

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

**Influência do Uso de Lubrificantes no Processo
de Estampagem Profunda com Chapas Espessas
de Aço**

Autor: Marco Fabricio Lopes Pereira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

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

Influência do Uso de Lubrificantes no Processo de Estampagem Profunda com Chapas Espessas de Aço

Autor: Marco Fabricio Lopes Pereira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

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

Campinas, 2007

S.P. – Brasil

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

Si38i

Silva, Marco Fabricio Lopes Pereira da
Influência do uso lubrificantes no processo de estampagem profunda com chapas espessas de aço / Marco Fabricio Lopes Pereira da Silva. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

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

1. Aço - Fratura. 2. Conformação de metais. 3. Estatística – análise. 4. Análise de regressão. I. Button, Sérgio Tonini. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Influence of the lubricant use in the process of deep drawing with thick steel sheet metals

Palavras-chave em Inglês: Cracking, Mechanical forming, Statitital analysis, Binary logistic regression

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Anselmo Eduardo Diniz, Luciano Pessanha Moreira

Data da defesa: 29/05/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

CJ
R-1524

Dedicatória:

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Influência do Uso de Lubrificantes no Processo
de Estampagem Profunda com Chapas
Espessas de Aço**

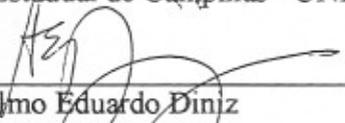
Autor: Marco Fabricio Lopes Pereira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button



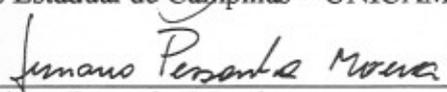
Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Luciano Pessanha Moreira

Universidade Federal Fluminense - UFF

Campinas, 15 de agosto de 2007

200925340

Dedicatória:

Dedico este trabalho a DEUS que colocou pessoas e idéias que iluminaram esse longo caminho, aos meus pais Nelson e Hilda que, representando coragem, luta e honestidade inspiram-me para os desafios da vida, à minha esposa CRISTINA, pelo seu amor e carinho que me forneceu estímulos para a execução deste projeto.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao meu orientador Sergio Tonini Button que me instruiu e possibilitou ampliar minhas fronteiras com seu valiosíssimo conhecimento.

Ao amigo Dipl.-Ing. (FH) Stefan Schlechtriem, modelo de dinamismo e liderança, por auxiliar na elaboração dessa proposta e desenvolvimento desse trabalho.

Ao amigo Prof. MSc. Sidney Ragazzi, IMECC-Unicamp, pela atenção e orientação no conteúdo estatístico desse trabalho.

Ao senhor Herman Eberle, Schaeffler do Brasil, que me possibilitou percorrer o rumo de meu desenvolvimento profissional.

A todos os que me apoiaram na realização deste trabalho, inclusive colaboradores das empresas Schaeffler Brasil Ltda e a Fuchs do Brasil S.A.

Nosso sentimento da realidade neste mundo material é totalmente ilusório. Nada conhecemos da verdadeira natureza dos objetos e dos seres, mas apenas as impressões que produzem sobre nossos sentidos, e deduzimos conclusões, quase sempre errôneas, do conjunto dessas impressões

Annie Wood Besant

Resumo

SILVA, Marco Fabricio Lopes Pereira da, *Influência do Uso de Lubrificantes no Processo de Estampagem Profunda com Chapas Espessas de Aço*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007, 135 p. Dissertação (Mestrado).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da lubrificação sobre os esforços do processo e produto durante o embutimento profundo de corpos com chapas metálicas, conforme ABNT NBR 5906: 1984 grau EPA de espessura 3,5mm e entender as causas da fratura no produto durante o embutimento sobre condições específicas de processo. Ocorrências de defeitos como trincas, acabamentos indesejáveis, estrangulamentos, entre outros, em componentes estampados desse gênero e nessa ordem de espessura, justificam avaliar como o lubrificante atua sobre as características do processo de embutimento e quais são seus efeitos sobre as características dimensionais do produto. Para avaliar a ocorrência da fratura dos corpos de prova, foi realizado o primeiro conjunto de experimentos (sem lubrificantes) planejados pelo método fatorial, com a intenção de selecionar os corpos de prova para a segunda fase de experimentos. Os resultados foram coletados e analisados, podendo-se concluir nessa primeira fase que a probabilidade de fraturar o corpo de prova é maior em função do diâmetro externo do blank do que em função do raio da ferramenta e que, a partir dos testes estatísticos não foi evidenciada a influência do prensa chapa sobre a probabilidade de fraturar o corpo de prova. Também nota-se que a não atuação do prensa chapa favorece a diminuição da força máxima de embutimento pela maior influência do raio da ferramenta. Quanto à ocorrência da fratura dos corpos de prova no segundo conjunto de experimentos planejados pelo método fatorial, com o objetivo de avaliar o desempenho de cinco lubrificantes, verificou-se que não houve influência da lubrificação sobre os resultados de fratura. Novamente foi identificada a relação com o raio da ferramenta (R) e com a atuação do prensa

chapa, reforçando a hipótese de sensibilidade do produto em função da geometria da ferramenta. Avaliando-se os tipos de lubrificantes sobre a estricção da parede do produto em pontos específicos, observou-se uma deformação significativa quanto comparada com os resultados sem a aplicação de lubrificantes. Os cinco lubrificantes selecionados para os ensaios não minimizaram o efeito de fraturas nos corpos de prova, porém foi evidenciado efeito nos esforços de embutimento, destacando-se dos demais o lubrificante semi-sintético Extrudoil 319 HT.

Palavras Chave

- fratura, conformação mecânica, análise estatística, regressão logística binária.

Abstract

SILVA, Marco Fabrício Lopes Pereira da, Influence of the Lubricant Use in the Process of Deep Drawing with Thick Steel Sheet Metals, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 135 p., Dissertation (Master Degree).

The objective of this work was to evaluate the influence of the lubrication on the process and product during the deep drawing of metallic cups, as Brazilian standard ABNT NBR 5906:1984, degree EPA to thickness 3,5mm and to understand the causes of the cracking during deep drawing, on specific conditions of this process. Occurrences of defects as crack, undesirable finishing, necking, among others, in stamped components in this level of thickness, justify evaluating the lubricant on the characteristics of the deep drawing process and the effect on the dimensional characteristics of the product. To evaluate the occurrence of cracking in the cups, it was planned the first set of experiments (without lubricant) with the factorial design, to select the cups for the second phase of experiments. The results had been collected and analyzed, being able to conclude in this first phase that the probability to crack the cup is bigger in function of the external diameter of blank, in function of the diameter of the tool, and according to the statistical tests, there were not evidences of the influence of the blank holder on the probability for cracking. Also without the blank holder there was a reduction of the maximum force of deep drawing because the biggest influence of the diameter of the tool. To evaluate the occurrence of cracking of the cups a second phase of experiments was planned with the factorial design, with the objective to evaluate the performance of five lubricants. It was verified that there was not influence of the lubrication on the cracking results; however it was again identified the relation with the diameter of the tool and with the performance of the blank holder, strengthening the hypothesis of

sensitivity of the product in function of the geometry of the tool. Evaluating the five lubricants influence on the reduction of area of the cup wall in specific points, it was observed a significant deformation when compared with the results without lubricant. The five lubricants selected for the tests had not minimized the effect of cracking, however evidenced the effect in the deep drawing load, being the semi-synthetic lubricant Extrudoil 319 HT the best of these five lubricants.

Key Words

- cracking, mechanical forming, statistical analysis, binary logistic regression.

Índice

| | |
|---|-------|
| Lista de Figuras | xiv |
| Lista de Tabelas | xviii |
| Nomenclatura | xxi |
| <i>Letras Latinas</i> | xxi |
| <i>Letras Gregas</i> | xxi |
| <i>Superescritos</i> | xxii |
| <i>Subscritos</i> | xxii |
| <i>Siglas e Abreviaturas</i> | xxiii |
| Capítulo 1 - Considerações iniciais | 1 |
| 1.1 Introdução | 1 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.3 Justificativas | 3 |
| 1.4 Descrição dos capítulos | 3 |
| Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica | 5 |
| 2.1 Descrição do processo de estampagem com ênfase em produtos de chapas espessas | 5 |
| 2.2 Variáveis do sistema de estampagem profunda | 8 |
| 2.3 Lubrificação | 14 |
| 2.3.1 Características dos lubrificantes | 14 |
| 2.3.2 Regimes de lubrificação | 16 |
| 2.3.3 Tipos de lubrificantes | 17 |
| 2.4 Produtos, geometrias e defeitos | 20 |

| | |
|--|----|
| Capítulo 3 – Materiais e métodos..... | 23 |
| 3.1 Especificação do material | 25 |
| 3.1.1 Caracterização das propriedades mecânicas e químicas..... | 25 |
| 3.1.2 Caracterização do acabamento superficial: rugosidade e textura | 26 |
| 3.2 Especificação do corpo de prova e ferramental | 27 |
| 3.2.1 Geometria do blanque e características do corpo de prova..... | 27 |
| 3.2.2 Dimensionamento do ferramental..... | 30 |
| 3.2.3 Instrumentação e aquisição de dados do ensaio..... | 35 |
| 3.2.4 Acabamento superficial da ferramenta | 38 |
| 3.3 Especificação do lubrificante..... | 40 |
| 3.4 Planejamento experimental..... | 42 |
| 3.4.1 Planejamento para a primeira fase | 42 |
| 3.4.2 – Planejamento para a segunda fase | 44 |
| 3.4.3 – Metodologia para análise de resultados dos experimentos | 46 |
| Capítulo 4 - Resultados e Discussão | 48 |
| 4.1 Análise dos ensaios do material..... | 48 |
| 4.1.1 Propriedades mecânicas e químicas..... | 48 |
| 4.1.2 Acabamento superficial | 50 |
| 4.1.3 Espessura da chapa | 52 |
| 4.2 Análise dos ensaios com o ferramental e corpo de prova..... | 53 |
| 4.3 Análise dos ensaios com os lubrificantes..... | 56 |
| 4.4 Análise dos resultados dos experimentos | 57 |
| 4.4.1 Resultados da primeira fase | 58 |
| 4.4.2 Resultados da segunda fase..... | 81 |
| 4.4.2.1 - Análise do comportamento das fraturas..... | 85 |
| 4.4.2.2 - Análise dos esforços de embutimento..... | 88 |
| 4.4.2.3 Análise da qualidade do produto quanto a estricção | 92 |
| Capítulo 5 - Conclusões e sugestões para próximos trabalhos..... | 98 |
| 5.1 Conclusões | 98 |
| 5.2 Sugestões para trabalhos futuros..... | 99 |

Bibliografia..... 101

Normas técnicas empregadas..... 101

Referências Citadas..... 101

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Peça com fratura após estampagem | 2 |
| Figura 2 – Forças predominantes na estampagem profunda de um copo. (Adaptado de Schuler, 1998)..... | 6 |
| Figura 3 – Regiões dos esforços do produto sob estampagem profunda (BRESCIANI FILHO, et al., 1986)..... | 6 |
| Figura 4 – Esforços atuantes nas regiões de um corpo (BRESCIANI FILHO, et al., 1986). | 7 |
| Figura 5 – Representação dos elementos principais que compõem a estampagem profunda de chapas. | 8 |
| Figura 6 – Relação do limite de estampagem profunda única para peças cilíndricas (Adaptado de Schuler, 1968). | 9 |
| Figura 7 - Curva de Stribeck (Schey, 1983)..... | 11 |
| Figura 8 - Pontos de diferentes condições de lubrificação no processo de embutimento profundo (Schey, 1983) | 16 |
| Figura 9 – Aspecto macroscópico do rompimento de uma peça..... | 21 |
| Figura 10 – Ensaio Swift de estampagem profunda (Adaptado de Garcia, et al., 2000) | 24 |
| Figura 11 – Causas e efeitos hipotéticos da falha. | 24 |
| Figura 12 – Rugosímetro de raio “Form TalySurf Series 2 PGI - Taylor Robson Pneumo” | 26 |
| Figura 13 – Dimensionamento do produto antes (1) e após o embutimento (2)..... | 27 |
| Figura 14 – Blanque com oito furos de diâmetro 15,3 mm no diâmetro médio de 108 mm. | 28 |
| Figura 15 – Cilindros a gás aplicados em ferramentas de estampagem (Prody, 2006). | 33 |
| Figura 16 – Comparativo entre a força de sujeição do cilindro de gás e mola helicoidal ao longo do curso de embutimento. | 34 |
| Figura 17 – Foto dos cilindros de gás instalados no sujeitador da ferramenta do experimento..... | 34 |
| Figura 18 – Foto das molas helicoidais instaladas no sujeitador da ferramenta do experimento. .. | 35 |
| Figura 19 – Fotografia transdutor de força preparado com extensômetros elétricos. | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 – Transdutor resistivo de deslocamento linear. | 37 |
| Figura 21 – Transdutor resistivo de deslocamento linear instalado na ferramenta do experimento. | 38 |
| Figura 22 – Medição da rugosidade da matriz | 38 |
| Figura 23 – Medição da rugosidade do punção..... | 39 |
| Figura 24 – Aplicação do silicone para réplica da textura do raio do punção | 39 |
| Figura 25 – Aplicação do silicone para réplica da textura do raio da matriz | 40 |
| Figura 26 – Regiões para medição das espessuras no corpo de prova embutido..... | 44 |
| Figura 27 – Valores de rugosidade aritmética e comparativo em μm , para os raios do punção e matriz de 6 mm e 8 mm..... | 51 |
| Figura 28 – Fotos das réplicas de silicone dos raios do punção..... | 51 |
| Figura 29 – Ampliação 100x (a) e 400x (b) respectivamente em microscópio ótico, da réplica do acabamento superficial do raio da ferramenta..... | 52 |
| Figura 30 – Valores de espessura inicial do blanche. | 53 |
| Figura 31 – Resultado da simulação para previsão dos esforços de embutimento. | 53 |
| Figura 32 – Simulação para previsão do funcionamento na ferramenta. | 54 |
| Figura 33 – Previsão da tensão plástica efetiva para o diâmetro inicial do blanche 185 mm..... | 54 |
| Figura 34 – Previsão da tensão plástica efetiva para o diâmetro inicial do blanche 190 mm..... | 55 |
| Figura 35 – Previsão da tensão plástica efetiva para o diâmetro inicial do blanche 195 mm..... | 55 |
| Figura 36 – Blanques com diâmetro externo 135 mm, 145 mm, 155 mm, 165 mm, 175 mm e 185 mm..... | 56 |
| Figura 37 – Massa de lubrificantes aplicados nos blanques..... | 57 |
| Figura 38 – Análise de superfície para a probabilidade de fratura $P(\text{Frat})$ em função do diâmetro externo do blanche (D_e) e do raio da ferramenta (R). | 61 |
| Figura 39 – ANOVA para classificação dos corpos de prova como fraturados e não fraturados... | 62 |
| Figura 40 - Comparativo entre a situação de fratura real das quantidades de peças fraturadas no ensaio e a situação prevista. | 62 |
| Figura 41 – Quantidade de corpos de prova que fraturados (Frat/s) e não fraturados (Frat/n) em relação ao diâmetro externo do blanche (D_e) | 63 |
| Figura 42 – Corpo de prova embutido a partir do blanche de 165 mm, com raio de matriz/punção de 6 mm com a atuação do prensa chapa. | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 43 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 165 mm, com raio de matriz/punção de 6 mm sem a atuação do prensa chapa..... | 64 |
| Figura 44 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 165 mm, com raio de matriz/punção de 8 mm com a atuação do prensa chapa. | 65 |
| Figura 45 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 165 mm, com raio de matriz/punção de 8 mm sem a atuação do prensa chapa..... | 65 |
| Figura 46 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 175 mm, com raio de matriz/punção de 6 mm com a atuação do prensa chapa. | 66 |
| Figura 47 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 175 mm, com raio de matriz/punção de 6 mm sem a atuação do prensa chapa..... | 66 |
| Figura 48 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 175 mm, com raio de matriz/punção de 8 mm com a atuação do prensa chapa. | 67 |
| Figura 49 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 175 mm, com raio de matriz/punção de 8 mm sem a atuação do prensa chapa..... | 67 |
| Figura 50 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 135 mm com região da aba comprometida..... | 68 |
| Figura 51 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 145 mm com região da aba comprometida..... | 68 |
| Figura 52 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 185 mm. Ensaio com todos os corpos de prova fraturados..... | 69 |
| Figura 53 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 155 mm sem fratura. Ensaio com nenhum corpo de prova fraturado. | 69 |
| Figura 54 – Análise de superfície a força máxima de embutimento (F_{max}) em função do diâmetro externo do blanque (D_e) e do raio da ferramenta (R) com e sem a atuação do prensa chapa (BH). | 71 |
| Figura 55 – Principais efeitos que influenciaram os resultados de força de embutimento máximo (F_{max}). | 72 |
| Figura 56 – Ajuste linear do modelo força máxima (F_{max}) em função do diâmetro externo do blanque (D_e) com atuação do prensa chapa (BH). | 72 |
| Figura 57 – Ajuste linear do modelo força máxima (F_{max}) em função do diâmetro externo do blanque (D_e) sem atuação do prensa chapa (BH). | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 58 – Relação entre as espessuras no raio do flange, prensa chapa e os diâmetros externos. | 74 |
| Figura 59 – Relação entre as espessuras no raio do fundo, raio da ferramenta e os diâmetros externos do blanque. | 75 |
| Figura 60 – Relação entre as espessuras no fundo do corpo do prova, raio da ferramenta e os diâmetros externos. | 76 |
| Figura 61 – Relação entre as espessuras da parede do corpo do prova, raio da ferramenta e o prensa chapa. | 77 |
| Figura 62 – Relação entre o coeficiente Beta e a probabilidade da fratura. | 79 |
| Figura 63 – Relação entre o diâmetro externo antes (De) após embutimento (DeEB-M). | 80 |
| Figura 64 – Gráfico de relação entre o coeficiente Beta e o diâmetro externo do blanque. | 81 |
| Figura 65 – Quantidade de corpos de prova com e sem fratura em função dos lubrificantes. | 85 |
| Figura 66 – Quantidade de corpos de prova com e sem fratura em função da atuação do prensa chapa. | 86 |
| Figura 67 – Quantidade de corpos de prova com e sem fratura em função do diâmetro externo do blanque. | 86 |
| Figura 68 – Quantidade de corpos de prova com e sem fratura em função do raio da ferramenta. | 87 |
| Figura 69 - Resultados de força máxima para as situações com e sem lubrificantes. | 88 |
| Figura 70 – Relação entre a força de embutimento e os lubrificantes aplicados, raio da ferramenta com 8 mm sem prensa chapa. | 89 |
| Figura 71 - Comportamento da força máxima de embutimento em função dos lubrificantes. | 90 |
| Figura 72 – Relação entre a força de embutimento e os lubrificantes aplicados, raio da ferramenta com 8 mm com prensa chapa. | 91 |
| Figura 73 – Relação entre a força de embutimento e os lubrificantes aplicados, atuação do prensa chapa e raio da ferramenta com 6 mm. | 92 |
| Figura 74 – Estricção da espessura da chapa no raio do fundo do corpo de prova em função da lubrificação com o raio da ferramenta de 8 mm. | 94 |
| Figura 75 - Estricção da espessura no raio do fundo do corpo de prova em função dos lubrificantes aplicados, com a atuação do prensa chapa com o raio da ferramenta de 8 mm. | 95 |
| Figura 76 – Estricção da espessura no raio do fundo do corpo de prova na combinação do raio com 6 mm com (a) e sem (b) prensa chapa. | 96 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Características de prensas empregadas na estampagem. (Prensas Schuler, 1997)..... | 10 |
| Tabela 2 – Defeitos de estampagem. (Schuler, 1997)..... | 22 |
| Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço-carbono laminado a quente (ABNT – NBR 5906)..... | 25 |
| Tabela 4 – Composição química do aço-carbono laminado a quente (ABNT – NBR 5906) | 25 |
| Tabela 5 – Propriedades metalográficas e superficial do aço-carbono laminado a quente (ABNT – NBR 5906) | 25 |
| Tabela 6 – Características e esforços esperados para a primeira fase do experimento | 29 |
| Tabela 7 – Valores para determinação da força de sujeição. | 32 |
| Tabela 8 – Características do transdutor resistivo de deslocamento linear selecionado para o experimento | 37 |
| Tabela 9 – Caracterização dos lubrificantes indicados pelo fabricante FUCHS do Brasil S.A. para o ensaio..... | 41 |
| Tabela 10 – Condição planejada do ensaio experimental correspondente a primeira fase, sem lubrificantes. | 43 |
| Tabela 11– Condição planejada do ensaio experimental correspondente a segunda fase, sem lubrificantes. | 45 |
| Tabela 12 – Resultados das propriedades mecânicas do aço-carbono laminado a quente..... | 49 |
| Tabela 13 – Composição química do aço-carbono laminado a quente | 49 |
| Tabela 14 - Propriedades metalográficas do aço-carbono laminado a quente | 49 |
| Tabela 15 – Resultados dos ensaios de tração para avaliação da anisotropia | 50 |
| Tabela 17 – Coeficientes obtidos por REGRESSÃO LOGÍSTICA para análise de probabilidade de fratura. | 58 |

| | |
|---|----|
| Tabela 16 – Resultados do experimento para estudo de fraturas dos corpos de prova em função do diâmetro externo, raio da ferramenta e prensa chapa..... | 59 |
| Tabela 18 - Resultados do experimento da primeira fase aplicado ao modelo logístico | 60 |
| Tabela 19 – Coeficientes obtidos por regressão linear para análise da força máxima (Fmax).. .. | 70 |
| Tabela 20 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da força máxima (Fmax)..... | 71 |
| Tabela 21 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da espessura no raio da região do flange (Eraiofl) | 73 |
| Tabela 22 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da espessura do raio no fundo (Erauífun) | 75 |
| Tabela 23 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da espessura no fundo (Efund)..... | 76 |
| Tabela 24 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da espessura na parede (Epare)..... | 77 |
| Tabela 25 – Coeficientes obtidos por regressão para análise da diminuição das espessuras. (Epare). | 78 |
| Tabela 26 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise do diâmetro médio embutido (DeEB-M)..... | 80 |
| Tabela 27 – Resultados do experimento da segunda fase para avaliação do desempenho dos lubrificantes para os corpos de prova com diâmetro externo (De) de 165 mm e 175 mm | 82 |
| Tabela 28 – Resultados do experimento da segunda fase para avaliação do desempenho dos lubrificantes para os corpos de prova com diâmetro externo (De) de 165 mm e 175 mm. | 83 |
| Tabela 29 – Resultados do experimento da segunda fase para avaliação do desempenho dos lubrificantes para os corpos de prova com diâmetro externo (De) de 165 mm e 175 mm. | 84 |
| Tabela 30 – Coeficientes obtidos por regressão logística para análise da probabilidade de fratura. | 87 |
| Tabela 31 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise força máxima de embutimento (Fmax). | 89 |
| Tabela 32 – Coeficientes obtidos por regressão linear para análise da diminuição da espessura do raio no fundo do corpo de prova (draio_fnd). | 93 |
| Tabela 33 – Coeficientes obtidos por regressão linear para análise da diminuição da espessura do fundo do corpo de prova (dfundo)..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| Tabela A1 – Resultados dos cálculos de ANOVA para Fmax versus lubrificantes..... | 104 |
| Tabela A2 – Resultados dos cálculos de ANOVA para estrição do raio do fundo do corpo de prova com raio de 8 mm, sem atuação do prensa chapa versus lubrificantes..... | 106 |
| Tabela A3 – Resultados dos cálculos de ANOVA para estrição do raio do fundo do corpo de prova com raio de 8 mm, com atuação do prensa chapa versus lubrificantes..... | 108 |

Nomenclatura

Letras Latinas

- a - tensão de atrito
- A - Limite superior de embutimento
- B - Limite inferior de embutimento
- c - tensão de compressão
- d - diâmetro do punção ou diâmetro interno
- D – diâmetro do blanque (Schuler)
- F - Avanço da ferramenta de corte
- L - Comprimento final do corpo de prova
- n - Coeficiente de encruamento
- p - pressão de interface dos contatos
- r - coeficiente de anisotropia normal
- \bar{r} - coeficiente de anisotropia médio
- Δr - coeficiente de anisotropia planar
- R - raio da ferramenta
- s - espessura da chapa
- Sm - Parâmetro Sommerfeld
- t - tensão de tração

Letras Gregas

- β_0 - relação de máximo embutimento

β_c – constante (modelo regressão logística)

μ - coeficiente de atrito

τ_C - tensão de cisalhamento

σ_N - tensão normal

Δr - coeficiente de anisotropia planar

ϵ_{r3} - deformação da espessura da chapa no fundo do corpo de prova (dfundo)

ϵ_{r1} - deformação da espessura da chapa no flange do corpo de prova (draioflange)

ϵ_{r2} - deformação da espessura da chapa no raio do fundo no corpo de prova (draiofundo)

ϵ_w - deformação da largura do corpo de prova

ϵ_t - deformação da espessura do corpo de prova

η - viscosidade dinâmica do lubrificante

v - velocidade de escorregamento

π - pi

Superescritos

CORR. - coeficiente de correlação

Subscritos

L_0 - Comprimento inicial do corpo de prova

m_0 - Fator mínimo embutimento

p_s - pressão específica de sujeição

t_0 - Espessura inicial do corpo de prova

t_f - Espessura final do corpo de prova até a ruptura

W_0 - Largura inicial do corpo de prova

W_f - Largura final do corpo de prova

Siglas e Abreviaturas

AL - alongamento do material

An - área de contato entre o blanque e matriz

ANOVA - ferramenta estatística para análise de fatores

BH - prensa chapa ou sujeitador

CP - corpo de prova

cSt - Centistokes ou viscosidade cinemática

d1 - primeiro diâmetro externo ensaiado

d2 - segundo diâmetro externo ensaiado

De - diâmetro externo do blanque

DeEB - Diâmetro externo após embutimento

Dg - diâmetro do furo de pilotagem do blanque na ferramenta

Dj - diâmetro da janela

Dpj - diâmetro de posição das janelas

dfundo - deformação ou estricção da espessura da chapa no fundo do corpo de prova

draio_flg – deformação ou estricção da espessura da chapa no raio do flange do corpo de prova

draio_fnd - deformação ou estricção da espessura da chapa no raio do fundo do corpo de prova

dw - diâmetro efetivo da sujeitador

Efund - espessura da chapa no fundo do corpo de prova

EP - extrema pressão

Epare - espessura da chapa na região da aba no corpo de prova

Eraiofl - espessura da chapa no raio da região do flange no corpo de prova

Erauífun - espessura da chapa no raio do fundo no corpo de prova

FA - Força de atrito

Fc – Força de compressão

fg - folga entre punção e matriz

Fmax - força máxima de embutimento

Fn - força de sujeição

FN - Força normal

Frat - ocorrência (ou não) de fratura

Ft – Força de tração
H1 - altura de embutimento total
H2 - altura de posição da janela conforme critérios de ensaio
HE - Altura do corpo de prova após embutimento
HV30 - Dureza Vickers pré carga 30N
La - lubrificante ensaiado tipo “a”
Lb - lubrificante ensaiado tipo “b”
Lc - lubrificante ensaiado tipo “c”
Ld - lubrificante ensaiado tipo “d”
LDR - taxa de limite de embutimento
LE - Limite de escoamento
Le - lubrificante ensaiado tipo “e”
ln – logaritmo de base neperiana
LR - Limite de resistência do material
Lubrif - aplicação de lubrificante
Massalubrif - quantidade de lubrificante
MINITAB - programa computacional estatístico
 $P(\text{frat})_{\log}$ - Probabilidade de ocorrência da fratura por regressão logística
 $P(\text{frat})_{\text{lin}}$ - Probabilidade de ocorrência da fratura por regressão linear
Pi - Probabilidade do evento
PMS – Ponto Morto Superior
r - coeficiente de anisotropia
R3 - raio formado pela matriz conforme critérios de ensaio
R4 - raio formado pelo punção conforme critérios de ensaio
Ra - rugosidade aritmética
Rmax - rugosidade máxima
Rmd - raio mínimo de dobramento
Rms - raiz da média quadrada da distribuição de rugosidade superficial
rp - réplica do ensaio
Rz - rugosidade parcial
Tipo Frat - tipo de fratura parcial ou total

Tipo lubrif - lubrificante ensaiado

Trabal. - trabalho despendido

Vc - Velocidade de corte

Capítulo 1 - Considerações iniciais

1.1 Introdução

A fabricação de componentes pelo processo de estampagem profunda a partir de chapas espessas de aço é abundante nas indústrias metalúrgicas que buscam produtos com robustez estrutural e complexidade geométrica, para serem aplicados em condições específicas ou extremas de trabalho, como fadiga, desgaste ou esforços excessivos em produtos tais como compressores, rodas de automóveis, rotores e embreagens.

A constante pesquisa para reduzir perdas nesse processo, muitas vezes isolada nas próprias indústrias, é comum e de grande importância, porém de recursos limitados e às vezes insuficientes, que dificultam ou encarecem o sucesso para a resolução dos problemas de estampagem, quando associados ao uso de chapas espessas de aço.

Em algumas circunstâncias esses problemas são atribuídos ao regime de lubrificação, pois conforme a vasta literatura, tal regime minimiza o efeito do atrito, aumenta a vida útil do ferramental e melhora o acabamento superficial das peças conformadas com chapas finas, o que eventualmente não se verifica em resultados alcançados na estampagem de chapas espessas.

Assim como os lubrificantes são indispensáveis para o bom funcionamento de qualquer máquina, tem também sua importância nos processos de conformação de metais, sejam eles lubrificantes isolantes ou lubrificantes de corte, principalmente pela obtenção de outros benefícios,

como por exemplo, o aumento de vida útil dos equipamentos e ferramentas em que eles são empregados.

Nos processos de embutimento, isento de lubrificantes com características tribológicas, aplicados para obtenção de corpos cilíndricos de grande espessura e com furos laterais, é limitado pelo surgimento de defeitos que podem prejudicar a função do produto pela formação de trincas nos produtos e desgastes excessivos das ferramentas devido aos esforços do embutimento, como denota a Figura 1.



Figura 1 – Peça com fratura após estampagem

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a influência da lubrificação sobre os esforços de estampagem e sobre a qualidade do produto durante o embutimento profundo de corpos com chapas metálicas em aço ABNT NBR 5906: 1984, grau EPA de espessura 3,5 mm e entender as causas da fratura no produto durante o embutimento sob condições específicas de um determinado processo de estampagem.

Destaca-se que não foi evidenciada na literatura, ou em normas técnicas, a definição clara para classificação de chapas finas ou espessas para o processo de conformação por estampagem.

1.3 Justificativas

Ao investigar a influência do lubrificante nesse processo com uso de chapas espessas, pode-se avaliar a lubrificação num sistema de conformação por estampagem mais severa que o verificado com chapas finas, com a finalidade de identificar e minimizar potenciais causas de problemas indesejáveis por deficiências do regime de lubrificação, como forma de minimizar tais falhas e melhorar a produtividade.

Ocorrências de defeitos como trincas, acabamentos indesejáveis, estrangulamentos, entre outros, em componentes embutidos nessa ordem de espessura, justificam avaliar como o lubrificante atua sobre as características do processo de embutimento e quais são seus efeitos sobre as características dimensionais do produto.

1.4 Descrição dos capítulos

O capítulo 2 traz informações de citações baseadas na literatura necessária para compreensão dos fenômenos a serem estudados, relacionados ao processo de estampagem com ênfase em produtos de chapas espessas assim como informações sobre materiais, ferramentas, lubrificantes e demais variáveis desse tipo de sistema.

O capítulo 3 apresenta informações pertinentes às condições iniciais do projeto como especificações de material, ferramental e corpo de prova, lubrificantes empregados, assim como os procedimentos adotados para os ensaios em duas fases distintas (com e sem lubrificação) e a definição da forma de tratamento e análise dos dados com embasamento estatístico.

O capítulo 4 contém os resultados dos procedimentos experimentais planejados no capítulo 3, com uso extensivo de tabelas e figuras, para compreensão dos dados expostos, característicos do material empregado, dimensionamento, acabamento e instrumentação do ferramental, geometria do blanque e corpo de prova, caracterização dos lubrificantes.

O capítulo 5 relata conclusões suportadas em estatísticas de análise de variâncias, regressões lineares e logísticas, quanto à influência da lubrificação sobre os esforços de estampagem e a qualidade do corpo de prova durante o embutimento profundo.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Como não há referências bibliográficas suficientes que especifiquem relatos ou ensaios associando estados de tensões, defeitos de produtos, regimes de lubrificação e tipos de lubrificantes, para estampagem profunda de produtos com chapas espessas e com geometrias complexas, tornaram-se necessário, a busca de textos associados à estampagem de chapas finas para a complementação desta pesquisa.

2.1 Descrição do processo de estampagem com ênfase em produtos de chapas espessas

A estampagem profunda é o processo de fabricação para dar forma a produtos a partir de chapas metálicas. A Figura 2 demonstra como as forças provocadas pela ferramenta sobre a chapa geram esforços de compressão indireta e de tração sobre a aba e a superfície cilíndrica do produto.

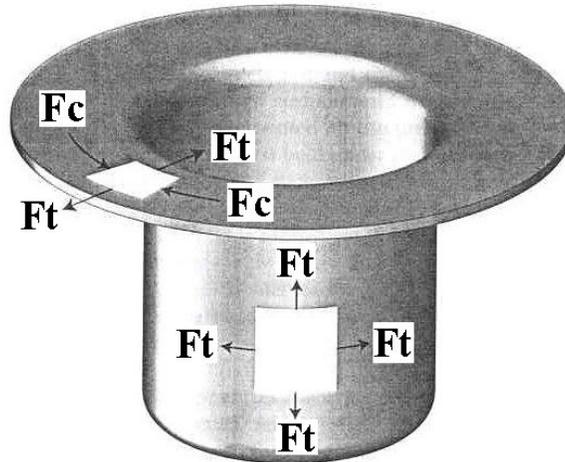


Figura 2 – Forças predominantes na estampagem profunda de um copo. (Adaptado de Schuler, 1998).

Na definição de Dieter (1981) o embutimento consiste na deformação de um blaque ou disco metálico que flui para a cavidade da matriz ao ser empurrado pelo punção contra a matriz, reduzindo gradativamente sua circunferência, enquanto é sujeitado por um anel ou placa da ferramenta que atua sobre a região da aba, como mostra a Figura 3.

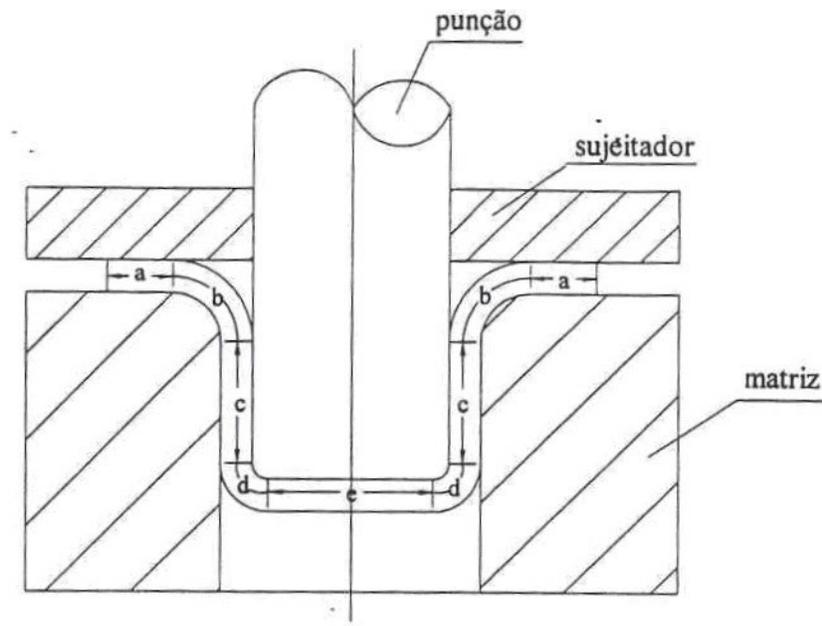


Figura 3 – Regiões dos esforços do produto sob estampagem profunda (BRESCIANI FILHO, et. al., 1986).

Segundo BRESCIANI FILHO et al. (1986) em chapas espessas não há necessidade de utilização do sujeitador, pois os esforços de compressão não são suficientes para provocar o

“enrugamento” da aba. Esse enrugamento fica cada vez menos evidente à medida que a espessura da chapa aumenta, elevando ao mesmo tempo os esforços de embutimento apresentados conforme a Figura 4.

O esforço do punção durante a estampagem pode ser utilizado como índice de verificação da severidade do processo, sendo que este esforço depende essencialmente das condições de atrito entre a chapa, matriz, punção, sujeitador e da intensidade da pressão de sujeição. Quanto mais fina a chapa, maior deverá ser a pressão de sujeição segundo Schuler (1998).

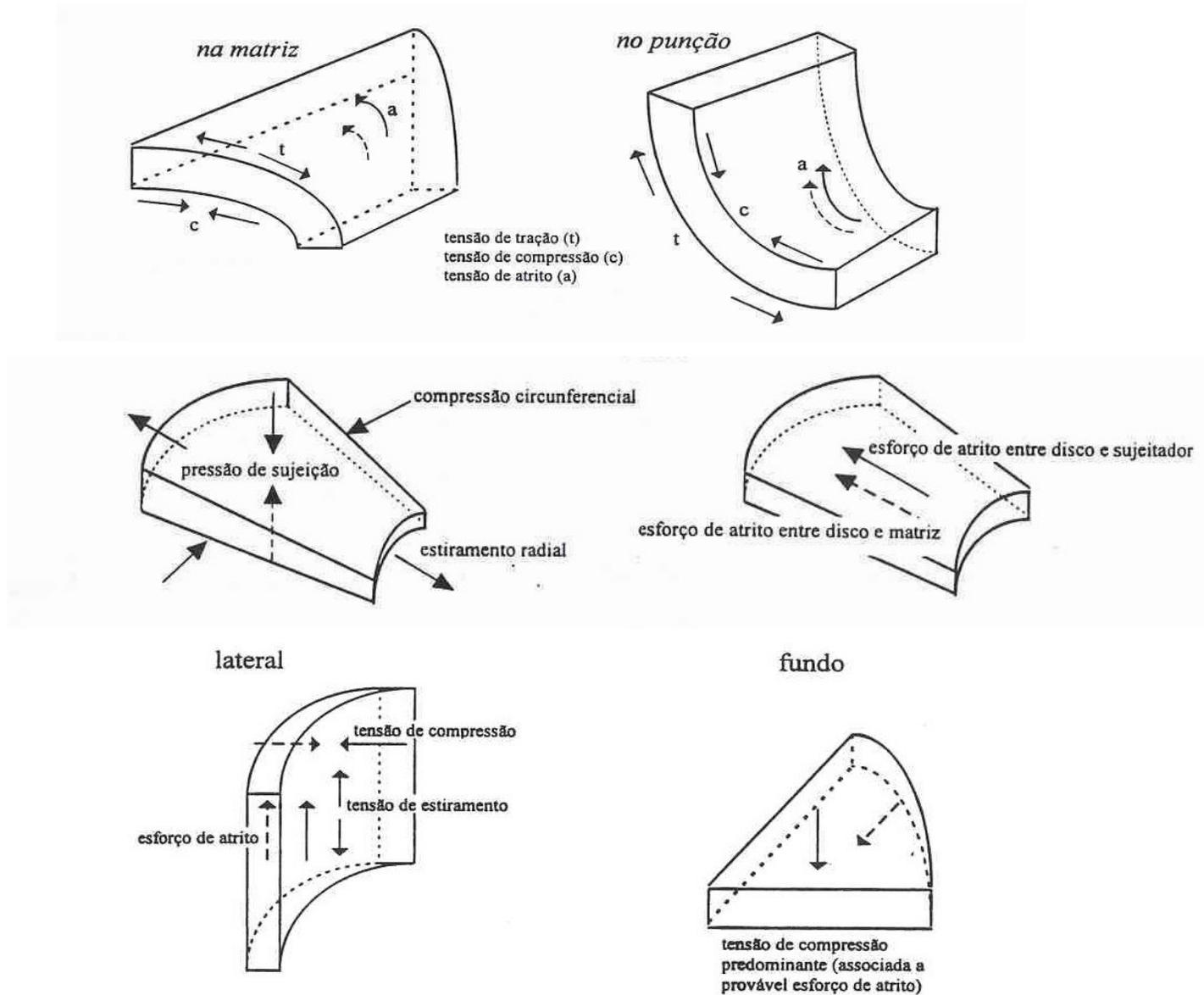


Figura 4 – Esforços atuantes nas regiões de um corpo (BRESCIANI FILHO et al., 1986).

2.2 Variáveis do sistema de estampagem profunda

Para avaliar as variáveis que possam influenciar o processo de estampagem profunda deve-se conhecer as características do material, as condições de estampagem e o projeto da ferramenta, ou seja, analisar o sistema ilustrado na Figura 5.

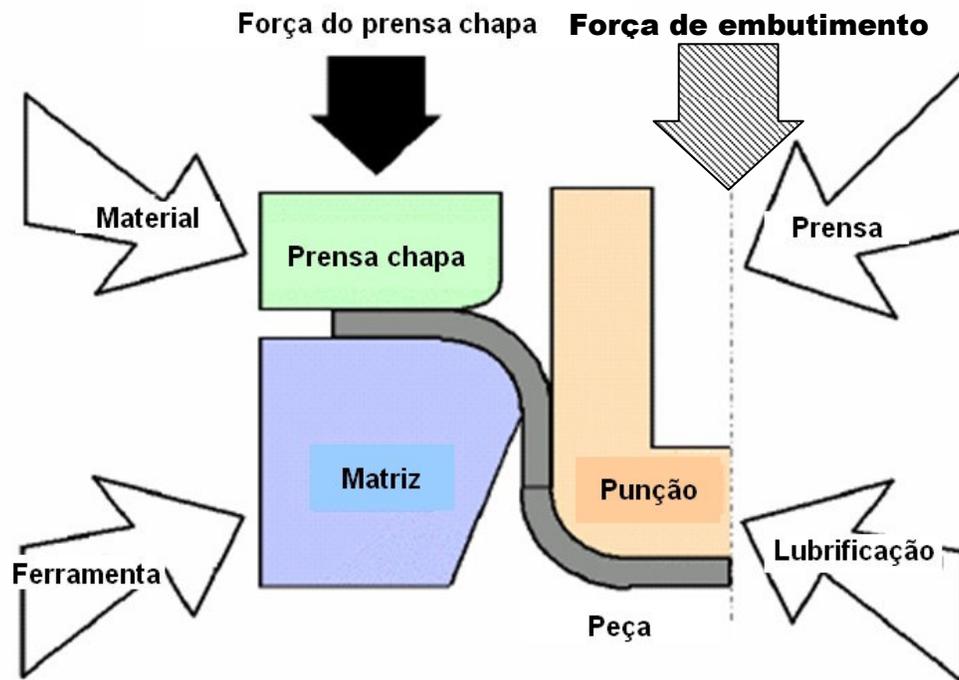


Figura 5 – Representação dos elementos principais que compõem a estampagem profunda de chapas.

Características que determinem a estampabilidade do material podem prever se haverá ou não ruptura durante o processo de embutimento, como também a presença do efeito mola, a rigidez do produto acabado e a ocorrência de rugas e defeitos de acabamento na superfície do material.

Indicadores como a redução máxima das dimensões da peça, inclusive de sua espessura, sem provocar a ruptura da chapa ou a relação entre a altura e os diâmetros de copos embutidos, definem a estampabilidade do material. Schuler (1968) propõe o diagrama de relação do limite de estampagem profunda numa única operação para peças cilíndricas, como mostra a Figura 6.

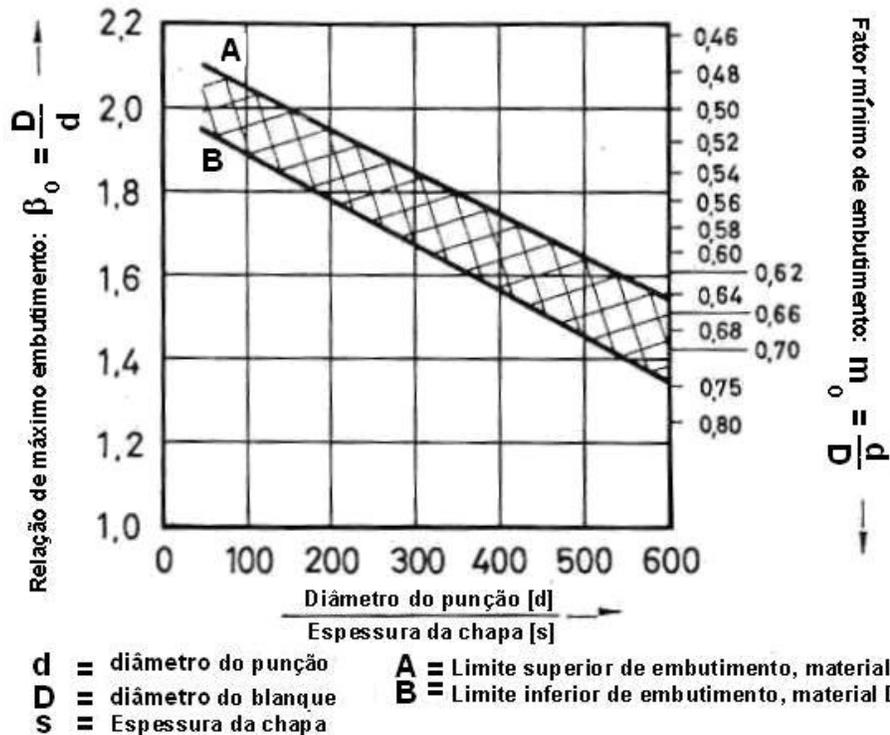


Figura 6 – Relação do limite de estampagem profunda única para peças cilíndricas (Adaptado de Schuler, 1968).

Se por alguma razão a resistência à deformação por compressão na aba for grande, o material da região da aba deixa de escoar para dentro da matriz. Com o aumento da força aplicada sobre o punção, a deformação passará a ocorrer apenas na região da cabeça do punção e atuarão apenas as forças biaxiais de tração, levando ao rompimento, devido à diminuição da espessura. Desta forma os modos básicos de deformação existentes são: encolhimento da aba, dobramento na região dos raios da matriz e punção e estiramento na parede lateral da peça.

O sistema mostrado na Figura 5 envolve variáveis de diversas naturezas que serão destacadas a seguir.

O embutimento profundo é normalmente executado em prensas hidráulicas, pois a velocidade de deformação pode ser controlada, juntamente com uma força de sujeição mais uniforme. Outra vantagem é o fato de a prensa hidráulica permitir um curso maior de abertura entre a mesa e o martelo, do que em prensas mecânicas pelo curso se tornar limitado devido ao curso do eixo excêntrico.

A Tabela 1 apresenta algumas características das prensas hidráulicas e mecânicas empregadas em estampagem.

Tabela 1 – Características de prensas empregadas na estampagem. (Prensas Schuler, 1997)

| PRENSA MECÂNICA | PRENSA HIDRÁULICA |
|---|---|
| Permite maior número de golpes | Grande capacidade de trabalho desde o PMS |
| Mais econômica | Força de prensagem ajustável |
| Fácil sincronismo de movimentos numa linha de prensas | Curso do martelo ajustável |
| Menor número de peças de desgaste | Velocidade do martelo variável |
| Fácil manutenção | Não necessita de dispositivos especiais para proteção contra sobrecarga |
| | Menor número de peças móveis |

Schey (1996) avaliou o efeito da velocidade de conformação de chapas galvanizadas por imersão a quente e chapas eletro-galvanizadas comparando-as com chapas laminadas a frio. Nesse trabalho ele combinou a variação de velocidade com a viscosidade de alguns lubrificantes para conformação.

Para essa análise no regime hidrodinâmico, ele utilizou o parâmetro de Sommerfeld ($S_m = \eta v/p$), definido como uma função da viscosidade dinâmica (η), velocidade de escorregamento (v), e pressão de interface dos contatos (p), com o qual demonstrou que quanto maior a velocidade, menor é o coeficiente de atrito, devido ao aumento da espessura do filme lubrificante (Figura 7 b), especialmente no regime hidrodinâmico (Figura 7 a).

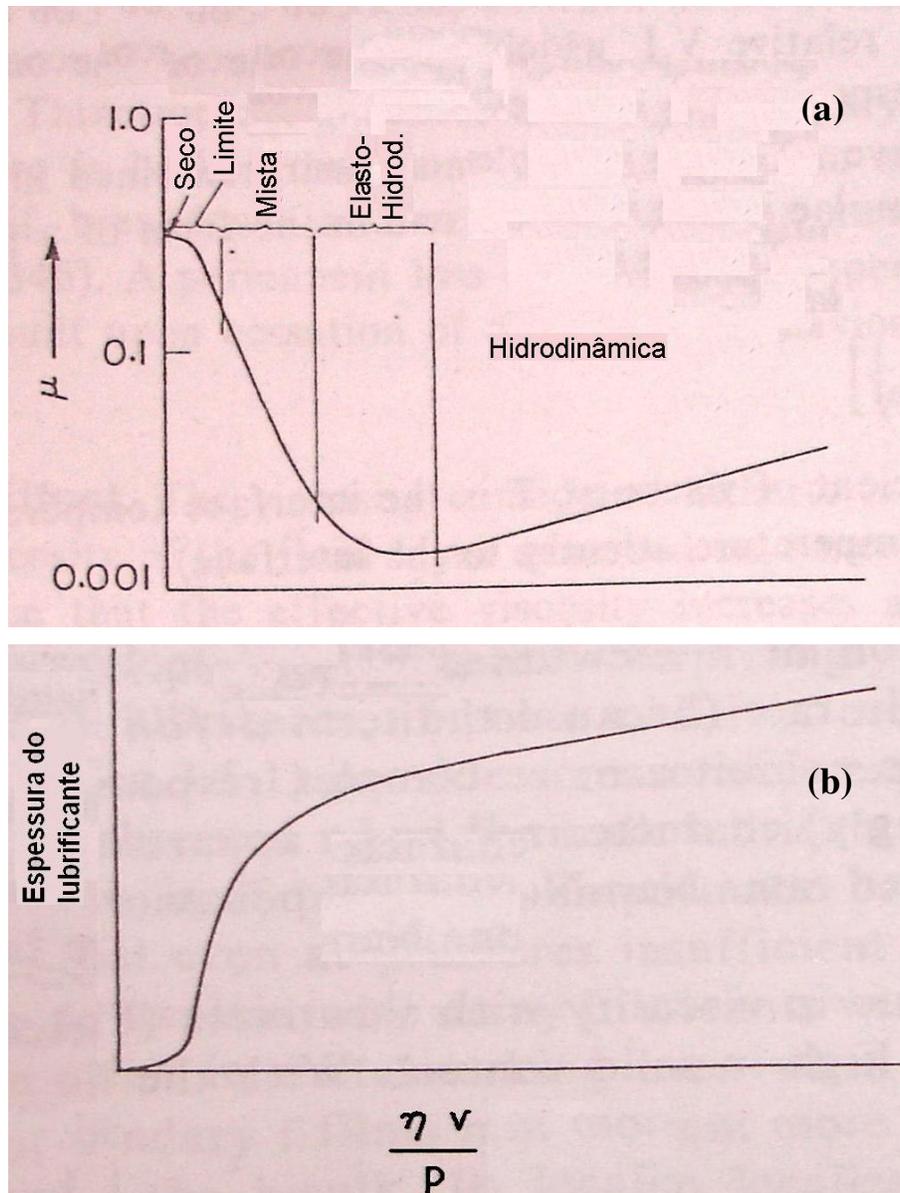


Figura 7 - Curva de Stribeck (Schey, 1983)

Em seu experimento observou que quando duas superfícies paralelas são sobrepostas e uma é movimentada sobre a outra com uma velocidade relativa v , o lubrificante é arrastado com a superfície movimentada na mesma velocidade, e permanece estacionário na superfície sem movimentação, promovendo uma tensão de cisalhamento e, quando aplicado um carregamento normal, pode-se romper o filme lubrificante.

No início do escoamento do material também se inicia um processo de reação química com o lubrificante entre a região de contato da peça e a ferramenta devido ao calor gerado pelo atrito.

Como consequência, o coeficiente de atrito se torna baixo enquanto houver o filme de lubrificante atuando na interface entre peça e ferramenta conforme Schey (1996).

No experimento de Schey (1996) com chapas finas sem acabamento superficial, houve o declínio gradual do coeficiente de atrito, típico de estudos já evidenciados, porém em chapas galvanizadas houve uma repentina queda seguida de uma estabilização do coeficiente de atrito.

Esse trabalho demonstrou que a natureza da camada do lubrificante tem uma influência muito grande, em velocidade constante, tanto para óleos quanto para lubrificantes sólidos.

Como são áreas particularmente importantes da tribologia, atrito, desgaste e lubrificação têm influências significantes no processo de estampagem profunda.

O atrito representa o papel principal na estampagem profunda assim como em outros processos de conformação.

Em suas diferentes manifestações, o atrito pode resultar num complexo mecanismo de desgaste das superfícies em contato entre a ferramenta e a peça.

Com o aumento da velocidade de escorregamento o coeficiente de atrito tende a diminuir devido ao aumento da espessura do filme lubrificante no regime hidrodinâmico.

Considera-se que o atrito é produzido pela ação recíproca das minúsculas irregularidades presentes nas superfícies em contato.

O coeficiente de atrito μ é expresso pela força de atrito dividida pela força normal, como segue abaixo:

$$\mu = F_A / F_N$$

ou a tensão de cisalhamento dividido pela tensão normal de contato,

$$\mu = \tau / \sigma$$

Yang (1999) analisou o processo de embutimento profundo utilizando filmes espessos de lubrificação de modo a evitar o contato da peça com a ferramenta, desenvolvendo um modelo teórico para esse processo. O estudo foi dividido em duas fases de deformação.

Primeiramente, foi analisada a zona de compressão do lubrificante com a peça e posteriormente, a zona da ferramenta onde começa a dobra da peça.

Neste trabalho ele demonstrou que, quanto maior a viscosidade do lubrificante, maior será a espessura do filme e melhor será sua atuação para diminuir o coeficiente de atrito, salvo para os lubrificantes sintéticos que possuem características específicas associadas aos efeitos dos polímeros em determinadas situações de temperatura e pressão.

Han (1997) analisou em dois casos a influência da **geometria da ferramenta** sobre o atrito em ensaios de estiramento e avaliou que efeito de desgaste não deve ser estudado de forma genérica, sendo necessário subdividi-lo em cinco estágios: deformação, desgaste superficial, adesão, abrasão e fadiga superficial.

O acabamento das superfícies também afeta a força de atrito, que tende a crescer à medida que a rugosidade superficial diminui. Quando superfícies perfeitamente lisas, tais como o vidro e metais polidos, estão em contato, o atrito é muito maior do que para o caso do contato entre materiais similares com superfícies levemente rugosas, indicando que outro fenômeno deve estar presente.

Segundo Dubar (2005) o fenômeno de **desgaste** é sinônimo de perda de material e o principal responsável pelo desgaste superficial é o contato entre as asperezas presentes nos perfis de rugosidade superficial. A remoção dessas asperezas pode ocorrer por vários mecanismos como abrasão, adesão ou fadiga de contato, dependentes de numerosos parâmetros como dureza da superfície, temperaturas, pressão de contato e lubrificação.

Schuler (1998) denomina a **adesão**, como a soldagem a frio que ocorre devido aos esforços que surgem entre as partes atritadas. Supostamente isso ocorre devido à deformação plástica dos picos da rugosidade contidos na superfície da peça em contato com a ferramenta, que causa uma

“quebra” do filme lubrificante, gerando uma superfície brilhante na região conformada. Essa adesão é mais provável na interface de contato de metais com estruturas cristalinas e durezas similares.

Já o processo de desgaste por **abrasão** é caracterizado pela remoção de partículas na região de interface ferramenta peça que sofre o atrito. Portanto a resistência ao desgaste é maior quanto maior a dureza da ferramenta, segundo Schuler (1998).

O desgaste por **fadiga** é definido como sendo a separação de partículas dos materiais em contato. Essa separação é causada por fraturas devido à fadiga gerada por tensões residuais mecânicas, térmicas e químicas na interface de contato.

Na estampagem profunda a fadiga não é de grande importância, sendo mais comum em processos de estampagem de corte onde os esforços são muito superiores e as velocidades são mais elevadas.

2.3 Lubrificação

Existem vários tipos de lubrificantes, destacando-se para a estampagem os lubrificantes sólidos e lubrificantes líquidos de extrema pressão. Nesta análise serão considerados os lubrificantes líquidos.

Durante a aplicação das forças sobre a chapa, há uma adaptação microgeométrica, que se inicia pelos picos da rugosidade da superfície do material em contato com a ferramenta, afetando a continuidade do filme lubrificante.

2.3.1 Características dos lubrificantes

Há várias formas de se promover a separação de duas superfícies sólidas em movimento com o emprego de lubrificantes como descritas a seguir.

O objetivo do uso de lubrificantes é basicamente criar uma camada na superfície da chapa que facilite o escorregamento do material para dentro da ferramenta a fim de evitar seu desgaste e

defeitos outros superficiais. Em outros casos o lubrificante também é importante para refrigerar a ferramenta.

Quando o lubrificante é aplicado na ferramenta tem-se por objetivo controlar o desgaste, e quando o lubrificante é aplicado na superfície da peça, há necessidade de pelo menos uma pequena aplicação na superfície da ferramenta de modo que o lubrificante não fique “preso” na superfície da peça.

Deng e Lovell (2000) avaliaram resultados de outras bibliografias quanto os efeitos da lubrificação para o processo de estampagem profunda de tanques de combustível. Lubrificantes como graxas e óleos foram avaliados quanto o estado de atrito, viscosidade, densidade e a área de contato e constatado sua influência sobre a rugosidade superficial do material em ensaios com raios de pinos correspondentes ao processo de estampagem.

Schey (1984) mostra que a película do lubrificante é mais fina se o tempo for longo entre a aplicação de pressão do prensa chapa e o começo do embutimento, com velocidade de entrada do punção mais baixa, sendo difícil manter o fluido na região do raio da matriz (R3) que está envolvida pela chapa, necessitando aumentar esse raio para diminuir a tensão (Figura 8).

A rugosidade superficial ajuda a ancoragem do lubrificante. A quantidade ancorada depende do volume de espaços livres entre as cavidades, aumenta a atuação de lubrificantes líquidos e promove melhor retenção dos lubrificantes sólidos. Um parâmetro geralmente empregado na descrição da topografia da distribuição de rugosidade superficial é a raiz da média quadrada (Rms) da distribuição de alturas dos picos e vales da rugosidade.

Os lubrificantes estão sujeitos a temperaturas e compressões diferentes durante sua aplicação, e sua escolha correta é diretamente influenciada por variáveis importantes como viscosidade em função da temperatura e pressão, densidade, e compressibilidade.

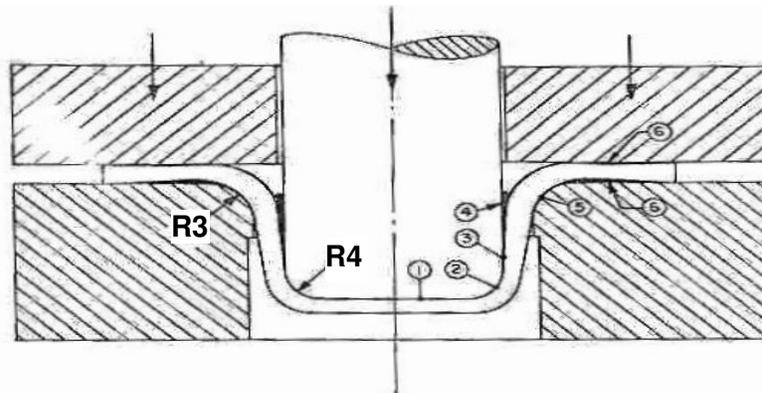


Figura 8 - Pontos de diferentes condições de lubrificação no processo de embutimento profundo (Schey, 1983).

2.3.2 Regimes de lubrificação

Os mecanismos presentes nos regimes de lubrificação, típicos de conformação de metais são relacionados por Schey (1984) com o auxílio da curva de Stribeck (Figura 7 b) adaptada para a deformação plástica de peças metálicas e dividida nas seguintes classes: regime de lubrificação hidrodinâmica, hidrostática, regime de lubrificação mista e regime de lubrificação de camada limite. Neste texto o regime de lubrificação mista compreende todos os regimes de transição entre a lubrificação hidrodinâmica e a lubrificação de camada limite.

No primeiro regime, lubrificação hidrodinâmica a película lubrificante é gerada e mantida pela ação viscosa causada pelo movimento entre superfícies, e o filme lubrificante é espesso, o bastante para separar completamente as duas superfícies sólidas.

Já na lubrificação hidrostática, a película de lubrificante é criada e mantida através de uma fonte externa de pressurização que impulsiona o fluido entre as superfícies.

Na lubrificação híbrida, a película lubrificante é gerada pela ação combinada dos efeitos hidrodinâmicos e hidrostáticos.

A lubrificação elasto-hidrodinâmica é uma forma de lubrificação hidrodinâmica na qual a deformação elástica das superfícies torna-se relevante.

O regime de lubrificação parcial ou mista é a transição entre os regimes de lubrificação elasto-hidrodinâmica e lubrificação de camada limite. Em algumas regiões de contato ocorrerá

interação metálica entre os picos de rugosidade superficial, enquanto em outras regiões de contato haverá separação total das superfícies pela ação do lubrificante pressurizado.

Na lubrificação de camada limite, as superfícies sólidas não são separadas pelo lubrificante e, naturalmente, os efeitos do filme fluido são desprezíveis. O mecanismo da lubrificação por contato é governado pelas propriedades físicas e químicas dos minúsculos filmes de material depositado entre as superfícies. O coeficiente de atrito independe da viscosidade do fluido. As características de atrito são determinadas pelas propriedades dos sólidos e do filme lubrificante nas regiões de interface.

Existe uma dificuldade muito grande para seleção do lubrificante devido à infinidade de condições de estampagem existentes. Em alguns casos Schuler (1968) sugere as seguintes aplicações:

1) Para estampagem profunda sem estiramento, geralmente são utilizadas graxas diluídas ou não em água, óleos com adição de ácidos graxos e substâncias químicas ativas, óleos com dissulfeto de molibdênio, filmes plásticos com adição ou não de lubrificantes, fosfato e óxidos.

2) Para processos de estampagem profunda onde o estiramento é necessário, utilizam-se graxas pouco diluídas ou não em água, óleos não diluíveis em água, adicionados de ácidos graxos e substâncias químicas ativas. Também são utilizados óleos com bissulfeto de molibdênio, fosfatos e óxidos.

Eles podem ser aplicados com escovas, pincéis de rolos, dependendo de sua viscosidade.

Óleos como o AQUAMOVE 109 AS da empresa Tirreno (2004), que se caracteriza por uma película semi-secativa, são comumente aplicados a condições de proteção contra fatores ambientais que provocam oxidação em materiais metálicos, sem qualquer característica de efeito tribológico.

2.3.3 Tipos de lubrificantes

Segundo Schey (1984) os lubrificantes são classificados como solúveis e não solúveis em água, sólidos ou vernizes.

Lubrificantes líquidos são predominantemente a base de óleos, geralmente de misturas sem uma composição consistente, com parafina, aromáticos, ou derivados de nafta, de acordo com sua origem. Óleos animais, vegetais e sintéticos também pertencem a esta categoria.

Lubrificantes do tipo pasta são provenientes de óleos minerais ou sintéticos, como graxas, ceras e sabão. Fragmentos de ceras e sabões duros são usados como lubrificantes sólidos. As propriedades de lubrificantes podem ser alteradas através de elementos aditivos e servem para melhorar o desempenho sob esforços e suportar grandes capacidades de força, temperatura e pressão, mantendo as propriedades da viscosidade, prevenindo corrosão e criando camadas de adsorção física ou de reação de substâncias químicas.

Lubrificantes sólidos são aplicados na interface ferramenta e peça, e apesar de permanecerem secas, a película formada ainda separa as superfícies evitando o contato metálico. A ancoragem desse tipo de lubrificante pode ser puramente mecânica ou por reações químicas, não interessando se o lubrificante será aplicado sobre a peça ou sobre a ferramenta.

Y. L. Su, et al. (1997) mostraram nos ensaios com lubrificação para comparação tribológica (deslizamento e desgaste mecânico) entre filmes TiN, TiCN e CrN, que o fluido de corte comum, diluído na proporção 1:20 apresentou melhor desempenho tribológico, principalmente quanto à lubrificação, comparado com o lubrificante HD-150 (conhecido como petróleo chinês), que na teoria por possuir enxofre e cloro deveria suportar maior pressão de contato.

Óxidos são de extrema importância por controlarem a deformação em superfícies secas. São provenientes da oxidação de metais ou ligas e podem ser aplicados tanto na peça, quanto na superfície da ferramenta. É necessária que a camada seja suficientemente espessa para resistir aos picos de relevos da rugosidade devido ao acabamento da superfície da ferramenta ou peça, mantendo a separação entre elas. Schey (1984) ainda afirma que se essa camada for excessivamente grossa, a resistência ao desgaste poderá ser comprometida. Se a aplicação do óxido for sobre a peça, ele deverá ser suficientemente dúctil ao longo de sua superfície; e se for aplicado sobre a ferramenta, a camada deverá possuir dureza suficiente para resistir aos esforços da estampagem e sobrepor a rugosidade da peça.

Os óxidos de ferro Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , são muito frágeis decompondo-se quando sujeitos à esforços, porém o FeO é capaz de superar alguns limites de deformação. O óxido de cobre decompõe-se acima de 500°C . Óxidos de níquel, alumínio, titânio, chumbo são muito duros e frágeis se comparados ao substrato. O óxido de magnésio quebra-se em partículas e pode ser utilizado como lubrificante.

Schey (1984) também descreve que esses lubrificantes podem auxiliar a ação de outros, simplesmente como ancoragem para lubrificantes líquidos ou reagindo com lubrificantes que isolados seriam ineficazes sobre a superfície do metal puro.

Com o revestimento da superfície da peça com uma camada contínua de outro metal pode-se reduzir a adesão entre ferramenta e peça. Na ausência de outro lubrificante a camada de metal com baixa tensão de cisalhamento sobre a peça pode reduzir o atrito conforme Schey (1984). A camada metálica pode promover um melhor desempenho de outro lubrificante, geralmente líquido, favorecendo sua ancoragem. O filme metálico somente será eficaz se estiver bem unido e uniforme sobre a ferramenta, de modo que o método de aplicação deve ser eficaz para evitarem falhas sobre a camada.

Polímeros são mais fracos que os metais, porém são suficientemente dúcteis para deformar junto com a superfície da peça. Precisam ser aplicados de forma separada na ferramenta ou depositados sobre a superfície da peça. Os polímeros podem ser raspados, fundidos ou colocados sobre as áreas de atuação em forma de pó para melhor dispersão, porém dependem do tipo de superfície ao qual serão aplicados, pois se não houver adesão suficiente o filme poderá ser rompido, e perder sua eficácia.

Componentes como grafite e dissulfeto de molibdênio são muito utilizados como lubrificantes sólidos não somente pela suas propriedades químicas, mas também por apresentarem baixos custos comparados a outros lubrificantes.

Lubrificantes de extrema pressão foram desenvolvidos para equipamentos e elementos de máquinas nos quais atuam altas pressões de contato combinadas com intenso deslizamento entre as superfícies e altas temperaturas. Esses lubrificantes são considerados como uma versão dos

lubrificantes sólidos diferenciando-se pela baixa tensão de cisalhamento, limitada pelos pontos de contato. Geralmente esses lubrificantes contêm fósforo, cloro e enxofre aplicados como aditivos de óleos minerais.

Os mecanismos de atuação foram investigados por Forbes, Kapsa e Martin conforme Schey (1984), porém não foram compreendidos totalmente, devido à superfície da camada não ser contínua de modo a impossibilitar que seja analisado pelas técnicas disponíveis.

Os elementos aditivos combinam-se formando filmes provenientes da reação sob temperaturas mais altas, tornando estes lubrificantes aptos a serem utilizados para qualquer aplicação. Por outro lado, a interação entre esses lubrificantes com as superfícies e o meio ambiente prevalece nos ensaios, alterando tais mecanismos.

Schey (1984) mostra alguns eventos do mecanismo de funcionamento desses lubrificantes:

- Interações do meio ambiente com os aditivos ocasionam outras reações.
- Os aditivos ou o produto da reação adsorvem-se sobre a superfície do metal.
- Sob intensa pressão e elevada temperatura, ocorrem reações com esses aditivos, que se unindo às moléculas ativas reagem para formar polímeros e desenvolver elementos ativos como compostos metalorgânicos e óxidos.
- O produto da reação é expulso pelo efeito do deslizamento e também por dissolução química sendo excluído da superfície da peça.

2.4 Produtos, geometrias e defeitos

Os defeitos mais comuns que ocorrem em peças estampadas por embutimento profundo, e na maioria dos casos, são provenientes de erros no projeto da ferramenta, construção da ferramenta, materiais em não conformidade com a especificação do projeto do produto. A conservação da ferramenta também dá origem a posteriores operações de retrabalho ou até mesmo o sucateamento do material estampado.

Para análise da origem dos defeitos há necessidade de conhecer detalhadamente o processo de conformação e o material que está sendo empregado, para evidenciá-los e caracterizá-los de maneira conveniente.

A aplicação de simulação numérica sobre conformação de chapas metálicas atualmente tem sido útil para dentro da indústria através de comparações entre os resultados práticos e teóricos para soluções de problemas e redução do tempo de fabricação.

Tekkaya (2000) destaca a aplicação de novas técnicas e critérios de falhas através da simulação numérica, substituindo testes físicos e experimentos de avaliação de erros, permitindo maior precisão nas análises para eliminação ao máximo de potenciais falhas e otimizações baseadas na análise mais sensível para muitos parâmetros como geometrias, pressão, posição entre outros itens.

Os defeitos podem ocorrer no início da conformação em que há a acomodação da chapa na ferramenta, como superfícies quebradas, linhas de distensão (stretcher strains), estufamento localizado, ondulações, rugas, arranhões, marcas e defeitos durante a conformação, associados à rigidez da peça como empenamento, efeito mola, baixa resistência mecânica da peça depois de conformada e defeitos de forma no produto final (Figura 9).

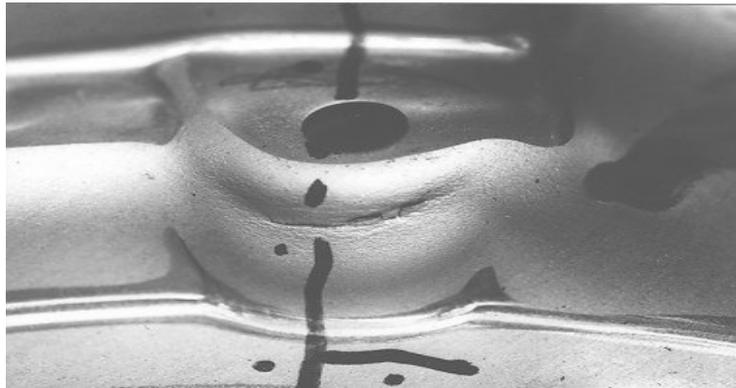


Figura 9 – Aspecto macroscópico do rompimento de uma peça.

Schuler (1968), a Tabela 2 relata alguns defeitos típicos da estampagem profunda e como preveni-los. Esses defeitos são classificados por tipo 1 (defeitos na chapa), tipo 2 (defeitos no conceito de construção da ferramenta), tipo 3 (deficiências na conservação e manutenção da ferramenta).

Keeler (2000) sugere remover os lubrificantes e aumentar a rugosidade na região do raio do punção onde o atrito deve ser máximo, para que não haja movimento relativo entre as superfícies da peça e ferramenta e o material não rompa, evitando a ruptura da chapa nessa região.

Tabela 2 – Defeitos de estampagem. (Schuler, 1968)

| Aspecto do defeito | Possíveis causas | Soluções propostas |
|---|--|---|
| Problemas como pregas ou fendas transversais no corpo | inclusão na chapa proveniente do processo de laminação | necessita-se trabalhar com material mais puro (tipo 1). |
| Problemas associados a furos alongados ou fendas | provocadas por poros finos na chapa ou corpos estranhos que penetram durante o processo de estampagem no interior da ferramenta | Necessita-se cuidar da limpeza e locais de armazenamento das chapas (tipo 1) |
| Diferenças de espessura na chapa provocam aba de largura irregular, formando-se fendas entre as regiões da aba de diferentes espessuras | provocados por cilindros de laminação desgastados | necessário exigir do fornecedor produtos laminado com tolerâncias dimensionais mais estreitas (tipo 1). |
| Desprendimento do fundo | Associado ao punção de embutir atuar como um punção de corte devido o raio de curvatura ser muito pequeno no punção e na aresta embutida | Necessita-se arredondar melhor a aresta no punção e na matriz de estirar (tipo 2). |
| Ruptura do fundo ou fundo rompido unido ao resto da peça apenas por um lado | está associado a relação de embutimento que é grande demais para chapa empregada | recomenda-se introduzir mais uma etapa de embutimento ou escolher uma chapa de maior capacidade de embutimento (tipo 2). |
| Trincas no fundo depois de se ter conseguido embutir quase todo o corpo ocorre pouco em peças redondas e mais freqüentemente em peças retangulares. | variação de espessura na chapa ou folga de embutimento entre o punção e a matriz muito estreita. Em peças retangulares o defeito está relacionado ao estreitamento da folga de embutimento devido à formação de uma pasta de óxido | recomenda-se revisar a espessura da chapa e eventualmente alargar o orifício de embutimento e, em peças de formato retangular é importante sempre limpar as arestas da ferramenta (tipo 2). |
| Forma abaulada ou corpo arqueado para fora, juntamente com o arqueamento do canto superior do recipiente | justifica-se pela folga de embutimento demasiadamente larga | Aumentar da pressão de sujeição devendo-se trocar a matriz ou o punção (tipo 2). |
| O surgimento de estrias de embutimento | pode estar associado ao desgaste da ferramenta ou chapas oxidada | Promover o tratamento superficial para endurecimento das arestas da matriz, ou melhorar o processo de decapagem pode melhorar as condições de lubrificação (tipo 3). |
| Relevos unilaterais nas rupturas do fundo (por dentro) | posição excêntrica do punção com relação matriz de embutimento | soltar a sujeição da ferramenta e centrar a matriz corretamente com relação ao punção (tipo 3). |
| Defeitos como formação de pregas na aba | podem estar associada a pressão de sujeição insuficiente | necessário aumentar a pressão do sujeitador (tipo 3). |
| Pregas e trincas na aba | Referem-se a folga de embutimento muito larga ou arredondamento muito grande das arestas de embutimento | recomenda-se para essa situação trocar a matriz do embutimento (tipo 3). |
| Ampolas no fundo e às vezes abaulamento do fundo | Podem ser provocados pela má aeração da ferramenta e peça | melhorar a saída do ar através da distribuição do lubrificante mais uniforme (tipo 3). |

Capítulo 3 – Materiais e métodos

A existência de defeitos como fraturas, afinamentos e riscos superficiais são comuns nos processos de estampagem profunda. Tais defeitos implicam na perda de desempenho em aspectos de qualidade e produtividade.

Fatores como geometria da ferramenta, geometria do blanque, espessura da chapa, velocidade de embutimento, controle do prensa chapas, anisotropia, taxa de encruamento e taxa de estampabilidade, entre outros, são variáveis que contribuem para surgimento desses defeitos quando não são avaliados e otimizados adequadamente.

A maior parte dos estudos experimentais e teóricos sobre estampagem profunda tem sido realizado em ensaios de embutimento de corpos cilíndricos de fundo plano a partir de um blanque de diâmetro externo definido, chamado ensaio Swift (Figura 10), similar ao “Earing Test” sugerido pela norma ISO 11531 – Metallic Materials (1994).

Para elaborar este estudo com lubrificantes optou-se em desenvolver um corpo de prova na forma cilíndrica, de grande ou média espessura e com furos laterais, para estudar a relação entre lubrificantes e variáveis do sistema, como força de embutimento, rugosidade, raios da ferramenta, atuação do prensa chapa e geometria do copo. Essa peça foi selecionada por analogias geométricas a uma carcaça embutida de embreagem automotiva.

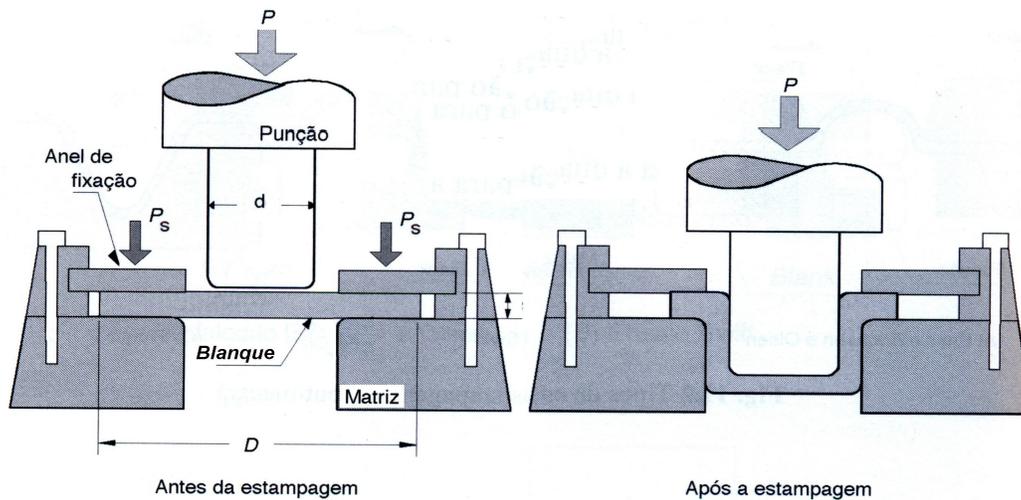


Figura 10 – Ensaio Swift de estampagem profunda (Adaptado de Garcia, et al., 2000).

Esse tipo de ensaio permite relacionar as variáveis de influência e as variáveis de resposta como num processo de produção por estampagem profunda.

Para identificação e determinação das variáveis do sistema foi elaborado o diagrama de causa e efeito das fraturas (Figura 11) permitindo definir as variáveis de influência e relacioná-las com as variáveis de resposta para elaboração do planejamento experimental.

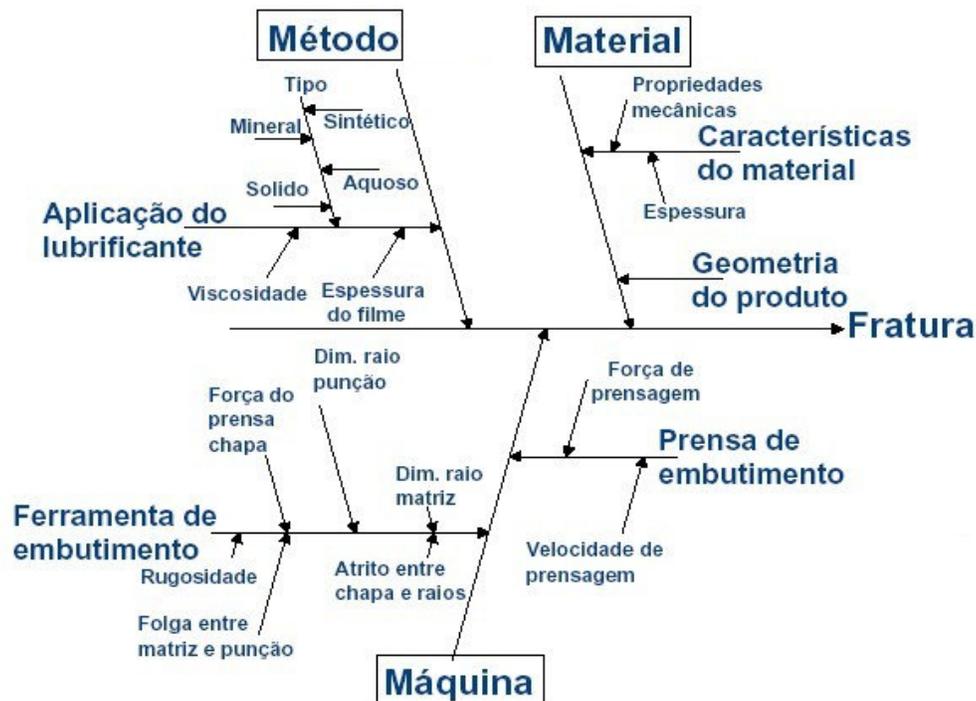


Figura 11 – Causas e efeitos hipotéticos da falha.

Duas variáveis de resposta foram escolhidas para avaliação nos ensaios, uma contínua, caracterizada pela força de embutimento e outra dicotômica, associada ao evento de ocorrência ou não da fratura em função da lubrificação.

3.1 Especificação do material

3.1.1 Caracterização das propriedades mecânicas e químicas

Para estampagem de blanques de chapas laminadas a quente foi selecionado um aço-carbono para estampagem profunda, com espessura na ordem de 3,5 mm, conforme norma ABNT NBR 5906 EPA (1984) com as seguintes características químicas, mecânicas e metalúrgicas especificadas nas Tabelas 3 a 5.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço-carbono laminado a quente (ABNT – NBR 5906)

| Propriedades Mecânicas | | |
|------------------------|----------|-------------|
| LR [MPa] | LE [MPa] | AL-50mm [%] |
| ≤ 410 | ≤ 280 | ≥ 38 |

Tabela 4 – Composição química do aço-carbono laminado a quente (ABNT – NBR 5906)

| Composição química (% de massa) | | | | | |
|---------------------------------|--------|-------|--------|--------|-----|
| C | Mn | Al | P | S | Si |
| < 0,10 | < 0,45 | > 0,2 | < 0,03 | < 0,03 | -x- |

Tabela 5 – Propriedades metalográficas e superficial do aço-carbono laminado a quente (ABNT – NBR 5906)

| Propriedades Metalográficas | | Superficial |
|-----------------------------|--------------------|-------------|
| Tamanho de Grão | Nível de inclusões | Rugosidade |
| ASTM 7 à 10 | ASTM E15 | Rt = 15mm |

Para avaliação da estampabilidade do material foram analisados fatores como o grau de anisotropia, o coeficiente de encruamento e a qualidade da superfície.

O grau de anisotropia é caracterizado pelo cálculo dos coeficientes de anisotropia normal r para as direções a 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação que permite calcular o coeficiente planar Δr e o coeficiente médio \bar{r} (BRESCIANI FILHO, et al., 1986).

3.1.2 Caracterização do acabamento superficial: rugosidade e textura

Para caracterização do acabamento superficial foram realizados na Schaeffler Brasil Ltda ensaios de avaliação da rugosidade e textura superficial do blanque, num rugosímetro modelo “Form TalySurf Series 2 PGI - Taylor Robson Pneumo” (Figura 12) com incerteza de $\pm 0.0281\mu\text{m}$ que permite a medição da rugosidade também em geometrias não planas como por exemplo raio, aplicado nas amostras de fitas de aço nos sentidos de laminação 0° , 45° e 90° .



Figura 12 – Rugosímetro de raio “Form TalySurf Series 2 PGI - Taylor Robson Pneumo”

Para caracterização da textura superficial do material foram realizados ensaios no microscópio de varredura eletrônico do DEMA – FEM - UNICAMP com uma amostra do material laminado a quente (norma ABNT – NBR 5906) e uma amostra de material laminado a frio (norma ABNT – NBR 6649) para comparação das texturas.

Para avaliação da espessura inicial dos blanques utilizados nos ensaios, foram executadas medições com um micrômetro de escala digital.

3.2 Especificação do corpo de prova e ferramental

3.2.1 Geometria do blanque e características do corpo de prova

Os critérios para dimensionamento do produto como corpo de prova para o ensaio de lubrificantes foram estabelecidos a partir dos conceitos do ensaio Swift (Figura 10).

O blanque para o ensaio de embutimento foi adaptado incluindo oito furos de diâmetro 15,3 mm no diâmetro primitivo de 108 mm do blanque para provocar maior severidade dos ensaios. A Figura 13 contém características geométricas de produtos comerciais como rodas de aço e carcaças de embreagens automotivas.

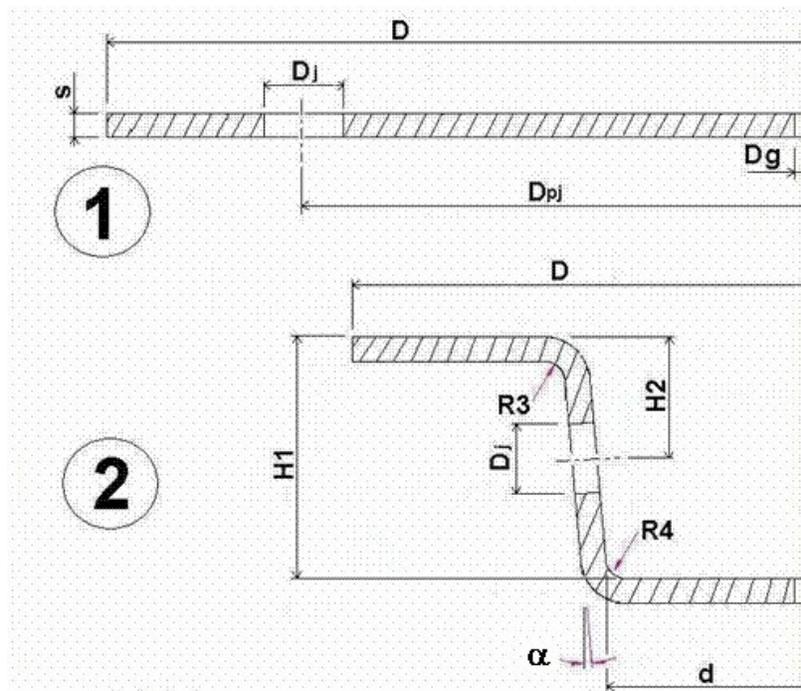


Figura 13 – Dimensionamento do produto antes (1) e após o embutimento (2).

Situação 1: Dimensões do blanque.

D_e = diâmetro externo do blanque conforme critérios de ensaio;

D_j = diâmetro da janela de 15,3 mm;

D_{pj} = diâmetro de posição das janelas igual a 108 mm;

D_g = diâmetro do furo de guia do blanque na ferramenta com 8 mm;

Situação 2: Dimensões do corpo de prova embutido.

De = diâmetro externo após embutimento conforme critérios de ensaio;

d = diâmetro formado pelo punção da ferramenta igual a 95 mm;

s = espessura da chapa de 3,5 mm;

R3 = raio formado pela matriz conforme critérios de ensaio;

R4 = raio formado pelo punção conforme critérios de ensaio;

H2 = altura de posição da janela conforme critérios de ensaio;

H1 = altura de embutimento total igual a 34,5 mm;

α = ângulo de 5 graus de saída do produto na ferramenta.

Baseando-se no diagrama de relação do limite de estampagem de Schuler (1968) o coeficiente de embutimento sugerido numa única operação é o índice $\beta_0 = 2,0$, denominado também limite de embutimento profundo ou razão crítica entre diâmetros externo do blanche e interno do produto. A partir desse coeficiente de embutimento pode-se determinar o diâmetro interno [d], ou diâmetro do punção da ferramenta de embutimento e o diâmetro externo [De], ou diâmetro máximo do blanche, adequados para o sucesso do embutimento.

O resultado do **dimensionamento do blanche** para o experimento baseado no ensaio de Swift foi o corpo de prova (Figura 14), com oito furos de diâmetro 15,3 mm no diâmetro médio de 108 mm do blanche, com diâmetro externo de 185 mm.



Figura 14 – Blanche com oito furos de diâmetro 15,3 mm no diâmetro médio de 108 mm.

Uma vez determinados o diâmetro externo [De] e o diâmetro interno [d] foi possível dimensionar os valores para o diâmetro adequado da matriz de embutimento e a folga ideal entre essa matriz e o punção de embutimento calculada segundo Schuler (1998).

Quanto à previsão dos esforços durante o embutimento, há dois parâmetros que influenciam o comportamento do sistema. A força necessária para o punção empurrar o blank para dentro da matriz, ou força de embutimento, e a força necessária para evitar enrugamento na região da aba, ou força de sujeição.

A determinação da **força de embutimento** necessária permite dimensionar a maior parte dos elementos ou recursos do sistema para executar o experimento. Schuler (1968) definiu a seguinte expressão para cálculo da força necessária para embutir uma peça cilíndrica.

$$F_{max} = \pi \cdot d \cdot s \cdot LR$$

Onde,

Fmax = força máxima necessária para embutir a peça

LR = limite de resistência do material

d = diâmetro do punção

s = espessura da chapa

A estimativa dos esforços de embutimento para variados diâmetros externos (Tabela 6) foram baseados na definição de Schuler (1968), determinando a classe de blankes em função do diâmetro externo e seus respectivos esforços esperados para a seleção da condição a ser aplicada na primeira fase do experimento.

Tabela 6 – Características e esforços esperados para a primeira fase do experimento

| De | d | s | $\beta_0 = De/d$ | d/s | $m_0 = d/De$ | Fmax [kN] | fg | ø matriz |
|-----|----|-----|------------------|-------|--------------|-----------|------|----------|
| 185 | 95 | 3,5 | 1,95 | 27,14 | 0,51 | 339 | 4,88 | 104,8 |
| 175 | 95 | 3,5 | 1,84 | 27,14 | 0,54 | 339 | 4,75 | 104,5 |
| 165 | 95 | 3,5 | 1,74 | 27,14 | 0,58 | 339 | 4,61 | 104,2 |
| 155 | 95 | 3,5 | 1,63 | 27,14 | 0,61 | 339 | 4,47 | 103,9 |
| 145 | 95 | 3,5 | 1,53 | 27,14 | 0,66 | 339 | 4,32 | 103,6 |
| 135 | 95 | 3,5 | 1,42 | 27,14 | 0,70 | 339 | 4,17 | 103,3 |

De = diâmetro externo do blanque

d = diâmetro do punção

s = espessura da chapa

fg= folga entre a matriz/punção

β_0 = coeficiente de embutimento

m_0 = fator mínimo de embutimento

A partir desses resultados foram determinados para a primeira fase, blanques com espessura de 3,5 mm e diâmetro externo nas dimensões de 185 mm, 175 mm, 165 mm, 155 mm, 145 mm e 135 mm, com previsão de força de embutimento na ordem de 340 kN, adequada para a prensa empregada nos ensaios.

Além da aplicação do modelo de Schuler para previsão dos esforços, também foram desenvolvidas simulações computacionais pelo método do volumes finitos no Laboratório de conformação de mecânica da UNICAMP, empregando-se o software comercial MSC Superforge 2005.

3.2.2 Dimensionamento do ferramental.

Para confecção do ferramental foi selecionado o aço temperado, endurecido para trabalho a frio AISI D2, com uma dureza de 58/60 HRC.

A força de sujeição inicial necessária para o experimento foi determinada conforme Tschätsch (1997).

$$F_n = (\pi / 4) * (D_e^2 - d^2) * p_s \text{ [N]}$$

onde,

De - diâmetro externo do blanque

d - diâmetro do punção

p_s - pressão específica de sujeição

$$p_s = (\beta_0 - 1)^2 + d / (200 * s)) * (LR / 400) \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Onde,

β_0 - relação de máximo embutimento

d - diâmetro do punção

s - espessura da chapa

LR - Limite de resistência do material

A delimitação do maior e menor raio de embutimento da matriz e punção para os ensaios foram baseados em dois modelos. A partir do modelo citado por Acesita (1997) usado para calcular raio de ferramentas para dobramento de chapas, determinou-se o menor raio (Rmd), aumentando-se a severidade do ensaio desse projeto. Já a delimitação do maior raio (Rme) para o ensaio, foi baseada no modelo tradicional de embutimento de chapas.

$$Rmd = (50 \times (s/AL)) - (s/2)$$

Onde,

Rmd - raio mínimo de dobramento.

s - espessura da chapa.

AL - Alongamento do corpo de prova até o limite de ruptura do material.

O modelo tradicional para cálculo do raio mínimo no processo de embutimento é

$$Rme = 0,8\sqrt{(De - d) \times s}$$

Onde,

Rme - raio mínimo de embutimento.

s - espessura da chapa.

De – diâmetro externo do blanque

d – diâmetro do punção

Portanto, para os **raios da ferramenta do ensaio**, foram calculadas as dimensões de 3 mm (modelo de cálculo para processos de dobramento) e 12 mm (modelo de cálculo para processos de embutimento). A partir desses resultados estimaram-se os raios de embutimento para ensaios com raio de punção e matriz com 6 mm e ensaios com raio de punção e matriz com 8 mm.

Para o experimento foram selecionados cilindros pneumáticos (Figuras 15 e 17) e molas (Figura 18) para avaliar qual delas permite obter **a força de sujeição** estável e adequada aos ensaios.

Foram adquiridos nove cilindros do modelo Prody PNCQ – 0,2 – 038 do tipo autônomo sem interligação (Prody, 2006) que incorporam internamente um reservatório, possibilitando a alteração e controle da pressão de carga e permitindo atingir a força de total de sujeição de 14947 N desejada sem elevá-la demasiadamente até o fim de seu curso, chegando até 18376 N, usando como requisito os valores da Tabela 7.

Tabela 7 – Valores para determinação da força de sujeição.

| Índice | Descrição | Unidade | Valor |
|----------------|--|-------------------|-------|
| β_0 | relação de máximo embutimento | - | 1,95 |
| d | diâmetro do punção | mm | 95 |
| s | espessura da chapa | mm | 3,5 |
| LR | limite de ruptura do material | N/mm ² | 325 |
| De | diâmetro externo do blank | mm | 185 |
| dw | diâmetro efetivo da sujeitador | mm | 108 |
| p _s | pressão específica de sujeição | N/mm ² | 0,844 |
| An | área de contato entre o blanque e matriz | mm ² | 17719 |
| Fn | força de sujeição | N | 14947 |

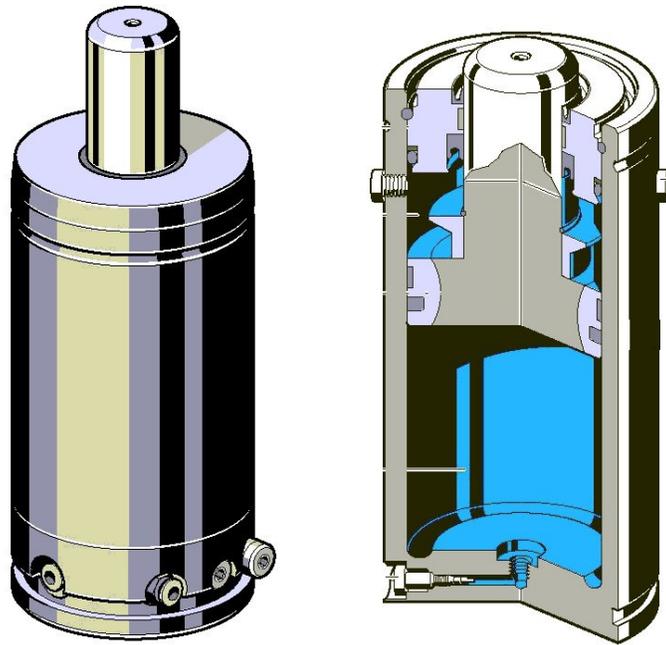


Figura 15 – Cilindros a gás aplicados em ferramentas de estampagem (Prody, 2006).

Foram executados ensaios que permitiram comparar a estabilidade da força de sujeição entre molas helicoidais e cilindros de gás. Aplicando-se molas helicoidais (Figura 18), a elevação demasiada da força de sujeição (Figura 16) provocaria interrupção indesejada do escoamento do blanque, seguido de ruptura do produto antes de atingir o fim do curso de embutimento.

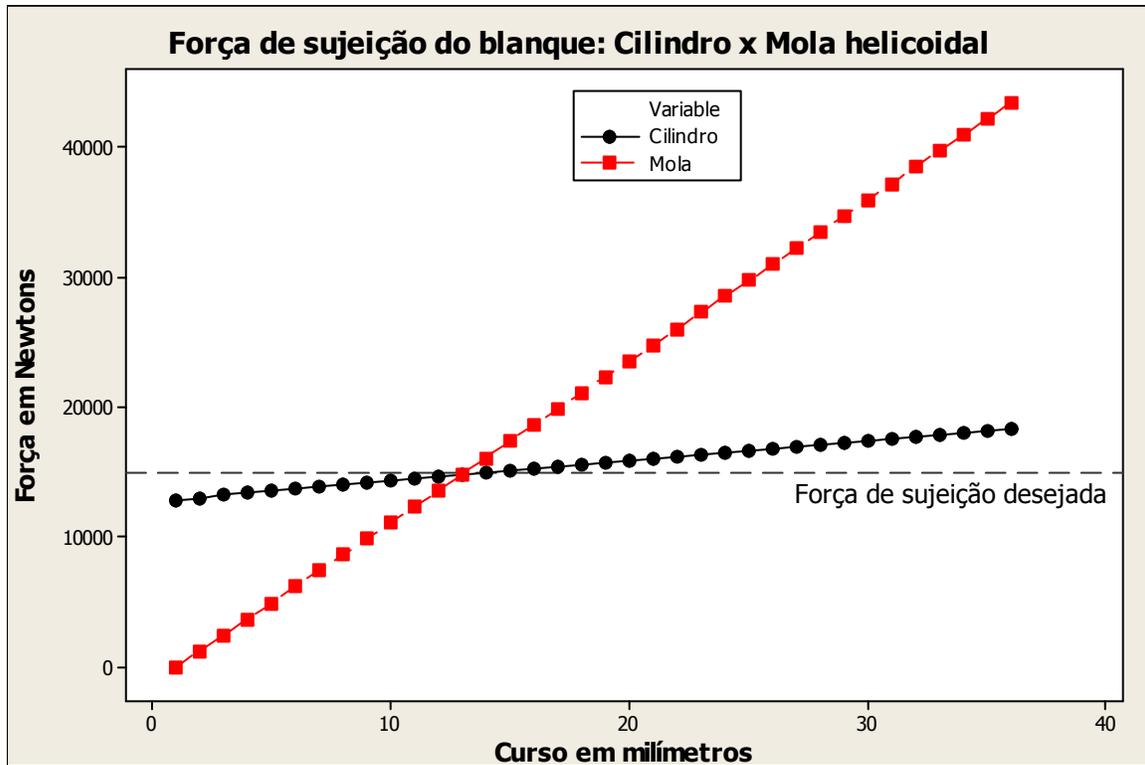


Figura 16 – Comparativo entre a força de sujeição do cilindro de gás e mola helicoidal ao longo do curso de embutimento.

Já os cilindros de gás possuem maior estabilidade ao longo do embutimento permitindo manter quase a mesma força de sujeição desde o início até o fim do embutimento.

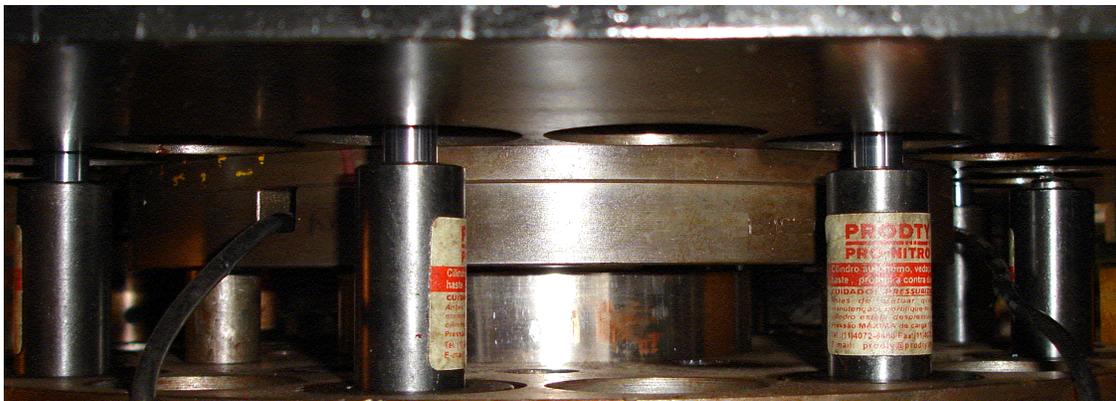


Figura 17 – Foto dos cilindros de gás instalados no sujeitador da ferramenta do experimento.

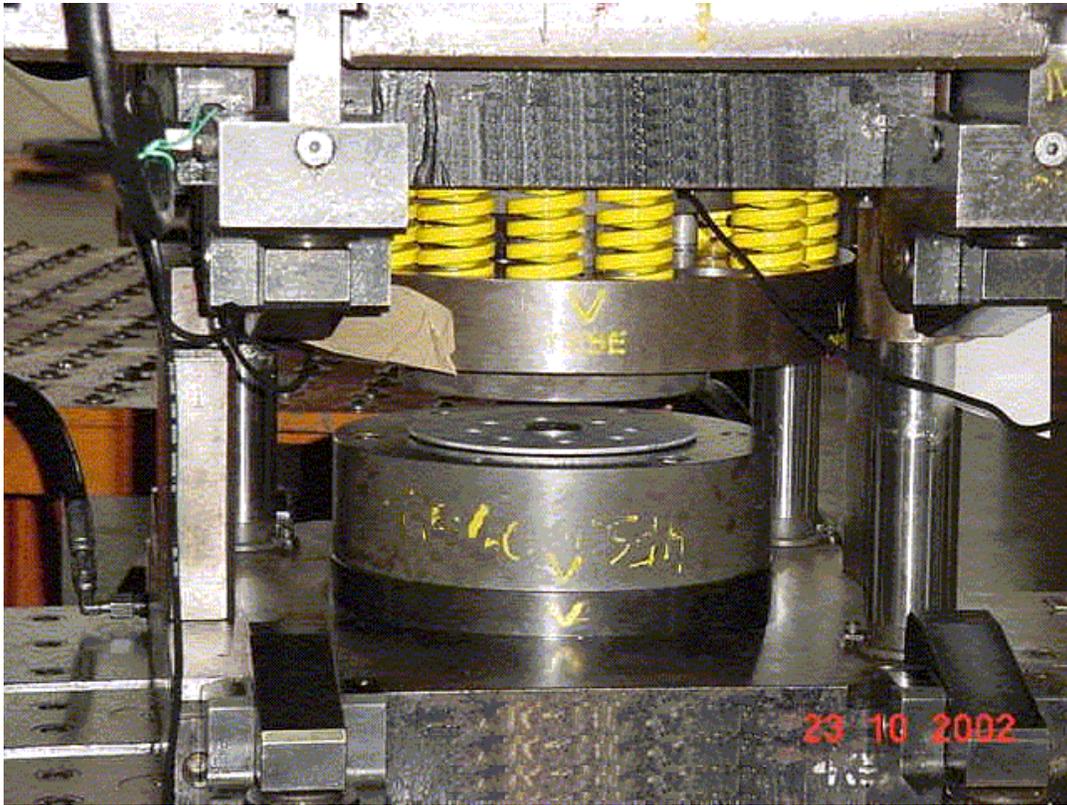


Figura 18 – Foto das molas helicoidais instaladas no sujeitador da ferramenta do experimento.

3.2.3 Instrumentação e aquisição de dados do ensaio

A extensometria elétrica é uma ferramenta muito importante na análise de tensões mecânicas.

Para a medida das deformações na superfície da maioria dos materiais estruturais, normalmente são utilizados extensômetros elétricos de resistência com características definidas de resistência elétrica constante do extensômetro e comprimento da grade de medida, podendo ser de dois tipos, extensômetro de fio ou extensômetro de película.

Esses dois tipos de extensômetros elétricos têm forma específica para cada aplicação. No caso de medidas de deformação na superfície de peças têm-se os estados uniaxial, biaxial e triaxial.

Os transdutores resistivos de deslocamento linear são sensores elétricos para medição de cursos entre 10 mm e 2000 mm, com linearidade média $\pm 0,05\%$ F.E. com fixação através de

olhais, presilhas ou flange, com haste ou cursor junto ao corpo. O retorno da haste pode ser através de mola com um apalpador, ligação elétrica através de cabo ou conector.

Para medição das forças durante os do ensaio foram confeccionados três transdutores de força do tipo “Strain Gage” (Figura 19) à compressão, específicos para instrumentação da ferramenta, com as seguintes características baseadas nos cálculos dos esforços já citados.

- Faixa nominal: 200kN
- Resistência de ponte: 700 Ohm
- Fator k: $2,03 \pm 1\%$
- Temperatura: $23 \pm 1^\circ\text{C}$

- Sensibilidade à compressão transdutor A: $2,119 \text{ mV/V} \Rightarrow 200\text{kN}$
- Incerteza de medição máxima transdutor A: 6,56kN
- Off-set transdutor A: $-0,514 \text{ mV/V}$

- Sensibilidade à compressão transdutor B: $2,015 \text{ mV/V} \Rightarrow 200\text{kN}$
- Incerteza de medição máxima transdutor B: 1,88kN
- Off-set transdutor B: $-1,531 \text{ mV/V}$

- Sensibilidade à compressão transdutor C: $2,173 \text{ mV/V} \Rightarrow 200\text{kN}$
- Incerteza de medição máxima transdutor C: 1,25kN
- Off-set transdutor C: $-0,134 \text{ mV/V}$



Figura 19 – Fotografia transdutor de força preparado com extensômetros elétricos.

Para aquisição de dados durante o percurso da ferramenta no embutimento do corpo de prova, foi instalado o transdutor resistivo de deslocamento (Figuras 20 e 21) associado ao transdutor de força para obtenção das curvas de força por curso (Tabela 8).

Tabela 8 – Características do transdutor resistivo de deslocamento linear selecionado para o experimento

| |
|--|
| • Curso de 10 a 50mm |
| • Suporte duplo para a haste de controle e mola de retorno |
| • Extremidade com rosca M2.5 e esfera de aço inoxidável |
| • Linearidade independente de até $\pm 0,1\%$ |
| • Resolução infinita |
| • Sem variação do sinal elétrico fora da excursão elétrica teórica |
| • Velocidade de deslocamento de até 10 m/s |
| • Temperatura de operação: -30 a +100°C |
| • Expectativa de vida: > 100x10 ⁶ operações |

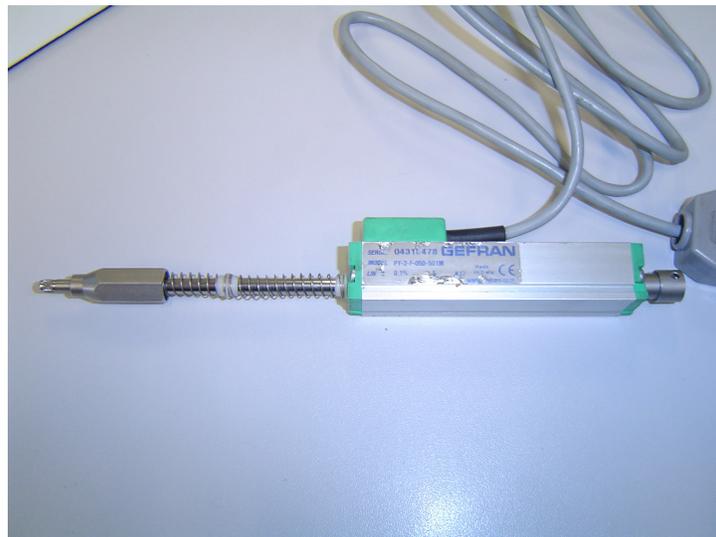


Figura 20 – Transdutor resistivo de deslocamento linear.

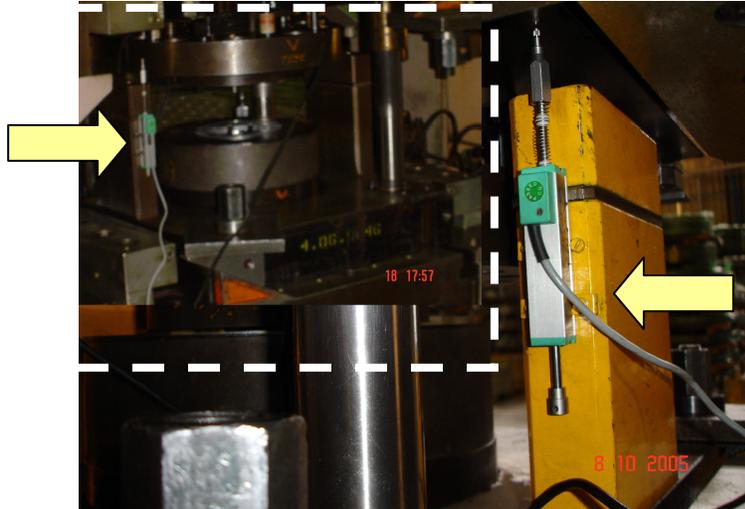


Figura 21 – Transdutor resistivo de deslocamento linear instalado na ferramenta do experimento.

3.2.4 Acabamento superficial da ferramenta

Para obter a rugosidade desejada nos pontos de contato da ferramenta com o branco, os componentes da ferramenta foram confeccionados pelo processo de torneamento com as seguintes características, procurando-se a repetibilidade do acabamento entre torneamentos para os ensaios:

- Avanço (F): 0,08 mm/rot
- Velocidade de corte (Vc): 200 m/s
- Inserto tipo CNGA

Os ensaios de rugosidade da ferramenta foram realizados no equipamento rugosímetro para raio modelo “Form TalySurf Series 2 PGI - Taylor Robson Pneumo” com incerteza de $\pm 0.0281\mu\text{m}$ (Figuras 22 e 23) .

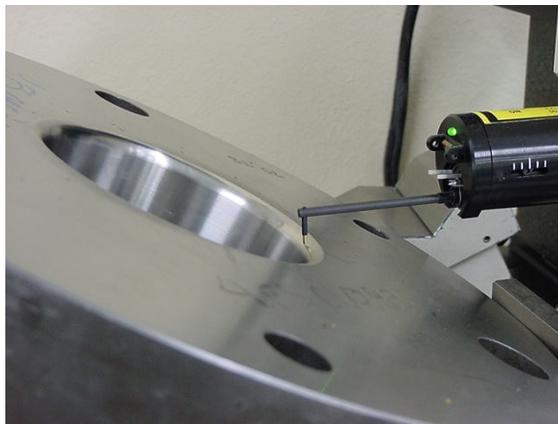


Figura 22 – Medição da rugosidade da matriz



Figura 23 – Medição da rugosidade do punção

Para avaliação da textura superficial da ferramenta, foi aplicado o processo de transferência, não destrutivo, de microtextura de superfície “Repliset 3D Techniques” da Struers (2005), utilizando-se o sistema de réplicas em borrachas de silicone para inspeção de superfícies.



Figura 24 – Aplicação do silicone para réplica da textura do raio do punção

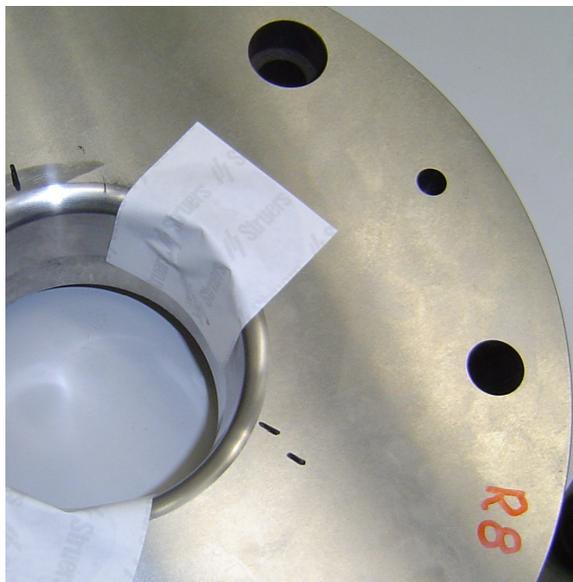


Figura 25 – Aplicação do silicone para réplica da textura do raio da matriz

3.3 Especificação do lubrificante

Os lubrificantes escolhidos para os ensaios foram indicados pelo fabricante FUCHS do Brasil S.A. (2000). A seleção foi baseada pela severidade do tipo embutimento em função dos esforços aplicados. Esses lubrificantes são descritos a seguir.

Plantoform 64 - Fluido de estampagem e anticorrosivo isento de óleo mineral, miscível em água. Isento de cloro, fósforo, metais pesados, nitritos, fenóis, boro, aditivos EP à base de enxofre ou qualquer outra substância química incompatível com o meio. Devido a boa solubilidade em água, é facilmente removido das peças com desengraxantes aquosos alcalinos ou neutros, evitando-se assim, o uso de solventes inflamáveis ou clorados.

Extrudoil 319 HT – Óleo semi-sintético sem cloro, para conformação a frio. Possui aditivação de enxofre, porém não ataca metais não ferrosos. Devido a viscosidade baixa, é apropriado para operações onde é gerado muito calor. Pode ser usado também como óleo “dual side”, isto é, pode ser aplicado como óleo de conformação e também como lubrificante de máquina, evitando desta forma a contaminação e alteração do óleo lubrificante pelo óleo de conformação.

Reniform MZA 20 – são fluidos baseados em óleo mineral, formulados com aditivos de extrema pressão e matéria graxa, indicados para forjamento, recalques, conformação e operações complementares tais como: extrusão, puncionamento, rebarbamento, ponteamento, rosqueamento de parafusos, porcas,

pinos, rebites, roletes, esferas e muitos outros tipos de operações. São indicados também, para operações leves de estampagem, repuxo e chapas de aço além de trefilação de ferro ou aço.

Não possuem enxofre ativo na sua composição, evitando com isso, ataque às ligas de cobre utilizadas nos mancais e outras peças integrantes de máquinas operatrizes.

Renoform Press 10 – Pasta especialmente desenvolvida para aplicação em estampagem geral, atendendo a uma ampla gama de operações. É composta de aditivos com alto poder lubrificante, para operações severas de repuxo, obtendo-se um perfeito acabamento das peças e maior vida útil das ferramentas.

Renoform 74 EEP - é um produto à base de óleo mineral parafínico, contendo em sua formulação aditivos de lubricidade, extrema pressão (EP), antidesgaste, antioxidante e anticorrosivo, e não contém cloro e metais pesados.

Foi desenvolvido para operações severas de estampagem, repuxo e corte, de metais fosfatizados ou não, oferecendo excelente proteção ao ferramental.

Não é necessário aplicar óleo protetivo, pois o mesmo confere excelente proteção anticorrosiva, podendo-se até transportar as peças, sendo também lavável.

Os lubrificantes determinados para os ensaios indicados pelo fabricante FUCHS do Brasil S.A. foram caracterizados para o experimento quanto ao tipo, aplicação e viscosidade em cSt [40°C] (Tabela 9).

Tabela 9 – Lubrificantes indicados pelo fabricante FUCHS do Brasil S.A. para o ensaio

| | Fornecedor | Descrição | Tipo | Aplicação | Qtde | Viscosidade cSt [40°C] |
|----------------------------|------------|--|----------------|-----------|----------|------------------------|
| Lubrificantes disponíveis: | FUCHS | 37510 Plantoform 64 | óleo sintético | Repuxo | 5 litros | 204 |
| | FUCHS | Extudoil 319 HT | éster | Extrusão | 3 litros | 68 |
| | FUCHS | 37212 Renoform MZA 20 | óleo mineral | Repuxo | 1 litro | 174 |
| | FUCHS | 37551 Renoform 74 EEP [Mineral Parafin.] | óleo mineral | Repuxo | 3 litros | 560 |
| | FUCHS | 40110 Renoform Press 10 | pasta | Repuxo | 3 kg | NA |

NA – não aplicável para pastas.

Para caracterizar a quantidade de lubrificante aplicado no ensaio sobre o blanque, foi selecionada uma balança de laboratório, com resolução de 0,01 gramas para identificar a diferença da massa do blanque antes e após a aplicação do lubrificante, obtidos conforme o tipo de lubrificante e o diâmetro externo do blanque aplicado.

Conforme recomendações da FUCHS do Brasil S.A, o método de aplicação dos lubrificantes selecionados foi a utilização de rolo de espuma embebido no lubrificante.

3.4 Planejamento experimental

O planejamento fatorial tem sido muito aplicado em pesquisas básicas e tecnológicas e é classificado como um método do tipo simultâneo, em que as variáveis de interesse que realmente apresentam influências significativas na resposta são avaliadas ao mesmo tempo.

Para realizar um planejamento fatorial, escolhem-se as variáveis a serem estudadas e efetuam-se experimentos em diferentes valores destes fatores, observando-se a resposta para cada combinação correspondente.

Os ensaios foram divididos em duas fases, sendo a primeira sem lubrificantes, com a intenção de caracterizar combinações de variáveis que resultassem em corpos de prova no limite de ruptura para, posteriormente, ensaiar-se na segunda fase os blanques selecionados na primeira fase com a aplicação dos lubrificantes selecionados para os ensaios.

3.4.1 Planejamento para a primeira fase

Para a primeira fase foram escolhidas as seguintes variáveis de influência para avaliar os fenômenos causadores das trincas (Tabela 10).

- Raio do punção em dois níveis: 6 mm e 8 mm.
- Raio da matriz em dois níveis: 6 mm e 8 mm.
- Atuação do prensa chapa em dois níveis: com atuação (1) e sem atuação (0).
- Diâmetro externo dos blanques em seis níveis: 135 mm, 145 mm, 155 mm, 165 mm, 175 mm e 185 mm.

Tabela 10 – Planejamento do ensaio experimental correspondente a primeira fase, sem lubrificantes.

| Raio punção/matriz | | 6 | | 8 | |
|--------------------|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Prensa chapa | | com | sem | com | sem |
| Diâmetro externo | 135 | $Y_{6;c;135;1}$ | $Y_{6;s;135;1}$ | $Y_{8;c;135;1}$ | $Y_{8;s;135;1}$ |
| | | $Y_{6;c;135;2}$ | $Y_{6;s;135;2}$ | $Y_{8;c;135;2}$ | $Y_{8;s;135;2}$ |
| | 145 | $Y_{6;c;145;1}$ | $Y_{6;s;145;1}$ | $Y_{8;c;145;1}$ | $Y_{8;s;145;1}$ |
| | | $Y_{6;c;145;2}$ | $Y_{6;s;145;2}$ | $Y_{8;c;145;2}$ | $Y_{8;s;145;2}$ |
| | 155 | $Y_{6;c;155;1}$ | $Y_{6;s;155;1}$ | $Y_{8;c;155;1}$ | $Y_{8;s;155;1}$ |
| | | $Y_{6;c;155;2}$ | $Y_{6;s;155;2}$ | $Y_{8;c;155;2}$ | $Y_{8;s;155;2}$ |
| | 165 | $Y_{6;c;165;1}$ | $Y_{6;s;165;1}$ | $Y_{8;c;165;1}$ | $Y_{8;s;165;1}$ |
| | | $Y_{6;c;165;2}$ | $Y_{6;s;165;2}$ | $Y_{8;c;165;2}$ | $Y_{8;s;165;2}$ |
| | 175 | $Y_{6;c;175;1}$ | $Y_{6;s;175;1}$ | $Y_{8;c;175;1}$ | $Y_{8;s;175;1}$ |
| | | $Y_{6;c;175;2}$ | $Y_{6;s;175;2}$ | $Y_{8;c;175;2}$ | $Y_{8;s;175;2}$ |
| | 185 | $Y_{6;c;185;1}$ | $Y_{6;s;185;1}$ | $Y_{8;c;185;1}$ | $Y_{8;s;185;1}$ |
| | | $Y_{6;c;185;2}$ | $Y_{6;s;185;2}$ | $Y_{8;c;185;2}$ | $Y_{8;s;185;2}$ |

Notação: y;R;C;De;rp

Onde,

y = Resultado

R = Raio da ferramenta

C = Com ou Sem atuação prensa chapa

De = Diâmetro externo do blanque

rp = réplica do ensaio

As variáveis de resposta da primeira fase selecionadas para caracterizar o corpo de prova a ser usado na segunda fase foram:

- Ocorrência de fratura
- Relação entre o diâmetro inicial do blanque e o diâmetro final do corpo de prova embutido
- Força desenvolvida durante o embutimento
- Espessura média das paredes do corpo de prova entre os furos após o embutimento
- Espessura no fundo do corpo de prova após o embutimento

- Espessura na região do raio de dobra no fundo e no flange do corpo de prova após o embutimento
- Influência do prensa chapa

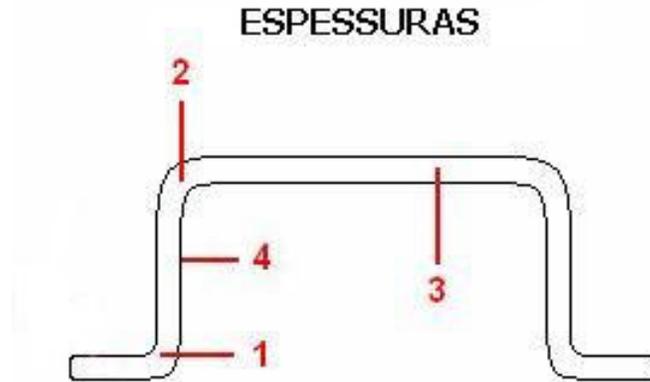


Figura 26 – Regiões para medição das espessuras no corpo de prova embutido.

Nomenclatura para as espessuras do corpo de prova embutido:

- Eraiofl = espessura no raio da região do flange (região 1).
- Erauifun = espessura no raio do fundo (região 2).
- Efund = espessura no fundo (região 3).
- Epare = espessura na região da aba (região 4).

3.4.2 – Planejamento para a segunda fase

Para a segunda fase foram escolhidas as seguintes variáveis de influência para explicar como e quais lubrificantes favorecem a não formação de trincas, o menor esforço durante o embutimento e a maior estabilidade do processo (Tabela 11):

- Raio do punção em dois níveis: 6 mm e 8 mm
- Raio da matriz em dois níveis: 6 mm e 8 mm
- Atuação do prensa chapa em dois níveis: com atuação (1) e sem atuação (0)
- Tamanho do diâmetro externo dos blanques em dois níveis: 165 mm e 175 mm.
- Tipo de lubrificante em cinco níveis: Plantofom 64, Extrudoil 319 HT, Renoform MZA 20, Renoform Press 10 e Renoform 74 EEP.

Tabela 11 – Planejamento do ensaio experimental correspondente a segunda fase, sem lubrificantes.

| Raio punção/matriz | | 6 | | | | 8 | | | |
|--------------------|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | com | | sem | | com | | sem | |
| Prensa chapa | | com | | sem | | com | | sem | |
| Diamentro | | d1 | d2 | d1 | d2 | d1 | d2 | d1 | d2 |
| Lubrificante | La | Y _{6;c;d1;la;1} | Y _{6;c;d2;la;1} | Y _{6;s;d1;la;1} | Y _{6;s;d2;la;1} | Y _{8;c;d1;la;1} | Y _{8;c;d2;la;1} | Y _{8;s;d1;la;1} | Y _{8;s;d2;la;1} |
| | | Y _{6;c;d1;la;2} | Y _{6;c;d2;la;2} | Y _{6;s;d1;la;2} | Y _{6;s;d2;la;2} | Y _{8;c;d1;la;2} | Y _{8;c;d2;la;2} | Y _{8;s;d1;la;2} | Y _{8;s;d2;la;2} |
| | Lb | Y _{6;c;d1;lb;1} | Y _{6;c;d2;lb;1} | Y _{6;s;d1;lb;1} | Y _{6;s;d2;lb;1} | Y _{8;c;d1;lb;1} | Y _{8;c;d2;lb;1} | Y _{8;s;d1;lb;1} | Y _{8;s;d2;lb;1} |
| | | Y _{6;c;d1;lb;2} | Y _{6;c;d2;lb;2} | Y _{6;s;d1;lb;2} | Y _{6;s;d2;lb;2} | Y _{8;c;d1;lb;2} | Y _{8;c;d2;lb;2} | Y _{8;s;d1;lb;2} | Y _{8;s;d2;lb;2} |
| | Lc | Y _{6;c;d1;lc;1} | Y _{6;c;d2;lc;1} | Y _{6;s;d1;lc;1} | Y _{6;s;d2;lc;1} | Y _{8;c;d1;lc;1} | Y _{8;c;d2;lc;1} | Y _{8;s;d1;lc;1} | Y _{8;s;d2;lc;1} |
| | | Y _{6;c;d1;lc;2} | Y _{6;c;d2;lc;2} | Y _{6;s;d1;lc;2} | Y _{6;s;d2;lc;2} | Y _{8;c;d1;lc;2} | Y _{8;c;d2;lc;2} | Y _{8;s;d1;lc;2} | Y _{8;s;d2;lc;2} |
| | Ld | Y _{6;c;d1;ld;1} | Y _{6;c;d2;ld;1} | Y _{6;s;d1;ld;1} | Y _{6;s;d2;ld;1} | Y _{8;c;d1;ld;1} | Y _{8;c;d2;ld;1} | Y _{8;s;d1;ld;1} | Y _{8;s;d2;ld;1} |
| | | Y _{6;c;d1;ld;2} | Y _{6;c;d2;ld;2} | Y _{6;s;d1;ld;2} | Y _{6;s;d2;ld;2} | Y _{8;c;d1;ld;2} | Y _{8;c;d2;ld;2} | Y _{8;s;d1;ld;2} | Y _{8;s;d2;ld;2} |
| | Le | Y _{6;c;d1;le;1} | Y _{6;c;d2;le;1} | Y _{6;s;d1;le;1} | Y _{6;s;d2;le;1} | Y _{8;c;d1;le;1} | Y _{8;c;d2;le;1} | Y _{8;s;d1;le;1} | Y _{8;s;d2;le;1} |
| | | Y _{6;c;d1;le;2} | Y _{6;c;d2;le;2} | Y _{6;s;d1;le;2} | Y _{6;s;d2;le;2} | Y _{8;c;d1;le;2} | Y _{8;c;d2;le;2} | Y _{8;s;d1;le;2} | Y _{8;s;d2;le;2} |

As variáveis de resposta selecionadas para avaliar o desempenho dos lubrificantes e entender as causas da fratura no produto durante o embutimento sobre condições específicas de processo foram:

- Ocorrência de fratura
- Esforço desenvolvido durante o embutimento (*)
- Espessura das paredes entre os furos
- Espessura no fundo do corpo de prova
- Espessura no raio de dobra no fundo e no flange do corpo de prova
- Diâmetro externo do corpo de prova após embutimento
- Estricção da espessura nos pontos críticos do corpo de prova

(*) – O resultado do esforço desenvolvido durante o embutimento está associado aos dados adquiridos dos transdutores de força.

3.4.3 – Metodologia para análise de resultados dos experimentos

Métodos estatísticos vêm sendo utilizados em engenharia de produção e em diversas áreas para estudar a relação entre variáveis de resposta e variáveis independentes, não somente nos aspectos teóricos, mas nos conceitos, idéias e interpretação de resultados, ajudando na otimização dos processos correntes e no projeto de novos processos.

Através do software estatístico MINITAB pode-se determinar a função probabilística a partir dos dados do experimento conforme Penha (2002), baseado no método de regressão logística binária, entre outros métodos de análise estatística.

$$P_i = \frac{e^{(\beta_c + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i)}}{1 + e^{(\beta_c + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i)}}$$

Onde:

P_i – probabilidade de resposta

β_c – constante

β_i – coeficiente da variável independente

x_i – variável independente

Os testes estatísticos, aplicados para validar e assegurar um modelo definido, também permitem identificar as variáveis que não se ajustam ao modelo ou que possuem influência significativa na estimação de parâmetros. Dentre esses testes destacam-se:

P-valor: probabilidade de obter um valor estatístico amostral de teste no mínimo extremo, como o que resulta nos dados amostrais, na suposição da hipótese nula ser verdadeira (Triola, 1998). Quando o P-valor for no máximo igual ao nível de significância adotado, a hipótese nula será rejeitada. Quando o valor P-valor for maior que o valor de significância adotado, a hipótese nula não é rejeitada. O valor do nível de significância adotado na análise dos resultados deste trabalho foi de 5% (0,05).

Pearson: mede quão bem a observação é prevista pelo modelo. Observações que não se ajustam ao modelo têm um alto valor de Pearson. Em regressão linear determina o coeficiente de correlação linear “R”, que mede o grau de relacionamento linear entre os valores emparelhados em uma amostra (Triola, 1998).

Desvio Residual: medida de como a observação é predita pelo modelo. Observações mal ajustadas pelo modelo têm elevados desvios residuais (Triola, 1998).

Hosmer-Lemeshow: este teste avalia o modelo ajustado, comparando as frequências observadas às esperadas. O teste associa os dados às suas probabilidades estimadas da mais baixa a mais alta, através do teste qui-quadrado para determinar se as frequências observadas estão próximas às frequências esperadas (Hosmer & Lemeshow, 1989).

Capítulo 4 - Resultados e Discussão

Todos os resultados associados a avaliações por técnicas estatísticas foram elaborados a partir do software estatístico MINITAB da empresa Minitab Inc.

4.1 Análise dos ensaios do material

4.1.1 Propriedades mecânicas e químicas

O aço selecionado conforme norma ABNT NBR 5906 EPA (1984) para os ensaios de estampagem apresentou os resultados mostrados nas Tabelas de 12 a 15 quanto às suas características químicas, mecânicas e metalúrgicas desejadas e encontradas.

Os ensaios foram executados no equipamento de tração de 100 kN para caracterização das curvas de tensão versus deformação. A velocidade de deslocamento foi 10 mm/min e pré-carga de 220 N. A célula de carga foi aferida de 100 kN.

Tabela 12 – Resultados das propriedades mecânicas do aço-carbono laminado a quente

| Propriedades Mecânicas | | | | |
|-------------------------------|----------------|----------|----------|--------------|
| Direção do corpo de prova (*) | Corpo de prova | LR [MPa] | LE [MPa] | AL - 50mm[%] |
| 0° | 1 | 332 | 265 | 36 |
| 0° | 2 | 333 | 269 | 36,5 |
| 0° | 3 | 335 | 273 | 37,4 |
| 45° | 1 | 322 | 250 | 31,2 |
| 45° | 2 | 335 | 271 | 36,8 |
| 45° | 3 | 327 | 262 | 33,1 |
| 90° | 1 | 336 | 255 | 36 |
| 90° | 2 | 337 | 261 | 36,8 |
| 90° | 3 | 339 | 269 | 37,2 |

(*) – em relação à direção de laminação

De acordo com a Tabela 12, todos os corpos de prova ensaiados atendem em sua média os requisitos da ABNT – NBR 5906 (vide Tabela 3 do capítulo 3), independente da direção de extração.

Tabela 13 – Composição química do aço-carbono laminado a quente

| Composição química (% de massa) | | | | |
|---------------------------------|------|------|-------|-------|
| C | Mn | Al | P | S |
| 0,047 | 0,12 | 0,04 | 0,019 | 0,009 |

Na avaliação da composição química do material foi identificado (Tabela 13) que o percentual de Alumínio (Al) não atende o requisito da ABNT – NBR 5906 (Tabela 4), donde se pode concluir que se trata de um aço acalmado ao alumínio.

Tabela 14 - Propriedades metalográficas do aço-carbono laminado a quente

| Propriedades Metalográficas | |
|-----------------------------|--------------------|
| Tamanho de grão | Nível de inclusões |
| ASTM 6 à 7 | ASTM E15 |

Na avaliação das propriedades metalográficas do material (Tabela 14) foi identificado que o tamanho de grão e o nível de inclusões atendem aos requisitos da norma ABNT – NBR 5906 (Tabela 5).

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de tração para avaliação da anisotropia

| Valores médios | | | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sentido de laminação | W_0 | W_f | t_0 | t_f | r | n |
| 0° | 12,93 | 6,35 | 3,45 | 1,04 | 0,593 | 0,231 |
| 45° | 12,86 | 6,06 | 3,51 | 1,13 | 0,664 | 0,207 |
| 90° | 12,73 | 6,1 | 3,49 | 1,15 | 0,663 | 0,223 |

| | |
|------------|-------|
| \bar{r} | 0,646 |
| Δr | -0,04 |

Conforme a Tabela 15, o coeficiente de anisotropia normal \bar{r} está abaixo de valores comuns encontrados para os aços efervescentes, normalmente próximos de 2.0 e o coeficiente de anisotropia planar Δr encontrado indica que há pequena probabilidade de surgimento de orelhas nos produtos embutidos.

O coeficiente de encruamento do material encontrado está próximo do valor esperado para os produtos de estampagem profunda.

4.1.2 Acabamento superficial

Os valores obtidos de rugosidade do material nos ensaios nas três direções em relação à direção de laminação (0°, 45° e 90°), apresentaram rugosidade aritmética R_a 1,58 μm , 1,56 μm e 1,49 μm , rugosidade parcial R_z 9,08 μm , 9,32 μm e 8,31 μm e rugosidade total R_t 10,65 μm , 10,84 μm e 10,03 μm respectivamente, valores já esperados para esse tipo de material com superfície decapada, com passe de laminação de acabamento e rugosidade máxima esperada R_t de 15 μm .

Quanto à rugosidade da ferramenta, a Figura 27 mostra os resultados da rugosidade aritmética R_a em μm , para as duas condições de raios da ferramenta 6 mm e 8 mm, da matriz e punção com tamanho da amostra igual a cinco.

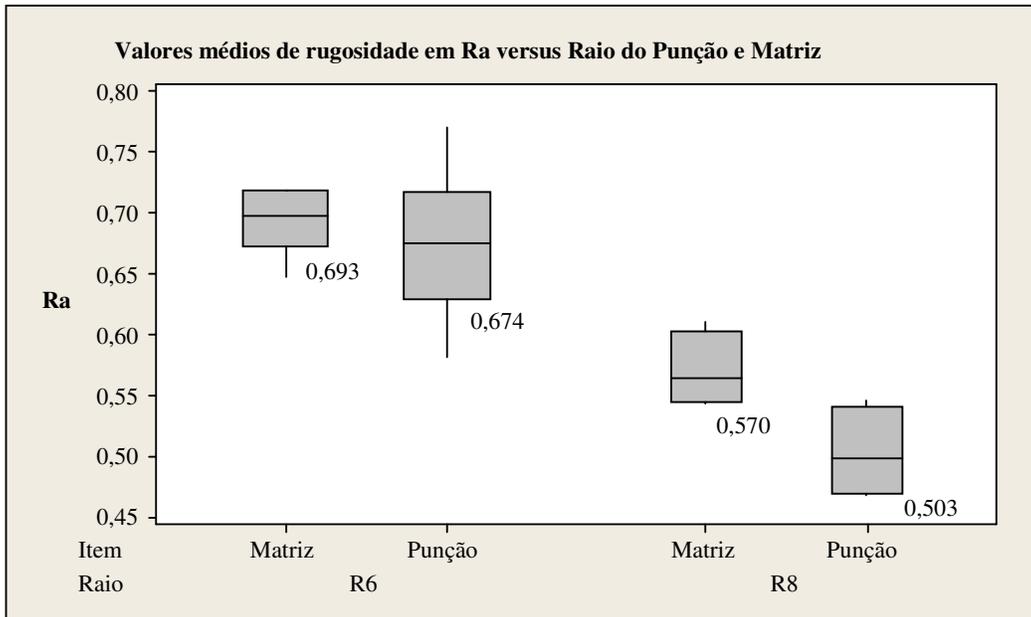


Figura 27 – Valores de rugosidade aritmética e comparativo em μm , para os raios do punção e matriz de 6 mm e 8 mm.

Os valores médios da Figura 27, distintos para ambos os raios são justificados pelo fato do processo de torneamento ter sido executado em momentos distintos (apesar dos mesmos parâmetros de usinagem aplicados). Pelo fato desse processo obter essa ordem de rugosidade não há necessidade de polimento.



Figura 28 – Fotos das réplicas de silicone dos raios do punção.

Na figura 28 pode-se observar as réplicas em silicone da Struers (2005) confeccionadas a partir da aplicação, aderência e secagem no raio da matriz e punção para obter a cópia fiel da textura superficial.

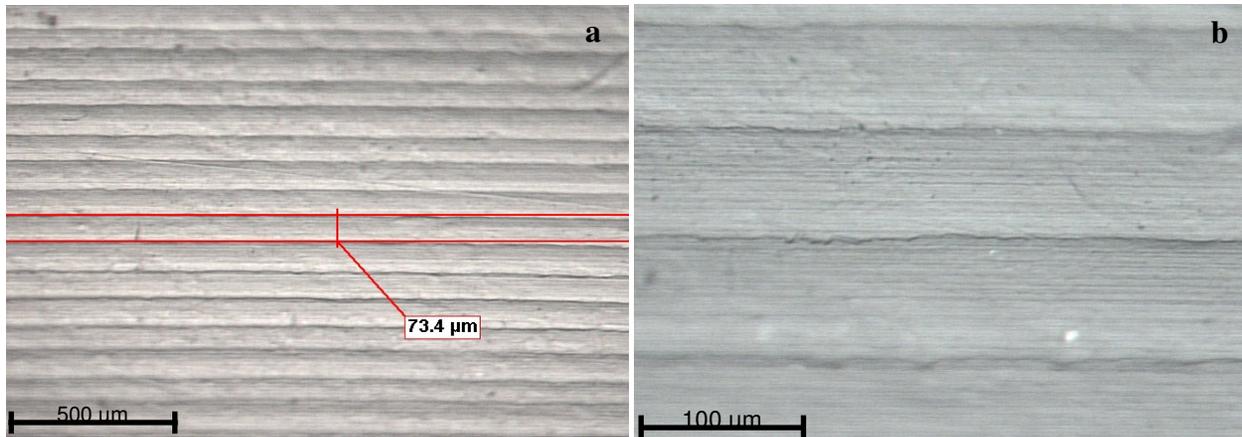


Figura 29 – Ampliação 100x (a) e 400x (b) respectivamente em microscópio ótico, da réplica do acabamento superficial do raio da ferramenta.

A Figura 29a mostra a textura do acabamento superficial da ferramenta obtida através da técnica das réplicas e ampliada 100x. O padrão de acabamento ou sulcos obtido é característico do processo de torneamento com os parâmetros de fabricação definidos no capítulo 3.2.4, como mostram as linhas horizontais na Figura 29b na ampliação de 400x.

4.1.3 Espessura da chapa

A Figura 30 apresenta os resultados da espessura inicial dos blanques utilizados nos ensaios, obtidos a partir das medições com micrômetro de escala digital. Observa-se que o valor médio encontrado está próximo do valor nominal de 3,5 mm, e que o desvio-padrão é adequado para esse tipo de material laminado a quente (ABNT NBR 11888, Tabela 5, 1991).

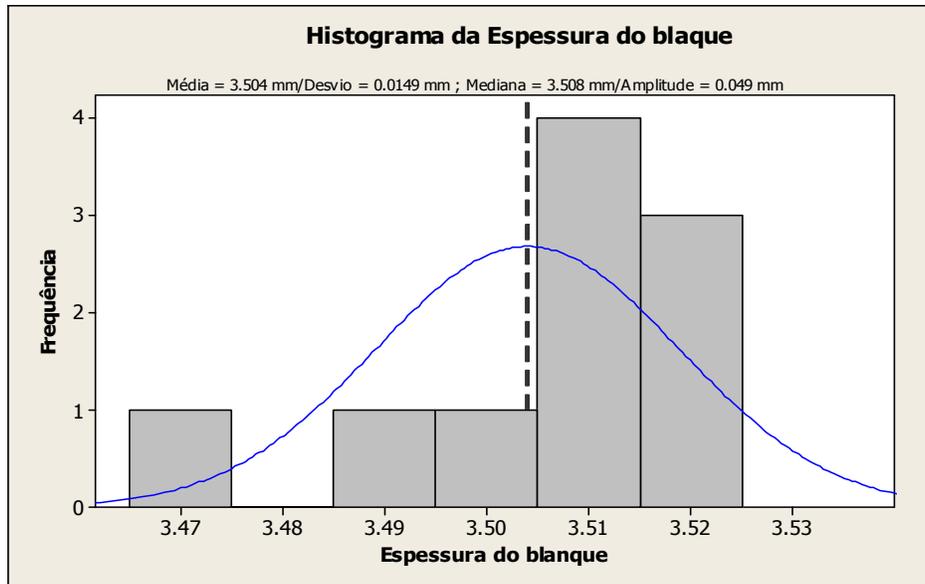


Figura 30 – Valores de espessura inicial do blaque.

4.2 Análise dos ensaios com o ferramental e corpo de prova

A análise do processo pelo método dos volumes finitos elaborado no Laboratório de Conformação de Mecânica da UNICAMP, permitiu prever o nível das tensões nas paredes do corpo de prova, como mostram as Figuras 31 à 35.

As Figuras 31 e 32 mostram que a região de maior esforço no corpo de prova aplicado no processo de embutimento, se concentra na região dos furos, justamente pela limitação da quantidade de material nessa região.

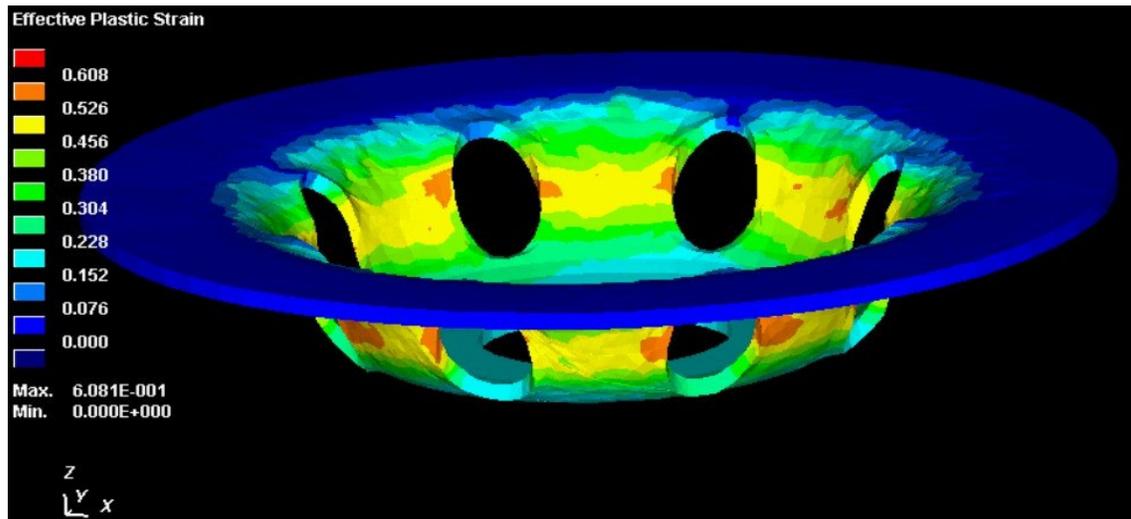


Figura 31 – Resultado da simulação para previsão dos esforços de embutimento.

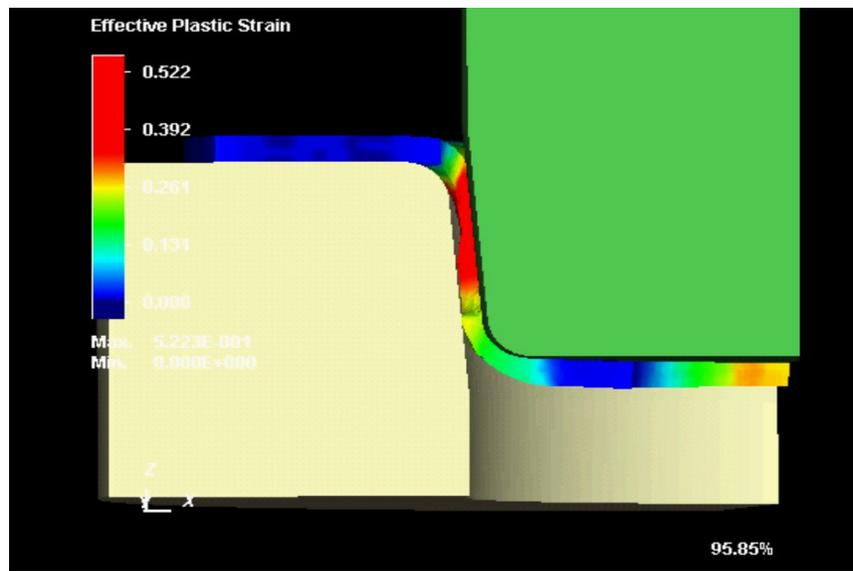


Figura 32 – Simulação para previsão do funcionamento na ferramenta.

A Figura 33 mostra a previsão da deformação plástica para um corpo de prova com diâmetro inicial do blanque com 185 mm na ordem de 0,522 (destacada pela cor vermelha). Ao ser comparada com a Figura 34, correspondente à simulação de um corpo de prova com diâmetro 190 mm e de maior deformação plástica 0,983 (destacada pela cor vermelha), permite afirmar que as chances do corpo de prova com diâmetro 185 mm pode suportar maiores deformações que o de diâmetro 190 mm.

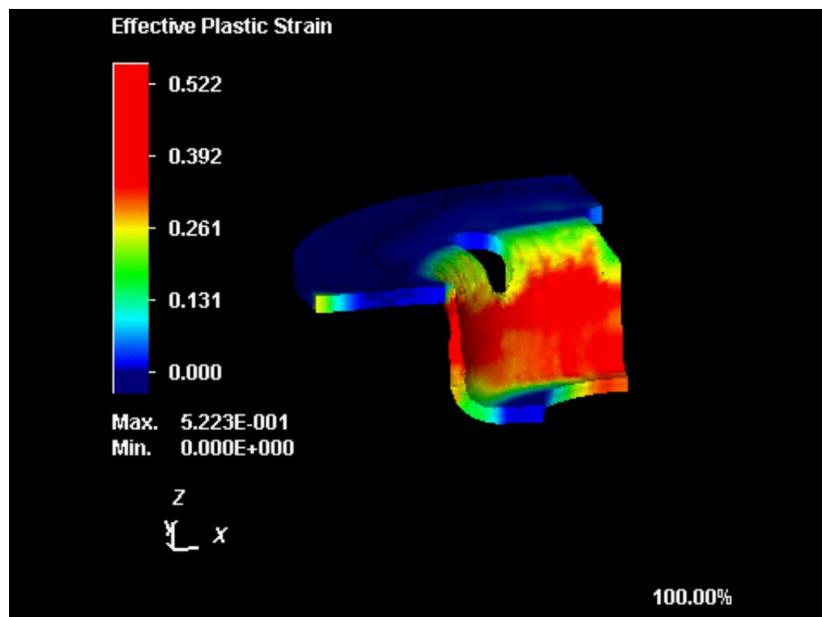


Figura 33 – Previsão da deformação plástica para o diâmetro inicial do blanque 185 mm.

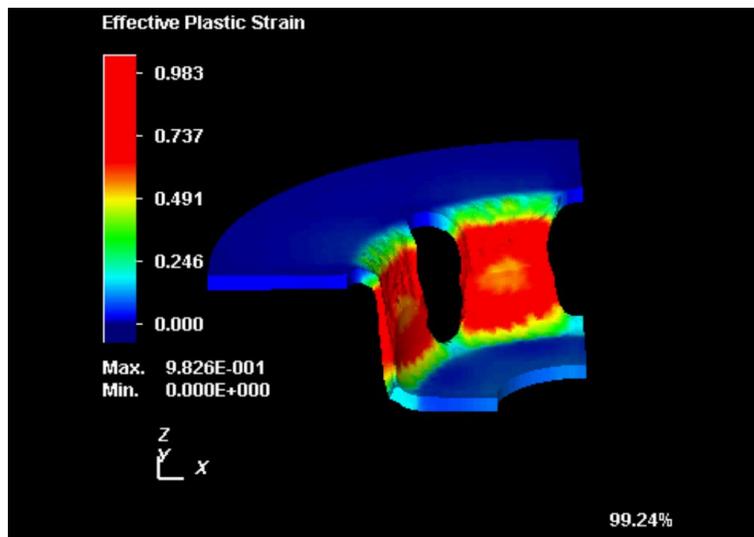


Figura 34 – Previsão da deformação plástica para o diâmetro inicial do blanque 190 mm.

A Figura 35, correspondente a simulação de um blanque com diâmetro externo de 195 mm extrapolou ambos os resultados anteriores, mostrando ser mais suscetível às fraturas na região dos furos.

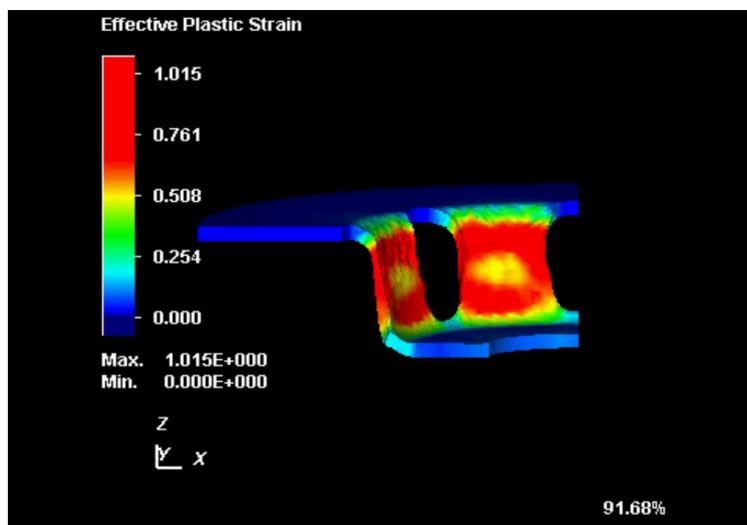


Figura 35 – Previsão da deformação plástica efetiva para o diâmetro inicial do blanque 195 mm.

A partir das simulações com os diâmetros do blanque 185 mm, 190 mm e 195 mm foi escolhido o blanque de 185 mm. Por ser de menor tensão sobre as paredes do corpo de prova, determinou os demais diâmetros de blanque para os ensaios (Figura 36).

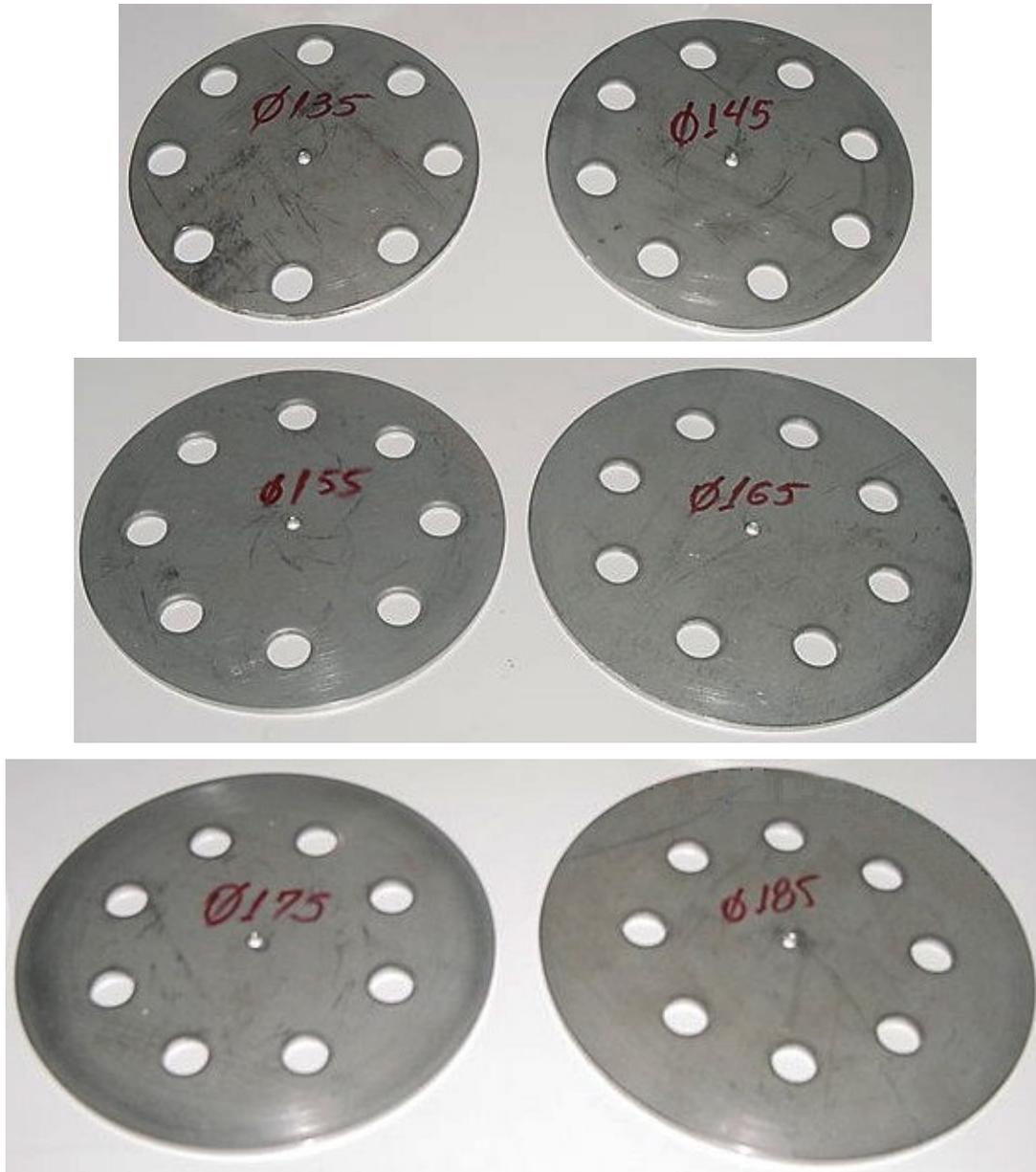


Figura 36 – Blanques com diâmetro externo 135 mm, 145 mm, 155 mm, 165 mm, 175 mm e 185 mm.

4.3 Análise dos ensaios com os lubrificantes

Foi controlada a quantidade de massa em gramas e em amostras de tamanho 8 ($n = 8$) para cada tipo de lubrificante nos dois diâmetros de blanques distintos ($De = 165\text{mm}$ e $De = 175\text{mm}$). Dos lubrificantes aplicados nos blanques com rolo de espuma embebido, foi verificado que os de maior viscosidade eram os de maior massa e, conseqüentemente, mais difíceis de replicar sua quantidade sobre os demais blanques.

Embora que o método de aplicação foi o mesmo e a superfície dos blanques diferentes, a massa se mostrou similar para os lubrificantes aplicados (Figura 37).

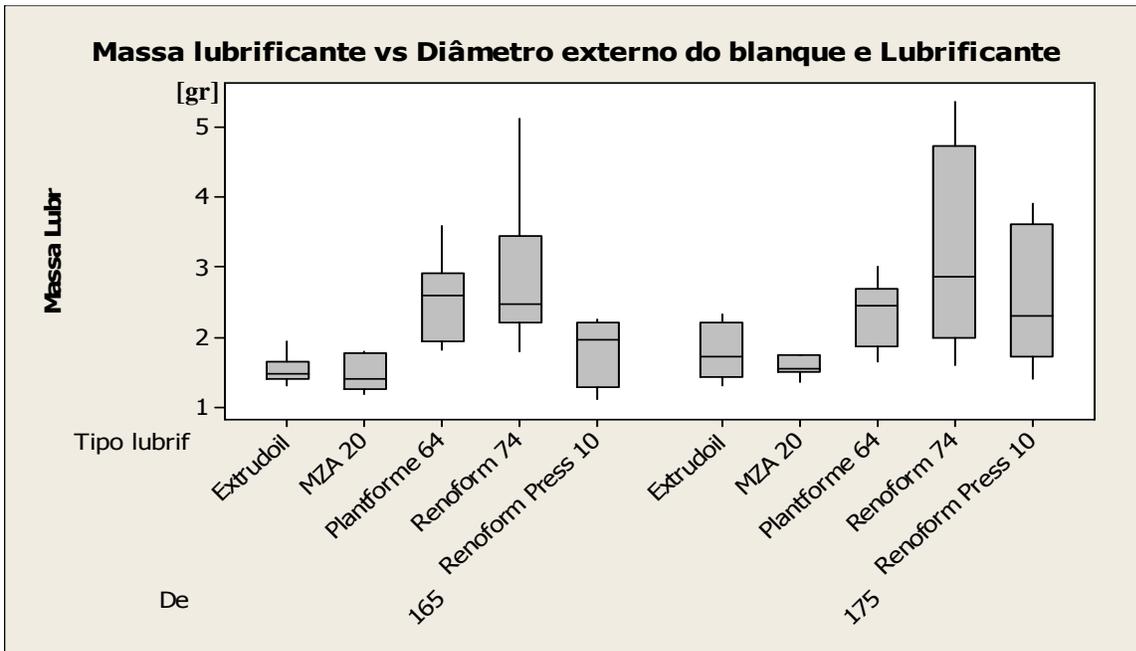


Figura 37 – Massa de lubrificantes aplicados nos blanques.

4.4 Análise dos resultados dos experimentos

Os resultados dos ensaios foram avaliados numa primeira fase, sem lubrificantes, para caracterizar as combinações de variáveis que resultassem em corpos de prova no limite de ruptura e, numa segunda fase, submetendo os blanques caracterizados na primeira com aplicação dos lubrificantes.

O primeiro conjunto de experimentos, sem qualquer aplicação de lubrificante, teve como objetivo determinar as condições de ensaios que permitissem selecionar corpos de prova num limite crítico de ruptura, entender suas principais causas no sistema avaliado e planejar o segundo conjunto de experimentos com aplicação de lubrificantes.

Esse segundo conjunto de experimentos foi conduzido de modo a obterem-se os resultados associados aos efeitos dos lubrificantes e identificar qual deles promoveu melhor desempenho no sistema avaliado.

4.4.1 Resultados da primeira fase

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos nos ensaios relativos ao planejamento fatorial (Tabela 11) sem o uso de lubrificantes. São apresentados os resultados de ocorrência de fratura, relação entre o diâmetro inicial do blanque e o diâmetro final do corpo de prova embutido, força desenvolvida durante o embutimento, espessura média das paredes do corpo de prova entre os furos após o embutimento, espessura no fundo do corpo de prova após o embutimento, espessura no raio de dobra no fundo após o embutimento e no flange do corpo de prova após o embutimento e influência do prensa chapa.

A ocorrência da fratura (Frat), caracterizada como variável de resposta em função das variáveis independentes, diâmetro externo do blanque (De) e raio da ferramenta (R), foi avaliada pelo método de regressão logística binária através dos indicadores dos testes de validação P-valor, Pearson e Hosmer-Lemeshow (Tabela 17).

Tabela 16 – Coeficientes obtidos por REGRESSÃO LOGÍSTICA para análise de probabilidade de fratura.

| Previsão | Coeficiente | P-Valor (Coeficiente) | P-Valor (Pearson) | P-Valor (Desvio Residual) | P-Valor (Hosmer Lemeshow) |
|-----------|-------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| Constante | -8,8265 | 0,042 | 0,062 | 0,028 | 0,227 |
| R | -1,1587 | 0,011 | | | |
| De | 0,102124 | 0,001 | | | |

A atuação do prensa chapa não foi significativa na probabilidade de fratura P(Frat), sendo eliminada do modelo inicial. No modelo logístico atualizado, a probabilidade do corpo de prova fraturar $P(\text{Frat})_{\log}$ em função do diâmetro externo do blanque (De) e do raio da ferramenta (R), pode ser estimada por meio da seguinte expressão (regressão logística binária):

$$P(\text{Frat})_{\log} = \frac{e^{(-8.827 + (-1.159 \times R) + (0.102 \times De))}}{1 + e^{(-8.827 + (-1.159 \times R) + (0.102 \times De))}}$$

Onde,

$P(\text{Frat})_{\log}$ – probabilidade de resposta para fratura

R – Raio da ferramenta (variável independente)

De – Diâmetro externo do blanque (variável independente)

Tabela 17 – Resultados do experimento para estudo de fraturas dos corpos de prova em função do diâmetro externo, raio da ferramenta e prensa chapa.

| R | BH | De | E0 | Frat | DeEB | Beta | Fmax | Efund | Eraiofl | Erauífun | dfundo | draio_flg | draio_fnd | P(Frat) |
|------|----|------|------|------|--------|------|------|-------|---------|----------|--------|-----------|-----------|---------|
| [mm] | | [mm] | [mm] | | [mm] | | [kN] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| 6 | 1 | 135 | 3,50 | não | 98,68 | 1,37 | 88 | 3,50 | 4,15 | 3,30 | 0,0 | -17,0 | 5,9 | 12 |
| 6 | 1 | 145 | 3,50 | não | 113,39 | 1,28 | 147 | 3,50 | 4,15 | 3,15 | 0,0 | -17,0 | 10,5 | 27,5 |
| 6 | 1 | 155 | 3,50 | não | 127,42 | 1,22 | 199 | 3,50 | 3,65 | 2,90 | 0,0 | -4,2 | 18,8 | 51,3 |
| 6 | 1 | 165 | 3,50 | sim | 147,68 | 1,12 | 217 | 3,50 | 3,15 | 2,85 | 0,0 | 10,5 | 20,5 | 74,5 |
| 6 | 1 | 175 | 3,50 | sim | 165,02 | 1,06 | 212 | 3,50 | 3,00 | 2,85 | 0,0 | 15,4 | 20,5 | 89 |
| 6 | 1 | 185 | 3,50 | sim | 178,60 | 1,04 | 202 | 3,50 | 2,75 | 2,95 | 0,0 | 24,1 | 17,1 | 95,7 |
| 6 | 0 | 135 | 3,50 | sim | 104,38 | 1,29 | 59 | 3,55 | 3,60 | 3,30 | -1,4 | -2,8 | 5,9 | 12 |
| 6 | 0 | 145 | 3,50 | sim | 123,45 | 1,17 | 88 | 3,55 | 4,05 | 3,20 | -1,4 | -14,6 | 9,0 | 27,5 |
| 6 | 0 | 155 | 3,50 | não | 126,90 | 1,22 | 162 | 3,55 | 4,15 | 3,15 | -1,4 | -17,0 | 10,5 | 51,3 |
| 6 | 0 | 165 | 3,50 | não | 139,12 | 1,19 | 216 | 3,50 | 3,45 | 2,95 | 0,0 | 1,4 | 17,1 | 74,5 |
| 6 | 0 | 175 | 3,50 | sim | 156,04 | 1,12 | 220 | 3,50 | 3,15 | 2,95 | 0,0 | 10,5 | 17,1 | 89 |
| 6 | 0 | 185 | 3,50 | sim | 169,44 | 1,09 | 220 | 3,50 | 3,25 | 2,85 | 0,0 | 7,4 | 20,5 | 95,7 |
| 8 | 1 | 135 | 3,50 | não | 101,07 | 1,34 | 80 | 3,55 | 4,15 | 3,30 | -1,4 | -17,0 | 5,9 | 1,3 |
| 8 | 1 | 145 | 3,50 | não | 113,85 | 1,27 | 138 | 3,50 | 4,15 | 3,15 | 0,0 | -17,0 | 10,5 | 3,6 |
| 8 | 1 | 155 | 3,50 | não | 126,73 | 1,22 | 188 | 3,50 | 3,60 | 3,20 | 0,0 | -2,8 | 9,0 | 9,4 |
| 8 | 1 | 165 | 3,50 | não | 141,07 | 1,17 | 220 | 3,50 | 3,30 | 3,05 | 0,0 | 5,9 | 13,8 | 22,3 |
| 8 | 1 | 175 | 3,50 | sim | 160,53 | 1,09 | 222 | 3,50 | 3,30 | 3,25 | 0,0 | 5,9 | 7,4 | 44,4 |
| 8 | 1 | 185 | 3,50 | sim | 175,34 | 1,06 | 213 | 3,50 | 2,55 | 3,25 | 0,0 | 31,7 | 7,4 | 68,9 |
| 8 | 0 | 135 | 3,50 | não | 101,10 | 1,34 | 54 | 3,55 | 4,15 | 3,35 | -1,4 | -17,0 | 4,4 | 1,3 |
| 8 | 0 | 145 | 3,50 | não | 122,46 | 1,18 | 75 | 3,55 | 4,15 | 3,25 | -1,4 | -17,0 | 7,4 | 3,6 |
| 8 | 0 | 155 | 3,50 | não | 125,60 | 1,23 | 148 | 3,55 | 3,75 | 3,25 | -1,4 | -6,9 | 7,4 | 9,4 |
| 8 | 0 | 165 | 3,50 | não | 137,99 | 1,20 | 209 | 3,50 | 3,55 | 3,15 | 0,0 | -1,4 | 10,5 | 22,3 |
| 8 | 0 | 175 | 3,50 | não | 150,97 | 1,16 | 219 | 3,50 | 3,45 | 3,15 | 0,0 | 1,4 | 10,5 | 44,4 |
| 8 | 0 | 185 | 3,50 | sim | 166,51 | 1,11 | 223 | 3,50 | 3,30 | 3,15 | 0,0 | 5,9 | 10,5 | 68,9 |
| 6 | 1 | 135 | 3,50 | não | 98,76 | 1,37 | 88 | 3,50 | 4,15 | 3,30 | 0,0 | -17,0 | 5,9 | 12 |
| 6 | 1 | 145 | 3,50 | não | 113,47 | 1,28 | 149 | 3,55 | 4,20 | 3,20 | -1,4 | -18,2 | 9,0 | 27,5 |
| 6 | 1 | 155 | 3,50 | não | 127,42 | 1,22 | 199 | 3,50 | 3,60 | 2,85 | 0,0 | -2,8 | 20,5 | 51,3 |
| 6 | 1 | 165 | 3,50 | sim | 147,48 | 1,12 | 217 | 3,50 | 3,35 | 2,85 | 0,0 | 4,4 | 20,5 | 74,5 |
| 6 | 1 | 175 | 3,50 | sim | 165,10 | 1,06 | 210 | 3,50 | 3,05 | 2,85 | 0,0 | 13,8 | 20,5 | 89 |
| 6 | 1 | 185 | 3,50 | sim | 178,65 | 1,04 | 203 | 3,50 | 2,75 | 2,95 | 0,0 | 24,1 | 17,1 | 95,7 |
| 6 | 0 | 135 | 3,50 | sim | 104,51 | 1,29 | 59 | 3,55 | 3,60 | 3,30 | -1,4 | -2,8 | 5,9 | 12 |
| 6 | 0 | 145 | 3,50 | sim | 123,67 | 1,17 | 80 | 3,50 | 3,75 | 3,15 | 0,0 | -6,9 | 10,5 | 27,5 |
| 6 | 0 | 155 | 3,50 | não | 126,91 | 1,22 | 165 | 3,50 | 4,15 | 3,10 | 0,0 | -17,0 | 12,1 | 51,3 |
| 6 | 0 | 165 | 3,50 | não | 138,70 | 1,19 | 218 | 3,50 | 3,50 | 2,95 | 0,0 | 0,0 | 17,1 | 74,5 |
| 6 | 0 | 175 | 3,50 | sim | 155,19 | 1,13 | 220 | 3,50 | 3,15 | 2,95 | 0,0 | 10,5 | 17,1 | 89 |
| 6 | 0 | 185 | 3,50 | sim | 169,44 | 1,09 | 220 | 3,50 | 3,20 | 2,90 | 0,0 | 9,0 | 18,8 | 95,7 |
| 8 | 1 | 135 | 3,50 | não | 101,16 | 1,33 | 90 | 3,55 | 4,15 | 3,30 | -1,4 | -17,0 | 5,9 | 1,3 |
| 8 | 1 | 145 | 3,50 | não | 113,92 | 1,27 | 135 | 3,55 | 4,15 | 3,20 | -1,4 | -17,0 | 9,0 | 3,6 |
| 8 | 1 | 155 | 3,50 | não | 126,69 | 1,22 | 191 | 3,50 | 3,65 | 3,15 | 0,0 | -4,2 | 10,5 | 9,4 |
| 8 | 1 | 165 | 3,50 | não | 141,12 | 1,17 | 221 | 3,50 | 3,45 | 3,05 | 0,0 | 1,4 | 13,8 | 22,3 |
| 8 | 1 | 175 | 3,50 | sim | 160,22 | 1,09 | 223 | 3,50 | 3,15 | 3,25 | 0,0 | 10,5 | 7,4 | 44,4 |
| 8 | 1 | 185 | 3,50 | sim | 175,38 | 1,05 | 215 | 3,50 | 2,35 | 3,25 | 0,0 | 39,8 | 7,4 | 68,9 |
| 8 | 0 | 135 | 3,50 | não | 101,10 | 1,34 | 54 | 3,55 | 4,15 | 3,30 | -1,4 | -17,0 | 5,9 | 1,3 |
| 8 | 0 | 145 | 3,50 | não | 122,18 | 1,19 | 77 | 3,50 | 4,15 | 3,30 | 0,0 | -17,0 | 5,9 | 3,6 |
| 8 | 0 | 155 | 3,50 | não | 125,65 | 1,23 | 148 | 3,55 | 3,80 | 3,25 | -1,4 | -8,2 | 7,4 | 9,4 |

O modelo probabilístico dos resultados do experimento da primeira fase resultaram os dados da Tabela 18 de $P(\text{Frat})_{\log}$.

Tabela 18 - Resultados do experimento da primeira fase aplicado ao modelo logístico $P(\text{Frat})_{\log}$

| R | De | P(Frat) | R | De | P(Frat) |
|----------|-----------|----------------|----------|-----------|----------------|
| 6 | 135 | 0,12005 | 8 | 135 | 0,013264 |
| 6 | 135 | 0,12005 | 8 | 135 | 0,013264 |
| 6 | 135 | 0,12005 | 8 | 135 | 0,013264 |
| 6 | 135 | 0,12005 | 8 | 135 | 0,013264 |
| 6 | 145 | 0,274737 | 8 | 145 | 0,035981 |
| 6 | 145 | 0,274737 | 8 | 145 | 0,035981 |
| 6 | 145 | 0,274737 | 8 | 145 | 0,035981 |
| 6 | 145 | 0,274737 | 8 | 145 | 0,035981 |
| 6 | 155 | 0,512627 | 8 | 155 | 0,093903 |
| 6 | 155 | 0,512627 | 8 | 155 | 0,093903 |
| 6 | 155 | 0,512627 | 8 | 155 | 0,093903 |
| 6 | 155 | 0,512627 | 8 | 155 | 0,093903 |
| 6 | 165 | 0,744931 | 8 | 165 | 0,223456 |
| 6 | 165 | 0,744931 | 8 | 165 | 0,223456 |
| 6 | 165 | 0,744931 | 8 | 165 | 0,223456 |
| 6 | 165 | 0,744931 | 8 | 165 | 0,223456 |
| 6 | 175 | 0,890221 | 8 | 175 | 0,444134 |
| 6 | 175 | 0,890221 | 8 | 175 | 0,444134 |
| 6 | 175 | 0,890221 | 8 | 175 | 0,444134 |
| 6 | 175 | 0,890221 | 8 | 175 | 0,444134 |
| 6 | 185 | 0,957476 | 8 | 185 | 0,689298 |
| 6 | 185 | 0,957476 | 8 | 185 | 0,689298 |
| 6 | 185 | 0,957476 | 8 | 185 | 0,689298 |
| 6 | 185 | 0,957476 | 8 | 185 | 0,689298 |

Aplicando-se o modelo de regressão linear sobre os resultados da Tabela 18 obtemos a função linear da probabilidade do corpo de prova fraturar $P(\text{Frat})_{\text{lin}}$ em função de tamanho do raio da ferramenta e da dimensão do diâmetro externo do blanque representada pela superfície gráfica na Figura 38, com coeficiente de correlação “CORR.” de 0,946.

$$P(\text{Frat})_{\text{lin}} = -0,929 + (-1,167 \times R) + (0,016 \times De)$$

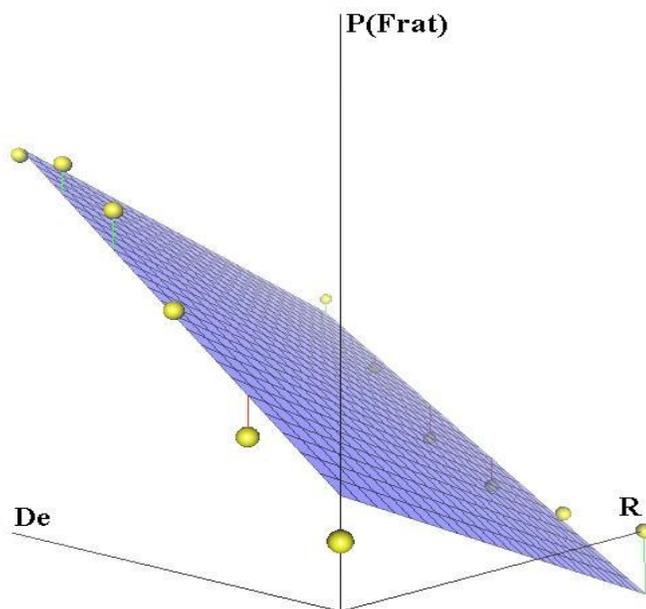


Figura 38 – Análise de superfície para a probabilidade de fratura $P(\text{Frat})_{\text{lin}}$ em função do diâmetro externo do blanque (De) e do raio da ferramenta (R).

Pode-se concluir para a primeira fase do experimento que a probabilidade de fraturar o corpo de prova é maior em função do diâmetro externo do blanque do que em função do raio da ferramenta e que, a partir dos testes estatísticos não foi evidenciada a influência do prensa chapa sobre a probabilidade de se fraturar o corpo de prova nesse ensaio.

Na seleção dos corpos de prova para os ensaios com lubrificantes, através da ANOVA, foi identificada a probabilidade de fratura de 50%, sendo classificados corpos de prova acima e abaixo dessa faixa. Com probabilidade de fratura abaixo de 50% foram classificados como não fraturados e os com probabilidade de fratura acima de 50% como fraturados (Figura 39).

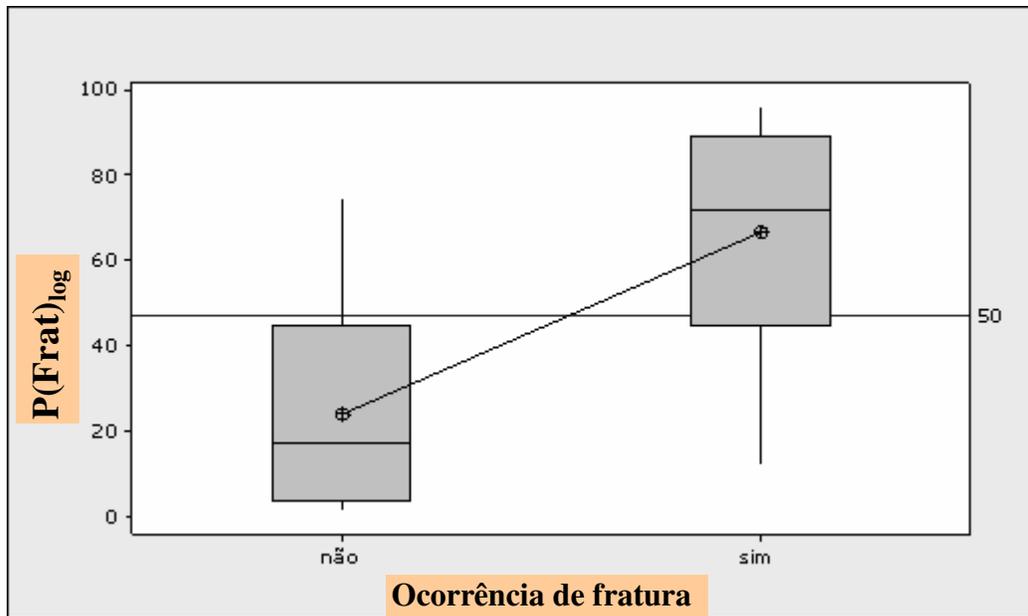


Figura 39 – ANOVA para classificação dos corpos de prova como fraturados e não fraturados.

O gráfico da Figura 40 se refere a um comparativo entre a situação real de fratura (R) das proporções de peças fraturadas no ensaio e a situação prevista (P) pelo modelo definido.

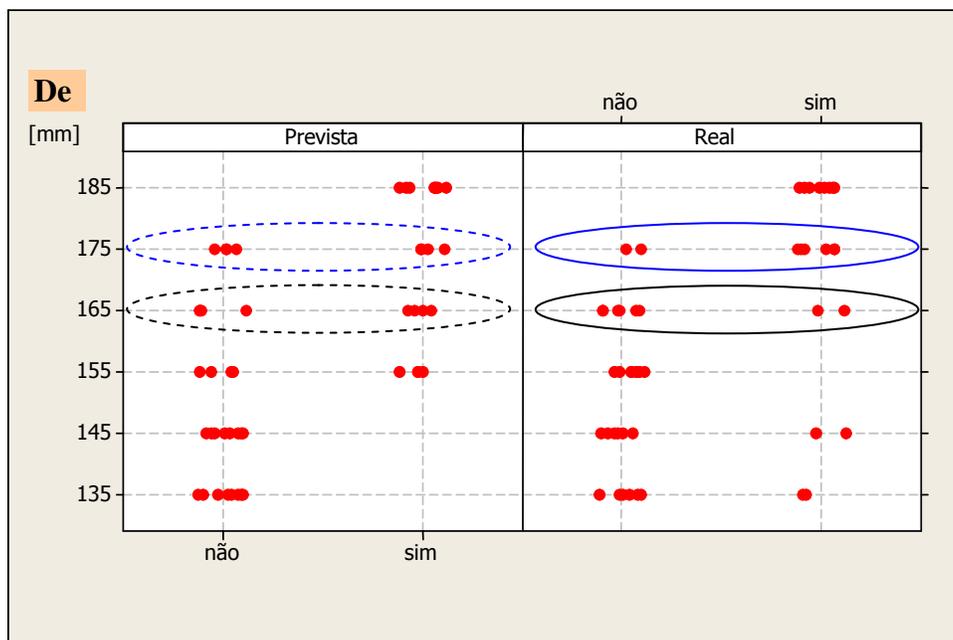


Figura 40 - Comparativo entre a situação de fratura real das quantidades de peças fraturadas no ensaio e a situação prevista.

Nota-se que nos resultados de fratura na situação real “R” para os blanques de diâmetro 175 mm e 165 mm, houve corpos de prova que fraturaram e corpos de prova que não fraturaram em proporções inversas.

Para os corpos de blanque com diâmetro externo 165 mm, a proporção de fraturados foi de 2 em 8 corpos ensaiados. Para os de diâmetros 175 mm a proporção de fraturados foi de 6 corpos em 8 ensaiados como mostra o gráfico na Figura 41. As Figuras 42 a 53 mostram a aparência dos corpos de prova de diâmetro do blanque com 165 mm e 175 mm correspondentes a esses ensaios.

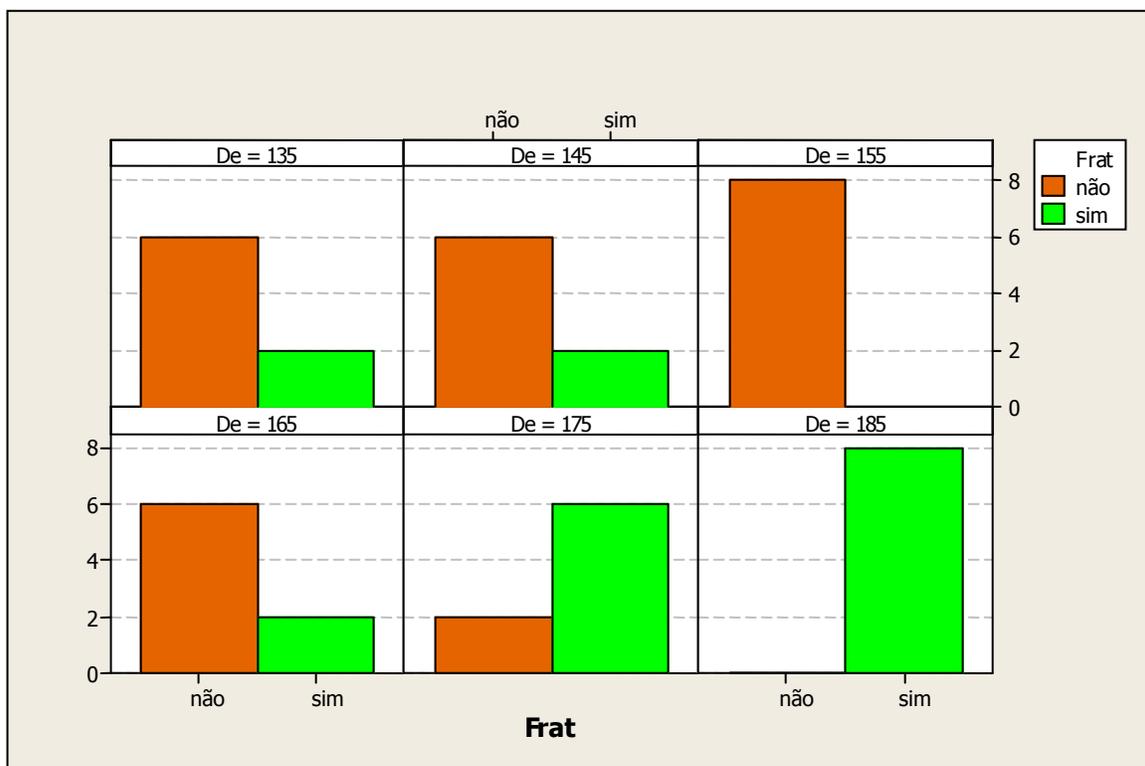


Figura 41 – Quantidade de corpos de prova que fraturados (Frat/s) e não fraturados (Frat/n) em relação ao diâmetro externo do blanque (De)

Os resultados dos corpos de prova com diâmetros de blanque 135 mm e 145 mm (Figuras 50 e 51) não foram considerados, devido ao comprometimento da região da aba em função da falta de material durante o escoamento, como mostrados nessas figuras.



Figura 42 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 165 mm, com raio de matriz/punção de 6 mm com a atuação do prensa chapa.

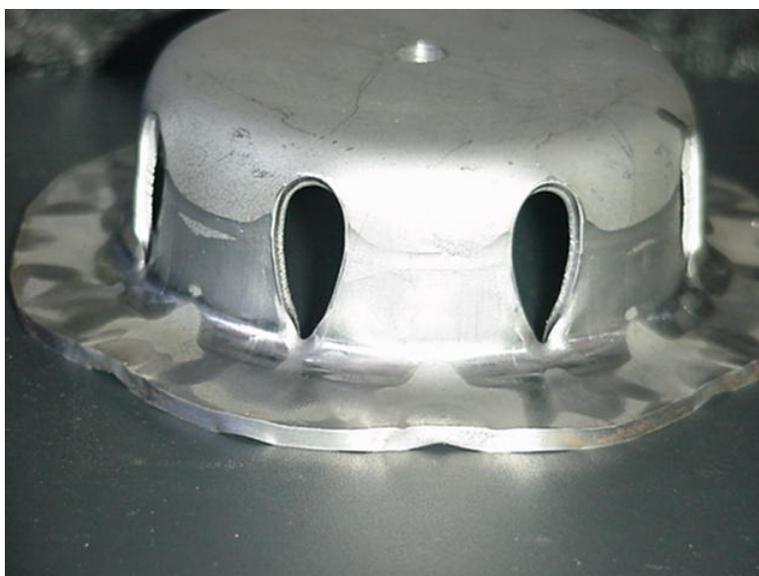


Figura 43 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 165 mm, com raio de matriz/punção de 6 mm sem a atuação do prensa chapa.



Figura 44 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 165 mm, com raio de matriz/punção de 8 mm com a atuação do prensa chapa.



Figura 45 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 165 mm, com raio de matriz/punção de 8 mm sem a atuação do prensa chapa.



Figura 46 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 175 mm, com raio de matriz/punção de 6 mm com a atuação do prensa chapa.

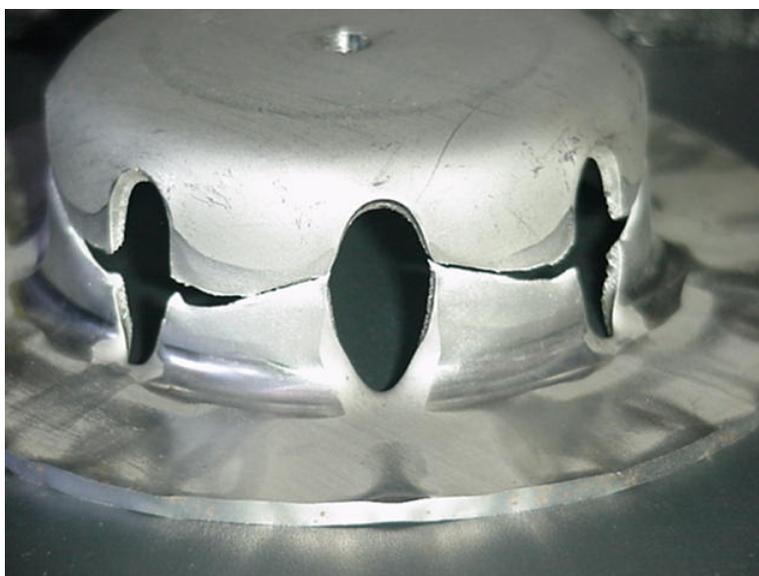


Figura 47 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 175 mm, com raio de matriz/punção de 6 mm sem a atuação do prensa chapa.



Figura 48 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 175 mm, com raio de matriz/punção de 8 mm com a atuação do prensa chapa.

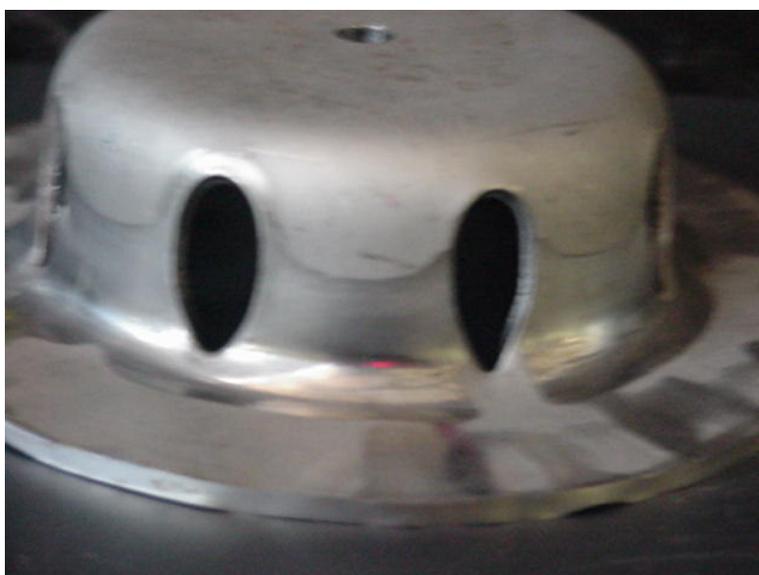


Figura 49 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 175 mm, com raio de matriz/punção de 8 mm sem a atuação do prensa chapa.



Figura 50 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 135 mm com região da aba comprometida.



Figura 51 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 145 mm com região da aba comprometida.



Figura 52 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 185 mm. Ensaio com todos os corpos de prova fraturados.



Figura 53 – Corpo de prova embutido a partir do blanque de 155 mm sem fratura. Ensaio com nenhum corpo de prova fraturado.

Os resultados dos ensaios da primeira fase evidenciam que os corpos de prova de diâmetro do blanque de 165 mm e 175 mm (Figuras 42 a 49) apresentam-se favoráveis para serem selecionados para os ensaios com lubrificantes. Eles representam uma condição crítica, sensíveis à potencial influência dos lubrificantes.

O mesmo não ocorreu com os diâmetros de 185 mm (Figura 52), pois todos os ensaios resultaram em fratura, e com o diâmetro de 155 mm (Figura 53), que não resultou em corpos de prova com fratura, como mostrado nas figuras correspondentes.

Finalmente, os diâmetros de 135 mm e 145 mm que ficaram comprometidos devido à falta de material na região da aba (Figuras 50 e 51), também não foram considerados.

Quanto ao esforço desenvolvido no embutimento representado pela força máxima (Fmax), pode-se determinar que o diâmetro externo do blanque fosse mais significativo que o raio da ferramenta, comprovado pelo modelo de regressão linear (Figuras 54 a 57).

Pelos coeficientes da Tabela 19 pode-se concluir que nos ensaios sem a atuação do prensa chapa a força máxima de embutimento é menor, com influência significativa do raio da ferramenta, ao contrário da situação de ensaios com a atuação do prensa chapa.

Tabela 19 – Coeficientes obtidos por regressão linear para análise da força máxima (Fmax).

| Prensa Chapa (BH) | Previsão | Coeficiente | P-Valor (Coeficiente) | Coeficiente de correlação |
|-------------------|-----------|-------------|-----------------------|---------------------------|
| com atuação | Constante | -215,32 | 0,003 | 0,742 |
| | R | 0,208 | 0 | |
| | De | 2,4479 | 0,969 | |
| sem atuação | Constante | -417,16 | 0 | 0,885 |
| | R | -2,833 | 0 | |
| | De | 3,7171 | 0,577 | |

$$F_{\max} (\text{com BH}) = - 215,32 + 2,45 \text{ De} + 0,21 \text{ R}$$

$$F_{\max} (\text{sem BH}) = - 417,16 + 3,72 \text{ De} - 2,83 \text{ R}$$

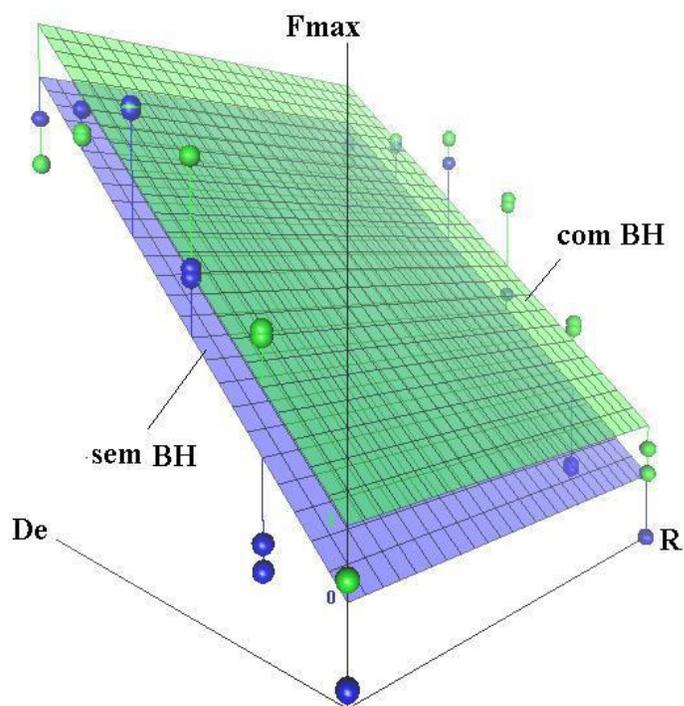


Figura 54 – Análise de superfície a força máxima de embutimento (F_{max}) em função do diâmetro externo do blanque (De) e do raio da ferramenta (R) com e sem a atuação do prensa chapa (BH).

Portanto, conforme os coeficientes da Tabela 20, a força máxima de embutimento (F_{max}) não é influenciada pelo raio da ferramenta (R), porém é influenciada pela atuação do prensa chapa (BH) e pelo diâmetro externo (De) como apresentado na figura 54.

Tabela 20 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da força máxima (F_{max}).

| Fator | Níveis | Valores | P-Valor (Anova) para F_{max} | Correlação linear "CORR." |
|-----------|--------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| De [mm] | 6 | 135; 145; 155; 165; 175; 185 | 0 | 0,947 |
| BH | 2 | 0 (com atuação); 1 (sem atuação) | 0 | |
| R [mm] | 2 | 6; 8 | 0,549 | |

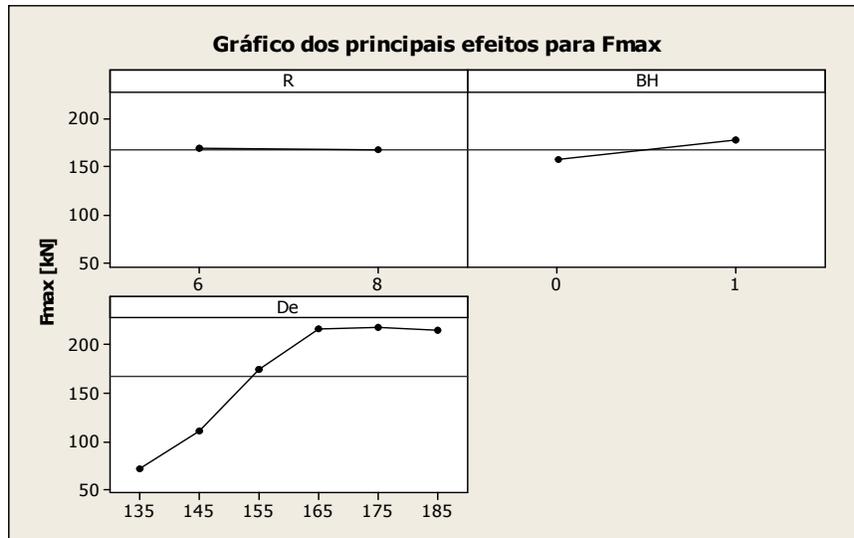


Figura 55 – Principais efeitos que influenciaram os resultados de força de embutimento máximo (Fmax).

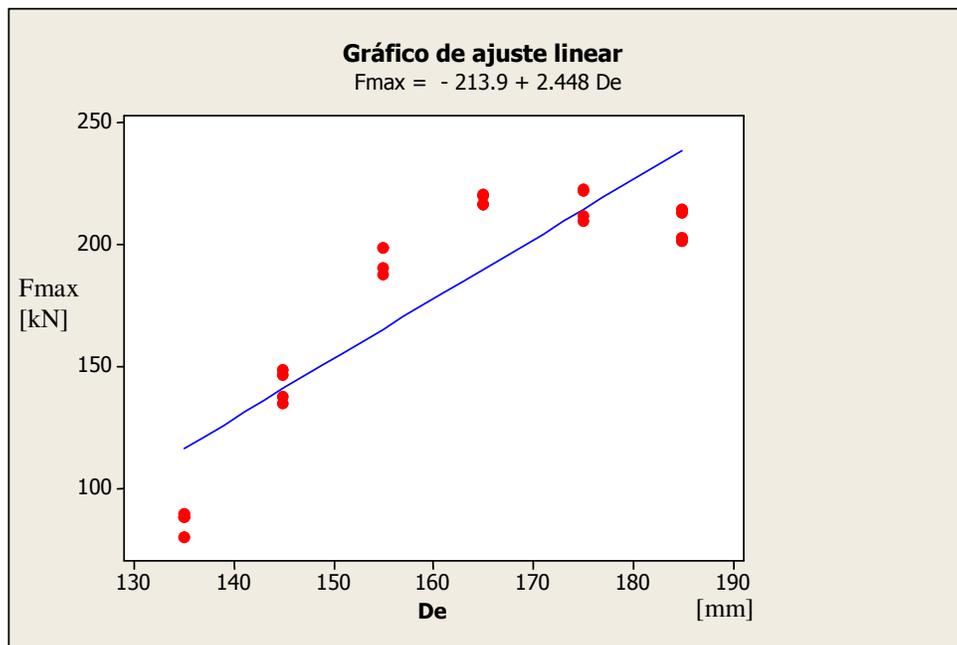


Figura 56 – Ajuste linear do modelo força máxima (Fmax) em função do diâmetro externo do blanque (De) com atuação do prensa chapa (BH), independente do tamanho do raio.

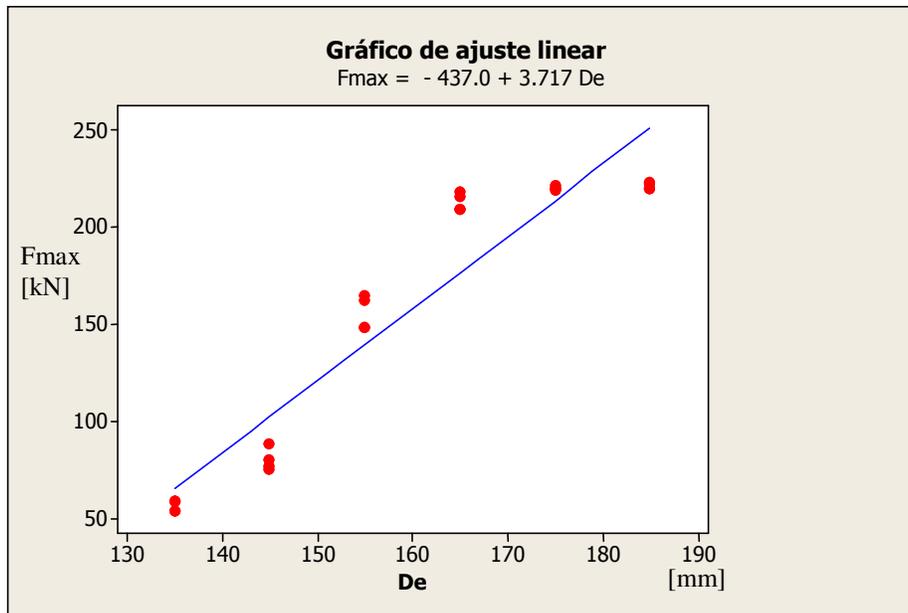


Figura 57 – Ajuste linear do modelo força máxima (Fmax) em função do diâmetro externo do blanque (De) sem atuação do prensa chapa (BH), independente do tamanho do raio.

Lembrando que a estricção é a redução das dimensões da seção transversal, provocada pelas cargas de tração do processo, é importante avaliar os resultados dos ensaios para esse efeito nas regiões para medição das espessuras no corpo de prova embutido conforme a Figura 26.

A espessura da chapa no raio da região do flange no corpo de prova (região 1 de maior tensão radial na parede) sofre influência do diâmetro externo do blanque (De), porém quando há atuação do prensa chapa (BH) a relação dessa espessura com o diâmetro externo do blanque aumenta, reforçando a hipótese (Tabela 21) de que quanto maior o diâmetro externo do blanque menor será a espessura nessa região do corpo de prova, conforme denotado pelos modelos “a” e “b” (Figura 58b).

Tabela 21 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da espessura no raio da região do flange (Eraiofl)

| Fator | Níveis | Valores | P-Valor (Anova) para Eraiofl | Correlação linear "CORR." |
|---------|--------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| De [mm] | 6 | 135; 145; 155; 165; 175; 185 | 0 | 0,819 |
| BH | 2 | 0 (com atuação); 1(sem atuação) | 0,015 | |
| R [mm] | 2 | 6; 8 | 0,249 | |

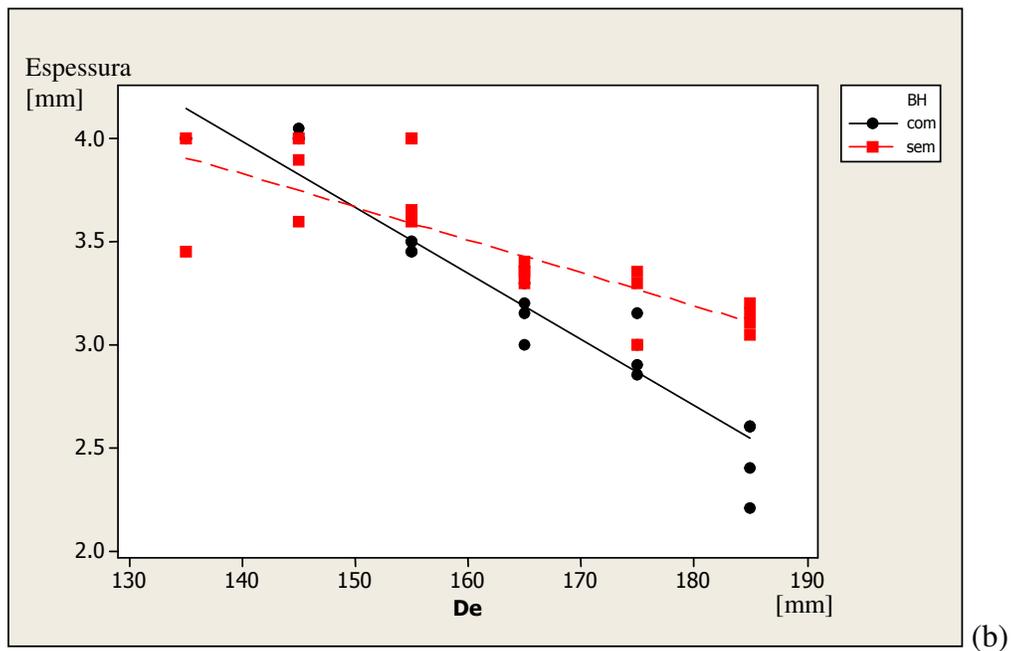
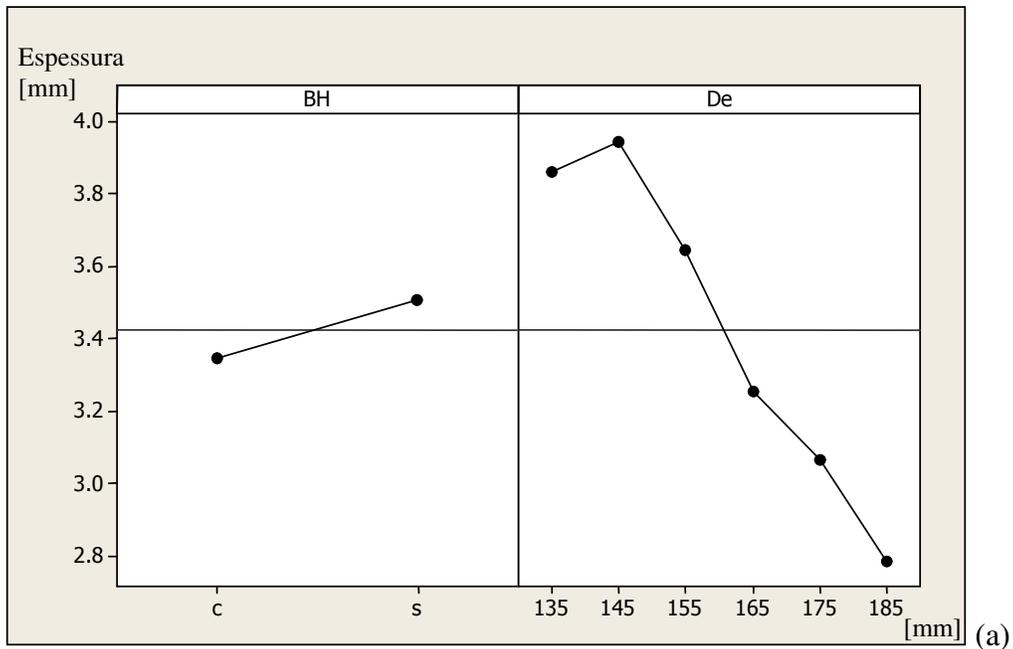


Figura 58 – Relação entre as espessuras no raio do flange, prensa chapa e os diâmetros externos.

(a) $E_{raiofl}(1) = 6,068 - 0,01600 De$
 CORR. = 0,610 (sem BH)

(b) $E_{raiofl}(1) = 8,454 - 0,03193 De$
 CORR. = 0,931 (com BH)

A espessura da chapa no raio do fundo no corpo de prova (região 2, Figura 26) sofre influência aproximadamente 10 vezes maior (tabela 22) pelo raio da ferramenta (R) do que pelo diâmetro externo do blanque (De), denotados pelo modelo e pelos gráficos da Figura 58. Quanto maior o raio da ferramenta, provavelmente maior será a espessura do raio no fundo do corpo de prova (Eraifun), como mostrado pelo modelo “c” e Figura 59.

Tabela 22 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da espessura do raio no fundo (Eraifun)

| Fator | Níveis | Valores | P-Valor (Anova) para Eraifun | Correlação linear "CORR." |
|---------|--------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| De [mm] | 6 | 135; 145; 155; 165; 175; 185 | 0 | 0,771 |
| BH | 2 | 0 (com atuação); 1(sem atuação) | 0,104 | |
| R [mm] | 2 | 6; 8 | 0 | |

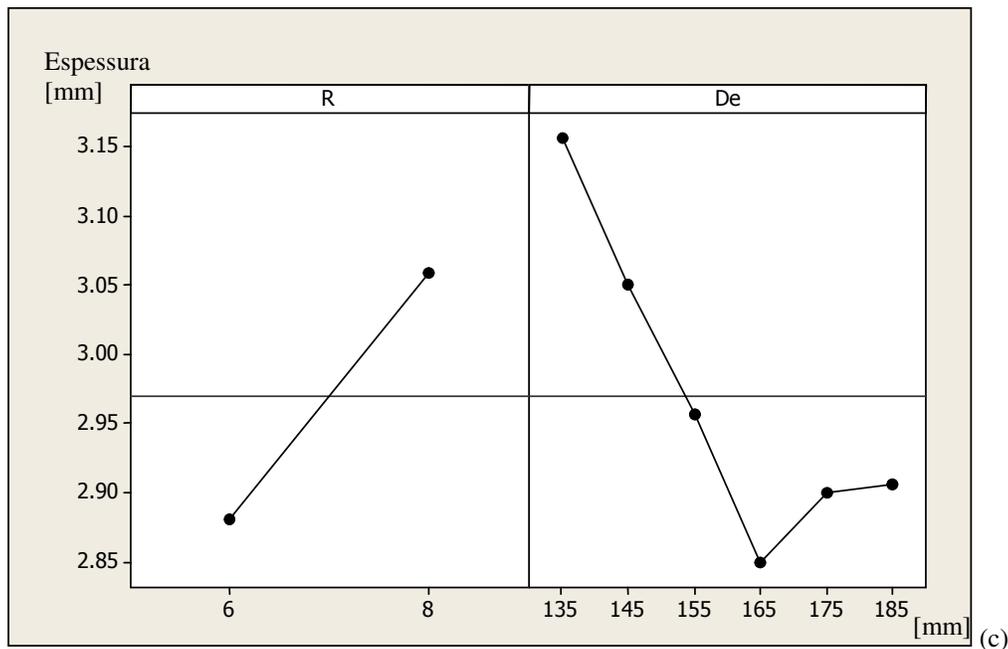


Figura 59 – Relação entre as espessuras no raio do fundo, raio da ferramenta e os diâmetros externos do blanque.

$$(c) \text{ Eraifun } (2) = 3,18 - 0,00516 \text{ De} + 0,0885 \text{ R}$$

$$\text{CORR.} = 0,633$$

Conforme mostrado na Figura 60 e os modelos “d” e “e”, sem a atuação do prensa chapa a espessura no fundo do corpo de prova possui média correlação com o diâmetro externo do blanque

(Tabela 23). Aumentando-se o diâmetro externo diminui-se a espessura nessa região, sendo significativo apenas sem a atuação do prensa chapa conforme o modelo “e”.

Tabela 23 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da espessura no fundo (Efund)

| Fator | Níveis | Valores | P-Valor (Anova) para Efund | Correlação linear "CORR." |
|---------|--------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| De [mm] | 6 | 135; 145; 155; 165; 175; 185 | 0 | 0,507 |
| BH | 2 | 0 (com atuação); 1(sem atuação) | 0,041 | |
| R [mm] | 2 | 6; 8 | 0,212 | |

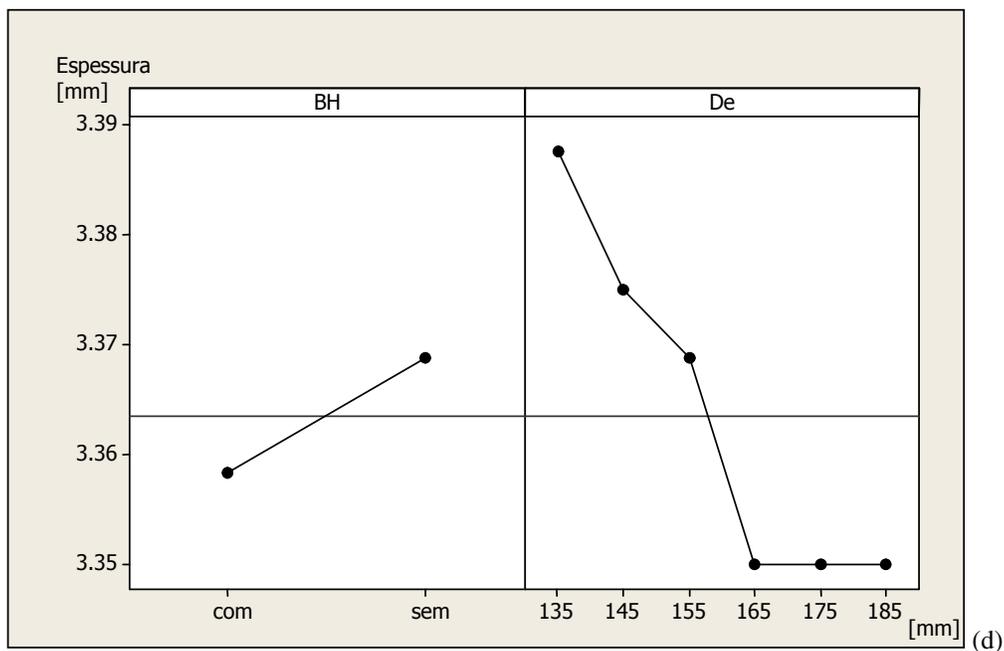


Figura 60 – Relação entre as espessuras no fundo do corpo do prova, raio da ferramenta e os diâmetros externos.

$$(d) \text{ Efund (3)} = 3,450 - 0,000571 \text{ De}$$

$$\text{CORR.} = 0,274 \text{ (com BH)}$$

$$(e) \text{ Efund (3)} = 3,534 - 0,001036 \text{ De}$$

$$\text{CORR.} = 0,534 \text{ (sem BH)}$$

Nessa análise para a espessura da parede no corpo de prova, Figura 61 e modelos “f” e “g” nota-se a clássica relação entre do raio da ferramenta e do diâmetro externo do blanque, conforme

a Tabela 24, sugerindo-se uma maior espessura de parede ao aumentar o raio da ferramenta ou diminuir o diâmetro externo do blanque.

Tabela 24 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise da espessura na parede (Epare).

| Fator | Níveis | Valores | P-Valor (Anova) para Epare | Correlação linear "CORR." |
|---------|--------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| De [mm] | 6 | 135; 145; 155; 165; 175; 185 | 0 | 0,731 |
| BH | 2 | 0 (com atuação); 1(sem atuação) | 0,042 | |
| R [mm] | 2 | 6; 8 | 0 | |

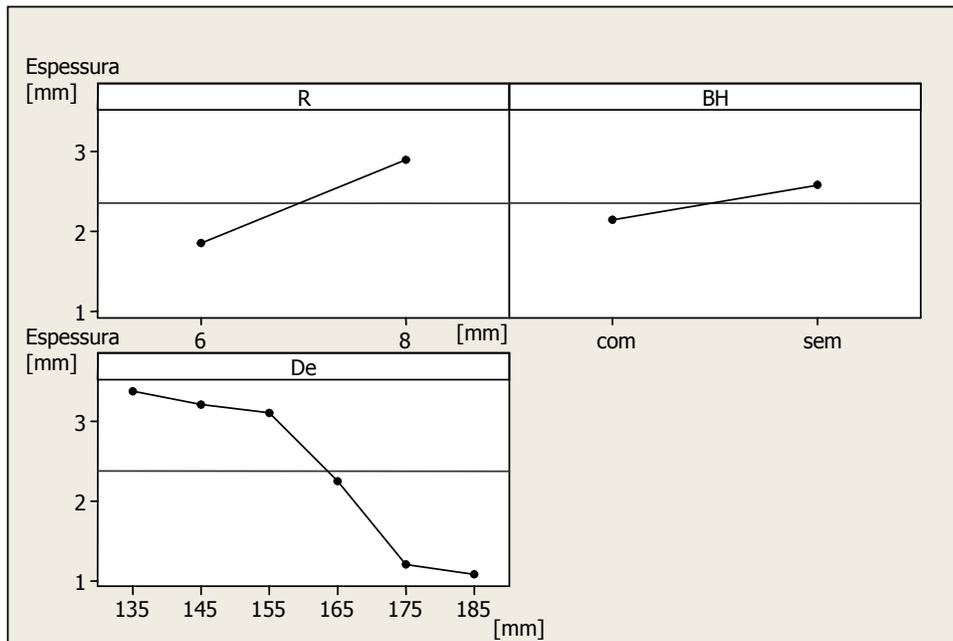


Figura 61 – Relação entre as espessuras da parede do corpo do prova em função do raio da ferramenta, da atuação do prensa chapa e diâmetro do blanque.

$$(f) \text{ Epare (4)} = 6,40 + 0,615 R - 0,0535 \text{ De}$$

$$\text{CORR.} = 0,711 \text{ (com BH)}$$

$$(g) \text{ Epare (4)} = 7,88 + 0,427 R - 0,0518 \text{ De}$$

$$\text{CORR.} = 0,643 \text{ (sem BH)}$$

Relacionando-se a probabilidade da fratura dos corpos de prova com as espessuras nas regiões 1, 2 e 3 analisadas anteriormente (Figura 26), obtêm-se os modelos abaixo, que indicam maior sensibilidade à fratura para a espessura da chapa no raio do fundo no corpo de prova do que

para as espessuras nas outras regiões. A região 4 não foi considerada na análise devido ao descolamento das partes superior e inferior do corpo de prova.

Sabendo-se que quanto maior o raio da ferramenta, maior será espessura da chapa no raio do fundo no corpo de prova (região 2) representado pelo modelo “c” da análise anterior, que conseqüentemente terá maior influência conforme descrito no modelo que segue, diminuindo a probabilidade da fratura do corpo de prova de modo mais significativo que as espessuras nas outras regiões.

Também foi notada influência significativa da atuação do prensa chapa sobre a diminuição das espessuras nessas regiões. Sem a atuação do prensa chapa a diminuição da espessura Erauifun (região 2) pôde influenciar significativamente a probabilidade de fratura P(Frat). Porém, com a atuação do prensa chapa, a região Eraiofl (região 1) também passou a influenciar a probabilidade de fratura P(Frat) no experimento (Tabela 25).

Tabela 25 – Coeficientes obtidos por regressão para análise da diminuição das espessuras. (Epare).

| Prensa Chapa (BH) | Previsão | Coeficiente | P-Valor (Coeficiente) | Coeficiente de regressão |
|-------------------|-----------|-------------|-----------------------|--------------------------|
| sem atuação | Constante | 7,366 | 0,128 | 0,882 |
| | Efund | -0,153 | 0,917 | |
| | Eraiofl | -0,162 | 0,128 | |
| | Erauifun | -1,8536 | 0 | |
| com atuação | Constante | -0,801 | 0,903 | 0,838 |
| | Efund | 1,508 | 0,438 | |
| | Eraiofl | -0,39815 | 0 | |
| | Erauifun | -0,8649 | 0 | |

Modelo da probabilidade de fratura (ajustado) para as regiões das espessuras com atuação do prensa chapa.

$$P(\text{Frat}) = 4,30 - 0,376 \text{ Eraiof} - 0,827 \text{ Erauifun}$$

$$\text{CORR.} = 0,833$$

Modelo da probabilidade de fratura (ajustado) para as regiões das espessuras sem atuação do prensa chapa.

$$P(\text{Frat}) = 7,16 - 2,15 \text{ Erauifun}$$

$$\text{CORR.} = 0,865$$

Lembrando que a relação sobre o diâmetro inicial do blanque e o diâmetro final do corpo de prova embutido é caracterizado pelo índice de Schuler “ β_0 ” e conforme o seu valor recomendado para embutimento está na ordem de $\beta_0 = 2$, nota-se que no experimento dessa fase esse coeficiente estava entre $\beta_0 = 1,37$ à 1.036 , provavelmente devido à influência das janelas inseridas no blanque (Figura 62).

Apesar da diferença entre o índice recomendado por Schuler e o índice obtido no experimento, nota-se que quanto maior esse índice, menor será a probabilidade de fratura, conforme segue o modelo e mostrado na Figura 62.

$$\beta_0 = 1,282 - 0,2244 P(\text{Frat}) \quad \text{CORR.} = 0,637$$

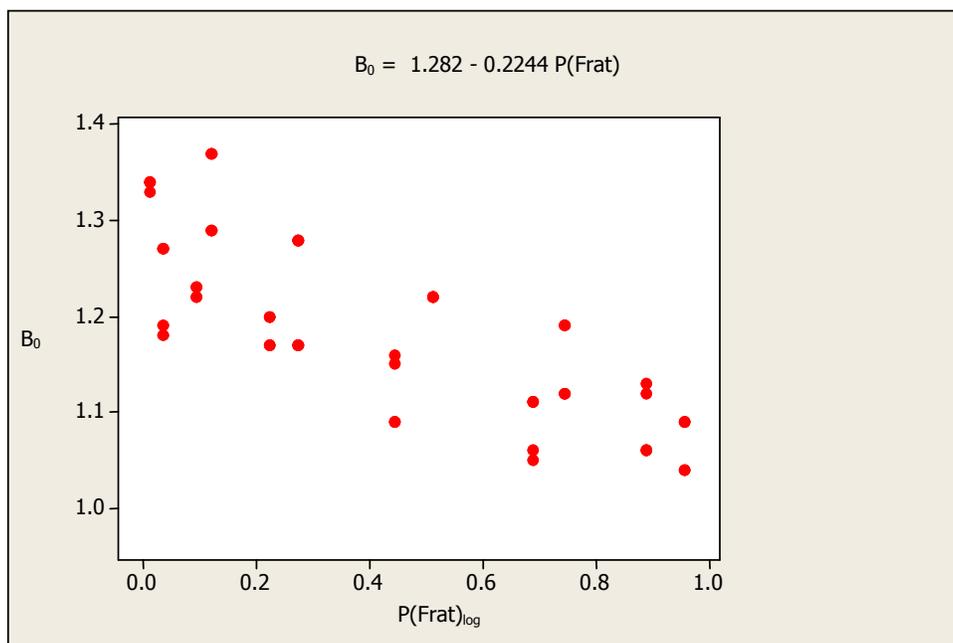


Figura 62 – Relação entre o coeficiente B_0 e a probabilidade da fratura $P(\text{Frat})_{\log}$.

Conforme mostrado na Figura 63, em relação ao diâmetro externo médio do corpo de prova medido após o embutimento (DeEB_M), foi identificada influência do diâmetro externo do blanque (De), enquanto a atuação do prensa chapa (BH) e raio da ferramenta (R) não responderam aos resultados do diâmetro externo após o embutimento (DeEB-M) durante os ensaios (Tabela 26). Conseqüentemente a correlação entre o diâmetro do blanque (De) e o diâmetro médio embutido (DeEB_M) é elevada (CORR. = 95,9%).

Tabela 26 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise do diâmetro médio embutido (DeEB-M)

| Fator | Níveis | Valores | P-Valor (Anova) para DeEB-M | Correlação linear "r" |
|---------|--------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| De [mm] | 6 | 135; 145; 155; 165; 175; 185 | 0 | 0,979 |
| BH | 2 | 0 (com atuação); 1(sem atuação) | 0,064 | |
| R [mm] | 2 | 6; 8 | 0,057 | |

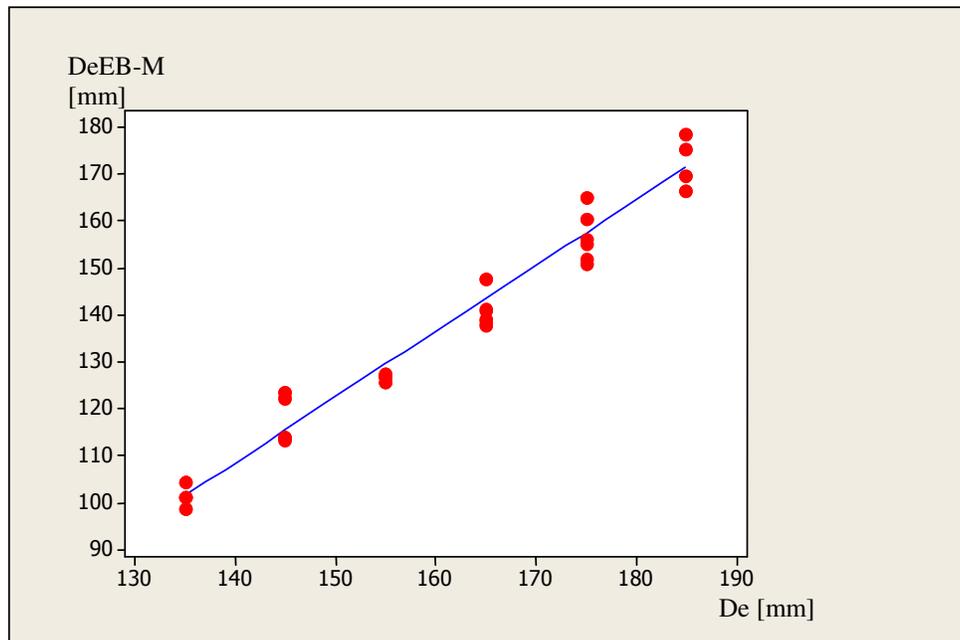


Figura 63 – Relação entre o diâmetro externo antes (De) após embutimento (DeEB-M).

Ao analisar-se β_0 em função do diâmetro externo inicial do blanque (Figura 64), o modelo abaixo mostra que quanto maior o diâmetro, menor será β_0 .

$$\beta_0 = 1,971 - 0,004887 De \quad \text{CORR.} = 0,838$$

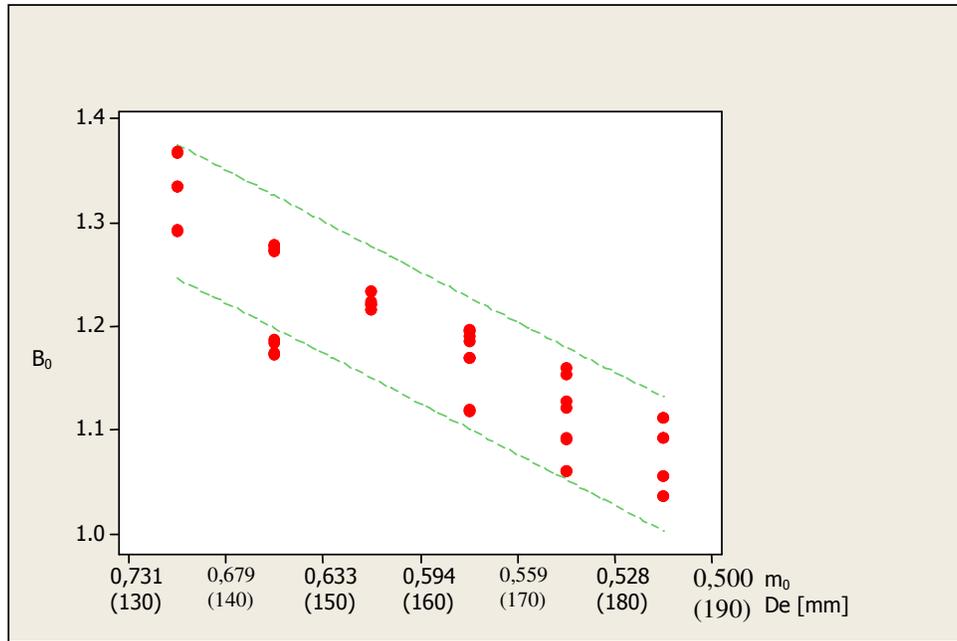


Figura 64 – Gráfico de relação entre o coeficiente Beta, em função do fator mínimo de embutimento o diâmetro externo do blanche.

Portanto a probabilidade de fratura do corpo de prova será maior, quanto menor o fator mínimo de embutimento e maior o diâmetro blanche, provocado pelo aumento das tensões na região da aba, em proporções mais significativas que o previsto por Schluer (1968), devido à severidade das janelas na parede (Figura 6).

4.4.2 Resultados da segunda fase

As Tabelas 27 a 29 apresentam os resultados obtidos nos ensaios realizados na segunda fase do planejamento experimental que teve por objetivo avaliar cinco diferentes lubrificantes empregando-se blanques com 165 e 175 mm de diâmetro externo, que nos ensaios da primeira fase de experimentos demonstraram ser os mais susceptíveis à fratura.

Tabela 27 – Resultados do experimento da segunda fase para avaliação do desempenho dos lubrificantes para os corpos de prova com diâmetro externo (De) de 165 mm e 175 mm

| R | BH | De | Lubrificação | Lubrificante | Massa Lubr | E0 | Frat | DeEB | Beta | Fmax | Rmax | Efund | Eraiofl | Erauifun | dfundo | draio_flg | draio_fnd |
|------|----|------|--------------|-------------------|------------|------|------|--------|------|------|-------|-------|---------|----------|--------|-----------|-----------|
| [mm] | | [mm] | | | [gr] | [mm] | | [mm] | | [kN] | mm | [mm] | [mm] | [mm] | [%] | [%] | [%] |
| 6 | 1 | 165 | 1 | Renoform Press 10 | 1,10 | 3,5 | sim | 145,31 | 1,14 | 220 | 0,806 | 3,47 | 3,18 | 2,87 | 1,0 | 9,5 | 20,0 |
| 6 | 0 | 165 | 1 | MZA 20 | 1,18 | 3,5 | não | 137,84 | 1,20 | 231 | 0,806 | 3,52 | 3,57 | 3,02 | -0,5 | -1,9 | 14,9 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | Renoform Press 10 | 1,24 | 3,5 | não | 141,04 | 1,17 | 222 | 0,067 | 3,48 | 3,43 | 3,08 | 0,5 | 1,9 | 12,7 |
| 6 | 0 | 165 | 1 | MZA 20 | 1,25 | 3,5 | não | 137,95 | 1,20 | 231 | 0,806 | 3,55 | 3,58 | 3,03 | -1,4 | -2,4 | 14,3 |
| 6 | 1 | 165 | 1 | MZA 20 | 1,30 | 3,5 | sim | 144,99 | 1,14 | 220 | 0,806 | 3,43 | 3,38 | 3,03 | 1,9 | 3,4 | 14,3 |
| 6 | 1 | 165 | 1 | MZA 20 | 1,30 | 3,5 | sim | 144,43 | 1,14 | 221 | 0,806 | 3,53 | 3,58 | 3,08 | -0,9 | -2,4 | 12,7 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | Extrudoil | 1,30 | 3,5 | não | 137,85 | 1,20 | 210 | 0,067 | 3,48 | 3,25 | 2,83 | 0,5 | 7,4 | 21,1 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | Extrudoil | 1,30 | 3,5 | sim | 152,57 | 1,15 | 220 | 0,067 | 3,47 | 3,25 | 2,83 | 1,0 | 7,4 | 21,1 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | MZA 20 | 1,35 | 3,5 | sim | 163,24 | 1,07 | 212 | 0,806 | 3,43 | 2,92 | 2,93 | 1,9 | 18,2 | 17,7 |
| 6 | 1 | 165 | 1 | Extrudoil | 1,40 | 3,5 | sim | 144,42 | 1,14 | 220 | 0,806 | 3,42 | 3,13 | 2,90 | 2,4 | 11,1 | 18,8 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | Renoform Press 10 | 1,40 | 3,5 | não | 140,72 | 1,17 | 223 | 0,067 | 3,48 | 3,42 | 3,05 | 0,5 | 2,4 | 13,8 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | Extrudoil | 1,40 | 3,5 | não | 137,94 | 1,20 | 214 | 0,067 | 3,50 | 3,60 | 3,12 | 0,0 | -2,8 | 11,6 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | Extrudoil | 1,40 | 3,5 | sim | 163,26 | 1,07 | 214 | 0,806 | 3,45 | 2,85 | 2,92 | 1,4 | 20,5 | 18,2 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | Renoform Press 10 | 1,40 | 3,5 | sim | 159,65 | 1,10 | 217 | 0,067 | 3,45 | 3,30 | 2,88 | 1,4 | 5,9 | 19,4 |
| 6 | 1 | 165 | 1 | Extrudoil | 1,44 | 3,5 | sim | 144,36 | 1,14 | 219 | 0,806 | 3,45 | 3,28 | 2,87 | 1,4 | 6,6 | 20,0 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | Extrudoil | 1,50 | 3,5 | não | 140,56 | 1,17 | 216 | 0,067 | 3,40 | 3,45 | 2,95 | 2,9 | 1,4 | 17,1 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | Extrudoil | 1,50 | 3,5 | não | 140,26 | 1,18 | 218 | 0,067 | 3,40 | 3,35 | 2,93 | 2,9 | 4,4 | 17,7 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | MZA 20 | 1,50 | 3,5 | não | 137,90 | 1,20 | 217 | 0,067 | 3,43 | 3,38 | 2,97 | 1,9 | 3,4 | 16,5 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | MZA 20 | 1,50 | 3,5 | sim | 163,53 | 1,07 | 214 | 0,806 | 3,48 | 3,57 | 3,08 | 0,5 | -1,9 | 12,7 |
| 6 | 0 | 175 | 1 | MZA 20 | 1,50 | 3,5 | sim | 153,67 | 1,14 | 223 | 0,806 | 3,43 | 3,03 | 2,95 | 1,9 | 14,3 | 17,1 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | Extrudoil | 1,50 | 3,5 | sim | 152,97 | 1,14 | 215 | 0,067 | 3,53 | 3,37 | 3,00 | -0,9 | 3,9 | 15,4 |
| 6 | 0 | 175 | 1 | MZA 20 | 1,53 | 3,5 | sim | 155,77 | 1,12 | 223 | 0,806 | 3,50 | 3,27 | 3,02 | 0,0 | 6,9 | 14,9 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | MZA 20 | 1,56 | 3,5 | sim | 158,44 | 1,10 | 216 | 0,067 | 3,43 | 3,18 | 2,98 | 1,9 | 9,5 | 16,0 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | Renoform 74 | 1,60 | 3,5 | sim | 162,67 | 1,08 | 216 | 0,806 | 3,43 | 3,08 | 2,87 | 1,9 | 12,7 | 20,0 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | Extrudoil | 1,60 | 3,5 | sim | 162,92 | 1,07 | 211 | 0,806 | 3,42 | 2,80 | 2,85 | 2,4 | 22,3 | 20,5 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | Plantforme 64 | 1,65 | 3,5 | sim | 163,14 | 1,07 | 215 | 0,806 | 3,52 | 3,05 | 2,93 | -0,5 | 13,8 | 17,7 |

Tabela 28 – Resultados do experimento da segunda fase para avaliação do desempenho dos lubrificantes para os corpos de prova com diâmetro externo (De) de 165 mm e 175 mm.

| R | BH | De | Lubrificação | Lubrificante | Massa Lubr | E0 | Frat | DeEB | Beta | Fmax | Rmax | Efund | Eraiofl | Eraifun | dfundo | draio_flg | draio_fnd |
|------|----|------|--------------|-------------------|------------|------|------|--------|------|------|-------|-------|---------|---------|--------|-----------|-----------|
| [mm] | | [mm] | | | [gr] | [mm] | | [mm] | | [kN] | mm | [mm] | [mm] | [mm] | [%] | [%] | [%] |
| 6 | 0 | 165 | 1 | Extrudoil | 1,70 | 3,5 | não | 137,92 | 1,20 | 227 | 0,806 | 3,45 | 3,45 | 3,08 | 1,4 | 1,4 | 12,7 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | MZA 20 | 1,70 | 3,5 | não | 140,27 | 1,18 | 222 | 0,067 | 3,47 | 3,42 | 2,98 | 1,0 | 2,4 | 16,0 |
| 6 | 0 | 175 | 1 | Renoform Press 10 | 1,70 | 3,5 | sim | 157,31 | 1,11 | 222 | 0,806 | 3,50 | 3,52 | 3,02 | 0,0 | -0,5 | 14,9 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | MZA 20 | 1,70 | 3,5 | não | 152,53 | 1,15 | 228 | 0,067 | 3,53 | 3,32 | 3,00 | -0,9 | 5,4 | 15,4 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | MZA 20 | 1,74 | 3,5 | sim | 158,36 | 1,11 | 216 | 0,067 | 3,43 | 3,20 | 3,00 | 1,9 | 9,0 | 15,4 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | Renoform Press 10 | 1,78 | 3,5 | sim | 163,33 | 1,07 | 215 | 0,806 | 3,47 | 2,98 | 2,80 | 1,0 | 16,0 | 22,3 |
| 6 | 1 | 165 | 1 | Renoform 74 | 1,80 | 3,5 | sim | 144,86 | 1,14 | 220 | 0,806 | 3,45 | 3,43 | 3,05 | 1,4 | 1,9 | 13,8 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | MZA 20 | 1,80 | 3,5 | não | 140,32 | 1,18 | 219 | 0,067 | 3,52 | 3,55 | 3,10 | -0,5 | -1,4 | 12,1 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | MZA 20 | 1,80 | 3,5 | não | 138,01 | 1,20 | 220 | 0,067 | 3,45 | 3,22 | 2,87 | 1,4 | 8,4 | 20,0 |
| 6 | 1 | 165 | 1 | Plantforme 64 | 1,82 | 3,5 | sim | 144,07 | 1,15 | 220 | 0,806 | 3,45 | 3,27 | 2,85 | 1,4 | 6,9 | 20,5 |
| 6 | 0 | 175 | 1 | Extrudoil | 1,82 | 3,5 | sim | 154,22 | 1,13 | 222 | 0,806 | 3,52 | 3,28 | 2,93 | -0,5 | 6,4 | 17,7 |
| 6 | 1 | 165 | 1 | Plantforme 64 | 1,83 | 3,5 | sim | 144,78 | 1,14 | 218 | 0,806 | 3,47 | 2,90 | 2,92 | 1,0 | 18,8 | 18,2 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | Plantforme 64 | 1,83 | 3,5 | sim | 163,45 | 1,07 | 217 | 0,806 | 3,43 | 3,25 | 2,90 | 1,9 | 7,4 | 18,8 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | Renoform 74 | 1,93 | 3,5 | sim | 162,58 | 1,08 | 217 | 0,806 | 3,47 | 3,08 | 3,00 | 1,0 | 12,7 | 15,4 |
| 6 | 1 | 165 | 1 | Renoform Press 10 | 1,94 | 3,5 | sim | 146,32 | 1,13 | 221 | 0,806 | 3,48 | 3,18 | 2,88 | 0,5 | 9,5 | 19,4 |
| 6 | 0 | 165 | 1 | Extrudoil | 1,94 | 3,5 | não | 137,73 | 1,20 | 227 | 0,806 | 3,50 | 3,57 | 2,98 | 0,0 | -1,9 | 16,0 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | Renoform Press 10 | 2,00 | 3,5 | não | 138,62 | 1,19 | 222 | 0,067 | 3,42 | 3,48 | 2,98 | 2,4 | 0,5 | 16,0 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | Plantforme 64 | 2,00 | 3,5 | não | 153,21 | 1,14 | 226 | 0,067 | 3,55 | 3,55 | 3,07 | -1,4 | -1,4 | 13,2 |
| 6 | 1 | 175 | 1 | Renoform Press 10 | 2,10 | 3,5 | sim | 162,70 | 1,08 | 216 | 0,806 | 3,45 | 3,23 | 3,03 | 1,4 | 7,9 | 14,3 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | Extrudoil | 2,10 | 3,5 | sim | 158,42 | 1,10 | 216 | 0,067 | 3,47 | 2,95 | 2,79 | 1,0 | 17,1 | 22,8 |
| 6 | 0 | 175 | 1 | Renoform 74 | 2,13 | 3,5 | sim | 155,35 | 1,13 | 227 | 0,806 | 3,52 | 3,50 | 2,93 | -0,5 | 0,0 | 17,7 |
| 6 | 0 | 165 | 1 | Renoform Press 10 | 2,20 | 3,5 | não | 139,80 | 1,18 | 233 | 0,806 | 3,50 | 3,60 | 3,10 | 0,0 | -2,8 | 12,1 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | Renoform 74 | 2,20 | 3,5 | não | 138,09 | 1,19 | 224 | 0,067 | 3,52 | 3,58 | 3,07 | -0,5 | -2,4 | 13,2 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | Renoform Press 10 | 2,20 | 3,5 | não | 138,66 | 1,19 | 223 | 0,067 | 3,50 | 3,57 | 3,02 | 0,0 | -1,9 | 14,9 |
| 6 | 0 | 165 | 1 | Renoform 74 | 2,24 | 3,5 | não | 138,04 | 1,20 | 227 | 0,806 | 3,50 | 3,53 | 3,02 | 0,0 | -0,9 | 14,9 |
| 6 | 0 | 165 | 1 | Renoform Press 10 | 2,25 | 3,5 | não | 140,27 | 1,18 | 233 | 0,806 | 3,52 | 3,28 | 2,93 | -0,5 | 6,4 | 17,7 |

Tabela 29 – Resultados do experimento da segunda fase para avaliação do desempenho dos lubrificantes para os corpos de prova com diâmetro externo (De) de 165 mm e 175 mm.

| R | BH | De | Lubrificação | Lubrificante | Massa Lubr | E0 | Frat | DeEB | Beta | Fmax | Rmax | Efund | Eraiofl | Erauífun | dfundo | draio_flg | draio_fnd |
|------|----|------|--------------|-------------------|------------|------|------|--------|------|------|-------|-------|---------|----------|--------|-----------|-----------|
| [mm] | | [mm] | | | [gr] | [mm] | | [mm] | | [kN] | mm | [mm] | [mm] | [mm] | [%] | [%] | [%] |
| 6 | 0 | 175 | 1 | Extrudoil | 2,25 | 3,5 | sim | 156,91 | 1,12 | 226 | 0,806 | 3,48 | 3,48 | 2,95 | 0,5 | 0,5 | 17,1 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | Plantforme 64 | 2,26 | 3,5 | não | 140,57 | 1,17 | 222 | 0,067 | 3,45 | 3,37 | 2,93 | 1,4 | 3,9 | 17,7 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | Extrudoil | 2,32 | 3,5 | sim | 158,81 | 1,10 | 219 | 0,067 | 3,42 | 3,22 | 2,93 | 2,4 | 8,4 | 17,7 |
| 6 | 1 | 165 | 1 | Renoform 74 | 2,35 | 3,5 | sim | 145,08 | 1,14 | 219 | 0,806 | 3,45 | 3,23 | 2,92 | 1,4 | 7,9 | 18,2 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | Plantforme 64 | 2,40 | 3,5 | sim | 158,36 | 1,11 | 215 | 0,067 | 3,48 | 3,23 | 3,15 | 0,5 | 7,9 | 10,5 |
| 6 | 0 | 175 | 1 | Plantforme 64 | 2,47 | 3,5 | sim | 155,14 | 1,13 | 226 | 0,806 | 3,52 | 3,35 | 2,92 | -0,5 | 4,4 | 18,2 |
| 6 | 0 | 175 | 1 | Plantforme 64 | 2,48 | 3,5 | sim | 154,42 | 1,13 | 225 | 0,806 | 3,55 | 3,33 | 2,97 | -1,4 | 4,9 | 16,5 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | Renoform Press 10 | 2,50 | 3,5 | sim | 159,55 | 1,10 | 218 | 0,067 | 3,42 | 3,13 | 3,00 | 2,4 | 11,1 | 15,4 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | MZA 20 | 2,50 | 3,5 | não | 151,87 | 1,15 | 228 | 0,067 | 3,47 | 3,40 | 2,98 | 1,0 | 2,9 | 16,0 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | Plantforme 64 | 2,56 | 3,5 | não | 140,25 | 1,18 | 219 | 0,067 | 3,42 | 3,42 | 3,00 | 2,4 | 2,4 | 15,4 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | Plantforme 64 | 2,60 | 3,5 | não | 138,46 | 1,19 | 227 | 0,067 | 3,50 | 3,60 | 3,10 | 0,0 | -2,8 | 12,1 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | Renoform 74 | 2,60 | 3,5 | não | 137,92 | 1,20 | 224 | 0,067 | 3,47 | 3,58 | 3,12 | 1,0 | -2,4 | 11,6 |
| 6 | 0 | 165 | 1 | Renoform 74 | 2,65 | 3,5 | não | 138,08 | 1,19 | 230 | 0,806 | 3,50 | 3,52 | 2,98 | 0,0 | -0,5 | 16,0 |
| 8 | 0 | 165 | 1 | Plantforme 64 | 2,70 | 3,5 | não | 138,22 | 1,19 | 228 | 0,067 | 3,50 | 3,60 | 3,07 | 0,0 | -2,8 | 13,2 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | Plantforme 64 | 2,74 | 3,5 | sim | 158,59 | 1,10 | 218 | 0,067 | 3,47 | 3,33 | 2,98 | 1,0 | 4,9 | 16,0 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | Renoform Press 10 | 2,75 | 3,5 | sim | 153,98 | 1,14 | 221 | 0,067 | 3,45 | 3,40 | 3,00 | 1,4 | 2,9 | 15,4 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | Renoform 74 | 2,80 | 3,5 | não | 153,48 | 1,14 | 223 | 0,067 | 3,40 | 3,37 | 3,00 | 2,9 | 3,9 | 15,4 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | Renoform 74 | 2,90 | 3,5 | não | 151,65 | 1,15 | 226 | 0,067 | 3,42 | 3,38 | 3,00 | 2,4 | 3,4 | 15,4 |
| 6 | 0 | 165 | 1 | Plantforme 64 | 2,96 | 3,5 | não | 138,18 | 1,19 | 229 | 0,806 | 3,50 | 3,53 | 2,98 | 0,0 | -0,9 | 16,0 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | Plantforme 64 | 3,00 | 3,5 | sim | 152,40 | 1,15 | 231 | 0,067 | 3,42 | 3,30 | 3,02 | 2,4 | 5,9 | 14,9 |
| 6 | 0 | 175 | 1 | Renoform 74 | 3,30 | 3,5 | sim | 153,83 | 1,14 | 220 | 0,806 | 3,53 | 3,43 | 3,00 | -0,9 | 1,9 | 15,4 |
| 6 | 0 | 165 | 1 | Plantforme 64 | 3,57 | 3,5 | não | 138,20 | 1,19 | 227 | 0,806 | 3,50 | 3,53 | 3,02 | 0,0 | -0,9 | 14,9 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | Renoform 74 | 3,70 | 3,5 | não | 140,34 | 1,18 | 220 | 0,067 | 3,42 | 3,47 | 3,03 | 2,4 | 1,0 | 14,3 |
| 6 | 0 | 175 | 1 | Renoform Press 10 | 3,90 | 3,5 | sim | 154,31 | 1,13 | 224 | 0,806 | 3,43 | 3,35 | 2,97 | 1,9 | 4,4 | 16,5 |
| 8 | 0 | 175 | 1 | Renoform Press 10 | 3,90 | 3,5 | sim | 153,10 | 1,14 | 216 | 0,067 | 3,55 | 3,23 | 3,00 | -1,4 | 7,9 | 15,4 |
| 8 | 1 | 165 | 1 | Renoform 74 | 5,10 | 3,5 | não | 140,67 | 1,17 | 225 | 0,067 | 3,40 | 3,38 | 2,98 | 2,9 | 3,4 | 16,0 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | Renoform 74 | 5,19 | 3,5 | sim | 158,44 | 1,10 | 216 | 0,067 | 3,45 | 3,17 | 2,97 | 1,4 | 10,0 | 16,5 |
| 8 | 1 | 175 | 1 | Renoform 74 | 5,36 | 3,5 | sim | 158,98 | 1,10 | 215 | 0,067 | 3,45 | 3,22 | 2,97 | 1,4 | 8,4 | 16,5 |

4.4.2.1 - Análise do comportamento das fraturas

O método de modelagem logística da fase anterior também foi aplicado nessa fase para correlacionar e identificar a função probabilística para resposta sobre os eventos de fratura e não fratura em função do raio da ferramenta (R), do diâmetro externo dos blanques (De), da atuação do prensa chapa (BH) e, principalmente, dos efeitos dos lubrificantes selecionados.

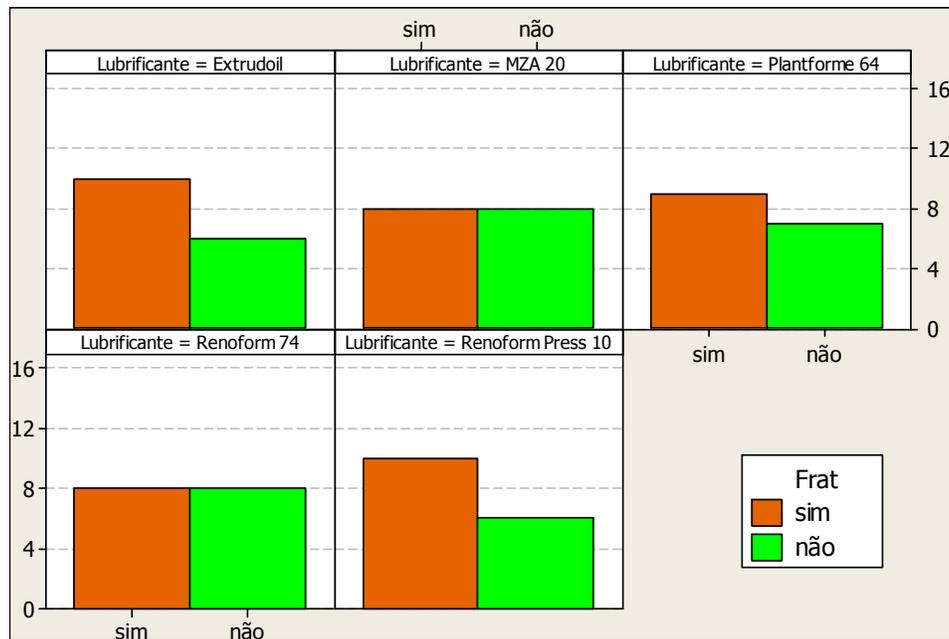


Figura 65 – Quantidade de corpos de prova com e sem fratura em função dos lubrificantes.

No caso aqui investigado a lubrificação não influencia de forma significativa o comportamento de fraturas e não fraturas (Figura 65). Foram evidenciadas pelo modelo logístico (Tabela 30) a influência direta do prensa chapa (Figura 66) e a interação do raio da ferramenta (Figura 67) com o diâmetro externo do blanque sobre tais resultados (Figuras 68).

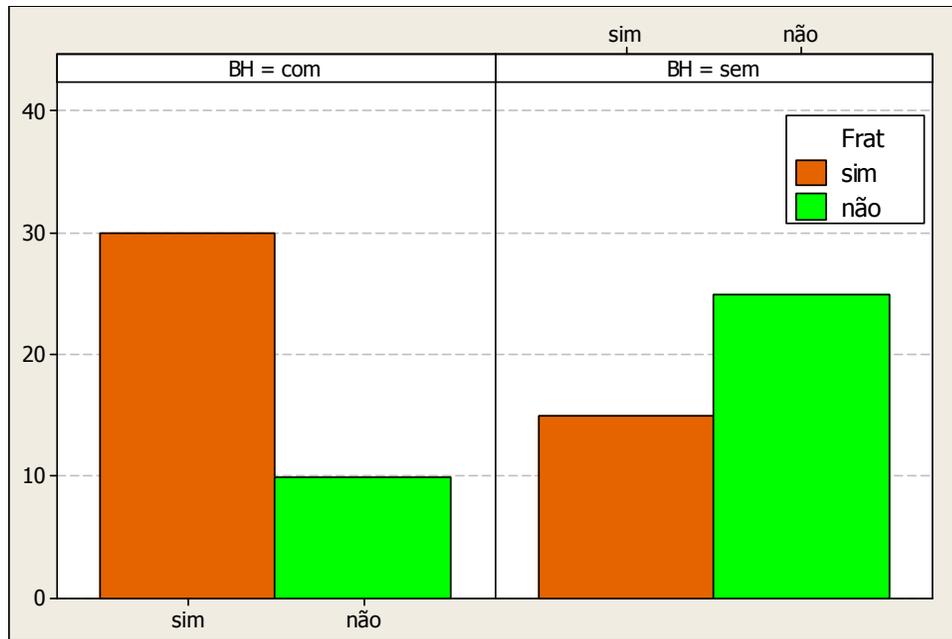


Figura 66 – Quantidade de corpos de prova com e sem fratura em função da atuação do prensa chapa.

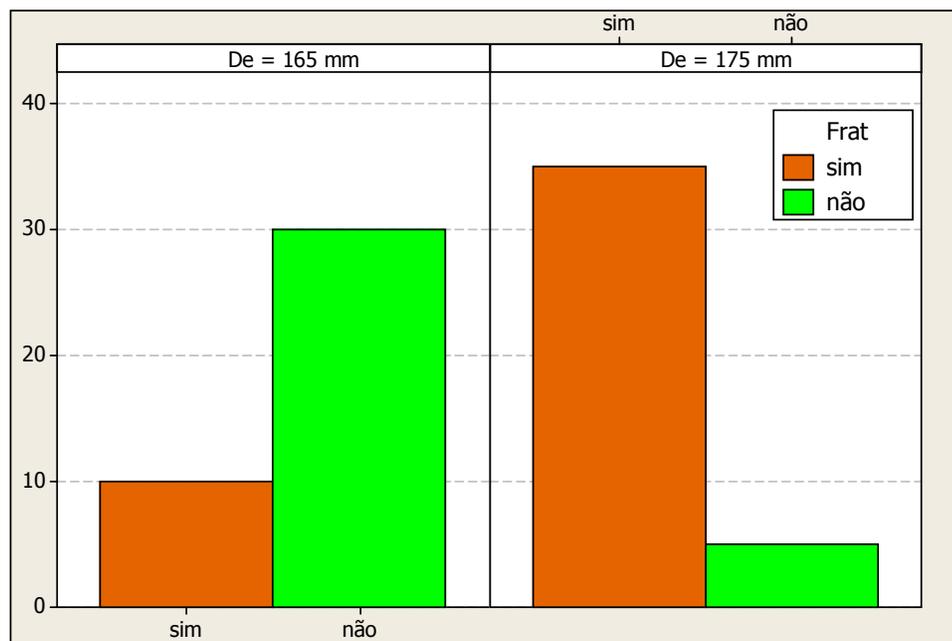


Figura 67 – Quantidade de corpos de prova com e sem fratura em função do diâmetro externo do blanque.

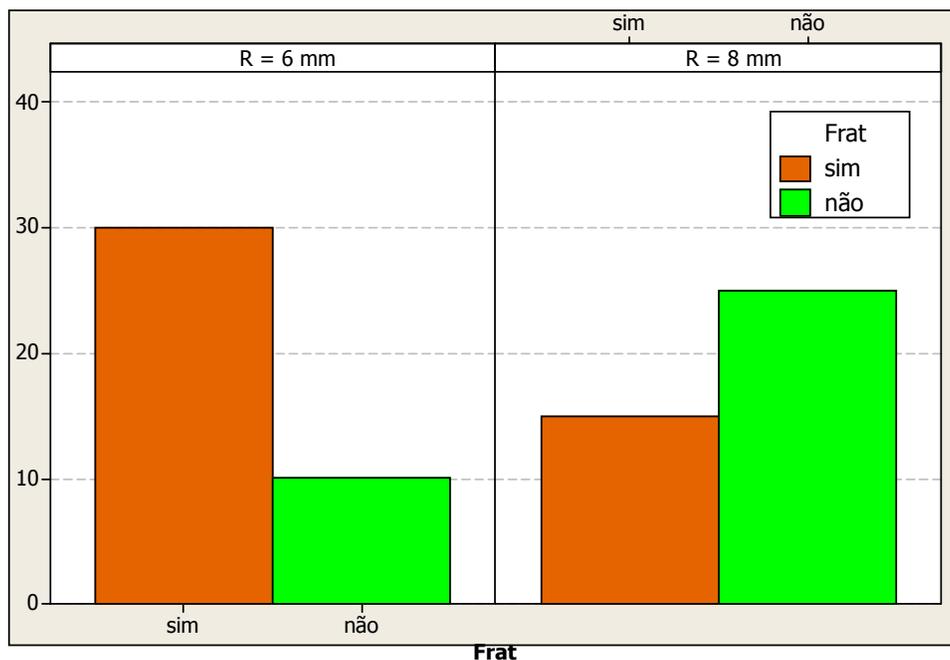


Figura 68 – Quantidade de corpos de prova com e sem fratura em função do raio da ferramenta.

Como o objetivo dessa fase no estudo em questão é avaliar os efeitos da lubrificação, não se optou em elaborar o modelo para essa situação de efeito do prensa chapa e interação entre o raio da ferramenta e diâmetro externo do blanque sobre as fratura, visto que um modelo de maior abrangência já foi citado nos resultados da fase anterior, sem lubrificação.

Tabela 30 – Coeficientes obtidos por regressão logística para análise da probabilidade de fratura.

| Previsão | Coeficiente | P-Valor (Coeficiente) | P-Valor (Pearson) | P-Valor (Desvio Residual) | P-Valor (Hosmer Lemeshow) |
|-----------|-------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| Constante | 6,58933 | 0 | 0,208 | 0,101 | 0,113 |
| R | -1,09822 | 0 | | | |
| BH | 2,19644 | 0 | | | |
| Lubríf | 0,369625 | 0,579 | | | |

Portanto não foi evidenciada a influência da lubrificação nos eventos de fratura e não fratura dos ensaios correspondentes, direcionando o estudo dos lubrificantes sobre as análises dos

resultados dos esforços de embutimento e estricção da espessura da chapa nas regiões 1, 2, 3 e 4 do corpo de prova (Figura 26).

4.4.2.2 - Análise dos esforços de embutimento

A força máxima na primeira fase sem lubrificação, ficou inferior quando comparadas com a força máxima na segunda fase com lubrificantes. Isso pode ter ocorrido devido à preparação da ferramenta e sensores de força efetuados em momentos distintos para ambas as fases, permitindo apenas a comparação dos resultados da força máxima com lubrificantes, na segunda fase conforme a Figura 69.

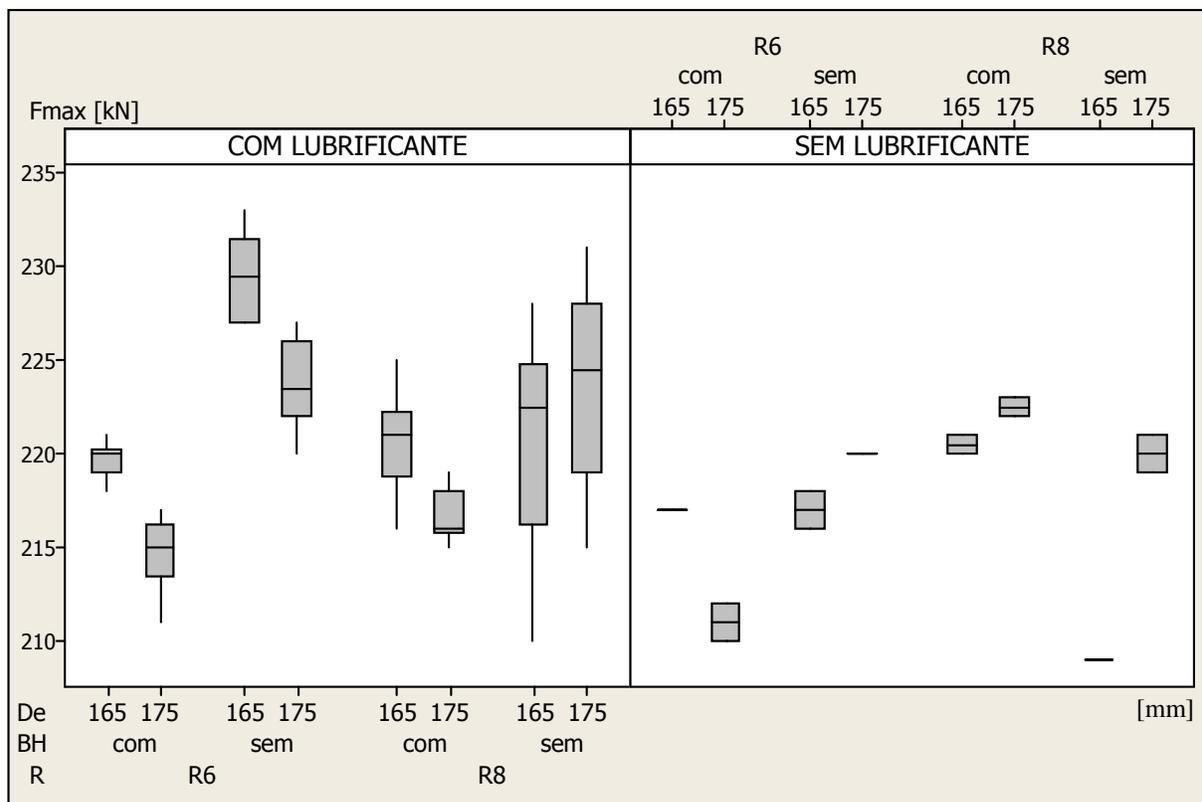


Figura 69 - Resultados de força máxima para as situações com e sem lubrificantes.

Apesar de não identificada à relação entre lubrificação e fraturas, pode-se notar a relação da força máxima de embutimento (F_{max}) com os diferentes de lubrificantes aplicados (Tabela 31), Extrudoil, Renoform Press 10, Renoform 74, Plantforme 64 e MZA 20 (Figura 70).

Tabela 31 – Coeficientes obtidos por ANOVA para análise força máxima de embutimento (Fmax).

| Fator | Níveis | Valores | P-Valor (Anova) para Fmax | Correlação linear CORR |
|-------------|--------|--|---------------------------|------------------------|
| De [mm] | 2 | 165; 175 | 0 | 0,536 |
| BH | 2 | 0 (com atuação); 1(sem atuação) | 0 | |
| Tipo lubrif | 5 | Extrudoil; MZA 20; Plantforme 64; Renoform 74; Renoform Press 10 | 0,023 | |

Sabendo-se da influência do prensa chapa e do raio da ferramenta, além dos tipos de lubrificantes sobre a força máxima de embutimento, torna-se necessário segregar os resultados em função do raio da ferramenta e do prensa chapa, para o estudo isolado dos efeitos dos lubrificantes sobre a força de embutimento (Figura 71).

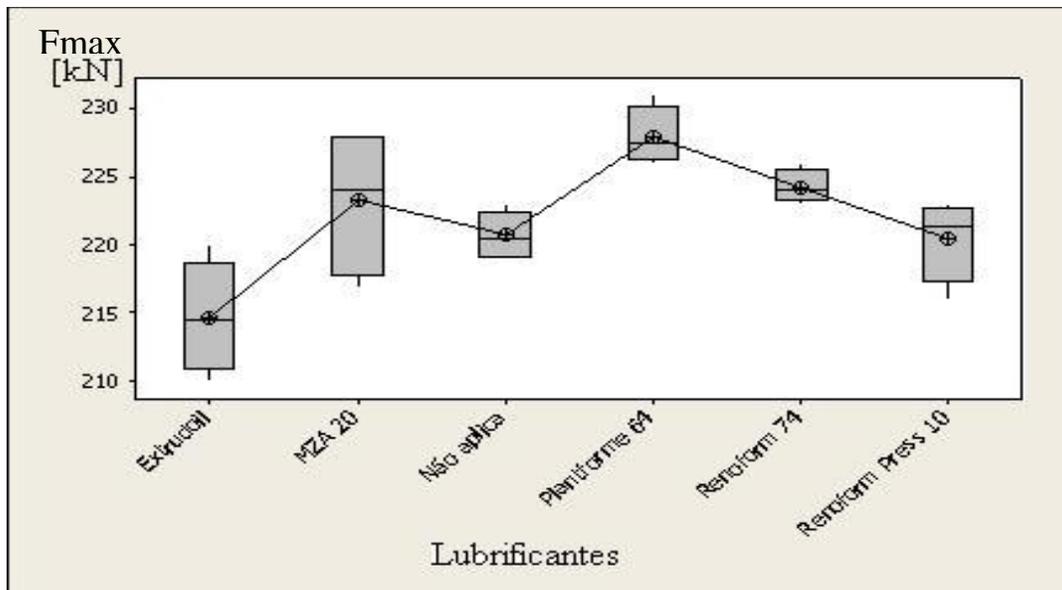
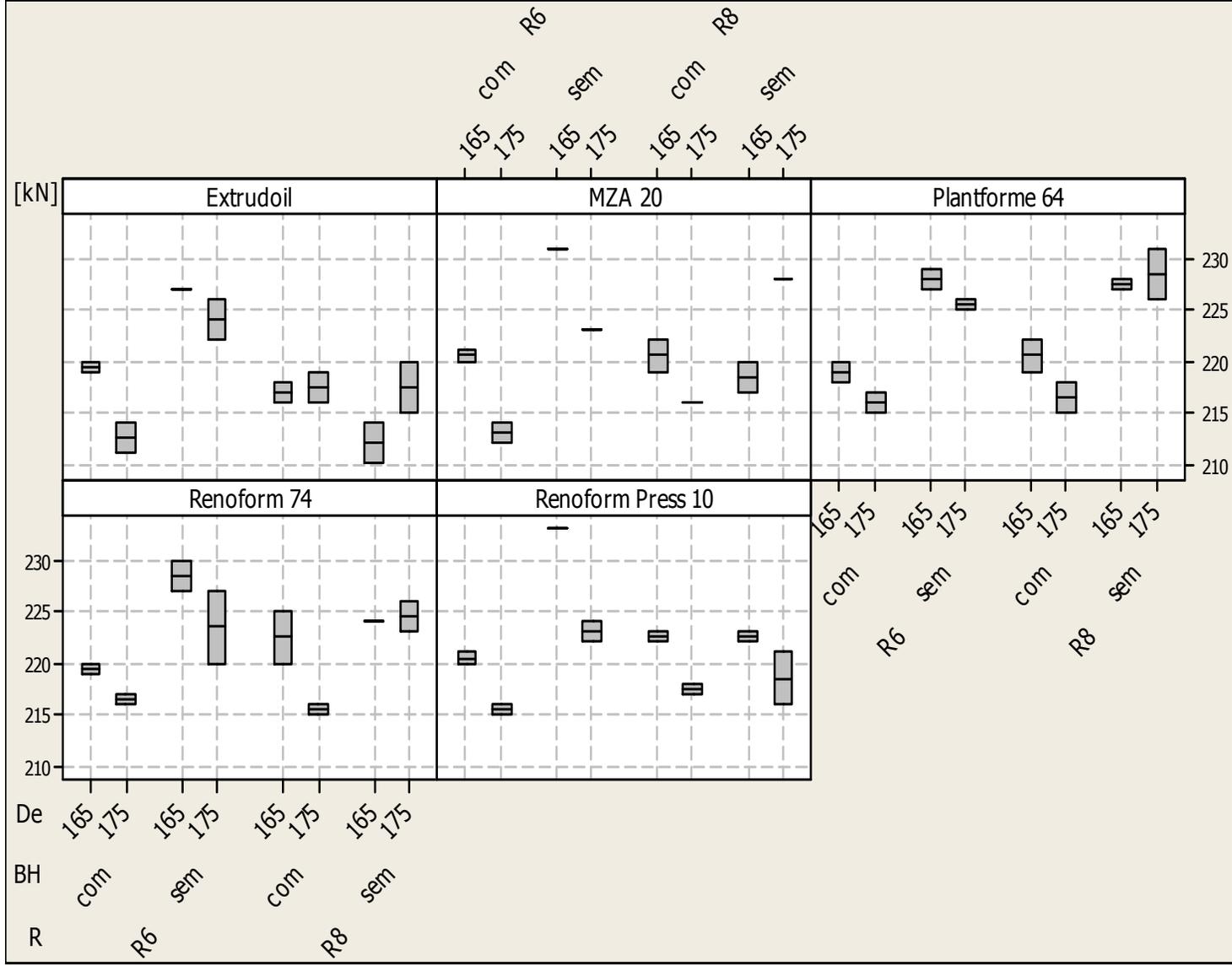


Figura 70 – Relação entre a força de embutimento e os lubrificantes aplicados, raio da ferramenta com 8 mm sem prensa chapa.

Sobre a relação entre a força de embutimento e lubrificantes, quando os resultados dos ensaios foram segregados para raio da ferramenta com 8 mm, sem a atuação do prensa chapa e com diâmetro externo de 165 mm, o Extrudoil resultou em menor força máxima de embutimento se comparado com os demais lubrificantes, como mostrado na Figura 70, confirmado pelos resultados da análise de variância da Tabela A1.

Figura 71 - Comportamento da força máxima de embutimento em função dos lubrificantes.



Com a atuação do prensa chapa e mantendo-se o raio da ferramenta com 8 mm não foram evidenciadas diferenças significativas da força máxima de embutimento em função dos lubrificantes (Figura 72).

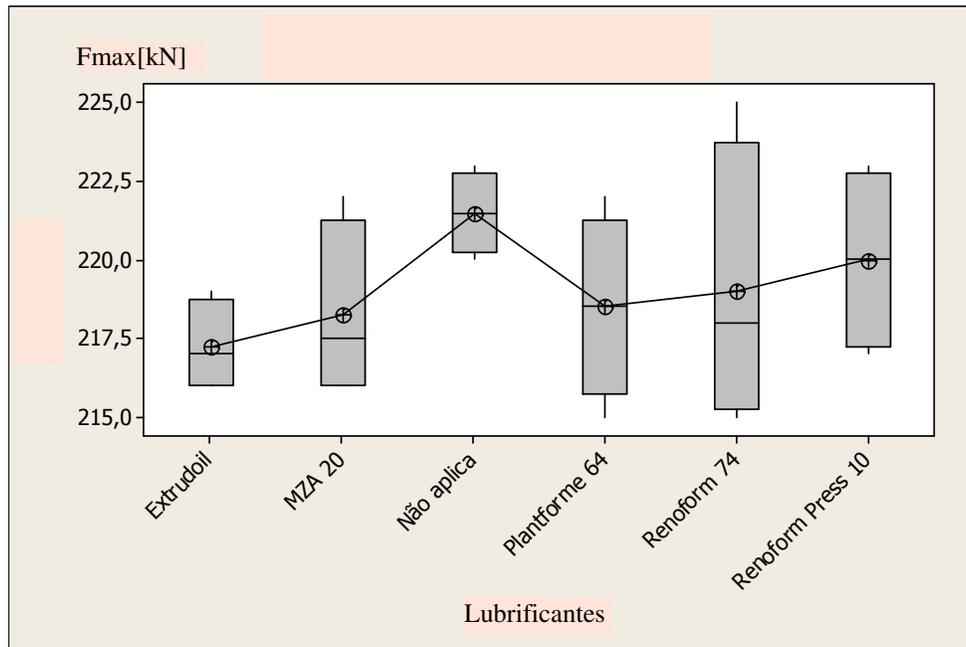


Figura 72 – Relação entre a força de embutimento e os lubrificantes aplicados, raio da ferramenta com 8 mm com prensa chapa.

Na análise dos resultados com raio de 6 mm, com e sem a atuação do prensa chapa não foi evidenciada a influência dos lubrificantes sobre os valores de força máxima de embutimento.

A aplicação do raio menor da ferramenta, associada à diminuição da área de contato entre o branco do corpo de prova durante o escoamento fez o raio da ferramenta de embutimento promover o aumento da tensão nesse ponto de contato, resultando na ineficiência do embutimento por ruptura da película de lubrificante. Os gráficos seguintes mostram o comportamento da força máxima de embutimento em função dos lubrificantes aplicados e da atuação do prensa chapa com o raio de 6 mm (Figura 73).

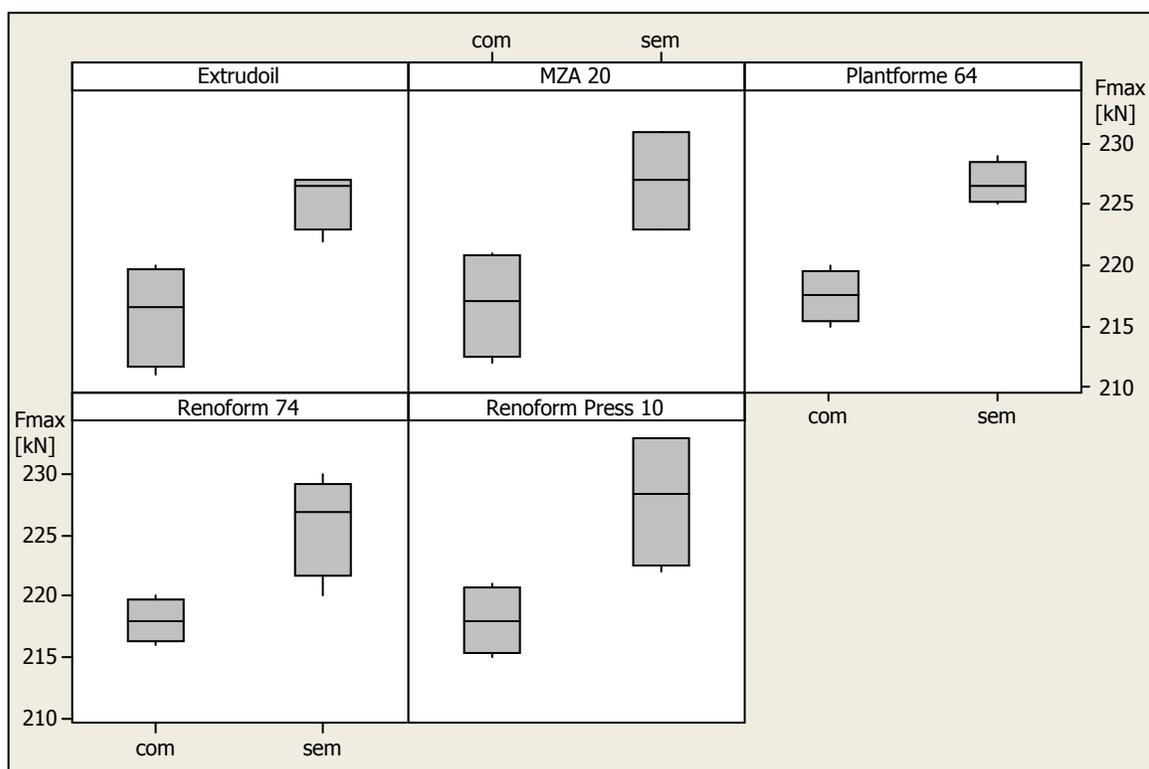


Figura 73 – Relação entre a força de embutimento e os lubrificantes aplicados, atuação do prensa chapa e raio da ferramenta com 6 mm.

4.4.2.3 Análise da qualidade do produto quanto a estricção

Sabendo-se a espessura final e inicial da chapa, foi calculado o índice de deformação da espessura ϵ , e identificada influência da lubrificação nas regiões 2 e 3 do corpo de prova denotados nos modelos de regressão que seguem. Na região 1 não foi identificada correlação da deformação com a lubrificação, mas apenas com o raio da ferramenta e com a atuação do prensa chapa.

Na análise da diminuição da espessura da chapa no raio do fundo no corpo de prova (Erauifun; região 2), foi identificada influência direta do lubrificante na estricção dessa região (draio_fnd) e também sua influência indireta quando combinada com o raio da ferramenta de 8 mm. De certa forma, a lubrificação tende a aumentar a estricção nessa região do corpo de prova conforme denotado pelo modelo a seguir e pelos resultados da Tabela 32, porém com o raio da ferramenta de 6 mm essa estricção não é significativa devido a interação do uso de lubrificante e o raio da ferramenta.

$$\text{draio_fnd} = 42,9 - 4,13 R + 1,32 BH - 23,7 \text{ Lubrif} + 3,60 R * \text{Lubrif}$$

Tabela 32 – Coeficientes obtidos por regressão linear para análise da diminuição da espessura do raio no fundo do corpo de prova (draio_fnd).

| Previsão | Coeficiente | P-Valor (Coeficiente) | Correlação linear CORR. |
|-----------|-------------|-----------------------|-------------------------|
| Constante | 42,892 | 0 | 0,404 |
| R | -4,125 | 0 | |
| BH | 1,3167 | 0,01 | |
| Lubrif | -23,66 | 0 | |
| R*Lubrif | 3,5975 | 0 | |

Já para a análise da deformação da espessura da chapa no fundo do corpo de prova (dfundo), caracterizada pela espessura da chapa no fundo do corpo de prova (Efund; região 3), apesar de não haver ajuste perfeito do modelo (CORR. = 0,31), há tendência do aumento da deformação nessa parte do corpo de prova pela interação entre o prensa chapa e lubrificação simultaneamente (Tabela 33).

$$\text{dfundo} = - 1,30 + 0,219 R + 1,18 BH * \text{Lubrificação}$$

Tabela 33 – Coeficientes obtidos por regressão linear para análise da diminuição da espessura do fundo do corpo de prova (dfundo).

| Previsão | Coeficiente | P-Valor (Coeficiente) | Correlação linear CORR. |
|-----------|-------------|-----------------------|-------------------------|
| Constante | -1,3045 | 0,059 | 0,31 |
| R | 0,21875 | 0,025 | |
| BH*Lubrif | 1,1757 | 0 | |

Portanto a influência dos tipos de lubrificante sobre a estricção da espessura na região do raio no fundo do corpo de prova com raio de 8 mm e sem prensa chapa, o MZA 20 e o Extrudoil mostraram estricção significativa quando comparadas com a situação sem lubrificante, conforme denota a Figura 74 e a Tabela A2.

A estricção significativa nessa região está associada ao raio do punção de embutimento e a lubrificação sobre o blanque, provocando maior escoamento e maior chance de ruptura do fundo do corpo de prova pela diminuição do atrito nessa região, confirmando a citação mencionada no Capítulo 2, por Keeler (2000).

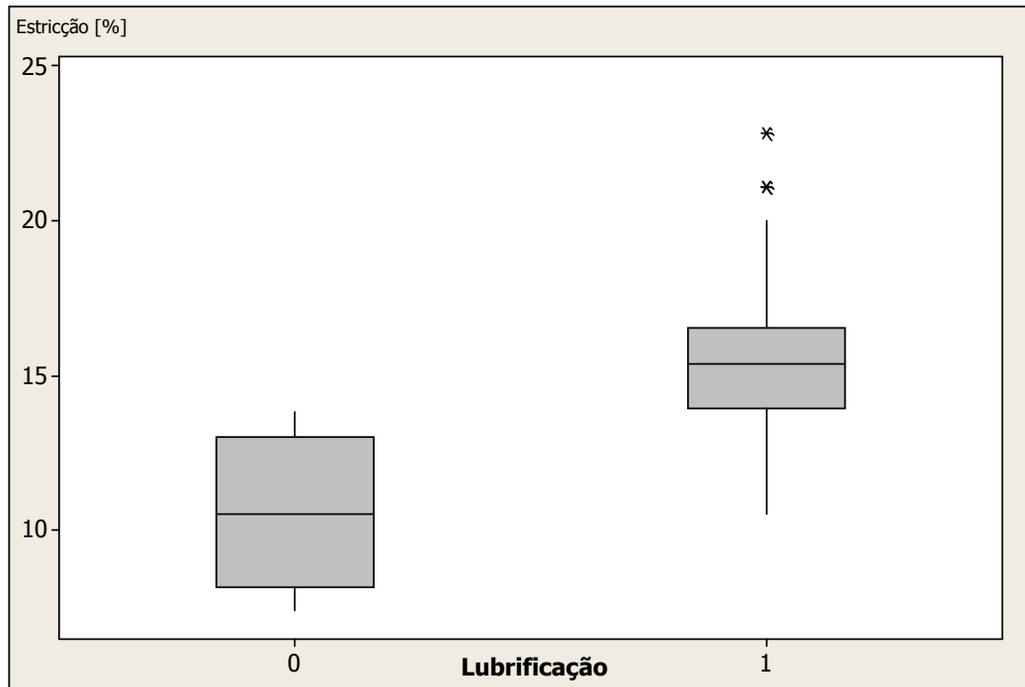


Figura 74 – Estricção da espessura da chapa no raio do fundo do corpo de prova em função da lubrificação com o raio da ferramenta de 8 mm.

Com a atuação do prensa chapa e raio da ferramenta com 8 mm, somente o Extrudoil se destacou se comparado com a situação sem aplicação de lubrificantes, no efeito de estricção da espessura no raio do fundo do corpo de prova (Figura 75 e Tabela A3).

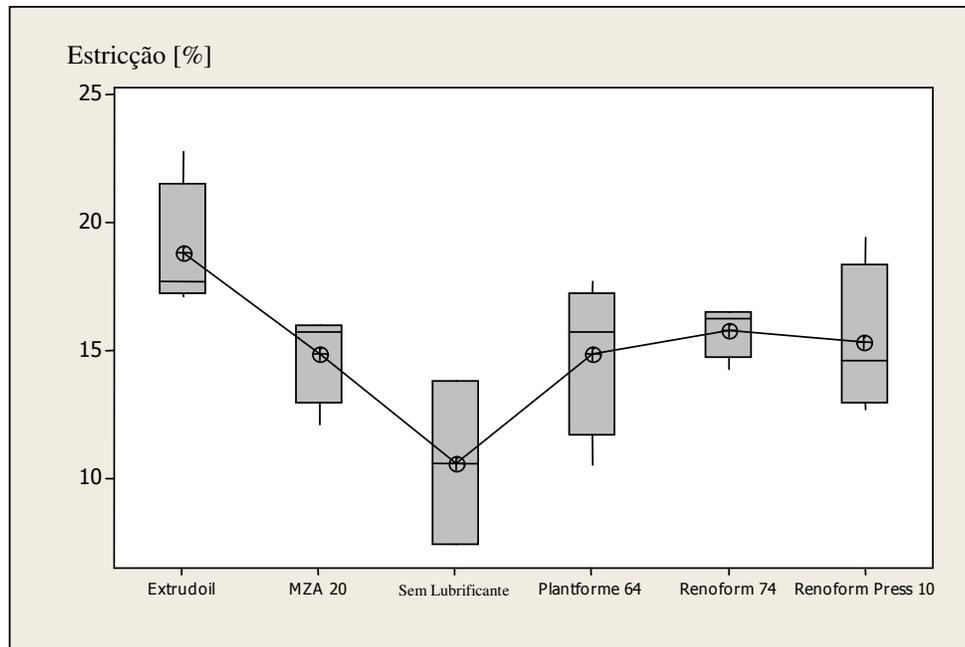


Figura 75 - Estricção da espessura no raio do fundo do corpo de prova em função dos lubrificantes aplicados, com a atuação do prensa chapa com o raio da ferramenta de 8 mm.

Não foi identificada a influência dos tipos de lubrificantes sobre a estricção da espessura do raio no fundo do corpo de prova quando aplicados nos ensaios com raio da ferramenta com 6 mm, com ou sem a atuação do prensa chapa (Figura 76a e 76b).

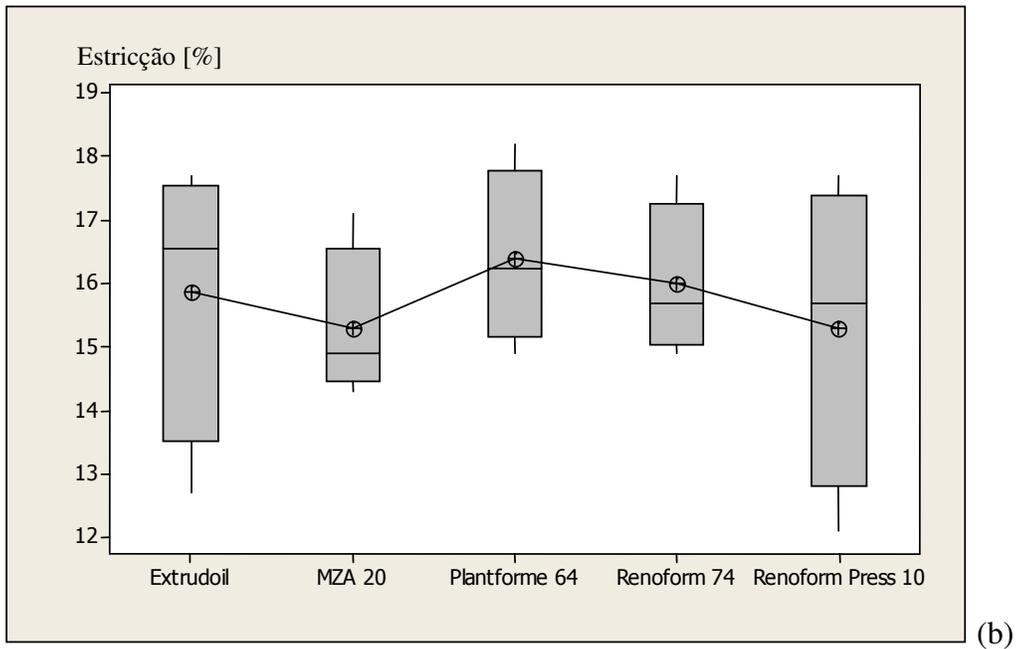
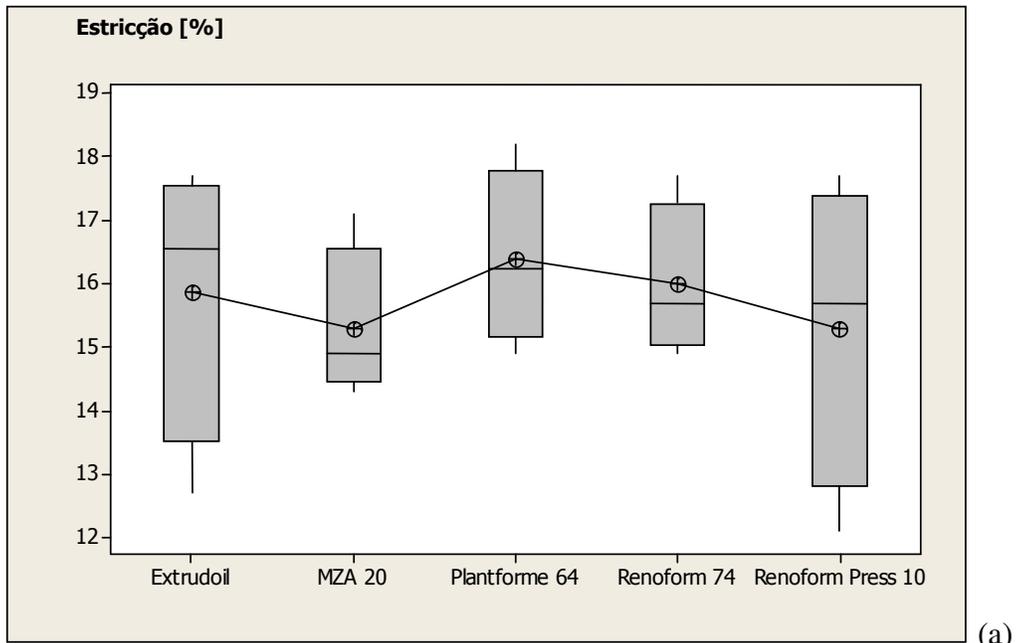


Figura 76 – Estricção da espessura no raio do fundo do corpo de prova na combinação do raio com 6 mm com (a) e sem (b) prensa chapa.

Os resultados da primeira fase sem lubrificantes, correspondentes aos blanques de diâmetro externo 165 mm e 175 mm (diâmetros correspondentes à segunda fase) foram acrescentados aos resultados com lubrificantes.

Na tentativa de correlacionar as variáveis citadas com os eventos fraturados e não fraturados não houve influência da lubrificação sobre os resultados de fratura, porém novamente foi identificada a relação com o raio da ferramenta (R) e a atuação do prensa chapa reforçando a hipótese de sensibilidade do produto em função a geometria da ferramenta.

Capítulo 5 - Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

5.1 Conclusões

Os experimentos mesmo sem lubrificantes mostraram grande sensibilidade do processo em função dos raios da ferramenta e do diâmetro externo dos blanques, que foi evidenciado pelo modelo logístico de probabilidade de fratura. Tais resultados são inversamente proporcionais ao tamanho do raio da ferramenta e diretamente proporcionais ao diâmetro externo do blanque. Isso significa que à medida que se opta por usar um raio maior de embutimento na matriz, menor será a probabilidade do corpo de prova romper. Porém, se aumentarmos o diâmetro externo do blanque, maior será a probabilidade de ruptura do corpo de prova.

Na primeira fase de ensaios, os eventos de ruptura nos corpos de prova ocorreram na região do raio do flange, que sofre influência direta apenas do diâmetro externo dos blanques planejados para essa fase de experimentos.

Quanto à redução da espessura do raio do fundo do corpo de prova e da parede, os resultados são influenciados pelo diâmetro externo do blanque, porém com maior intensidade pelo raio da ferramenta. Quanto maior essa redução, maior será a probabilidade de fratura do corpo de prova.

Quanto aos ensaios com a aplicação de lubrificantes, somente foram evidenciadas alterações nos resultados de força máxima de embutimento nos ensaios planejados com raio da matriz e punção com 8 mm sem a atuação do prensa chapa.

Dessa forma não se recomenda o uso de lubrificantes com o objetivo de evitar a fratura, tomando maior atenção com os raios da ferramenta e com o diâmetro externo do blanque. Nos ensaios executados, a combinação que favoreceu a menor probabilidade de fratura foram as condições de raio maior da ferramenta, 8 mm e o diâmetro externo do blanque com 165 mm, sem a atuação do prensa chapa.

Com a lubrificação, a força de embutimento diminuiu quando comparado com os resultados de ensaios sem a aplicação de lubrificantes (Figuras 70 e 72).

O Extrudoil se destacou em melhor desempenho para força e estricção, com específica condição de raio da ferramenta, diâmetro do blanque e atuação do prensa chapa dentre os demais lubrificantes. Em outras palavras, ele permitiu menor força de embutimento e maior deformação na espessura do raio no fundo dos corpos de prova, apenas válido para o raio da ferramenta de 8 mm, tanto com atuação do prensa chapa quanto sem sua atuação.

Esta condição específica de lubrificação promoveu força e estricção inferiores, quando comparado com a sem lubrificação, como mostram as Figuras 70 e 72.

Além do Extrudoil, o lubrificante MZA 20 também se destacou sobre os demais lubrificantes e sobre os ensaios sem lubrificação, para os resultados de estricção da espessura, com raio da ferramenta de 8 mm sem a atuação do prensa chapa.

Nos resultados de estricção houve alterações identificadas nos ensaios com raio da ferramenta com 8 mm tanto com e sem a atuação do prensa chapa. Porém, nos ensaios planejados com o raio da ferramenta de 6 mm não foram identificadas alterações nos resultados de estricção da espessura, nas diversas regiões dos corpos de prova, comprovando a inatividade da lubrificação também nessa condição.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Recomenda-se que em trabalhos futuros equivalentes, para a avaliação dos efeitos de fratura, dos esforços de embutimento e da estricção da espessura dos corpos de prova, os ensaios sejam

planejados aplicando-se tratamentos de TiN sobre a superfície dos raios da ferramenta de embutimento conjugando-se ou não a aplicação de lubrificantes.

Para aplicação em escala de produção dos lubrificantes destacados nesse trabalho recomendam-se estudos de outras formas de aplicação desses lubrificantes, tanto nas ferramentas quanto em superfícies dos produtos a serem embutidos. Ainda é viável o contato com o fornecedor para processo que exijam tratamentos térmicos posteriores ao uso desses lubrificantes.

Bibliografia

Normas técnicas empregadas

ABNT NBR 11888, 1991

ABNT NBR 5906, 1984

ABNT NBR 6108,

ABNT NBR 11888, 1992

ABNT NBR 11889, 1992

International Standard ISO 11531: 1994(E) Metallic Materials – Earing Test

Referências Citadas

ACESITA, Estampagem dos aços inoxidáveis, 1997.

Bayraktar, Emin; Altintas, Sabri, Some problems in steel sheet forming processes (Journal of Materials Processing Technology, Volume: 80-81, August 1, 1998, pp. 83-89).

BITTENCOURT, H. R.; CLARKE, R. T.. Um classificador baseado na Discriminação Logística: vantagens e desvantagens. In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2001, Foz do Iguaçu, Brasil. Anais do X SBSR, 2001.

BRESCIANI FILHO, E. (Coord.), Conformação Plástica dos Metais, 4ª. Edição, Editora da Unicamp.

Catálogo de informações técnicas FUCHS do Brasil, Janeiro de 2000.

Deng, Zhi; Lovell, M.R., Effects of lubrication and die radius on the friction behavior of Pb-coated sheet steels (Wear, Volume: 244, Issue: 1-2, August 20, 2000, pp. 41-51)

Dieter; George E ; “ Metalurgia Mecânica” ; 2ª Edição 1981.

Fernandes, José Manoel, Estudo da fabricação de latas em folha-de-flandres pelos processos de embutimento profundo e estiramento, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 75 p. Dissertação (Mestrado)

Garcia, J. A. Spim & C. A. Santos - "Ensaio dos Materiais", 1ª. Edição 2000, LTC - Livros Técnicos e Científicos.

Han, S. S. The Influence of Tool Geometry on Friction Behavior in Sheet Metal Forming (Journal of Materials Processing Technology, Volume: 63, Issue: 1-3, January, 1997, pp. 129-133)

Hosmer, D.W. & Lemeshow, S., 1989, Applied Logistic Regression, John Wiley & Sons, Inc.

Keeler, S. P., To Lube or Not to Lube, Magazine Metal Forming, p. 68-69, April 2000.

Penha, Renata Neves; Um Estudo Sobre Regressão Logística Binária; Trabalho de formatura da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Departamento de Produção; 2002.

Prensas Schuler, Curso Básico de Prensas Mecânicas, 1997.

PRESS D.J. & WILSON S. -"Choosing Between Logistic Regression and Discriminant Analysis". Journal of American Statistical Economics, p.3-35, 1986.

SCHEY, J. A., Tribology in metalworking (friction, lubrication and wear), 2. Edition, ASM, M. Park, 1984.

Schey, John A., Speed effects in drawbead simulation (Journal of Materials Processing Technology, Volume: 57, Issue: 1-2, February 1, 1996, pp. 146-154)

Schuler, L. Manual Schuler, Prensas y sus Aplicaciones, 4.ed.Stuttgart, 1968.

Schuler, Metal Forming Handbook, Springer-Verlag Berlin Heidelberg – 1998.

Skarpelos, P.; Morris, J.W. Jr., The effect of surface morphology on friction during, forming of electrogalvanized sheet steel (Wear, Volume: 212, Issue: 2, December 10, 1997, pp. 165-172).

Y.L. Su, S.H. Yao, Z.L. Leu, C.S. Wei, C.T. Wu, Comparison of tribological behavior of three films TiN, TiCN and CrN – grown by physical vapor deposition (Wear, Volume: 213, June 1997, pp. 165-174)

Tekkaya, A. E., State-of-the-art of simulation of sheet metal forming (Journal of Materials Processing Technology, Volume: 103, 2000, pp. 14-22)

Triola, M. F., 1998, Introdução à Estatística, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, Sétima Edição.

Tschätsch, Heinz: Praxiswissen Umformtechnik Vieweg Verlag, Wiesbaden 1997

Yang, Tung-Sheng, Full film lubrication of deep drawing (Tribology International, Volume: 32, Issue: 2, February, 1999, pp. 89-96)

Apêndice

Tabela A1 – Resultados dos cálculos de ANOVA para Fmax versus lubrificantes.

| One-way ANOVA: Fmax versus Tipo lubrif | | | | | |
|--|--------------------------|--------|--------|--------------------------|-------|
| Source | DF | SS | MS | F | P |
| Tipo lubrif | 5 | 395,8 | 79,2 | 7,05 | 0,001 |
| Error | 18 | 202,0 | 11,2 | | |
| Total | 23 | 597,8 | | | |
| S = 3,350 R-Sq = 66,21% R-Sq(adj) = 56,83% | | | | | |
| Individual 95% CIs For Mean Based on | | | | | |
| Pooled StDev | | | | | |
| Level | N | Mean | StDev | -----+-----+-----+-----+ | |
| Extrudoil | 4 | 214,75 | 4,11 | (-----*-----) | |
| MZA 20 | 4 | 223,25 | 5,62 | (-----*-----) | |
| Não aplica | 4 | 220,75 | 1,71 | (-----*-----) | |
| Plantforme 64 | 4 | 228,00 | 2,16 | (-----*-----) | |
| Renoform 74 | 4 | 224,25 | 1,26 | (-----*-----) | |
| Renoform Press 1 | 4 | 220,50 | 3,11 | (-----*-----) | |
| -----+-----+-----+-----+ | | | | | |
| 216,0 222,0 228,0 234,0 | | | | | |
| Pooled StDev = 3,35 | | | | | |
| Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals | | | | | |
| All Pairwise Comparisons among Levels of Tipo lubrif | | | | | |
| Individual confidence level = 99,48% | | | | | |
| Tipo lubrif = Extrudoil subtracted from: | | | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper | | |
| MZA 20 | 0,979 | 8,500 | 16,021 | | |
| Não aplica | -1,521 | 6,000 | 13,521 | | |
| Plantforme 64 | 5,729 | 13,250 | 20,771 | | |
| Renoform 74 | 1,979 | 9,500 | 17,021 | | |
| Renoform Press 1 | -1,771 | 5,750 | 13,271 | | |
| Tipo lubrif | -----+-----+-----+-----+ | | | | |
| MZA 20 | (-----*-----) | | | | |
| Não aplica | (-----*-----) | | | | |
| Plantforme 64 | (-----*-----) | | | | |

| | | | |
|--|---------|--------|-------------------------------|
| Renoform 74 | | | (-----*-----) |
| Renoform Press 1 | | | (-----*-----) |
| | | | -----+-----+-----+-----+----- |
| | -10 | 0 | 10 20 |
| Tipo lubrif = MZA 20 subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Não aplica | -10,021 | -2,500 | 5,021 |
| Plantforme 64 | -2,771 | 4,750 | 12,271 |
| Renoform 74 | -6,521 | 1,000 | 8,521 |
| Renoform Press 1 | -10,271 | -2,750 | 4,771 |
| Tipo lubrif | | | -----+-----+-----+-----+----- |
| Não aplica | | | (-----*-----) |
| Plantforme 64 | | | (-----*-----) |
| Renoform 74 | | | (-----*-----) |
| Renoform Press 1 | | | (-----*-----) |
| | | | -----+-----+-----+-----+----- |
| | -10 | 0 | 10 20 |
| Tipo lubrif = Não aplica subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Plantforme 64 | -0,271 | 7,250 | 14,771 |
| Renoform 74 | -4,021 | 3,500 | 11,021 |
| Renoform Press 1 | -7,771 | -0,250 | 7,271 |
| Tipo lubrif | | | -----+-----+-----+-----+----- |
| Plantforme 64 | | | (-----*-----) |
| Renoform 74 | | | (-----*-----) |
| Renoform Press 1 | | | (-----*-----) |
| | | | -----+-----+-----+-----+----- |
| | -10 | 0 | 10 20 |
| Tipo lubrif = Plantforme 64 subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Renoform 74 | -11,271 | -3,750 | 3,771 |
| Renoform Press 1 | -15,021 | -7,500 | 0,021 |
| Tipo lubrif | | | -----+-----+-----+-----+----- |
| Renoform 74 | | | (-----*-----) |
| Renoform Press 1 | | | (-----*-----) |
| | | | -----+-----+-----+-----+----- |
| | -10 | 0 | 10 20 |
| Tipo lubrif = Renoform 74 subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Renoform Press 1 | -11,271 | -3,750 | 3,771 |
| Tipo lubrif | | | -----+-----+-----+-----+----- |
| Renoform Press 1 | | | (-----*-----) |
| | | | -----+-----+-----+-----+----- |
| | -10 | 0 | 10 20 |

Tabela A2 – Resultados dos cálculos de ANOVA para estrição do raio do fundo do corpo de prova com raio de 8 mm, sem atuação do prensa chapa versus lubrificantes.

| | | | | | |
|--|--------------------------|--------|--------|-----------------------------|-------|
| Results for: Worksheet 1 (R = 8; BH = 0) | | | | | |
| One-way ANOVA: d raio_fnd versus Tipo lubrif | | | | | |
| Source | DF | SS | MS | F | P |
| Tipo lubrif | 5 | 129,88 | 25,98 | 5,04 | 0,005 |
| Error | 18 | 92,69 | 5,15 | | |
| Total | 23 | 222,57 | | | |
| S = 2,269 R-Sq = 58,36% R-Sq(adj) = 46,79% | | | | | |
| Individual 95% CIs For Mean Based on | | | | | |
| Pooled StDev | | | | | |
| Level | N | Mean | StDev | ---+-----+-----+-----+----- | |
| Extrudoil | 4 | 17,300 | 4,654 | (-----*-----) | |
| MZA 20 | 4 | 16,975 | 2,066 | (-----*-----) | |
| Não aplica | 4 | 10,500 | 0,000 | (-----*-----) | |
| Plantforme 64 | 4 | 13,350 | 1,156 | (-----*-----) | |
| Renoform 74 | 4 | 13,900 | 1,851 | (-----*-----) | |
| Renoform Press 1 | 4 | 15,425 | 0,450 | (-----*-----) | |
| -----+-----+-----+----- | | | | | |
| 9,0 12,0 15,0 18,0 | | | | | |
| Pooled StDev = 2,269 | | | | | |
| Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals | | | | | |
| All Pairwise Comparisons among Levels of Tipo lubrif | | | | | |
| Individual confidence level = 99,48% | | | | | |
| Tipo lubrif = Extrudoil subtracted from: | | | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper | | |
| MZA 20 | -5,419 | -0,325 | 4,769 | | |
| Não aplica | -11,894 | -6,800 | -1,706 | | |
| Plantforme 64 | -9,044 | -3,950 | 1,144 | | |
| Renoform 74 | -8,494 | -3,400 | 1,694 | | |
| Renoform Press 1 | -6,969 | -1,875 | 3,219 | | |
| Tipo lubrif | +-----+-----+-----+----- | | | | |
| MZA 20 | (-----*-----) | | | | |
| Não aplica | (-----*-----) | | | | |
| Plantforme 64 | (-----*-----) | | | | |
| Renoform 74 | (-----*-----) | | | | |
| Renoform Press 1 | (-----*-----) | | | | |
| +-----+-----+-----+----- | | | | | |
| -12,0 -6,0 0,0 6,0 | | | | | |

| | | | |
|--|--------------------------|--------|---------|
| Tipo lubrif = MZA 20 subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Não aplica | -11,569 | -6,475 | -1,381 |
| Plantforme 64 | -8,719 | -3,625 | 1,469 |
| Renoform 74 | -8,169 | -3,075 | 2,019 |
| Renoform Press 1 | -6,644 | -1,550 | 3,544 |
| Tipo lubrif | +-----+-----+-----+----- | | |
| Não aplica | (-----*-----) | | |
| Plantforme 64 | (-----*-----) | | |
| Renoform 74 | (-----*-----) | | |
| Renoform Press 1 | (-----*-----) | | |
| | +-----+-----+-----+----- | | |
| | -12,0 | -6,0 | 0,0 6,0 |
| Tipo lubrif = Não aplica subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Plantforme 64 | -2,244 | 2,850 | 7,944 |
| Renoform 74 | -1,694 | 3,400 | 8,494 |
| Renoform Press 1 | -0,169 | 4,925 | 10,019 |
| Tipo lubrif | +-----+-----+-----+----- | | |
| Plantforme 64 | (-----*-----) | | |
| Renoform 74 | (-----*-----) | | |
| Renoform Press 1 | (-----*-----) | | |
| | +-----+-----+-----+----- | | |
| | -12,0 | -6,0 | 0,0 6,0 |
| Tipo lubrif = Plantforme 64 subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Renoform 74 | -4,544 | 0,550 | 5,644 |
| Renoform Press 1 | -3,019 | 2,075 | 7,169 |
| Tipo lubrif | +-----+-----+-----+----- | | |
| Renoform 74 | (-----*-----) | | |
| Renoform Press 1 | (-----*-----) | | |
| | +-----+-----+-----+----- | | |
| | -12,0 | -6,0 | 0,0 6,0 |
| Tipo lubrif = Renoform 74 subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Renoform Press 1 | -3,569 | 1,525 | 6,619 |
| Tipo lubrif | +-----+-----+-----+----- | | |
| Renoform Press 1 | (-----*-----) | | |
| | +-----+-----+-----+----- | | |
| | -12,0 | -6,0 | 0,0 6,0 |

Tabela A3 – Resultados dos cálculos de ANOVA para estrição do raio do fundo do corpo de prova com raio de 8 mm, com atuação do prensa chapa versus lubrificantes.

| | | | | | |
|--|----|---------------------------|--------|--------------------------|-------|
| Results for: Worksheet 1(R = 8; BH = 1) | | | | | |
| One-way ANOVA: d raio_fnd versus Tipo lubrif | | | | | |
| Source | DF | SS | MS | F | P |
| Tipo lubrif | 5 | 139,13 | 27,83 | 3,84 | 0,015 |
| Error | 18 | 130,53 | 7,25 | | |
| Total | 23 | 269,66 | | | |
| S = 2,693 R-Sq = 51,59% R-Sq(adj) = 38,15% | | | | | |
| Individual 95% CIs For Mean Based on | | | | | |
| Pooled StDev | | | | | |
| Level | N | Mean | StDev | -----+-----+-----+-----+ | |
| Extrudoil | 4 | 18,825 | 2,665 | (-----*-----) | |
| MZA 20 | 4 | 14,875 | 1,871 | (-----*-----) | |
| Não aplica | 4 | 10,600 | 3,695 | (-----*-----) | |
| Plantforme 64 | 4 | 14,900 | 3,091 | (-----*-----) | |
| Renoform 74 | 4 | 15,825 | 1,044 | (-----*-----) | |
| Renoform Press 1 | 4 | 15,325 | 2,934 | (-----*-----) | |
| -----+-----+-----+-----+ | | | | | |
| 10,5 14,0 17,5 21,0 | | | | | |
| Pooled StDev = 2,693 | | | | | |
| Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals | | | | | |
| All Pairwise Comparisons among Levels of Tipo lubrif | | | | | |
| Individual confidence level = 99,48% | | | | | |
| Tipo lubrif = Extrudoil subtracted from: | | | | | |
| Tipo lubrif | | Lower | Center | Upper | |
| MZA 20 | | -9,996 | -3,950 | 2,096 | |
| Não aplica | | -14,271 | -8,225 | -2,179 | |
| Plantforme 64 | | -9,971 | -3,925 | 2,121 | |
| Renoform 74 | | -9,046 | -3,000 | 3,046 | |
| Renoform Press 1 | | -9,546 | -3,500 | 2,546 | |
| Tipo lubrif | | +-----+-----+-----+-----+ | | | |
| MZA 20 | | (-----*-----) | | | |
| Não aplica | | (-----*-----) | | | |
| Plantforme 64 | | (-----*-----) | | | |
| Renoform 74 | | (-----*-----) | | | |
| Renoform Press 1 | | (-----*-----) | | | |
| +-----+-----+-----+-----+ | | | | | |
| -14,0 -7,0 0,0 7,0 | | | | | |

| Tipo lubrif = MZA 20 subtracted from: | | | |
|--|--------------------------|--------|---------|
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Não aplica | -10,321 | -4,275 | 1,771 |
| Plantforme 64 | -6,021 | 0,025 | 6,071 |
| Renoform 74 | -5,096 | 0,950 | 6,996 |
| Renoform Press 1 | -5,596 | 0,450 | 6,496 |
| Tipo lubrif | +-----+-----+-----+----- | | |
| Não aplica | (-----*-----) | | |
| Plantforme 64 | (-----*-----) | | |
| Renoform 74 | (-----*-----) | | |
| Renoform Press 1 | (-----*-----) | | |
| | +-----+-----+-----+----- | | |
| | -14,0 | -7,0 | 0,0 7,0 |
| Tipo lubrif = Não aplica subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Plantforme 64 | -1,746 | 4,300 | 10,346 |
| Renoform 74 | -0,821 | 5,225 | 11,271 |
| Renoform Press 1 | -1,321 | 4,725 | 10,771 |
| Tipo lubrif | +-----+-----+-----+----- | | |
| Plantforme 64 | (-----*-----) | | |
| Renoform 74 | (-----*-----) | | |
| Renoform Press 1 | (-----*-----) | | |
| | +-----+-----+-----+----- | | |
| | -14,0 | -7,0 | 0,0 7,0 |
| Tipo lubrif = Plantforme 64 subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Renoform 74 | -5,121 | 0,925 | 6,971 |
| Renoform Press 1 | -5,621 | 0,425 | 6,471 |
| Tipo lubrif | +-----+-----+-----+----- | | |
| Renoform 74 | (-----*-----) | | |
| Renoform Press 1 | (-----*-----) | | |
| | +-----+-----+-----+----- | | |
| | -14,0 | -7,0 | 0,0 7,0 |
| Tipo lubrif = Renoform 74 subtracted from: | | | |
| Tipo lubrif | Lower | Center | Upper |
| Renoform Press 1 | -6,546 | -0,500 | 5,546 |
| Tipo lubrif | +-----+-----+-----+----- | | |
| Renoform Press 1 | (-----*-----) | | |
| | +-----+-----+-----+----- | | |
| | -14,0 | -7,0 | 0,0 7,0 |