

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR *Mauricio Lopez*  
*Santaella* ..... E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM *24, 03, 2009*  
*Sergio J Button*  
.....  
ORIENTADOR

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

# **Fatores de influência no desgaste de matrizes de forjamento a quente de bielas automotivas**

Autor: Mauricio Lopez Santaella  
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

37/2009

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

# **Fatores de influência no desgaste de matrizes de forjamento a quente de bielas automotivas**

Autor: Mauricio Lopez Santaella  
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

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

Dissertação de mestrado acadêmico apresentado à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2009  
S.P. – Brasil

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

Sa59f Santaella, Mauricio Lopez  
Fatores de influência no desgaste de matrizes de  
forjamento a quente de bielas automotivas / Mauricio  
Lopez Santaella. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Sérgio Tonini Button.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Forjamento. 2. Desgaste mecânico. 3. Vida útil. I.  
Button, Sérgio Tonini. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.  
Título.

Título em Inglês: Influence factors on forging die wear of automotive connecting rods

Palavras-chave em Inglês: Forging, Mechanical wear, Utility life

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Anselmo Eduardo Diniz, Sérgio Stefano Guerreiro

Data da defesa: 24/03/2009

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**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Fatores de influência no desgaste de matrizes  
de forjamento a quente de bielas automotivas**

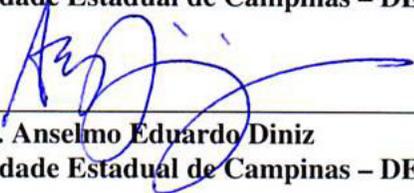
Autor: Mauricio Lopez Santaella  
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



---

**Prof. Dr. Sérgio Tonini Button, Presidente**  
Universidade Estadual de Campinas – DEMa – FEM – Unicamp



---

**Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz**  
Universidade Estadual de Campinas – DEF – FEM – Unicamp



---

**Dr. Sérgio Stefano Guerreiro**  
ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo Pta. – Engenharia Avançada

Campinas, 24 de Março de 2009  
S.P. - Brasil

## **Dedicatória**

Aos meus pais,

**José Santaella Redorat Júnior e Márcia Regina Lopez Alonso Santaella**

Por sempre me apoiarem durante todos os anos de minha vida. Obrigado por me mostrarem o caminho! Sem vocês nada disto seria possível.

Irmãos,

**Felipe José Santaella e Maithe Lopez Santaella**

Pela companhia, alegria e amizade.

À minha querida

**Daniela Rodrigues Recchia**

Pela companhia e amor. Que vibrou e torceu por mim desde o início para que este projeto desse certo. Obrigado!

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Sérgio Tonini Button pela disposição e orientação, sempre me apoiando qualquer fosse minha idéia em todos os anos de graduação e pós-graduação na Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp e ajudando a tornar-me uma pessoa melhor sendo um exemplo de caráter e conduta profissional.

Ao Dr. Mauro Aparecido Ferreira de Oliveira pela co-orientação, disposição e conselhos, os quais me ajudaram muito a guiar este projeto. Sem sua grande ajuda nada disto seria possível. Uma pessoa extremamente atenciosa sendo uma das poucas pessoas que dominam a arte de forjar e meu “*Sensei*”.

À Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Unicamp e todos os funcionários pelo acolhimento, disposição e ajuda.

À todos os professores da FEM pelo ensino, disponibilidade e compreensão.

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, membro da banca, pelos comentários, sugestões e opiniões.

Ao Dr. Sérgio Stefano Guerreiro, membro da banca, pelos comentários, sugestões para este trabalho e trabalhos futuros, amizade e ajuda.

À empresa ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo Pta. pela ajuda financeira para elaboração deste projeto e fornecimento de dados, em especial para:

Ao Sr. M. Sc. Luis Galli pelo apoio e suporte ao Programa de Incentivo à Capacitação Científica.

Ao Sr. Pedro Lüdke de Oliveira por oferecer seu departamento à disposição, exemplo de conduta profissional.

Ao Sr. João Lester Garcia Lopes por sua grande ajuda científica, apoio, conhecimento e amizade. Exemplo de alegria e carisma.

Ao Sr. José Martinho Pelacani pela grande ajuda com adaptação ao software, amizade e por compartilhar seu grande conhecimento em engenharia comigo.

Aos senhores: Fausto, Heraldo, Flávio e Paulo que também me ajudaram muito para a elaboração deste projeto.

A Sifco S.A. por abrir suas portas para que eu pudesse participar de um treinamento em suas instalações.

A Transvalor que me cedeu uma licença *trial* do software FORGE 2007 para elaboração deste projeto.

*“Dai-me, Senhor meu Deus, o que vos resta  
Aquilo que ninguém vos pede  
Não peço o repouso nem a tranqüilidade  
Nem da alma nem do corpo  
Não vos peço a riqueza, nem o êxito, nem a saúde  
Tanto vos peço isso meu Deus  
Que já não vos deve sobrar para dar  
Dai-me, Senhor, o que vos resta  
Dai-me aquilo que todos recusam  
Quero a insegurança e a inquietação  
Quero a luta e a tormenta  
Dai-me a certeza  
De que esta será a minha parte para sempre  
Porque nem sempre terei a coragem de vô-la pedir  
Dai-me, Senhor, o que vos resta  
Dai-me aquilo que os outros não querem  
Mas dai-me também  
A coragem, a força e a fé”*

## Resumo

SANTAELLA, Mauricio, *Fatores de influência no desgaste de matrizes de forjamento a quente de bielas automotivas*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidades Estadual de Campinas, 2009. 134p. Dissertação (Mestrado).

Uma faixa significativa do preço final de produtos forjados é proveniente de custos referentes a re-trabalho de ferramental devido a falhas superficiais nas matrizes de conformação. Na busca de uma empresa por maior competitividade em termos de preço e tempo, surge a necessidade de entender-se os mecanismos de falha das matrizes de modo a aumentar sua vida útil, evitando situações de risco para a matriz e uma possível falha, diminuindo custos referentes ao re-trabalho e diminuindo tempos de manutenção e *set-ups*, tendo por fim um aumento de produtividade. Além de mudanças conhecidas para o aumento da vida útil das matrizes como, por exemplo, temperatura e velocidade de forjamento, lubrificação e alterações metalúrgicas superficiais nas matrizes, pode-se aumentar a vida útil das matrizes com mudanças geométricas do desenho do forjado.

Neste trabalho foi estudado como a modificação dos valores do raio de boca, largura do patamar de rebarba, maior profundidade de cavidade, raio superior da haste, espessura de rebarba e temperaturas de forjamento e de matrizes influenciam no processo de desgaste de matrizes de pré-forma no forjamento de bielas automotivas na região da haste.

Através de simulação numérica e análise estatística pôde-se verificar que os parâmetros que mais influem no processo de desgaste são os mesmos que influem na profundidade de cavidade de matriz que por sua vez influem diretamente na largura total de rebarba que escoo pelo patamar de rebarba, sendo assim a largura de rebarba uma medida comparativa do desgaste.

Foi analisado também o processo de forjamento na região da haste de bielas, podendo-se verificar quatro etapas distintas para a evolução do desgaste, da tensão normal e do carregamento. Nessa avaliação verificou-se que o processo de escoamento durante o forjamento difere do observado em referências bibliográficas disponíveis, podendo-se verificar um processo de recalque na haste ou de escoamento radial das cabeças do laminado em direção à haste, o que tende a aumentar o diâmetro do tarugo que por sua vez com diâmetros maiores da haste, aumentam também o processo de desgaste, portanto sendo um importante fator a ser considerado em projetos de bielas.

Da análise dos gráficos da força necessária para forjar a região da haste pôde-se verificar também que a curva gráfica de carregamento se distingue quando há falha de preenchimento de cavidade quando comparado com um processo sem falha. Por fim através da construção de gráficos de mapeamento do processo ou sobre-posição de gráficos de contorno para os parâmetros com os quais houve falha de preenchimento para o desgaste e carregamento, podem-se verificar regiões otimizadas, sem falhas, com menores valores de desgaste, com aumento da vida útil das matrizes, garantia de qualidade do produto e possivelmente, redução de matéria-prima.

#### *Palavras Chave*

- Forjamento a Quente, Bielas, Desgaste, Falha, Vida útil, Planejamento de Experimentos, Projeto de Matrizes.

## **Abstract**

SANTAELLA, Mauricio, *Influence factors on forging die wear of automotive connecting rods*, Campinas: School of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2009. 134p. Dissertation (Master of Science).

A significant part of forgings prices is due to costs from reworks of forging dies because of superficial failures on their surfaces. In quest of a higher competitiveness in terms of prices and production times, it is necessary to understand the mechanisms of die failure to increase its working life, avoiding risk situations and a possible total failure of the tools, and also decreasing costs of reworks, and maintenance and set-ups, achieving a higher productiveness. Besides known changes to increase forging die life such as forging temperature, stroke speed, lubrication (friction) and superficial metallurgical modification on dies surfaces, it is possible to increase die life trough geometrical changes of the die sketch.

In this work it has been studied how the modification of the corner radius, flash land width, depth of cavity, radius of the upper stem, flash thickness and temperatures of forging dies and workpiece influence the wear of the forging of connecting rods in the stem region from the preform dies.

Through numerical simulation and statistical analysis it was found that the parameters that most influence the process of die wear are the same that affect the die cavity volume which also influence directly the overall width of flash of the forged part. Therefore, the width of a flash is a comparative measure of abrasive wear.

It was also analyzed the process of forging in the stem region from connecting rods and it could be verified four distinct stages in the evolution of the abrasive wear, normal stress and forging load. Through this validation it was found that the material flow during the process differs from the observed in available bibliographies and it could be also verified a process of upsetting in the rods stem or a radial flow of the rolled workpiece heads toward the rods stem, which tends to increase the diameter of the workpiece stem. Larger diameters increase the process of abrasive wear, therefore being an important factor to be considered in the design of connecting rods dies.

From the analysis of the necessary load to forge the stem region of the rod it was verified that the loading pattern is different when the cavity is not completely filled. Finally through the construction of processing maps it can be determined optimized regions without filling defects, with lower values of wear and thereby increasing die life, keeping the product quality and possibly reducing raw material.

*Key Words*

- Hot Forging, Connecting Rods, Wear, Failure, Die Life, Design of Experiment, Die Project.

## Índice

Dedicatória .....	iv
Agradecimentos.....	v
Resumo .....	viii
Abstract .....	x
Índice.....	xii
Lista de Figuras .....	xv
Lista de Tabelas .....	xviii
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
Introdução.....	1
1.1. Justificativa.....	2
1.2. Objetivo .....	2
1.3. Forjamento a Quente .....	3
1.4. Visão geral da dissertação .....	6
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>7</b>
Desgaste em Matrizes de Conformação a Quente.....	7
2.1. Desgaste Abrasivo .....	13
2.1.1. Cálculo do Desgaste .....	13
2.2. Tratamento das matrizes .....	15
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>18</b>
Avaliação do processo atual .....	18
3.1. Seqüência de processo.....	18
3.2. Análise do forjamento na pré-forma.....	21
3.3. Análise da força de carregamento para o forjamento da seção da alma da biela.....	28
3.3.1. Primeira Etapa.....	31
3.3.2. Segunda Etapa.....	32
3.3.3. Terceira Etapa.....	33
3.3.4. Quarta Etapa .....	33
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>36</b>
Metodologia experimental.....	36
4.1. Parâmetros a serem estudados .....	36
4.2. Análise da Razão Flash .....	37

4.3.	Procedimento de Análise dos Resultados.....	39
4.3.1.	Experimento Fatorial $2^k$ .....	39
4.3.2.	Efeitos Principais e Interações .....	40
4.3.3.	Ponto central (“ <i>Center Point</i> ”).....	40
4.3.4.	Gráficos de análise.....	40
4.4.	Delineamento Experimental .....	42
4.5.	Delineamento Experimental (parte 2 – mapeamento do processo) .....	44
<b>Capítulo 5</b>	.....	<b>46</b>
	Projeto de corpos de prova para ensaio experimental.....	46
5.1.	Testes Preliminares .....	47
5.1.1.	Processo atual.....	47
5.1.1.	Matriz com calços redondos e simétricos.....	48
5.1.2.	Matriz fechada com calço no tarugo.....	49
5.1.3.	Matriz fechada com ranhura no formato do tarugo .....	49
5.1.4.	Matriz fechada com ranhura paralela .....	50
5.1.5.	Matriz fechada com ranhura paralela (simetria) .....	51
5.1.6.	Matriz fechada com arredondamentos e ângulo de saída inferior e superior .....	52
5.1.7.	Matriz fechada com arredondamentos e ângulo de saída inferior e canto. Rasgo profundo.....	53
<b>Capítulo 6</b>	.....	<b>57</b>
	Resultados.....	57
6.1.	Parâmetros influentes no processo.....	59
6.1.1.	Carregamento.....	59
6.1.2.	Tensão normal .....	62
6.1.3.	Desgaste .....	63
6.1.4.	Largura de rebarba.....	66
6.1.5.	Largura de rebarba total x Desgaste .....	68
6.1.6.	Volume de cavidade interna.....	69
6.2.	Mapeamento do Processo .....	71
6.2.1.	Espessura de rebarba x Largura de patamar de rebarba.....	72
6.2.2.	Espessura de rebarba x Raio de Boca de rebarba .....	74
6.2.3.	Espessura de rebarba x Altura máxima da seção.....	76
6.2.4.	Espessura x Temperatura do forjado .....	79
6.2.5.	Espessura de rebarba x diâmetro da geratriz.....	81
<b>Capítulo 7</b>	.....	<b>85</b>
	Discussão de Resultados .....	85
7.1.	Parâmetros.....	85
7.1.1.	Temperatura do forjado.....	85
7.1.2.	Temperatura das Matrizes.....	86
7.1.3.	Espessura de rebarba .....	86
7.1.4.	Largura de patamar de rebarba.....	89
7.1.5.	Raio de Boca.....	91
7.1.6.	Altura máxima da seção .....	92

7.1.7. Diâmetro do forjado .....	93
7.2. Correlação Desgaste x Largura de Rebarba.....	95
7.3. Mapa de otimização de processo.....	96
<b>Capítulo 8</b> .....	<b>99</b>
Conclusões .....	99
8.1. Recomendações Futuras .....	101
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>102</b>
Anexo A1 .....	106
Anexo A2 .....	107
Anexo A3 .....	108
Anexo A4 .....	109
Anexo B .....	110
Anexo C .....	111
Anexo D .....	112
Anexo E .....	113
Anexo F .....	114

## Lista de Figuras

FIGURA 1.1: CONFORMABILIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE TRABALHO [13].	3
FIGURA 2.1: GRÁFICO DE EFEITOS PARA OS PARÂMETROS MAIS CONHECIDOS NO PROCESSO A QUENTE (ADAPTADO DE [19]).	8
FIGURA 2.2: FATORES DE INFLUENCIA NA VIDA DE MATRIZES DE CONFORMAÇÃO [12].	9
FIGURA 2.3: DESGASTE ABRASIVO NA REGIÃO DO RAIOS [25].	10
FIGURA 2.4: FADIGA TÉRMICA [30].	10
FIGURA 2.5: DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SUPERFICIAL NA DIREÇÃO DO ESCOAMENTO [28].	11
FIGURA 2.6: FADIGA MECÂNICA, TRINCA [30].	11
FIGURA 2.7: MÉTODOS DE DESGASTE EM MATRIZES DE FORJAMENTO, ADAPTADO DE [12].	11
FIGURA 2.8: ADESÃO SUPERFICIAL EM CONJUNTO COM ABRASÃO [25].	12
FIGURA 2.9: MECANISMO DO DESGASTE ABRASIVO: PARTÍCULA ABRASIVA, TENSÃO NORMAL E VELOCIDADE TANGENCIAL.	14
FIGURA 2.10: CAMADA TRANSVERSAL NITRETADA EM AÇO FERRAMENTA H13 [25].	15
FIGURA 3.1: ESQUEMA PARA A PRODUÇÃO DE FORJADOS.	18
FIGURA 3.2: DIFERENTES FORMAS DE LAMINAÇÃO TRANSVERSAL [18].	19
FIGURA 3.3: EXEMPLO DE LAMINAÇÃO LONGITUDINAL [31].	19
FIGURA 3.4: PROCESSO DE FORJAMENTO, PRÉ-FORMA E MATRIZ FINAL [30].	20
FIGURA 3.5: DIMENSÃO FINAL DA BIELA FORJADA.	21
FIGURA 3.6: DIMENSÃO DA GERATRIZ LAMINADA.	21
FIGURA 3.7: SISTEMA DE ENTRADA E SAÍDA DO FORJAMENTO NA PRÉ-FORMA.	22
FIGURA 3.8: ESQUEMA DE RECALQUE SOBRE A HASTE DO TARUGO NO FORJAMENTO DE BIELAS.	23
FIGURA 3.9: ESQUEMA DE RECALQUE SOBRE A HASTE DO TARUGO DURANTE O FORJAMENTO, INÍCIO DO FORJAMENTO.	23
FIGURA 3.10: ESQUEMA DE RECALQUE SOBRE A HASTE DO TARUGO DURANTE O FORJAMENTO, MOMENTO EM QUE AS GRAVURAS DAS MATRIZES TOCAM A ALMA DA GERATRIZ.	24
FIGURA 3.11: DESLOCAMENTO DE MATERIAL NO EIXO X PARA O CENTRO DA HASTE NO MOMENTO DO TOQUE COM A GRAVURA DA ALMA GERANDO RECALQUE.	25
FIGURA 3.12: DESLOCAMENTO DE MATERIAL NO EIXO X NO FINAL DO PROCESSO.	25
FIGURA 3.13: ESQUEMA ILUSTRATIVO DA SEÇÃO DA ALMA DE UMA BIELA.	26
FIGURA 3.14: SEÇÃO DA ALMA DA BIELA COM REBARBA, VISTA FRONTAL.	26
FIGURA 3.15: ETAPAS NO FORJAMENTO DE ALMA DE BIELAS PARA FORÇA DE CARREGAMENTO X PASSO.	29
FIGURA 3.16: VARIAÇÃO DA ENERGIA DE ATRITO DURANTE O FORJAMENTO.	29
FIGURA 3.17: DESGASTE, TENSÃO NORMAL E CARGA NORMALIZADOS X TEMPO.	30
FIGURA 3.18: ANÁLISE DA FORÇA DE CARREGAMENTO DA ALMA DA BIELA, COMEÇO DA PRIMEIRA ETAPA.	31
FIGURA 3.19: ANÁLISE DA FORÇA DE CARREGAMENTO DA ALMA DA BIELA, FIM DA PRIMEIRA ETAPA E COMEÇO DA SEGUNDA.	32
FIGURA 3.20: ANÁLISE DA FORÇA DE CARREGAMENTO DA ALMA DA BIELA, NO MEIO DA SEGUNDA ETAPA.	32
FIGURA 3.21: ANÁLISE DA FORÇA DE CARREGAMENTO DA ALMA DA BIELA, FIM DA SEGUNDA E COMEÇO DA TERCEIRA ETAPA.	33

FIGURA 3.22: ANÁLISE DA FORÇA DE CARREGAMENTO DA ALMA DA BIELA, FIM DA TERCEIRA E COMEÇO DA QUARTA ETAPA.....	34
FIGURA 3.23: ANÁLISE DA FORÇA DE CARREGAMENTO DA ALMA DA BIELA, FIM DA QUARTA ETAPA E DO PROCESSO....	34
FIGURA 4.1: ESQUEMA DOS PARÂMETROS A SEREM ESTUDADOS E MODIFICADOS.....	37
FIGURA 4.2: LARGURA DE REBARBA = 16,8 MM E ESPESSURA DE REBARBA = 4,2 MM.....	38
FIGURA 4.3: LARGURA DE REBARBA = 20,8 MM E ESPESSURA DE REBARBA = 5,2 MM.....	38
FIGURA 4.4: CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRÃO COM A=0,5%.....	41
FIGURA 4.5: GEOMETRIA DA MATRIZ DA PEÇA NA SEÇÃO DA ALMA, PLANO SIMÉTRICO ESQUERDO DA MATRIZ INFERIOR.....	43
FIGURA 4.6: DEMONSTRAÇÃO DE REDE DE MALHA PARA MATRIZ INFERIOR E GERATRIZ.....	45
FIGURA 5.1: PROJETO DE CORPOS DE PROVA, PROCESSO ATUAL.....	47
FIGURA 5.2: PROJETO DE CORPOS DE PROVA, CALÇOS REDONDOS.....	48
FIGURA 5.3: PROJETO DE CORPOS DE PROVA, MATRIZ FECHADA COM CALÇO.....	49
FIGURA 5.4: PROJETO DE CORPOS DE PROVA, MATRIZ FECHADA COM RANHURA REDONDA.....	50
FIGURA 5.5: PROJETO DE CORPOS DE PROVA, MATRIZ FECHADA COM RANHURA PARALELA.....	51
FIGURA 5.6: PROJETO DE CORPOS DE PROVA, MATRIZ FECHADA COM RANHURA PARALELA (SIMÉTRICO).....	52
FIGURA 5.7: PROJETO DE CORPOS DE PROVA, ÂNGULOS DE SAÍDA.....	53
FIGURA 5.8: PROJETO DE CORPOS DE PROVA, ÂNGULOS DE SAÍDA E MAIOR RASGO PARA FIXAÇÃO.....	54
FIGURA 5.9: GEOMETRIA FINAL DA PEÇA.....	54
FIGURA 5.10: FIBRAMENTO DA CONFORMAÇÃO.....	54
FIGURA 5.11: VISTA FRONTAL DAS MATRIZES PARA ENSAIO DE CORPOS DE PROVA.....	55
FIGURA 5.12: VISTA LATERAL DAS MATRIZES PARA ENSAIO DE CORPOS DE PROVA.....	55
FIGURA 5.13: LOCALIZAÇÃO DO DESGASTE NA MATRIZ INFERIOR PARA CORPOS DE PROVA.....	55
FIGURA 5.14: LOCALIZAÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS NA MATRIZ INFERIOR PARA CORPOS DE PROVA.....	55
FIGURA 5.15: LOCALIZAÇÃO DO DESGASTE NA MATRIZ SUPERIOR PARA CORPOS DE PROVA.....	56
FIGURA 5.16: LOCALIZAÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS NA MATRIZ SUPERIOR PARA CORPOS DE PROVA.....	56
FIGURA 6.1: LOCALIZAÇÃO DO DESGASTE NAS MATRIZES.....	58
FIGURA 6.2: LOCALIZAÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS NAS MATRIZES.....	58
FIGURA 6.3: LOCALIZAÇÃO DAS REGIÕES COM MAIOR TEMPO DE CONTATO COM TARUGO.....	59
FIGURA 6.4: GRÁFICO DE PARETO, CARREGAMENTO.....	60
FIGURA 6.5: CURVA DE PROBABILIDADE NORMAL, CARREGAMENTO.....	60
FIGURA 6.6: CURVA DE EFEITOS PRINCIPAIS, CARREGAMENTO.....	61
FIGURA 6.7: GRÁFICO DE PARETO, FORÇA NORMAL.....	62
FIGURA 6.8: LOCALIZAÇÃO DOS MAIORES VALORES PARA TENSÃO NORMAL.....	63
FIGURA 6.9: GRÁFICO DE PARETO, DESGASTE.....	64
FIGURA 6.10: CURVA DE PROBABILIDADE NORMAL, DESGASTE.....	64
FIGURA 6.11: CURVA DE EFEITOS PRINCIPAIS, DESGASTE.....	65
FIGURA 6.12: LOCALIZAÇÃO DA MEDIDA DA LARGURA DE REBARBA.....	66
FIGURA 6.13: GRÁFICO DE PARETO, LARGURA TOTAL DE REBARBA.....	66
FIGURA 6.14: CURVA DE PROBABILIDADE NORMAL, LARGURA TOTAL DE REBARBA.....	67
FIGURA 6.15: GRÁFICO DE INTERAÇÃO, LARGURA TOTAL DE REBARBA.....	68
FIGURA 6.16: DESGASTE EM FUNÇÃO DA LARGURA DE REBARBA, PARTE 1.....	69
FIGURA 6.17: VOLUME DE CAVIDADE DE MATRIZ.....	70
FIGURA 6.18: GRÁFICO DE PARETO, VOLUME DE CAVIDADE.....	70
FIGURA 6.19: VOLUME DE CAVIDADE X LARGURA DE REBARBA TOTAL.....	71
FIGURA 6.20: ESQUEMA PARA VISUALIZAÇÃO DAS CURVAS DE NÍVEL.....	72
FIGURA 6.21: CURVA DE NÍVEL PARA A CARGA, L X E.....	73
FIGURA 6.22: CURVA DE NÍVEL PARA A TENSÃO NORMAL, L X E.....	73
FIGURA 6.23: CURVA DE NÍVEL PARA O DESGASTE, L X E.....	74
FIGURA 6.24: CURVA DE NÍVEL PARA A CARGA, R X E.....	75
FIGURA 6.25: CURVA DE NÍVEL PARA A TENSÃO NORMAL, R X E.....	75
FIGURA 6.26: CURVA DE NÍVEL PARA O DESGASTE, R X E.....	76

FIGURA 6.27: CURVA DE NÍVEL PARA A CARGA, H X E.....	77
FIGURA 6.28: CURVA DE NÍVEL PARA A TENSÃO NORMAL, H X E.....	77
FIGURA 6.29: CURVA DE NÍVEL PARA O DESGASTE, H X E.....	78
FIGURA 6.30: FALHA DE PREENCHIMENTO, H = 12,89 MM, E = 4,2 MM.....	79
FIGURA 6.31: FALHA DE PREENCHIMENTO, H = 11,6 MM, E = 5,2 MM.....	79
FIGURA 6.32: FALHA DE PREENCHIMENTO, H = 12,89 MM, E = 5,2 MM.....	79
FIGURA 6.33: CURVA DE NÍVEL PARA A CARGA, Tf X E.....	80
FIGURA 6.34: CURVA DE NÍVEL PARA A TENSÃO NORMAL, Tf X E.....	80
FIGURA 6.35: CURVA DE NÍVEL PARA O DESGASTE, Tf X E.....	81
FIGURA 6.36: CURVA DE NÍVEL PARA A CARGA, D X E.....	82
FIGURA 6.37: CURVA DE NÍVEL PARA A TENSÃO NORMAL, D X E.....	83
FIGURA 6.38: CURVA DE NÍVEL PARA O DESGASTE, D X E.....	83
FIGURA 6.39: FALHA DE PREENCHIMENTO, D = 25,6 MM, E = 2,2 MM.....	84
FIGURA 6.40: FALHA DE PREENCHIMENTO, D = 25,6 MM, E = 3,2 MM.....	84
FIGURA 7.1: LOCALIZAÇÃO DA ESPESSURA MAIOR DE REBARBA.....	87
FIGURA 7.2: REBARBA EM FORMA DE “GOTA”, ESPESSURA DE 4,2 MM.....	87
FIGURA 7.3: REBARBA EM FORMA DE “GOTA”, ESPESSURA DE 3,2 MM.....	87
FIGURA 7.4: REBARBA EM FORMA DE “GOTA”, ESPESSURA DE 2,2 MM.....	88
FIGURA 7.5: REBARBA EM FORMA DE “GOTA”, ESPESSURA DE 1,2 MM.....	88
FIGURA 7.6: DESGASTE ABRASIVO, E= 5,2MM.....	89
FIGURA 7.7: DESGASTE ABRASIVO, E= 4,2MM.....	89
FIGURA 7.8: DESGASTE ABRASIVO, E= 3,2MM.....	89
FIGURA 7.9: DESGASTE ABRASIVO, E= 2,2MM.....	89
FIGURA 7.10: DESGASTE ABRASIVO, L= 10,8MM.....	90
FIGURA 7.11: DESGASTE ABRASIVO, L= 12,8MM.....	90
FIGURA 7.12: DESGASTE ABRASIVO, L= 14,8MM.....	90
FIGURA 7.13: DESGASTE ABRASIVO, RB= 2,03 MM.....	91
FIGURA 7.14: DESGASTE ABRASIVO, RB= 4,05 MM.....	91
FIGURA 7.15: DESGASTE ABRASIVO, RB= 6,08 MM.....	91
FIGURA 7.16: DESGASTE ABRASIVO, H= 7,73 MM.....	92
FIGURA 7.17: DESGASTE ABRASIVO, H= 10,31 MM.....	92
FIGURA 7.18: DESGASTE ABRASIVO, H= 12,89 MM.....	92
FIGURA 7.19: DIÂMETRO DA GERATRIZ (D) = 27,6 MM, E=3,2MM.....	93
FIGURA 7.20: DIÂMETRO DA GERATRIZ (D) = 29,6 MM, E=3,2MM.....	93
FIGURA 7.21: DIÂMETRO DA GERATRIZ (D) = 31,6 MM, E=3,2MM.....	94
FIGURA 7.22: DESGASTE ABRASIVO, D= 27,6 MM, E=3,2MM.....	94
FIGURA 7.23: DESGASTE ABRASIVO, D= 29,6 MM, E=3,2MM.....	94
FIGURA 7.24: DESGASTE ABRASIVO, D= 31,6 MM, E=3,2MM.....	95
FIGURA 7.25: CORRELAÇÃO LARGURA TOTAL DE REBARBA E DESGASTE, PARTE 2.....	96
FIGURA 7.26: MAPA DE OTIMIZAÇÃO PARA ALTURA DA SEÇÃO E ESPESSURA DE REBARBA.....	97
FIGURA 7.27: MAPA DE OTIMIZAÇÃO PARA DIÂMETRO DA GERATRIZ E ESPESSURA DE REBARBA.....	98

## Lista de Tabelas

TABELA 3.1: ÁREA DA SEÇÃO DA BIELA.....	27
TABELA 3.2: PARÂMETROS DO PROCESSO REAL.....	27
TABELA 4.1: ANÁLISE DA RAZÃO FLASH .....	37
TABELA 4.2: NÍVEIS DE VARIAÇÃO PARA OS FATORES.....	42
TABELA 6.1: NÍVEIS DE VARIAÇÃO PARA OS FATORES, L X E. ....	72
TABELA 6.2: NÍVEIS DE VARIAÇÃO PARA OS FATORES, R X E. ....	74
TABELA 6.3: NÍVEIS DE VARIAÇÃO PARA OS FATORES, HX E.....	77
TABELA 6.4: NÍVEIS DE VARIAÇÃO PARA OS FATORES, Tf X E.....	80
TABELA 6.5: NÍVEIS DE VARIAÇÃO PARA OS FATORES, D X E. ....	82

# Capítulo 1

## Introdução

A arte de forjar data de 4000 a.C. quando metais como bronze e ferro bruto eram forjados para a produção de ferramentas manuais e armas de guerra [3][29]. Desde a antiguidade o forjamento era sinal de poder e tecnologia. No Império Romano há cerca de 2000 anos, espadas e armaduras eram forjadas de modo que eram as mais fortes e resistentes da época, oferecendo assim grande vantagem em suas conquistas.

Mais recentemente podem-se citar as 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> guerras mundiais, quando os armamentos mais potentes e exigentes em termos mecânicos, também facilitaram a vitória dos aliados, cujos equipamentos e veículos mais precisos e resistentes possuíam uma grande parcela de produtos forjados. Atualmente o forjamento continua sendo utilizado, infelizmente, para a manufatura de armas. No entanto sua aplicação é muito variada e ampla, desde o armamento até a indústria espacial e automotiva.

Nos dias atuais existe uma crescente exigência de peças cada vez mais precisas e confiáveis em termos mecânicos e de qualidade, no que se refere tanto à qualidade superficial quanto à qualidade de processo, fazendo com que o forjamento continue em um processo de desenvolvimento para melhoria de preço, tempo e qualidade, gerando maior competitividade industrial.

Segundo Summerville [28] estima-se que quase 10% do valor final do forjado seja atribuído a gastos referentes a desgastes com matrizes, como re-trabalho e substituição. Estudos mais

recentes de Turk *et al.* [32] apontam que quase 17% do custo total da produção são provenientes das ferramentas, fazendo com que a vida útil das matrizes torne-se um fator importante para aumentar a competitividade da empresa no setor de forjados.

Para o processo de forjamento de componentes automobilísticos que combinam geometrias com reentrâncias é necessário um maior número de ferramentas pré-formas quando comparado com o número de ferramentas finais de forjamento. Isto se deve à alta deformação neste primeiro estágio, ocasionando falhas e desgastes prematuras na primeira matriz, principalmente na região do raio de canto do patamar da rebarba, também conhecido como raio de boca, por ser uma região com alta solitação térmica e mecânica, levando-a assim a sua substituição.

## **1.1. Justificativa**

Pretende-se através deste trabalho aumentar a vida útil das matrizes, compreendendo os fatores que influenciam o desgaste da matriz de conformação de bielas na região da haste no primeiro estágio de forjamento por meio de simulação numérica.

Além deste aumento de vida, faz-se necessário também citar um menor tempo de troca de ferramental (*set-up*), menor desgaste e um melhor preenchimento das matrizes, tendo como objetivo final aumentar a competitividade da empresa e reduzir os custos das ferramentas.

## **1.2. Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência de alguns parâmetros antes nunca estudados assim como sua importância para o processo de degradação de matrizes de conformação a quente de um projeto específico de biela automotiva. Através da compreensão destas variáveis será possível modificar o projeto atual das matrizes de biela adequando-as às expectativas de redução de re-trabalhos tornando possível prever o desgaste para futuros processos ou para situações similares de forjamento em andamento.

Outro ponto a ser apresentado é uma maneira qualitativa de medir o desgaste em matrizes através da visualização da largura de rebarba. Apesar de ser algo intuitivo, a largura de rebarba nunca foi relacionada com o desgaste como aqui apresentado.

### 1.3. Forjamento a Quente

Existem basicamente três tipos de forjamento, todos dependentes de suas temperaturas de trabalho, variando consideravelmente sua conformabilidade e grau de deformação. A Figura 1.1 ilustra a conformabilidade para os diferentes tipos de processos em função de suas temperaturas de trabalho [13], onde também é possível se notar que o ponto de fusão de materiais trabalhados por conformação (PFt) é maior que para seu estado fundido (PFf).

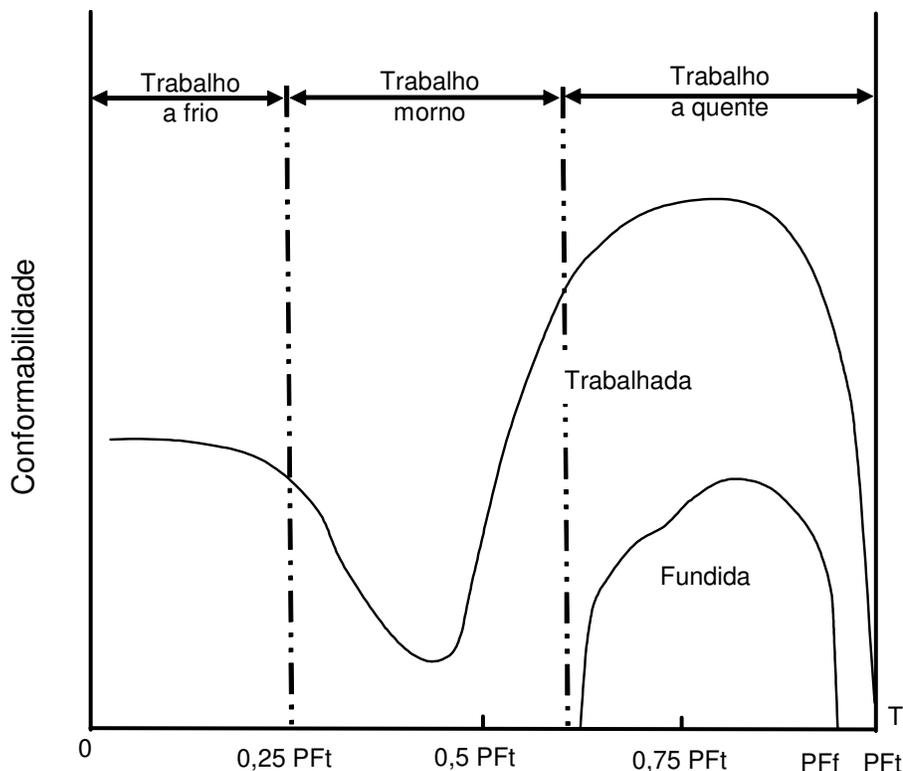


Figura 1.1: Conformabilidade em função da temperatura de trabalho [13].

No forjamento a frio as cargas são mais elevadas exigindo um equipamento mais robusto e potente. As deformações são pequenas e limitadas em função do alto encruamento que o material sofre. Por estar abaixo da temperatura de recristalização, não há amaciamento, levando ao

encruamento. As qualidades superficial e dimensional, no entanto, são elevadas, sendo geralmente empregadas para o acabamento e para peças não complexas.

No forjamento a morno a temperatura se encontra próxima da temperatura de recristalização, oferecendo energia suficiente para o deslizamento de grãos e diminuindo a taxa de encruamento e a energia necessária para forjar quando comparado ao processo a frio. Contudo tal aumento de energia não é o suficiente para a nucleação de novos grãos, o que pode levar à propagação de trincas, um fenômeno conhecido como fragilização a morno.

Já o forjamento a quente é o processo mais empregado e comum por sua possibilidade de forjar peças mais complexas e com alto grau de deformação.

O forjamento a quente é também um processo industrial clássico e largamente difundido. Na Europa a cada ano, milhões de toneladas de peças em aço são produzidas por processos de forjamento a quente [26].

O trabalho ocorre em temperaturas acima da temperatura de recristalização, e por isso não requer apenas menor energia mecânica para deformar o metal mas também proporciona maior facilidade para o escoamento plástico sem o surgimento de trincas.

O escoamento do material é fortemente influenciado pela temperatura e taxa de deformação. Sob algumas condições, uma estrutura uniforme é geralmente estabelecida para uma faixa segura de deformação, quando a tensão é constante. Esta situação uniforme é considerada como o equilíbrio entre os processos de endurecimento e amolecimento. O endurecimento surge dos obstáculos ou imperfeições cristalinas, que impedem a movimentação das discordâncias. O amolecimento está associado com a recuperação e a recristalização, que ocorre durante a deformação em altas temperaturas. As propriedades finais dos aços são influenciadas pelo tamanho de grão austenítico após a temperatura de deformação. O tamanho de grão final em uma certa temperatura decresce com o aumento da deformação e da taxa de deformação. Isto significa que a taxa de deformação é tão importante como a deformação em si, influenciando a microestrutura final e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas finais do produto [11] [17].

As variações estruturais resultantes do trabalho a quente proporcionam um aumento na ductilidade e na tenacidade se comparado ao estado fundido, por exemplo. Geralmente, a estrutura e propriedade dos metais trabalhados a quente não são tão uniformes ao longo da seção transversal como nos metais trabalhados a frio e recozidos, já que a deformação é sempre maior nas camadas superficiais. O metal possuirá grãos recristalizados de menor tamanho nesta região. Como o interior do produto estará submetido a temperaturas mais elevadas por um período de tempo maior durante o resfriamento do que as superfícies externas, pode ocorrer crescimento de grão no interior de peças de grandes dimensões, que resfriam vagarosamente a partir da temperatura de trabalho, gerando regiões com propriedades bem distintas daquelas superficiais.

O trabalho a quente apesar de apresentar uma série de vantagens como o aumento da tenacidade e ductilidade em relação ao bruto fundido também apresenta algumas desvantagens como a necessidade de equipamentos para manterem as peças quentes e, conseqüentemente, um maior consumo de energia.

Quanto maior for a temperatura de trabalho maior será o volume de oxidação que acabará por prejudicar a qualidade superficial que posteriormente terá de ser trabalhada nos processos subseqüentes de usinagem, além de aumentar o número de partículas abrasivas, fatores importantes para o desgaste de matrizes. Em altas temperaturas ocorre também a descarbonetação dos aços o que prejudica a resistência mecânica dos produtos forjados.

Outro ponto relevante é que devido à necessidade de tolerâncias dimensionais maiores causadas pelas contrações térmicas, deve-se adicionar uma quantidade razoável de sobre-metal que gerará maior quantidade de cavaco nos processos posteriores de usinagem e acabamento.

O desgaste de matrizes será maior no processo de forjamento a quente, pois sua lubrificação se torna mais complicada quanto maior for a temperatura de trabalho, gerando problemas de atrito e desgaste, além de se tornar algo mais complicado de se prever à medida que mais fatores devem

ser considerados como influentes ao processo de degradação de ferramentas. Fadigas térmicas também são mais evidentes neste tipo de processo.

#### **1.4. Visão geral da dissertação**

Esta dissertação possui no total oito capítulos com o acréscimo de anexos e referências. O primeiro capítulo fornece informações básicas do processo de conformação mecânica, além da justificativa e objetivo do presente trabalho. No segundo capítulo são mostrados os principais métodos de falhas superficiais de matrizes de conformação a quente, bem como o método de desgaste abrasivo a partir de revisões bibliográficas. No capítulo três é feita uma análise do processo de forjamento da biela atualmente forjada em grande escala por uma empresa. Sendo possível notar as etapas no processo de escoamento de material na cavidade interna das matrizes na seção da alma da biela e também é possível verificar o processo de recalque da haste. O quarto capítulo mostra a metodologia experimental para análise estatística com a descrição dos parâmetros envolvidos. No quinto capítulo foram feitos projetos para corpos-de-prova para uma análise experimental. Apesar de fazer parte do escopo deste projeto, fica como sugestão para trabalhos futuros. Já no sexto capítulo os resultados das simulações e gráficos estatísticos são apresentados. São mostrados os parâmetros mais influentes ao processo, algumas relações encontradas e mapas de processo. O capítulo sete apresenta a discussão dos resultados apresentados no capítulo anterior de forma separada. A correlação entre a largura total de rebarba com o desgaste é apresentado e também os mapas para otimização do processo de forjamento. Finalmente o capítulo 8 relata as conclusões encontradas e sugestões futuras. Em seguida as Referências Bibliográficas e Anexos.

## Capítulo 2

### Desgaste em Matrizes de Conformação a Quente

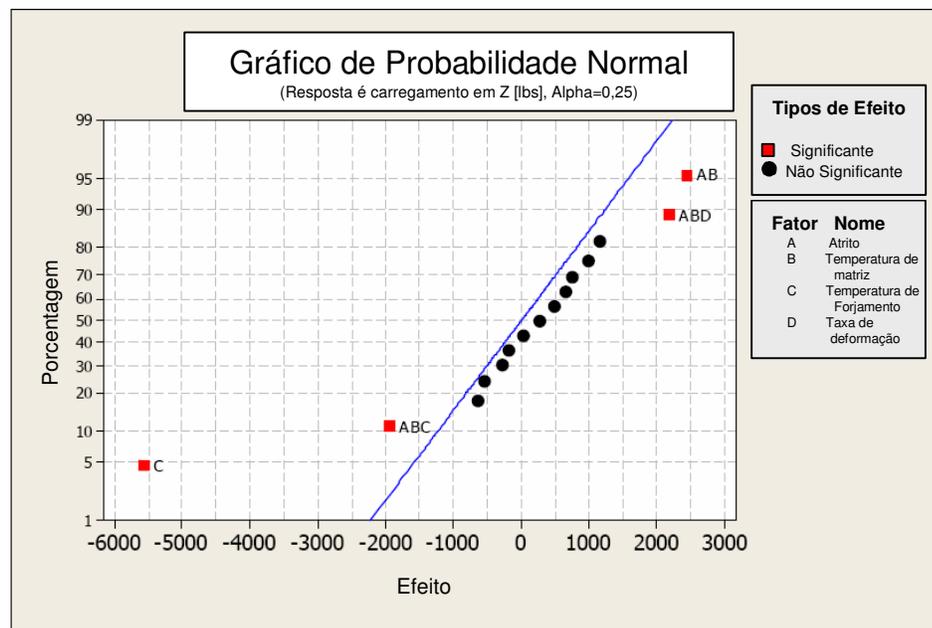
Muitos foram os estudos para criar um método quantitativo para a previsão do desgaste em matrizes. Babu, S. [4] analisou os pré-requisitos para que as ferramentas de forjamento a quente resistissem ao desgaste abrasivo e à deformação plástica além de propor um método para prever a vida útil de matrizes. O autor também estudou alterações superficiais nas matrizes devido ao contato com a geratriz e sua influência no processo de desgaste.

Em altas temperaturas um processo que afeta consideravelmente a vida útil das matrizes são mudanças micro-estruturais superficiais, que ocorrem com o aquecimento da matriz que durante o uso, áreas superficiais e sub-superficiais podem ser aquecidas além da temperatura de austenitização ou próximas e resfriadas abaixo ou perto da temperatura martensítica. Em casos em que a matriz sofre tal processo superficial de têmpera, citado sob as condições acima, forma-se uma camada branca muito resistente de martensita não temperada. Este fenômeno é especialmente ocasionado quando lubrificante a base de carbono é utilizado. Esta camada pode por fim ocasionar falhas e trincas na superfície, ocorrendo normalmente durante os dez primeiros ciclos de forjamento [28], [6].

A vida útil das ferramentas é afetada por diversas variáveis e diferem de um caso para outro, sendo equivalente aos principais fatores que influenciam de forma significativa o processo como um todo do forjamento a quente:

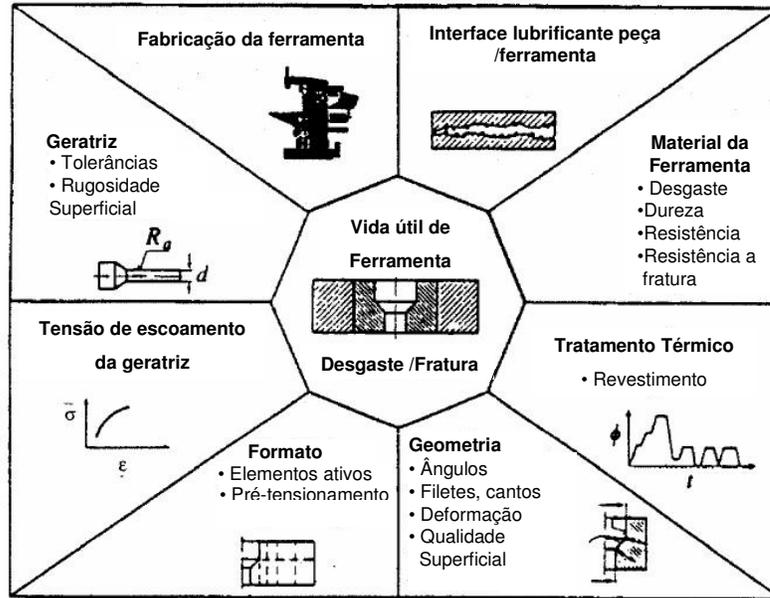
- Lubrificação;
- Temperatura da matriz;
- Temperatura da geratriz, ou de trabalho;
- Velocidade de forjamento.

Grobaski [19] estudou estes parâmetros e suas influências no processo de desgaste nas matrizes de conformação. A análise por meio do gráfico de Probabilidade Normal é mostrada na Figura 2.1. É possível verificar que, dentre os parâmetros estudados, a temperatura de forjamento da geratriz, ou laminado, e as combinações (ou efeitos de segunda ordem) entre atrito, temperatura de matriz e velocidade de forjamento são os parâmetros mais significantes no processo respectivamente.



**Figura 2.1:** Gráfico de efeitos para os parâmetros mais conhecidos no processo a quente (adaptado de [19]).

Cser *et al* [12] propuseram os fatores que influenciam no desgaste das matrizes através da Figura 2.2. Pode-se verificar a existência de inúmeros parâmetros de influência para a vida útil da ferramenta, desde lubrificação, geometria, tratamento térmico das matrizes, materiais envolvidos, rugosidade, temperatura e outros.



**Figura 2.2:** Fatores de influencia na vida de matrizes de conformação [12].

Os principais mecanismos que diminuem a vida útil das matrizes, levando-as a sua substituição por degradação e baixas qualidades das peças finais forjadas a quente são principalmente descritas abaixo:

- Desgaste abrasivo
- Fadiga Térmica
- Fadiga Mecânica
- Deformação Plástica

O desgaste abrasivo é notado na Figura 2.3 onde percebe-se a retirada de material da ferramenta na região do raio de boca de rebarba (raio de canto do patamar de rebarba), algo muito comum de se acontecer em matrizes de bielas e um dos fatores principais que levam a sua substituição. Na Figura 2.4 percebe-se um descascamento da superfície ou reticulado de trincas superficiais onde a seta vermelha aponta, caracterizada pela fadiga térmica. Olhando-se mais atentamente é possível notar a camada nitretada da ferramenta sem fadiga térmica pouco abaixo do centro da gravura na parte mais profunda indicado pela seta verde claro. Este processo é também

muito comum de acontecer, prevalecendo sua ocorrência em regiões com elevadas temperaturas, normalmente regiões centrais onde a geratriz permanece em maior tempo de contato com a matriz e também regiões de rebarba.

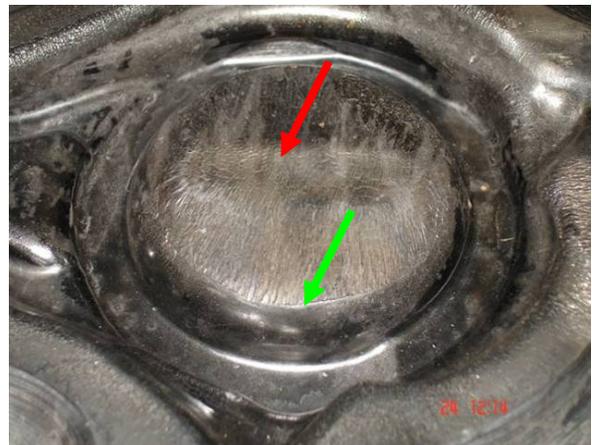
Na Figura 2.5 uma micrografia feita na região central de um punção de forjamento a quente mostra a deformação do aço na direção do escoamento do forjado fazendo com que a matriz perca tolerâncias dimensionais.

E por fim, na Figura 2.6 é mostrada um trinca na região mais profunda da gravura. Esta trinca é originada por solicitações mecânicas alternadas e localizadas nesta região. Este é um dos métodos mais severos e problemáticos, pois a trinca pode se estender levando a uma fratura total da ferramenta ou, em casos menos severos, ao re-trabalho, que nestes casos envolve uma série de outros processos como a retirada total da trinca removendo todo o material da região com uma fresadora, em seguida soldas específicas e, por fim, um novo fresamento.

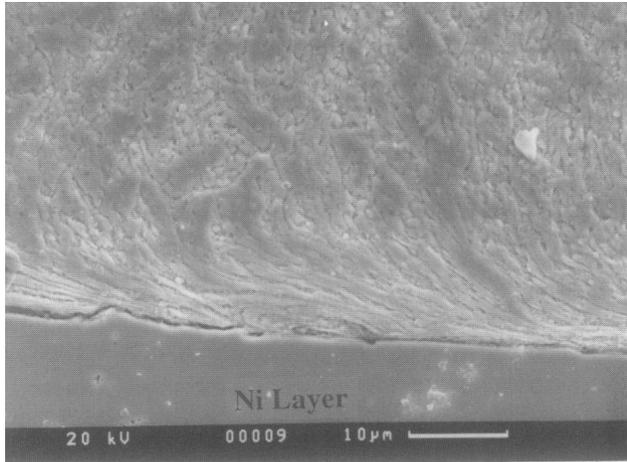
A fadiga mecânica ocorre naturalmente com cargas elevadas e repetidas ao longo da vida da matriz, sendo algo que se pode melhorar com um projeto mais adequado e sem concentradores de tensões.



**Figura 2.3:** Desgaste abrasivo na região do raio [25].



**Figura 2.4:** Fadiga térmica [30].

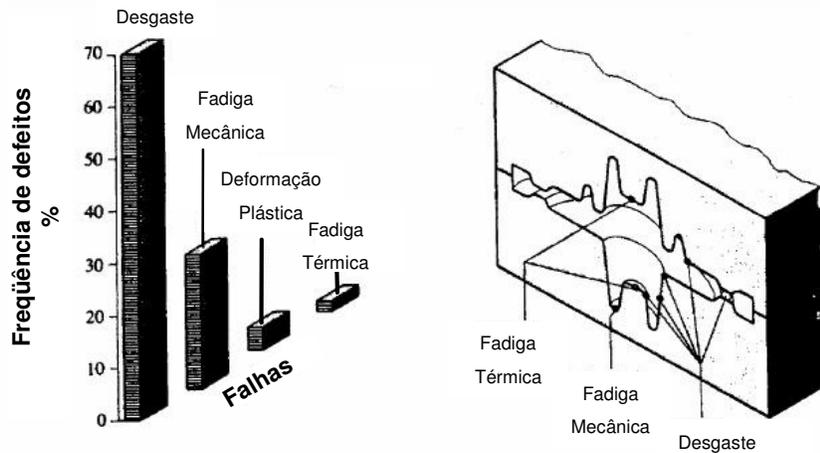


**Figura 2.5:** Deformação plástica superficial na direção do escoamento [28].



**Figura 2.6:** Fadiga mecânica, trinca [30].

Calcula-se que de todos os métodos que uma ferramenta degrada, quase 70% são provenientes de desgaste abrasivo como esquematizado por meio de análise estatística na Figura 2.7 [12]. No entanto não há um consenso quanto qual o principal meio de desgaste ou o fator dominante que causa a falha, o qual pode variar consideravelmente de um processo para outro.



**Figura 2.7:** Métodos de desgaste em matrizes de forjamento, adaptado de [12].

Antigamente acreditava-se que o principal método de desgaste superficial era a erosão, mais tarde outros pesquisadores apontaram para o desgaste abrasivo como o principal meio de desgaste. Recentemente, Doege *et al.* [15] apontaram para a importância do desgaste por adesão

microscópica, resultado de uma fusão local entre a peça e matriz, devido às irregularidades superficiais da ferramenta. Contudo a adesão ocorre principalmente em forjamento a frio, onde o contato metal e matriz é direto sem uma camada de lubrificante e na presença de altas pressões.

No caso de uma lubrificação ineficiente o metal pode-se fundir localmente com a matriz [4] e com um deslocamento tangencial arrancar material na matriz, levando a defeitos superficiais como mostrado na Figura 2.8.



**Figura 2.8:** Adesão superficial em conjunto com abrasão [25].

Considerando a formação de óxidos superficiais, “carepas”, durante o processo de aquecimento do tarugo para o forjamento a quente, pode-se afirmar que grande parte dos desgastes provém da abrasão superficial, lembrando que o desgaste abrasivo é o arraste de materiais duros ou partículas duras, tais como óxidos formados pela oxidação.

Por fim, pode-se criar uma linha do tempo para o desgaste de matrizes de conformação a quente, sendo o primeiro estágio da degradação a fadiga térmica que faz com que a matriz perca dureza superficial influenciando de forma significativa o estágio seguinte de desgaste abrasivo.

## 2.1. Desgaste Abrasivo

Como citado anteriormente, o processo de desgaste abrasivo é o mais importante dentre todos os outros métodos devido à formação de óxidos superficiais, partículas abrasivas, fadiga térmica e amolecimento superficial de matrizes. Assim segue a descrição de seu princípio e seu mecanismo básico é ilustrado na Figura 2.9.

### 2.1.1. Cálculo do Desgaste

O método matemático mais antigo de desgaste é o de Archard, em que o desgaste abrasivo é uma função da tensão normal, velocidade tangencial e tempo [1].

$$\delta W = k * p * \delta L \text{ (Modelo de Archard para o desgaste abrasivo)} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde:

$\delta W$  = Volume de material removido no intervalo de tempo  $\delta t$

k = Constante de Archard

p = Tensão normal

$\delta L$  = Distância de escorregamento no intervalo  $\delta t$

Este método é confiável quando a constante de Archard é bem definida. Contudo este modelo não é muito exato, pois no seu cálculo outros parâmetros não são considerados como, por exemplo, a variação da dureza superficial da ferramenta com o tempo.

O programa computacional utilizado neste trabalho foi o FORGE versão 2007, o qual utiliza uma versão modificada do método de Archard para o cálculo do desgaste superficial das matrizes [31]:

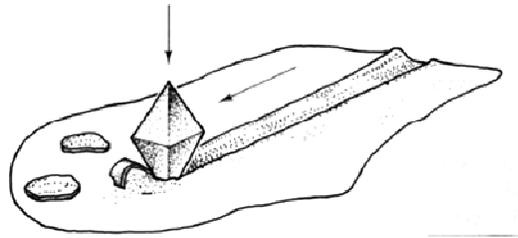
$$\text{Desgaste} = \int (\sigma_n * \delta V) \delta t_{\text{contato}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde:

$\sigma_n$  = Tensão normal no intervalo  $\delta l$  de contato

$\delta V$  = Velocidade tangencial

Unidade de Desgaste = Unidade de Tensão [MPa] \* unidade de comprimento [mm].



**Figura 2.9:** Mecanismo do desgaste abrasivo: partícula abrasiva, tensão normal e velocidade tangencial.

Uma forma mais adequada seria talvez acrescentar outros parâmetros para o cálculo do desgaste como [2]:

- Pressão normal à superfície
- Velocidade
- Fração volumétrica de partículas abrasivas
- Tamanho da partícula abrasiva
- Resistência do forjado
- Resistência das matrizes
- Decaimento de dureza superficial das matrizes

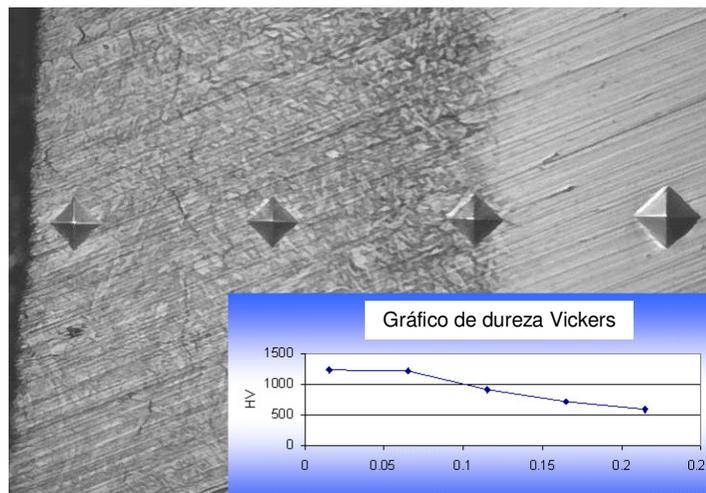
Apesar deste último ser um método mais complicado, muitos trabalhos já foram feitos para a formulação de métodos de cálculo numéricos para o desgaste abrasivo levando em consideração a dureza superficial e mudanças metalúrgicas superficiais nas matrizes e, por fim, mostrando a importância destes para seus cálculos [20][21].

Novas versões do programa FORGE 2007, como se soube após conclusão deste trabalho, farão seus cálculos de desgaste levando em consideração a dureza superficial das matrizes atingindo resultados mais precisos. Contudo este trabalho foi realizado com a versão 2007.

## 2.2. Tratamento das matrizes

As matrizes de conformação a quente são geralmente nitretadas para aumentar sua dureza superficial. Este aumento de dureza permite uma maior vida útil das ferramentas por retardar mecanismos de desgastes como a fadiga térmica e o desgaste abrasivo o qual depende basicamente da tensão normal e dureza.

A nitretação é um tratamento termoquímico de enriquecimento da superfície com  $N_2$  formando camadas de nitretos e nitrogênio dissolvido na matriz ferrítica. Dependendo das variáveis do processo pode haver a formação de nitretos na superfície, gerando assim uma camada branca e muito dura em sua superfície. Tal camada é apropriada para componentes e peças. No entanto para ferramentas não pode haver tal camada branca, pois esta pode ocasionar trincas na superfície e degradação da ferramenta. Em matrizes de conformação deve ocorrer uma camada de difusão, gerando uma camada de transição e mais dura que o substrato. A Figura 2.10 ilustra uma camada nitretada de um aço ferramenta H13 e o perfil de dureza Vickers em sua superfície.



**Figura 2.10:** Camada transversal nitretada em aço ferramenta H13 [25].

A nitretação pode ser feita através de vários processos, dentre eles podem ser citados:

- Deposição por gás
- Câmeras de Baixa Pressão
- Plasma
- Banho de Sal

O banho de sal é o mais utilizado em indústrias por ser de mais fácil utilização e possuir menor custo, porém implica em problemas ambientais gerando uma tendência para migrar para outros tipos de enriquecimento de superfície.

Apesar da metalurgia das matrizes de conformação não ser objeto de estudo no presente trabalho, deve-se mostrar a sua importância para o processo de degradação de ferramentas, pois um tratamento inadequado é altamente influenciável para o processo de fadiga térmica e desgaste abrasivo de matrizes de conformação a quente [25].

O método de tratamento superficial de têmpera superficial a LASER não é uma solução para o problema, pois este processo gera uma camada muito dura superficialmente sem uma camada de transição de dureza gerando assim o efeito “casca de ovo”. Tal camada também, por ser uma região instável e não recozida, tende a abaixar a dureza por processos posteriores de recozimento durante o forjamento, aumentando de forma significativa os processos de desgastes.

A camada de PVD é uma excelente alternativa e já possui resultados excelentes para a vida útil das matrizes na prática. Tal camada produz uma superfície com excelentes características tribológicas com relação a baixo atrito e aumento da resistência ao desgaste abrasivo. No entanto o processo para sua obtenção é geralmente terceirizado e caro além de ser mais delicado, devendo haver uma preparação adequada da superfície para a deposição do PVD. No caso de matrizes de bielas é totalmente viável, porém para matrizes profundas pode ocasionar falha de deposição, gerando uma superfície não homogênea e com diferentes espessuras de camadas.

Por fim, sabe-se que o banho de sal não gera uma camada homogênea na superfície da ferramenta além de gerar também oxidação superficial.

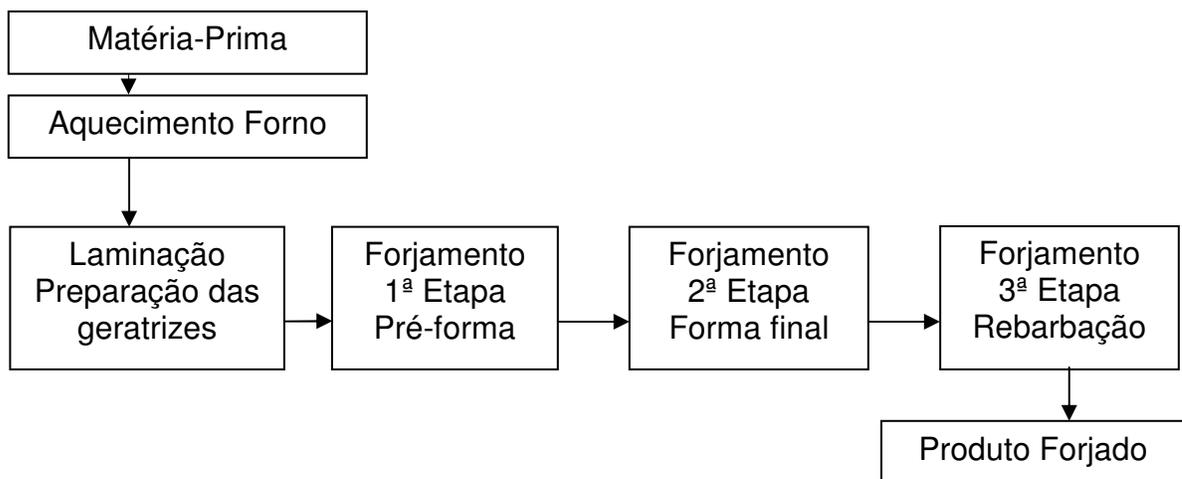
Logo, os diferentes métodos de nitretação são uma possível solução para se obter resultados diferentes e melhores para o desgaste.

## Capítulo 3

### Avaliação do processo atual

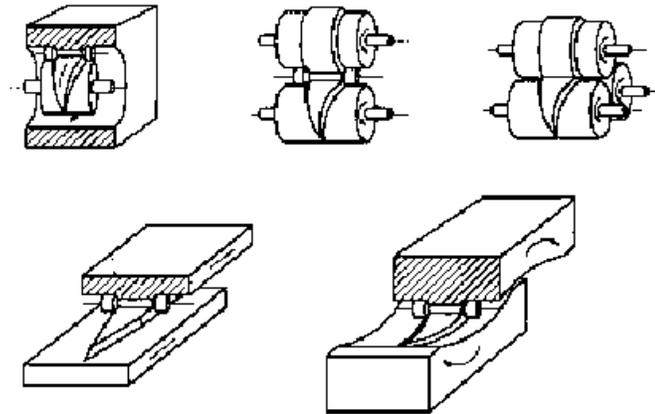
#### 3.1. Seqüência de processo

Para dar início ao estudo há a necessidade de se avaliar o processo atual em que o forjamento ocorre. Primeiramente é mostrada uma seqüência normalmente utilizada pela indústria para a manufatura de bielas, Figura 3.1.



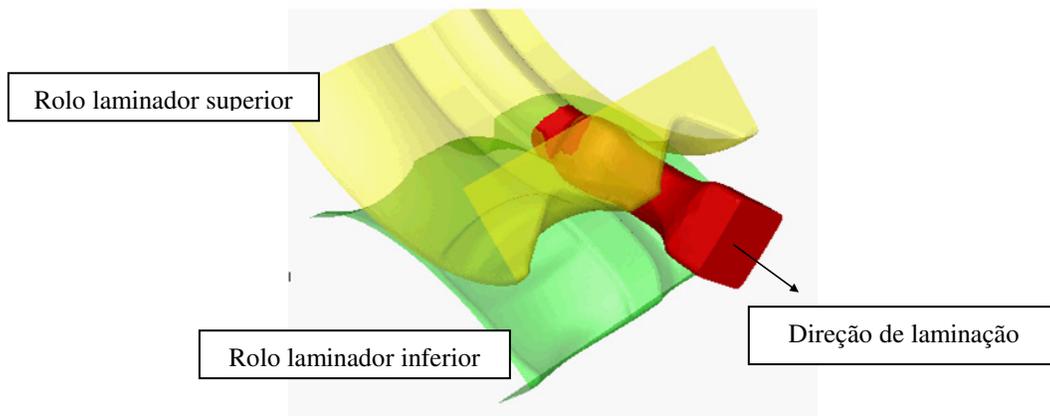
**Figura 3.1:** Esquema para a produção de forjados.

As geratrizes, ou matérias-primas, primeiramente são aquecidas por fornos e posteriormente seguem com temperaturas adequadas para a laminação transversal ou CWR (Cross Wedge Rolling), Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Diferentes formas de laminação transversal [18].

Outra possibilidade para esta etapa é a laminação longitudinal ou axial, Figura 3.3. Nesta configuração o material é deformado no sentido do seu eixo maior, possibilitando simetrias em apenas um plano, o que pode ser benéfico para a etapa posterior de conformação, facilitando um melhor escoamento do material dentro das cavidades das matrizes.



**Figura 3.3:** Exemplo de laminação longitudinal [31].

Após a laminação o tarugo segue para a primeira etapa do forjamento, a pré-forma no qual ocorre a maior deformação do material e também objetivo deste estudo, Figura 3.4 à direita. Em seguida as matrizes finais finalizam o forjamento e conferem uma calibração às medidas do forjado, Figura 3.4 à esquerda. Por último, a etapa de rebarbação cisalha a rebarba e os olhais centrais conferindo o formato da peça forjada final que, posteriormente, seguirá para processos de usinagem e acabamento.



**Figura 3.4:** Processo de forjamento, pré-forma e matriz final [30].

A dimensão final da biela após o processo de rebarbação pode ser notada na Figura 3.5.

O material desta biela é um aço C70, similar ao SAE 1070. Seu peso inicial, ou seja, material de partida, é de 3,380 quilos. Contudo, após o forjamento 1,146 quilos serão descartados através da rebarba, deixando a biela forjada final com 2,234 quilos. Assim sendo, cerca de 34% da matéria inicial será descartada e apenas 66% formaram a biela. Em processos de forjamento a quente este número é algo absolutamente normal e aceitável. O alto volume inicial da geratriz, Figura 3.6, é empregado para garantir o correto preenchimento de toda cavidade.



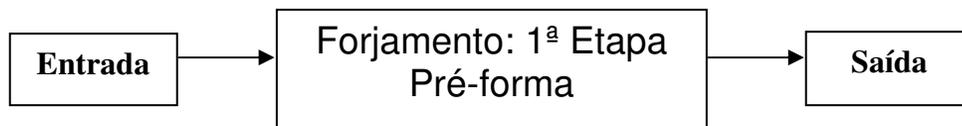
**Figura 3.5:** Dimensão final da biela forjada.



**Figura 3.6:** Dimensão da geratriz laminada.

### 3.2. Análise do forjamento na pré-forma

Para esta análise foram coletados em série uma geratriz após ser laminada transversalmente e pouco antes de entrar para o processo de forjamento, Figura 3.6, e também uma peça após ser forjada pelo primeiro passe (pré-forma), representando desta forma os dois produtos objetos deste estudo, entrada e saída de um sistema fechado, Figura 3.7. Todas foram resfriadas, jateadas e em seguida analisadas.



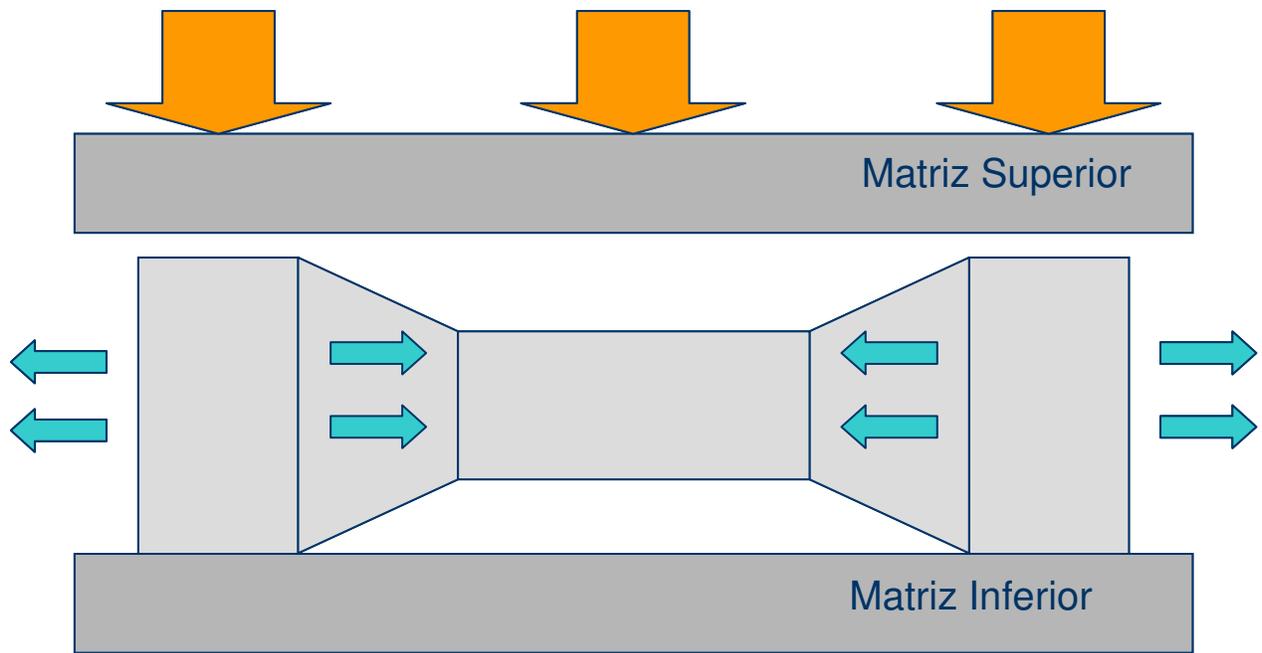
**Figura 3.7:** Sistema de entrada e saída do forjamento na pré-forma.

O diâmetro inicial da geratriz laminada na seção da alma, ou seja, no seu centro, possui vinte e nove milímetros, medido com um paquímetro. Deve-se levar em consideração, no entanto, que a laminação possui pequenas variações no processo devido ao abaulamento dos rolos laminadores e possíveis ajustes dos operadores para a laminação correta e bem sucedida da geratriz inicial, o que acarreta em uma pequena variabilidade em seu diâmetro final. Contudo não se entrará em maiores detalhes neste ponto, pois a laminação transversal não é objeto do presente trabalho.

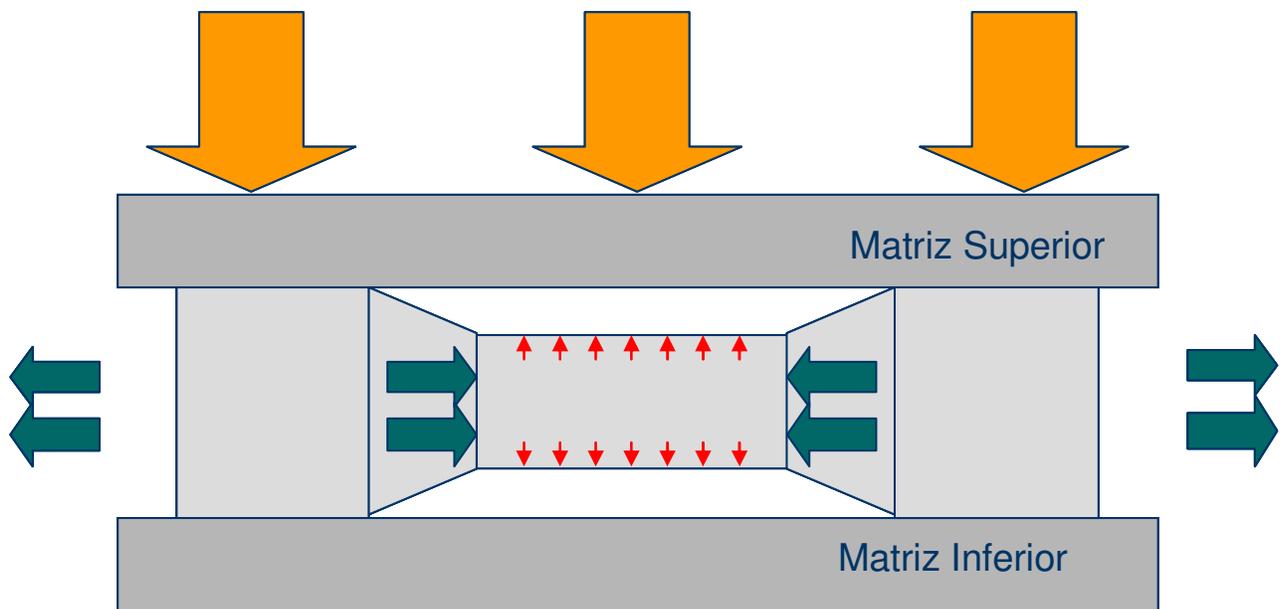
Outro fato que vem a mente e que deve ser analisado quanto ao diâmetro é um possível recalque da haste. Na existência de duas cabeças com maiores volumes de material no laminado, ou geratriz, que posteriormente formarão os olhais da biela há um escoamento radial em todas as direções durante o início do forjamento que quando se encontra com a haste da geratriz geram um recalque na mesma durante o início do processo.

Em um primeiro instante os olhais tocam as matrizes superior e inferior por estarem em uma posição mais elevada, Figura 3.8. Conforme a matriz superior fornece pressão, os olhais direito e esquerdo (Figura 3.9) começam a se deformar em todas as direções de forma radial. Porém o material escoando ao encontrar a região da haste do tarugo fornece pressão nas extremidades que acabam recalcando-a.

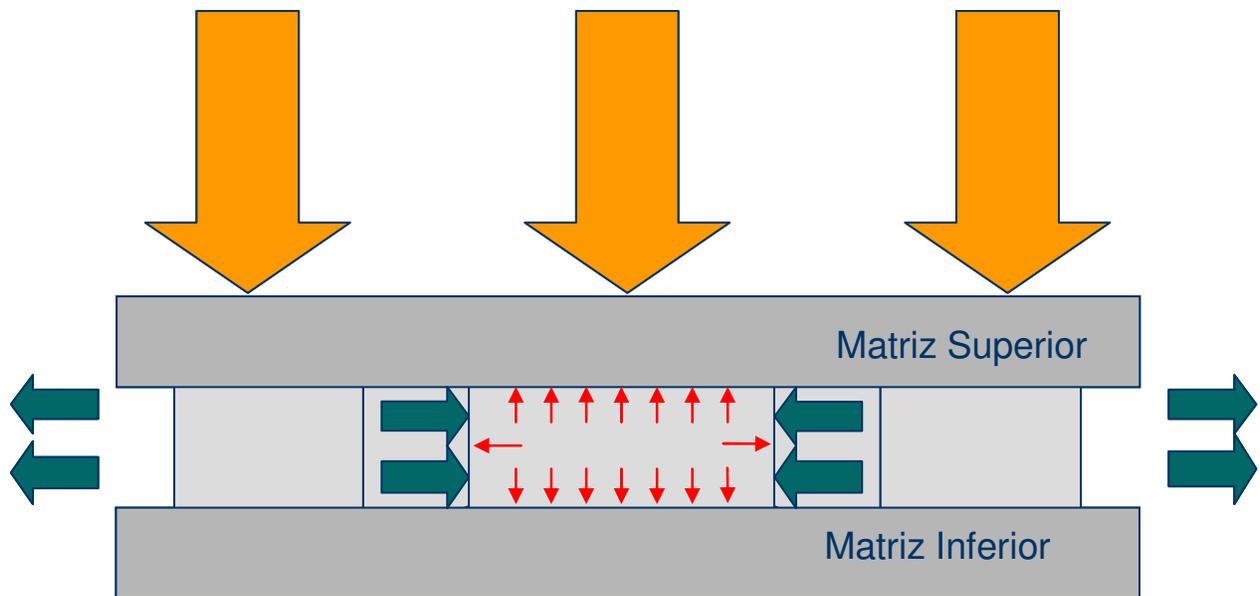
É de se esperar que o processo de recalque cesse quando a matriz toca a região da haste, Figura 3.10, por haver tanto a força radial de recalque para a haste como a força no sentido contrário proveniente da haste fazendo com que ambas sejam canceladas. Contudo é possível mostrar mais adiante que o processo de recalque se mantém mesmo quando a região da haste toca as matrizes, como será visto mais adiante neste capítulo.



**Figura 3.8:** Esquema de recalque sobre a haste do tarugo no forjamento de bielas.



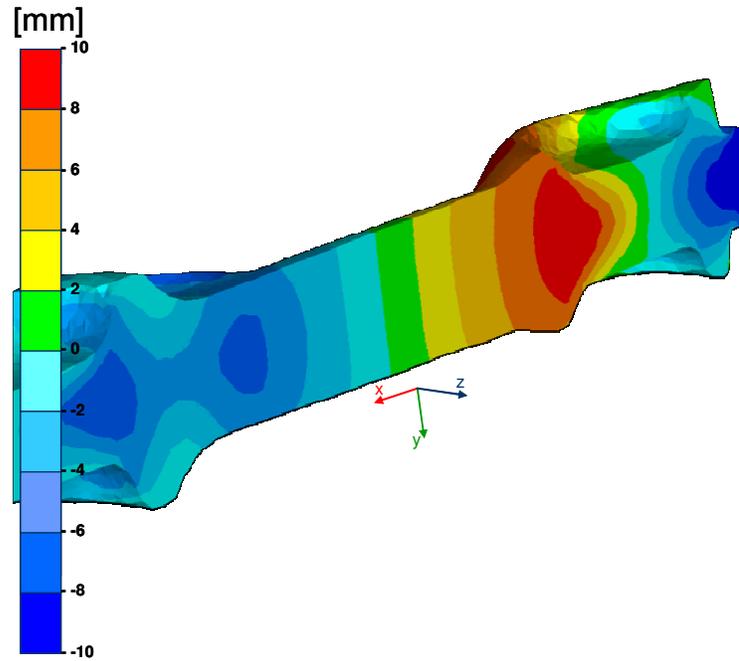
**Figura 3.9:** Esquema de recalque sobre a haste do tarugo durante o forjamento, início do forjamento.



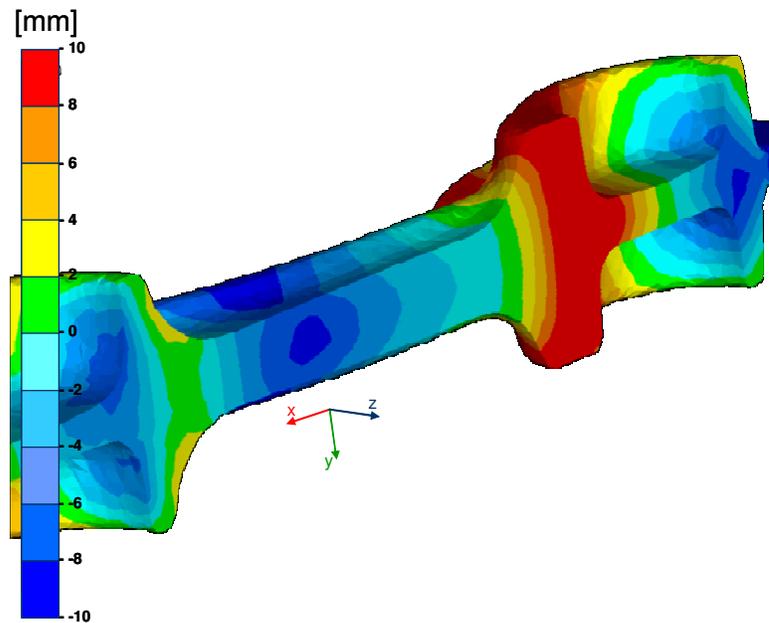
**Figura 3.10:** Esquema de recalque sobre a haste do tarugo durante o forjamento, momento em que as gravuras das matrizes tocam a alma da geratriz.

Com este fato em mente, deve-se calcular o diâmetro da haste quando esta começa seu processo de forjamento entrando em contato com as matrizes superior e inferior e, a partir deste ponto, assumir um escoamento plano, uma vez que as cabeças continuam exercendo uma força radial que irá se contrapor à força exercida pela haste.

Por meio de simulação numérica do forjamento atual da biela automotiva feita no software FORGE 2007, pode-se notar na Figura 3.11 o deslocamento de material das extremidades para o centro no sentido do eixo X, de forma que é possível perceber um recalque na haste no momento em que a gravura da alma toca a haste da geratriz, também mostrado anteriormente na Figura 3.10. Nota-se que o lado direito sofre deslocamento positivo no sentido do eixo X, enquanto o lado esquerdo sofre um deslocamento negativo, sendo que o centro da biela (em verde claro), não sofre deslocamento algum.



**Figura 3.11:** Deslocamento de material no eixo X para o centro da haste no momento do toque com a gravura da alma gerando recalque.



**Figura 3.12:** Deslocamento de material no eixo X no final do processo.

Com uma análise do diâmetro da seção transversal na região central no momento em que as superfícies das matrizes superior e inferior tocam a geratriz na região da haste também representado pelas Figura 3.10 e Figura 3.11, obteve-se um diâmetro igual a 29,6 milímetros no simulador, logo um recalque de 0,6 milímetros ou 2,1% no diâmetro. Apesar de uma baixa porcentagem no aumento do diâmetro, pode-se verificar mais precisamente no Anexo F sua importância, onde se nota que uma leve variação no diâmetro da geratriz influencia de forma significativa o desgaste presente nas matrizes e a força de carregamento necessária para forjar o material.

A alma da biela também foi seccionada na região da haste, Figura 3.13, para a medição da área desta região,  $A_t$ , com auxílio de um planímetro, Tabela 3.1. A Figura 3.14 mostra uma visão frontal da região da haste da biela com rebarba.



**Figura 3.13:** Esquema ilustrativo da seção da alma de uma biela.



**Figura 3.14:** Secção da alma da biela com rebarba, vista frontal.

Por cálculo do diâmetro equivalente, Equação 3.1, pode-se adquirir um diâmetro equivalente para um processo de escoamento plano.

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_t}{\pi}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

**Tabela 3.1:** Área da seção da biela

<b>Medição</b>	<b>Área da seção [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Diâmetro Equiv. [mm]</b>
<b>1</b>	7,0	29,8
<b>2</b>	7,4	30,7
<b>3</b>	7,1	30,0
<b>4</b>	7,1	30,0
<b>5</b>	7,4	30,7
<b>6</b>	7,2	30,2

Pela Equação 3.1 temos que o diâmetro equivalente da seção é de  $30,3 \pm 0,35$  milímetros. O que evidencia um recalque ainda maior e não esperado após o contato da gravura da matriz com a haste da biela. Para todas as simulações feitas durante este trabalho foi considerado um diâmetro de 29,6 milímetros obtido em um primeiro momento através das simulações.

Feita a análise do diâmetro do tarugo, os parâmetros de forjamento utilizados para o forjamento atual também são de suma importância para uma posterior análise numérica. A Tabela 3.2 mostra todos os parâmetros da prensa e temperaturas utilizados no processo e para a simulação numérica.

**Tabela 3.2:** Parâmetros do processo real.

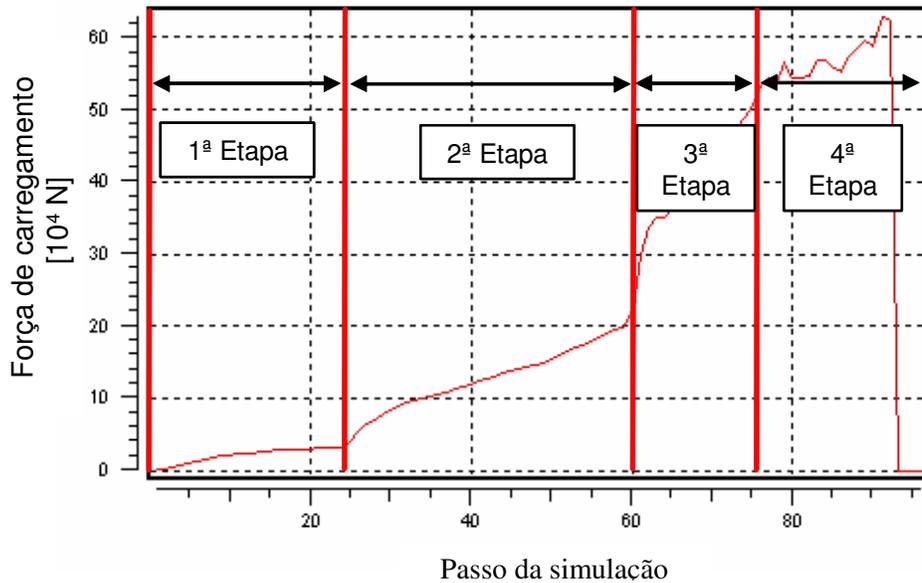
<b>Temperatura do tarugo</b>	1180°C
<b>Temperatura das matrizes</b>	200°C
<b>Tipo de prensa</b>	Prensa Mecânica
<b>RPM</b>	70
<b>R/L</b>	0,265
<b>Raio do Excêntrico</b>	135 mm
<b>Material do Forjado</b>	Aço C70
<b>Espessura de rebarba</b>	3,2 mm

### **3.3. Análise da força de carregamento para o forjamento da seção da alma da biela**

A força de carregamento foi analisada passo a passo com auxílio do software de simulação numérica FORGE 2007 durante o forjamento como mostra a Figura 3.15. Neste modelo com as dimensões atuais da seção da alma da biela verifica-se o processo de escoamento durante o forjamento. Apesar de ser um modelo bidimensional, optou-se por um modelo tridimensional para a minimização de erros provenientes de qualquer software de simulação numérica em relação à perda de volume de malha. Os gráficos são expressos em newtons e o comprimento da seção é de vinte milímetros. O diâmetro da geratriz é o mesmo do projeto da haste do tarugo, ou seja, vinte e nove milímetros, não sendo relevante neste ponto, haver um acréscimo devido ao recalque na haste, pois o padrão dos gráficos é o único interesse no momento. O forjamento também ocorre na ausência de lubrificante.

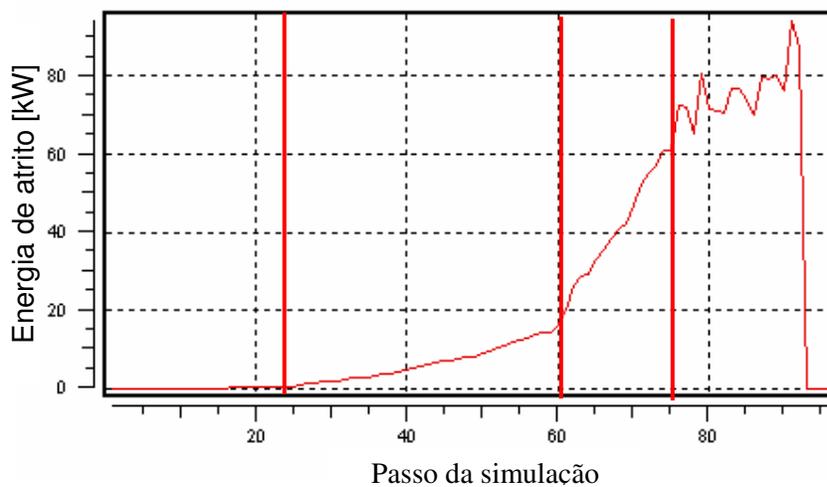
No forjamento de bielas, o modelo demonstrado é na verdade uma etapa na qual os olhais já começaram a serem forjados e a região da alma começa a tocar as matrizes. A partir deste ponto assume-se que não haverá mais processo de recalque e o volume na seção se manterá constante.

O processo de escoamento do material na cavidade da matriz para a haste da biela pode ser dividido em quatro etapas distintas e discutidas separadamente adiante. Para um dado exemplo com certos parâmetros irrelevantes no momento, tem-se o padrão de curva de carregamento demonstrado na Figura 3.15. Deve-se lembrar que cabe aqui discernimento ao se analisar as curvas de carregamento, pois as curvas podem variar quanto ao valor absoluto total de carga e/ou momento em que as etapas se iniciam, sendo o esquema apresentado apenas um método padronizado verificado em todas as simulações aqui feitas neste trabalho.



**Figura 3.15:** Etapas no forjamento de alma de bielas para força de carregamento x passo.

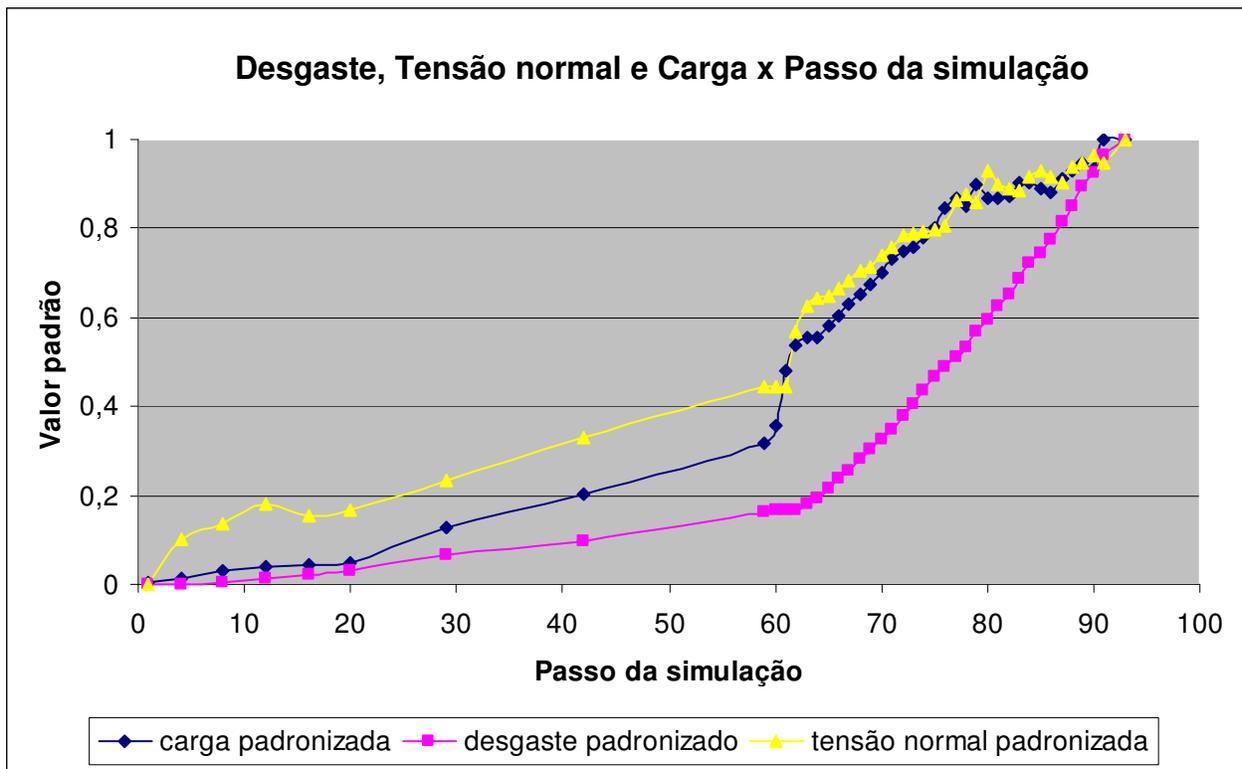
Tal padrão do gráfico demonstrado pode ser explicado também pelo atrito presente no forjamento. A Figura 3.16 a seguir mostra a energia de atrito em kW presente no processo, notando-se nitidamente a presença das quatro etapas, lembrando que as simulações aqui feitas não possuem lubrificante e que sua presença modificaria significativamente os valores finais e provavelmente o padrão da curva.



**Figura 3.16:** Variação da energia de atrito durante o forjamento.

Este gráfico permite uma melhor compreensão das etapas, pois na verdade estas ocorrem devido a diferentes modos de contato da geratriz com as matrizes, fornecendo assim valores distintos para a energia de atrito e conseqüentemente para a força de carregamento.

Outro ponto interessante a ser analisado é a evolução do desgaste abrasivo e da tensão normal para este mesmo processo. O gráfico representado pela Figura 3.17, combina os gráficos da força de carregamento, tensão normal e desgaste abrasivo de forma padronizada.



**Figura 3.17:** Desgaste, tensão normal e carga normalizados x tempo.

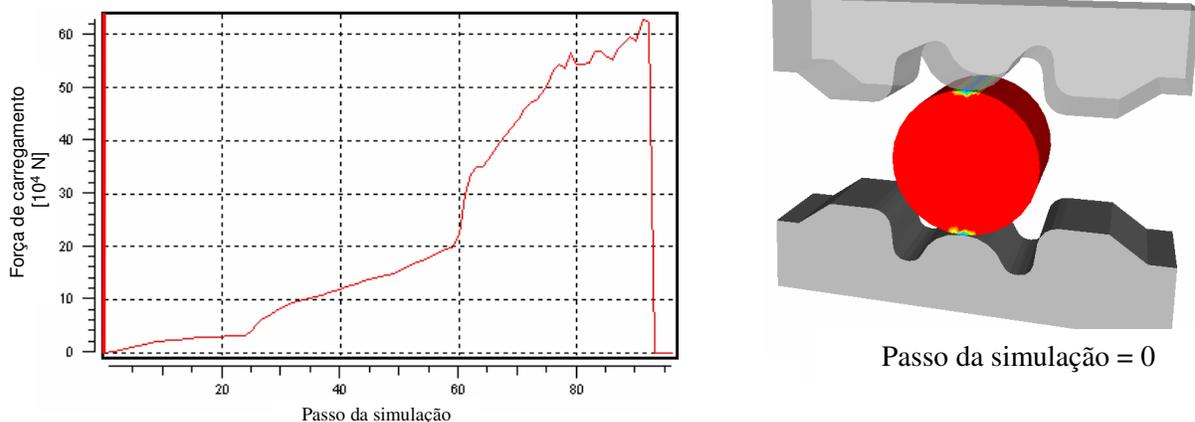
Para a tensão normal o padrão segue de forma clara, igual ao da carga com modificações visíveis para os passos de simulação aproximadamente iguais a 20, 60 e 75. Contudo para o desgaste é possível verificar visivelmente apenas as três primeiras etapas. O início da última etapa, na qual passo igual a 75, não há alteração visível no padrão da curva, como pode ser verificado.

Visivelmente todos os valores começam a crescer de forma muito significativa a partir da terceira etapa (*passo da simulação*  $\approx 60$ ), tornando esta a etapa mais importante do processo e altamente influente nos processo de degradação superficial de matrizes.

Para melhor efeito de visualização as etapas serão discutidas separadamente com intuito de tornar a compreensão mais pictórica. Assim, nas Figuras 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23 os gráficos de carregamento à esquerda com a linha vermelha vertical representam o estágio do forjamento à direita, no qual as regiões do tarugo que estão em contato com as matrizes estão marcadas em azuis.

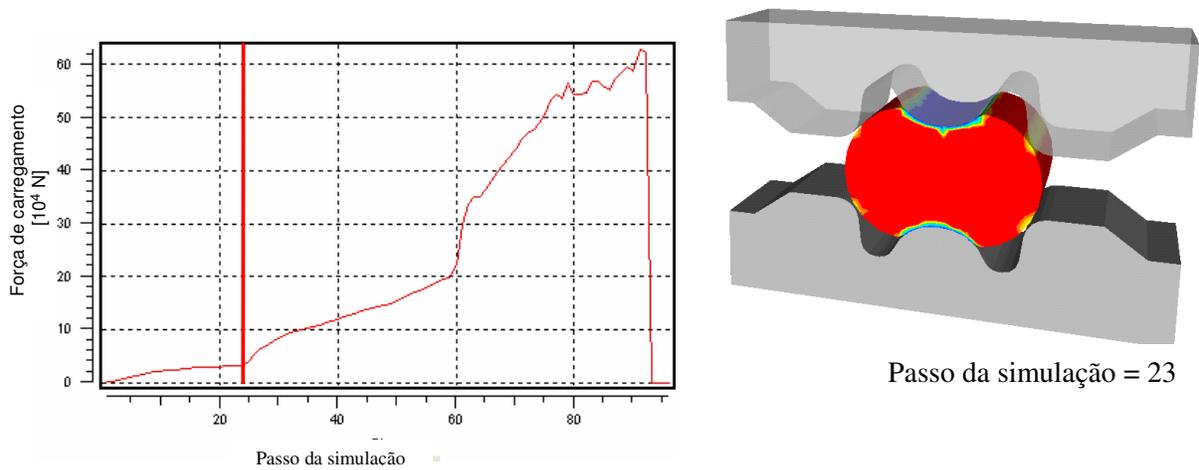
### 3.3.1. Primeira Etapa

A 1ª etapa é um forjamento livre do centro da seção que se estende do início do processo (Figura 3.18) até o momento em que a geratriz toca as partes da matriz na região do raio de boca (Figura 3.19).



**Figura 3.18:** Análise da força de carregamento da alma da biela, começo da primeira etapa.

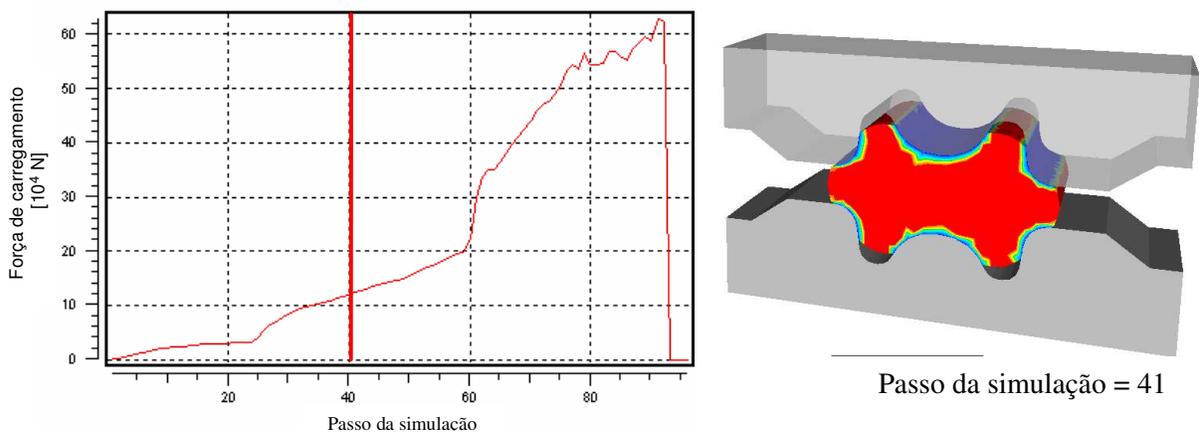
Por se tratar de um forjamento livre e sem restrições para o escoamento de material, a carga será baixa, bem como a sollicitação normal e, por não haver material escoando com alta velocidade tangencial à matriz, o desgaste também é baixo.



**Figura 3.19:** Análise da força de carregamento da alma da biela, fim da primeira etapa e começo da segunda.

### 3.3.2. Segunda Etapa

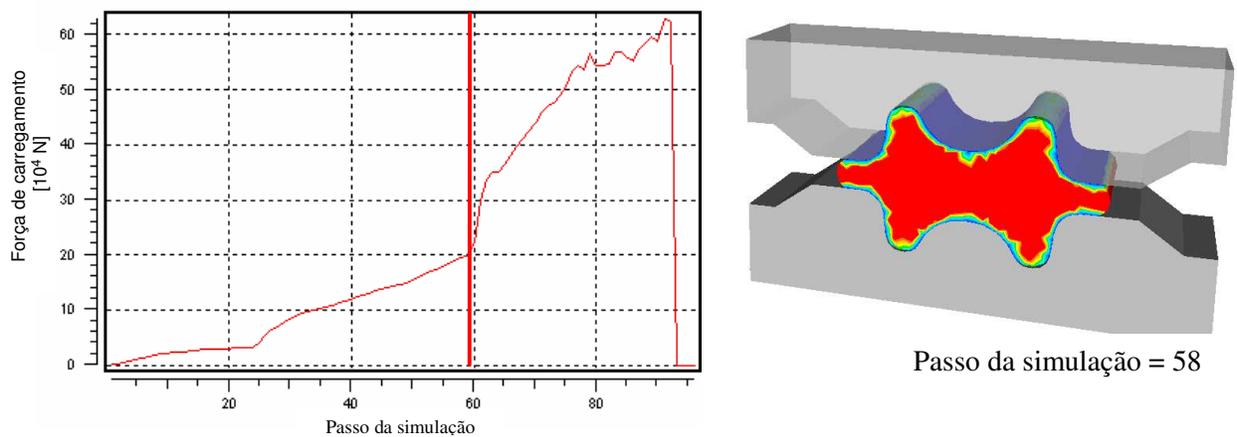
Já a segunda etapa é verificada quando o material toca o raio de transição para o patamar de rebarba, também conhecido como raio de boca (Figura 3.19) preenchendo a cavidade da matriz e também começa levemente a preencher o patamar de rebarba. Neste momento foram acrescentados mais pontos de restrições ao escoamento, a força de carregamento e a tensão normal tendem a aumentar em comparação à etapa anterior. Novamente os valores para o desgaste continuam em um patamar inferior ao total para esta etapa, pois apesar de haver material escoando pela superfície, o valor de uma de suas variáveis, precisamente a tensão normal, continua baixa. A Figura 3.20 ilustra o processo durante a etapa dois.



**Figura 3.20:** Análise da força de carregamento da alma da biela, no meio da segunda etapa.

### 3.3.3. Terceira Etapa

No momento em que a cavidade da matriz é preenchida, Figura 3.21, criam-se zonas mortas de escoamento e a única saída de material é pelo patamar de rebarba criando assim a terceira etapa. Isto faz com que a força cresça rapidamente atingindo valores muito maiores do que aqueles encontrados anteriormente.

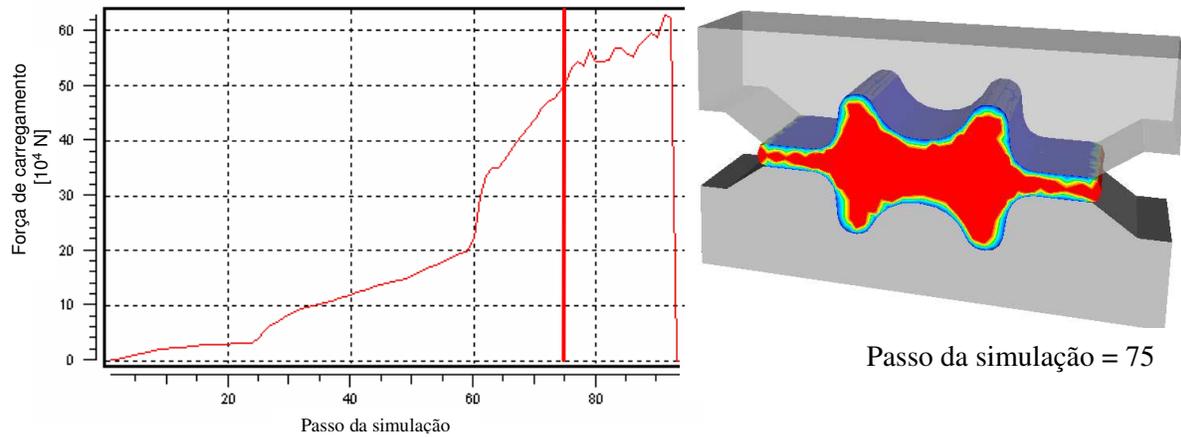


**Figura 3.21:** Análise da força de carregamento da alma da biela, fim da segunda e começo da terceira etapa.

Em apenas dez passos (passos 60 a 70) a força aumenta quase  $25 \cdot 10^4$  N, o que antes demoraria no total sessenta passos de simulação. Para a tensão normal também ocorre um salto no momento em que a cavidade é preenchida e, conseqüentemente, o desgaste aumenta de forma exponencial. Contudo um ponto interessante a ser levantado é que após um rápido aumento momentâneo o desgaste abrasivo cresce de forma quase linear a partir deste ponto até o final do processo como visto na Figura 3.17 e sem modificações de seu padrão com a quarta etapa.

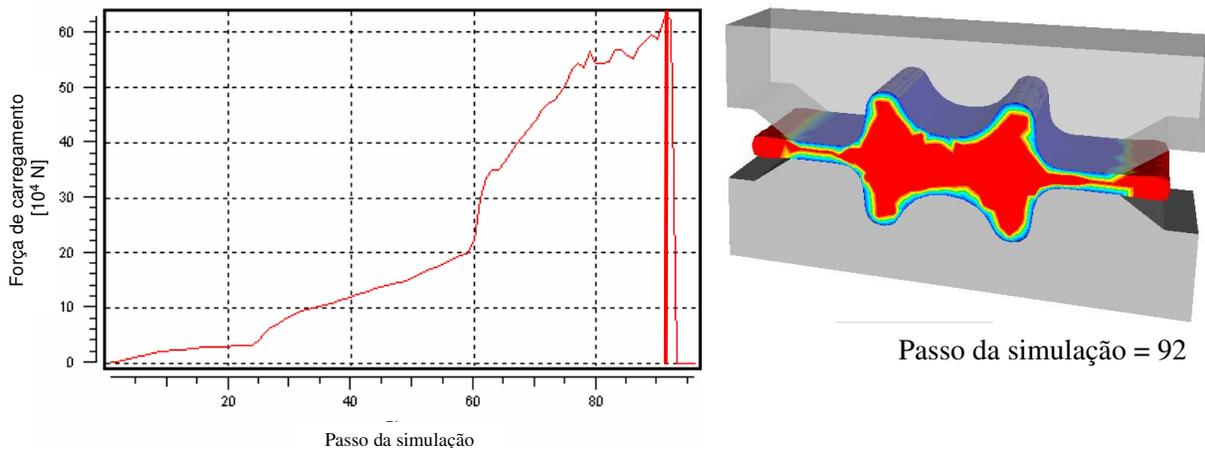
### 3.3.4. Quarta Etapa

A quarta etapa é quando a cavidade já foi preenchida e o material que estava escoando pelo patamar de rebarba encontra alívio de tensões ao sair da região de patamar de rebarba, Figura 3.22, até o estágio final, Figura 3.23.



Passo da simulação = 75

**Figura 3.22:** Análise da força de carregamento da alma da biela, fim da terceira e começo da quarta etapa.



Passo da simulação = 92

**Figura 3.23:** Análise da força de carregamento da alma da biela, fim da quarta etapa e do processo.

Nesta etapa, as tensões normais seguem também um padrão serrilhado como a força de carregamento, visto na Figura 3.17, porém o desgaste continua aumentando com o mesmo coeficiente linear da etapa anterior, pois como visto na seção 2.1.1, o cálculo para o desgaste do simulador depende basicamente da força normal e velocidade de escoamento. Este cálculo é feito para as regiões onde o valor do desgaste é maior, ou seja, na região do patamar de rebarba.

Outra forma de se analisar é pela mecânica dos fluídos, onde dada uma vazão  $Q = v * A$  :

Onde:

$v$  = Velocidade de escoamento

$A$  = Área da seção = *espessura* \* *largura*

Temos que a vazão de entrada  $Q_1$  é sempre igual à vazão de saída  $Q_2$ , assim tem-se que:

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Ou,

$$v_1 * e_1 = v_2 * e_2 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Assim, a velocidade tangencial tende a aumentar de forma proporcional à diminuição da espessura de rebarba, uma vez que a largura da seção é constante e não considerando o efeito de recalque, fazendo com que a espessura influencie de forma significativa o desgaste abrasivo da região e não havendo influência quando o material escoar para fora da bacia.

## Capítulo 4

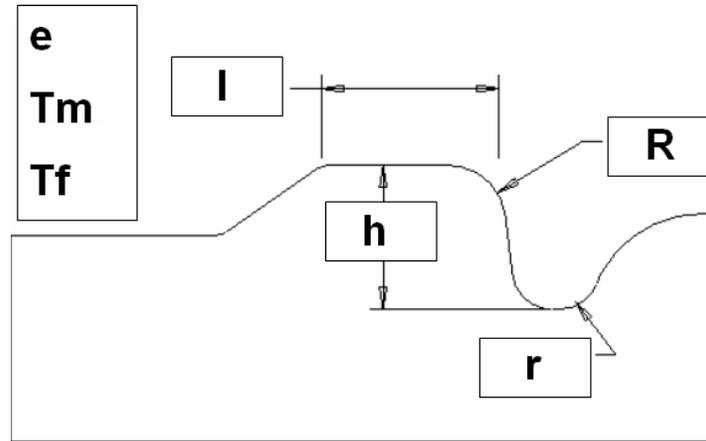
### Metodologia experimental

#### 4.1. Parâmetros a serem estudados

Neste trabalho as seguintes variáveis serão consideradas como significativas para o processo de forjamento da pré-forma e também ilustradas na Figura 4.1 através de um plano simétrico esquerdo da matriz inferior:

- Raio de canto de rebarba (R)
  - Raio superior (r)
  - Espessura de rebarba (fechamento das matrizes) (e)
  - Largura do patamar de rebarba (l)
  - Maior altura da seção transversal (h)
- 
- Temperatura de forjamento ( $T_f$ )
  - Temperatura da matriz ( $T_m$ )

Nota-se cinco variáveis geométricas e duas de temperaturas relacionadas ao objetivo deste estudo. Aqui não será considerada a lubrificação, mesmo ela sendo um fator muito importante para o desgaste de matrizes, pois devido à complexidade de controle em altas temperaturas, poderá interferir de forma significativa nos resultados finais.



**Figura 4.1:** Esquema dos parâmetros a serem estudados e modificados.

## 4.2. Análise da Razão Flash

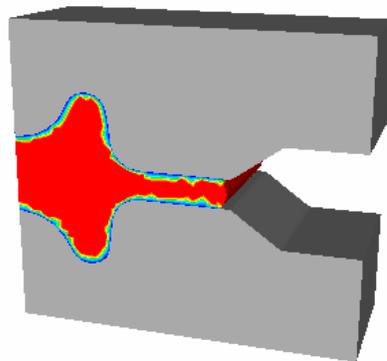
Como para a análise existem muitas variáveis, cogitou-se a possibilidade de transformar a razão flash ( $l/e$ ) em uma única variável, diminuindo desta forma o número de variáveis de sete para seis. Para isso foi feita uma análise no simulador com diferentes espessuras e larguras de patamares mantendo a razão flash constante e igual a quatro, Tabela 4.1, que segundo recomendação para projetos de matrizes este seria um valor intermediário para uma peça com geometria complexa e simples. Além disto, no processo atual esta razão é  $12,7/3,2 = 3,968 \approx 4$ . Aqui foram consideradas as medidas do processo atual com um comprimento de seção de 20 milímetros e meio plano de simetria.

**Tabela 4.1:** Análise da razão flash

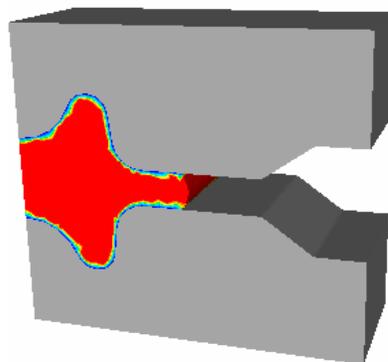
$l$	$e$	Força de Carregamento [ $10^4$ N]	Força Normal [MPa]	Desgaste [MPa*mm]
7,8	1,2	21,7	-675,868	3779,91
8,8	2,2	24,0	-627,462	3560,01
10,8	2,7	24,5	-613,688	3092,21
12,7	3,2	25,2	-619,308	2518,97
12,8	3,2	25,2	-607,384	2490,31

l	e	Força de Carregamento [ $10^4$ N]	Força Normal [MPa]	Desgaste [MPa*mm]
14,8	3,7	26,1	-569,147	1909,12
16,8	4,2	23,3	-543,835	1258,32
20,8	5,2	13,7	-392,621	423,464

Nas duas últimas análises (2 últimas linhas da Tabela 4.1) não houve saída de rebarba durante o fechamento das matrizes, Figura 4.2 e Figura 4.3, fazendo com que conseqüentemente houvesse uma diminuição considerável da força de carregamento e desgaste. Para todos os casos, houve preenchimento total de cavidade.



**Figura 4.2:** Largura de rebarba = 16,8 mm e espessura de rebarba = 4,2 mm.



**Figura 4.3:** Largura de rebarba = 20,8 mm e espessura de rebarba = 5,2 mm.

Com uma variação de 62,5% na espessura para cima ( $e = 5,2\text{mm}$ ) do zero ( $e = 3,2\text{mm}$ ) e para baixo ( $e = 1,2\text{mm}$ ), houve uma variação máxima de aproximadamente 54% na força de carregamento, 83% no desgaste e 64% na tensão normal. Assim optou-se por não fazer a razão flash como uma única variável, mantendo-se então as sete variáveis iniciais neste trabalho.

## 4.3. Procedimento de Análise dos Resultados

### 4.3.1. Experimento Fatorial $2^k$

Os delineamentos fatoriais  $2^k$  permitem a avaliação em separado dos efeitos individuais e dos efeitos de interação dos fatores num experimento no qual todos os fatores variam simultaneamente.

Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é a pesquisa dos parâmetros que influem no processo de desgaste, optou-se por um delineamento de experimento fatorial de dois níveis para simplificação do processo.

Neste trabalho, como se tem sete variáveis sob controle, ter-se-á um total de  $2^7 = 128$  simulações.

Apesar de não haver necessidade de uma análise completa de todas as combinações possíveis, ou seja, as 128 simulações, para um nível confiável de significância, o fatorial completo foi utilizado para não haverem dúvidas quanto aos parâmetros mais influentes ao processo.

Outros delineamentos de experimentos podem ser utilizados para se analisar a variação dos fatores em diversos níveis, contudo o simples acréscimo de um nível ao delineamento experimental  $2^k$ , faria com que o novo experimento tivesse  $3^k$ , logo  $3^7 = 2187$  simulações, o que tornaria o experimento inviável. Contudo a adoção de um ponto central (“*center point*”) faz com que o experimento possa ser validado fazendo uma verificação da curvatura entre os dois níveis dos fatores no experimento  $2^k$ .

### **4.3.2. Efeitos Principais e Interações**

Para este trabalho de  $2^7$ , tem-se: sete combinações de primeira ordem, vinte e uma de segunda, trinta e cinco de terceira, trinta e cinco de quarta, vinte e uma de quinta, sete de sexta e por fim uma de sétima ordem.

### **4.3.3. Ponto central (“Center Point”)**

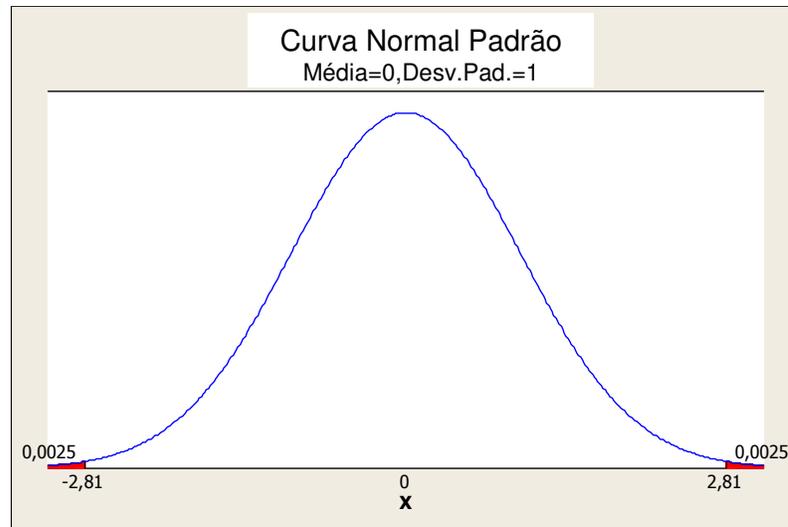
O Ponto Central (PC) é um ponto fixado no zero para ajustar o gráfico de modo a avaliar a curvatura do teste. Caso não haja curvatura no teste, o PC estará sob a reta do gráfico, fazendo com que o comportamento das variáveis seja linear. Caso fique fora, o teste deve ser reavaliado e mais níveis devem ser acrescentados.

### **4.3.4. Gráficos de análise**

Para a elaboração dos gráficos de Probabilidade Normal e Pareto é definido o grau de significância ( $\alpha$ ), ou P-Valor. Para os ensaios foi utilizado um grau de significância de 0,5% ou 0,005.

Ou seja, para uma distribuição normal, apenas 0,5% dos resultados serão considerados significantes para o processo. Tornando esta análise em uma forma mais pictórica, mostrada na Figura 4.4 pode-se afirmar que para uma série de fatores, aqueles que se encontram nas caudas de uma curva normal padrão [9], neste caso nas regiões de 0,25% em cada um dos lados da curva simétrica, são considerados como significantes para o processo. O restante, 99,5% se encontram na região central da Curva Normal Padrão e não são significantes para o processo de análise dos parâmetros importantes no caso estudado.

Os resultados foram analisados por gráficos de Pareto, Efeitos Principais, de contorno e curva da probabilidade normal dos efeitos.



**Figura 4.4:** Curva de distribuição normal padrão com  $\alpha=0,5\%$ .

No gráfico de Pareto, todos os efeitos são analisados e apenas os que ultrapassam a linha vermelha vertical, a qual é dada pelo nível de significância, são significantes para o processo.

Na curva de probabilidade normal todos os efeitos são inseridos, criando uma tendência em linha reta ou dentro de uma curva normal. Quanto mais distantes os pontos estiverem da reta, mais distantes estarão do centro da Curva Normal Padrão localizando-se na região das caudas.

Em outras palavras pode-se dizer que basicamente o gráfico de Pareto e a curva de probabilidade normal podem ser tidos como equivalentes, dependendo muito da preferência do usuário e facilidade individual de visualização das significâncias do processo.

Em Efeitos Principais, uma reta é traçada de modo a ilustrar os efeitos dos parâmetros de forma independente, quanto maior a inclinação desta maior é o nível de significância. Neste último é inserido um Ponto Central para verificar a curva da reta validando o delineamento 2k. Os efeitos principais só podem ser analisados se a significância dos parâmetros for de primeira ordem. Caso houver interações de segunda ordem como significativa ao processo, ou seja, ultrapassarem a linha vermelha do gráfico de Pareto, o gráfico de Efeitos Principais, como o próprio nome diz, não pode ser utilizado, devendo-se assim ser construído um gráfico de Interações.

## 4.4. Delineamento Experimental

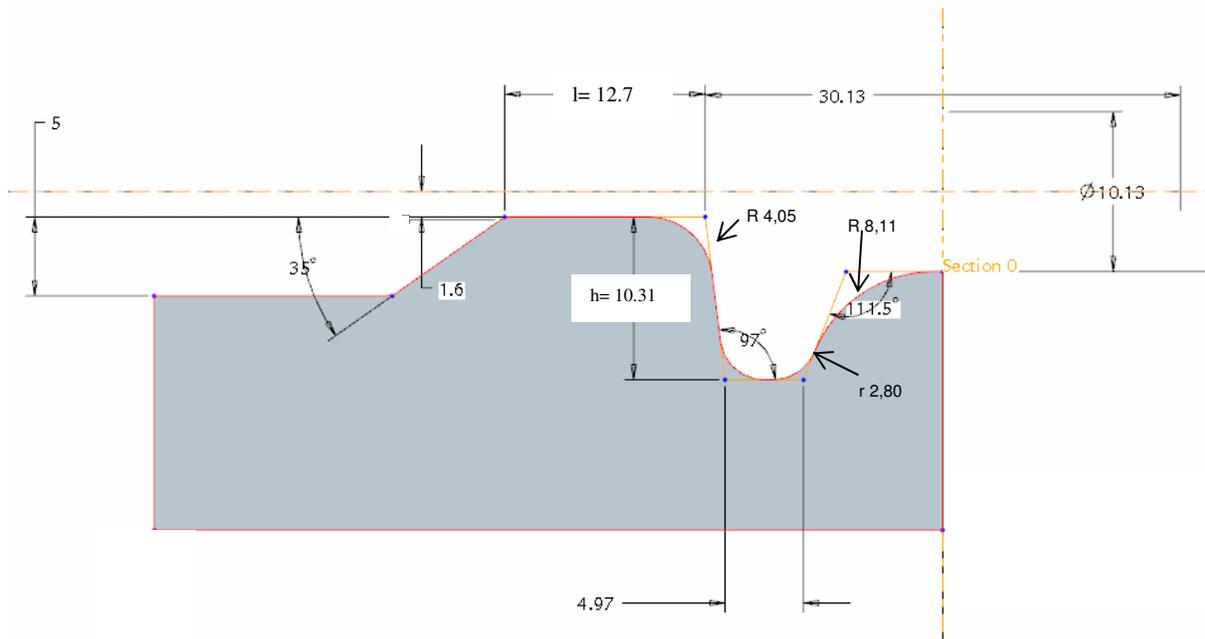
Como o objetivo deste trabalho é analisar os parâmetros de influência para o desgaste de matriz, devem-se variar todas as variáveis na mesma porcentagem de modo a verificar os parâmetros que mais afetam o processo. Para isso será feita uma variação de 10% para todas as variáveis, pois uma variação maior acarretaria em uma temperatura excessiva de forjamento e fugindo do aceitável, além de outras medidas extrapolarem o permitido para a geometria interna de gravura.

É de comum entendimento que algumas variáveis podem variar mais que outras. No entanto todas serão fixadas em torno do zero e variadas na mesma proporção de modo a ressaltar as mais influentes ao processo. A Tabela 4.2 mostra os parâmetros de variação e seus respectivos níveis. As letras ao lado das variáveis fazem referência aos resultados obtidos e mostrados nos ANEXO A1 a A4.

**Tabela 4.2:** Níveis de variação para os fatores.

Fatores			(-)	0	(+)
A	[mm]	R	3,65	4,05	4,46
B	[mm]	r	2,52	2,80	3,08
C	[mm]	e	2,88	3,20	3,52
D	[mm]	l	11,43	12,7	13,97
E	[mm]	h	9,28	10,31	11,34
F	[°C]	T. Forj.	1062	1180	1298
G	[°C]	T. Mat.	180	200	220

A variação de alguns parâmetros partiu do pressuposto que algumas medidas se mantivessem constantes e outras variando. A Figura 4.5 mostra o desenho original da peça (com simetria) e também o ponto de partida para os desenhos das outras matrizes.



**Figura 4.5:** Geometria da matriz da peça na seção da alma, plano simétrico esquerdo da matriz inferior.

Para a variação de  $r$  (raio superior) existe um limite no qual não haverá interpolação de raios fazendo com que houvesse um ângulo pronunciado entre os mesmos gerando uma ponta. Para a variação de 10% não há alteração na forma básica da geometria.

Os ângulos de  $97^\circ$  e  $111,5^\circ$ , o comprimento do patamar central onde o raio de 8,11 milímetros é localizado e a medida de 30,13 milímetros não foram alteradas e, portanto mantidas constantes. Apenas a medida de 4,97 milímetros foi variada e logo foi tida como uma medida flutuante para melhor ajustar as diferentes alturas para as simulações. O comprimento desta seção é de vinte milímetros de forma a aumentar o número de elementos, diminuindo erros e, por fim, o elemento de malha possui tamanho máximo de um milímetro.

A partir dos dados obtidos serão construídos os gráficos de Pareto, Probabilidade Normal e Efeitos Principais para o carregamento, tensão normal, desgaste abrasivo e largura total de rebarba, podendo desta forma analisar-se a influência dos parâmetros estudados ao processo como um todo.

## 4.5. Delineamento Experimental (parte 2 – mapeamento do processo)

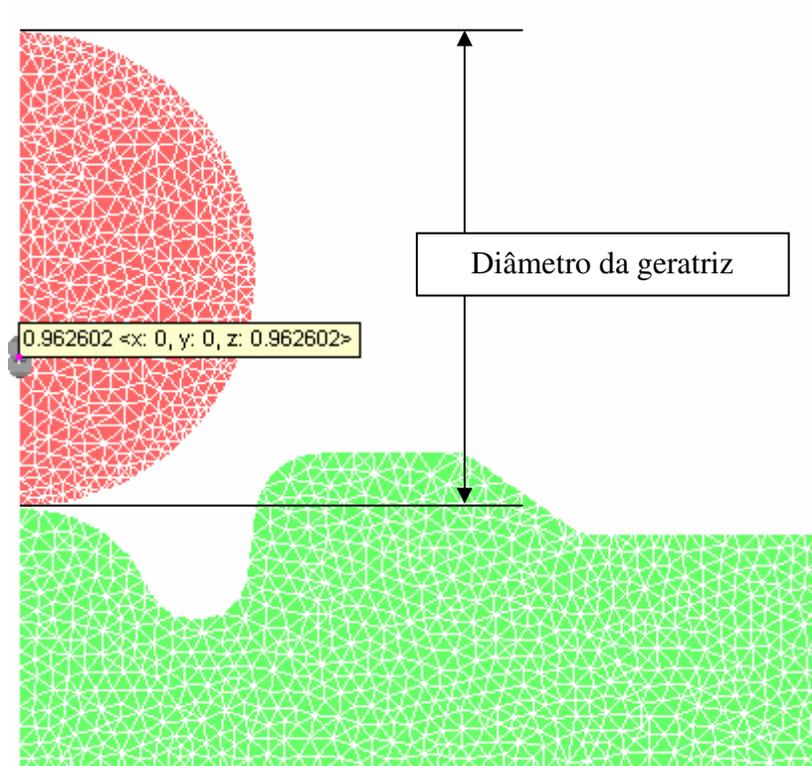
Após a verificação dos efeitos principais no processo, partiu-se para a otimização do seu processo através de um mapa de processo. Para isso foram feitas outras séries de simulações com fatores pareados, ou seja, um conjunto de grupos de dois fatores.

Para o primeiro experimento a largura do patamar de rebarba foi analisada com a espessura (Anexo B). A partir desta análise é possível construir um gráfico de contorno que facilite a visualização dos resultados.

Em seguida o raio de boca com a espessura (Anexo C). A altura da haste com a espessura (Anexo D), temperatura de forjamento e espessura (Anexo E) e por fim o diâmetro da geratriz, Figura 4.6, com a espessura (Anexo F).

Já nesta parte do experimento o comprimento da seção foi de três milímetros de forma a manter a simulação em formato tridimensional, com maior número de elementos porém poupando tempo de processamento com um menor comprimento. O tamanho máximo das malhas manteve-se o mesmo e igual a um milímetro.

A Figura 4.6 mostra a rede de malha na matriz inferior e na geratriz do projeto estudado no plano simétrico direito. Pode-se verificar o comprimento de uma malha no centro com o valor de 0,962602.



**Figura 4.6:** Demonstração de rede de malha para matriz inferior e geratriz.

## Capítulo 5

### Projeto de corpos de prova para ensaio experimental

Apesar de um ensaio experimental não fazer parte do escopo deste trabalho, o presente capítulo apresenta uma forma de elaboração de corpos de prova para o trabalho experimental de ensaio de almas de bielas automotivas.

Para uma análise experimental deve-se elaborar um corpo de prova que retrate o processo de forma real, porém simplificada. Tendo em vista que todas as simulações foram feitas partindo da premissa que o escoamento é plano, devem-se elaborar matrizes para a conformação dos corpos de modo que o escoamento seja, em maior parte, plano. A partir desse ponto elaboraram-se diferentes simulações para a análise do escoamento, tendo como partida uma geratriz cilíndrica de cem milímetros de comprimento, quase que a mesma distância da haste no processo real. As premissas para o projeto destas matrizes são em ordem crescente:

1. Fixação central
2. Escoamento plano
3. Ângulos apropriados para o forjamento e retirada do produto

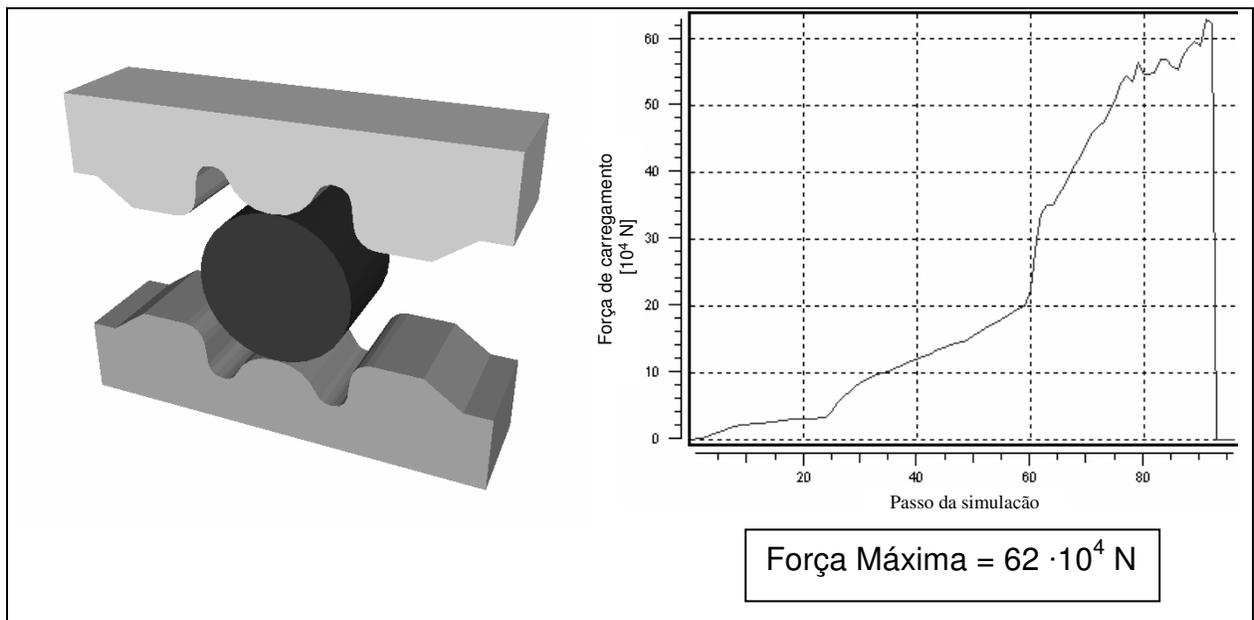
As figuras seguintes mostram a evolução da busca por uma matriz ideal para a conformação dos corpos de prova, podendo assim validar o estudo com as simulações numéricas.

## 5.1. Testes Preliminares

### 5.1.1. Processo atual

Esta primeira simulação é para ter uma base hipotética do processo, sendo que o mesmo modelo foi utilizado para a análise do desgaste nas simulações deste trabalho. Pode-se verificar a elevada força para o forjamento da seção. Isto se deve ao fato do aumento significativo no momento de preenchimento da matriz e saída da rebarba pelo patamar. A força máxima foi de  $62 \cdot 10^4$  N como mostra o gráfico.

Contundo não condiz com um processo real, sendo que para um ensaio experimental haveria dificuldade de posicionamento e grande parte do material escoaria pelas laterais das matrizes, formando um escoamento quase radial.



**Figura 5.1:** Projeto de corpos de prova, processo atual.

### 5.1.1. Matriz com calços redondos e simétricos

Uma primeira opção foi a mostrada na Figura 5.2, em que a preocupação inicial foi o posicionamento do tarugo na matriz de modo que a haste e região de interesse permanecessem centralizadas e encostadas nas gravuras da seção da alma das matrizes superior e inferior. A força mostrada no gráfico representa a força necessária para forjar o corpo de prova. As dimensões do tarugo são de cem milímetros. As cabeças servem simplesmente de apoio e não possuem nenhuma outra finalidade.

Contudo, o escoamento forma uma “barriga”, ou parte de uma circunferência, o que inutilizaria a possibilidade, tendo em vista o objetivo deste estudo. Apenas na parte central haveria uma extensão máxima da rebarba mas não suficiente para retratar um ensaio experimental da haste no processo real.

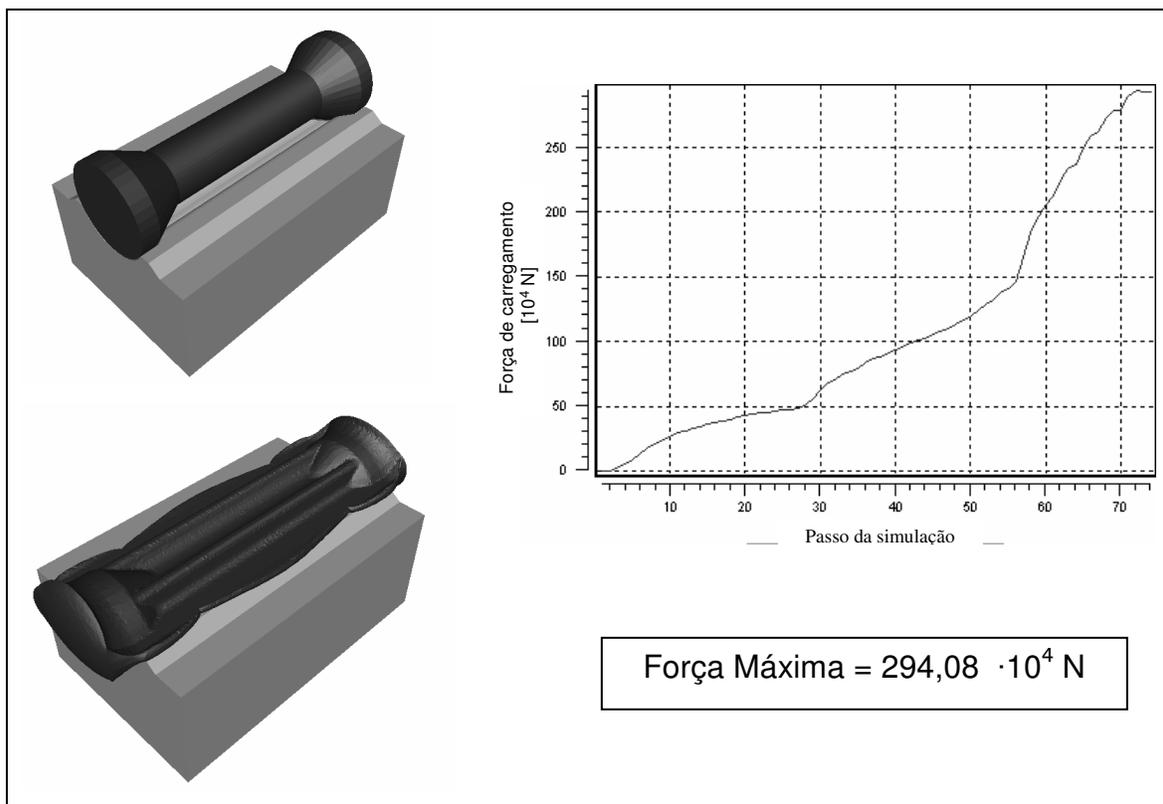


Figura 5.2: Projeto de corpos de prova, calços redondos.

### 5.1.2. Matriz fechada com calço no tarugo

A partir das simulações anteriores cogitou-se a possibilidade de se elaborar uma matriz fechada para evitar o escoamento do material nas direções longitudinais. Através de duas abas o tarugo seria posicionado dentro da matriz e com a matriz superior haveria um cisalhamento das mesmas e seu corte. Contudo poderia haver um travamento da prensa e possível inutilização do ferramental. Verifica-se que a força de carregamento é similar à hipótese anterior,  $295 \cdot 10^4$  N.

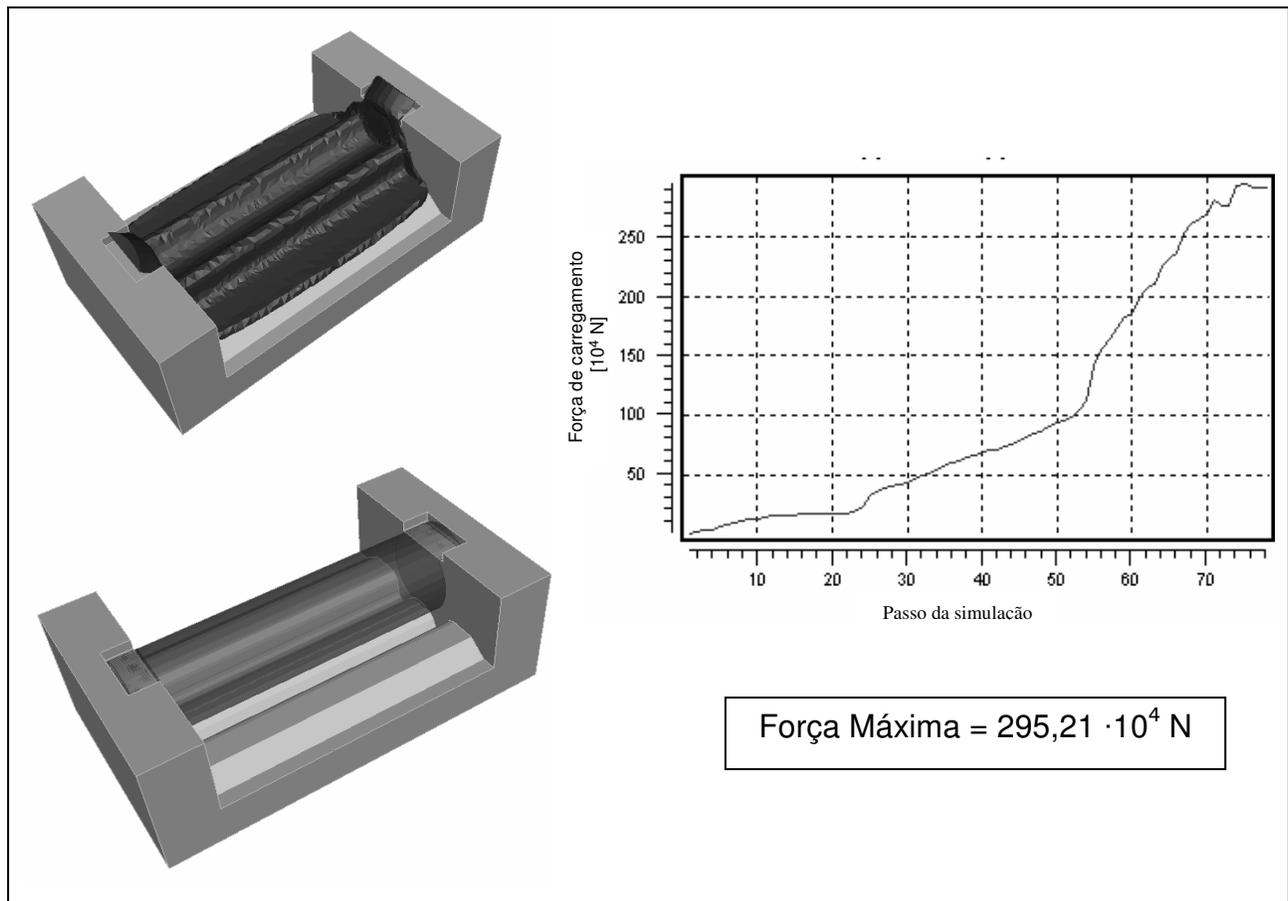


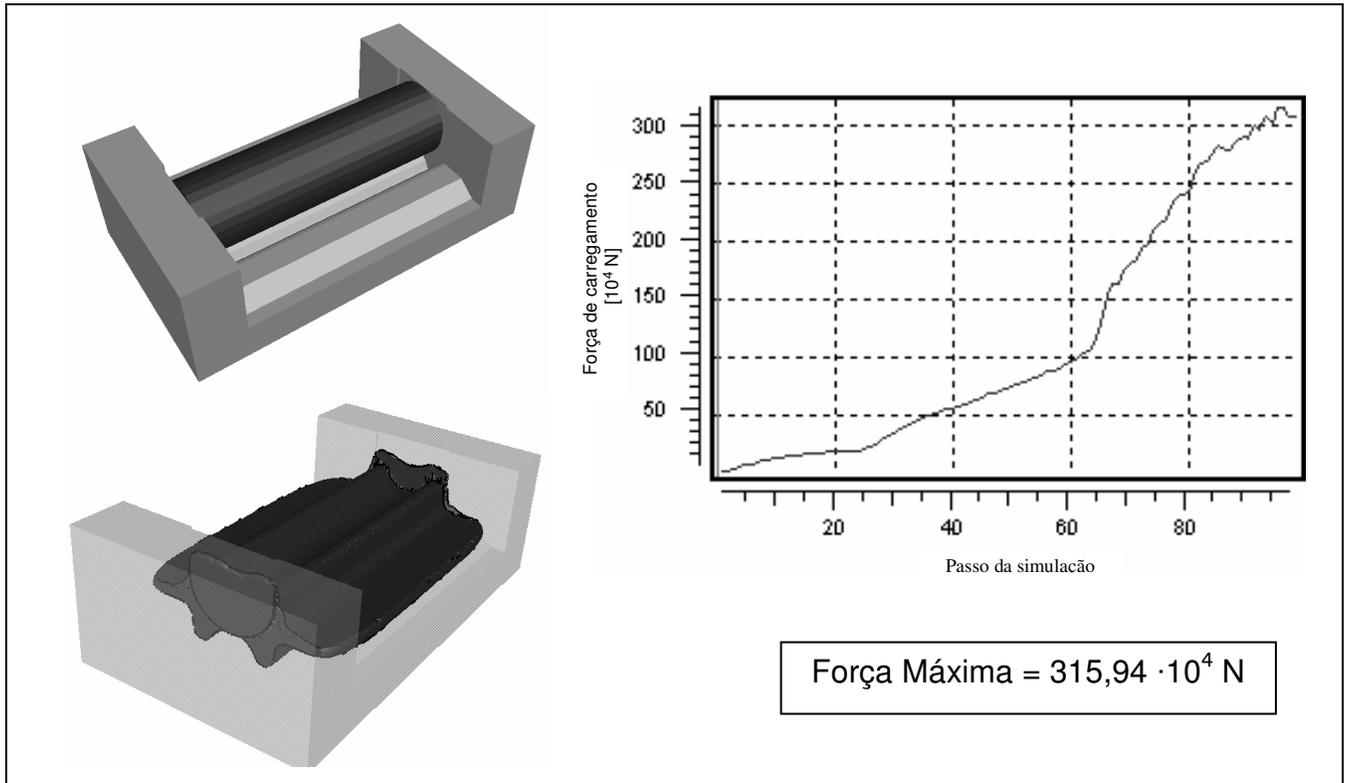
Figura 5.3: Projeto de corpos de prova, matriz fechada com calço.

### 5.1.3. Matriz fechada com ranhura no formato do tarugo

A idéia de uma matriz fechada foi concluída e o sistema de fixação melhorado. Através de um rasgo na matriz inferior, o tarugo pode ser posicionado de forma correta.

No entanto o rasgo deve ser otimizado pois as tensões serão grandes em suas bordas podendo levar a uma falha localizada na ferramenta.

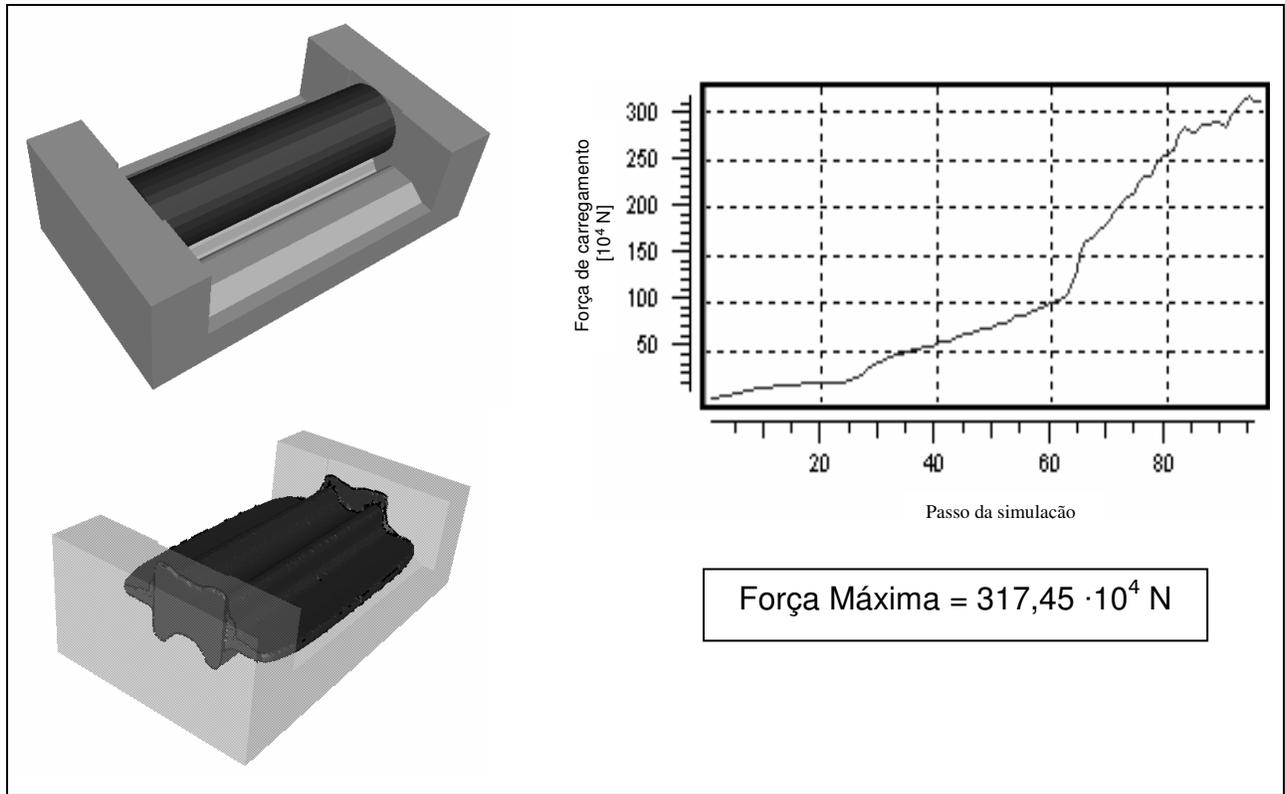
A força continua basicamente seguindo o mesmo patamar,  $315 \cdot 10^4$  N.



**Figura 5.4:** Projeto de corpos de prova, matriz fechada com ranhura redonda.

#### 5.1.4. Matriz fechada com ranhura paralela

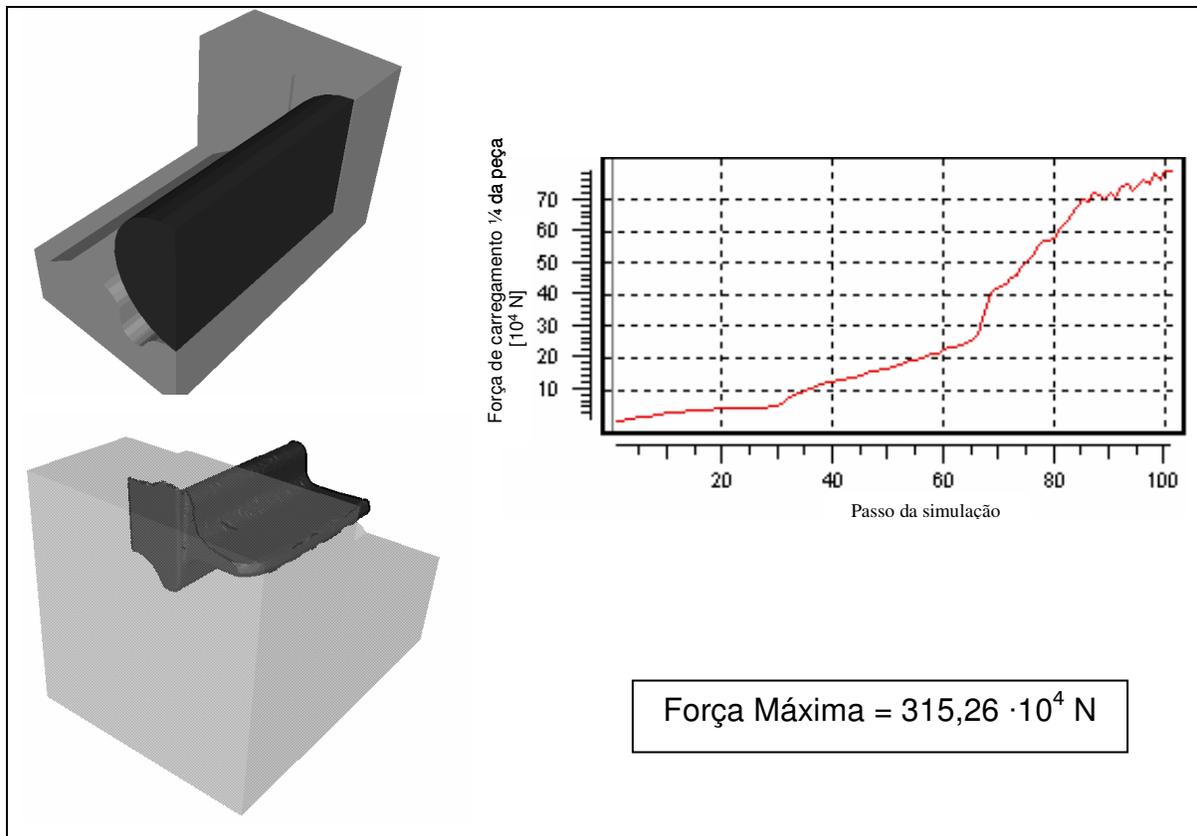
Através de uma ranhura que acompanhe todo o escoamento vertical do material durante o forjamento, as tensões localizadas são reduzidas.



**Figura 5.5:** Projeto de corpos de prova, matriz fechada com ranhura paralela.

### 5.1.5. Matriz fechada com ranhura paralela (simetria)

Com uma melhoria do processo de simulação repetiu-se a mesma simulação anterior mas agora com planos de simetria. O gráfico mostra apenas um quarto da peça e para a força total este resultado deve ser multiplicado por quatro, ou seja,  $315 \cdot 10^4$  N. O resultado difere um pouco da simulação anterior devido às perdas de volume das malhas de elementos finitos durante a simulação, um processo normal em simuladores numéricos e também devido ao maior arredondamento da matriz na região do calço.



**Figura 5.6:** Projeto de corpos de prova, matriz fechada com ranhura paralela (simétrico).

### 5.1.6. Matriz fechada com arredondamentos e ângulo de saída inferior e superior

As matrizes superiores utilizadas anteriormente eram retas e verticais, o que fazia com que o material escoasse de forma constante pelas frestas entre matrizes superior e inferior. Neste momento, a matriz superior foi desenhada em ângulo para diminuir o espaço entre ferramentas, diminuindo assim o escoamento ascendente. Foram feitos também raios de arredondamento em todas as arestas. Por diminuir o espaço de escoamento na região de apoio a força aumentou para  $327 \cdot 10^4$  N.

Um ângulo de saída foi criado na parte vertical do apoio para facilitar a retirada do corpo de prova da ferramenta. O mesmo ângulo foi utilizado para a matriz superior.

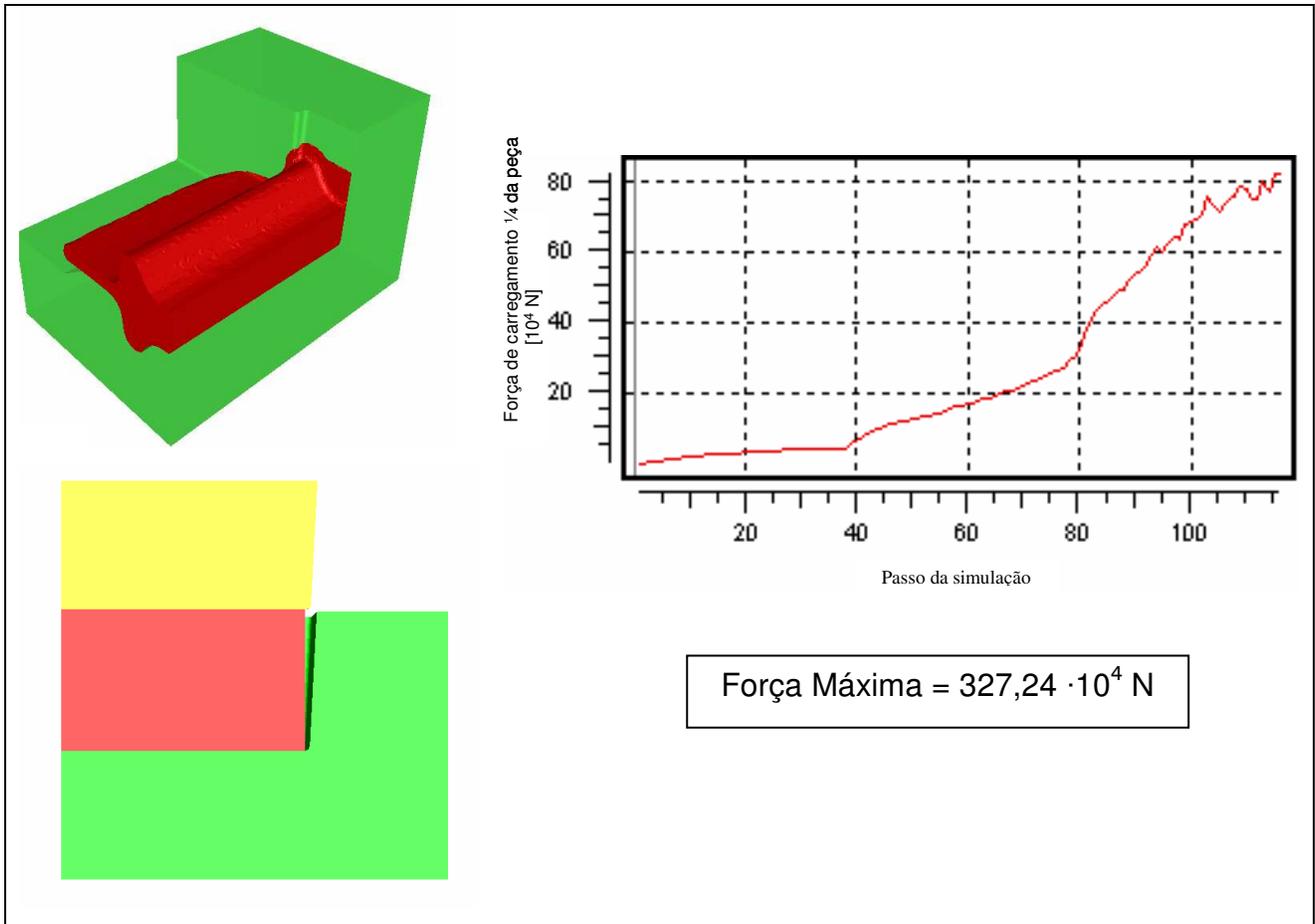
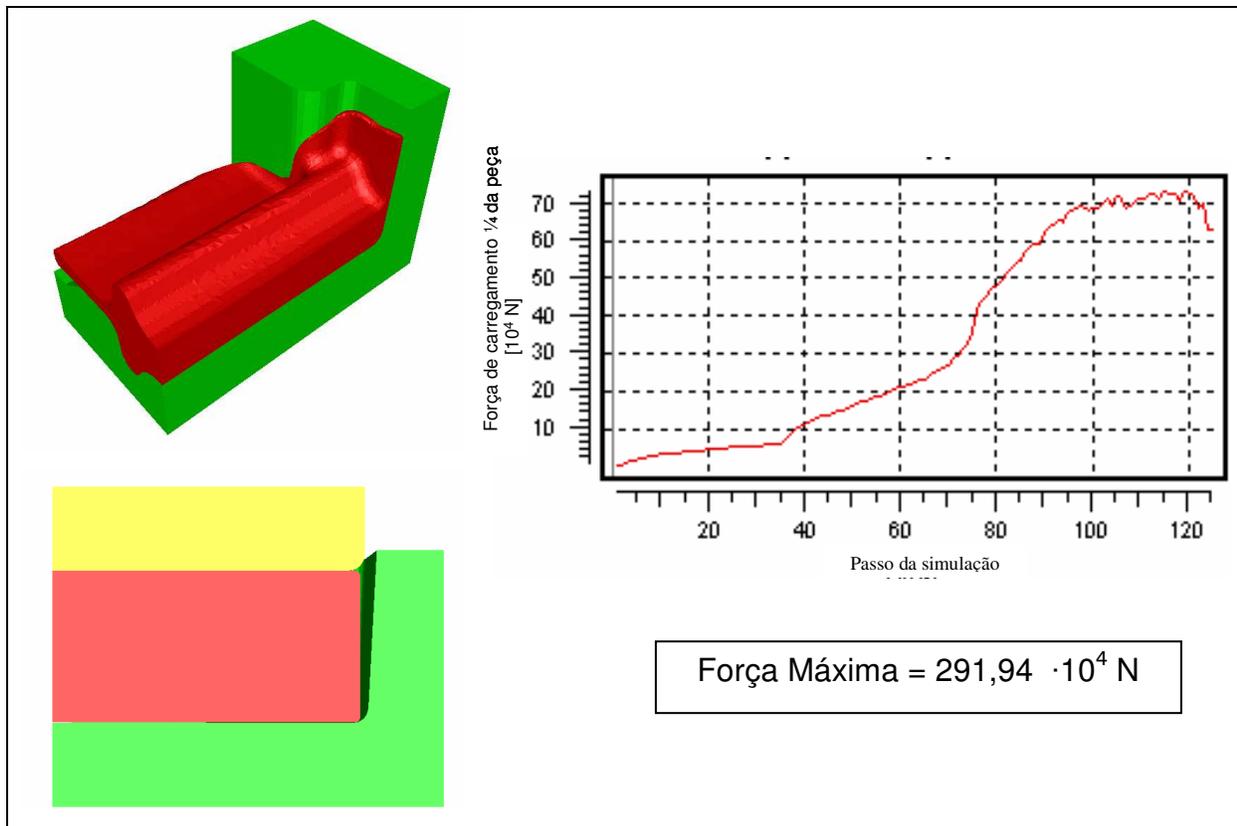


Figura 5.7: Projeto de corpos de prova, ângulos de saída.

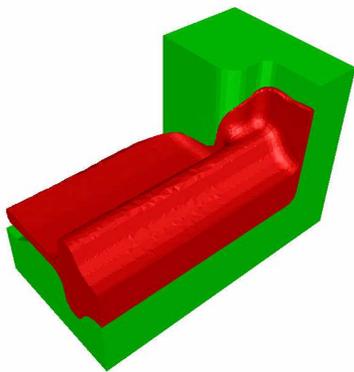
### 5.1.7. Matriz fechada com arredondamentos e ângulo de saída inferior e canto. Rasgo profundo.

Analisando o excesso de área da matriz em contato com o tarugo, é possível notar o surgimento de problemas com a retirada do corpo de prova da ferramenta já analisado anteriormente. Assim, neste momento o rasgo foi otimizado e aumentado. Ângulos de saída foram feitos na parte de contato lateral do tarugo para facilitar ainda mais a sua retirada. Pode-se notar um decréscimo na força de carregamento.

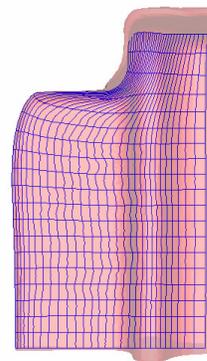


**Figura 5.8:** Projeto de corpos de prova, ângulos de saída e maior rasgo para fixação.

Este processo foi o melhor encontrado dentre todas as possibilidades e pode retratar a hipótese de escoamento plano e viabilidade dos ensaios. A Figura 5.10 confirma a hipótese de um escoamento plano para a peça pela análise de fibramento, onde verificam-se as linhas horizontais sem modificações.

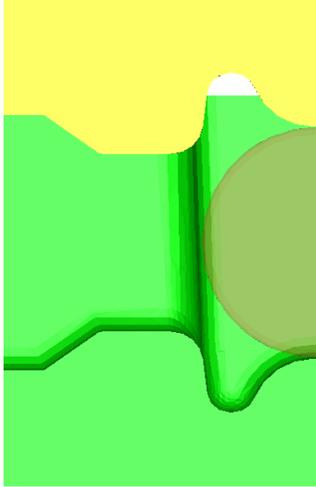


**Figura 5.9:** Geometria final da peça.

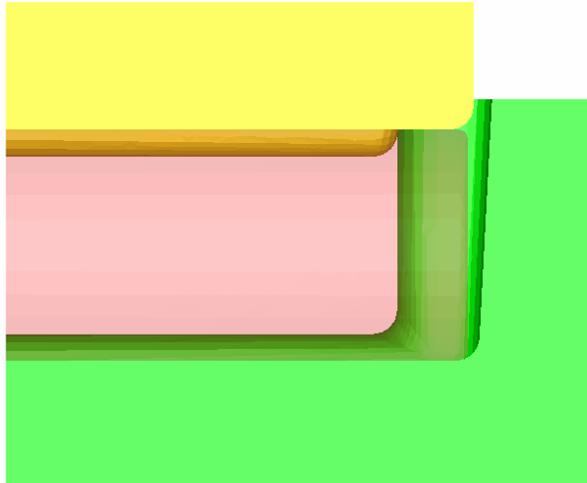


**Figura 5.10:** Fibramento da conformação.

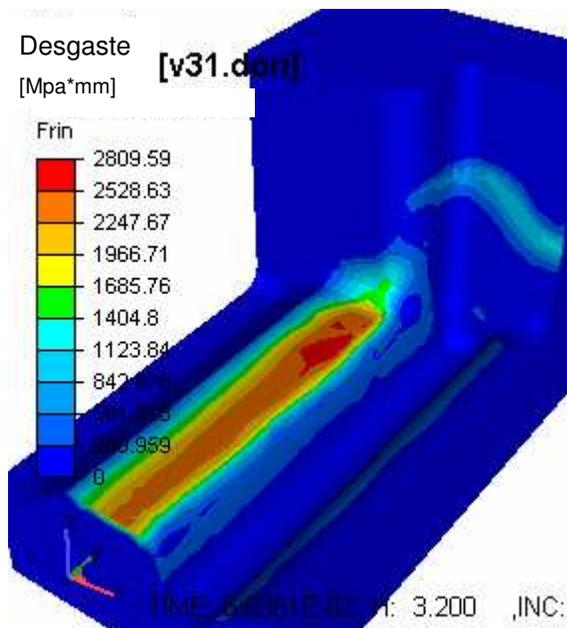
A Figura 5.9 demonstra a geometria final do corpo de prova, enquanto as Figuras 5.11 e 5.12 demonstram a configuração de  $\frac{1}{4}$  das matrizes superior e inferior em uma visão frontal e lateral.



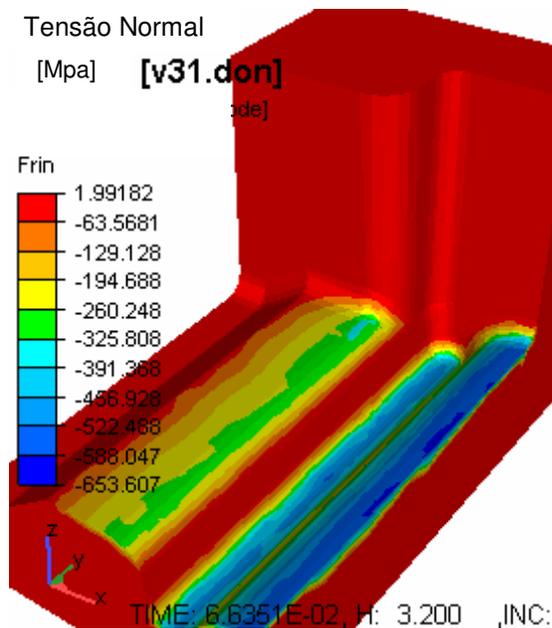
**Figura 5.11:** Vista frontal das matrizes para ensaio de corpos de prova



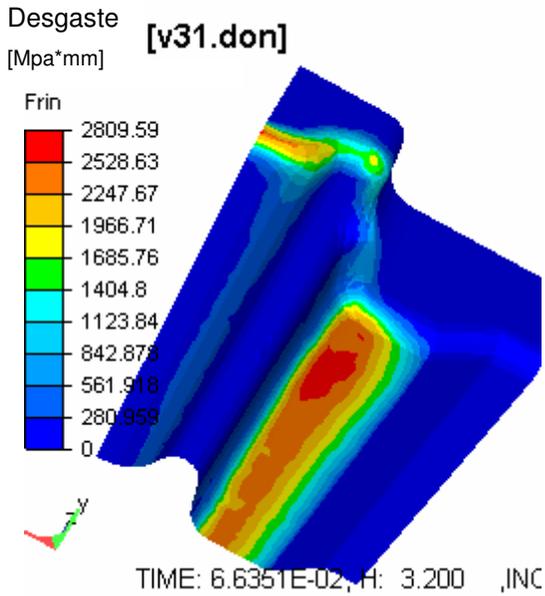
**Figura 5.12:** Vista lateral das matrizes para ensaio de corpos de prova.



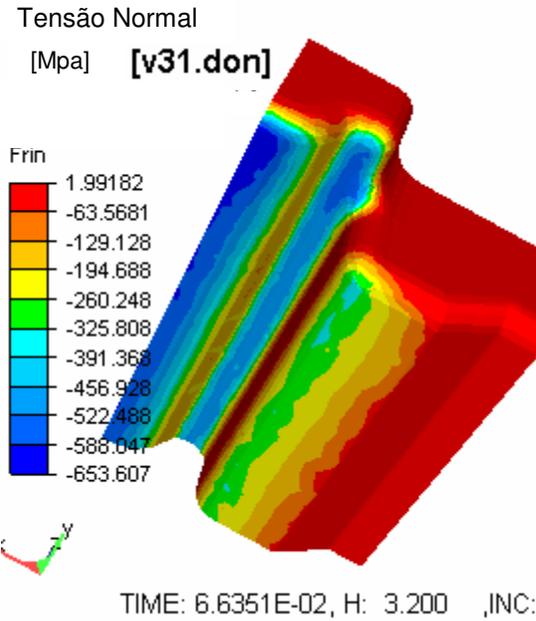
**Figura 5.13:** Localização do desgaste na matriz inferior para corpos de prova



**Figura 5.14:** Localização das tensões normais na matriz inferior para corpos de prova.



**Figura 5.15:** Localização do desgaste na matriz superior para corpos de prova



**Figura 5.16:** Localização das tensões normais na matriz superior para corpos de prova.

As Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 mostram as localizações do desgaste e tensões normais atuantes nas matrizes superior e inferior do modelo, podendo desta forma validar o projeto e confirmar que não há tensões excessivas nas extremidades que podem levar à fratura da matriz.

O desenho das matrizes também pode ser projetado para experiências de desgaste com um alto ciclo de forjamento, pois a maior parte do desgaste encontra-se no patamar de rebarba podendo retratar o modo e o local em que a ferramenta fratura no processo atual da linha de produção de forjamento de biela na região da haste.

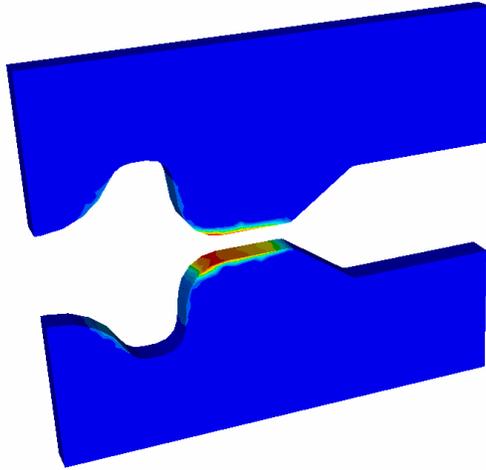
## Capítulo 6

### Resultados

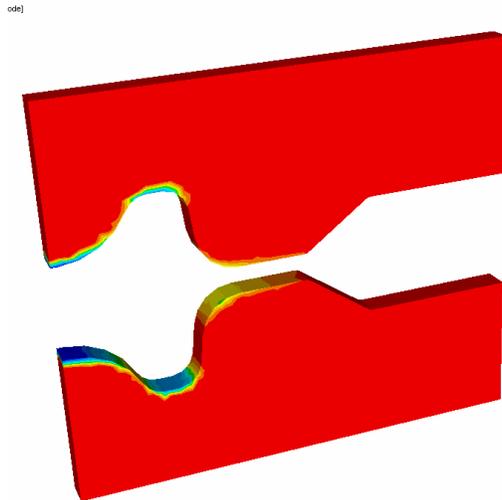
Neste trabalho foram realizadas apenas simulações numéricas com o objetivo de se analisar o desgaste nas matrizes de conformação a quente. Por se tratar de desgaste, um trabalho experimental tornar-se-ia inviável, pois para um dado modelo com certos parâmetros haveria a necessidade de se forjar com as mesmas matrizes centenas ou até mesmo milhares de vezes, como mostra o processo real na indústria, na qual uma mesma matriz é capaz de forjar milhares de peças. Além disto, as matrizes de conformação a quente apresentam uma vida útil com muita variabilidade, não sendo possível especificar um único valor de forjados a partir de uma matriz. Como este trabalho lida com uma série de fatores, como visto no Capítulo 4, com cerca de 128 modelos para a primeira parte e mais 135 para a segunda, não seria possível escrever este trabalho caso fosse feito a partir de ensaios experimentais.

Neste capítulo serão analisados os parâmetros de influência que para tanto foi necessário ter como resposta do software de simulações o desgaste, calculado pelo próprio programa e descrito no Capítulo 2, a tensão normal, que fornecer apenas a tensão normal à superfície da matriz e diretamente relacionada com a deformação plástica, e por fim, a força de carregamento, que é a força necessária para se forjar o material. Deste modo pode-se ter uma visão geral dos principais mecanismos de degradação das ferramentas.

A Figura 6.1 mostra a região onde em todas as simulações ocorre o maior desgaste e a Figura 6.2 mostra a localização das tensões normais.

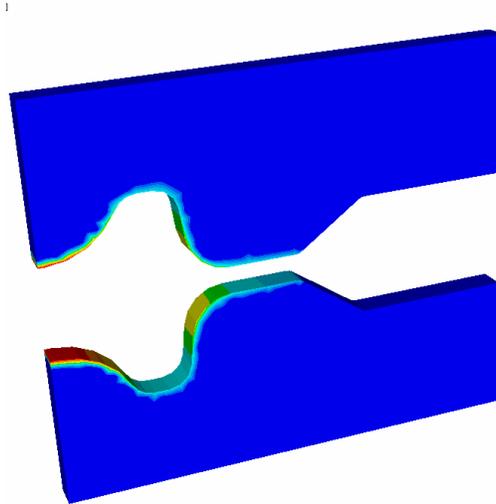


**Figura 6.1:** Localização do desgaste nas matrizes



**Figura 6.2:** Localização das tensões normais nas matrizes.

Através da visualização da área onde o desgaste ocorre e com o acréscimo de tensões normais pode-se concluir que o raio de boca é uma região crítica; pois devido ao elevado tempo de contato da geratriz com a matriz, Figura 6.3, têm-se um aumento da sua temperatura superficial levando assim a uma fadiga térmica que em conjunto com tensões normais elevadas no ponto assim como o desgaste, a região do raio acaba fraturando primeiramente.



**Figura 6.3:** Localização das regiões com maior tempo de contato com tarugo.

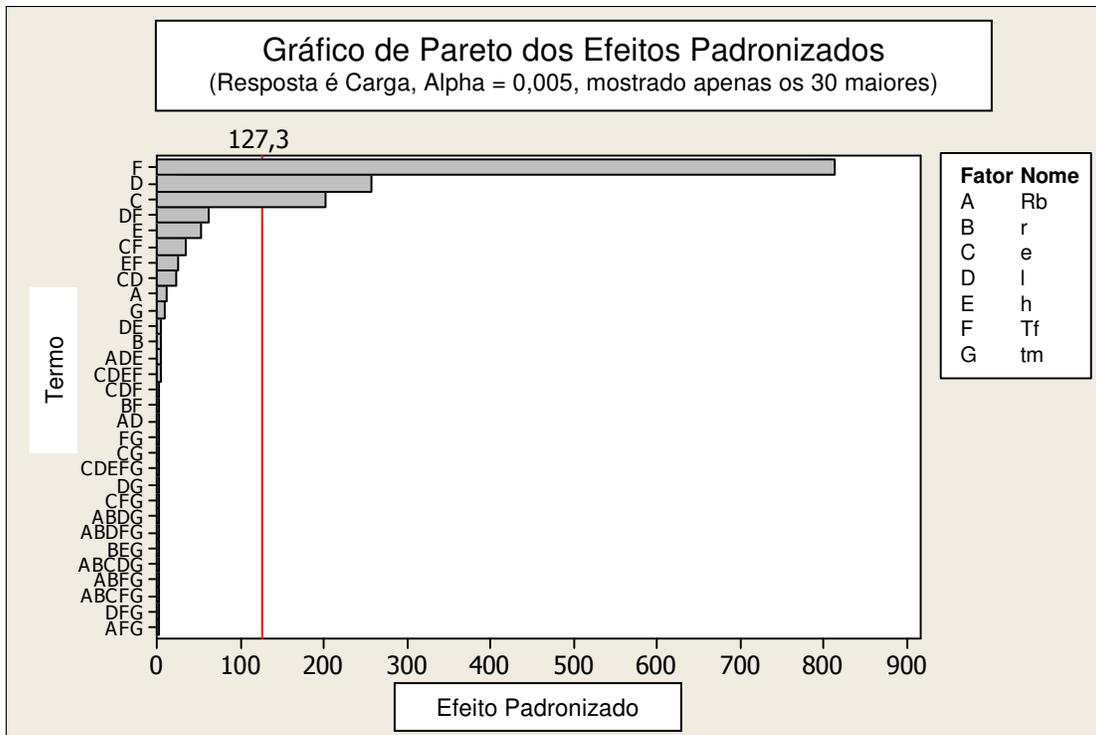
A região central possui elevado tempo de contato bem como tensões normais, por ser uma região com alta taxa de deformação. No entanto não é uma região crítica pois não há quantidade significativa de material escoando em sua superfície, o que faria o desgaste aumentar. Portanto, é uma região com apenas dois dos três elementos principais, fato comprovado por observações experimentais do forjamento de bielas feito em indústrias, no qual em tal região prevalece a fadiga térmica enquanto que no raio de boca o desgaste abrasivo acaba por inutilizar as ferramentas.

## 6.1. Parâmetros influentes no processo

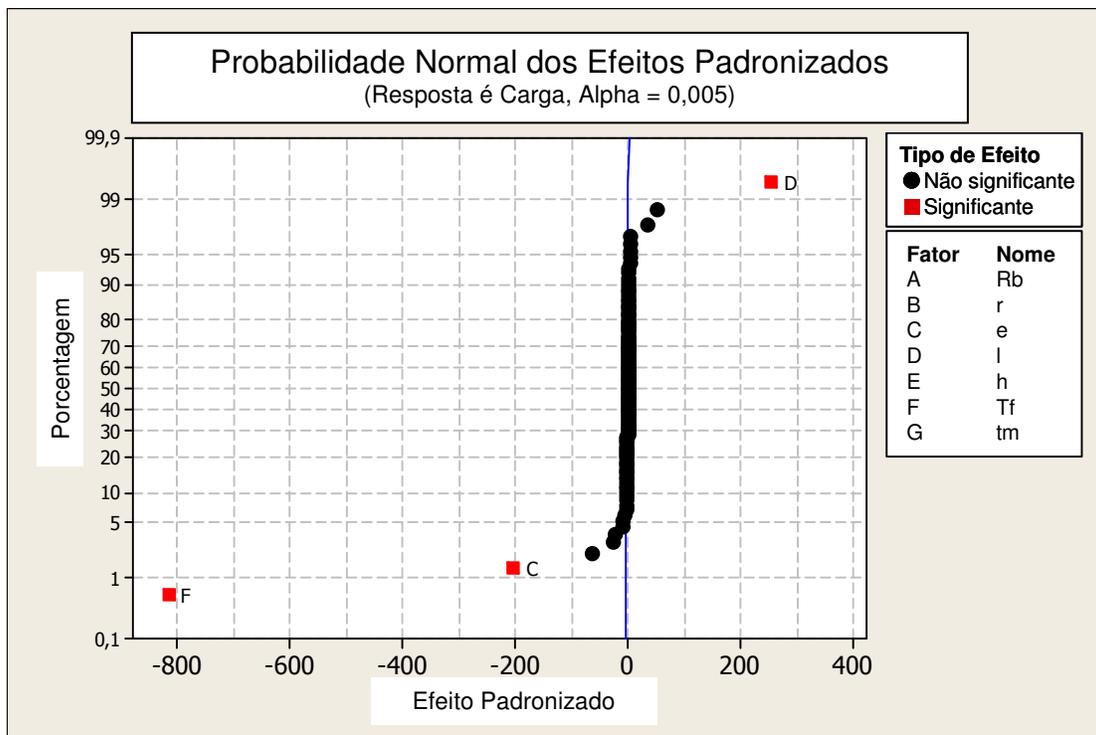
Nesta primeira análise, todos os fatores foram analisados simultaneamente por delineamento fatorial completo 2k. Seus resultados encontram-se nos Anexo A1, A2, A3 e A4 para uma verificação mais criteriosa.

### 6.1.1. Carregamento

Primeiramente são construídos os gráficos de Pareto, Figura 6.4 e Probabilidade Normal, Figura 6.5. Dado o nível de significância ( $\alpha= 0,005$ ), apenas para os parâmetros mais influentes será construído o gráfico de Efeitos Principais.



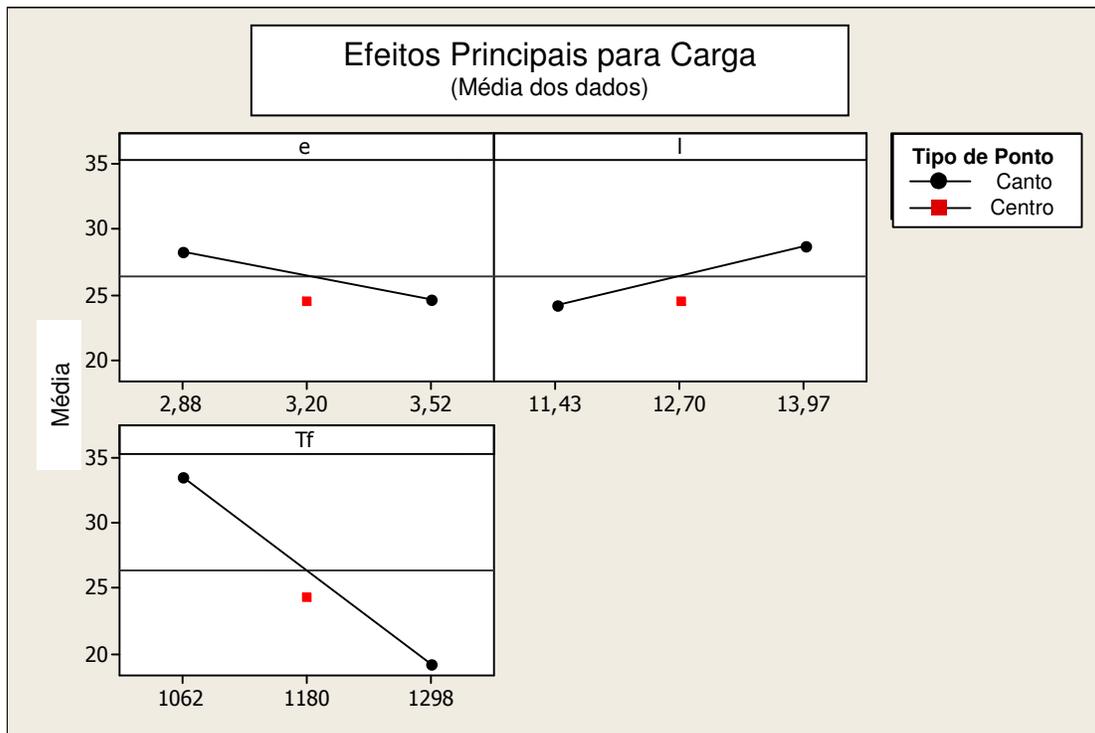
**Figura 6.4:** Gráfico de Pareto, carregamento.



**Figura 6.5:** Curva de probabilidade normal, carregamento.

Pelo gráfico de Pareto nota-se a ordem dos parâmetros que mais influenciam na força de carregamento:

1. Temperatura de Forjamento
2. Largura do patamar de rebarba
3. Espessura



**Figura 6.6:** Curva de Efeitos principais, carregamento.

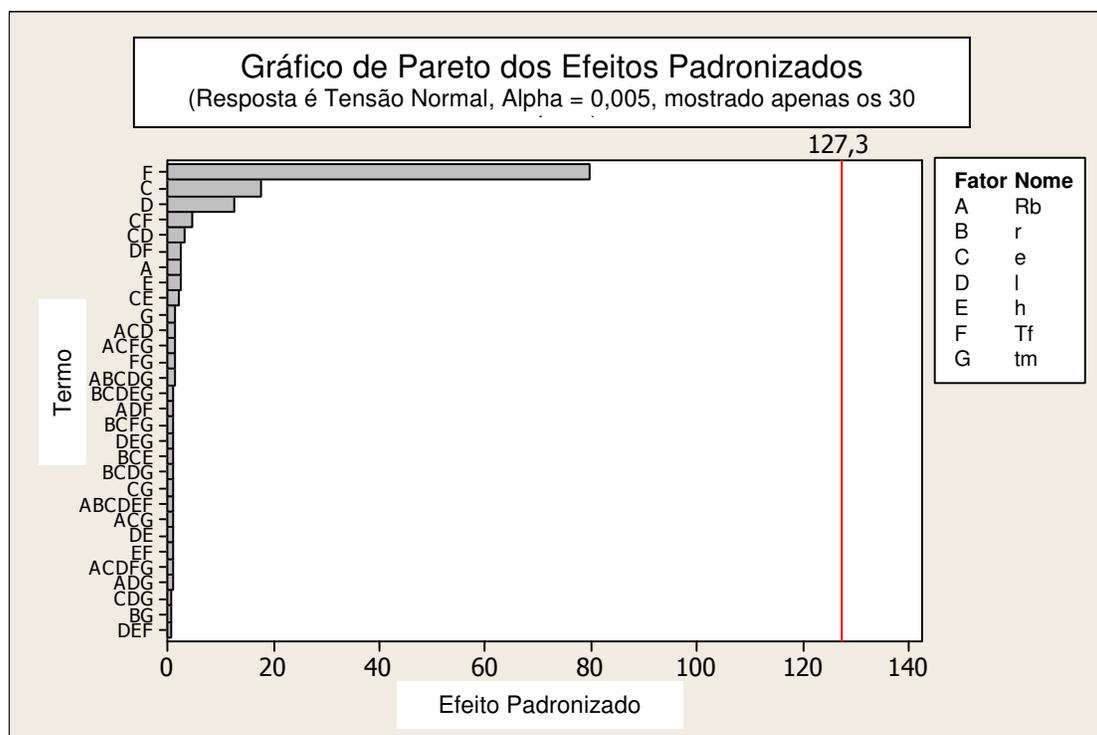
No gráfico de Efeitos principais, Figura 6.6, para o carregamento feito apenas para os parâmetros influentes, espessura (“e”), largura do patamar de rebarba (“l”) e temperatura de forjamento (“Tf”) nota-se que:

- Um aumento da espessura de rebarba resulta em uma menor força de carregamento
- Um aumento da largura do patamar de rebarba resulta em um aumento da carga
- Maiores temperaturas de trabalho diminuem a força de carregamento

Nas ordenadas estão os níveis que foram impostos na análise como descrito pela Tabela 4.2. O ponto central em vermelho (*center point*) encontra-se próximo da curva, portanto todos os parâmetros variam de forma praticamente linear. Através deste ponto pode-se dizer que variando mais níveis dentro do intervalo imposto, o gráfico continuará praticamente o mesmo, portanto não haverá um abaulamento da curva.

### 6.1.2. Tensão normal

Apesar dos parâmetros não se apresentarem como significantes para o processo, devido ao baixíssimo valor do nível de significância imposto neste trabalho, pode-se notar a influência da Temperatura de forjamento, Largura e Espessura de rebarba assim como na análise para o carregamento.

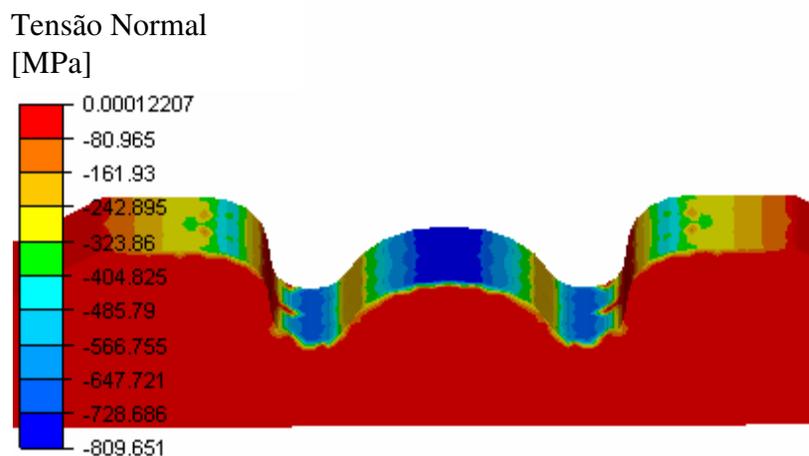


**Figura 6.7:** Gráfico de Pareto, força normal.

A baixa influência dos parâmetros também ocorreu pois o maior valor da tensão normal encontra-se sempre no raio central, Figura 6.8, e em todas as simulações aqui feitas, a medida final na qual ocorre a maior tensão normal depende exclusivamente do grau de conformação (espessura

de rebarba) e conformabilidade (temperatura de forjamento). Portanto todos os dados encontram-se muito próximos não havendo grande variabilidade para o nível de significância de 0,5%. Todas as variáveis estudadas são insignificantes para a tensão normal.

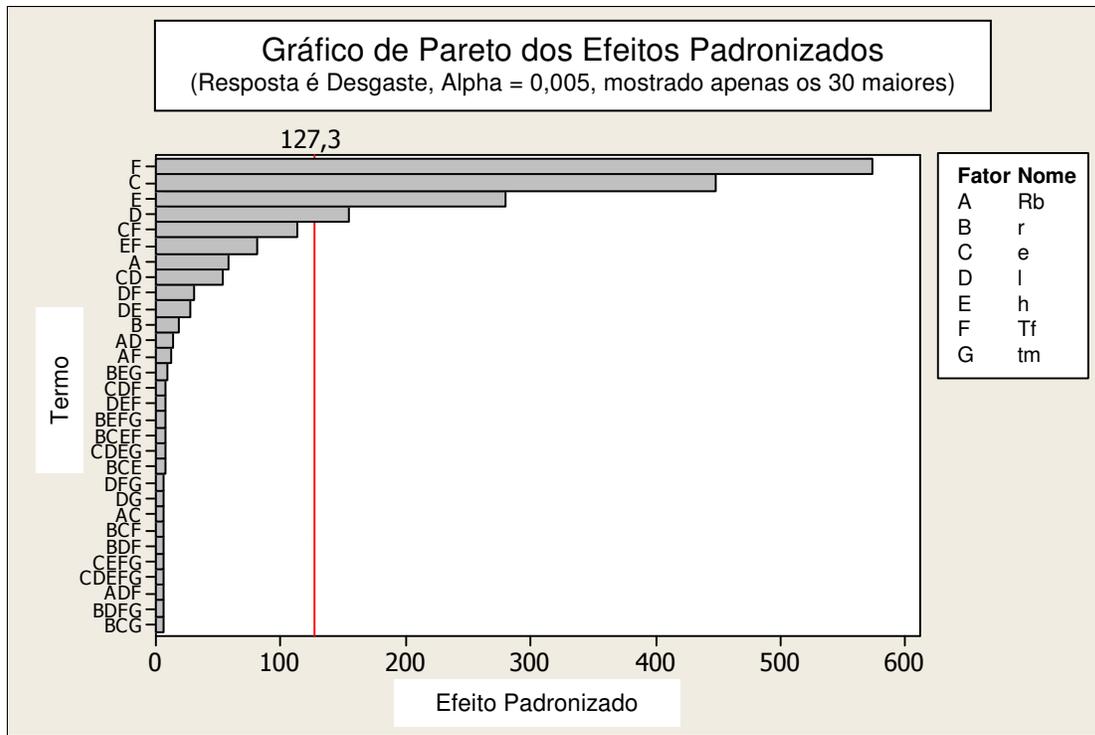
Muito provavelmente caso a tensão fosse medida apenas na região do raio de boca, o resultado final seria modificado. Cabe aqui uma sugestão para trabalhos futuros.



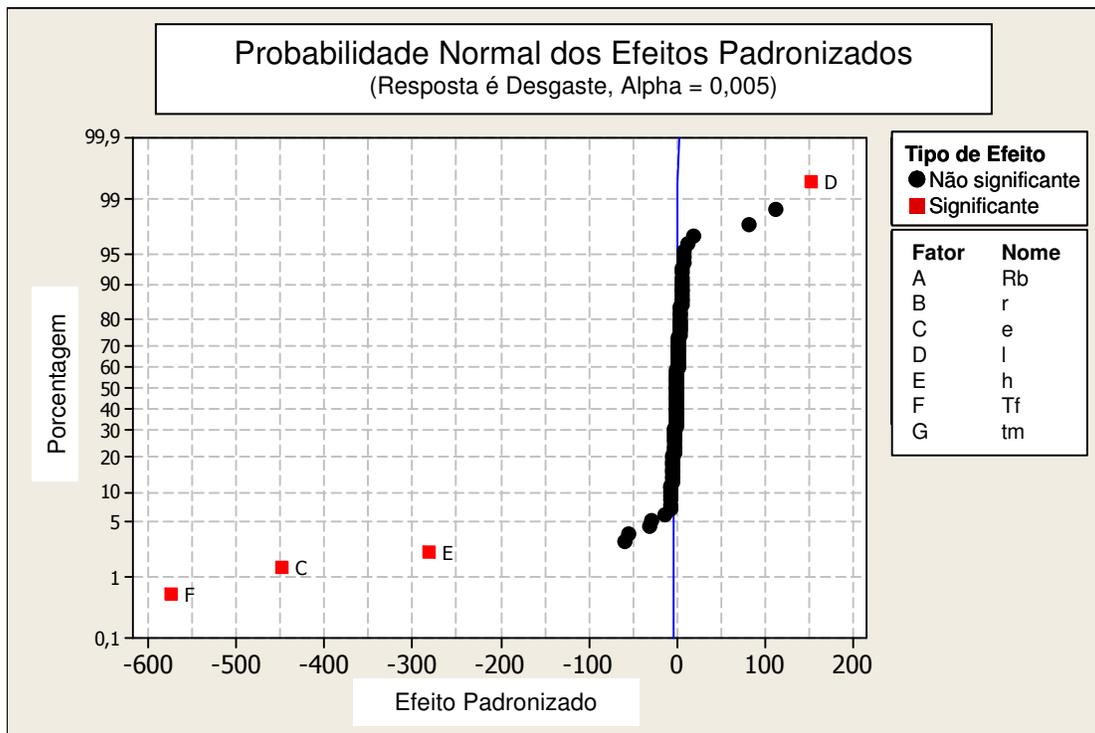
**Figura 6.8:** Localização dos maiores valores para tensão normal.

### 6.1.3. Desgaste

As Figura 6.9 e Figura 6.10 mostram o gráfico de Pareto e Probabilidade Normal respectivamente enquanto a Figura 6.11 mostra os Efeitos Principais para os parâmetros influentes encontrados nos gráficos anteriores.



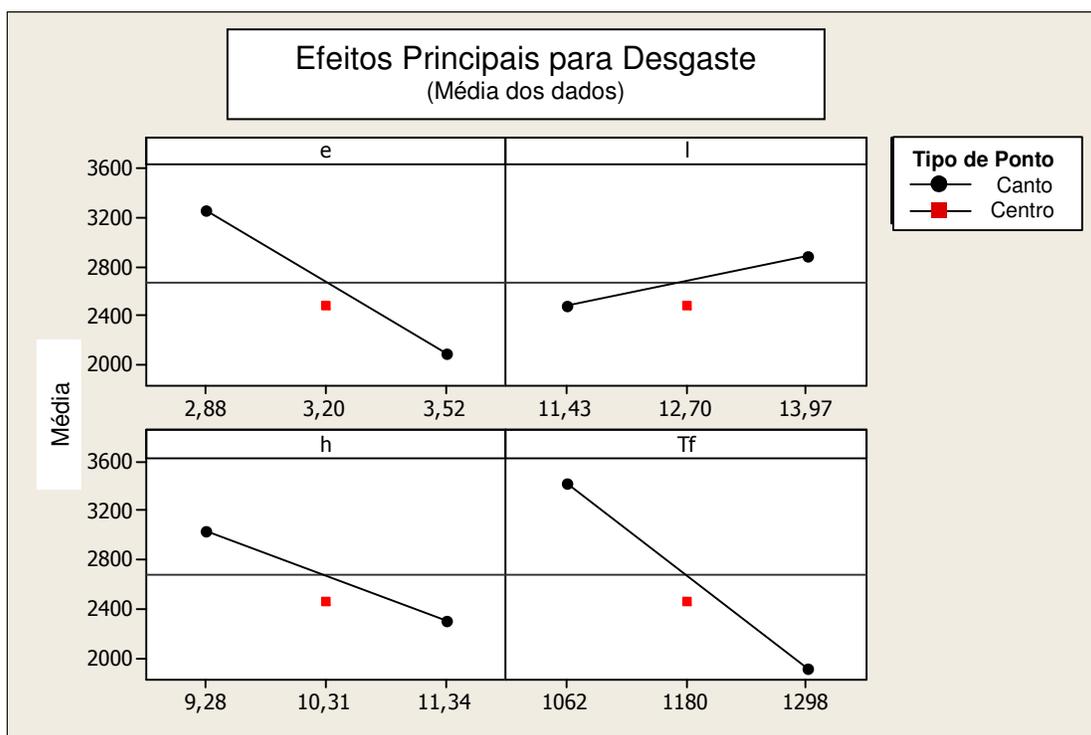
**Figura 6.9:** Gráfico de Pareto, desgaste.



**Figura 6.10:** Curva de Probabilidade Normal, desgaste.

Nesta análise verifica-se que o número de fatores influentes no desgaste das matrizes aumenta. Em ordem crescente tem-se:

1. Temperatura de forjamento
2. Espessura de rebarba
3. Altura da seção
4. Largura do patamar de rebarba



**Figura 6.11:** Curva de Efeitos principais, desgaste.

Um fato curioso a se notar é a altura máxima da seção como fator significativo ao processo de desgaste. Assim uma descrição do gráfico de Efeitos Principais segue:

- Um aumento na Altura da Seção reduz o desgaste.
- Maiores temperaturas de forjamento diminuem o desgaste.
- Maiores espessuras de rebarba levam a uma diminuição do valor total de desgaste.
- Já um aumento da largura do patamar de rebarba aumenta também o desgaste abrasivo presente.

#### 6.1.4. Largura de rebarba

Nas diferentes simulações realizadas, notou-se que o comprimento total de rebarba era consideravelmente alterado com modificações geométricas das matrizes, assim esta variável foi medida de ponta a ponta no eixo perpendicular ao eixo maior da biela, ou seja, no plano horizontal da peça estudada como mostra a Figura 6.12 para tentar relacioná-la com outras saídas como a força de carregamento, tensão normal e desgaste.



Figura 6.12: Localização da medida da largura de rebarba.

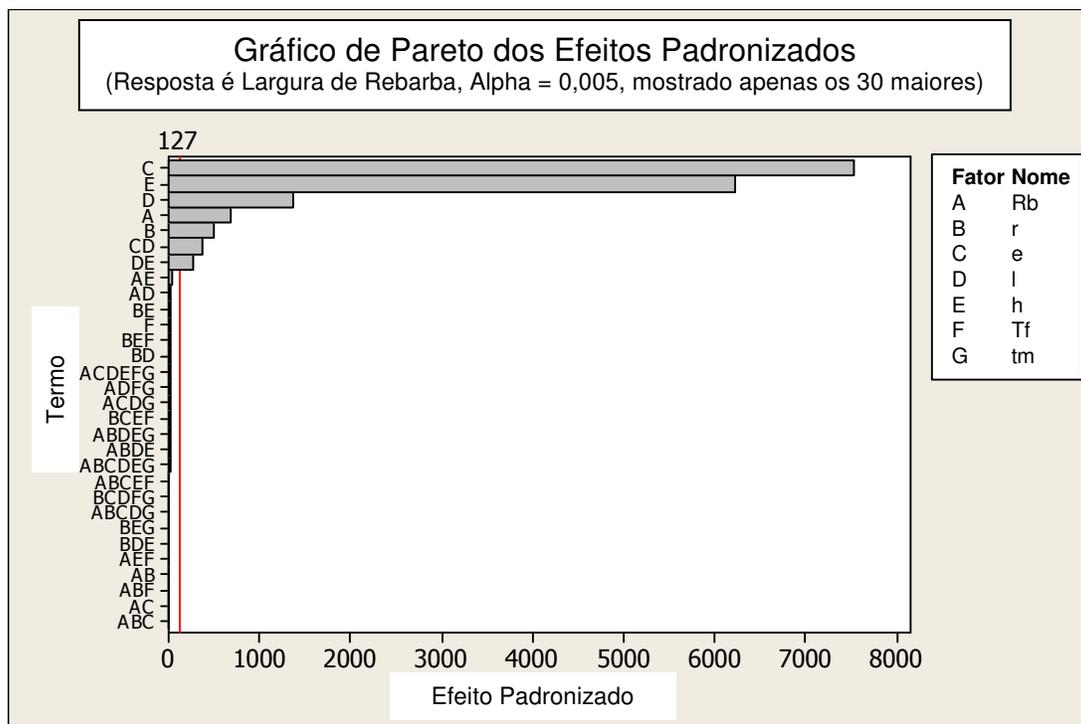
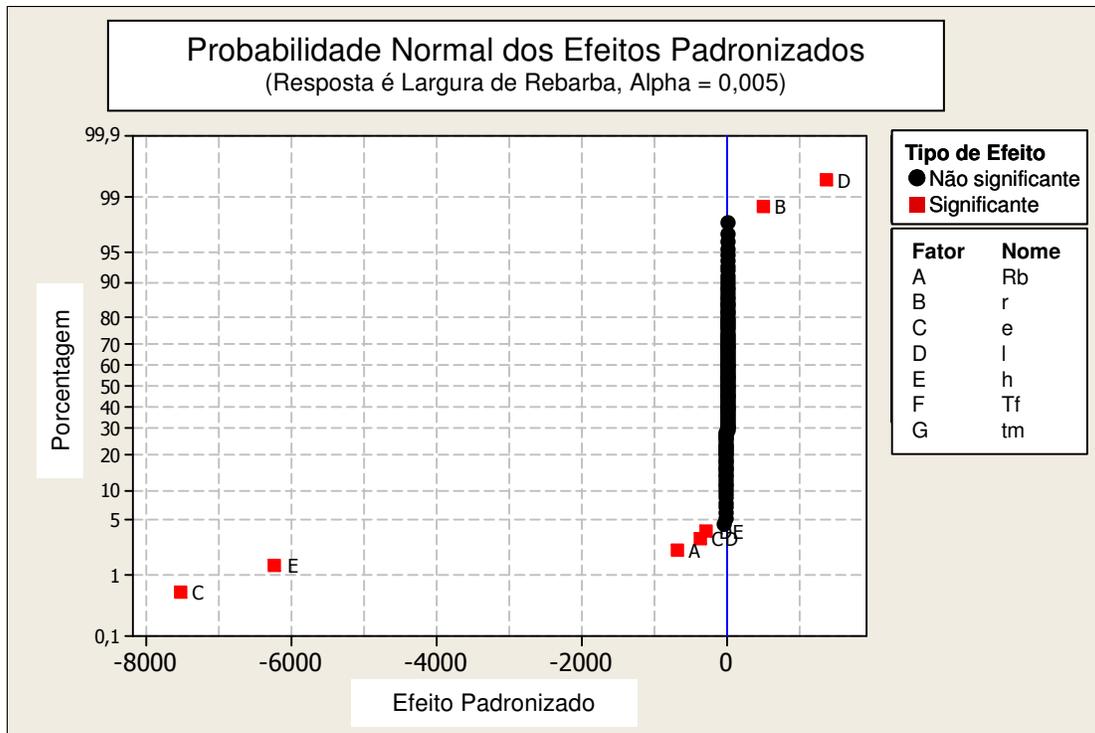


Figura 6.13: Gráfico de Pareto, largura total de rebarba.

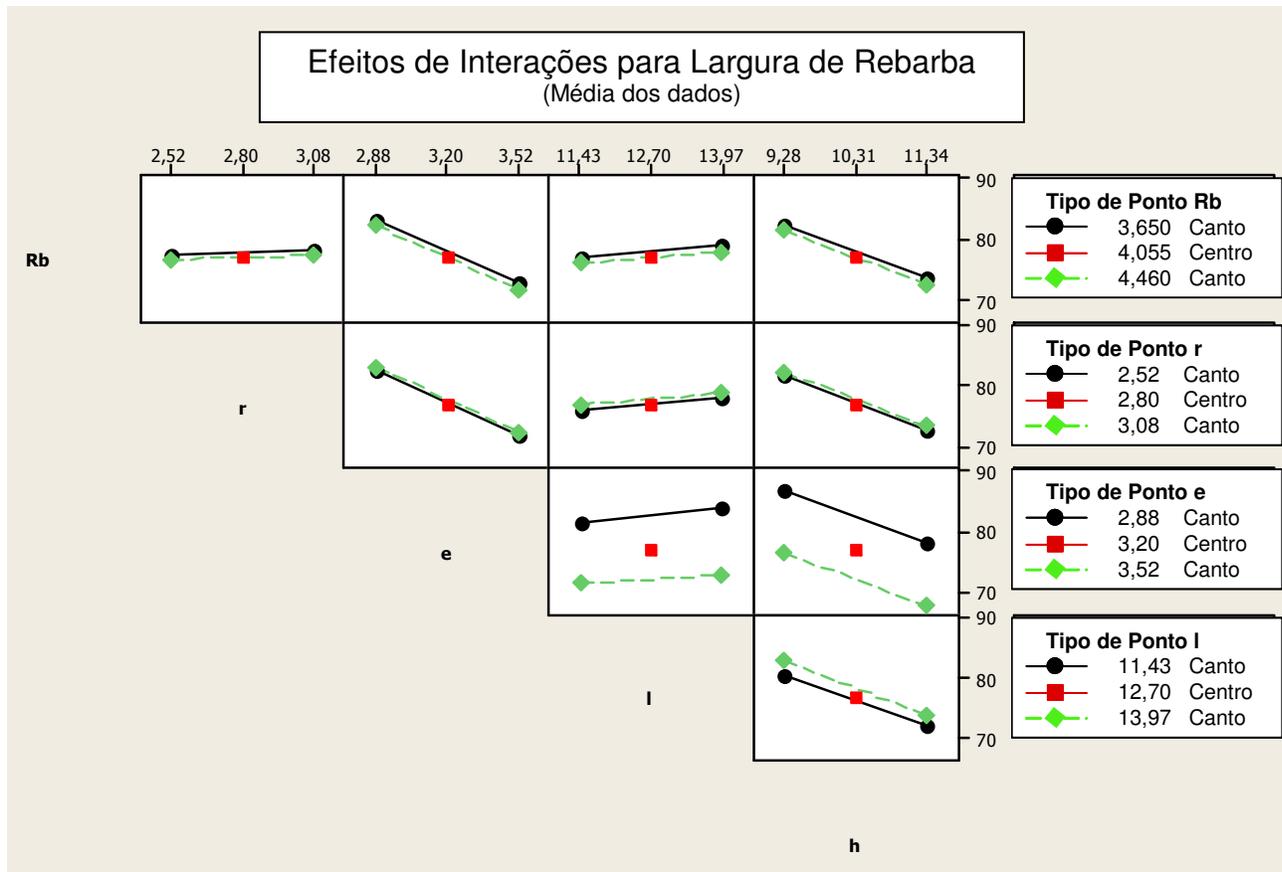


**Figura 6.14:** Curva de Probabilidade Normal, largura total de rebarba.

No gráfico de Pareto, Figura 6.13, nota-se que além de efeitos de primeira ordem como influentes ao processo têm-se dois efeitos de segunda ordem, assim deve-se montar o gráfico de Interações e não Efeitos Principais, como o próprio nome diz. Destacam-se para largura de rebarba os seguintes fatores, ilustrados anteriormente na Figura 4.1:

1. Espessura de rebarba
2. Altura da seção
3. Largura de patamar de rebarba
4. Raio de boca
5. Raio superior
6. Interação Largura de patamar x Espessura
7. Interação Largura de patamar x Altura

Uma analogia pode ser feita em um primeiro momento com os parâmetros encontrados para o desgaste, citados anteriormente com exceção da temperatura de forjamento em primeiro lugar.



**Figura 6.15:** Gráfico de interação, largura total de rebarba.

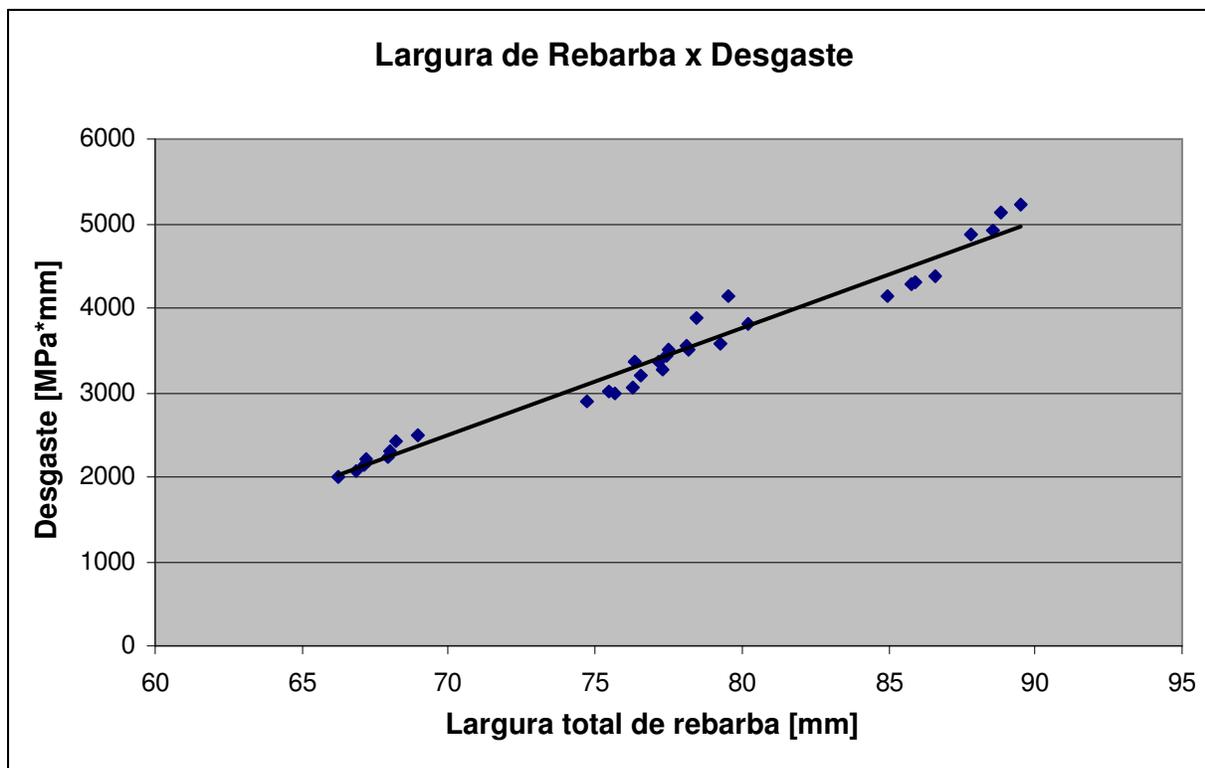
No gráfico de Interações pode-se verificar principalmente que:

- Menores espessuras aumentam o comprimento da largura total de rebarba
- Menores alturas de seção também aumentam a largura total de rebarba
- Menores larguras de patamares diminuem um pouco a largura de rebarba

### 6.1.5. Largura de rebarba total x Desgaste

Como os mesmos parâmetros geométricos que influem no processo de desgaste e na largura total de rebarba são idênticos e na mesma ordem de significância, levantou-se a hipótese de haver uma relação entre ambas. Excluindo a temperatura de forjamento e a temperatura de matriz que não são significantes para a largura construiu-se o gráfico da Largura de Rebarba x Desgaste com

trinta e dois dados a partir do ANEXO A1. Assim, o gráfico da Figura 6.16 é válido apenas para modificações geométricas das matrizes.

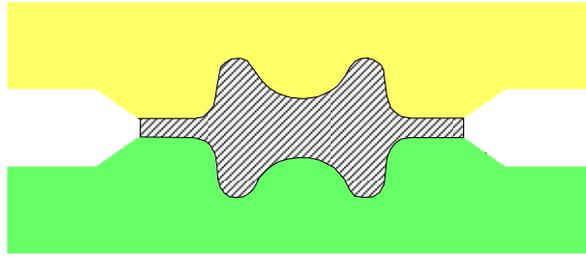


**Figura 6.16:** Desgaste em função da largura de rebarba, parte 1.

Pode-se notar que existe um padrão desgaste x largura de rebarba, assim quanto maior a largura total de rebarba do forjado, maior será o desgaste encontrado nas matrizes como mostrado no gráfico acima e por sua linha de tendência.

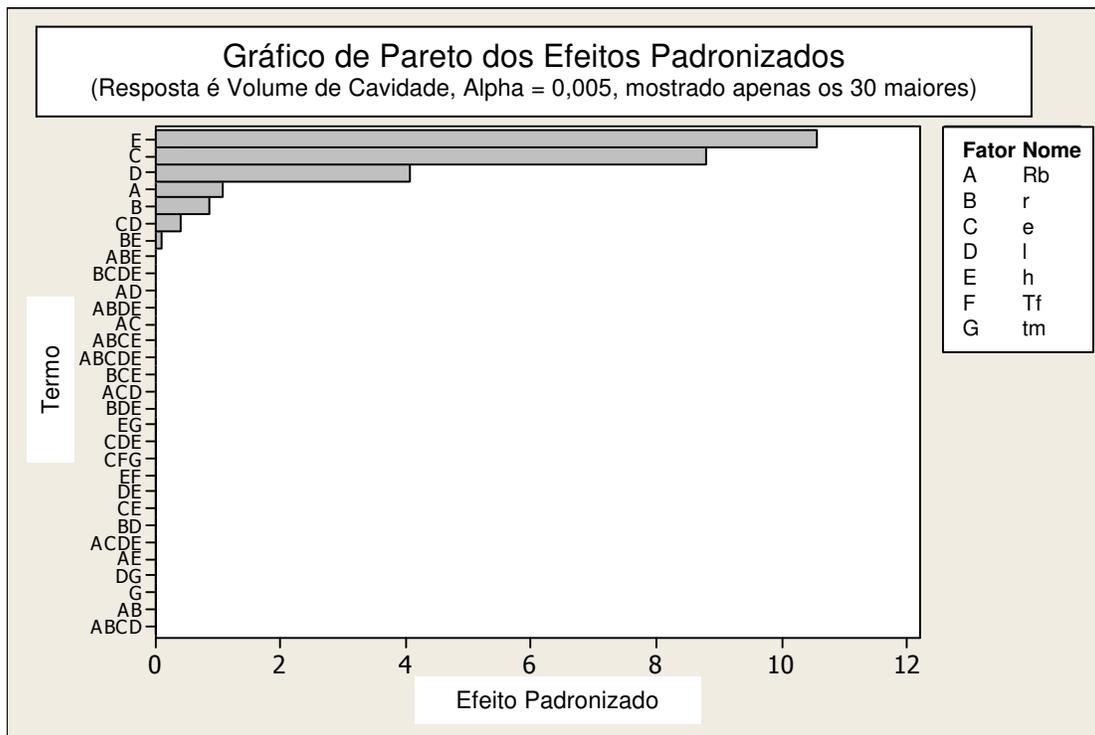
#### **6.1.6. Volume de cavidade interna**

Cada variação de um parâmetro geométrico faz modificações no volume da cavidade, Figura 6.17, assim o volume da cavidade que é toda a superfície da matriz em que o material entra em contato, também foi calculado para cada caso para ser possível analisar a interação com outros gráficos e parâmetros.



**Figura 6.17:** Volume de cavidade de matriz.

A Figura 6.18 mostra o gráfico de Pareto para os sete parâmetros estudados.



**Figura 6.18:** Gráfico de Pareto, volume de cavidade.

Destacam-se principalmente para o volume de cavidade de matriz segundo o gráfico de Pareto os seguintes parâmetros:

1. Altura da seção
2. Espessura de rebarba
3. Largura de patamar de rebarba

Algo evidente é a relação entre a largura total de rebarba e o volume de cavidade, assim o gráfico representado pela Figura 6.19 relaciona a largura total de rebarba com o volume de cavidade interna das matrizes.

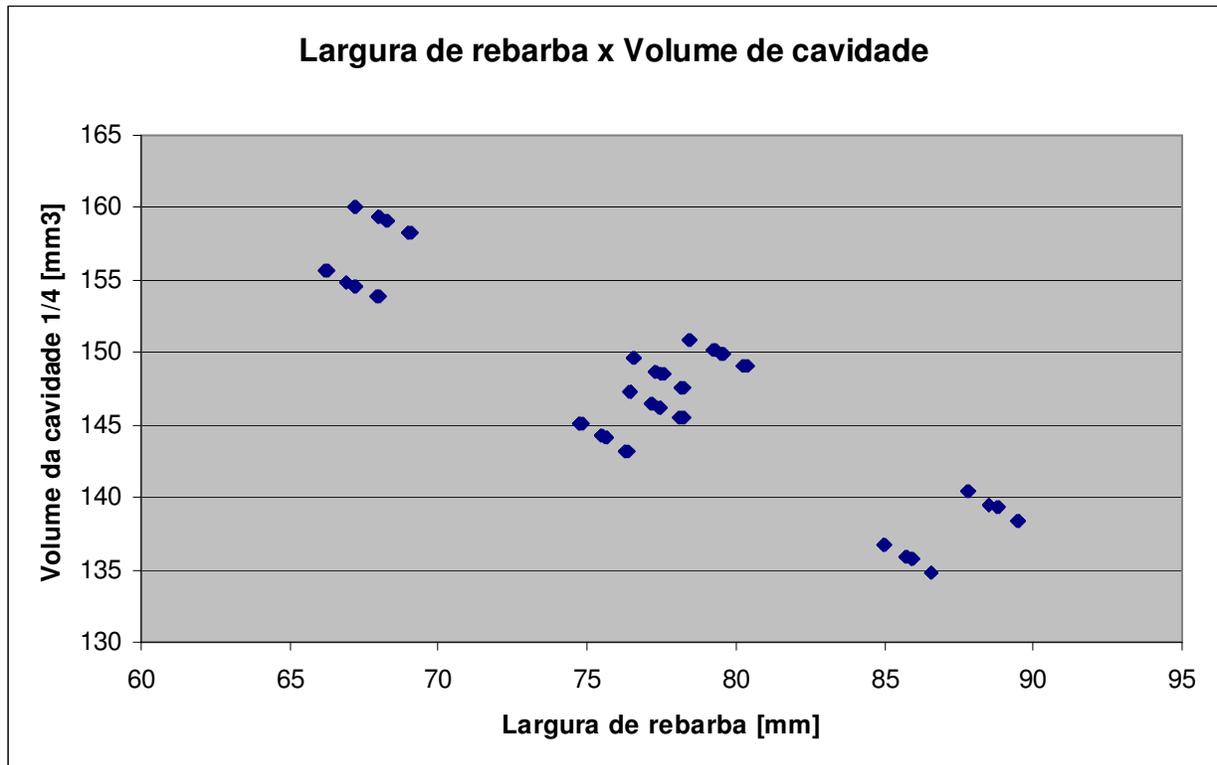
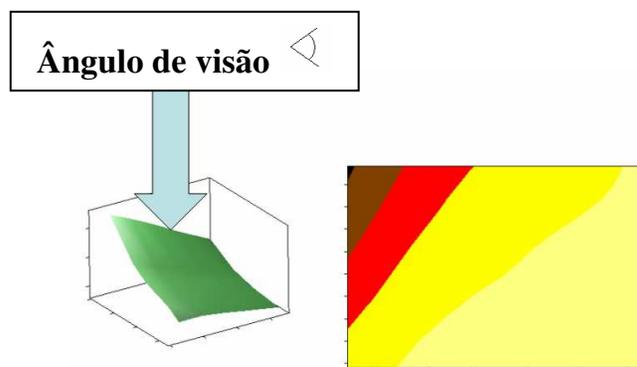


Figura 6.19: Volume de cavidade x Largura de rebarba total.

Pode-se notar que maiores larguras de rebarba estão relacionadas com menores volumes de cavidade e conseqüentemente com maiores valores para o desgaste.

## 6.2. Mapeamento do Processo

Para esta análise as curvas de contorno foram utilizadas para melhor verificação dos resultados dos fatores pareados. Deste modo pode-se mapear e obter uma melhor compreensão do forjamento na região da haste de bielas. As curvas de contorno nada mais são que a projeção da superfície no plano como mostra o esquema ilustrado na Figura 6.20 a seguir:



**Figura 6.20:** Esquema para visualização das curvas de nível.

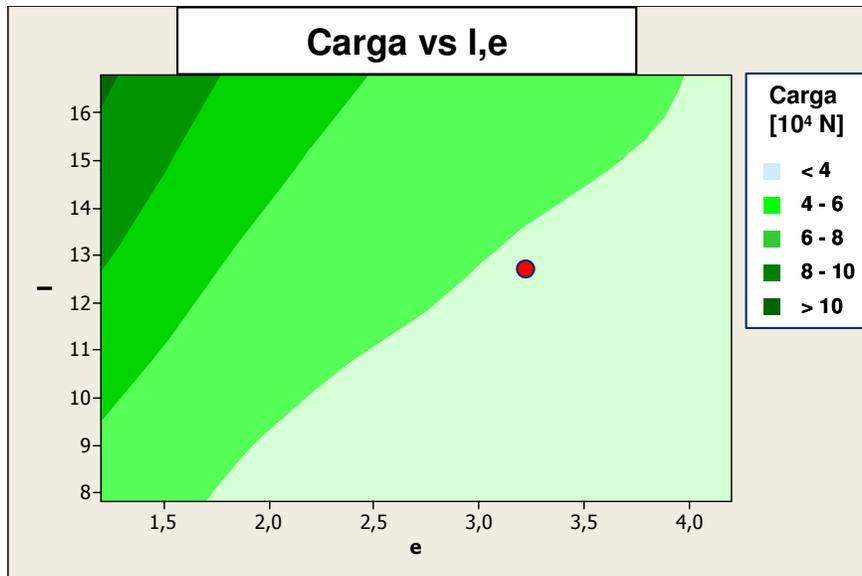
Nas análises a seguir o comprimento de seção foi de três milímetros enquanto que os pontos vermelhos ilustrados nas curvas de níveis referem-se à localização do processo atual, ou geometria inicial.

### 6.2.1. Espessura de rebarba x Largura de patamar de rebarba

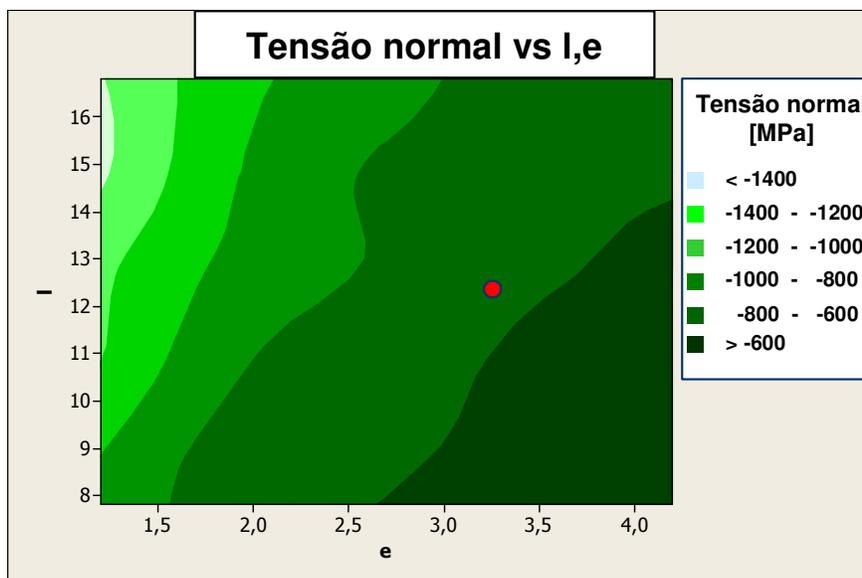
Para a obtenção destas curvas, a largura do patamar de rebarba e a espessura de rebarba possuem seis níveis cada, Tabela 6.1, todas em torno do zero, ou da geometria inicial. Todas as combinações possíveis foram analisadas e inseridas nas curvas de níveis mostradas a seguir.

**Tabela 6.1:** Níveis de variação para os fatores, 1 x e.

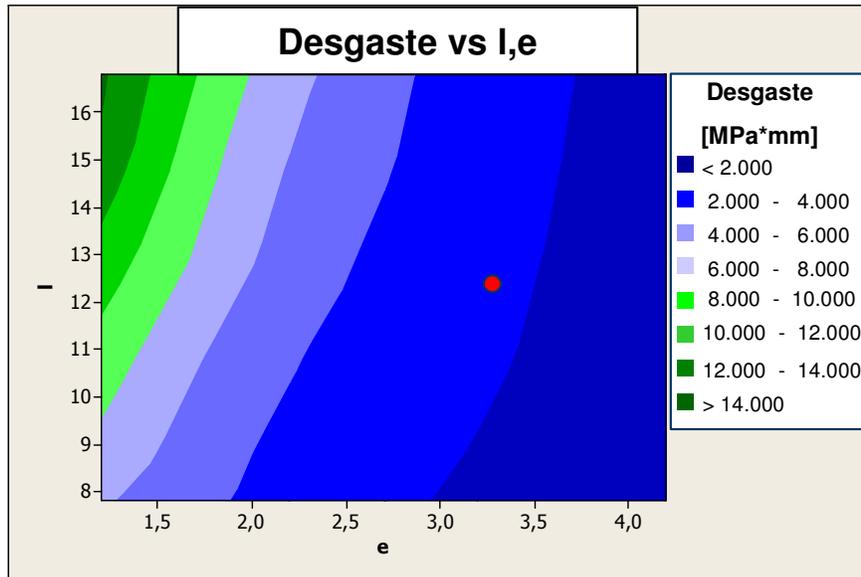
Largura [mm]	Espessura [mm]
7,8	1,2
8,8	2,2
10,8	2,7
12,8	3,2
14,8	3,7
16,8	4,2



**Figura 6.21:** Curva de nível para a carga, l x e.



**Figura 6.22:** Curva de nível para a tensão normal, l x e.



**Figura 6.23:** Curva de nível para o desgaste, l x e.

Um acréscimo na espessura de forjamento leva a diminuição significativa do desgaste como mostra a Figura 6.23 e a uma diminuição na tensão normal, Figura 6.22. Contudo a força de carregamento não mudaria, o que poderia levar a uma falsa conclusão de que como a força não muda, os mecanismos de desgaste também não mudariam.

### 6.2.2. Espessura de rebarba x Raio de Boca de rebarba

O raio de boca (ilustrado na Figura 4.1 como R) foi variado em sete níveis para a análise atual, já a espessura em cinco níveis como mostra a Tabela 6.2, todas as combinações foram novamente testadas totalizando trinta e cinco simulações.

**Tabela 6.2:** Níveis de variação para os fatores, R x e.

Raio de Boca [mm]	Espessura [mm]
2,03	1,2
3,04	2,2
3,54	3,2
4,05	4,2
4,56	5,2
5,06	
6,08	

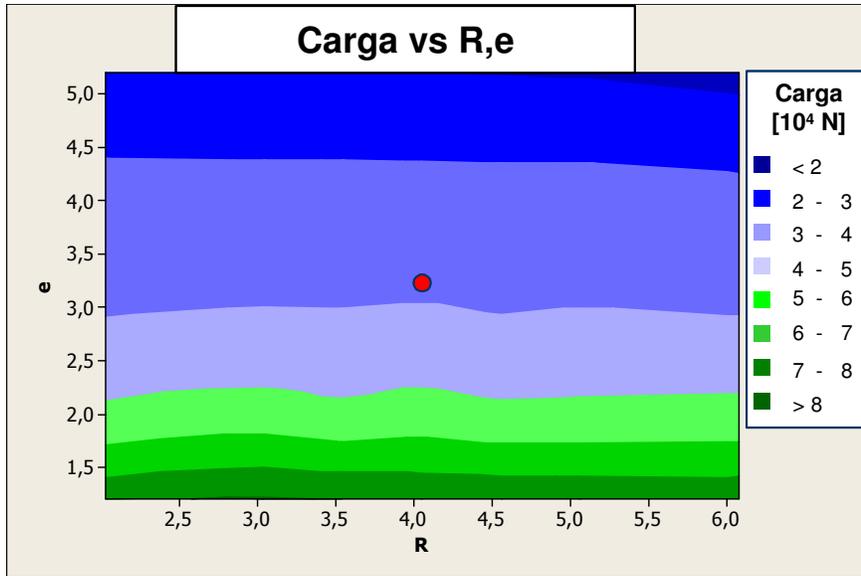


Figura 6.24: Curva de nível para a carga, R x e.

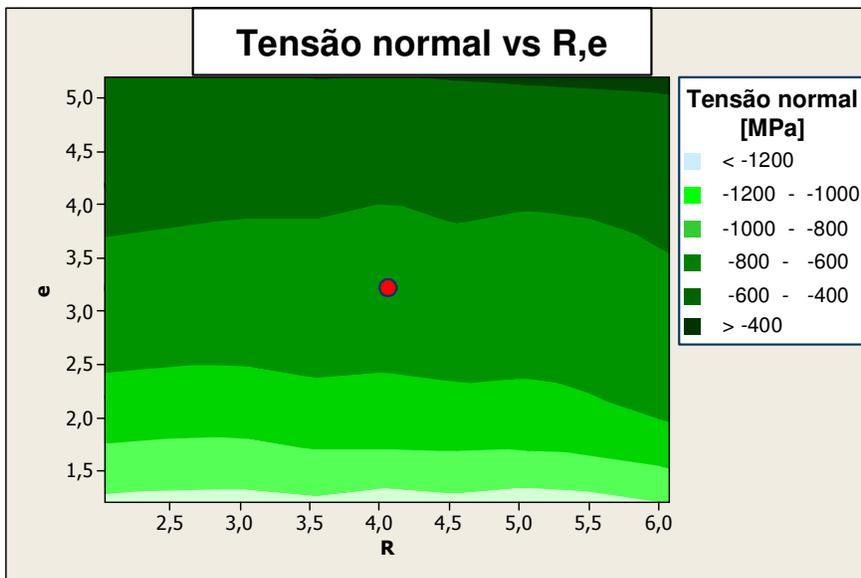
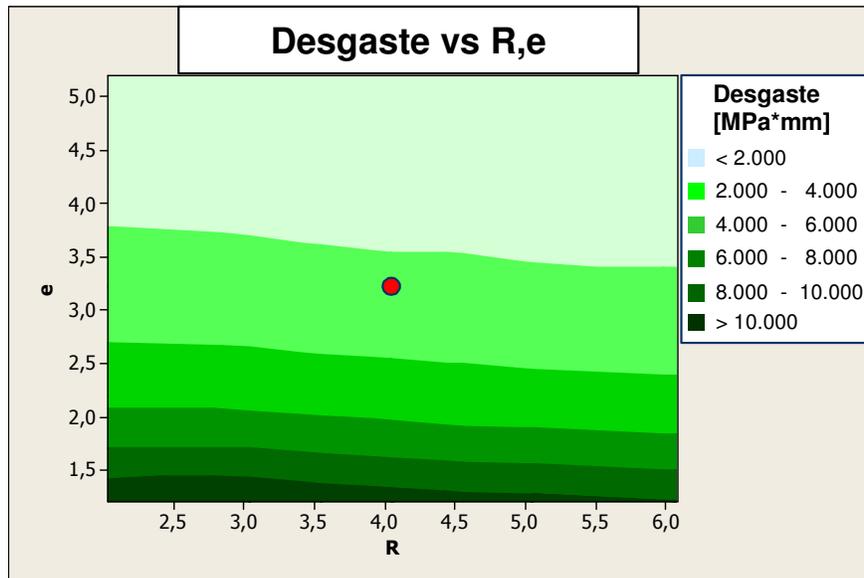


Figura 6.25: Curva de nível para a tensão normal, R x e.



**Figura 6.26:** Curva de nível para o desgaste, R x e.

Como previamente visto nos gráficos de Efeitos Principais, o raio de boca não é muito influente para o processo quando analisado às respostas impostas. Um pequeno efeito surge no desgaste, contudo não se pode excluir o raio de boca como um fator importante à degradação da ferramenta, pois em trabalhos anteriores já foi verificada a influência deste fator no desgaste localizado da matriz nesta região.

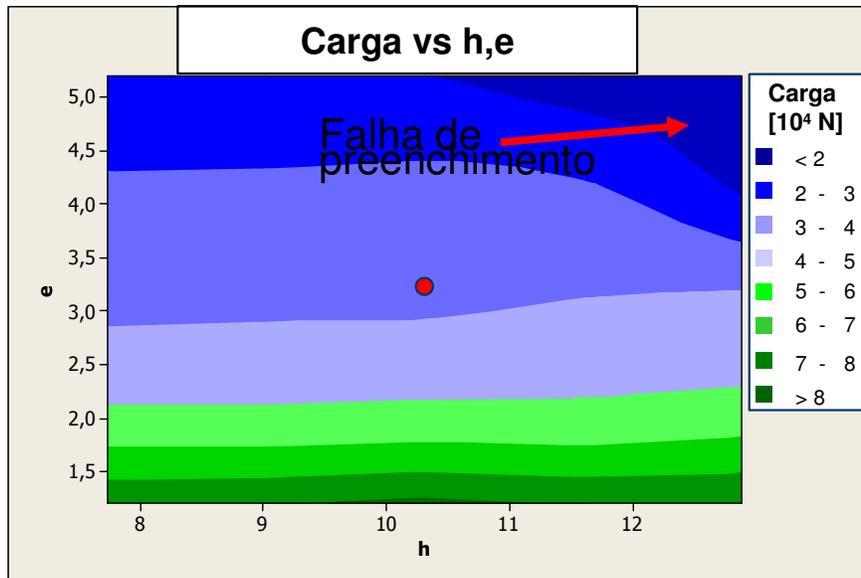
Um ponto a ser comentado é que conforme o raio aumenta, melhor será o escoamento do material pelo patamar de rebarba. Entretanto quando analisado o raio com a espessura de rebarba, este torna-se praticamente insignificante como mostrado nesta seção.

### 6.2.3. Espessura de rebarba x Altura máxima da seção

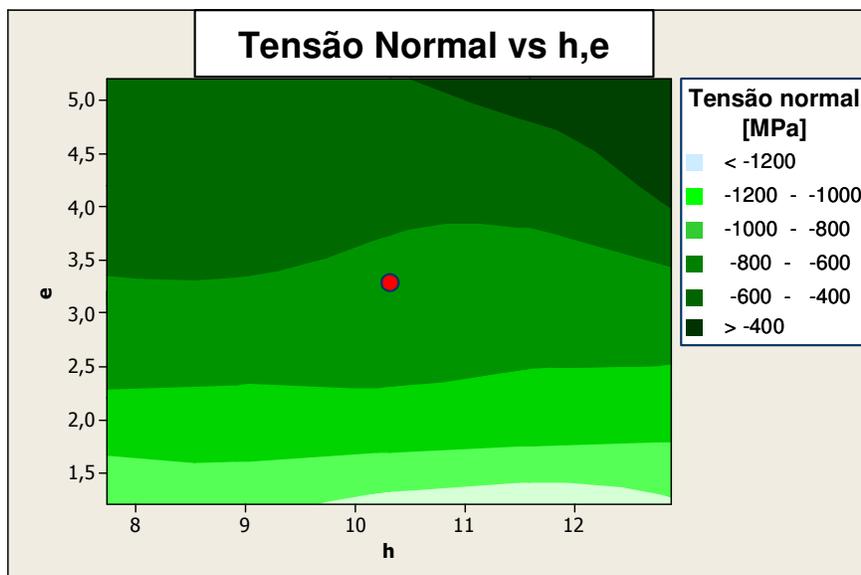
Para estas combinações cada variável possui cinco níveis, Tabela 6.3.

**Tabela 6.3:** Níveis de variação para os fatores, h x e.

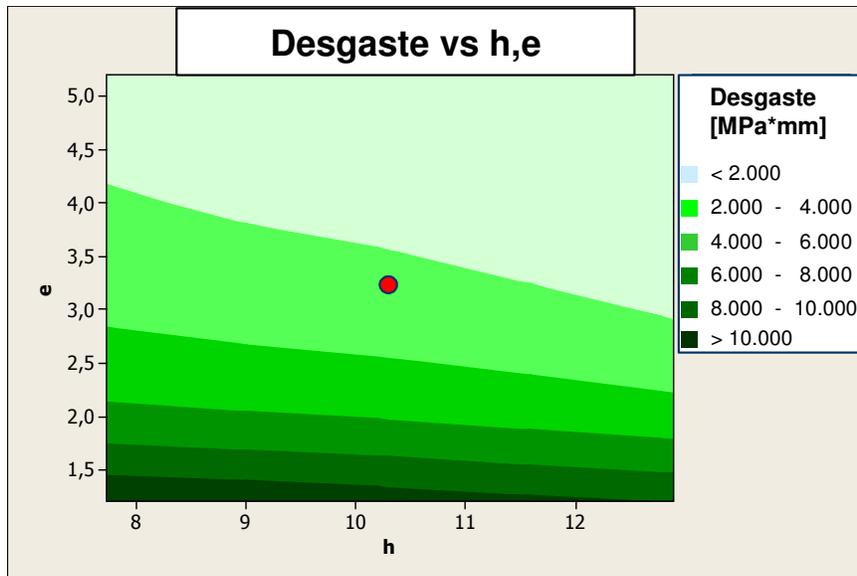
Altura [mm]	Espessura [mm]
7,73	1,2
9,02	2,2
10,31	3,2
11,6	4,2
12,89	5,2



**Figura 6.27:** Curva de nível para a carga, h x e.



**Figura 6.28:** Curva de nível para a tensão normal, h x e.



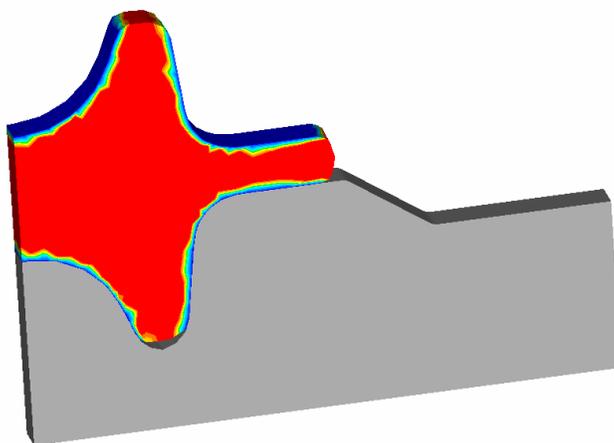
**Figura 6.29:** Curva de nível para o desgaste, h x e.

Nas curvas de níveis podem-se verificar regiões onde a força de carregamento e a tensão normal caem bruscamente, precisamente para alturas de seção e espessuras de rebarba elevadas, nos quais não houve preenchimento total da cavidade. Podendo assim estabelecer um limite para a altura máxima da seção em função da espessura de rebarba e também uma margem de segurança para projeto das matrizes de bielas.

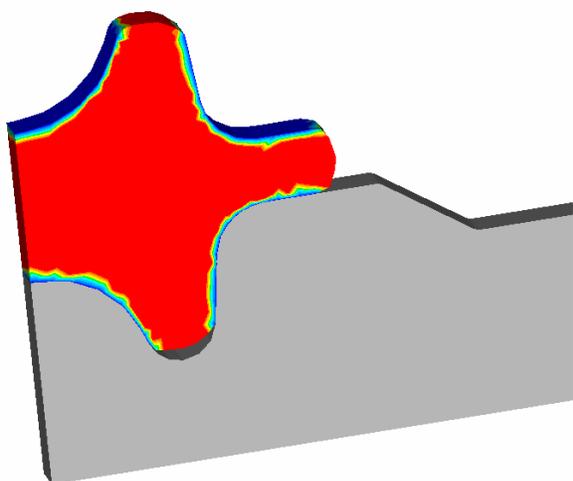
Pode-se verificar que um aumento da altura, leva a um menor desgaste, contudo não se pode dizer o mesmo para a força normal.

Contradizendo a informação anterior uma diminuição na altura também pode levar a melhoras no processo ao diminuir a tensão normal da parede da matriz, mantendo o mesmo valor para o desgaste.

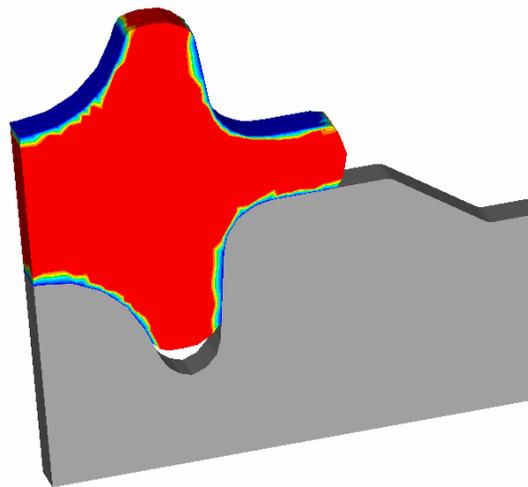
A altura possui um limite, pois para os casos de uma altura elevada ocorrerá falhas de preenchimento. Para a espessura de 4,2 milímetros e altura de 12,89 milímetros ocorreu uma falha pequena como mostra a Figura 6.30. Para a espessura de 5,2 milímetros, as alturas de 11,6 e 12,89 milímetros apresentaram falhas, Figura 6.31 e Figura 6.32.



**Figura 6.30:** Falha de preenchimento,  $h = 12,89$  mm,  $e = 4,2$  mm.



**Figura 6.31:** Falha de preenchimento,  $h = 11,6$  mm,  $e = 5,2$  mm.



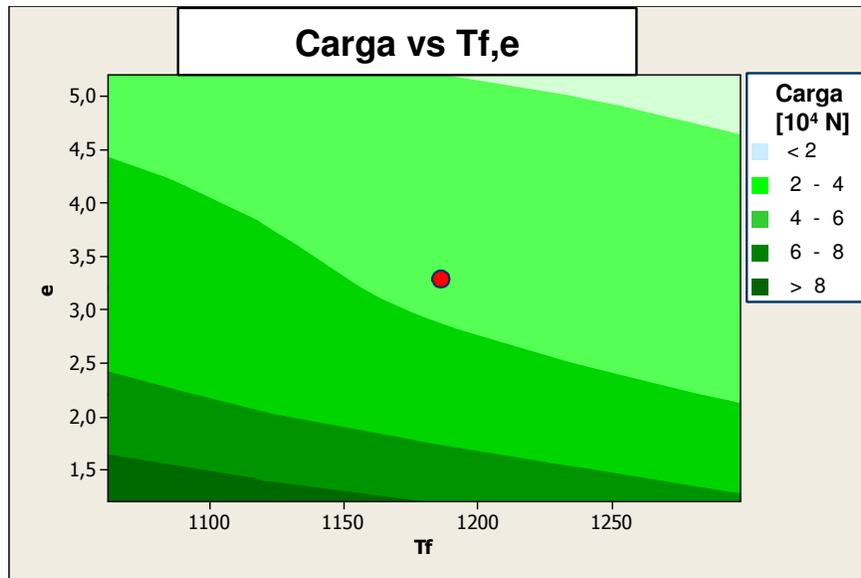
**Figura 6.32:** Falha de preenchimento,  $h = 12,89$  mm,  $e = 5,2$  mm.

#### 6.2.4. Espessura x Temperatura do forjado

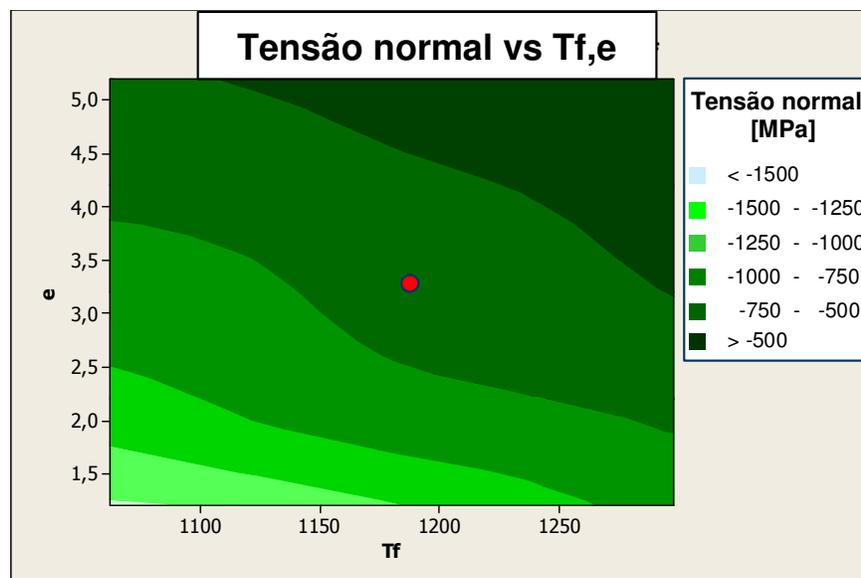
Novamente todos os fatores possuem cinco níveis cada como mostra a Tabela 6.4. Seus níveis foram novamente impostos ao redor do zero.

**Tabela 6.4:** Níveis de variação para os fatores, Tf x e.

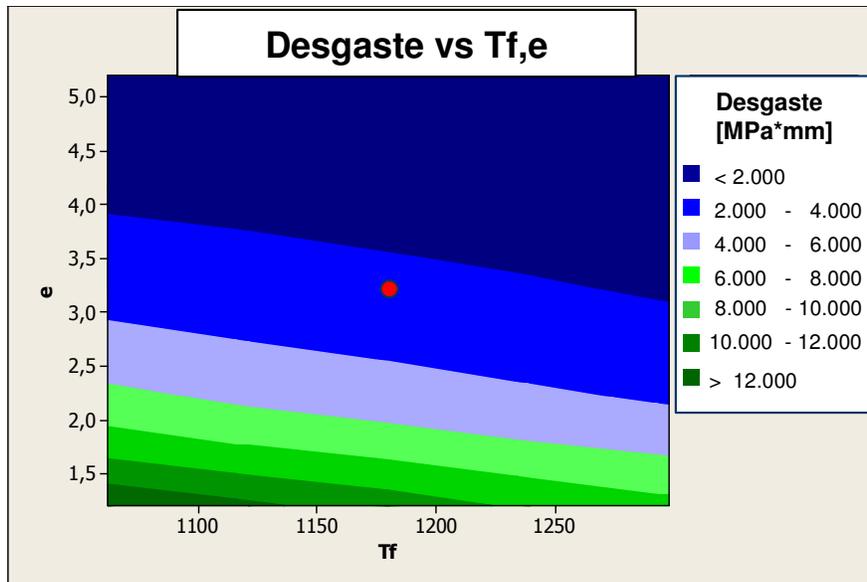
Temperatura [°C]	Espessura [mm]
1062	1,2
1121	2,2
1180	3,2
1239	4,2
1298	5,2



**Figura 6.33:** Curva de nível para a carga, Tf x e.



**Figura 6.34:** Curva de nível para a tensão normal, Tf x e.



**Figura 6.35:** Curva de nível para o desgaste, Tf x e.

A modificação da temperatura de forjamento torna-se algo muito complicado pois sua diminuição causa perda de energia interna, podendo em algumas regiões abaixar a tal ponto que seja próximo da temperatura de recristalização levando o material a uma fragilização a morno.

O acréscimo da temperatura de trabalho aumenta a oxidação superficial levando a um maior número de partículas abrasivas atuando no processo. Além disto, tende a aumentar a temperatura superficial da matriz levando-a a temperaturas altas que podem ocasionar um amolecimento da superfície da ferramenta, diminuindo sua dureza e conseqüentemente aumentando a possibilidade de ocasionarem falhas.

Levando em consideração que durante o forjamento algumas regiões do forjado podem aumentar sua temperatura devido às movimentações de discordâncias e movimentação de grãos, elevando sua energia interna, algumas áreas podem elevar sua temperatura a tal ponto próximo da fusão do material, levando a falhas internas e imperceptíveis.

### 6.2.5. Espessura de rebarba x diâmetro da geratriz

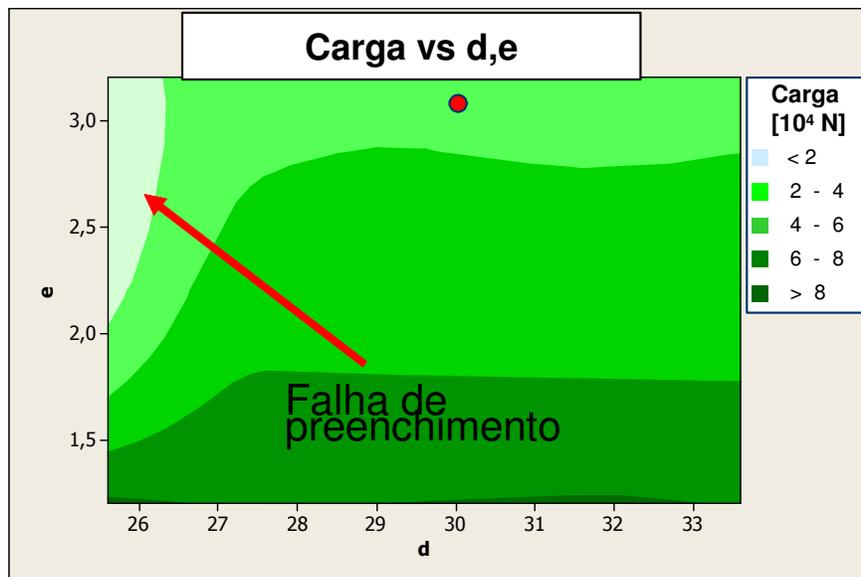
Finalmente o diâmetro do tarugo foi analisado. Este fator não foi considerado anteriormente, pois não havia sido considerado como muito influente no início, pois seu diâmetro deveria se

manter constante e não haveria modificações do projeto em relação à geratriz. Porém, o estudo provado do recalque na haste faz com que o diâmetro varie durante o forjamento e por isso seu comportamento deve ser estudado.

O diâmetro possui cinco níveis e a espessura três, Tabela 6.5.

**Tabela 6.5:** Níveis de variação para os fatores, D x e.

Diâmetro [mm]	Espessura [mm]
25,6	1,2
27,6	2,2
29,6	3,2
31,6	
33,6	



**Figura 6.36:** Curva de nível para a carga, d x e.

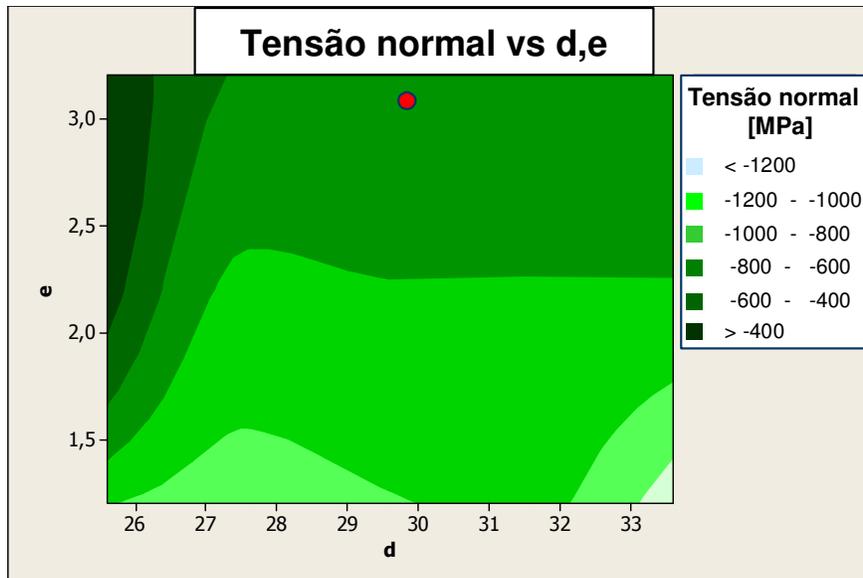


Figura 6.37: Curva de nível para a tensão normal, d x e.

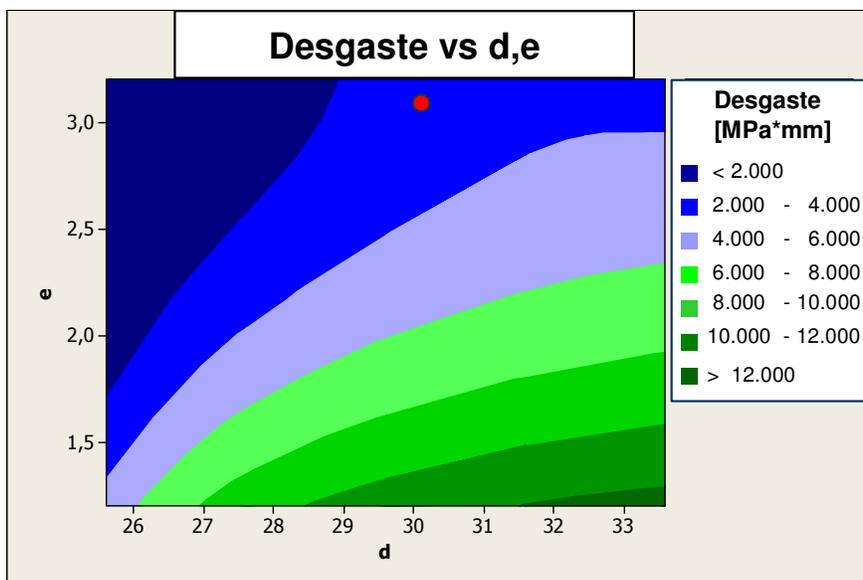
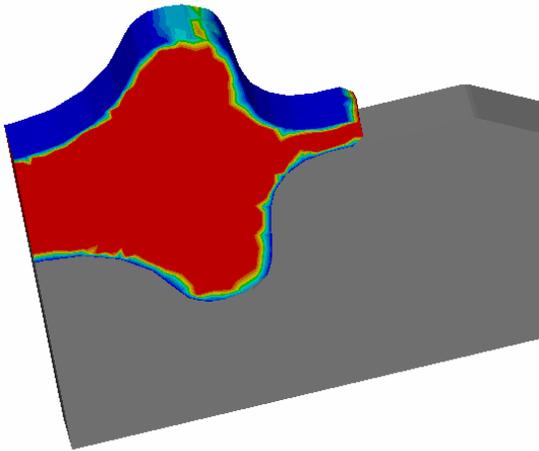


Figura 6.38: Curva de nível para o desgaste, d x e.

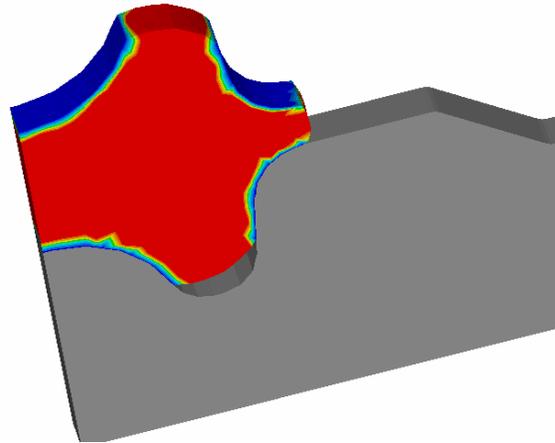
Pelos gráficos de análise da significância dos fatores e comparando com o padrão dos gráficos dos outros parâmetros em função da espessura, pode-se concluir que o diâmetro é um fator tão influente quanto a espessura de rebarba, devido a forma do gráfico e suas curvas com contornos quase diagonais, ou seja, um gráfico de superfície íngreme.

Para um diâmetro muito pequeno da geratriz não há preenchimento total, isto ocorre precisamente para um diâmetro de 25,6 milímetros tanto para uma espessura de rebarba de 2,2 milímetros, mostrado na Figura 6.39, e para uma espessura de 3,2 milímetros, Figura 6.40. Entretanto a falha ocorrida no primeiro caso (2,2 milímetros de rebarba) é tão pequena que pode ser corrigida facilmente pelo processo seguinte de calibração nas matrizes finais. Para a espessura de 3,2 milímetros o defeito já foi grande e provavelmente de difícil correção nos processos seguintes, levando a uma falha do produto forjado final. Estes foram os únicos dois processos que apresentaram defeitos para a variação do diâmetro.

Nas figuras adiantes, a cor azul representa a distância do tarugo com a matriz, portanto o correto para um preenchimento completo é a peça estar completamente azul em toda superfície.



**Figura 6.39:** Falha de preenchimento,  $D = 25,6$  mm,  $e = 2,2$  mm.



**Figura 6.40:** Falha de preenchimento,  $D = 25,6$  mm,  $e = 3,2$  mm.

## **Capítulo 7**

### **Discussão de Resultados**

Neste capítulo será abordada a influência de cada parâmetro variável que influencia o processo de forjamento de bielas de forma separada em subtítulos. Desta forma pode-se avaliar como cada um dos fatores estudados afeta a vida útil das matrizes.

#### **7.1. Parâmetros**

##### **7.1.1. Temperatura do forjado**

Apesar da temperatura apresentar alto índice de influência no processo de forjamento como visto nos gráficos da seção 6.1., este não é um parâmetro interessante a ser modificado devido a problemas com possibilidades de fusões internas e localizadas durante o processo de forjamento podendo levar a falhas internas.

Um aumento da temperatura diminui consideravelmente a força de carregamento, a tensão normal atuante e o desgaste. Contudo, o acréscimo de energia também aumenta a velocidade de oxidação superficial, promovendo partículas abrasivas que irão por fim aumentar o processo de desgaste superficial.

Este aumento de energia da geratriz promove um aumento da temperatura superficial das matrizes, que em caso de resfriamento inadequado pode levar à fragilização de superfície e decréscimo em sua dureza superficial.

É de se esperar que a temperatura seja altamente relevante, pois a conformabilidade do material é fortemente influenciada pela mesma como visto na Seção 1.3. Quanto maior a energia fornecida pela temperatura, a movimentação das discordâncias é facilitada, diminuindo bruscamente a carga necessária para forjar o material.

### **7.1.2. Temperatura das Matrizes**

A modificação da temperatura das matrizes apesar de não se apresentar como significativa para o processo, pois houve uma pequena modificação de apenas  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ , é um parâmetro importante a ser levado em consideração, pois devido à modificações estruturais superficiais pode aumentar o processo de desgaste amolecendo a ferramenta.

### **7.1.3. Espessura de rebarba**

A espessura de rebarba é sem dúvida um dos parâmetros geométricos mais influentes no processo de desgaste das matrizes de conformação a quente neste trabalho como mostra os gráficos de Pareto e Probabilidade Normal na Seção 6.1.

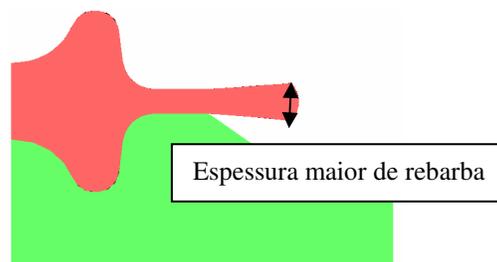
Isto se deve ao mesmo fato descrito para a força de carregamento: quanto menor a espessura de rebarba menor será a área para o escoamento do material, maior a velocidade tangencial, menor o volume de cavidade de matriz e, por fim, maior a largura total de rebarba.

Tendo em vista que o material já preenchido na cavidade tende a escoar pela rebarba, quanto menor a espessura de rebarba, menor a área de escoamento como visto anteriormente na Seção 3.3.4. e também quanto maior o grau de deformação do material, maior será a carga de forjamento.

Pode-se verificar que a variação da espessura faz com que o formato da rebarba tenha diferentes padrões. Para espessuras pequenas a rebarba assume a forma de uma “gota” mais pronunciável. Conforme a espessura aumenta, a forma da rebarba tende a apresentar uma “gota” menos larga, diminuindo a espessura de rebarba como visto na Seção 6.1.4.

Contudo a espessura maior da rebarba, mostrada em um corte transversal do plano na Figura 7.1 e localizada em sua extremidade é constante, independente da espessura final de rebarba. Tendo em vista que a espessura se mantém no momento em que o material em fluxo sai da região da rebarba e da cavidade não possuindo mais limitadores de escoamento (quarta etapa do forjamento da biela descrita na Seção 3.3.4).

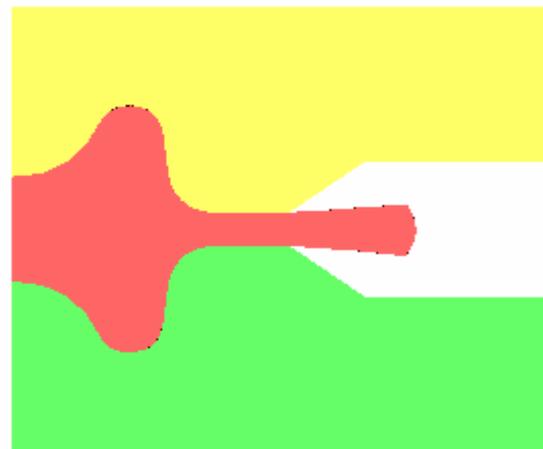
As Figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5 mostram a seqüência de forjamento desde uma espessura de rebarba maior até uma mais fina respectivamente.



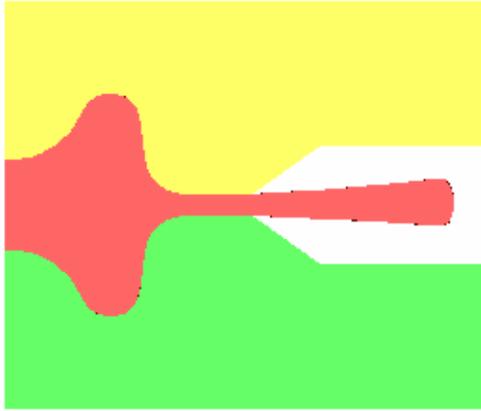
**Figura 7.1:** Localização da espessura maior de rebarba.



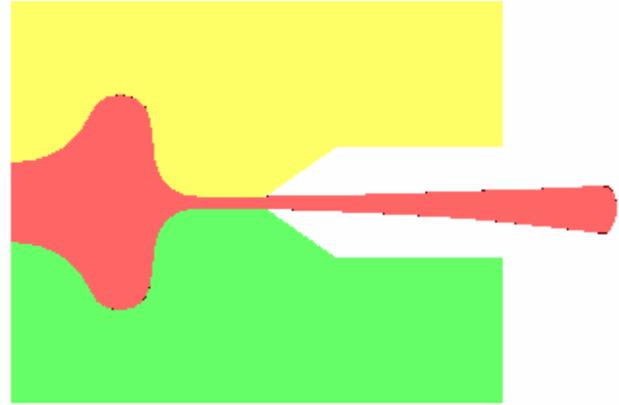
**Figura 7.2:** Rebarba em forma de “gota”, espessura de 4,2 mm.



**Figura 7.3:** Rebarba em forma de “gota”, espessura de 3,2 mm.



**Figura 7.4:** Rebarba em forma de “gota”, espessura de 2,2 mm.

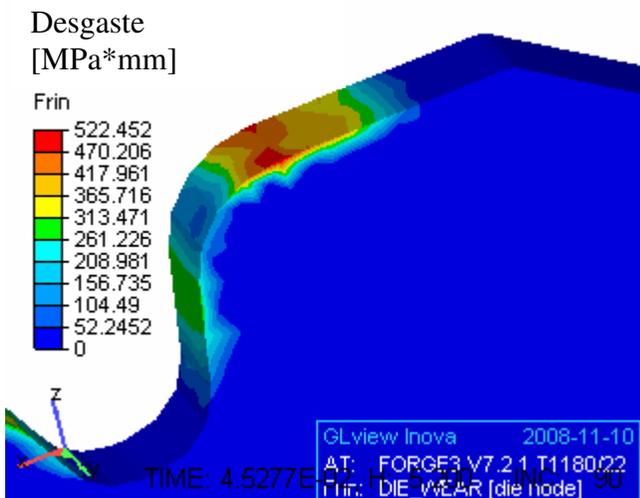


**Figura 7.5:** Rebarba em forma de “gota”, espessura de 1,2 mm.

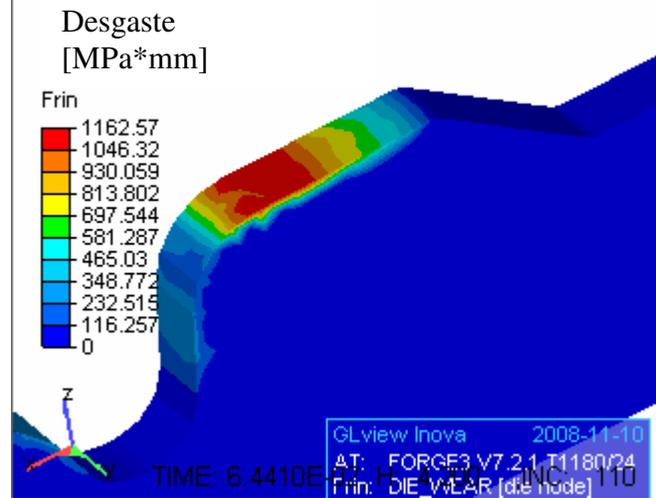
Além do fator visual de modificação no formato da peça forjada, a espessura afeta de forma muito significativa a tensão normal em toda a matriz, desde a região central até o raio de boca.

No momento em que a cavidade é preenchida, aproximadamente quando as matrizes formam uma rebarba de 5,2 milímetros e para todos os outros parâmetros iguais aos atuais de forjamento, a seção de escape (largura da seção \* espessura de rebarba) para o escoamento tende apenas a diminuir conforme a espessura diminui, uma vez que a largura da seção é constante e como se nota a partir da Eq. 3.3.

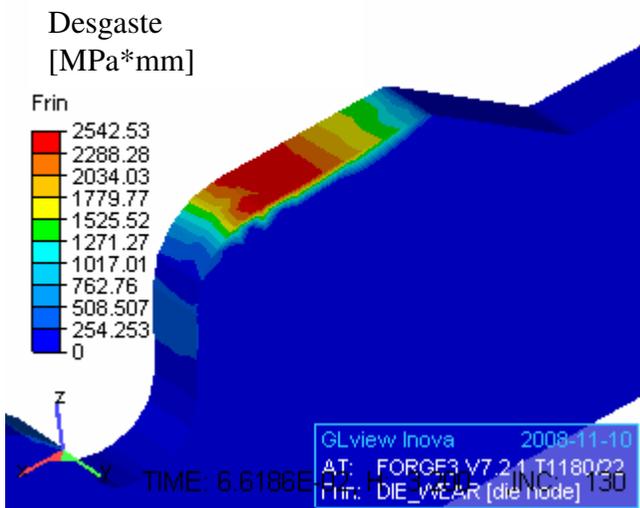
O desgaste ocorre em toda a superfície da matriz onde houver tensão normal e velocidade tangencial. Assim no início do forjamento o desgaste ocorre na região central, Figura 7.6. Em seguida nas paredes laterais. Contudo, conforme a espessura diminui, estes valores tornam-se insignificantes perante o valor do desgaste na região do patamar de rebarba, Figuras 7.7 a 7.9.



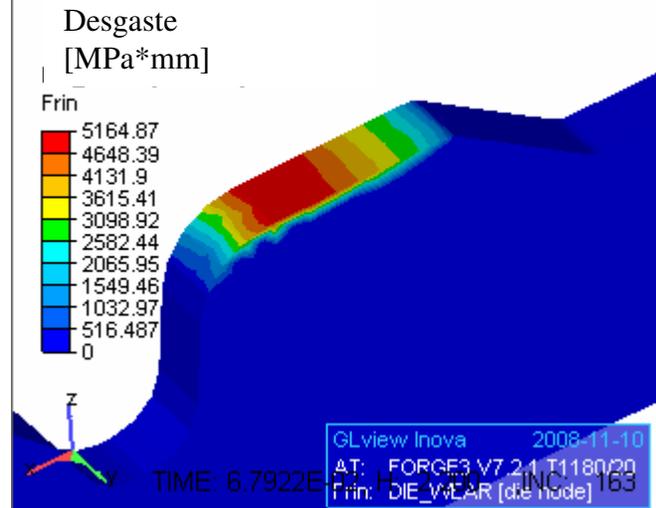
**Figura 7.6:** Desgaste abrasivo,  $e = 5,2\text{mm}$



**Figura 7.7:** Desgaste abrasivo,  $e = 4,2\text{mm}$



**Figura 7.8:** Desgaste abrasivo,  $e = 3,2\text{mm}$



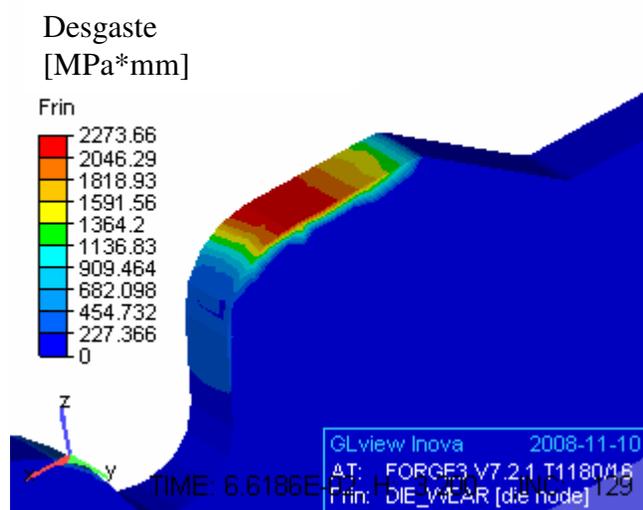
**Figura 7.9:** Desgaste abrasivo,  $e = 2,2\text{mm}$

#### 7.1.4. Largura de patamar de rebarba

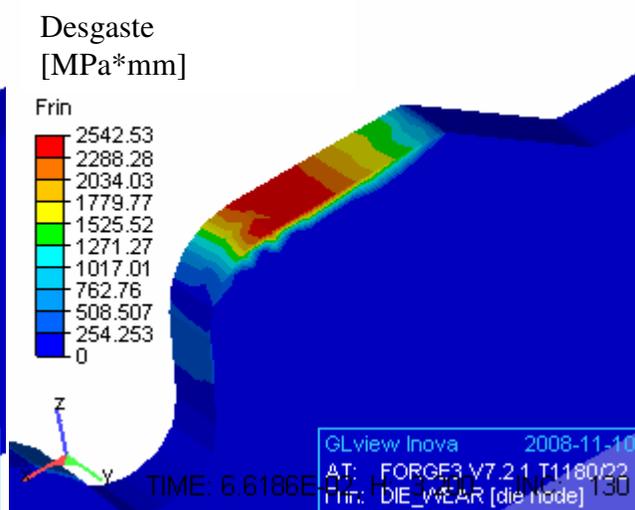
Quanto maior a largura do patamar de rebarba maior será a área de atrito do forjado quando escoar nesta região, aumentando desta forma a força de carregamento, tensão normal e desgaste abrasivo.

A largura do patamar de rebarba influi diretamente na área de contato que o material percorre, aumentando sua resistência de atrito para escoar e aumentando a força de carregamento além de aumentar o volume de cavidade interna e influenciar no comprimento final de rebarba.

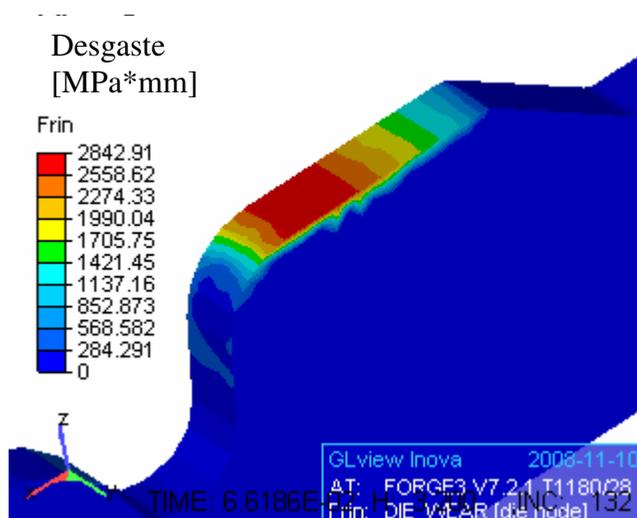
A evolução do desgaste abrasivo é mostrada nas Figuras 7.10 a 7.12. Pode-se notar que além dos valores absolutos do desgaste no patamar de rebarba aumentarem com maiores valores de patamares de rebarba a extensão do desgaste abrasivo também aumenta, levando a problemas ainda mais sérios pela extensão do desgaste abrasivo.



**Figura 7.10:** Desgaste abrasivo,  $l= 10,8\text{mm}$



**Figura 7.11:** Desgaste abrasivo,  $l= 12,8\text{mm}$



**Figura 7.12:** Desgaste abrasivo,  $l= 14,8\text{mm}$

### 7.1.5. Raio de Boca

Uma modificação do Raio de Boca afeta o volume de cavidade interna levando a uma variação do volume de material que deve escoar pelo patamar de rebarba no momento em que a cavidade é preenchida e os valores do desgaste e força de carregamento aumentam como se percebe nas Figuras 7.13, 7.14 e 7.15, nas quais um maior valor do Raio de Boca diminui a extensão do valor máximo para o desgaste.

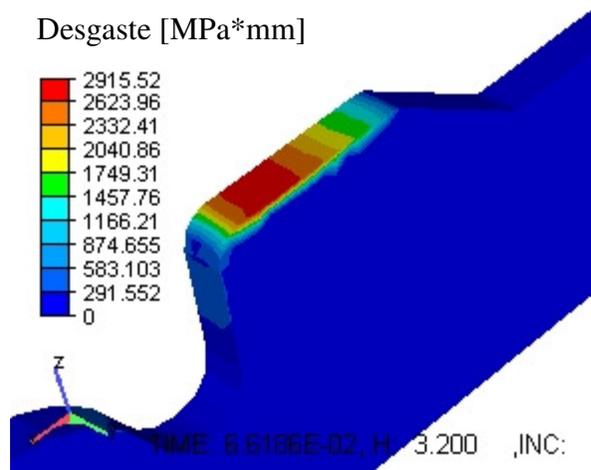


Figura 7.13: Desgaste abrasivo, Rb= 2,03 mm

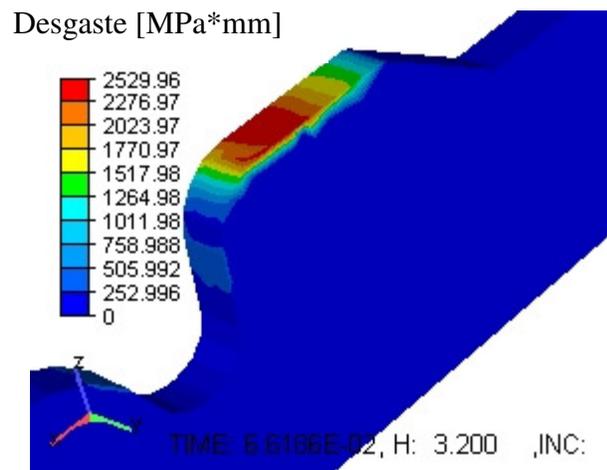


Figura 7.14: Desgaste abrasivo, Rb= 4,05 mm

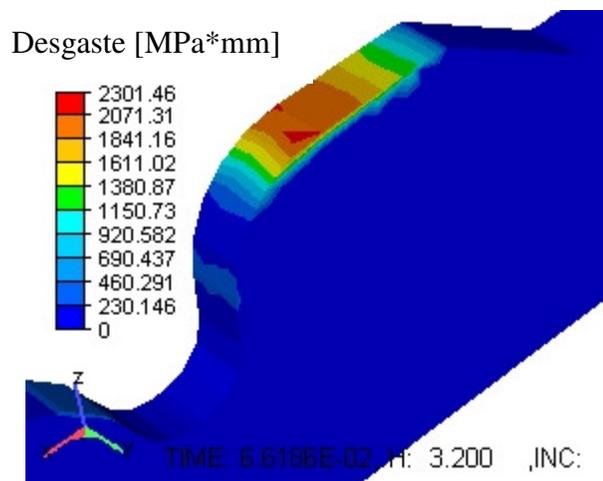


Figura 7.15: Desgaste abrasivo, Rb= 6,08 mm

### 7.1.6. Altura máxima da seção

Analisando o processo de forjamento nas simulações pode-se afirmar que quanto maior a altura da seção, maior é a tendência do material subir por extrusão tendendo a preencher a matriz, retardando a passagem pelas frestas da rebarba e aumentando o volume de cavidade interna das matrizes que por fim acarretará em uma menor quantidade de material passando pelo patamar de rebarba. Por outro lado existem limites, pois caso a altura seja muito grande o material não preencherá toda a cavidade ocasionando falhas como mostrado na Seção 6.2.3. As Figura 7.16 a 7.18 mostram o decréscimo do desgaste em função do aumento da altura máxima da seção.

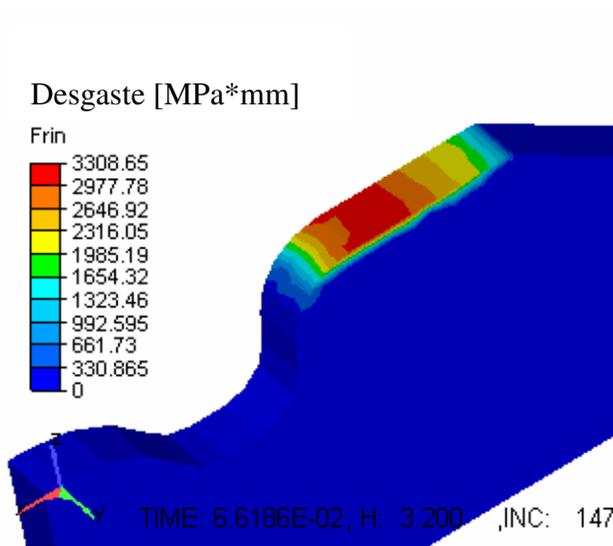


Figura 7.16: Desgaste abrasivo, h= 7,73 mm

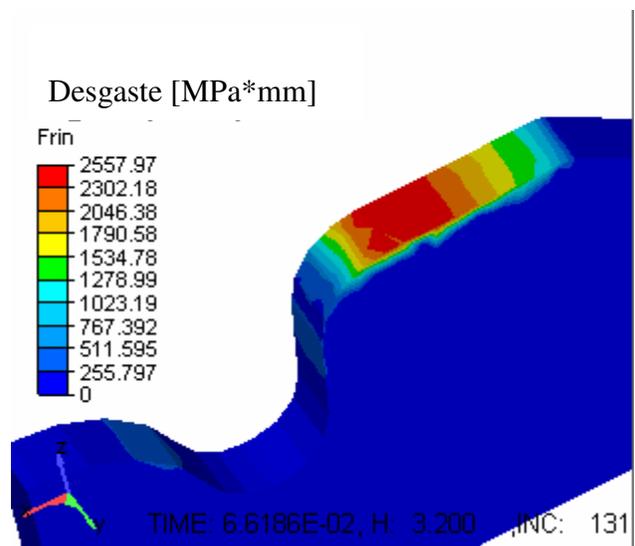


Figura 7.17: Desgaste abrasivo, h= 10,31 mm

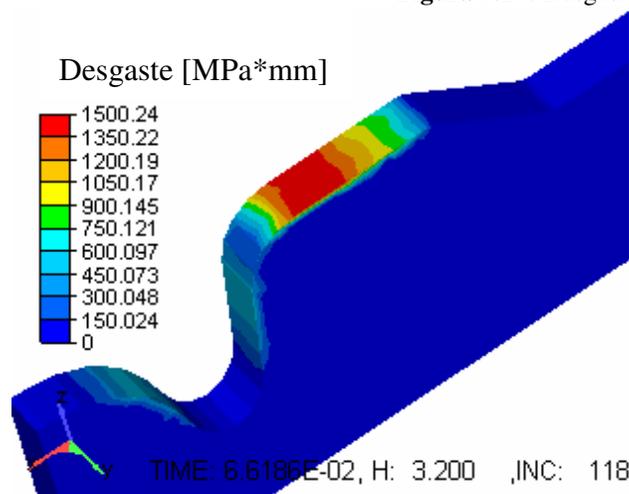


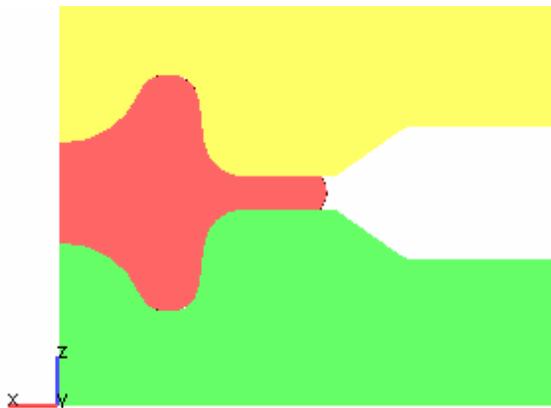
Figura 7.18: Desgaste abrasivo, h= 12,89 mm

### 7.1.7. Diâmetro do forjado

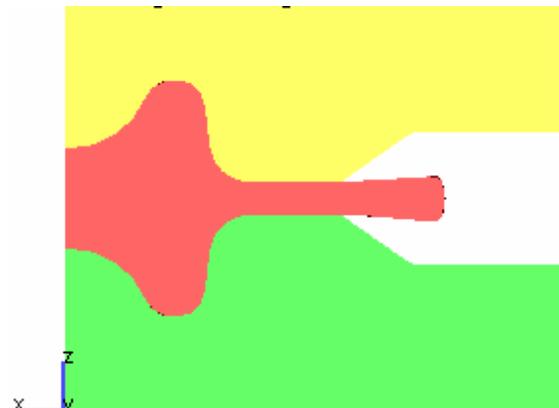
Como visto anteriormente o volume de cavidade interna é um importante parâmetro para o desgaste abrasivo e força de carregamento. Contudo uma modificação do volume inicial da geratriz também faz com que haja variações no volume de material dentro das matrizes.

Assim menores diâmetros da geratriz levam a um processo mais otimizado e quase a com sua forma final (*NEAR NET SHAPE*) ou um processo sem rebarba (*FLASHLESS*) do produto forjado final, levando a menores valores de desgaste e aumento da vida útil do ferramental. Além de diminuir a matéria-prima utilizada e processos de usinagem.

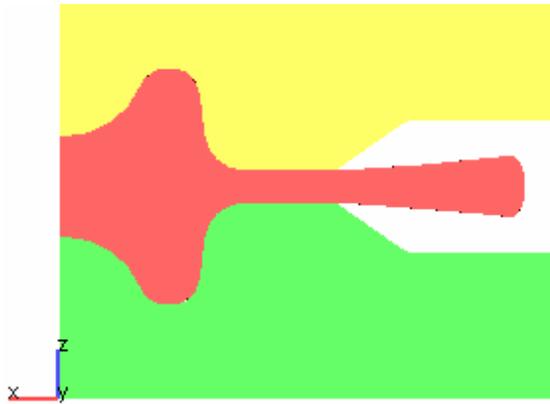
As Figuras 7.19, 7.20 e 7.21 ilustram o formato final do produto para diferentes volumes e diâmetros das geratrizes cilíndricas iniciais com a mesma espessura de rebarba. Pode-se verificar a sua significância para o comprimento final da largura de rebarba.



**Figura 7.19:** Diâmetro da geratriz ( $d$ ) = 27,6 mm,  
 $e=3,2\text{mm}$

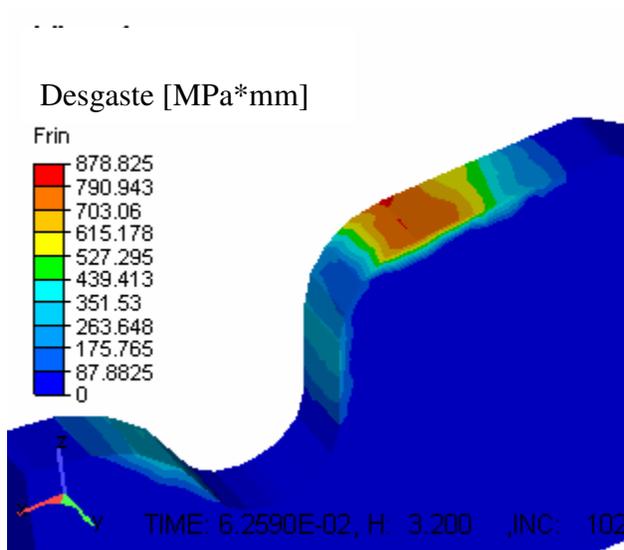


**Figura 7.20:** Diâmetro da geratriz ( $d$ ) = 29,6 mm,  
 $e=3,2\text{mm}$

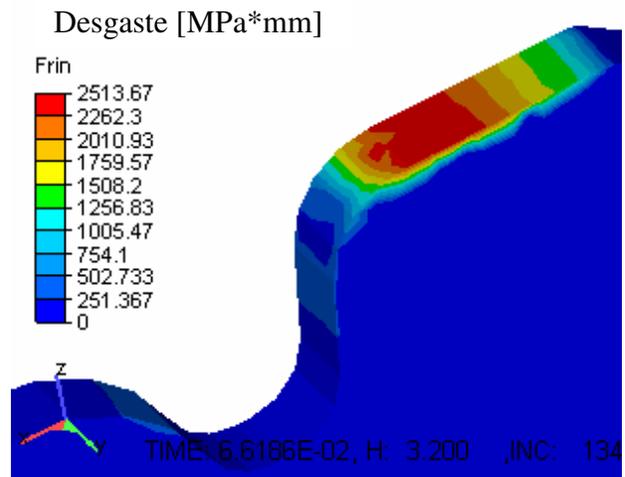


**Figura 7.21:** Diâmetro da geratriz ( $d$ ) = 31,6 mm,  $e=3,2$ mm.

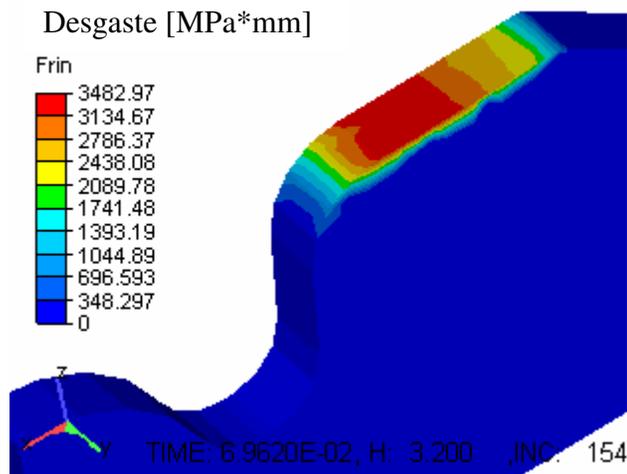
As Figuras 7.22, 7.23 e 7.24 mostram os diferentes valores do desgaste superficial nas matrizes inferiores com o aumento do diâmetro inicial da geratriz para um forjamento com 3,2 milímetros de rebarba nos quais pode-se verificar a modificação no valor do desgaste e sua extensão superficial.



**Figura 7.22:** Desgaste abrasivo,  $d= 27,6$  mm,  $e=3,2$ mm.



**Figura 7.23:** Desgaste abrasivo,  $d= 29,6$  mm,  $e=3,2$ mm.



**Figura 7.24:** Desgaste abrasivo,  $d= 31,6$  mm,  $e=3,2$ mm.

## 7.2. Correlação Desgaste x Largura de Rebarba

A partir da somatória de todos os resultados descritos na Seção 6.2 que possuem modificações exclusivamente de geometria do desenho das matrizes, ou seja, sem modificações nas temperaturas e volume inicial da geratriz, têm-se noventa e seis valores de desgaste com uma dada largura de rebarba, que se somados aos trinta e dois da Seção 6.1 resultam em cento e vinte e oito dados, o que poderá confirmar a hipótese da correlação Largura de rebarba e Desgaste de matrizes.

A Figura 7.25 confirma esta hipótese, podendo-se notar claramente uma correlação entre ambos os objetos de estudo desta seção. Nota-se uma relação quase exponencial entre os dois parâmetros e também que maiores valores do comprimento total de rebarba gera maiores desgastes nas matrizes, o que é de se esperar uma vez que maiores comprimentos de rebarba são gerados com menores volumes de cavidade que, por sua vez, geram maiores velocidades tangenciais no patamar de rebarba e por fim afetam diretamente o desgaste abrasivo.

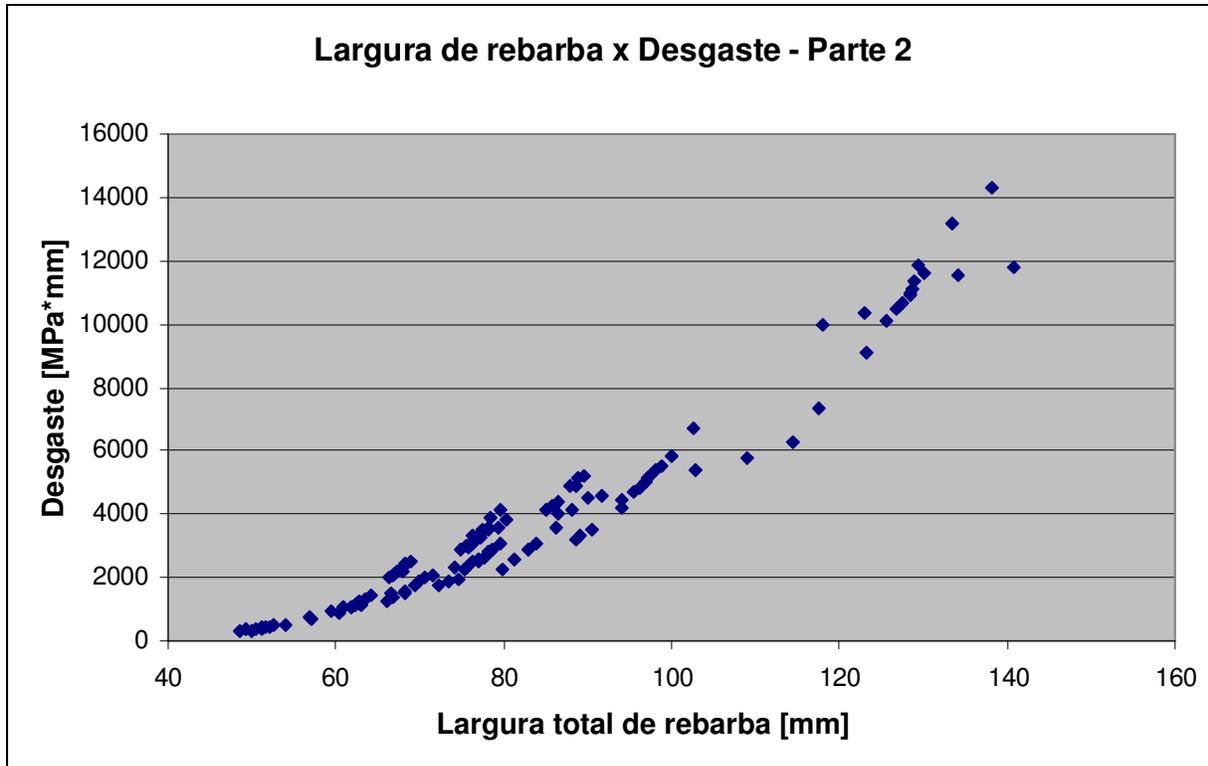
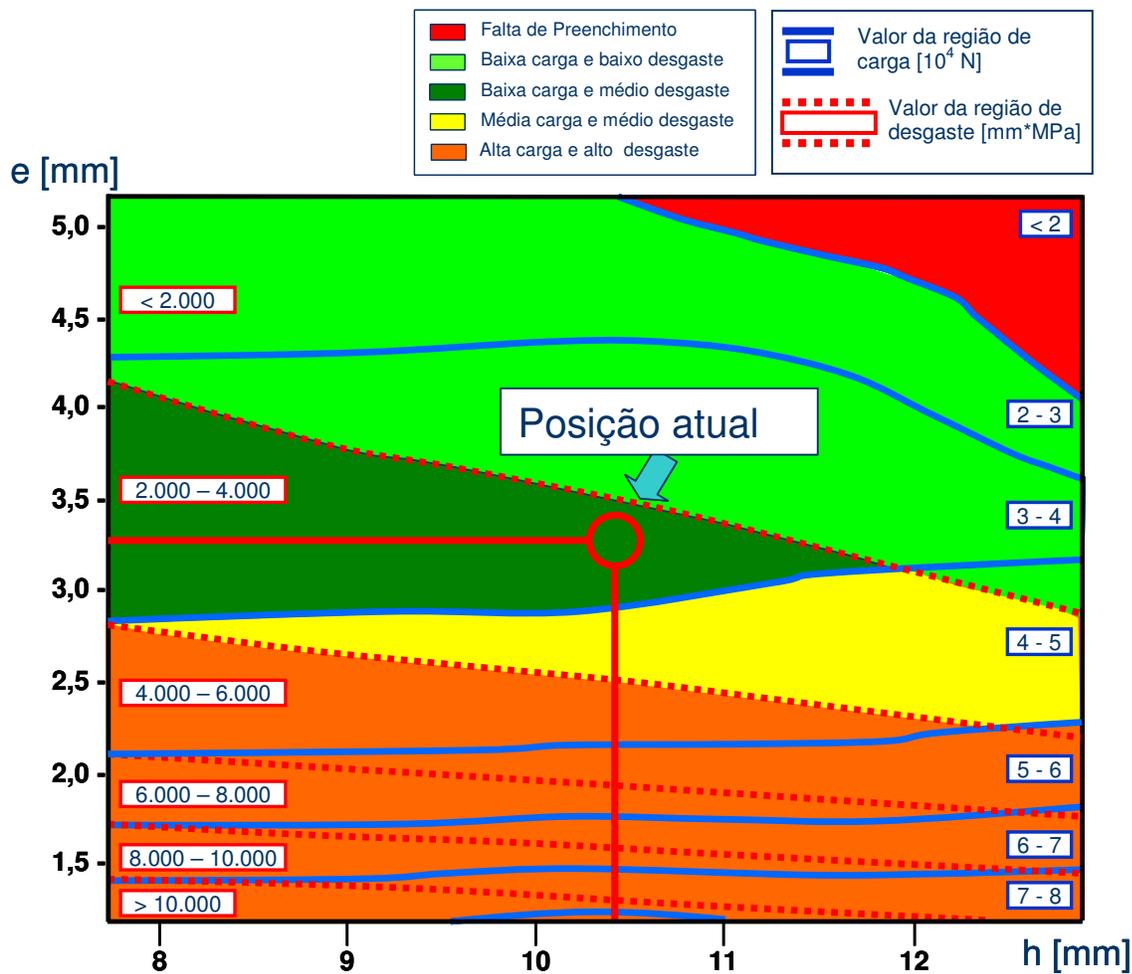


Figura 7.25: Correlação largura total de rebarba e desgaste, parte 2.

### 7.3. Mapa de otimização de processo

Os dois parâmetros mais influentes no processo, além da temperatura de forjamento são também o Diâmetro do forjado, Altura da seção e Espessura de rebarba. Estes dois últimos são os únicos parâmetros onde houve falhas quando se variou a espessura de rebarba. Em todos esses casos, nota-se nos Anexos D e F, que a falha de preenchimento ocorre quando a carga é reduzida drasticamente. Assim podem-se montar mapas para o processo de otimização do forjamento desses casos em função da carga e do desgaste, sendo a força de carregamento o limitante para o preenchimento da cavidade e qualidade do processo de forjamento.

Sobrepondo-se os gráficos de curva de nível para o desgaste abrasivo em função da Altura da seção e da Espessura de rebarba, Figuras 6.27 e 6.29 respectivamente, é possível verificar regiões onde o processo encontra-se numa região otimizada com baixa carga, porém sem falhas e com baixos valores para o desgaste.



**Figura 7.26:** Mapa de otimização para altura da seção e espessura de rebarba.

Na Figura 7.26 as linhas azuis são referentes aos valores da carga de carregamento enquanto as linhas tracejadas vermelhas são os valores para o desgaste abrasivo.

Simbolizando de forma pictórica, as diferentes regiões são mostradas em diferentes cores em função da combinação carga e desgaste.

Desta forma pode-se notar que o processo atual pode melhorar atingindo a zona verde claro (baixa carga e baixo desgaste) através de um aumento da espessura ou aumento da altura da seção sem atingir zonas perigosas ao processo, com falhas (zona vermelha).

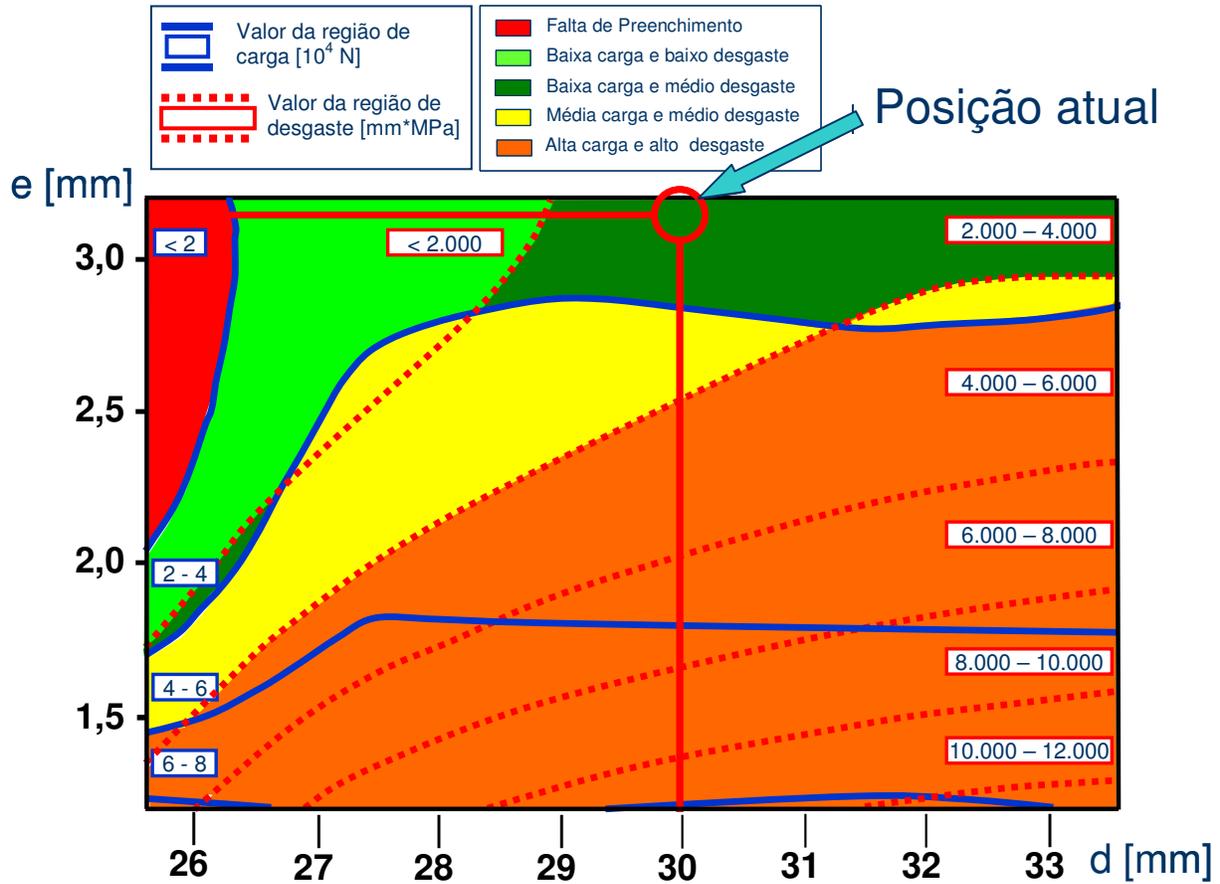


Figura 7.27: Mapa de otimização para diâmetro da geratriz e espessura de rebarba.

Novamente sobrepondo-se as curvas de níveis para a carga, Figura 6.36, e desgaste abrasivo, Figura 6.38, tem-se que para diferentes valores do diâmetro da geratriz e espessura de rebarba a Figura 7.27. Na qual novamente pode-se verificar visualmente que o processo é capaz de atingir zonas otimizadas (verde claro), sem correr riscos quanto à qualidade (zona vermelha).

## Capítulo 8

### Conclusões

Uma vez que a cavidade da matriz é preenchida, somente haverá fluxo de material por entre o patamar de rebarba. Nesta região existe uma elevada tensão normal em conjunto com uma elevada velocidade tangencial, fatores cruciais para o surgimento do desgaste abrasivo e de falhas na região. O tempo de contato na região também é elevado fazendo com estes três elementos, tensão normal, velocidade tangencial e tempo de contato sejam muito importantes para a vida útil das matrizes.

Após a análise feita neste trabalho pode-se concluir que uma modificação na temperatura de forjamento, espessura de rebarba, largura de patamar de rebarba, altura da seção maior e diâmetro da geratriz podem levar a modificações na vida útil da ferramenta. Sendo que os parâmetros geométricos que mais influenciam no processo de desgaste de matrizes são aqueles que mais modificam o volume de cavidade interna das matrizes.

Uma conclusão a ser feita a partir dos dados obtidos é que o forjamento em matrizes fechadas em especial para o forjamento de bielas na seção da alma deve ocorrer até o momento em que há preenchimento total da matriz, pois após este ponto o desgaste aumentará progressivamente assim como a força de forjamento. Sendo assim, a força de carregamento é um indicativo do preenchimento de cavidade e na previsão da qualidade superficial da peça forjada.

Alterações na geometria das matrizes afetam o volume de cavidade interna e fazem com que o material a preencha em diferentes tempos e com diferentes espessuras.

O processo de recalque na haste durante o forjamento de bielas deve ser levado em consideração pois a variação de volume inicial da geratriz nesta região central também afetará o momento em que a cavidade é preenchida, no processo final de desgaste e também na largura total de rebarba. Contudo a diminuição do diâmetro deve ser analisada para o processo como um todo, pois podem surgir áreas defeituosas na região de transição da haste para as cabeças da geratriz que posteriormente formarão os olhais das bielas. O estudo deve ser analisado através de simulações numéricas da biela como um todo, levando por fim a um trabalho mais árduo e com simulações mais demoradas. Entretanto uma diminuição no diâmetro da geratriz economizaria matéria-prima levando o produto forjado a uma redução de preço.

Pode-se assumir que para um processo de desgaste abrasivo de matrizes de forjamento a quente de bielas considerado neste trabalho e no qual o raio de boca tende a aumentar por um processo natural de desgaste gerando pequenas cavidades na superfície e por fim levando a um aumento de seu valor para raios maiores, não haverá falha de preenchimento de cavidade como visto na seção 6.2.2, onde é mostrado que para diferentes valores de raio e espessura não há influência no acabamento superficial da alma da biela. Assim as matrizes quando apresentarem sinais de deteriorização por desgaste abrasivo no raio de canto na região da alma de biela, estas podem ser mantidas por mais tempo em utilização sem a necessidade de trocas prematuras de ferramental quando analisado do ponto de vista do preenchimento de cavidade na região da alma da biela.

Um método alternativo para se avaliar o desgaste de matrizes é através da largura de rebarba que apesar de não apresentar modificação para a temperatura, possui correlação direta com todos os outros parâmetros. Ou seja, caso a temperatura não se modifique e apenas parâmetros geométricos sejam modificados temos a largura total de rebarba como medida para o desgaste: quanto maior seu valor, maior o processo de desgaste abrasivo presente no processo de forjamento de alma de bielas.

Por fim, conclui-se que a análise do desgaste em matrizes é um processo lento e deve-se ter em mente todos os mecanismos para uma melhor compreensão da degradação das ferramentas.

Através da definição de um corpo de prova ideal que retrate o processo e as simulações, podem-se elaborar ensaios experimentais para a validação das propostas de melhoria.

## **8.1. Recomendações Futuras**

Neste trabalho foram considerados apenas parâmetros que influenciam a carga de forjamento, tensão normal e desgaste abrasivo, contudo qualquer modificação na geometria da cavidade das matrizes de conformação gerará uma modificação no grau de deformação, especialmente para modificações na espessura de rebarba. Diferentes graus de deformação e escoamento, com alterações dos parâmetros aqui estudados, levam a alterações estruturais do aço bem como alterações no padrão de fibramento da estrutura.

Em casos de uma maior espessura de rebarba no forjamento da pré-forma (fato que aumentará a vida útil das matrizes desta etapa diminuindo o desgaste consideravelmente), o processo seguinte de calibração ou forjamento final deverá ter um maior grau de deformação para manter as especificações do projeto da biela. Após o forjamento na primeira etapa de forjamento, a pré-forma, e seguindo para a segunda etapa, matrizes finais de calibração, a geratriz se resfria por convecção térmica (ar) e por condução térmica (contato com as matrizes), com excessiva perda de calor e com maiores taxas de deformação na segunda etapa, o material poderá apresentar alterações em sua dureza, algo que pode ser benéfico para o projeto da biela. Contudo o fibramento deve ser mantido em vista e sob controle para assegurar o padrão e qualidade das normas que regem o produto.

Assim, o estudo da micro-estrutura e fibramento resultante das modificações no processo de pré-forjamento são de extrema importância para assegurar um produto final de qualidade e com as especificações exigidas.

## Referências Bibliográficas

- [1] ARCHARD, J. F., *Contact and Rubbing of flat surfaces*. Journal of applied physics 981-988, 1953.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, *Curso de Engenharia de Forjamento*, 2007.
- [3] ASM Handbook, *Forming and Forging*, Vol. 14. ASM International, 1993.
- [4] BABU, S. *A Material Based Approach To Creating Wear Resistant Surfaces For Hot Forging*. Tese de Doutorado. Ohio State University, 2004.
- [5] BAYER, RAYMOND G. *Wear Analysis for Engineers*. Vestal, New York: HNB Publishing, 2002.
- [6] BEHRENS, B., A., *Finite Element Analysis Die Wear in Hot Forging Processes*. CIRP Annals, Manufacturing Technology 57, p. 305-308, 2008.
- [7] BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. *Statistics for Experiments An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*. 1978.
- [8] BRESCIANI FILHO, E., ZAVAGLIA C. A. C., BUTTON, S. T., *Conformação Plástica dos Metais*, Editora da Unicamp, 4ª edição, 1996.

- [9] BUSSAB, WILTON DE O., MORETTIN, P. A., *Estatística Básica*. Editora Saraiva, 5ª edição, 2006.
- [10] CAMINAGA, C., *Estudo da conformabilidade Plástica do Aço Microligado 27MnSiVS6 Forjado por Ausforming*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- [11] CARSÍ, M., PENALBA, F., LARREA, M.,T., RUANO, O., A., *Influence of strain rate on the microstructure of a termo-mechanically processed medium carbon microalloyed steel*, Materials Science & Engineering A, vol. 234-236, p.703-706, 1997.
- [12] CSER, L., GEISER, M., LANGE, K., KALS, J., HANSEL, M. *Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming*. Proceedings of Mechanical Engineers, Vol. 207, pp. 223-239, 1993.
- [13] DIETER, G., E., *Workability Testing Techniques*, American Society for Metals, 1984.
- [14] DOEGE, E. *Aspects of Wear Prediction in Precision Forging*. Proceedings of Institute of Mechanical Engineers, Vol. 208, pp. 111-119, 1994.
- [15] DOEDGE, E., GROCHE, P., BOBKE, TH., *Application of adhesion theory to friction and wear processes*, in: Proceedings of the Third International Conference on Technology of Plasticity, vol. 1, Kyoto, July 1990, pp. 27-32.
- [16] DOEGE, E., MELCHING, R., KOWALLICK, G. *Investigation into the Behavior of Lubricants and the Wear Resistance of Die Materials in Hot and Warm Forging*. J. MEch. Working Technology, Vol. 2, pp. 129, 1978.

- [17] FERNÁNDEZ, A., I., URANGA, P., LÓPEZ, B., RODRIGUES-IBABE, J., M., *Dynamic recrystallization behavior covering a wide austenite grain size in Nb and Nb-Ti microalloyed steels*, Materials Science & Engineering A, vol. 361, p.367-376. 2003.
- [18] FU, X. P. e DEAN, T.A. *Past developments, current applications and trends in the cross wedge rolling process*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 33, n. 3, p. 367-400, 1993.
- [19] GROBASKI, T. C. *Preliminary research for the development of a hot forging die life prediction model*. Dissertação de Mestrado, Ohio State University, 2004.
- [20] KANG, J.H., PARK, I. W., JAE, J. S., KANG, S. S., *A study on a die wear model considering thermal softening: (I) Construction of the wear mode*. Journal of Material Processing Technology 96 (1999) p.53-58.
- [21] KANG, J.H., PARK, I. W., JAE, J. S., KANG, S. S., *A study on a die wear model considering thermal softening: (II) Application of the suggested wear model*. Journal of Material Processing Technology 94 (1999) p.183-188.
- [22] KANNAPPAN, A., *Wear in Forging Dies – A review of world experience*. Metal Forming 1970, p.6-14, 21.
- [23] MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 3ª Edição, 1991.
- [24] NORTON, R. L. *Projeto de máquinas, uma abordagem integrada*, Editora Bookman, 2ª edição, 2003.
- [25] OERLIKON BALZERS COATING, *Processos de Nitretação*, Março de 2007.

- [26] PANJAN, P., URANKAR, I., NAVINSEK, B., TERCELJ, M., TURK, R., CEKADA, M., LESKOVSEK, V. *Improvement of hot forging tools with duplex treatment*, Surface & Coatings Technology, vol. 151-152, p.505-509. 2002.
- [27] SAILESH BABU, M. S. *A material based approach to creating wear resistant surfaces for hot forging*. Tese de Doutorado, Ohio University, 2004.
- [28] SUMMERVILLE, E., VENKATESAN, K., SUBRAMANIAN, C. *Wear Processes in Hot Forging Press Tools*. Elsevier Database, 1996.
- [29] THE A TO Z OF MATERIALS, <http://www.azom.com>, acesso em Outubro 2008.
- [30] THYSSENKRUPP METALÚRGICA CAMPO LIMPO PTA. Banco de dados da empresa, com a devida autorização para inclusão nesta dissertação, 2008.
- [31] TRANSVALOR S.A. *Manuais de Utilização*. Forge 2007.
- [32] TURK, R., PERUS, I., TERCELJ, M. *New starting points for the prediction of tool wear in hot forging*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 1319-1331.

## Anexo A1

Sim. Nº	Fator							Rótulo	Carga [10 <sup>4</sup> N]	Desgaste [MPa*mm]	Tensão Normal [MPa]	T. Normal Compressão [MPa]	Largura rebarba [mm]
	A	B	C	D	E	F	G						
1	-	-	-	-	-	-	-	(-1)	32,167	4296,73	25,1671	-920,233	85,8928
2	+	-	-	-	-	-	-	a	32,025	4138,13	21,9472	-898,369	84,952
3	-	+	-	-	-	-	-	b	32,116	4371,96	27,7498	-912,555	86,5858
4	+	+	-	-	-	-	-	ab	32,250	4292,49	27,5397	-909,167	85,75
5	-	-	+	-	-	-	-	c	28,401	2979,9	14,5165	-824,804	75,6926
6	+	-	+	-	-	-	-	ac	28,458	2900,07	28,3103	-805,44	74,752
7	-	+	+	-	-	-	-	bc	28,347	3067,41	12,6859	-815,282	76,2862
8	+	+	+	-	-	-	-	abc	28,407	3022,42	20,3488	-830,137	75,4614
9	-	-	-	+	-	-	-	d	38,058	5127,32	19,4333	-1022,74	88,8046
10	+	-	-	+	-	-	-	ad	38,012	4876,87	19,0442	-1007,69	87,8006
11	-	+	-	+	-	-	-	bd	38,090	5218,63	32,58	-998,348	89,5034
12	+	+	-	+	-	-	-	abd	37,801	4908,95	32,2477	-991,801	88,5348
13	-	-	+	+	-	-	-	cd	33,547	3443,29	23,2623	-895,223	77,4562
14	+	-	+	+	-	-	-	acd	33,155	3207,71	26,0152	-911,693	76,5534
15	-	+	+	+	-	-	-	bcd	33,425	3507,37	23,8045	-904,325	78,1496
16	+	+	+	+	-	-	-	abcd	33,169	3277,53	23,8009	-910,755	77,2704
17	-	-	-	-	+	-	-	e	33,663	3500,22	16,1633	-977,12	77,4726
18	+	-	-	-	+	-	-	ae	33,589	3354,11	20,1017	-882,282	76,3746
19	-	+	-	-	+	-	-	be	33,540	3558,08	21,2574	-977,419	78,1152
20	+	+	-	-	+	-	-	abe	33,165	3357,71	32,8996	-928,664	77,1884
21	-	-	+	-	+	-	-	ce	29,822	2131,44	17,7676	-852,463	67,152
22	+	-	+	-	+	-	-	ace	29,683	1992,68	19,9037	-875,482	66,2288
23	-	+	+	-	+	-	-	bce	29,612	2224,98	10,489	-860,484	67,9472
24	+	+	+	-	+	-	-	abce	29,417	2077,16	25,8764	-833,718	66,873
25	-	-	-	+	+	-	-	de	39,632	4148,69	23,5493	-1004,02	79,5238
26	+	-	-	+	+	-	-	ade	39,657	3875,9	14,9408	-1033,15	78,471
27	-	+	-	+	+	-	-	bde	39,708	3817,18	18,459	-1045,54	80,238
28	+	+	-	+	+	-	-	abde	39,345	3581,73	24,6748	-1034,01	79,2742
29	-	-	+	+	+	-	-	cde	35,084	2428,98	12,7004	-886,29	68,2342
30	+	-	+	+	+	-	-	acde	34,951	2209,9	29,589	-872,7	67,179
31	-	+	+	+	+	-	-	bcde	34,839	2502,43	25,0163	-890,309	68,9858
32	+	+	+	+	+	-	-	abcde	34,654	2315,24	15,2003	-906,965	68,0002

Os valores para os fatores superiores e inferiores encontram-se na Tabela 4.2.

## Anexo A2

Sim. Nº	Fator							Rótulo	Carga [10 <sup>4</sup> N]	Desgaste [MPa*mm]	Tensão Normal [MPa]	T. Normal Compressão [MPa]	Largura rebarba [mm]
	A	B	C	D	E	F	G						
33	-	-	-	-	-	+	-	f	18,735	2413,16	5,12396	-512,153	85,9848
34	+	-	-	-	-	+	-	af	18,589	2293,07	10,3867	-471,4	84,9754
35	-	+	-	-	-	+	-	bf	18,789	2457,37	11,093	-499,15	86,5398
36	+	+	-	-	-	+	-	abf	18,745	2323,75	15,1341	-482,22	85,6944
37	-	-	+	-	-	+	-	cf	16,210	1636,47	6,60153	-444,523	75,6208
38	+	-	+	-	-	+	-	acf	16,031	1564,7	15,1517	-455,754	74,8368
39	-	+	+	-	-	+	-	bcf	16,216	1679,45	10,2537	-444,989	76,293
40	+	+	+	-	-	+	-	abcf	16,017	1586,66	16,1732	-448,823	75,5188
41	-	-	-	+	-	+	-	df	22,493	2927,17	10,7228	-546,047	88,8324
42	+	-	-	+	-	+	-	adf	22,280	2753,08	5,49554	-569,011	87,8484
43	-	+	-	+	-	+	-	bdf	22,421	2975,04	11,0784	-565,489	89,4414
44	+	+	-	+	-	+	-	abdf	22,174	2833,81	20,4933	-559,86	88,5106
45	-	-	+	+	-	+	-	cdf	19,362	1919,99	12,1881	-502,201	77,5702
46	+	-	+	+	-	+	-	acdf	18,992	1795,34	11,2731	-484,899	76,5674
47	-	+	+	+	-	+	-	bcdf	19,263	1978,1	10,0533	-492,764	78,2504
48	+	+	+	+	-	+	-	abcdf	18,948	1840,66	14,0079	-496,281	77,236
49	-	-	-	-	+	+	-	ef	19,380	1954,22	12,8434	-511,391	77,4132
50	+	-	-	-	+	+	-	aef	19,071	1814,97	12,0089	-504,259	76,4356
51	-	+	-	-	+	+	-	bef	19,114	1994,13	9,77417	-555,041	78,1942
52	+	+	-	-	+	+	-	abef	18,942	1877,82	12,3198	-520,802	77,1828
53	-	-	+	-	+	+	-	cef	16,533	1161,89	8,40649	-468,121	67,1288
54	+	-	+	-	+	+	-	acef	16,352	1101,38	17,5388	-452,635	66,2726
55	-	+	+	-	+	+	-	bcef	16,575	1212,64	8,09189	-445,152	68,0284
56	+	+	+	-	+	+	-	abcef	16,396	1118,68	16,7545	-441,253	66,9158
57	-	-	-	+	+	+	-	def	23,139	2357,84	14,038	-570,074	79,565
58	+	-	-	+	+	+	-	adef	22,920	2193,39	8,84869	-572,413	78,3908
59	-	+	-	+	+	+	-	bdef	22,924	2406,24	6,0528	-573,595	80,4196
60	+	+	-	+	+	+	-	abdef	22,897	2254,87	13,3641	-568,801	79,3152
61	-	-	+	+	+	+	-	cdef	19,735	1328,85	14,01	-495,974	68,3168
62	+	-	+	+	+	+	-	acdef	19,474	1198,07	14,01	-484,223	67,1542
63	-	+	+	+	+	+	-	bcdef	19,745	1389,27	8,09045	-512,064	68,963
64	+	+	+	+	+	+	-	abcdef	19,500	1270,43	9,87769	-481,219	67,9868

Os valores para os fatores superiores e inferiores encontram-se na Tabela 4.2.

## Anexo A3

Sim. Nº	Fator							Rótulo	Carga [10 <sup>4</sup> N]	Desgaste [MPa*mm]	Tensão Normal [MPa]	T. Normal Compressão [MPa]	Largura rebarba [mm]
	A	B	C	D	E	F	G						
65	-	-	-	-	-	-	+	g	31,706	4264,18	8,6886	-907,683	85,8692
66	+	-	-	-	-	-	+	ag	31,789	4116,87	18,2398	-886,316	84,9686
67	-	+	-	-	-	-	+	bg	31,765	4317,52	36,6518	-904,477	86,5604
68	+	+	-	-	-	-	+	abg	31,649	4239,29	23,1376	-888,575	85,6648
69	-	-	+	-	-	-	+	cg	28,486	2986,39	28,1606	-851,445	75,667
70	+	-	+	-	-	-	+	acg	28,353	2874,9	25,8629	-803,559	74,727
71	-	+	+	-	-	-	+	bcg	28,174	3026,65	24,793	-809,719	76,3198
72	+	+	+	-	-	-	+	abcg	28,140	2914,36	30,5493	-797,202	75,4364
73	-	-	-	+	-	-	+	dg	38,461	5080	27,8595	-992,678	88,7938
74	+	-	-	+	-	-	+	adg	37,779	4878,52	21,4751	-1006,45	87,7576
75	-	+	-	+	-	-	+	bdg	37,985	5157,39	26,6902	-993,435	89,5346
76	+	+	-	+	-	-	+	abdg	37,612	4899,86	16,4269	-1031,62	88,4876
77	-	-	+	+	-	-	+	cdg	33,447	3469,08	24,104	-878,591	77,541
78	+	-	+	+	-	-	+	acdg	33,105	3228,36	23,1442	-855,612	76,5778
79	-	+	+	+	-	-	+	bcdg	33,332	3487,02	17,4377	-903,366	78,154
80	+	+	+	+	-	-	+	abcdg	33,110	3265,86	22,2148	-846,287	77,2594
81	-	-	-	-	+	-	+	eg	33,325	3486,61	28,5358	-951,506	77,4698
82	+	-	-	-	+	-	+	aeg	33,154	3255,55	20,0645	-926,999	76,4566
83	-	+	-	-	+	-	+	beg	33,191	3557,4	17,0839	-954,523	78,0914
84	+	+	-	-	+	-	+	abeg	32,794	3317,82	13,0974	-897,901	77,1538
85	-	-	+	-	+	-	+	ceg	29,435	2097,43	36,6426	-838,943	67,226
86	+	-	+	-	+	-	+	aceg	29,352	1976,11	20,763	-807,523	66,2234
87	-	+	+	-	+	-	+	bceg	29,587	2182,41	30,7599	-816,498	67,9116
88	+	+	+	-	+	-	+	abceg	29,209	2077,63	27,6823	-805,663	66,899
89	-	-	-	+	+	-	+	deg	39,690	4107,39	21,2242	-1029,29	79,5926
90	+	-	-	+	+	-	+	adeg	39,005	3873,75	21,2241	-1017,53	78,3856
91	-	+	-	+	+	-	+	bdeg	39,123	4215,23	22,9206	-1037,98	80,272
92	+	+	-	+	+	-	+	abdeg	39,090	4002,18	27,7877	-1038,16	79,2058
93	-	-	+	+	+	-	+	cdeg	35,030	2386,24	24,6018	-921,216	68,295
94	+	-	+	+	+	-	+	acdeg	34,680	2120,69	19,2067	-871,945	67,258
95	-	+	+	+	+	-	+	bcdeg	34,806	2517,54	19,8931	-862,411	69,0124
96	+	+	+	+	+	-	+	abcdeg	34,793	2295,34	26,2098	-830,56	67,9484

Os valores para os fatores superiores e inferiores encontram-se na Tabela 4.2.

## Anexo A4

Sim. Nº	Fator							Rótulo	Carga [10 <sup>4</sup> N]	Desgaste [MPa*mm]	Tensão Normal [MPa]	T. Normal Compressão [MPa]	Largura rebarba [mm]
	A	B	C	D	E	F	G						
97	-	-	-	-	-	+	+	fg	18,548	2411,11	12,997	-504,521	85,866
98	+	-	-	-	-	+	+	afg	18,661	2330,06	12,953	-501,217	85,043
99	-	+	-	-	-	+	+	bfg	18,722	2436,42	9,17932	-508,844	86,544
100	+	+	-	-	-	+	+	abfg	18,523	2321,95	12,2028	-482,155	85,7418
101	-	-	+	-	-	+	+	cfg	16,034	1628,09	11,1068	-452,882	75,6862
102	+	-	+	-	-	+	+	acfg	15,868	1557,62	14,2793	-448,221	74,7946
103	-	+	+	-	-	+	+	bcfg	15,984	1673,06	6,50208	-470,313	76,3692
104	+	+	+	-	-	+	+	abcfg	15,932	1580	0	-460	75,4562
105	-	-	-	+	-	+	+	dfg	22,341	2906,76	12,8267	-598,6002	88,845
106	+	-	-	+	-	+	+	adfg	22,179	2751,57	9,37189	-553,693	87,8312
107	-	+	-	+	-	+	+	bdfg	22,410	2976,12	14,823	-556,883	89,5268
108	+	+	-	+	-	+	+	abdfg	22,072	2810,66	12,9298	-546,527	88,54
109	-	-	+	+	-	+	+	cdfg	19,182	1929,39	15,5507	-483,006	77,4966
110	+	-	+	+	-	+	+	acdfg	18,870	1798,21	9,5658	-486,36	76,5522
111	-	+	+	+	-	+	+	bcdfg	19,047	1941,45	7,02548	-499,214	78,1912
112	+	+	+	+	-	+	+	abcdfg	18,880	1831,64	14,3101	-475,543	77,3126
113	-	-	-	-	+	+	+	efg	18,880	1935,61	0	-500,615	77,4604
114	+	-	-	-	+	+	+	aefg	18,867	1809,31	13,3529	-509,744	76,4816
115	-	+	-	-	+	+	+	befg	19,140	1986,28	11,257	-510,046	78,259
116	+	+	-	-	+	+	+	abefg	18,852	1864,04	13,7326	-513,072	77,1394
117	-	-	+	-	+	+	+	cefg	16,550	1188,95	7,26746	-440,466	67,2586
118	+	-	+	-	+	+	+	acefg	16,177	1073,43	14,8872	-430,012	66,1712
119	-	+	+	-	+	+	+	bcefg	16,583	1209,35	11,3488	-445,864	67,9712
120	+	+	+	-	+	+	+	abcefg	16,389	1114,33	14,6577	-471,221	66,878
121	-	-	-	+	+	+	+	defg	23,035	2349,41	14,0383	-599,357	79,5054
122	+	-	-	+	+	+	+	adefg	22,921	2188,15	14,3516	-566,895	78,4614
123	-	+	-	+	+	+	+	bdefg	22,829	2409,25	10,8749	-587,388	80,3498
124	+	+	-	+	+	+	+	abdefg	22,732	2261,29	6,86694	-561,482	79,2792
125	-	-	+	+	+	+	+	cdefg	19,552	1340,05	15,5714	-504,602	68,2442
126	+	-	+	+	+	+	+	acdefg	19,475	1209,31	15,5714	-491,235	67,2018
127	-	+	+	+	+	+	+	bcdefg	19,642	1389,16	13,0225	-484,32	69,0752
128	+	+	+	+	+	+	+	abcdefg	19,354	1246,58	11,9935	-476,294	67,9452

Os valores para os fatores superiores e inferiores encontram-se na Tabela 4.2.

## Anexo B

Sim. Nº	Fator		Carga [10 <sup>4</sup> N]	Desgaste [MPa*mm]	Tensão Normal [MPa]	T. Normal Compressão [MPa]	Largura rebarba [mm]
	L [mm]	E [mm]					
1	7,8	1,2	5,002	6252,51	3,64465	-964,808	114,415
2	7,8	2,2	3,306	3168,9	2,21893	-622,06	88,7254
3	7,8	2,7	2,923	2246,35	18,3925	-594,194	79,8088
4	7,8	3,2	2,575	1745,06	2,95697	-515,958	72,3706
5	7,8	3,7	2,420	1256,2	9,46109	-457,652	66,0326
6	7,8	4,2	2,206	870,804	16,9007	-457,949	60,443
7	8,8	1,2	5,581	7357,07	11,1931	-998,883	117,5164
8	8,8	2,2	3,584	3486,89	10,6788	-652,68	90,5166
9	8,8	2,7	3,201	2583,48	11,9912	-627,096	81,2066
10	8,8	3,2	2,827	1910,95	7,69495	-567,029	73,4
11	8,8	3,7	2,617	1401,19	3,28531	-489,135	66,8626
12	8,8	4,2	2,417	1045,53	9,43619	-510,018	60,9786
13	10,8	1,2	6,769	9081,1	4,36768	-1202,31	123,3396
14	10,8	2,2	4,245	4174,09	9,5033	-748,759	93,9644
15	10,8	2,7	3,725	3047,77	11,5598	-689,351	83,9236
16	10,8	3,2	3,372	2273,66	9,22699	-603,183	75,4192
17	10,8	3,7	3,018	1550,02	0,461609	-523,505	68,2434
18	10,8	4,2	2,793	1086,59	9,00024	-514,679	61,8378
19	12,8	1,2	8,083	11100,2	6,32263	-1244,44	128,7184
20	12,8	2,2	5,008	5164,87	4,14832	-867,923	97,0752
21	12,8	2,7	4,356	3588,24	7,14465	-772,019	86,1846
22	12,8	3,2	3,788	2542,53	3,83704	-664,936	77,0482
23	12,8	3,7	3,456	1752,99	0,638123	-604,313	69,3422
24	12,8	4,2	3,200	1162,57	7,8797	-558,668	62,4536
25	14,8	1,2	9,267	13172,1	3,45227	-1433,06	133,5378
26	14,8	2,2	5,797	5861,85	3,99908	-894,545	100,0022
27	14,8	2,7	4,910	4117,27	11,8369	-775,998	88,2346
28	14,8	3,2	4,363	2842,91	2,83453	-718,915	78,3942
29	14,8	3,7	3,923	1886,84	2,58759	-645,987	69,8184
30	14,8	4,2	3,501	1190,31	2,10889	-614,671	62,7434
31	16,8	1,2	10,347	14304	0,0001	-1412,83	138,2502
32	16,8	2,2	6,623	6725,85	19,2467	-976,577	102,5732
33	16,8	2,7	5,6073	4530,75	10,3075	-886,086	90,037
34	16,8	3,2	4,9658	3064,62	5,34863	-747,81	79,4988
35	16,8	3,7	4,4544	2025,7	10,3922	-699,977	70,5562
36	16,8	4,2	3,4771	1239,22	11,0884	-598,652	62,6894

## Anexo C

Sim. Nº	Fator		Carga [10 <sup>4</sup> N]	Desgaste [MPa*mm]	Tensão Normal [MPa]	T. Normal Compressão [MPa]	Largura rebarba [mm]
	R [mm]	e [mm]					
1	2,03	1,2	7,7154	11636,6	6,44141	-1239,32	130,1458
2	3,04	1,2	8,0702	11889,1	11,3081	-1257,72	129,5078
3	3,54	1,2	7,9805	11328,1	8,96533	-1235,19	128,859
4	4,05	1,2	7,8365	10944,6	2,63843	-1281,11	128,4274
5	4,56	1,2	7,8034	10662,5	10,4601	-1256,89	127,6144
6	5,06	1,2	7,7339	10480,5	7,2301	-1288,56	126,766
7	6,08	1,2	7,6836	10071,1	14,4816	-1198,37	125,5304
8	2,03	2,2	4,8567	5511,76	12,9617	-857,934	98,6986
9	3,04	2,2	5,0808	5398,06	9,25134	-874,177	98,0662
10	3,54	2,2	4,9144	5198,78	8,09271	-840,64	97,489
11	4,05	2,2	5,0747	5017,59	3,07312	-834,64	96,9556
12	4,56	2,2	4,8858	4817,99	4,35974	-827,24	96,3036
13	5,06	2,2	4,9300	4699,38	7,9632	-825,91	95,61
14	6,08	2,2	4,9732	4478,97	10,4409	-745,933	94,0314
15	2,03	3,2	3,7590	2915,52	18,8578	-652,438	78,6564
16	3,04	3,2	3,8231	2803,49	5,57629	-666,407	78,0992
17	3,54	3,2	3,8285	2637,02	14,5283	-665,103	77,5952
18	4,05	3,2	3,8539	2529,96	2,6925	-695,302	76,9336
19	4,56	3,2	3,7787	2522,96	10,4053	-664,853	76,3758
20	5,06	3,2	3,8229	2347,7	4,18781	-685,823	75,6222
21	6,08	3,2	3,7224	2301,46	0	-632,764	74,0732
22	2,03	4,2	3,1601	1442,04	5,66602	-547,557	64,0732
23	3,04	4,2	3,1608	1316,47	11,518	-565,299	63,5246
24	3,54	4,2	3,1665	1215,63	1,97839	-563,08	62,9412
25	4,05	4,2	3,1583	1149,75	1,88062	-575,165	62,3828
26	4,56	4,2	3,1388	1083,86	7,97089	-557,836	61,78
27	5,06	4,2	3,1500	1062,72	4,3161	-567,689	60,9834
28	6,08	4,2	3,0610	930,897	10,262	-536,721	59,4172
29	2,03	5,2	2,1966	526,424	3,09897	-428,448	52,6302
30	3,04	5,2	2,1664	457,317	7,16885	-438,038	52,1278
31	3,54	5,2	2,0770	430,701	2,16312	-398,467	51,607
32	4,05	5,2	2,0353	428,667	4,85358	-405,123	51,0874
33	4,56	5,2	1,9495	359,658	1,73428	-394,797	50,5348
34	5,06	5,2	1,9131	342,178	3,41574	-386,222	49,913
35	6,08	5,2	1,6483	337,05	8,32932	-370,302	48,5256

## Anexo D

Sim. Nº	Fator		Carga [10 <sup>4</sup> N]	Desgaste [MPa*mm]	Tensão Normal [MPa]	T. Normal Compres. [MPa]	Largura rebarba [mm]	
	h [mm]	e [mm]						
1	7,73	1,2	7,8112	11767,8	0,364014	-1204,72	140,6736	
2	9,02	1,2	7,8840	11519,5	1,97363	-1139,2	134,0506	
3	10,31	1,2	8,1751	10993,6	4,85425	-1273,11	128,4756	
4	11,6	1,2	7,9397	10380	3,9939	-1340,22	122,9786	
5	12,89	1,2	7,9545	9947,68	5,32996	-1232,12	117,924	
6	7,73	2,2	4,8517	5765,18	2,93848	-820,783	109,0706	
7	9,02	2,2	4,8540	5389,52	9,70624	-832,492	102,7854	
8	10,31	2,2	4,9352	5033,73	7,95752	-822,126	96,9214	
9	11,6	2,2	4,9760	4586,06	6,96991	-842,545	91,6358	
10	12,89	2,2	5,1416	4041,17	6,22583	-871,933	86,5634	
11	7,73	3,2	3,6882	3308,65	4,07031	-621,768	89,191	
12	9,02	3,2	3,7485	2906,6	6,25669	-625,332	82,8764	
13	10,31	3,2	3,7616	2557,97	3,19879	-656,676	77,0218	
14	11,6	3,2	3,9168	2058,92	0,86145	-694,896	71,6302	
15	12,89	3,2	3,9781	1500,24	1,10223	-670,949	66,596	
16	7,73	4,2	3,0496	1967,49	2,78781	-499,721	74,6058	
17	9,02	4,2	3,0806	1523,77	7,30466	-488,989	68,2328	
18	10,31	4,2	3,1861	1146,16	9,06842	-547,882	62,3394	
19	11,6	4,2	3,0189	695,14	7,33551	-533,339	57,09	
20	12,89	4,2	1,7637	516,612	11,0375	-340,915	53,975	falha pequena
21	7,73	5,2	2,6171	1110,86	1,76123	-449,774	63,0282	
22	9,02	5,2	2,4571	753,154	4,89417	-430,472	56,73	
23	10,31	5,2	2,0260	406,479	3,45148	-409,013	51,038	
24	11,6	5,2	1,2569	358,409	6,65176	-294,13	49,2654	falha pequena
25	12,89	5,2	1,2588	363,642	0	-248,35	49,3388	falha grande

## Anexo E

Sim. Nº	Fator		Carga [10 <sup>4</sup> N]	Desgaste MPa*mm]	Tensão Normal [MPa]	T. Normal Compressão [MPa]	Largura rebarba [mm]
	T [mm]	e [mm]					
1	1062	1,2	9,7438	13840,3	0,968628	-1534,55	128,2606
2	1121	1,2	8,7310	12337,6	3,57861	-1436,07	128,1954
3	1180	1,2	7,9755	11086,9	5,42664	-1266,54	128,4942
4	1239	1,2	7,0133	9634,92	3,81262	-1087,27	128,3918
5	1298	1,2	6,2166	8567,53	3,08124	-893,339	128,2636
6	1062	2,2	6,3897	6543,91	15,2638	-1088,67	96,8916
7	1121	2,2	5,6656	5675,12	16,8959	-952,228	96,9214
8	1180	2,2	4,9352	5033,73	7,95752	-822,126	96,9214
9	1239	2,2	4,3640	4349,18	2,79041	-757,312	96,939
10	1298	2,2	3,8785	3805,07	6,31226	-682,783	97,0064
11	1062	3,2	4,9826	3324,57	4,6261	-852,718	76,9658
12	1121	3,2	4,4014	2920,68	3,66168	-795,846	77,0526
13	1180	3,2	3,7616	2557,97	3,19879	-656,676	77,0218
14	1239	3,2	3,2998	2178,37	4,42267	-586,541	76,9714
15	1298	3,2	2,8248	1865,19	1,16306	-494,407	76,9926
16	1062	4,2	4,2641	1578,39	7,83246	-702,471	62,3968
17	1121	4,2	3,6694	1394,98	1,83429	-650,408	62,3656
18	1180	4,2	3,1861	1146,16	9,06842	-547,882	62,3394
19	1239	4,2	2,7369	1035,91	4,0376	-486,069	62,3738
20	1298	4,2	2,3399	849,732	0	-411,731	62,4218
21	1062	5,2	2,7879	575,422	5,98663	-557,104	51,1246
22	1121	5,2	2,3903	477,279	2,62006	-482,376	51,0598
23	1180	5,2	2,0260	406,479	3,45148	-409,013	51,038
24	1239	5,2	1,7367	322,718	4,19711	-353,463	51,1036
25	1298	5,2	1,4557	275,07	3,14359	-305,378	51,089

## Anexo F

Sim. Nº	Fator		Carga [10 <sup>4</sup> N]	Desgaste [MPa*mm]	Tensão Normal [MPa]	T. Normal Compres. [MPa]	Largura rebarba [mm]	
	Diâmetro geratriz [mm]	e [mm]						
1	25,6	1,2	8,2783	4778,05	0	-991,081	70,4376	
2	27,6	1,2	7,8841	9067,84	0	-1089,49	105,516	
3	29,6	1,2	8,0272	10917,75	0	-1012,52	128,043	
4	31,6	1,2	8,1494	12040,9	0	-966,638	145,1472	
5	33,6	1,2	7,8759	12640,1	8,74719	-1341,56	158,808	
6	25,6	2,2	1,2898	379,895	18,0384	-307,38	41,9164	Falha pequena
7	27,6	2,2	5,0591	3261,67	16,8466	-843,758	73,853	
8	29,6	2,2	4,9947	5008,53	16,816	-809,314	96,601	
9	31,6	2,2	4,9040	6012,37	0,145203	-810,395	113,6422	
10	33,6	2,2	4,9555	6596,1	5,97089	-818,612	127,4502	
11	25,6	3,2	0,8363	257,171	0,14534	-220,337	38,664	Falha grande
12	27,6	3,2	3,3481	878,825	6,29535	-620,866	54,0058	
13	29,6	3,2	3,7974	2513,67	17,3044	-653,816	76,6152	
14	31,6	3,2	3,7802	3482,97	12,5745	-648,571	93,5212	

