriz inferior.



Figura 2.5 - Representação esquemática das operações do processo de extrusão a frio (SCHULER, 1998).

		Extrusão direta		Extrusão direta		Extrusão inversa				
		de tarugo		de tubo			de copo			
Processo							h_0			
/	Valor limite	ε _{Amax}	ϕ_{max}	(h_0/d_0)	€ _{Amax}	ϕ_{max}	(h_0/d_0)	ϵ_{Amin}	€ _{Amax}	(h_0/d_0)
ma	terial	(%)			(%)			(%)	(%)	
Mat. Não ferrosos	alumínio (e.g. Al99,5).	0,98	4		0,98	4		0,10	0,98	6
	chumbo zinco cobre (E-Cu)	0,85	1,9		0,85	1,9		0,12	0,80	4
	latão (CuZn37 – CuZn28)	0,75	1,4		0,75	1,4		0,15	0,75	3
-	fácil para conformar (e.g. Qst32-3, Cq15)	0,75	1,4	10	0,75	1,4	15	0,15	0,75	3
Aços	difícil para conformar (e.g. Cq35, 15MnCr5)	0,67	1,1	6	0,67	1,1	12	0,25	0,65	2
	mais difícil p/ conformar (e.g. Cq45, 42CrMo4)	0,60	0,9	4	0,60	0,9	8	0,35	0,60	1,5

Tabela 2.2 – Limites importantes do Processo de Extrusão a Frio de acordo com a Vida Econômica da Ferramenta (SCHULER, 1998)

2.4 Extrusão Lateral

O processo de extrusão lateral apresenta a oportunidade de se aumentar o limite de geometrias que não podem ser produzidas pelos processos clássicos de forjamento e extrusão. Apesar disso, a extrusão lateral não tem sido muito aplicada no meio industrial, e é ainda pouco estudada.

Similar aos processos já mencionados e mostrados na figura 2.5, a extrusão lateral também é diferenciada quanto à geometria final desejada e sua denominação também é baseada no escoamento do material sob ação de um ou dois movimentos das ferramentas.
2.4.1 Descrição do Processo

O forjamento de precisão é realizado em matrizes fechadas a fim de garantir a contínua qualidade de peças trabalhadas, e evitar a necessidade de possíveis operações como rebarbação e estampagem (SIEGERT, 2000).

Na extrusão lateral faz-se necessária a utilização de matrizes partidas com a geometria requerida da peça, matrizes essas que consistem principalmente de duas seções que são posicionadas transversalmente à direção do movimento do golpe (figura 2.6).

O método empregado nesse processo pode ser dividido em quatro passos: na primeira fase, o tarugo é colocado dentro da cavidade, as duas seções matriciais são fechadas e uma força de fechamento de elevada intensidade é aplicada nos dois moldes para mantê-los na posição fechada durante a conformação.

O processo de extrusão é então executado de acordo com os movimentos dos golpes que serão usados. Já a fase final envolve a abertura dos dois moldes e ejeção da peça final extrudada.



Figura 2.6 – Esquema do processo de extrusão lateral (SIEGERT, 2001).

2.4.2 Limites do Processo de Extrusão Lateral

A extrusão lateral geralmente permite obter-se formatos como flanges, anéis ou outras características geométricas (dentes, saliências) a partir de duas ou mais matrizes, geralmente superior e inferior, que são fechadas sob grande pressão e determinam o formato da peça. Esse permanece inalterado durante todo o processo de forjamento, enquanto o material é forçado a escoar nas regiões central e axial das matrizes completamente fechadas.

Depois que as matrizes são fechadas, o material é pressionado internamente através da penetração do punção. Contudo, considera-se que é possível produzir flanges com uma relação máxima de 2,5 do diâmetro maior externo em relação ao diâmetro do tarugo (D1/d0 \leq 2,5) em uma simples operação de forjamento (SCHULER, 1998). A razão entre a espessura do flange e o diâmetro inicial do tarugo (s/d₀) não deve exceder 1,4, pois poderá ocorrer a separação do material com superfície neutra (figura 2.7).

As forças requeridas para extrusão lateral são substancialmente menores se comparadas às do recalque, por exemplo, e sua determinação ainda é puramente experimental, devido à dificuldade em representar-se nos modelos de simulação os diversos estados de tensão desenvolvidos devido à ação das ferramentas.



Figura 2.7 – Esquema para limitação do processo de extrusão lateral (SCHULER, 1998).

2.4.3 Matérias-Primas Empregadas na Extrusão Lateral

ALTAN (1999), por sua vez, assinala que o grupo de materiais possíveis de extrusão lateral consiste principalmente em aços e ligas de alumínio, relacionados a seguir:

- Aços para cementação: sem liga ABNT 1010, 1015; e os ligados 5115, 5120, 3115;
- Aços tratáveis termicamente: sem liga ABNT 1020, 1035; e ligados 5140, 4130, 4140, 8620;
- Ligas de Al puro ou de Al quase puro: 1285, 1070, 1050, 1100;
- Ligas de alumínio não endurecíveis: 3003, 5152, 5052;
- Ligas de alumínio endurecíveis: 6063, 6053, 6066, 2017, 2024, 7075.

2.4.4 Preparação do Tarugo

Os materiais para forjamento são fornecidos laminados ou trefilados, na forma de barras ou arames, assim como na forma de tarugos cisalhados ou serrados. As dimensões, peso e acabamento superficial de um tarugo serrado ou pré-forma devem ser controlados precisamente, a fim de manter as tolerâncias dimensionais na peça forjada a frio e evitar sobrecarga na prensa e nas ferramentas de forjamento (BILLIGMANN, 1979). Esse controle deve ser ainda mais cuidadoso no caso da extrusão lateral, pois o fato das matrizes permanecerem fechadas durante o processo exige o uso de tarugos com volumes precisos.

2.4.5 Tratamento Térmico

Normalmente, o aço fornecido em bobinas já se apresenta no estado coalescido. Já o material recebido em barras, dependendo da necessidade, é tratado termicamente, para que sofra um coalescimento, tornando-se mais adequado para a conformação, especialmente para os aços que apresentam baixa forjabilidade a frio. Após o tratamento térmico, o material é lubrificado, pois a condição de atrito entre a matriz e a peça é de grande importância na conformação da peça.

Em seguida, o material é submetido a uma etapa de conformação, na qual ocorre o encruamento e a diminuição da conformação. Dessa forma, é necessário que se repita o ciclo

(recozimento intermediário para alívio de tensões, lubrificação, conformação) até que a forma final seja obtida, se existir necessidade, a peça é temperada e revenida para melhorar as propriedades mecânicas.

2.4.6 Lubrificação

No forjamento a frio, o lubrificante deve aceitar altas pressões, da ordem de 2000 MPa na extrusão de aço, para evitar o contato entre a ferramenta e o material sob deformação. No forjamento a frio de aços baixo carbono ou baixa liga é comum a prática de recobrir-se a superfície do tarugo ou da bobina com um substrato retentor de lubrificante, comumente uma cobertura de fosfato de zinco é um bom substrato para lubrificantes, que trabalhem sob altas pressões de forjamento.

Os processos de ensaboamento a base de sabão e aplicação de bissulfeto de molibdênio, são muito utilizados em tarugos processados em prensas com múltiplos estágios. Quando o forjamento se utiliza de fio máquina como matéria-prima, é mais comum o uso de óleos minerais, que são geralmente empregados para melhorar as propriedades do lubrificante e do substrato (SCHULER, 1998).

2.4.7 Etapas do Planejamento de Processo

Normalmente, existe uma sequência típica para o planejamento do processo de forjamento a frio, que se baseia principalmente nos modos de escoamento do material. O fluxograma apresentado na figura 2.8 representa bem essa sequência.

O material trabalhado segue geralmente este fluxo de processo, mas existem condições específicas que dependem de cada forjaria, em função do conhecimento prático adquirido e da disponibilidade de equipamentos e facilidades que acabam por introduzir outros processos auxiliares como operações de estampagem, e até mesmo eliminar etapas de tratamento térmico entre operações subseqüentes de forjamento a frio.

No caso de extrusão lateral, a peça segue esse fluxograma apenas uma vez, pois normalmente esse tipo de processo é escolhido por permitir que a peça pronta seja obtida em apenas uma operação de conformação.



Figura 2.8 - Fluxograma típico do processo de forjamento a frio.

2.4.8 Tipos de Produtos

Em geral, o processo de forjamento a frio, incluindo a extrusão lateral, apresenta algumas características que permitem a obtenção de produtos com elevada qualidade geral (bom acabamento superficial e tolerâncias dimensionais reduzidas). Dentre essas características destacam-se:

• Ausência de problemas relacionados ao aquecimento do tarugo, como oxidação, descarbonetação ou contração térmica;

• Presença de lubrificação eficiente;

• Equipamentos (prensas) com elevada rigidez, tolerâncias dimensionais e geometrias apertadas;

• Ferramentas rígidas com elevada qualidade superficial, dimensional e geométrica.

A qualidade de trabalho encontrada na extrusão a frio de aços apresenta-se entre IT 8 e IT 13 (em situações especiais, obtém-se até IT 7), ou seja, qualidades de trabalho semelhantes às encontradas nas operações de usinagem para desbaste e acabamento, por exemplo, o torneamento.

Já a rugosidade superficial média (R_a) dos produtos, varia entre 0,3 e 3,5 μ m, de acordo com as condições de redução de seção e de acabamento das ferramentas. Esses valores são característicos de processos como a retificação e o torneamento em produção.

Sempre que possível, deve-se considerar a utilização e a funcionalidade dos produtos acabados, observando as regiões a serem necessariamente usinadas, projetando forjados geometricamente mais favoráveis, e com tolerâncias dimensionais mais abertas.

Isto contribui de certa forma, para que o período de vida das ferramentas seja prolongado, reduzindo, consequentemente, os custos totais de fabricação, melhorando assim, a produtividade. A figura 2.9 apresenta alguns produtos forjados a frio por extrusão lateral, e a figura 2.10 apresenta produtos obtidos por processos de forjamento a frio convencionais.

2.4.9. Defeitos Característicos do Processo

Os principais defeitos que podem surgir durante o processo de extrusão lateral são:

• Rebarbas, devido ao excesso de volume no tarugo;

• A não conformidade de preenchimento nas duas extremidades axiais da peça, na falta de volume do tarugo.

Em contraste com o forjamento convencional, o material sob deformação não pode invadir as divisões das matrizes, o que requer que o volume do tarugo seja extremamente preciso evitando sobrecarga na ferramenta. É típico permitir uma variação de massa entre +/- 0,5 a1% no volume do tarugo de partida, que pode ser obtido por cisalhamento ou serra (DOEGE, 2000).



Figura 2.9 - Exemplos de Extrusão Lateral (UNIVERSIDADE TÉCNICA - LISBOA).



Figura 2.10 - Tipos de produtos obtidos no processo de forjamento a frio (TECHFORGE - BRASIL).

2.4.10 Materiais para Ferramentas

O aço ferramenta mais frequentemente usado para o forjamento a frio é o aço rápido, que também pode ser fabricado pela metalurgia do pó, e que apresenta muita uniformidade na distribuição de carbonetos. Isso resulta em uma acentuada melhoria da tenacidade e uma resistência à compressão extremamente alta.

Nas práticas industriais, matrizes e punções utilizados no processo de forjamento a frio estão freqüentemente sujeitas a parâmetros de projetos e adaptações, fazendo que as configurações dos projetos de matrizes e punções sejam de importância vital para a escolha do material dessas ferramentas (SCHULER, 1998).

Na tabela 2.3, encontram-se os aços mais empregados neste tipo de processo e as similaridades entre fornecedores.

SIMILARIDADES ENTRE MARCAS DE AÇOS							
VILLARES	WNr	DIN	AISI	BÖHLER	UDDEHOLM	PIRATINI	THYSSEN
VK10E	1 3207	S10-4-3-10	-	1900 A.A.C.		20	THYRAPID 3207
VK5E	1.3243	S6-5-2-5	M41	S705	25	25	THYRAPID 3243
VWM2	1.3343	S6-5-2	M2 Rec C	S600	-22	22	THYRAPID 3343
VWM7	1.3348	S2-9-2	M7	S400	20	20	THYRAPID 3348
VKM42	1.3247	S2-10-1-8	M42	S500			THYRAPID 3247
SINTER 23	-	-	-	S790 *	VANADIS 23		-
SINTER 30	- 2		-	S590 *	VANADIS 30	- 2	CPM REX 45
-3	-88		-	S390 *	-8	-55	CPM REX T 15
23	-2	-	M4	S690 *	-	-))	CPM M4
AÇO FERRAMENTA PARA TRABALHO A FRIO							
VC130	1.2080	X210 Cr 12	D3	K100	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	- 9	THYRODUR 2080
N2601	1.2601	X165 CrMoV12	-	K105	-22	-22	-
VC131	1.2436	X210CrW12	D6	K107	SVERKER23	AFP 828	THYRODUR 2436
VD2	1.2379	X155CrVM012 1	D2	K110	SVERKER21	AFP 826	THYRODUR 2379
N2631	1.2631	X50CrMoW9 11	5	K300AS	CHIPER	-53	-
VH13A	1.2345	X50CrVMo51	-	K306		 2	-
VW1	1.2516	120WV4	F1	K405	-	- Commencer	
VW3	1.2542	45WCrV7	S1	K450	REGIN 3	AFP 836	THYRODUR 2542
4 0	1.2550	60WCrV7	-	K455	REGIN 3	AFP 836	THYRODUR 2550
VND	1.2510	100MnCrW4	01	K460	ARNE	AFP 814	THYRODUR 2510
VCO	1.2721	50NiCr13	2	K605	GRANE	20	THYRODUR 2721
VETD	1.2833	100V1	ē	K760	7 .0	7.2	-
VET3	1.1545	C105VV1	3	K990	-5.5 (i	-20	-
VF800AT	-	8.5.8	ē 3	-	-	-5.0	-
-0	1.2380		-	K190	VANADIS 10	-6	-
-	-	-	-	K340	SLEIPNER	- 2	FOR 821 ESR
	1.2210	-	-	K510		-	THYRODUR 2210
-	1.2842	-	102	K720	- X.	-8	THYRODUR 2842

Tabela 2.3 – Aços utilizados no processo de forjamento a frio (VILLARES METALS)

2.4.11 Projeto de Matrizes

DOEGE (2000) enfatiza que com o aumento da demanda de complexidade de formatos e peças precisas, o ferramental tornou-se um dos fatores mais importantes para o custo e qualidade da peça trabalhada. Comparado com o ferramental do forjamento convencional, o do forjamento em matrizes fechadas requerer atenção especial ao se atender algumas especificações técnicas para o detalhamento da ferramenta.

• Guia Exata de Elementos da Ferramenta

Especialmente quando a matriz é fechada pelo punção superior, é necessária uma guia exata com uma folga usualmente pequena, menor que 0,1mm, de modo a evitar-se a formação de rebarba na face do forjado, e garantir-se a posição precisa dos elementos do ferramental de modo a garantir a qualidade geométrica e dimensional do produto.

Posição do Tarugo Dentro da Matriz

Para garantir que o preenchimento das matrizes apresente repetibilidade, todos os elementos do ferramental devem ter seu posicionamento bem definido, de modo que o centramento do tarugo seja feito facilmente e favoreça como consequência a automação da operação.

• Fechamento Seguro da Matriz

Esse é o fator mais importante para a função do conjunto de fechamento das matrizes, pelo fato de que na extrusão de peças muito precisas, a linha de separação das matrizes apresenta-se próxima dos elementos do ferramental que definem detalhes geométricos importantes do produto de modo a não se permitir, por exemplo, rebarbas nessas regiões.

De acordo com a Figura 2.11, o sistema pode ser fechado por elementos de fechamento adicionais ou por punções. Se a matriz é fechada por elementos de fechamento, o nível de pressão

no fechamento deverá ser maior que a pressão no interior das matrizes no final da conformação. Para fornecer a pressão de fechamento, frequentemente são utilizadas molas, que são comprimidas durante o deslocamento do material, oferecendo de certa forma, proteção contra uma eventual sobre carga. Se a pressão interna na matriz for maior que a pressão de forjamento permissível, as molas deverão compensar a abertura da matriz.



Figura 2.11 – Esquema de ferramenta com ação simples de molas (DOEGE, 2000).

• Requisitos de Prensa

Devido aos elevados esforços necessários para o fechamento das matrizes e para a própria extrusão lateral, a prensa a ser empregada deve apresentar requisitos especiais para a proteção contra possíveis sobre-cargas, que deverão ser absorvida pela superfície da mesa e sua própria estrutura. Portanto, sua rigidez será mantida a fim de não transmitir erros geométricos ao produto extrudado.

• Sistema de Ejeção

Devido ao fato de o forjado ser completamente ejetado após a operação, dependendo da geometria da peça, a carga de ejeção pode alcançar mais que 100 kN. Então, faz-se necessário um projeto que permita aliviar a carga durante a extração, principalmente no forjamento de engrenagens helicoidais, de modo a não causar distorções geométricas nos produtos causadas pela ejeção.

Repetibilidade do Processo

Para a repetibilidade de um processo de forjamento de precisão, a energia constante da prensa é muito importante, porque, no caso de uma energia menor, poderia haver comprometimento nas dimensões finais do forjado. Já, uma energia adicional aumentaria a pressão dentro da matriz e com isso, a deformação elástica atuaria de maneira ainda mais acentuada nos componentes como punção, contra-punção e na própria matriz, e desta forma, a recuperação elástica desses componentes também estaria comprometida.

2.4.12 Recuperação Elástica em Matrizes

O forjamento a frio de metais e especialmente de aços, é conhecido por causar um carregamento das ferramentas extremamente alto, e algumas vezes pode atingir 2000 a 3000 MPa. Esse carregamento pode ser responsável pela deformação elástica ou plástica da ferramenta, e consequentemente também pode influenciar a geometria e as dimensões do produto final.

Após a deformação elástica das ferramentas durante o forjamento, ocorre seu retorno elástico durante a extração do forjado, o que pode afetar o comprimento do forjado em variações de até 0,2mm e do diâmetro em até 0,1mm, o que pode significar até um terço do campo de tolerância ISO IT8. Atualmente, pode-se estimar a deformação elástica nos componentes do ferramental usando-se sistemas numéricos computacionais baseados, por exemplo, no Método dos Elementos Finitos – MEF (OSMAN, 1995).

Trabalhos futuros permitirão a utilização desses sistemas na previsão do retorno elástico da ferramenta, que será considerado na fabricação da própria, e garantirá a precisão dimensional da peça após o forjamento.

2.4.13 Mecânica do Processo para Ação Simples de Ferramenta Flutuante

O Instituto de Conformação Mecânica da Universidade de Hannover apresenta experiência fundamental no forjamento de precisão por extrusão lateral a frio com engrenagens helicoidais, na qual é destacado o uso de sistemas de ferramentas que são montadas sob ação de molas. Nessas montagens, dois conceitos são introduzidos: o primeiro refere-se a um sistema com ação simples de ferramenta, no qual somente o conjunto inferior é equipado com elementos relativamente móveis. No segundo conceito observa-se um sistema com ação dupla de molas, em que ambos os conjuntos, ou seja, tanto o inferior quanto o superior, possuem elementos móveis.

As montagens e as funções do sistema de ferramentas são mostradas na figura 2.11, na qual se observa uma matriz móvel para formar os dentes helicoidais, que é fechada por uma matriz superior durante o processo de forjamento. A matriz é guiada por colunas com montagem sob molas que permitem o movimento da matriz e fornecem a força de fechamento necessária. O contra-punção passa a atuar até concluir o escoamento e finalmente, o ejetor extrai a engrenagem forjada.

2.4.14 Mecânica do Processo para Ação Dupla de Ferramentas Flutuantes

Um avanço para o conceito de ação simples das ferramentas é o de ação dupla, que torna possível acionar todo o conjunto de ferramentas, de modo que tanto as ferramentas inferiores e as inferiores apresentam-se similares e com alturas próximas. O sistema de ferramentas é montado dentro de um conjunto padronizado que favorece a troca de ferramentas, de modo que a construção modular permite o forjamento de uma grande variadade de engrenagens e outras peças axi-simétricas.

O forjamento pode ser feito dentro de duas seções fechadas. No início da deformação a mola do conjunto superior é comprimida e o punção move-se dentro do tarugo, com isso, uma pré-forma da engrenagem é formada e o furo da engrenagem é obtido por um processo de extrusão inversa. Depois que as molas são comprimidas, o anel de fechamento e a matriz que formará os dentes, movem-se simultaneamente para baixo, de modo que as molas são comprimidas e a engrenagem é acabada pelo movimento relativo entre a matriz geradora e o contra-punção.

A precisão obtida para a engrenagem produzida é tão significativa que somente a área funcional (faces e furo interno) necessita passar por usinagem dura. A figura 2.12 apresenta um esquema das ferramentas e o movimento das molas que seguem o aumento progressivo da carga de deformação, de modo que o consumo de energia pode ser reduzido no fechamento da montagem sob ação de molas, gerando mais energia na conformação para o processo como um todo.



1. Punção superior

- 2. Placa de fechamento
- 3. Matriz dentada
- 4. Punção inferior
- 5. Pino extrator

Figura 2.12 - Esquema de ferramenta com ação dupla de molas (DOEGE, 2000).

2.5 Engrenagens Cilíndricas Helicoidais

Neste item são apresentados detalhes das engrenagens cilíndricas helicoidais, bem como aspectos de sua produção industrial convencional, com o objetivo de comparar esses processos com o processo de extrusão lateral a frio proposto neste trabalho.

A Figura 2.13 mostra duas engrenagens helicoidais usadas para transmissão de movimento entre árvores paralelas. O ângulo de hélice é o mesmo em cada engrenagem, porém, uma engrenagem deve ter a hélice à direita e a outra, à esquerda. A forma do dente é uma helicóide envolvente, e o contato inicial entre os dentes de engrenagens retas é uma linha que se estende ao longo de toda a largura do denteado.



Figura 2.13 - Engrenagens helicoidais (SHIGLEY, 1984).

O contato inicial dos dentes de engrenagens helicoidais é um ponto que se transforma em uma linha, à medida que o engrenamento prossegue. Nas engrenagens retas, a linha de contato é paralela ao eixo de rotação, já nas helicoidais, essa linha é diagonal ao longo do flanco do dente.

Esse acoplamento gradual dos dentes e a transferência suave de carga de um dente para o outro conferem às engrenagens helicoidais a aptidão de transmitirem pesadas cargas a altas velocidades com baixo ruído. Devido à natureza do contato entre engrenagens, a razão frontal de transmissão é menos importante, já a área de contato que é proporcional à largura do denteado, se torna a característica mais importante.

As engrenagens helicoidais sujeitam os mancais da árvore a cargas radiais e axiais. Quando o esforço axial torna-se elevado ou indesejável por outras razões, é possível que se usem engrenagens helicoidais duplas. Uma engrenagem helicoidal dupla (tipo "espinha de peixe") é equivalente a duas engrenagens helicoidais de sentidos de hélices opostas, montadas lado a lado na mesma árvore. Estas engrenagens desenvolvem empuxos axiais opostos, que anulam, portanto, a carga axial resultante.

Na montagem de duas ou mais engrenagens helicoidais simples, em uma mesma árvore, deve-se selecionar as engrenagens pelos sentidos das hélices, de modo a produzir uma carga axial mínima (SHIGLEY, 1984).

2.5.1 Manufatura de Engrenagens Helicoidais

Segundo DEGARMO (1997), as engrenagens são produzidas em pequenas ou grandes quantidades, em células ou em série. A sequência de processos de manufatura de engrenagens requer quatro passos de operação:

- 1. Obtenção da pré-forma (Blanking)
- 2. Usinagem
- 3. Tratamento térmico
- 4. Retificação

A etapa *Blanking* refere-se ao forjamento inicial ou operações de usinagem que produzam uma peça semi-acabada que segue para o processo de usinagem em torno ou fresadora, iniciandose o processo de desbaste dos dentes.

Os cortes por usinagem ou operações de usinagem, podem ser divididos dentro de operações executadas antes do tratamento térmico, quando o material ainda está dúctil e de fácil usinabilidade, ou após um tratamento térmico de normalização para auxiliar a usinagem.

O tratamento térmico de beneficiamento oferece ao material, tanto resistência e durabilidade para suportar altas cargas quanto bons resultados ao desgaste, mas em consequência disso, ocorre a perda em precisão dimensional e geométrica, devido às transformações metalúrgicas que ocorrem durante a cementação, tempera, resfriamento e revenimento.

As operações de retificação são usadas onde se deseja obter precisão dimensional, como nos diâmetros internos e externos da engrenagem. Já o processo *shaving*, com pequena redução de material nos flancos dos dentes, é responsável pela garantia de precisão entre os dentes.

As engrenagens helicoidais são feitas em grande quantidade por usinagem em fresadoras universais com ferramentas por geração e também por laminação a frio como mostra a figura 2.14.

2.5.2 Acabamento dos Dentes

As engrenagens que giram a altas rotações e transmitem grandes forças, podem ficar sujeitas às forças dinâmicas adicionais devidas a erros inevitáveis nos perfis dos dentes. Em consequência disto, é possível que se diminua, um pouco, esses erros, através do acabamento superficial nos perfis dos dentes, por polimento ou de brunimento. Diversas máquinas de polir podem remover pequenas quantidades de material, trazendo a precisão do perfil do dente para dentro dos limites de $R_a = 5 \mu m$.

Usa-se o brunimento como polimento em engrenagens que foram usinadas, porém não tratadas termicamente. No brunimento, faz-se girar as engrenagens endurecidas e com dimensões ligeiramente superiores às engrenagens que se deseja acabar, às quais são acopladas até que suas superfícies se tornem lisas.

É comum o uso de retificação e lapidação para dentes de engrenagens endurecidos após tratamento térmico. A operação de retificação emprega o princípio da geração (*shaving*) e produz dentes muito precisos (figura 2.15). Na lapidação, os dentes da engrenagem e a ferramenta deslocam-se axialmente, de modo que toda a superfície do dente fique alisada por igual.



Figura 2.14 – Processos de Fabricação de Engrenagens helicoidais – modificado de DEGARMO (1997).



Figura 2.15 - Processo de acabamento dos dentes por shaving modificado de DEGARMO (1997).

2.6 Requisitos para Prensas Utilizadas na Extrusão Lateral

DOYLE (1978) estabelece que na seleção de uma prensa para determinada aplicação, considerações devem ser atribuídas à capacidade requerida, e também quanto ao tipo de acionamento (se é manual, mecânico ou hidráulico), o número de golpes, a distância de cada golpe e o tipo de martelo.

Para a realização da extrusão lateral conta-se na maior parte das vezes com o auxílio de prensas hidráulicas, pelos motivos expostos a seguir.

As prensas hidráulicas produzem movimento pelo deslocamento de um pistão, sendo grande a extensão do curso dos golpes que podem ser programados sem a limitação das dimensões do cilindro hidráulico. A força é mais precisa quanto ao seu controle e independente da posição do pistão. A velocidade pode ser programada e permanecer constante durante todo o golpe.

O curso do pistão é realizado através da pressurização de um fluido, de modo que a repetibilidade da operação terá menos variação do que em uma prensa mecânica,

desempenhando-se, de maneira mais eficaz, em operações que requerem pressões constantes (figura 2.16).

Nota-se que estas são características fundamentais para o processo de extrusão lateral, e comprovam a utilização do equipamento para o bom desempenho do processo, mas em alguns casos, tornam-se desvantajosas em relação às prensas mecânicas, pois as prensas hidráulicas são máquinas mais lentas, o que pode prejudicar a produtividade e em algumas situações o próprio processo, caso seja realizado a morno, por exemplo.



Figura 2.16 – Esquema de acionamento de prensas hidráulicas (DOYLE, 1978)

2.7 Acumulador de Pressão

Os acumuladores de pressão são sistemas usados para o armazenamento de energia, e têm como função introduzir um fluido mais compressível em um recipiente em que a compressibilidade seja baixa, o que faz com que o sistema reaja rapidamente à alteração de nível e impactos no martelo. Basicamente, um acumulador é composto por cilindro, bexiga, bico para alimentação de gás e válvula de segurança para alívio do sistema (figura 2.17).



Figura 2.17 – Esquema de acionamento do acumulador de pressão (TECHFORGE).

2.8 A Simulação Numérica do Processo de Forjamento

A simulação numérica do processo de forjamento é aplicada para aperfeiçoar as variáveis do processo, bem como para prever a formação de defeitos e assim evitá-los, e finalmente, prevenir falhas prematuras de ferramentas ainda na fase de projeto (SILVA *et al.*,1995).

Entre os resultados de uma simulação, destacam-se:

- Conhecimento da carga necessária para formar a peça;
- Antecipação da geometria correta da pré-forma, e volume ideal da peça forjada;
- Controle preciso de escoamento do material durante o processo de forjamento;
- Análise criteriosa das tensões na peça e nas ferramentas;
- Otimização das pré-cargas no inserto e anéis, otimizando interferências, bem como a montagem do ferramental.

2.8.1 Criação de Geometrias

Dentro da modelagem física devem ser definidas as geometrias das matrizes e da peça inicial. Existem duas maneiras de executar essa operação: utilizar uma interface gráfica de *software* ou sistemas (*CAD*), ou a introdução manual dos dados através de sistemas de coordenadas. Um aspecto importante é a verificação da possibilidade de se fazer uso da simulação bidimensional, a partir da simetria de deformação plana ou a um eixo, ou ainda, se existe a possibilidade de uma análise tridimensional definindo-se planos de simetria.

Uma atenção especial deve ser direcionada à representação de pequenos raios e chanfros, que podem não ser descritos e causar problemas na convergência dos resultados. Nas figuras 2.18 (a) e (b) pode ser observado a modelagem de um processo com simetria axial, na qual é possível uma modelagem bidimensional. Já na figura 2.19, tem-se um caso que exige um modelo tridimensional, no qual já as respectivas malhas de elementos finitos já estão representadas.



Figura 2.18 (a) – Criação de geometrias (Software comercial eesy-Form 2).



Figura 2.18 (b) – Geometrias concluídas – (Software comercial eesy-form 2).



Figura 2.19 - Peça simulada com *software* tridimensional (*Software* comercial *DEFORM 3D*).

A figura 2.20 apresenta alguns dos principais parâmetros do processo. O primeiro item refere-se à resistência ao escoamento (*Kf*), que é influenciada pelo material, microestrutura, temperatura, deformação e velocidade de deformação. Já o segundo, representa as variações do

coeficiente de atrito entre peças e matrizes. De maneira geral, o atrito é associado a um aspecto negativo dos processos de conformação, (consumo de energia, desgaste de ferramentas, aumento da força de conformação, aumento da temperatura na ferramenta). Mas há também a possibilidade de atuar de maneira positiva, auxiliando no preenchimento da cavidade formadora da peça no forjamento.



Figura 2.20 - Parâmetros importantes do processo de forjamento (SILVA et al., 1995).

O terceiro e o quinto item correspondem à obtenção dos parâmetros de troca de calor (condução, radiação e convecção) que é, de modo geral, muito complexa. O fato de existir uma enorme gama de materiais e formas geométricas limita severamente a utilização de correlações existentes no estudo da transferência de calor. Além disso, associado ao item 5, existe geração interna de calor devido ao trabalho mecânico, o que ocasiona alterações nas propriedades do material e dos parâmetros no decorrer do processo, em algumas regiões do material sob deformação.

A modelagem dos dados térmicos é feita baseada em hipóteses simplificadoras e estimadas a partir de referências literárias especificas ou de resultados de ensaios experimentais. O quarto item, por sua vez, chama a atenção para a variação da tensão de escoamento em função da temperatura para cada processo que pode apresentar diferentes taxas de deformação.

2.8.2 Pré-Processamento

Após a definição dos dados relativos ao material e ao processo, são obtidos os resultados específicos da simulação numérica, que variam de acordo com a sofisticação do *software* utilizado.

A grande maioria dos programas atuais voltados para a solução de problemas de conformação mecânica possui algoritmos específicos, que determinam automaticamente parâmetros como número e tamanho de elementos (definição de malha), e número de incrementos. No entanto, ainda existem programas nos quais estes parâmetros devem ser definidos pelo usuário, exigindo um conhecimento mais aprofundado do funcionamento do *software*.

Outro aspecto importante a ser definido é o tipo de solução desejada, seja ela: mecânica, térmica, termomecânica (problemas mecânicos e térmicos acoplados) ou microestrutural.

2.8.3 Processamento

O processamento é a etapa pela qual é realizado o cálculo computacional, com o problema dividido em incrementos de deslocamento, sendo realizadas iterações a ponto de atingir determinado critério de convergência para cada incremento.

No processo de forjamento, nas regiões onde ocorrem deformações plásticas, pode-se aplicar a lei da constância de volume, ou seja, a soma algébrica das três deformações principais é igual à zero.

2.8.4 Pós-processamento

Esta etapa é representada pela análise dos resultados obtidos na etapa anterior. Utilizando recursos gráficos, pode-se visualizar tensões, deformações, distribuição de temperatura, escoamento de material, força de forjamento, taxa de deformação, evolução microestrutural, entre outros. Os parâmetros podem variar de acordo com o tipo de análise (mecânica ou termomecânica) ou mais especificamente, com o tipo de *software* utilizado. A seguir, é apresentada a simulação de uma operação de forjamento de uma peça de alumínio.

Na figura 2.21, é possível analisar dois parâmetros que podem ser muito úteis na análise do processo. As linhas de escoamento descrevem as direções por onde o material escoa durante a conformação. Neste âmbito, muitas experiências são realizadas a fim de se descobrir a origem de certos defeitos no forjado. Os principais fatores que alteram as linhas de escoamento são: o atrito, a composição química do material, a forma da matriz e a temperatura de forjamento. A deformação real, também chamada de deformação logarítmica ou grau de deformação, tem influência direta na força de forjamento, principalmente no processo a frio (figura 2.22).



Figura 2.21 – Análise das Linhas de Escoamento (Software comercial eesy-form 2).



Figura 2.22 – Análise da Força de Forjamento (Software comercial eesy-form 2).

Outro parâmetro de grande utilidade é a distribuição de tensão resultante na peça forjada. Conforme o programa utilizado, é possível analisar separadamente, tensões nas direções principais, tensões cisalhantes ou de acordo com algum critério de escoamento (Tresca ou von Mises). A figura 2.23 mostra a distribuição de tensões equivalentes, segundo o critério da máxima energia armazenada em um corpo (von Mises).

Dentro deste tipo de análise, ainda é possível determinar tensões resultantes em matrizes, recurso não característico de todos os programas de simulação de forjamento, e que serve como alerta para o usuário que pretende analisar determinado processo. É preciso saber o que se pretende analisar, quais as variáveis mais importantes do problema em questão e, a partir disso, escolher o programa adequado a cada caso. O exemplo da figura 2.24 mostra um caso de análise das tensões na matriz.



Figura 2.23 - Análise da Tensão Equivalente na peça (Software comercial eesy-form 2).



Figura 2.24 – Análise da Tensão Equivalente no Inserto (Software comercial eesy-form 2).

A matriz é pré-tensionada (figura 2.25) e é possível modelar a interferência existente em cada anel. Assim, pode-se facilmente, fazer uma análise elastoplástica das tensões e deformações nas ferramentas, inclusive encamisadas e com insertos, o que é fundamental para uma análise de desgaste ou quebra prematuros.



Figura 2.25 – Análise da Interferência no Inserto (software comercial eesy-form 2).

2.9 Aplicação Industrial

A seguir, são apresentados alguns importantes trabalhos de pesquisa na área da conformação mecânica, em que a abordagem do desenvolvimento teórico e experimental foi de grande importância na realização da metodologia de pesquisa desta tese.

DEAN (2000) é o responsável pelos estudos direcionados ao processo de forjamento de engrenagens cônicas, cilíndricas e helicoidais, com atenção especial para a pesquisa de formas acabadas sem usinagem dura.

Com o auxilio do forjamento de precisão para produzir geometrias sem requerer operações subsequentes de acabamento, mostrou ser possível forjar a frio engrenagens cônicas utilizadas em diferenciais automotivos com dentes acabados.

KIM et al. (1997) propuseram uma nova técnica para determinar a geometria inicial de préformas forjadas de engrenagens cilíndricas de dentes retos, por meio de aproximações de funções em redes neurais. O método era obtido a partir da análise rígida plástica realizada pela simulação do material trabalhado, na sequência eram revelados os dados da quantidade de material que não preenchiam regiões com maior complexidade na matriz, e a seguir, os dados eram adicionados a outros obtidos experimentalmente, e as redes neurais recebiam o devido treinamento para posterior processamento, objetivando uma pré-forma com geometria otimizada para um completo preenchimento da matriz.

O grande desafio é sempre de viabilizar um processo alternativo para o processo de forjamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais, utilizadas em caixas de transmissão, já que usualmente são forjadas a morno ou a quente, comprometendo assim, a qualidade do produto, devido à imprecisão dimensional. O procedimento de usinagem adicional corrige essa imprecisão, mas o custo do processo deve ser adicionado ao produto, o que se torna economicamente não competitivo.

O trabalho de DEAN (2000) detalha os aspectos de se combinar o forjamento a morno com o forjamento a frio, que conduz a um dos projetos alternativos de ferramentas que podem ser usadas em uma prensa com somente um movimento associado ao sistema de ejeção.

Ele compara em alguns projetos de ferramentas, os diferentes arranjos de seus subconjuntos, a força de atrito na interface da ferramenta e peça trabalhada, a atuação diferenciada entre um e outro, com a finalidade de se verificar, qual apresenta maior influência no preenchimento da ferramenta.

Portanto, essas configurações influenciam no escoamento do metal e requerimentos de cargas, de modo que para se verificar essas influências, torna-se necessária a realização de experimentos e a simulação com o Método dos Elementos Finitos. O efeito do atrito na carga de forjamento e o modo de escoamento do metal também são discutidos.

SKUNCA (2006) fundamenta a importância da simulação numérica no processo de forjamento a frio em engrenagens cilíndricas de dentes retos. Trata-se de um trabalho teórico - experimental, que tem por finalidade comparar e analisar a distribuição de tensões e o comportamento do escoamento de material em função do preenchimento dos dentes da engrenagem na matriz. No trabalho são abordadas algumas divergências encontradas na teoria e prática, com respeito às condições metalúrgicas do forjado, possivelmente causadas pela dificuldade de se quantificar o atrito na interface peça e ferramenta ao longo do processo.

2.9.1 Conjunto de Ferramentas com Cavidades Fechadas

Como definido anteriormente, a função do conjunto de ferramentas é definir o formato da peça a ser forjada. No trabalho de DEAN (2000), foram usados tarugos cilíndricos serrados para o forjamento das engrenagens, que serão usadas em sistemas de transmissão.

A pré-forma é formada a partir do tarugo com furo passante no centro, e usando-se matrizes completamente fechadas com punções-pilotos, é possível variar o arranjo dos subconjuntos das ferramentas para forjar engrenagens acabadas. Os elementos que terão a função de trabalho são um punção, um contra-punção que ao mesmo tempo tem a função de ejetor, um inserto e um mandril.

Uma montagem genérica dos elementos é mostrada na figura 2.26, onde somente uma cavidade cilíndrica é ilustrada para simplificação do esquema. O punção superior tem o formato da cavidade, e é acoplado ao movimento do golpe da prensa. O contra-punção é acoplado ao sistema de mola estacionária da prensa, que é rígida e permite movimento vertical.

A função da ferramenta é permitir que a pré-forma seja deformada pela relação de fechamento entre o punção e o contra-punção. O modo de escoamento do material depende do movimento relativo dos elementos; já o preenchimento da cavidade e a acomodação do material são afetados pela cinemática dos movimentos das ferramentas. Então, o modo de escoamento com que uma peça se formará dentro da cavidade será determinada pela direção em que a força de atrito atuar.

Nesse trabalho, o efeito do arranjo da ferramenta no preenchimento da cavidade é analisado em detalhes, usando-se um caso de forjamento com engrenagem cilíndrica de dentes retos. O preenchimento da cavidade e a variação da carga foram modelados através de um *software* de elementos finitos, e testados através de ensaios experimentais de forjamento.



Figura 2.26 – Elementos de uma ferramenta para forjamento de peças cilíndricas modificado de DEAN (2000).

2.9.2 Projeto Alternativo de Matriz para Forjamento a Morno de Engrenagens

Também no trabalho de DEAN (2000) é mostrado um exemplo de forjamento a morno de engrenagens. A figura 2.27 apresenta o tarugo e a engrenagem forjada em aço AISI 8620 H obtida nesse trabalho. Os 27 dentes da engrenagem possuem 36 mm de altura com um módulo de 4,233 mm. Há diferentes projetos de matrizes possíveis para esse tipo de peça, portanto, o estudo do movimento das matrizes é detalhado a seguir.



Figura. 2.27 - Pré-forma para forjamento e engrenagem cilíndrica de dentes retos (DEAN, 2000).

Nos dois projetos de ferramentas com o fechamento já considerado, a matriz é acoplada rigidamente à máquina, o que permite somente um grau de movimento no sentido vertical com molas. Em ambos os casos, o punção move-se para baixo, e o contra-punção é fixo na máquina durante o processo de forjamento.

O esquema dos dois projetos é mostrado na figura 2.28, na qual percebe-se a matriz elasticamente acoplada em (a) e rigidamente fixada em (b). A principal diferença entre esses dois projetos é o efeito da força de atrito na interface entre a peça trabalhada e a matriz, onde o material preencherá as cavidades dos dentes.



Figura 2.28 - Esquema do projeto de ferramenta para forjamento de engrenagem com punção e contrapunção de superfície plana. (a) I: a matriz é elasticamente fixada a máquina; (b) II: a matriz é rigidamente fixada a máquina – modificado DEAN (2000).

No projeto da matriz fixa, durante o forjamento, o punção se moverá dentro da cavidade e a formação dos dentes será realizada pelo punção. Pelo fato de o punção, enquanto no projeto da matriz móvel, não entrar na cavidade, há a descida simultânea do punção e da matriz, sendo da parte superior para a inferior da ferramenta, de modo que para a formação dos dentes uma simples pré-forma com formato cilíndrico poderá ser utilizada.

Devido à elevada temperatura do tarugo e das ferramentas, a dimensão da forma dos dentes forjados não dependerá somente da expansão térmica, mas sim da expansão elástica das ferramentas de forjamento, devida à pressão radial que é relacionada à carga de forjamento requerida para a completa formação dos dentes.

No forjamento da engrenagem, a seção média do preenchimento dos dentes avança para o topo em ambas as faces, de tal forma que quando os topos de ambos os lados da matriz são preenchidos, dá-se início a um aumento significante da carga. Nesse instante, o punção está a 0,3mm para completar a operação e o tarugo está a 1,2% da deformação total, o que resulta em um aumento da carga de aproximadamente 50%.

Através das técnicas de projetos de matrizes, com facilitação do escoamento de material entre os cantos do inserto, ou através de projetos de engrenagens que não possuam cantos vivos, pode-se reduzir drasticamente a carga de forjamento requerida, e as tensões na ferramenta. Como consequência obtém-se produtos com pouca distorção, melhor precisão dimensional e maior vida útil das ferramentas.

Um dos possíveis projetos estudados propôs um leve chanfro nos cantos das extremidades dos dentes, para acomodar um eventual excesso de material e reduzir a carga de contato matriz e peça no estágio final de forjamento.

O excesso de material acumulado nos dentes poderá ser facilmente faceado numa simples operação de usinagem. Possíveis projetos similares são mostrados na figura 2.29, nos quais o punção e o contra-punção são modificados para permitir os chanfros nas extremidades dos dentes da engrenagem.

Através de quatro projetos distintos, os respectivos processos de forjamento de engrenagem são analisados conforme o método de elementos finitos, que considera o preenchimento da cavidade, e requerimentos de carga. O projeto é adaptado para conduzir ensaios de forjamento e os resultados experimentais são comparados aos provenientes do método dos elementos finitos.



Figura 2.29 - Esquema do projeto da ferramenta para forjamento de engrenagem com punção e contrapunção chanfrados. (a) III: a matriz é elasticamente fixada a máquina; (b) IV: a matriz é rigidamente fixada a máquina – modificado DEAN (2000).

2.9.3 Formação dos Dentes

As figuras 2.28 e 2.29 apresentam as soluções encontradas dos quatro projetos pelo método dos elementos finitos. Devido à simetria da peça, somente a parte correspondente ao dente foi utilizada para análise. O modelo geométrico e a malha de elementos finitos foram gerados pelo *software* comercial *Patran* (figura 2.30).

A engrenagem foi forjada a morno com o tarugo a 950°C, e a ferramenta foi aquecida a 200°C; como lubrificante foi utilizada uma mistura de grafite com água e o coeficiente de atrito para simulação foi de 0,1.

A figura 2.30 também representa a formação dos dentes com o uso de dois projetos de ferramentas com punções de superfícies planas: (a) matriz fixa; (b) matriz móvel, e com punções chanfrados: (a) matriz fixa; (b) matriz móvel. Os estágios de formação dos dentes são analisados por MEF e oferecem diferente alternativa de projetos.



Figura 2.30 – Formação de dentes usando dois projetos de matrizes com punções planos: (a) matriz fixa;
(b) matriz móvel. Formação dos dentes usando dois projetos de matrizes com punções chanfrados:
(a) matriz fixa; (b) matriz móvel – modificado de DEAN (2000).

Em um estágio anterior à formação dos dentes, ocorre o fechamento das ferramentas, quando a pré-forma fica localizado no interior e no meio na cavidade da matriz, onde se dará o escoamento lateral do material, devido ao atrito da base do punção e da base do contra-punção.

Conforme o forjamento prossegue, a pré-forma entra em contato com os dentes na superfície da matriz, que pode ser rígida e fixa à mesa da máquina, ou móvel, fixada também, na mesa da máquina. No caso da matriz móvel, o atrito na superfície da matriz tem atuação diferenciada de acordo com o movimento desta.

Quando a matriz é fixa, a força de atrito é oposta ao escoamento inclinado do material, o que permite um preenchimento da região do topo mais rapidamente. Portanto, a parte superior dos dentes tem melhor formação que o meio e a superfície inferior. No caso de a matriz ser elasticamente solicitada durante a operação, a mola entra em ação fazendo com que aquela se mova para baixo com o punção, durante o forjamento.

A força de atrito auxilia na inclinação do material, e a superfície inferior e superior flui rapidamente no plano central da peça. Portanto, o preenchimento dos dentes da superfície inferior até a superfície superior da matriz é completado, posteriormente. A diferença entre o punção com superfície plana e a superfície chanfrada é evidenciada no final do estágio de forjamento, quando os cantos são preenchidos.

Os cantos superiores apresentam preenchimento melhor que os cantos inferiores, quando a matriz é fixa a mesa da máquina. Com o uso do punção de superfície plana, todos os cantos superiores e inferiores são preenchidos completamente.

No caso do punção chanfrado, o formato do chanfro será removido posteriormente e o preenchimento dos cantos da matriz é desnecessário. Assim, somente o completo e necessário preenchimento dos dentes é obtido. Portanto, exclusivamente quando os cantos inferiores e superiores são completamente preenchidos é que ocorre a solicitação elástica da matriz.

2.9.4. Cargas de Forjamento

As cargas de forjamento são cuidadosamente examinadas devido à sobrecarga, que causa expansão elástica e até mesmo plástica das matrizes, o que prejudica a precisão do forjado e reduz consideravelmente a vida útil das ferramentas.

KANG (2007) apresenta uma pesquisa para a redução da expansão elástica da matriz, o que resulta em maior precisão do forjado. O retorno elástico de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos é estudado, pela simulação numérica faz-se a análise elástica da matriz para avaliar as melhores técnicas de manufatura e montagem dos insertos e anéis de contração, para obter-se o melhor comportamento elástico do conjunto de ferramentas e consequentemente, do forjado.

Para análise das cargas de forjamento foram utilizadas as quatro alternativas de projetos de matrizes apresentadas anteriormente, obtendo-se os resultados mostrados na figura 2.31.


Figura 2.31 - Cargas de forjamento usando diferentes projetos de matrizes - modificado de DEAN (2000).

O material da pré-forma escoa para a lateral durante o forjamento, e o modo de escoamento é o mesmo para os quatro projetos antes de o material encostar-se à superfície da matriz, para um curso do punção de 15mm.

Uma vez que o metal está em contato com a matriz, a força de atrito na interface por si só auxiliará na oposição ao escoamento do material, resultando em diferentes cargas no punção. No caso do punção chanfrado, o arranjo com matriz móvel requer uma carga menor, comparada ao arranjo da matriz fixa. A carga máxima requerida pelo sistema de matriz fixa é 15192 kN, enquanto que para o sistema de matriz móvel é de 12520 kN, e assim a formação dos dentes se dá com uma redução da carga próxima de 21%.

No punção com superfície plana, a carga é extremamente alta para o preenchimento das superfícies inferior e superior do forjado. Quando a matriz é fixa, a carga necessária para preencher completamente os cantos aumenta para 24933 kN, um aumento de 64% quando comparado ao punção chanfrado. Um grande aumento de carga é verificado quando a matriz é móvel, ou seja, a carga para o punção de superfície plana torna-se 90% maior que a do punção chanfrado, atingindo 23881 kN.

O efeito do atrito também pode ser verificado no carregamento do punção e do contrapunção, sendo a diferença entre o carregamento do punção e contra-punção igual à força de atrito entre a matriz e a pré-forma, conforme representa a figura 2.32 (a). A matriz é fixada à mesa da máquina, e a resistência ao atrito na interface matriz-peça são opostas ao movimento do punção, fazendo com que ocorra um aumento da carga no punção.

Já na figura 2.32 (b), a carga do punção é menor, ou seja, quando a matriz é elasticamente solicitada, a reação de mola da ferramenta faz com que a força de atrito na interface matriz-peça atue na mesma direção do movimento do punção. Já a carga no contra-punção é alta devido ao balanço da cargas no punção e na matriz. Ao considerar a capacidade de carga em relação ao escoamento do metal, o projeto da matriz móvel com punção chanfrado, projeto IV, foi usado para os ensaios de forjamento.



Figura 2.32 - Cargas no punção e contra-punção no forjamento da engrenagem: (a) matriz fixa e punção chanfrado; (b) matriz móvel e punção chanfrado - modificado de DEAN (2000).

2.10 Ensaios de forjamento

No projeto IV o piloto é acoplado ao punção e a matriz é fixada à máquina através da mola. O contra-punção é usado também como ejetor depois do forjamento. O conjunto de ferramentas mostrado na figura 2.33 foi montado em uma prensa mecânica com capacidade equivalente a 12000 kN.



Fig. 2.33 - Conjunto de matriz de forjamento da engrenagem (matriz móvel e punção chanfrado) modificado de DEAN (2000).

Os ensaios de forjamento seguiram as mesmas condições de contorno usadas na simulação MEF, e a carga de forjamento atuante no punção foi medida através de uma célula de carga. A figura 2.34 mostra uma comparação das cargas de forjamento, provenientes de medidas experimentais e do MEF, e é evidente a boa concordância obtida entre as análises numéricas e o forjamento real.

Na figura 2.35 notam-se os estágios de forjamento da engrenagem durante a conformação, e a evidência da similaridade do escoamento de metal na formação dos dentes. Ambas mostram claramente que a formação dos dentes que ocorreu da base inferior para a base superior é conseguida quando a matriz é elasticamente fixada a mesa da máquina.



Fig. 2.34 - Predição de cargas de forjamento pelo MEF (matriz móvel e punções chanfrados) modificado DEAN (2000).



Figura 2.35 - Formação dos dentes no processo de forjamento da engrenagem (matriz móvel e punção chanfrado) (a) teste de forjamento (b) FE predição - modificado de DEAN, 2000.

Na concepção CAI (2004), existem diferentes alternativas para se projetar uma matriz capaz de forjar engrenagens cilíndricas com dentes retos. Um projeto em particular deverá ser escolhido e direcionado à geometria do forjado, conciliando o movimento alternativo dos elementos que afetam o escoamento do material trabalhado, com o modo com que o preenchimento ocorre.

Em HU (2007), encontram-se análises voltadas ao estudo do preenchimento das matrizes, a partir da simulação numérica, com o exame minucioso da distribuição da carga de forjamento, das forças de atrito e da velocidade de escoamento do material, do forjamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos. O preenchimento das matrizes só se completa a partir de alterações na geometria do punção superior, que direciona o escoamento do material para as regiões com maior grau de complexidade.

Quando o atrito atua na interface matriz-peça, a relação de movimento relativo das ferramentas não afeta o escoamento do metal, tampouco as forças requeridas para o preenchimento da cavidade. Para os exemplos dos punções chanfrados, em ambos os casos, no punção e no contra-punção a carga é 12500 kN. De qualquer forma, a matriz pode ser fixada a mesa da máquina, tanto de forma rígida quanto elástica. O padrão verificado para o escoamento do material também foi independente do movimento relativo das ferramentas.

No projeto III, o efeito do atrito na formação dos dentes foi estudado com uma matriz elasticamente fixada a mesa da máquina, em ambos os casos, o punção e contra-punção são chanfrados. A formação dos dentes no final do estágio é mostrada na figura 2.36.

Os coeficientes de atrito constante m = 0,01 e 0,2 foram utilizados para simulação MEF. Nas regiões onde não existe atrito o modo de escoamento do metal comportou-se como num processo de recalque livre (figura 2.36-a). Já na região referente à metade dos dentes, há a possibilidade de uma melhor formação, quando comparada aos cantos inferiores e superiores da engrenagem.

Pelo fato de existir a resistência ao atrito na direção vertical, os cantos inferiores e superiores são uniformemente preenchidos ao mesmo tempo. Quando há atrito na interface matriz-peça, o movimento da matriz auxiliará o escoamento do metal da base inferior para a superior, e a formação do canto inferior antecede o superior.

Ao final do processo, a base inferior é completamente preenchida e um chanfro é formado na base superior (figura 2.36 - b). O chanfro com excesso de material pode ser facilmente faceado por usinagem, para se obter o formato exigido para a engrenagem. A não uniformidade do escoamento aumenta o atrito, podendo chegar a m = 0,2 (figura 2.36 - c), resultando na formação de um chanfro.



Figura 2.36 – Efeitos do atrito na formação dos dentes (matriz móvel e punções chanfrados): (a) coeficiente de atrito m= 0; (b) coeficiente de atrito m= 0,1; (c) coeficiente de atrito m= 0,2 modificado de DEAN (2000).

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os métodos e materiais empregados para a realização da simulação numérica por MEF e dos ensaios experimentais relacionados ao forjamento a frio de uma engrenagem helicoidal e à análise das ferramentas empregadas e dos produtos forjados obtidos.

3.1 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados na fabricação do eletrodo e dos principais itens do ferramental, bem como os materiais empregados nos ensaios de forjamento, encontram-se especificados nos itens deste capítulo.

3.1.1 Eletrodo

O eletrodo é uma ferramenta do processo por eletroerosão, processo comumente usado na manufatura de matrizes com geometrias de maior grau de complexidade. Visto que se trata de uma ferramenta específica e importante para o sucesso do processo de forjamento, será feita uma descrição mais detalhada num dos itens apresentados a seguir.

3.1.2 Ferramental

Para a formação da engrenagem foi necessária a fabricação de um ferramental na qual se utilizaram os seguintes materiais:

• Conjunto Punção, Extrator e Segundo Anel de Contração.

O material utilizado foi o aço rápido AISI M2, recebido em barra redonda recozida laminada, com Ø 41,27 mm / 1000 mm e dureza de 248 HB, cuja composição química encontrase na tabela 3.1.

С	Si	Mn	Р	S	Co	Cr	Мо	Ni	V
0,90	0,41	0,29	0,027	0,001	0,08	4,09	4,81	0,28	1,89
W	Cu	Ti	Nb	Al	Pb	Sn	Ca	Ν	0
6,11	0,13	0,011	0,01	0,058	0,00	0,0124	0,0014	0,029	0,002

Tabela 3.1 – Composição química do aço AISI M2 (% em peso)

• Inserto

O material utilizado foi o aço rápido sinterizado SINTER 23, recebido em barra redonda recozida laminada, com Ø 64,00 mm / 1000 mm e dureza de 277 HB, cuja composição química encontra-se na tabela 3.2.

С	Si	Mn	Р	S	Со	Cr	Мо	Ni	V
1,31	0,64	0,36	0,021	0,01	0,34	4,04	4,98	0,16	3,02
W	Cu	Ti	Nb	Al	Pb	Sn	Ca	Ν	0
6,16	0,11	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,056	0,007

Tabela 3.2 - Composição química do aço SINTER 23 (% em peso)

• Terceiro e Quarto Anéis de Contração

O material utilizado foi o aço DIN 1.2721, recebido em barra redonda recozida laminada e descascada, com (Ø 152,00 mm / 2000 mm) e dureza de 247 HB, cuja composição química encontra-se na tabela 3.3.

С	Si	Mn	Р	S	Со	Cr	Мо	Ni	V
0,50	0,29	0,55	0,015	0,008	0,04	1,04	0,27	3,26	0,01
W	Cu	Ti	Nb	Al	Pb	Sn	Ca	Н	Ν
0,07	0,17	0,005	0,01	0,021	0,00	0,0093	0,00	0,00012	0,0055

Tabela 3.3 - Composição química do aço DIN 1.2721 (%)

3.1.3 Tarugo de Alumínio como Material de Partida

É de grande importância deixar clara a utilização de duas ligas metálicas como matériaprima para os ensaios de forjamento. Preliminarmente, a liga de alumínio foi utilizada para a avaliação inicial do ferramental desenvolvido e para garantir sua integridade antes dos ensaios com tarugos de aço.

A finalidade foi comparar o seu comportamento com o aço forjado a morno, já que a peça forjada em aço é o resultado final esperado, por ser o material com propriedades mecânicas adequadas às aplicações das engrenagens.

O alumínio foi recebido como liga ABNT 6351 recozida com Ø 57,15 mm / 6000 mm com dureza de 38,05 HB, e a composição química é apresentada na tabela 3.4.

	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	В
Min.	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,70	0,00	0,00	0,00
Máx.	0,10	0,50	0,80	0,80	0,05	1,30	0,20	0,20	0,05
	Be	Cr	Bi	Pb	Ga	V	Na	Zr	Outros
Min.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máx.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela 3.4 – Composição química do alumínio liga ABNT 6351 (% em peso)

3.1.4 Tarugo de Aço como Material de Partida

O aço empregado como matéria-prima nos ensaios de forjamento foi recebido como DIN 16 Mn Cr5 barra redonda bruto recozido Ø 57,15 mm / 7000 mm com dureza de 149 HB, e a composição química é representada na tabela 3.5. Esse é um aço para cementação empregado industrialmente na fabricação de engrenagens para caixas de transmissão automotivas.

			-		-				
С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
0,159	0,290	1,070	0,014	0,003	0,910	0,080	0,030	0,015	0,090

Tabela 3.5 – Composição química do aço DIN 16 Mn Cr5 (%)

3.2 Métodos Utilizados

Os métodos utilizados referem-se ao projeto da engrenagem helicoidal a ser forjada a frio, à simulação numérica do forjamento, à fabricação do ferramental, ao planejamento da fase experimental e às análises para validação do processo.

3.2.1 Projeto da Engrenagem Forjada a Frio

A escolha das dimensões da engrenagem helicoidal, vista na tabela 3.6, procurou representar uma peça de utilização comercial, que deve atender em grande parte, à indústria do ramo automotivo. O cálculo de suas dimensões características foi baseado em NORTON (1998) e PROVENZA (1989).

m= 2	m - Módulo normal
mc= 2,13	mc - Módulo circunferêncial
Z= 19	Z - Número de dentes
$\beta = 20^{\circ}$	β - Ângulo de inclinação da hélice
dp = (mc * Z) = 40,47	dp - Diâmetro primitivo
de = (dp + 2m) = 44,47	de - Diâmetro externo
di= (dp-2,334m)= 35,80	di - Diâmetro interno
a= m= 2	a - Altura da cabeça do dente
b= (7/6)m= 2,33	b - Altura do pé do dente
e = (0,167m) = 0,334	e - Folga no pé do dente
h=(b+a)=4,334	h - Altura do dente
$R=(f.*m) \Rightarrow f=3,22 \Rightarrow R=6,44$	R - Raio da cabeça do dente
$R^{=}(f^{*}m) \Rightarrow f^{=}1,79 \Rightarrow R^{=}3,58$	R` - Raio do meio do dente
r= (m/6) =0,333	r - Raio do pé do dente
θ= 20°	db - Diâmetro de base
$db=(dp.cos\theta) = 38,03$	θ - Ângulo de pressão
S=3,35	S - Largura do dente
$V = 150005,4 \text{ mm}^3$	

Tabela 3.6 – Dados para projeto e fabricação da engrenagem (mm)

Depois de definidos e calculados os dados da engrenagem helicoidal, o sólido de revolução mostrado na figura 3.1.foi gerado através de um *software* gráfico 3 D, no caso o *Solid-edge* V17.



Figura 3.1 – Engrenagem Helicoidal.

3.2.2 Elaboração dos Modelos das Ferramentas

Após a modelagem do sólido, desenvolveram-se os modelos das ferramentas e do tarugo a serem utilizados na simulação do processo de forjamento a frio. A figura 3.2 apresenta as dimensões empregadas para a construção desses modelos tridimensionais. A figura 3.3 apresenta os modelos gerados.

3.2.3 Simulação do Processo da Engrenagem Helicoidal

Para a simulação utilizou-se a metodologia apresentada no capítulo 2 e que se baseia em duas ferramentas computacionais, uma utilizada na modelagem dos sólidos que representam as ferramentas, e a segunda no pré-processamento, para a simulação propriamente dita e finalmente, para o pós-processamento.

Na simulação deseja-se obter os resultados da análise plástica do material trabalhado, nesse caso a engrenagem, e a análise elasto-plástica do material da ferramenta, como matriz, punção superior e inferior.

A tabela 3.7 apresenta os dados empregados como condições de contorno iniciais para a simulação numérica e representam as condições empregadas nos ensaios de forjamento.

Para a realização deste trabalho foram utilizados três softwares comerciais:

- Solid Edge V17 Software gráfico 3D utilizado na geração de desenhos tridimensionais.
- MSC.Superforge Software baseado no Método dos Elementos Finitos, destinado à determinação da carga de forjamento e à análise tridimensional completa das tensões e deformações na peça conformada e nos componentes da ferramenta onde se dá a conformação (inserto, punção, contra-punção espiga e pino extrator).
- eesy Dieopt Software baseado em métodos analíticos relativamente simples e é usado para análise das condições do carregamento do inserto e anéis de contração, e que permite





Figura 3.2 – Dimensional dos componentes para simulação (a) pré-forma, (b) inserto e (c) punção.

Observação: As demais dimensões do item (b) da figura 3.2 encontram-se na tabela 3.6.



Figura 3.3 – Sólidos de revolução gerados para a entrada de dados na simulação (a) punção, (b) pré-forma e (c) inserto.

	Material			
Características técnicas	Alumínio	Aço DIN 16MaCa5		
	ADN1 0551	DIN TOWINCIS		
Temperatura material trabalhado	100°C	100°C		
Temperatura material ferramenta	20°C	20°C		
Atrito de Coulomb ferramenta superior	0,05	0,1		
Atrito de Coulomb ferramenta inferior	0,05	0,1		
Tipo de elemento	tetraédrico	tetraédrico		
Tamanho do elemento	1 mm	1 mm		
Tipo de prensa	Hidráulica 330 (t)	Hidráulica 330 (t)		
Velocidade de Forjamento	14,6 mm/s	14,6 mm/s		

Tabela 3.7 - Dados utilizados na programação

3.2.4 Planejamento Experimental

Depois de planejada a simulação, iniciou-se o planejamento experimental através de estudos de opções de ferramentas adequadas às condições do forjamento a frio e à obtenção da engrenagem projetada.

O processo escolhido para forjar a engrenagem helicoidal foi a extrusão lateral. Como descrito no capítulo 2, há duas configurações de ferramentas que podem ser utilizadas nesta operação.

A partir da análise das referências consultadas, neste trabalho optou-se pelo conceito de acionamento simples, sendo tal opção considerada devido às condições da altura de montagem dos equipamentos disponíveis industrialmente, dos custos de fabricação e do conhecimento prévio do processo (Figura 3.4).

3.2.5 Conceito de Extração da Peça

O esquema do ferramental da figura 3.4 está representado de duas maneiras: no lado direito e a partir da linha de centro, a ferramenta encontra-se em regime de trabalho, portanto, a peça está sendo conformada. Já no lado esquerdo, a ferramenta encontra-se em regime estacionário, quando a peça não está sendo conformada.



Figura 3.4 – Esquema do ferramental para forjamento e extração.

- 1. Punção superior
- 2. Rolamento axial
- 3. Placa superior de fechamento
- 4. Inserto
- 5. Anel de contração
- 6. Suporte inferior
- 7. Punção inferior
- 8. Pino extrator

À medida que o martelo da prensa desce, a base inferior do punção (item 1) toca a superior da matriz (item 4), quando ocorre o fechamento da ferramenta através do punção e matriz (itens 1 e 4), consequentemente, todo conjunto superior da ferramenta representado pelos itens 3, 4, 5 e 6 desce, comprimindo a mola. Como o pino extrator e o punção inferior (itens 7 e 8) não possuem grau de liberdade no sentido vertical, dá-se a conformação lateral da peça através do punção

inferior e superior (itens 7 e 1). Depois de finalizada a conformação, o martelo da prensa é recolhido, e junto sobe o punção superior (item 1), que está montado no martelo da prensa.

Neste instante, o conjunto superior (itens 3, 4, 5 e 6) também sobe devido à liberação da pressão da mola. Então, inicia-se o processo de extração da peça, quando o pino extrator e o punção inferior (itens 7 e 8) iniciam seu curso de subida. Como a engrenagem está presa na ferramenta, devido ao atrito de interface entre as hélices da engrenagem e matriz, a extração torna-se quase impossível, mas devido ao ângulo de hélice formado na interface matriz-peça, e a resultante vetorial da força aplicada para a extração, é possível que se inicie uma rotação no sentido horário, proporcionada pela ação de um rolamento axial que garante a extração da peça (SIEGERT, 1997).

Esse dispositivo para rotação diferencia este sistema de extração projetado neste trabalho das demais ferramentas convencionais, que extraem o forjado no sentido vertical e horizontal.

Nas matrizes para o forjamento de engrenagens de uso comum deve-se ter uma tolerância IT 7, já para as aplicações com precisão reduzida recomenda-se IT 9, enquanto tolerâncias entre IT 10 e IT 12 são incapazes de se obter devido a:

- Geração de calor durante o forjamento;
- Retorno elástico da peça trabalhada;
- Distorção da matriz devida a resistência mecânica do dente em trabalho;
- Deflexão da matriz.

Como apresentado no capítulo 2, vários trabalhos tratam do desenvolvimento e uso de programas auxiliares, que terão como principal função a pré-correção da geometria da matriz para a otimização da geometria da engrenagem. Em combinação com um programa de elementos finitos para simulação, esse programa auxiliar calculará a modificação da geometria na matriz, gerando um perfil compensador do retorno elástico da peça, após a extração. Consequentemente, a peça sofrerá o retorno elástico previsto e planejado e estará nas dimensões requeridas.

A deflexão da matriz é o parâmetro determinante para o sucesso do processo de forjamento a frio, de modo que qualquer método que venha a melhorar a precisão da engrenagem forjada a frio permitirá o controle da carga de forjamento e a redução das deformações das matrizes.

Definidas as condições ideais das geometrias da pré-forma e da engrenagem, têm-se as informações dimensionais do forjado, bem como o diâmetro interno do inserto. Esse diâmetro é estudado, separadamente, através do *software eesy DieOpt*, a fim de se obter a melhor condição de interferência ou carregamento na montagem, com o ferramental em regime ou não de trabalho (Pi), e a partir do inserto pode-se ter dois ou três anéis de contração.

Os dados são introduzidos no *eesy DieOpt* através da utilização do diâmetro interno do inserto "Di" (figura 3.5), e o diâmetro externo do anel de contração "Da" (figura 3.5), que neste trabalho foi adotado como um diâmetro externo padronizado característico da família de anéis disponíveis.

eesy-DieOpt Vers. 1.90		License for: Polime	ec Indústria e Com	iércio Ltda., Brazil		
Arquivo SISTEMA 2 ANEIS (fri	o) SISTEMA 2 A	ANEIS (quente) SISTEMA (3 ANEIS SISTEMA 4	ANEIS Idioma Sy	stem EXIT	
SISTEMA 4 ANEIS	Lice	ense for: Polimec Indús	tria e Comércio Lt	ia., Brazil		
Diâmetro Interno Di	40.40 mm		Inserto	1* Anel	2* Anel	Сара
Diâmetro Externo Da	194.00 mm	-	ASP23	1.3343, 56.7 💌	1.2721, 56.4 💌	1.2721, 47.6
ран I II I I	74.00	Código do Material	ASP23	S-6-5-2	50NiCr13	50NiCr13
Diametro de Montagem	74.00 mm	Número do Material	1.3344	1.3343	1.2721	1.2721
Interferência S1	0.145 mm	Módulo de Young [MPa]	230000.	208000.	200000.	200000.
	2.0 0/00	Relação de Poisson [+]	0.27	0.28	0.28	0.28
Diâmetro de Montagem	110.00 mm	Limite de Resist. [MPa]	1	2100.0	2080.0	1550.0
Interferência S2	0.801 mm	Limite de Escoam. [MPa]]	1850.0	1620.0	1320.0
	7.3 0/00	T. de Revenimento [°C]	580.	250.	450.
Diâmetro de Montagem	140.00 mm					1
Interferência S3	0.202 mm	Tensão Equivalente	[MPa] 1195.7	776.0	1458.0	1188.0
	1.4 0/00	Tensão tangencial	[MPa] 0.0	0.0	894.4	903.3
Pressão Interna Pi	1195.7 MPa	Contração (-) / Expansã	ăo(+): no Di	0.057 mm	no Da 0.600	Ĵ mm
Pressão de Montagem	776.0 MPa	C	((Capa + 2* Anel) <-	- 1° Anel) < Inserto)	
Pressão de Montagem	563.6 MPa	Montagem C	((Inserto + 1* Anel)	> 2° Anel)> Capa	3	
Pressão de Montagem	284.7 MPa	Ċ	Sem lavoro intermed	→ (2' Anei + Capa) İiáro		
Novo Cálculo 📗 Otimização	(Interferências)	Otimização (Completa)	Otimização (son	nente D2/D3)	Ajuda Gi	ráfico

Figura 3.5 – Otimização de interferência e montagem.

A partir desses dados e da escolha ideal dos materiais para inserto e anéis no *eesy Die Opt*, foi possível determinar e otimizar as tensões atuantes na montagem, pela definição dos diâmetros de montagem intermediários, das interferências intermediárias e das pressões ideais do carregamento entre anéis e matriz. A figura 3.6 mostra a representação da sequência de números na base da matriz que corresponde ao inserto (i) e anéis (1), (2) e capa (3).

Na análise do processo deste trabalho, a pressão interna determinada pelo *software* foi 1195,7 MPa, a pressão de montagem entre a divisão i e 1 foi 776 MPa, entre a divisão 1 e 2 foi 563,6 MPa, e entre a divisão 2 e 3 foi 284,7 MPa. Para a simulação forneceu-se somente a pressão entre a divisão i e 1, como dado para carregamento do inserto no *software MSC.Superforge*.



Figura 3.6 – Montagem da matriz.

3.2.6 Fabricação e Montagem do Ferramental

Concluída a fase de dimensionamento da matriz, iniciou-se o desenvolvimento da geometria dos dentes helicoidais, que deveria ser gravada na matriz pelo processo de eletroerosão, o que fez com que fosse necessário o desenvolvimento de um eletrodo conjugado com as funções de desbaste, pré-acabamento e acabamento (figura 3.7). No entanto, o eletrodo por si só, não teria condições de gerar uma geometria helicoidal, portanto, a necessidade de rotação durante a penetração foi inevitável, e para tanto usou-se um equipamento de eletro-erosão com comando numérico e graus de liberdade para trabalho nos sentidos horário e anti-horário.



Figura 3.7 – Dimensional do eletrodo utilizado na usinagem dos dentes da engrenagem.

A configuração do ferramental é apresentada na figura 3.8, em que tem-se: (a) fabricação do eletrodo; (b) matriz com forma interna helicoidal dentada; (c) sub-conjunto punção superior; (d) contra-punção; (e) elementos de contato e força da ferramenta; (f) sub-conjunto de formação da geometria.

A montagem do ferramental e do acumulador hidráulico na prensa é mostrada na figura 3.9, na qual se tem: (a) ferramental em regime estacionário; (b) ferramental em regime de trabalho; (c) ferramental montado na prensa; (d) detalhe do agregado do acumulador hidráulico.

Trata-se de um acumulador especial devido à necessidade de se variar a pressão de fechamento da ferramenta, de modo a obter maior flexibilidade para a produção de outros forjados que também requeiram a operação de extrusão lateral.



Figura 3.8 – Configuração do ferramental.



Figura 3.9 – Montagem do ferramental e do acumulador hidráulico na prensa.

Para os ensaios de forjamento deste trabalho foi empregada uma prensa hidráulica com capacidade de 3300 kN. A seguir na figura 3.10, observa-se o esquema de montagem do ferramental, ao lado esquerdo a ferramenta encontra-se em regime estacionário, e no lado direito em pleno regime de trabalho.



Figura 3.10 – Esquema da montagem do ferramental.

3.2.7 Preparação das Amostras

Para a realização dos ensaios de forjamento para avaliação do processo foram preparadas oito amostras de alumínio comercial ABNT 6351, extraídas da mesma barra, e 15 amostras de

aço 16MnCr5, também extraídas de uma mesma barra. Essas amostras tiveram as formas e dimensões mostradas Figura 3.2 (a). A tabela 3.8 mostra a sequência de preparação dos corposde-prova.

	Mater	ial
Características técnicas	Alumínio ABNT 6351	Aço 16MnCr5
Tratamento térmico utilizado	não	coalescimento
Fosfatização	não	sim
Ensaboamento	sim	não
Lubrificante	Estearato de zinco	MSo ₂

Tabela 3.8 - Sequência utilizada na preparação das amostras

3.2.8. Avaliação do Grau de Deformação

A figura 3.11, representa a forma final da engrenagem que se empregou para a tomada de dados, utilizada na análise do grau de deformação. Ela representa a distância entre as faces planas A - B, valida para as amostras de aço e alumínio, e que permite avaliar se o processo atingiu o fechamento das matrizes.



Figura 3.11 – Representação da coleta de dados.

Essa análise é realizada a partir do tarugo inicial mostrado na figura 3.2 (a) após uma sequência de prensagem até a altura desejada, definida como mostrado nas tabelas 3.9 e 3.10 que relacionam o curso da ferramenta e a distância entre as faces da engrenagem. Cada passo foi obtido pelo forjamento controlado de um corpo-de-prova.

Amostra	Curso da prensa (mm)	Altura entre faces da pré-forma (mm)
Pré-forma	0	26
Passo 1	5,5	20,5
Passo 2	7,1	18,9
Passo 3	9,6	16,4
Passo 4	10,1	15,9
Passo 5	10,4	15,6
Passo 6	10,7	15,3
Passo 7	11	15,0

Tabela 3.9 – Plano de análise do grau de deformação para amostras de alumínio

Tabela 3.10 - Plano de análise do grau de deformação para amostras de aço

Amostra	Curso da prensa (mm)	Altura entre faces da pré-forma (mm)
Pré-forma	0	26
Passo 1	1,7	24,3
Passo 2	2,9	23,1
Passo 3	3,5	22,5
Passo 4	6,9	19,1
Passo 5	7,9	18,1
Passo 6	8,3	17,7
Passo 7	8,33	17,67
Passo 8	8,336	17,664
Passo 9	8,436	17,564
Passo 10	8,456	17,544
Passo 11	8,486	17,514
Passo 12	8,616	17,384
Passo 13	8,646	17,354
Passo 14	8,666	17,334

3.2.9. Análise do Diâmetro Externo da Engrenagem Forjada

Essa análise teve por finalidade verificar após cada passo da sequência de prensagem, o diâmetro externo da engrenagem, as condições de escoamento do material e o preenchimento da matriz.

Para essa avaliação, considerou-se que quando a Face A está em contato com o punção inferior, tomando-se 5 mm a partir da rebarba, mede-se o diâmetro externo da engrenagem. Da mesma forma, considerando-se que a Face B está em contato com o punção superior, e tomando-se 5 mm a partir da rebarba, mede-se novamente esse diâmetro. O valor tabelado é obtido pela média dos diâmetros determinados a partir das faces.

3.2.10 Análise da Direção de Fibramento

Nesta etapa foi realizada a análise de macroestrutura a fim de examinar a direção de fibramento causada pelo escoamento do material durante o processo. Para tanto, cortou-se algumas amostras forjadas entre os dentes (figura 3.12). Em seguida, essas amostras foram lixadas e polidas até o ponto de se obter uma superfície espelhada, que foi submetida à imersão total em uma solução de 50% de ácido clorídrico e 50% de água, durante 60 segundos.



Figura 3.12 – Representação do corpo de prova para análise de fibramento.

3.2.11 Análise da Dureza

O método de análise seguiu dos mesmos procedimentos comuns encontrados nos laboratórios de metalurgia e a dureza foi medida nas faces A e B da engrenagem (figura 3.11).

Para a análise da dureza na região dos dentes, o corpo de prova foi extraído no sentido da hélice (figura 3.13).



Figura 3.13 - Representação das regiões de análise.

3.2.12 Monitoramento da Carga de Forjamento

Com a finalidade de comparar os resultados da simulação numérica com os resultados experimentais, projetou-se e fabricou-se uma célula de carga com as características apresentadas na figura 3.14.

A figura 3.15 mostra ao lado direito da prensa, os instrumentos para a aquisição de dados da célula de carga, já ao lado esquerdo, pode-se encontrar o acumulador de pressão responsável pelo efeito mola da ferramenta.



Figura 3.14 – Esquema da célula de carga.



Figura 3.15 – Sistema de monitoramento do processo e acumulador hidráulico.

3.2.13 Análise de Microestrutura

Nesta análise as amostras representativas de aço e alumínio foram cortadas entre os dentes no sentido transversal e longitudinal (figura 3.16), em seguida, foram embutidas e passaram pelos processos de lixamento e polimento. As amostras de aço foram atacadas com Nital 2%, e para as de alumínio usou-se uma solução a base de soda cáustica como reagente.

A tabela 3.11 apresenta a nomenclatura utilizada nas amostras de aço que também é mostrada na figura 3.16.

ALB - x	ATB - x
A – Numero da amostra	A – Numero da amostra
L – Plano longitudinal	T – Plano transversal
B – Região de análise	B – Região de análise
x – Aumento do microscópio	x – Aumento do microscópio

Tabela 3.11 – Nomenclatura das amostras

. T 3. 1. 2 L		4L1 - 50	4L2 - 100	4T3 - 500
		A = 1	A = 7	A = 15
		L = Plano	L = Plano	T = Plano
		longitudinal	longitudinal	transversal
		B = 1	B = 2	B = 3
		x = 50	x = 100	x = 500

Figura 3.16 – Exemplos de aplicação da nomenclatura.

3.2.14 Análise da Deflexão Elástica da Peça Forjada

A análise de deflexão da peça forjada foi realizada num laboratório de uma empresa especializada na fabricação de engrenagens, que possui equipamentos especiais para a análise dimensional de engrenagens helicoidais.

Nesse mesmo laboratório também fez-se a análise dimensional do eletrodo (função acabamento), da matriz com as dimensões originais da engrenagem e da engrenagem após o forjamento.

Ao comparar-se os resultados obtidos para esses componentes, pode-se determinar a deflexão elástica da engrenagem, que permitiu avaliar os erros devidos à fabricação da matriz e ao processo de forjamento, e desta forma, corrigir as dimensões para obter as dimensões especificadas para a engrenagem projetada.

O objetivo dessa análise neste trabalho diverge do propósito da empresa, que busca a classificação das engrenagens conforme a norma DIN 10 (norma DIN 3962, 1978), para controlar possíveis erros que possam reduzir a vida da engrenagem por falhas em aplicação.

Apesar disso, os resultados dimensionais serão úteis para avaliar o retorno elástico da engrenagem, e redimensioná-la a fim de minimizar esses erros.

Os erros comuns de fabricação encontrados em uma engrenagem são mostrados na figuras 3.17 e 3.18. Os ressaltos no pé do dente e riscos de ferramenta nessa região são fatores fundamentais para concentração de tensões.



Figura 3.17 - Ressalto no pé do dente.



Figura 3.18 - Riscos no pé do dente.

No caso do desvio da medida sobre esferas (menor no *shaving* / maior no *hobbing*), podem ocorrer degraus no fundo do dente devido ao excesso de sobre metal removido. A figura 3.19 (a) apresenta uma condição de erro que possibilita a quebra do dente por impacto, enquanto a figura 3.19 (b) já mostra uma condição mais favorável em que esse problema é minimizado.

O controle desses erros é realizado com o auxílio dos métodos de análises gráficas, em que representações como as mostradas a seguir relacionam cada gráfico com uma região de análise da engrenagem.



Figura 3.19 – (a) Ausência do raio na raiz dos dentes - (b) Geração correta do diâmetro da raiz.

• Análise do Perfil do Dente

A figura 3.20 mostra o gráfico e a região de análise do perfil do dente, na figura 3.21 é representado os flancos direito e esquerdo, e a figura 3.22 mostra a região de análise ao longo do perfil do dente.



Figura 3.20 – Representação da origem da análise gráfica do perfil do dente.



Figura 3.21 – Representação da origem da análise gráfica do perfil do flanco direito e esquerdo.



Figura 3.22 - Representação da origem da análise gráfica ao longo do perfil do dente.

• Análise do Passo da Hélice

A figura 3.23 mostra o gráfico e a região de análise no passo do dente para determinar o abaulamento, na figura 3.24 é representado os flancos direito e esquerdo, e a figura 3.25 mostra a região de análise em 80% da largura do dente.



Figura 3.23 - Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice.



Figura 3.24 – Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice no flanco direito e esquerdo.



Figura 3.25 – Representação da origem da análise gráfica do passo da hélice em 80% da largura do dente.

Outros erros que podem surgir são os associados à excentricidade, que causam ruídos e desgaste irregular, que compromete o bom funcionamento da engrenagem em trabalho.

• Análise da Excentricidade

Um método simples para se determinar a excentricidade é a utilização de um pino (ou esfera) posicionado entre os dentes. Nesse método, o valor da excentricidade é obtido medindose, com auxilio de um relógio, o deslocamento relativo do pino (ou esfera), posicionado entre os diversos dentes (figura 3.26).

A figura 3.27 mostra os erros de excentricidade, representados pela somatória das amplitudes inferior e superior da onda que passa pelo eixo das abscissas, que representa o centro de medição da engrenagem.

A excentricidade também pode causar a variação dos desvios do ângulo de pressão. Assim como o embaralhamento de perfil, que normalmente está associado à excentricidade dos dentes em relação ao eixo de trabalho da engrenagem (figura 3.28).



Figura 3.26 – Esquema de medição da excentricidade.



Figura 3.27 – Análise do erro de excentricidade.



Figura 3.28 – Erro de excentricidade na variação dos desvios do ângulo de pressão.

O controle desses erros é realizado tomando-se a medida do espaçamento entre todos os dentes (t), em um dado perímetro de raio (r). As medições são efetuadas tanto no flanco direito
como no flanco esquerdo, a figura 3.29 mostra a medição no flanco esquerdo. Então, as análises dos desvios de espaçamento são feitas de forma independente para cada flanco.

A figura 3.30 representa o erro de espaçamento dente a dente (fp), que é a diferença algébrica entre cada medição de (t) e a média das medições de (t).



Figura 3.29 – Medição de espaçamento no flanco esquerdo dos dentes.



Figura 3.30 - Erro de espaçamento dente a dente (*fp*).

A figura 3.31 (a) e (b) representa o erro de espaçamento acumulado (Fp), que é obtido do erro acumulado dente a dente (fp), pelo cálculo da diferença entre o maior e o menor valor.







Figura 3.31 (b) – Representação do erro de espaçamento acumulado (Fp).

3.2.15 Análise da Rugosidade Superficial

Tratando-se de forjados de precisão (*net shape*), para os quais prevê-se que não haverá remoção posterior de material nos flancos dos dentes, a rugosidade superficial obtida no forjamento torna-se um fator muito importante para a qualidade da engrenagem. Consequentemente, o estudo será realizado por meio do método comum, ou seja, utilizando-se um rugosímetro, e a região de análise será a face dos dentes onde ocorrerá o contato durante a utilização das engrenagens em caixas de transmissão.

3.2.16 Análise do Tempo de Processo

O tempo de processo para fabricar a engrenagem helicoidal forjada a frio foi obtido através da cronometragem iniciada no manuseio da pré-forma sobre a bancada, e que considerou o ato de colocar o tarugo no ferramental, a retirada do forjado do ferramental e sua colocação sobre a bancada. Os demais tempos consumidos, como furação da preforma, lubrificação, preparação da ferramenta e *setup* de máquina, não foram considerados, devido à similaridade dessas operações no processo proposto com aquelas do processo convencional por forjamento a quente.

Como o objetivo deste trabalho foi obter-se um forjado de precisão (*net shape*), torna-se importante comparar os tempos de fabricação para forjar a engrenagem a frio, com os tempos associados às operações de acabamento da engrenagem forjada a quente, normalmente empregadas industrialmente e representadas no quadro da figura 3.32.

Detalhe	Nº Oper.	Rev.	C.C Sub	Descrição da Operação	Descrição da Máquina
	10	D	05155-8A	Tornear	Torno CNC Index GFG250
	20	D	05155-8C	Semi-acabar 17 dentes	Hobber Pfauter PA 300
	30	D	05155-80	Fresar, furar(e quebrar cantos)	Centro Usinagem Vertical Haas
	50	С	05155-8P	Acabar 17 dentes	Rotary Shaver C.L.P. Red Ring

Figura 3.32 – Operações de acabamento de uma engrenagem similar forjada a quente.

Capítulo 4

Apresentação e Análise dos Resultados

A apresentação e a análise dos resultados obtidos neste trabalho são apresentadas a seguir e dividem-se em duas partes, sendo a primeira (itens 4.1 a 4.1.3) relacionada com a simulação numérica, a segunda (itens 4.2 a 4.2.10) é relativa aos ensaios definidos no planejamento experimental.

4.1 Análise da Capacidade da Força de Prensagem

O estudo foi iniciado a partir da análise de força para forjar a peça, tarefa que na prática, a dificuldade é maior e a precisão menor, de acordo com o grau de complexidade da geometria da peça. A capacidade estimada próxima da real pode ser obtida através do simulador *MSC.Superforge* durante todo o trajeto da ferramenta (figura 4.1. a - b).

Assim, tem-se a informação do carregamento aplicado no ferramental, bem como a carga necessária para o equipamento realizar a operação de forjamento. A carga utilizada no final do processo para forjar a engrenagem de aço foi próxima de 1800 kN - figura 4.1 (a), e para o forjamento da engrenagem de alumínio foi de aproximadamente 270 kN - figura 4.1 (b). Considerando-se as capacidades de carga obtidas numericamente optou-se por uma prensa hidráulica de 3300 kN, de comum uso no chão de fábrica da empresa.

Esses gráficos de carga de forjamento versus deslocamento da matriz superior apresentam curvas com comportamentos semelhantes, para os dois materiais e variações



nas curvas que também serão observadas e discutidas na análise dos resultados experimentais.

Figura 4.1 (a) - Gráfico de força x deslocamento – amostra de aço. (b) - Gráfico de força x deslocamento – amostra de alumínio.

4.1.1 Análise de Tensões na Montagem do Ferramental

A figura 4.2 apresenta os resultados obtidos na simulação numérica da montagem do ferramental, vide também figura 3.5. À esquerda tem-se as tensões que serão analisadas, os respectivos diâmetros que fazem parte da montagem da matriz $(D_i - D_a)$ e as interferências intermediárias $(S_1 - S_3)$. À direita, tem-se o gráfico que apresenta os seguintes resultados de tensões:



Figura 4.2 – Solicitação de tensões inserto-anéis

- $P_i = 0$ MPa Ferramenta apenas montada;
- $P_i = 1195,7$ MPa Ferramenta montada em regime de trabalho;
- Acima da linha traço ponto (tensões > 0) Tensões trativas atuantes no conjunto;
- Abaixo da linha traço ponto (tensões < 0) Tensões compressivas atuantes no conjunto;
- (i 1) Espessura da parede do inserto;
- (1-2) Espessura da parede do primeiro anel de contração;

- (2−3) Espessura da parede do segundo anel de contração;
- (3 a) Espessura da parede do terceiro anel de contração;
- Tensão radial (Linha verde) Tensão atuante na direção do eixo "x";os valores são sempre negativos devido à condição de carregamento imposta na montagem;
- Tensão tangencial (Linha vermelha) Tensão atuante na periferia, os valores devem ser negativos ou positivos, já a transição poderá causar fadiga. O inserto sempre apresentará tensões negativas, condição também imposta pelo carregamento, mas valores em torno de 200 MPa são aceitáveis para aplicação dos aços rápidos, e acima desse valor pode-se ter comprometimento da vida útil.
- Tensão equivalente (Linha azul) Tensão que indicará se o material suportará ou não a solicitação mecânica a que é submetido. Para o aço rápido e aço ferramenta, os valores devem ser comparados ao seu limite de escoamento, observando que na curva tensão-deformação desses aços, o limite de resistência está sempre próximo do limite de escoamento, pelo fato de estarem altamente endurecidos.

A seguir tem-se a comparação dos dados da figura 3.5 com a análise gráfica da figura 4.2, a partir do quadro elaborado com os resultados, como mostra a tabela 4.1:

	Tensão radial (MPa)	Tensão tangencial (MPa)	Tensão equivalente (MPa)
(i – 1)	Negativa	0	1195,7
(1 - 2)	Negativa	0	776
(2 – 3)	Negativa	894,4	1458
(3 - a)	Negativa	903,3	1188

Tabela 4.1 - Resultados das análises de tensões

O resultado é satisfatório e mostra um bom comportamento da montagem quando submetida à condição de solicitação, representativa do forjamento a frio estudado. Isto pode ser observado na figura 3.5, que caso houvesse irregularidades nos valores de tensões calculados, as indicações em azuis estariam vermelhas. A tensão equivalente em todos os componentes não excedeu o limite de escoamento do material. A tensão tangencial respeita a condição de tração ou compressão, ou seja, o inserto e o primeiro anel de contração estão em regime de compressão e os demais anéis em regime de tração. Já a tensão radial é compressiva em todo o conjunto, que é esperado perante a solicitação submetida.

4.1.2 Análise da Simulação Numérica do Forjamento a Frio da Engrenagem Helicoidal

O forjamento da engrenagem ocorreu em uma única etapa. A figura 4.3 apresenta passo a passo os resultados da simulação numérica realizada com o *software MSC.Superforge* de acordo com os procedimentos descritos no item 3.2.2.

4.1.3 Análise de Tensões na Peça Forjada

Durante a operação de forjamento o material trabalhado passou por diferentes condições de deformação, originando concentrações de tensões que atingiram diferentes regiões da peça formada. Então, a análise de tensões na peça foi possível durante todo o processo, mas a principal análise executada foi ao final da operação, quando as tensões atingiram o maior grau de intensidade, como mostrado nas figuras 4.4 - 4.9.



Figura 4.3 – Passos da simulação da operação de forjamento.

• Tensão equivalente

Figura 4.4 - O maior valor de tensão equivalente encontrado foi de 776 MPa e ficou restrito à região do pé dos dentes (regiões em vermelho) o que na matriz corresponde ao topo da gravação dos dentes. Esse valor máximo pode ser considerado adequado quando se

compara ao limite de escoamento estimado para o material da matriz, e como mostrado no quadro da tabela 4.1, essa tensão equivalente máxima é significativamente menor que a pressão interna estimada para a operação e considerada na montagem do ferramental.

• Deformação plástica equivalente

Figura 4.5 - Para o aço utilizado nos ensaios de forjamento, a deformação plástica equivalente a que poderia representar algum risco de ruptura estaria próxima a valores iguais a 1,4 (vide tabela 2.2) e como o máximo valor de deformação equivalente encontrada na simulação foi próxima de 1,2 e localizada na região de formação da rebarba superior, pode-se considerar que as condições de processamento são adequadas para a segurança do processo em termos da qualidade do produto e da vida das ferramentas.

• Distância entre a peça e matriz

Figura 4.6 - A simulação mostra que não ocorreu o preenchimento total da matriz no final da operação. Nas regiões na cor azul observou-se uma distância igual a zero entre peça e matriz, ou seja, nessas regiões ocorreu o preenchimento total.

Já regiões nas cores verde e amarela a distância entre peça e matriz ficou em torno de 1,0 mm, o que caracteriza que essas regiões não foram totalmente preenchidas, o que pode ter sido causado pela falta de força de fechamento, ou por um volume inadequado do tarugo, ou mesmo por um erro na simulação numérica, devido ao tamanho de elemento escolhido. De todo modo, esse erro de preenchimento deverá ser avaliado experimentalmente.

• Pressão de contato entre peça e matriz

Figura 4.7 - Apresenta pressões altas de contato, acima de 2500 MPa, em toda a superfície da peça forjada, o que comprova a necessidade de uma análise de tensões mais criteriosa do ferramental.

• Taxa de deformação efetiva

Figura 4.8 - A simulação não forneceu resultados confiáveis para essa variável de resposta, talvez por problemas numéricos, mas a princípio isto não compromete a análise, pois como o processo foi realizado a frio, considera-se que a taxa de deformação não seja um parâmetro de influência significativa no comportamento do material trabalhado.

• Escoamento do material

Figura 4.9 - O comportamento de escoamento do material nesse processo corresponde ao movimento lateral causado pela extrusão dos dentes, representada pelas regiões de tonalidade azul próximas do topo dos dentes. Observa-se que também a superfície superior do tarugo/engrenagem apresenta-se azul, o que representa que também aí houve movimento de material. A opção escoamento livre nas extremidades, mostrada pela simulação, foi definida a fim de que se evitasse a extrusão totalmente fechada, o que poderia acarretar o aumento excessivo da carga, e como consequência, a grande solicitação do ferramental.



Figura 4.4 - Tensão equivalente



Figura 4.5 - Deformação plástica equivalente



Figura 4.6 - Distância entre a peça e matriz



Figura 4.7 - Pressão de contato entre peça e matriz



Figura 4.8 - Taxa de deformação efetiva



Figura 4.9 - Escoamento do material

4.2 Grau de Deformação entre Sequências de Prensagem

Os resultados do grau de deformação entre as sequências de prensagem das amostras de alumínio e aço podem ser observados nas tabelas 4.2 e 4.3, e com maior evidência nos gráficos das figuras 4.10 e 4.12.

As tabelas apresentam os resultados referentes à distância entre as faces A e B (figura 3.11), bem como o peso das peças forjadas. Quanto ao peso, notam-se pequenas variações entre as peças, e que se deve à imprecisão encontrada normalmente no corte por serra, responsável pela separação dos tarugos. Quanto à distância entre as faces, pode-se observar pequenas variações em relação aos valores nominais esperados e apresentados nas tabelas 4.2 e 4.3, o que pode ser explicado por possíveis erros de montagem e pela recuperação elástica após o forjamento. Essa é uma observação que deve ser considerada e corrigida quando da fabricação em série das engrenagens pelo forjamento a frio com extrusão lateral.

A figura 4.10 apresenta esse resultado e permite que se observe uma tendência à replicação nos ensaios entre os números 5 e 8, que não é absoluta talvez devido à elevada ductilidade do alumínio e pela variação esperada de suas propriedades mecânicas. Na figura 4.12 é possível que se note, que os ensaios números 8 a 14 são réplicas do ensaio 7, o que representa a situação de fim de curso do processo, no qual o produto estava formado.

	Peso				Média
Alumínio	(gramas)	Distância e	entre faces A	A - B (mm)	(mm)
Pré-forma	59,900	26,042	26,050	26,040	26,044
Passo 1	59,400	20,412	20,413	20,419	20,415
Passo 2	59,900	18,784	18,790	18,796	18,790
Passo 3	60,000	16,276	16,270	16,271	16,272
Passo 4	60,000	15,874	15,878	15,875	15,876
Passo 5	59,000	15,799	15,796	15,792	15,796
Passo 6	58,900	15,499	15,486	15,503	15,496
Passo 7	58,800	15,187	15,184	15,166	15,179

Tabela 4.2 - Distância entre faces: amostras de alumínio



Figura 4.10 - Análise do grau de deformação - amostras alumínio.

A figura 4.11 apresenta a sequência de ensaios com amostras de alumínio, na qual percebe-se que ocorreu uma melhor formação dos dentes na região central, se comparada às extremidades da engrenagem.



Figura 4.11 - Sequência de ensaios - amostras de alumínio.

	Peso				Média
Aço	(gramas)	Distância e	(mm)		
Pré-forma	173,800	26,394	26,26	26,253	26,302
Passo 1	172,800	24,558	24,554	24,552	24,555
Passo 2	172,400	23,324	23,328	23,319	23,324
Passo 3	172,400	22,707	22,709	22,714	22,710
Passo 4	171,800	19,337	19,340	19,338	19,338
Passo 5	172,700	18,337	18,332	18,328	18,332
Passo 6	172,900	17,981	17,984	17,982	17,982
Passo 7	172,800	17,963	17,949	17,939	17,950
Passo 8	172,200	17,946	17,933	17,953	17,944
Passo 9	172,600	17,827	17,830	17,830	17,829
Passo 10	172,700	17,822	17,807	17,813	17,814
Passo 11	172,800	17,787	17,779	17,784	17,783
Passo 12	172,300	17,656	17,651	17,650	17,652
Passo 13	172,400	17,617	17,627	17,615	17,620
Passo 14	172,300	17,603	17,608	17,605	17,605

Tabela 4.3 – Distância entre faces: amostras de aço



Figura 4.12 - Análise do grau de deformação: amostras de aço.



Figura 4.13 - Sequência de ensaios: amostras de aço.

A figura 4.13 exibe a sequência de ensaios com amostras de aço, na qual também se observa uma boa formação dos dentes na região central, e que, mais uma vez, não ocorreu a

completa formação das extremidades da engrenagem. Caso o escoamento livre das superfícies extremas fosse evitado, é possível que se obtivesse um resultado final mais satisfatório da formação dos dentes.

A divergência do preenchimento do material na matriz encontrada na simulação numérica, dessa observada experimentalmente, pode ter se dado devido ao tamanho do elemento utilizado no Método dos Volumes Finitos.

4.2.1 Análise do Diâmetro Externo da Engrenagem

Os resultados da variação do diâmetro externo da engrenagem entre as sequências de prensagem podem ser observados nas tabelas 4.4 e 4.5, e mais representativamente nos gráficos das figuras 4.14 e 4.15.

A figura 4.14 mostra um aumento do diâmetro externo até a amostra 4, que representa na matriz o estágio de preenchimento dos dentes. A partir da amostra 5, o aumento perde a intensidade devido ao final de preenchimento. A pequena tendência ao aumento pode ser explicada pela grande ductilidade do alumínio. Na figura 4.15 observa-se o aumento do diâmetro externo até a amostra 6, que representa o estágio de preenchimento dos dentes na matriz, e a partir da amostra 7 a tendência é a estabilização, devido ao final do preenchimento.

Alumínio	Face A (mm)	Meio (mm)	Face B (mm)	Média (mm)
Passo 1	37,680	37,350	37,070	37,367
Passo 2	41,000	40,600	40,030	40,543
Passo 3	43,410	43,100	42,820	43,110
Passo 4	44,370	44,210	43,770	44,117
Passo 5	44,410	44,350	44,110	44,290
Passo 6	44,380	44,320	44,370	44,357
Passo 7	44,390	44,400	44,420	44,403

Tabela 4.4 - Análise dimensional do diâmetro externo das amostras de alumínio



Figura 4.14 - Variação dimensional do diâmetro externo: amostras de alumínio.

Aço	Face A (mm)	Meio (mm)	Face B (mm)	Média (mm)
Passo 1	36,093	36,107	36,019	36,073
Passo 2	37,315	37,037	36,931	37,094
Passo 3	37,519	37,779	38,099	37,799
Passo 4	40,69	40,370	39,070	39,720
Passo 5	42,387	42,110	41,639	42,045
Passo 6	44,313	44,120	43,578	44,004
Passo 7	44,389	44,490	44,468	44,449
Passo 8	44,476	44,490	44,400	44,455
Passo 9	44,465	44,490	44,415	44,457
Passo 10	44,409	44,490	44,489	44,463
Passo 11	44,473	44,484	44,457	44,471
Passo 12	44,452	44,498	44,466	44,472
Passo 13	44,469	44,499	44,498	44,489
Passo 14	44,477	44,499	44,492	44,489

Tabela 4.5 – Análise dimensional do diâmetro externo das amostras de aço



Figura 4.15 – Variação dimensional do diâmetro externo – amostras aço.

4.2.2 Análise da Dureza nas Faces da Engrenagem

As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os resultados das análises de dureza medida nas faces das engrenagens de alumínio e de aço (vide esquema de medição na figura 3.10). Os gráficos das figuras 4.16 e 4.17 apresentam esses resultados.

Alumínio	Dureza (HB) Face A		Média (HB)	Dureza (HB) Face B			Média (HB)	
Pré-forma	40	39	44	41	41	38	40	39,7
Passo 1	54	52	57	54,3	55	56	53	54,7
Passo 2	57,5	57	59	57,8	57	56,5	57	56,8
Passo 3	56,5	59,5	61	59	56	58	62	58,7
Passo 4	61	59	61	60,3	59,5	58	59,5	59
Passo 5	62	61	61	61,3	62	59,5	61	60,8
Passo 6	62	61	61,5	61,5	62	61	60	61
Passo 7	60,5	61	63,5	61,7	62	59,5	62	61,2

Tabela 4.6 – Análise da dureza nas faces: amostras de alumínio



Figura 4.16 - Análise de dureza entre faces: amostras de alumínio.

Aço	Dureza	a (HB) l	Face A	Média (HB)	Dure	za (HE) Face B	Média (HB)
Pré-forma	133	130	131	131,3	132	130	134,00	131
Passo 1	154	152	152	152,7	149	152	150	150,3
Passo 2	157	158	159	158	159	157	157	157,7
Passo 3	158	159	160	159	160	159	161	160
Passo 4	162	161	159	160,7	164	162	162	162,7
Passo 5	166	164	167	165,7	164	167	163	164,7
Passo 6	167	164	167	166	167	164	169	166,7
Passo 7	170	172	173	171,7	178	179	182	179,7
Passo 8	175	172	170	172,3	182	180	179	180,3
Passo 9	180	189	179	182,7	181	182	179	180,7
Passo 10	186	182	183	183,7	181	182	183	182
Passo 11	189	193	191	191	183	182	182	182,3
Passo 12	200	197	197	198	186	185	182	184,3
Passo 13	197	201	198	198,7	195	193	194	194
Passo 14	197	197	199	197,7	193	193	196	194

Tabela 4.7 – Análise de dureza nas faces das amostras de aço



Figura 4.17 - Análise de dureza entre faces - amostras de aço.

Observa-se na figura 4.16 que o aumento da dureza nas faces se dá até o ensaio 4, e representa o encruamento associado aos diversos graus de deformação em cada passe. A partir do ensaio 5 em que se tem a engrenagem completamente formada, observa-se que a dureza mantém-se constante representando mesmo grau de deformação.

Já na figura 4.17 relativa às amostras de aço, observam-se três estágios do aumento da dureza associados diretamente ao encruamento nas faces, diferenciado em função do estágio de preenchimento em cada ensaio, como pode ser observado na figura 4.13: o primeiro e o segundo ensaios apresentam um encruamento menor, pois houve apenas o recalque do tarugo sem o início da formação dos dentes.

Os ensaios 3 a 6 apresentam dureza semelhante, pois nesses ensaios os dentes ainda não estão completos. Já nos ensaios 7 a 12 os dentes foram formados totalmente, com um consequente aumento da dureza nas faces, enquanto nos ensaios 13 e 14 percebe-se um novo aumento da dureza provocada talvez pela sobrecarga das ferramentas, após a formação completa dos dentes. Esses diferentes comportamentos demonstram a diferença de ductilidade entre os materiais ensaiados, sendo que para o aço o aumento de dureza foi de quase 50% em relação à matéria-prima, o que pode ser considerado significativo considerando-se que o material de partida dos ensaios encontrava-se no estado coalescido.

4.2.3 Análise do Fibramento

As linhas de fibramento representam de forma clara na figura 4.18, o modo de escoamento ocorrido durante o processo de extrusão lateral. Observou-se um comportamento semelhante à operação típica de recalque na região helicóide do dente, que pode significar um produto com maior resistência mecânica proporcionada pelas mudanças da direção de fibramento. Esses resultados são semelhantes aos obtidos na simulação numérica para a velocidade de escoamento.



Figura 4.18 – Representação do fibramento.

4.2.4 Análise da Dureza nas Faces dos Dentes

As tabelas 4.8 e 4.9 e as figuras 4.19 e 4.20 apresentam os resultados das análises de dureza realizadas na região dos flancos dos dentes da engrenagem.

Alumínio]	Média (HB)		
Passo 1	55	57	56	56
Passo 2	62	62	61	61,7
Passo 3	64	64	65	64,3
Passo 4	64	67	66	65,7
Passo 5	65	66	67	66
Passo 6	68	69	67	68
Passo 7	68	70	68	68,7

Tabela 4.8 - Análise de dureza no flanco do dente: amostras de alumínio



Figura 4.19 - Análise de dureza no flanco do dente; amostras de alumínio.

Aco		Média (HB)		
Passo 1	164	164	163	163,7
Passo 2	170	169	170	169,7
Passo 3	176	175	176	175,7
Passo 4	205	205	204	204,7
Passo 5	209	213	212	211,3
Passo 6	210	213	213	212
Passo 7	211	213	213	212,3
Passo 8	212	213	213	212,7
Passo 9	213	214	213	213,3
Passo 10	213	215	214	214
Passo 11	217	217	216	216,7
Passo 12	217	218	217	217,3
Passo 13	217	222	217	218,7
Passo 14	222	227	227	225,3

Tabela 4.9 – Análise de dureza no flanco do dente: amostras de aço



Figura 4.20 - Análise de dureza no flanco do dente: amostras de aço.

A figura 4.19 mostra o aumento da dureza na região de contato dos dentes até a amostra 4, que representa na matriz o estágio de preenchimento dos dentes, a partir da amostra 5 o aumento perde intensidade, mas não continuidade de crescimento. Observou-se ainda que, apesar da grande ductilidade do alumínio, em regiões submetidas a grande redução de área, como no estágio final de preenchimento, ocorreu o encruamento e a dureza aumentou em torno de 30 HB.

Vê-se na figura 4.20, um aumento da dureza na região de contato dos dentes até a amostra 4, que representa o início do estágio de preenchimento dos dentes. No caso do aço, a partir da amostra 5 o aumento perde a intensidade, pois nesse instante, os dentes são completados e a seguir dá se início a formação da rebarba. Em comparação aos valores de dureza obtidas nas faces, observa-se um aumento considerável da dureza no flanco dos dentes. Esse aumento está associado ao intenso encruamento causado pela formação dos dentes.

4.2.5 Análise da Carga de Forjamento

A figura 4.21 mostra o gráfico da carga necessária para forjar a engrenagem de alumínio, que atingiu 680 kN no final da operação, ou seja, uma diferença de 410 kN quando comparado ao resultado da simulação de 270 kN [figura 4.1 (b)]. A grande diferença apresentada entre experimento e simulação, pode estar associada às condições de elementos de liga e estado de fornecimento do alumínio (solubilização), que faria com que as propriedades mecânicas fossem subestimadas na simulação numérica dos ensaios com a liga de alumínio.



Figura 4.21- Carga de forjamento - amostra de alumínio.

As cargas utilizadas para forjar cada passo da sequência de prensagem da engrenagem de aço, apresentada na figura 4.13, podem ser vistas na figura 4.22, na qual se observa a repetição e tendência das curvas da primeira a ultima amostra em função do grau de deformação em cada ensaio. Assim, é possível definir-se as amostras representativas de cada estágio do forjamento a partir do aspecto das curvas que são mais similares entre si. Esses ensaios são reunidos na figura 4.23, e as amostras escolhidas como mais representativas são as de número 2, 3, 4, 5, 8 e 14, que passarão por análise de microestrutura na região do flanco dos dentes.

A figura 4.24 mostra o gráfico de carga utilizado para forjar completamente a engrenagem de aço, que atingiu 2100 kN no final da operação, de modo que percebe-se uma diferença de 300 kN se comparado ao resultado da simulação numérica de 1800 kN [figura 4.1 (a)], diferença que também pode ser atribuída às diferentes propriedades assumidas na simulação para o aço a ser forjado, e indica que deve-se ter ainda um maior cuidado com as tensões resultantes nas ferramentas.

Em todas as curvas observa-se um primeiro aumento da força com uma maior taxa em função do tempo de processo, exemplificado pelos ensaios 1 e 2 nos quais só ocorreu o recalque do tarugo sem a formação de dentes, seguido de um aumento com menor taxa, mas significativo. O que representa a resistência ao escoamento causado pela formação dos dentes, esse tipo de curva em seu segundo estágio é representativo da extrusão em canais com aumento da resistência ao atrito, devido à maior área de contato ao longo do processo.

Também se deve destacar que o aspecto das curvas obtidas experimentalmente é similar ao obtido na simulação numérica, que assim representa adequadamente o processo de forjamento a frio da engrenagem helicoidal.



Figura 4.22 - Carga para forjamento das amostras de aço.



Figura 4.23 - Carga para forjamento das amostras de aço mais representativas.



Figura 4.24 – Carga de forjamento - amostra de aço.

4.2.6 Análise de Microestrutura

As amostras de alumínio passaram por análises de microestrutura, e as imagens foram capturadas num microscópio óptico de luz polarizada. Cabe ressaltar que houve uma dificuldade muito grande na revelação do contorno de grão devido ao processo de extrusão a quente que a barra foi submetida anteriormente. Apesar de toda dificuldade encontrada na preparação e análise dos resultados, pôde-se verificar certo grau de encruamento representado na figura 4.25.



Figura 4.25 – Microestrutura da engrenagem de alumínio (aumento 200x)

As microestruturas das amostras de aço foram analisadas em cada etapa de conformação, o que permitiu observar o grau de encruamento em cada um dos ensaios, bem como o sentido que toma o escoamento do material em cada situação. As figuras (4.26, 4.28, 4.31, 4.34, 4.37, 4.40 e 4.43) apresentam uma sequência de amostras, região e critério de análise utilizada em todos os passos relativos aos ensaios de forjamento.

Pré-forma	Região de análise	Plano Longitudinal (L)	Corpo de Prova
		Plano Transversal (T)	Região Longitudinal (L)
			Região Transversal (T)
0		• T • • • L	L 1 2 1 3 2 3 T

Figura 4.26 – Amostra e região de análise pré-forma.

Na figura 4.27 observa-se a microestrutura da pré-forma. Na região longitudinal (L1, L2 e L3), nota-se a condição de coalescimento com faixas de agrupamento da cementita grobular na matriz ferrita. Já na região transversal (T1, T2 e T3), têm-se condições de coalescimento com cementita globular bem distribuída na matriz ferrita. Essa condição de coalescimento da matéria-prima é adequada para o processo de forjamento a frio, e normalmente é o requisito industrial para esse aço no estado coalescido.





Figura 4.28 – Amostra 2 e região de análise.



Figura 4.29 – Gráfico de força da amostra 2.

A figura 4.29 apresenta a força de prensagem utilizada no passo número 2. A figura 4.30 mostra as microestruturas obtidas para essa amostra. São observados na região longitudinal (L1, L2 e L3) sinais de orientação de grão e encruamento em algumas regiões. Já na região transversal (T1, T2 e T3), há mais sinal de orientação que encruamento associado ao alongamento dos grãos.



Figura 4.30– Análise de microestrutura por região da amostra 2.

Amostra 3



Figura 4.31 – Amostra 3 e região de análise.



Figura 4.32 – Gráfico de força da amostra 3.

A figura 4.32 apresenta a força de prensagem utilizada no passo 3. A figura 4.33 apresenta as microestuturas obtidas para essa amostra, e também são observados na região longitudinal (L1, L2) sinais de orientação de grão e encruamento em algumas regiões da peça, (L3), ou seja, sinais de orientação de grão e encruamento são vistos em toda região da peça. Já na região transversal (T1, T2 e T3), há sinais de orientação e encruamento somente em algumas regiões da peça.



Amostra 4	Corte da Amostra	Plano Longitudinal (L) Plano Transversal (T)	Corpo de Prova Região Longitudinal (L) Região Transversal (T)
		• T • • •	T 1 1 2 2 3 3 L

Figura 4.34 – Amostra 4 e região de análise.



Figura 4.35 – Gráfico de força da amostra 4.

Na figura 4.35 pode ser vista a força de prensagem utilizada no passo 4. A figura 4.36 apresenta as microestruturas obtidas para essa amostra nas quais são observados na região longitudinal (L1, L2 e L3), sinais de orientação de grão em algumas regiões da peça e encruamento em regiões distintas. Já na transversal (T1) nota-se uma orientação de grão homogênea, (T2 e T3) há pouca orientação de grão e encruamento em regiões adversas, o que pode ser causado pelo fato de que nesse ensaio tem-se pela primeira vez o início da formação dos dentes.



Figura 4.36 – Análise de microestrutura por região da amostra 4.
Amostra 5	Corte da Amostra	Plano Longitudinal (L)	Corpo de Prova
		Plano Transversal (T)	Região Longitudinal (L)
			Região Transversal (T)
		•• T • • • L	T 1 2 3 3 L

Figura 4.37 – Amostra 5 e região de análise.



Figura 4.38 – Gráfico de força da amostra 5.

A figura 4.38 apresenta a força de prensagem utilizada no passo 5. A figura 4.39 mostra as microestruturas nas quais são notados na região longitudinal (L1, L2 e L3), sinais de pouca orientação de grão e encruamento em regiões adversas da peça. Com relação à região transversal (T1) nota-se também uma orientação de grão homogênea, (T2 e T3) com pouca orientação de grão e encruamento em regiões adversas.



Figura 4.39 – Análise de microestrutura por região da amostra 5.

Amostra 8	Corte da Amostra	Plano Longitudinal	Corpo de Prova
		(L)	Regiao Longitudinal (L)
		Plano Transversal (T)	Região Transversal (T)
		· T · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	T 3 2 2 1 1 T

Figura 4.40 – Amostra 8 e região de análise.



Figura 4.41 – Gráfico de força da amostra 8.

A figura 4.41 apresenta a força de prensagem utilizada no passo 8. A figura 4.42 mostra as microestruturas obtidas e nela são observados na região longitudinal (L1, L2) uma orientação de grão e encruamento em regiões adversas da peça, em (L3) observam-se sinais de pouca orientação de grão e encruamento. Já a região transversal (T1) apresenta orientação de grão homogênea, em (T2 e T3) há pouca orientação de grão e encruamento em regiões adversas.



Amostra 14	Corte da Amostra	Plano Longitudinal (L)	Corpo de Prova
		Plano Transversal (T)	Região Longitudinal (L)
			Região Transversal (T)
		• T • • • L	

Figura 4.43 – Amostra 14 e região de análise.



Figura 4.44 – Gráfico de força da amostra 14.

A figura 4.44 apresenta a força de prensagem utilizada no passo 14, que representa o fechamento total das matrizes e formação completa da engrenagem. A figura 4.45 apresenta as microestrutura nas quais são observados na região longitudinal (L1, L2) orientação de grão e encruamento em toda região, na (L3) há orientação de grão e encruamento em menor intensidade. Na região transversal (T1) nota-se uma orientação de grão homogênea, e em (T2 e T3) há orientação de grão e encruamento em menor intensidade.



Figura 4.45 – Análise de microestrutura por região da amostra 14.



Figura 4.46 – Visão geral do grau de encruamento em relação à força.

Na figura 4.46 tem-se uma visão geral do grau de encruamento (alongamento dos grãos) característico das faces dos dentes da engrenagem em relação à força de forjamento, Como esperado, observa-se um alongamento considerável dos grãos em função da evolução do processo e do grau de deformação. No entanto, também pode-se perceber que apesar da grande deformação provocada, o material ainda apresenta regiões significativamente grandes com microestrutura coalescida, o que demonstra a elevada conformabilidade desse material e a possibilidade de obter-se produtos forjados a frio com intensidades de deformação ainda maiores.

4.2.7 Análise da Deflexão Elástica da Engrenagem

A seguir são apresentadas as análises dos resultados dimensionais do eletrodo na região de acabamento, da matriz e da engrenagem helicoidal. Esses resultados são comparados ao dimensional real da engrenagem helicoidal estabelecida no projeto. A numeração dos dentes foi escolhida aleatoriamente no momento da medição, a fim de distribuir possíveis erros de medição.

Análise Dimensional do Eletrodo

O Anexo 1 apresenta o gráfico do erro acumulado para todos os dentes nos flancos direito e esquerdo. Na parte superior encontra-se o flanco direito e na inferior, o flanco esquerdo.

				· · · ·	,
	Quantidade	Flanco	Flanco	Tolerância	Classificação
	dentes	direito	esquerdo	DIN 10	DIN 10
		(mm)	(mm)	(mm)	
Erro total acumulado (Fp)	19	0,0794	0,0782	0,0800	Positiva
Erro individual de passo (fp)	02	0,0190	0,0214	0,0280	Positiva
Erro sobre dois dentes (fu)	03	0,0110	0,0159	0,0360	Positiva

Tabela 4.10 – Análise dimensional do erro acumulado para todos os dentes (DIN 3962)

O resultado dimensional do eletrodo na região acabamento satisfaz a norma estabelecida (tabela 4.10), neste caso a DIN 10, norma para classificação dimensional da engrenagem conforme projeto.

No Anexo 2 é mostrado o gráfico da proporção de desvio da excentricidade radial para todos os dentes em relação ao diâmetro primitivo. Os resultados da excentricidade, obtidos pela medição sobre esfera, são mostrados a seguir na tabela 4.11.

do desvio da excentricidade "eletrodo (Dir(3)02)								
	Quantidade	Dimensional	Tolerância	Classificação				
	dentes encontrado DIN		DIN 10	DIN 10				
		(mm)	(mm)					
Total de variações (Fr)	19	0,0787	0,0560	Negativa				
Diâmetro sobre esferas	19	45,4319	45,683 - 45,705	Positiva				

Tabela 4.11 – Resultado da análise dimensional do eletrodo para a proporção do desvio da excentricidade - eletrodo (DIN 3962)

O resultado dimensional do eletrodo na região de acabamento para o total de variações não satisfaz a tolerância estabelecida, mas encontra-se na classificação DIN 10 desejada, isso devido ao bom resultado dimensional obtido no diâmetro sobre esferas.

O Anexo 3 apresenta o gráfico da proporção do desvio do passo dos dentes em relação ao centro da engrenagem, ao lado direito encontra-se o flanco direito e no lado esquerdo, o flanco esquerdo e apresenta valores que estão acima da tolerância permissível.

Os desvios mostrados na tabela 4.12 são comumente encontrados no processo de fabricação convencional de engrenagens. Assim, não podem ser associados exclusivamente a engrenagem forjada a frio neste trabalho e dessa forma, não desclassificam o processo empregado se considerada a norma DIN 10.

rubeia 4.12 Resultado da analise dimensionar do eletrodo para a proporção do desvio de passo						
	Quantidade	Flanco	Flanco	Tolerância	Classificação	
	dentes	direito	esquerdo	(mm)		
		(mm)	(mm)			
Média da inclinação	04	0,012	0,0226	-0,0100 a	Negativa	
				0,0100	-	
Média do crown	04	0,060	0,0125	0	Negativa	
Buraco máximo	04	0,040	0,0001	0,0040	Negativa	
Embaralhamento máximo	04	0,0210	0,0354	0,0100	Negativa	

Tabela 4.12 - Resultado da análise dimensional do eletrodo para a proporção do desvio de passo

Observação: No jargão industrial o termo *crown* significa abaulamento, o termo buraco quer dizer irregularidade, e ambos estão associados à superfície dos dentes. Já

embaralhamento, está associado ao desvio e sobreposição dos dentes, em relação um ao outro.

No Anexo 4 é apresentado o gráfico de proporção do desvio de passo para um dente em relação ao centro da engrenagem, e repete os resultados encontrados anteriormente.

O Anexo 5 apresenta o gráfico da proporção do desvio na envolvente dos dentes, mas como os desvios da tabela 4.13 também são comumente encontrados no processo de fabricação convencional de engrenagens, e novamente, pode-se afirmar que não podem ser associados exclusivamente a engrenagem forjada a frio neste trabalho e dessa forma, não desclassificam o processo empregado se considerada a norma DIN 10.

	uoucs				
	Quantidade	Flanco	Flanco	Tolerância	Classificação
	dentes	direito	esquerdo	(mm)	_
		(mm)	(mm)		
Média da inclinação	04	0,013	0,0515	-0,0100 a	Negativa
				0,0100	_
Média do crown	04	0,0182	0,0668	0	Negativa
Buraco máximo	04	0	0	0,0040	Positiva
Embaralhamento máximo	04	0,0354	0,0587	0,0100	Negativa

Tabela 4.13 – Resultado da análise dimensional do eletrodo para a proporção do desvio na envolvente

Já o Anexo 6 apresenta o gráfico da proporção do desvio na envolvente para o um dente, em relação ao centro da engrenagem, e repete os resultados encontrados anteriormente.

• Análise Dimensional da Matriz

No Anexo 7 há linhas e curvas sobrepostas, a linha reta representa o perfil real da engrenagem helicoidal, já a curva representa o perfil obtido experimentalmente. Portanto, a somatória das amplitudes esquerda e direita é analisada para o controle do perfil direito e esquerdo dos dentes (1, 6, 10 e15), na região inferior próxima ao flanco do dente e na região superior próxima ao diâmetro externo.

Na região inferior é analisada a média do erro acumulado para todos os dentes (Fa), ou seja, no perfil direito é de 46,9 μ m e no perfil esquerdo 33,4 μ m. A somatória média entre o desvio encontrado e o real (ffa) é de 28,7 μ m para o perfil direito e de 28 μ m para o esquerdo. A média da diferença do desvio (fha) é 41,9 μ m para o perfil direito e 15,5 μ m para o esquerdo.

Na região superior ou acima é analisada a média do erro acumulado para todos os dentes (Fa), no perfil direito é de 29,6 μ m, no perfil esquerdo 17,5 μ m. A somatória média entre o desvio encontrado e o real (ffa) é de 25 μ m para o perfil direito e 6,8 μ m para o esquerdo. A média da diferença do desvio (fha) é 12,4 μ m para o perfil direito e 5 μ m para o esquerdo.

As variações encontradas nessas análises é função do polimento realizado manualmente na matriz, e observa-se que os resultados encontrados para (Fa), (ffa) e (fha) são menores na região superior quando comparadas à região inferior, o que significa melhor condição operacional na realização do polimento manual.

Uma sequência de gráficos pode ser observada no Anexo 8, e refere-se à análise do flanco esquerdo e direito através do gráfico (fp) ou seja, do erro acumulado teórico para os 19 dentes, comparado ao perfil real e (fu) ao se tratar do erro máximo entre o erros máximo e mínimo. No flanco direito (fp) = $37,2 \ \mu m$ e (fu) = $46,7 \ \mu m$. Para o flanco esquerdo (fp) = $26,9 \ \mu m$ e (fu) = $43,7 \ \mu m$.

A seguir são mostradas as análises do erro acumulado experimental (Fp), apresentado para o flanco direito e esquerdo dos 19 dentes. O erro acumulado experimental para oito dentes (Fpz/8), e em seguida comparado ao perfil real dos dentes. No flanco direito (Fp) = 71,1 μ m e (Fpz/8) = 39,8 μ m. Para flanco esquerdo (Fp) = 54 μ m e (Fpz/8) = 29,1 μ m.

Logo após, apresenta-se a excentricidade radial em relação ao diâmetro primitivo (Fr) para todos os dentes, e conclui-se que há um erro de excentricidade (Fr) = $51,2 \mu$ m entre os dentes 12 e 13.

As variações encontradas nessas análises é função do polimento realizado manualmente na matriz, observa-se que os resultados encontrados para (Fa), (ffa) e (fha) são menores na região superior se comparados aos da região inferior, o que também significa melhor condição operacional na realização do polimento manual da matriz.

• Análise Dimensional da Engrenagem Helicoidal

O Anexo 9 representa o gráfico do erro acumulado para todos os dentes no flanco direito e esquerdo. Na parte superior, encontra-se o flanco direito e na inferior, o flanco esquerdo.

O resultado dimensional da engrenagem não satisfaz a norma estabelecida (tabela 4.14), neste caso a DIN 10. O erro acumulado (Fp) está fora da tolerância especificada, o que justifica a classificação da engrenagem como DIN 11.

	Quantidade	Flanco	Flanco	Tolerância	Classificação		
	dentes	direito	esquerdo	DIN 10	DIN 10		
		(mm)	(mm)	(mm)			
Erro total acumulado (Fp)	19	0,0980	0,0890	0,0800	Negativa		
Erro individual de passo (fp)	02	0,0195	0,0179	0,0280	Positiva		
Erro sobre dois dentes (fu)	03	0,0181	0,0144	0,0360	Positiva		

Tabela 4.14 – Resultado da análise dimensional da engrenagem do erro acumulado para todos os dentes (DIN 3962)

No Anexo 10 é mostrado o gráfico da excentricidade radial para todos os dentes em relação ao diâmetro primitivo. Os resultados apresentados na tabela 4.15 mostram que o total de variações (Fr), e o diâmetro sobre esferas ultrapassaram a tolerância especificada, portanto, não atingiram a classificação DIN 10 desejada.

 Tabela 4.15 – Resultado da análise dimensional da engrenagem para a proporção do desvio da excentricidade (DIN 3962)

 Ouantidade
 Dimensional

 Tolerância
 Classifica

	Quantidade	Dimensional	Tolerância	Classificação
	dentes	encontrado	DIN 10	DIN 10
		(mm)	(mm)	
Total de variações (Fr)	19	0,0559	0,0560	Negativa
Diâmetro sobre esferas	19	45,7186	45,683 - 45,705	Negativa

O Anexo 11 apresenta o gráfico da proporção do desvio do passo dos dentes em relação ao centro da engrenagem, novamente, à direita encontra-se o flanco direito e à esquerda, o flanco esquerdo. Observam-se valores que estão acima da tolerância permissível.

Os desvios mostrados na tabela 4.16 são comumente encontrados no processo de fabricação convencional de engrenagens, embora não sigam a classificação conforme a norma DIN 10. Assim, esses desvios representam sinais de problemas gerados no forjamento a frio quando adicionados aos erros anteriores comumente encontrados na fabricação dos dentes da engrenagem por usinagem.

rubble mit rubble de gubbe de gubbe							
	Quantidade	Flanco	Flanco	Tolerância	Classificação		
	dentes	direito	esquerdo	(mm)			
		(mm)	(mm)				
Média da inclinação	04	0,0423	0,0227	-0,0100 a	Negativa		
				0,0100	-		
Média do crown	04	0,093	0,035	0	Negativa		
Buraco máximo	04	0,017	0,049	0,0040	Negativa		
Embaralhamento máximo	04	0,0932	0,0846	0,0100	Negativa		

Tabela 4.16 – Resultado da análise dimensional da matriz para a proporção do desvio de passo

No anexo 12 é apresentado o gráfico de proporção do desvio de passo para um dente em relação ao centro da engrenagem, e repete os resultados encontrados anteriormente.

O Anexo 13 apresenta o gráfico da proporção do desvio na envolvente dos dentes. Embora não sejam classificados conforme norma DIN 10, os erros apresentados na tabela 4.17 também representam problemas quando adicionados aos erros anteriores.

Já no Anexo 14 é apresentado o gráfico da proporção do desvio na envolvente para um dente, em relação ao centro da engrenagem, e repete os resultados encontrados anteriormente.

do desvio na envolvente						
	Quantidade	Flanco	Flanco	Tolerância	Classificação	
	dentes	direito	esquerdo	(mm)		
		(mm)	(mm)			
Média da inclinação	04	0,0648	0,0518	-0,0100 a	Negativa	
				0,0100		
Média do crown	04	0,0265	0,0267	0	Negativa	
Buraco máximo	04	0,015	0,028	0,0040	Positiva	
Embaralhamento máximo	04	0,0342	0,0291	0,0100	Negativa	

Tabela 4.17 – Resultado da análise dimensional da matriz para a proporção do desvio na envolvente

Segundo técnicos responsáveis pela medição, é importante, para maior precisão dos resultados, usinar o furo central apoiando a engrenagem pelo diâmetro primitivo.

4.2.8 Análise do Tempo de Processo

O tempo de processo do forjamento a quente da preforma será desconsiderado para efeito de comparação, porque somente as operações de acabamento são importantes quando se trata de um forjado de precisão. Então, estabeleceu-se um tempo total de 4 minutos e 81 segundos para o acabamento da engrenagem forjada a quente (Figura 4.47). Esse tempo é elevado quando comparado ao tempo de 8 segundos por peça, observada no forjamento de precisão a frio, considerando a medição definida no item 3.2.16, proposto e realizado neste trabalho.

No entanto, o resultado do desvio dimensional da engrenagem provocado pelo retorno elástico, mostrou-se necessário a utilização da operação de *shaving* para acabamento, o que demonstra um acréscimo do tempo para 1 minuto e 45 segundos no forjamento a frio, que ainda pode ser considerado vantajoso no que se refere à produtividade.

Detalhe	№ Oper.	Rev.	C.C Sub 4	Descrição da Operação	Descrição da Máquina	Tempo de Fabricação	Tempo de Preparação
	10	D	05155-8A	Tornear	Torno CNC Index GFG250	0,0306	0,00
	20	D	05155-8C	Semi-acabar 17 dentes	Hobber Pfauter PA 300	0,0240	1,35
	30	D	05155-80	Fresar, furar(e quebrar cantos)	Centro Usinagem Vertical Haas	0,0364	2,00
	50	с	05155-8P	Acabar 17 dentes	Rotary Shaver C.L.P. Red Ring	0,0180	1,35

Figura 4.47 – Sequência e tempo-padrão das operações de usinagem de uma engrenagem similar.

4.2.9 Análise da Quantidade de Material

A figura 4.48 apresenta a comparação do peso entre a engrenagem usinada e a forjada. Para as duas condições desconsiderou-se o material extraído na operação de acabamento. Assim, partindo-se da mesma preforma removem-se na operação de usinagem 39 gramas do material, enquanto que após a operação de forjamento deverão ser removidas apenas 11 gramas, devido à operação de faceamento das extremidades, nas quais permitiu-se o escoamento livre, a fim de evitar o sobrecarregamento das matrizes. Esse material excedente poderá ser reduzido pelo controle preciso do curso de forjamento, o que diminuirá a formação de rebarba na superfície inferior e superior da engrenagem.

Modelo	Peso (gramas)	Diferença (gramas)
Preforma	169	0
Engrenagem usinada	130	39
Engrenagem forjada	158	11

Figura 4.48 – Comparação entre peso da preforma, engrenagem usinada e engrenagem forjada.

4.2.10 Acabamento Superficial nos Flancos dos Dentes

A rugosidade superficial (R_a) nos flancos dos dentes da engrenagem forjada a frio apresentou um valor médio de 0,19 μ m obtido a partir de três amostras, já o valor de R_z apresentou um valor médio de 1,41 μ m. Os valores representam uma superfície polida, e são similares aos encontrado quando o acabamento dos dentes dá-se pela operação de *shaving*.

Capítulo 5

Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Considerando-se os resultados obtidos nos ensaios de forjamento a frio para a obtenção da engrenagem helicoidal, pode-se concluir que vários dos objetivos principais deste trabalho foram alcançados, principalmente no que se refere ao conhecimento da otimização das variáveis do processo que permitiram qualificar o produto forjado.

Embora os objetivos iniciais desse trabalho tenham sido selecionados de maneira criteriosa, não se foi possível realizar a análise de tensões nas ferramentas, visto que o *software* apresentou erros no inicio da programação, ou seja, o insucesso ocorreu no momento em que a análise elasto-plástica das ferramentas foi modelada.

Tais erros podem ser atribuídos à configuração da malha gerada nas ferramentas. Pelo fato da matriz ter o formato inverso da engrenagem, observou-se certa dificuldade na formação da malha, especificamente nas ranhuras dos dentes, impedindo que a definição da malha de elementos finitos fosse completada.

As condições metalúrgicas da peça forjada apresentaram resultados significantes, quando comparadas à condição inicial do material, o que foi comprovado tanto nas análises de dureza

quanto nas micrografias. O que demonstra à possibilidade do aumento gradativo da deformação, com aumento do encruamento e como consequência, a melhoria das propriedades mecânicas.

Ao analisar o escoamento do material forjado, perceberam-se boas condições de fibramento, o que representa maior resistência mecânica na engrenagem, quando submetida a esforços de flexão. Se considerar que a engrenagem não necessitará de beneficiamento posterior, o fibramento obtido e seus benefícios poderão ser mantidos, o que não ocorre quando parte-se de uma engrenagem forjada a quente para obter-se a peça pronta por usinagem.

O *software MSC.Superforge* foi capaz de analisar as tensões atuantes na peça, e mostrou que os valores da máxima tensão efetiva excederam o limite adotado em algumas regiões, mas a prática tem mostrado que no estado compressivo, os materiais selecionados podem suportar tensões dessa ordem de grandeza.

As forças necessárias para a formação da engrenagem apresentaram diferenças entre a simulação numérica e os experimentos, que podem ser atribuídas ao coeficiente de atrito utilizado na simulação e também às propriedades mecânicas adotadas para os materiais deformados. Esse é um erro comum na simulação numérica de processos de conformação, e deverá ser corrigido adotando-se valores mais próximos dos observados na prática industrial.

Os desvios dimensionais nos dentes da engrenagem apresentaram-se significativos, mas como esses erros foram medidos e agora são conhecidos, pode-se modificar as dimensões da matriz de modo a obter-se as dimensões corretas da engrenagem, quando da extração após o forjamento a frio.

O acabamento superficial dos flancos da engrenagem forjada foi considerado como de superfície polida, mas se houver a necessidade de cementação, tempera e revenimento para aumento da dureza superficial, uma operação de acabamento por *shaving* será necessária para que se possa manter essa qualidade superficial. No processo proposto, quando se forjar aços microligados que dispensem o tratamento térmico de beneficiamento, o forjamento de extrusão lateral será certamente mais vantajoso que o processo atual, por manter a qualidade do acabamento superficial, além das propriedades mecânicas obtidas no forjamento a frio.

Quanto ao tempo de fabricação, pode-se afirmar que foi 30 % menor no processo de forjamento proposto, se comparado ao processo de usinagem a partir de engrenagem forjada a quente, o que indica um *lead time* mínimo na fabricação da engrenagem pela operação de extrusão lateral a frio.

5.2 Propostas para Trabalhos Futuros

A partir de algumas dificuldades encontradas para a análise das tensões presentes nas ferramentas durante o forjamento, conclui-se que novas pesquisas devem ser direcionadas ao uso de *softwares* de simulação que sejam capazes de calcular essas tensões, bem como os desvios dimensionais por elas provocadas entre as geometrias da peça e da matriz, e permitam que utilize esses resultados para corrigir a geometria da matriz e dessa forma, reduzir os erros geométricos da engrenagem forjada.

Há necessidade de que a geometria da pré-forma seja continuamente estudada e melhorada, a fim de se obter menores erros de excentricidade e assim, aumentar a vida útil da matriz.

O conceito de ferramental com ação dupla de molas deve ser analisado, a fim de que durante o forjamento da engrenagem seja possível observar o comportamento do escoamento do material, e a possível redução das tensões atuantes na matriz.

Uma pesquisa interessante para aplicação da engrenagem forjada a frio será submetê-la a esforços de flexão nos dentes reais como por exemplo, no regime de trabalho de uma caixa de cambio. Assim, poderá ser analisado o comportamento do material sob condições de fadiga, e numa eventual falha, observar-se a microestrutura.

Na hipótese da dificuldade de fabricação em larga escala de engrenagens helicoidais, não deve ser descartado um processo misto que reúna forjamento a morno e a frio, a fim de aumentar a conformabilidade, em especial, de aços mais resistentes, para a formação adequada dos dentes.

Referências Bibliográficas

ALTAN, T.; SOO-IK, O.; GEGELI, L. H. Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações. Tradução, COELHO, R. T.; ADAMI, L. A. Supervisão, RUFFINO, T. R. São Carlos: EESC/USP, 1999. 366P.

B. FALK.; ENGEL, U.; GEIGER. Fundamental aspects for the evaluation of the fatigue behavior of cold forging tools. Journal of Materials Processing Technology. n. 98, p. 143–149, 2001.

BEHRENS, B. A. *et al.* Precision fording process for high-duty automotive components. Journal of Materials Processing Technology. n. 185, p. 139-146, 2007.

BIBA, N.; STEBOUNOV, S.; LISHINY, A. Cost effective implementation of forging simulation. Journal of Materials Processing Technology. n. 113, p. 34-39, 2001.

BILLIGMANN J.; FELDMANN, H.D. Estampado y Prensado a Máquina. 2 ed. Reverté, 1979.

BRAMLEY, A. N.; MYNORS, D. J. Th. The use of simulation tools. Materials and Design. n. 21, p.279–286, 2000.

BRESCIANI, E.; et al. Conformação Plástica dos Metais. Ed. da Unicamp, 4a. ed., 1991.

CAI, J.; DEAN, T. A.; HU, Z. M. Alternative die designs in net-shape forging of gears. Journal of Materials Processing Technology, n. 150, p. 48-55, 2004.

DEAN, T. A. The net-shape forming of gears. Materials and Design. n. 21, p. 271-278, 2000.

DEGARMO, E. P. Materials and process in manufacturing. New York MacMillan, 1997. p. 982.

DIETER, E. G. Mechanical metallurgy. Adapted by David Bacon. London: MacGraw-Hill, 1988. 749 p.

DOEGE, E; BOHNSACK, R. Closed die technology for hot forging. Journal of Materials Processing Technology. n.98, p. 165-170, 2000.

DOYLE, L. E. et al. Processos de Fabricação e Materiais para Engenheiros. Tradução, VIEIRA, R. R. et al. São Paulo: ed. Blucher; USP, 1972. 639P.

HIRCHVOGEL, M.; DOMMELEM, H. V. Some applications of cold and warm forging. In: Journal of Materials Processing Technology, 1992. n. 35, p. 343-356.

HYUNKEE Kim; TETSUJI Yagi; MASAHITO Yamanaka. FE simulation as a must tool in cold/warm forging process and tool design. Journal of Materials Processing Technology. n. 98, p. 143-149, 2000.

HU, C.; WANG, K.; LIU, Q. Study on a new technology scheme for cold forging of spur gears. Journal of Materials Processing Technology. n. 187-188, p. 600-603, 2007.

INTERNATIONAL CONFERENCE "New Developments In Forging Technology", 2001, in Fellbach (near Stuttgart) – Germany, p. 1-465, 2001.

KANG, J. H. et al. Spur gear forging tool manufacturing method considering elastic deformation due to shrink fitting. Journal of Materials Processing Technology. n. 187-188, p. 14-18, 2007.

KIM, D. J.; KIM, B. M.; CHOI, J. C. Determination of the initial billet geometry for a forged product using neural networks. Journal of Materials Processing Technology, n. 72, p. 86-93, 1997.

KURT Lange. Modern metal forming technology for industrial production. Journal of Materials Processing Technology. n. 71, p. 2-13, 1997.

KUZMAN, K. Problems of accuracy control in cold forging. Journal of Materials Processing Technology. n.113, p. 10-15, 2001.

KURT Lange. Advanced Technology of Plasticity – proceedings of the Second International Conference on Technology of Plasticity, Stuttgart, Aug. 24/28, 1987 / edited by K. Lange. Berlin – Springer, 1987.

LEE, Y. S.; LEE, J. H.; ISHIKAWA, T. Analysis of the elastic characteristics at die and workpiece to improve the dimensional accuracy for cold forged part. Journal of Materials Processing Technology. 2004.

MEIDERT, M.; WALTER, C.; PÖHLAND, K. E. .Net, São Paulo, mar. 2004. Disponível em: <u>http://www.utfscience.de</u>. Acesso em 10 fev. 2006.

MEIDERT, M.; HÄNSEL, M. Net shape cold forging to close tolerances under QS 9000 aspects. N. 98, p. 150-154, 2000.

NÄGELE. H. WÖRNER, H.; HIRSHOVOGEL, M. Automotive parts produced by optimizing the process flow forming – machining. Journal of Materials Processing Technology. n. 98, p. 171-175, 2000.

NORMA – DEUTSCHE NORMEN (DIN 3962). Tolerances for Cylindrical Gear Teeth. DEUTSCHE, aug. 1978.

NORTON, L. R. Machine design: an integrated approach. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998. 1048p.

ONODERA, S. ISO 9000 conformance in respect of precision cold forging manufacturing. Journal of Materials Processing Technology. n. 71, p. 71-75, 1997.

OSMAN, F. H.; BRAMLEY, A. N. Preform Design for forging rotationally symmetric parts. Annals of the CIRP, v. 44, p. 227-230, jan. 1995.

PROVENZA, F. Projetista de máquinas. São Paulo: Pro-tec, 1989. 1v.

SANTOS, S. W. J. et al. Recursos informáticos agilizam o processo de conformação. Máquinas e Metais, Brasil, 146-157, 09/2001.

SHIGLEY, J. E. Elementos de máquinas. Tradução: Edival Ponciano de Carvalho. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984. 749 p.

SIEGERT, K.; KAMMERER, M.; KEPPLER-OTT, Th. Recent developments on height precision forging of aluminum and steel. Journal of Materials Processing Technology. n.21, p. 279-286, 1997.

SILVA, E. C., Estudo do processo isotérmico de forjamento de precisão através do método de elementos finitos. Diss. de Mestrado Orientador: Sérgio Tonini Button. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, S.P, 1995.

SKUNCA, M. at al. Relation between numerical simulation and experiment in closed die forging of a gear. Journal of Materials Processing Technology. n. 177, p. 256-260, 2006.

SCHULER; ALTAN, T. Metal Forming Handbook. Berlin: Springer Verlag, 1998.

VAN VLACK; LAWRENCE, H. Princípios de ciência e tecnologia dos materiais. Rio de Janeiro: Campus, 1984. 567 p.

VAZQUES, V.; HANNAN, D.; ALTAN, T. Tool life in cold forging – an example of design improvement. to increase service life. Journal of Materials Processing Technology. n. 98, p. 90–96, 2000.

VAZQUES, V.; ALTAN, T. New concepts in die design – physical and computer modeling applications. Journal of Materials Processing Technology. n. 98 2000, p. 212-223, 2000.

VAZQUES, V.; ALTAN, T. Optimization of process design in forging. In: International Seminar on Precision Forging, 1997, Japan: Osaka, 1997, p. 1-13.

VILLARES METALS. Aços Para Ferramentas. Catálogo Villares, São Paulo, 2006.

VILLAS, B. D. Estudo do processo de forjamento a frio de peças automotivas. 1999. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

Anexos

Os anexos a seguir apresentam os resultados das análises realizadas na empresa Eaton, segundo os métodos descritos no Capítulo 3 - item 3.14 e são analisados no capítulo 4 - item 4.2.7.



Anexo 1 – Gráfico de erro acumulado para todos os dentes - eletrodo



Anexo 2 – Gráfico da excentricidade radial - eletrodo



Anexo 3 – Gráfico de proporção do desvio do passo para determinados dentes – eletrodo



Anexo 4 – Gráfico de proporção do desvio do passo para 1 dente - eletrodo

Anexo 5 – Gráfico da proporção do desvio na envolvente para determinados dentes – eletrodo





Anexo 6 - Gráfico da proporção do desvio na envolvente para 1 dente – eletrodo



Anexo 7 - Gráfico do Controle de Perfil da Hélice para determinados dentes - matriz



Anexo 8 - Gráfico de controle da divisão e concentricidade - matriz



Anexo 9 - Gráfico de erro acumulado para todos os dentes - engrenagem



Anexo 10 - Gráfico da excentricidade radial - engrenagem



Anexo 11 - Gráfico de proporção do desvio do passo para determinados dentes - engrenagem


Anexo 12 - Gráfico de proporção do desvio do passo para 1 dente – engrenagem

Anexo 13 - Gráfico da proporção do desvio na envolvente para determinados dentes –engrenagem



Anexo 14 - Gráfico da proporção do desvio na envolvente para 1 dente - engrenagem

