

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

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL
DO CRAVAMENTO DE COMPONENTES
MECÂNICOS TUBULARES EM HASTE
COM PONTA ESFÉRICA.**

**Autor: João Emanuel Soffiati
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button**

11/2007

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

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL
DO CRAVAMENTO DE COMPONENTES
MECÂNICOS TUBULARES EM HASTE
COM PONTA ESFÉRICA.**

Autor: João Emanuel Soffiati

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Materiais e processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado Acadêmico 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

So11a Soffiati, João Emanuel
Análise numérica e experimental do cravamento de componentes mecânicos tubulares em haste com ponta esférica / João Emanuel Soffiati. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

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

1. Metais – Fratura. 2. Aço – Fratura. 3. Metais – Deformação. 4. Planejamento experimental. I. Button, Sérgio Tonini. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Numerical and experimental analysis of tubular metallic parts indented with spherical punches

Palavras-chave em Inglês: Indentation, Fracture, Metal forming, Mechanical testing, statistical analysis

Área de concentração: Materiais e processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Luciana Montanari, Kátia Lucchesi Cavalca Dedini

Data da defesa: 23/11/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL
DO CRAVAMENTO DE COMPONENTES
MECÂNICOS TUBULARES EM HASTE
COM PONTA ESFÉRICA.

Autor: João Emanuel Soffiati

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Sérgio Tonini Button
DEMA - FEM - UNICAMP



Profa. Dra. Katia Lucchesi Cavalca Dedini
DPM - FEM - UNICAMP



Profa. Dra. Luciana Montanari
DEM - EESC - USP

Campinas, 23 de novembro de 2007

Dedicatória

Dedico este trabalho:

Àquele que é Autor de toda criação, que a despeito disso, reparte toda sua Glória conosco e nos proporciona a satisfação de descobrir e utilizar os recursos criados para também sermos co-participantes da criação. É mediante Sua imensa Graça que este trabalho pôde ser realizado. Toda Honra seja dada a Ele.

À minha querida esposa Denise, sempre pronta amiga que tanto me incentiva nos desafios planejados e nas lutas do dia a dia.

Às minhas filhas, Ana Flávia e Ana Luíza, que este seja a elas um incentivo à perseverança em atingir alvos e uma referência para uma vida cheia de descobertas e ousadia.

Aos meus pais Eli José e Helena, que desde a minha infância me deram exemplo da Fé, Verdade, Perseverança e Honestidade.

Agradecimentos

Não poderia ter chegado ao fim deste trabalho sem a ajuda de diversas pessoas às quais gostaria de prestar minhas homenagens:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Tonini Button, que desde os primeiros contatos me incentivou a prosseguir o trabalho, me mostrou sempre alternativas a serem seguidas e pelo exemplo marcante de caráter, respeito e competência.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro que permitiu os bons resultados desta pesquisa.

À Sra. Claudenete Leal do Departamento de Engenharia de Materiais – Unicamp, que colaborou nas análises de trincas requeridas no decorrer do trabalho.

Aos colegas e amigos de universidade: Neuza Monteiro Fernandes pelas palavras de incentivo e Célio Caminaga que, sempre pronto, me ajudou na preparação dos equipamentos para a realização dos experimentos.

À TRW Automotive Ltda, empresa em que exerço a profissão atualmente e que me inspirou muito no transcurso deste trabalho.

Ao Sr. Maciel da Ferramentaria IDEAL pela contribuição e colaboração na construção de dispositivo de ensaio de cravamento e dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

Aos professores: Celestino Mikami, Maria José Negro Lencione e Paulo César Razuk, que passaram pela minha vida e me deixaram grandes contribuições.

Aos colegas de minha vida profissional, que mesmo sem saberem, me desafiaram a prosseguir e a terminar este trabalho.

*“Que Deus me dê...
a serenidade para aceitar as coisas que não posso mudar,
a coragem para mudar as coisas que posso mudar,
e a sabedoria para saber a diferença.”*

Prece da Serenidade, de Reinhold Niebuhr

Resumo

SOFFIATI, João Emanuel, *Análise numérica e experimental do cravamento de componentes mecânicos tubulares em haste com ponta esférica*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 116 p. Dissertação (Mestrado).

Cravamento é um processo de conformação de metais a frio que apresenta baixo custo na utilização de fixação de componentes tubulares. O tipo de cravamento estudado é aplicado em projetos de componentes que necessitem transmitir movimento de rotação, similar às articulações de pedais de freios automotivos. Se a folga da articulação, neste caso, for menor que 0,02mm causará restrições no movimento da articulação, podendo não fechar a válvula de vácuo do sistema de frenagem causando a diminuição da eficiência, em contra partida, se a folga for maior que 0,15mm o acionamento do freio poderá apresentar ruídos. Outro problema é a presença de trincas passantes geradas pela escolha de parâmetros de processos inadequados no cravamento. Usualmente estes parâmetros não são especificados no projeto do sistema de frenagem, causando alta variabilidade no processo de manufatura. Este trabalho apresenta a análise de cravamento considerando seis fatores que foram escolhidos para iniciar a análise: geometria do punção, rugosidade do punção, diâmetro da ponta da haste a ser cravada, espessura da parede do componente tubular, profundidade da indentação e folga entre esfera e diâmetro do tubo para indentação. O processo de manufatura foi simulado experimentalmente através de um dispositivo especialmente projetado e montado para este trabalho e comparado com os resultados obtidos com o software MSC Superforge 2005.

Palavras chave

- Cravamento, Indentação, Fissura, Trinca, Folga, Ensaio de cravamento.

Abstract

SOFFIATI, João Emanuel, *Numerical and experimental analysis of mechanical tubular components crimping in a spherical connecting rod*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 116 p. Dissertação.

Crimping is a cold metal forming process that presents low costs for use in holding tubular components. The type of crimping analyzed is used in projects of components that transmit rotating motion, such as joining systems of brake pedals. If the joining clearance, in this case, is less than 0,02mm the brake movement will be restrained and may not close the vacuum valve of the break system what could cause reduction of efficiency; however, if that clearance is greater than 0,15mm may cause excessive noisy. Another problem is the presence of cracks or fissures generated by the choice of inappropriate process parameters. These parameters are not usually specified in the product design leading to high process variability. This work presents six factors that were chosen to start the analysis: punch geometry, roughness of the punch, diameter of the rod end, thickness of the tubular component, indentation depth, and position of indentation load. The crimping manufacturing process was simulated experimentally through the fixture specially projected and built to this work and compared with the results obtained with the software MSC Superforge 2005.

Key words

Crimping, Indentation, Fissure, Crack, Clearance, Crimping assay.

Índice

Listas de Figuras	xi
Listas de Tabelas	xv
Nomenclatura	xvii
Capítulo 1 – Introdução	1
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1 Influência da Profundidade na Energia de Penetração Crítica	5
2.2 Influência da Geometria da Punção na Propagação da Trinca	9
2.3 Influência do Acabamento dos Punções Cravadores	15
2.4 Influência do Posicionamento do Punção em Relação à Esfera	19
Capítulo 3 – Modelo Físico, Métodos e Planejamento Experimental	21
3.1 Modelo Físico	21
3.2 Método Numérico – Método dos Volumes Finitos	26
3.3 Método Experimental e Materiais	29
3.3.1 Planejamento Experimental Preliminar	29
3.3.2 Planejamento Aleatorizado por Níveis	34
3.3.3 Dispositivo de Cravamento	34
3.3.4 Material dos corpos-de-prova	40
3.3.5 Rugosidade dos Corpos de Prova	41
3.4 Descrição dos Ensaios	43
3.4.1 Ensaio de Cravamento	43
3.4.2 Ensaio de Extração de Esferas	44
3.4.3 Medição da Folga da Esfera após o Cravamento	45
3.4.4 Análise de Trincas – Microscopia Eletrônica de Varredura	46

3.4.5	Ensaio de Vazamento	47
	Capítulo 4 – Análise de Resultados	48
4.1	Método Numérico	48
4.2	Método Experimental	58
4.2.1	Precisão Dimensional do Dispositivo de Cravamento	58
4.2.2	Primeiro Conjunto de Ensaios de Cravamento	58
4.2.2.1	Análise de Variância – Força de Indentação	60
4.2.2.2	Análise dos efeitos dos níveis – Força de Indentação	65
4.2.3	Segundo Conjunto de Ensaios de Cravamento	72
4.2.3.1	Análise de Variância – Força de Extração	74
4.2.3.2	Análise dos efeitos dos níveis – Força de Extração	78
4.2.4	Terceiro Conjunto de Ensaios de Cravamento	82
4.2.4.1	Análise de Variância – Folga da Esfera	83
4.2.4.2	Análise dos Efeitos dos Níveis – Folga da Esfera	87
4.2.5	Resumo dos Resultados dos Experimentos Fatoriais Fracionados	89
4.3	Análise Comparativa da Força de Indentação – Métodos Numéricos e Experimental	90
4.4	Análise Visual de Presença de Trincas por MEV	93
4.5	Resultados dos Ensaios de Vazamento	104
	Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões de trabalhos Futuros	105
5.1	Conclusões sobre o Dispositivo de Cravamento	105
5.2	Conclusões dos Resultados dos Experimentos Fatoriais Fracionados	105
5.3	Conclusões dos Resultados dos Experimentos Aleatorizados por Níveis	106
5.4	Conclusões dos Resultados do Método Numérico	107
5.5	Conclusões dos Resultados da Análise MEV e Teste de Vazamento	108
5.6	Sugestões para Trabalhos Futuros	109
	Referências Bibliográficas	110
	Anexo A	113

Lista de Figuras

1.1	(a) Conjunto de acionamento de freio automotivo, (b) Elemento mecânico de fixação com cavidade para alojamento de ponta esférica de haste articulada retida através da utilização de anel elástico. esférica de haste articulada retida através da utilização de anel elástico.	2
1.2	Elemento mecânico fixado na ponta esférica através de processos de cravamento.	4
2.1	Representação da determinação da profundidade de fratura em função da tensão de penetração versus <i>profundidade de penetração</i> em baixas e altas temperaturas.	7
2.2	(a) <i>Geometria</i> do punção, (b) limite semi-circular, (c) limite próximo de punção plano.	9
2.3	Distribuição de pressão em função de A/B para modelo físico dos punções indetadores a serem utilizados em modelo experimental.	11
2.4	Representação do início de uma trinca pela indentação com punção plano sob ação de Força de Compressão P e Força cíclica de Cisalhamento Q .	12
2.5	Influência da <i>rugosidade</i> sobre o coeficiente de atrito com lubrificantes de diferentes viscosidades cinemáticas.	17
2.6	Influência da viscosidade do lubrificante sobre o coeficiente de atrito para superfícies com diferentes rugosidades.	18
2.7	<i>Posicionamento do punção</i> em relação à ranhura do projétil	20
3.1	Representação da composição de forças no cravamento, no instante em que a parede conformada apóia-se sobre a esfera.	22
3.2	Representação da variável <i>folga para indentação</i> em função da distância entre os centros do punção e da esfera.	25
3.3	Exemplo de tela do programa MSC.Superforge 2005.	27

3.4	Dimensões características do processo de cravamento.	28
3.5	Fluxograma do planejamento experimental.	33
3.6	Desenho em corte do dispositivo para cravamento utilizado nos ensaios.	35
3.7	Dimensões principais e <i>geometria dos punções</i> utilizados.	36
3.8	Dispositivo de cravamento montado em prensa hidráulica vertical.	37
3.9	Vista do dispositivo de cravamento com detalhes dos atuadores dos punções.	37
3.10	(a) Vista do posicionador das esferas, (b) Penetrador de ponta esférica, (c) Célula de carga do penetrador.	38
3.11	Lâmina com extensômetros elétricos para medida do deslocamento dos punções.	39
3.12	Especificação dimensional dos corpos de prova	42
3.13	Corpos-de-prova empregados nos ensaios de cravamento.	42
4.1	Resultados da simulação numérica para cravamento referente ao ensaio 24, considerando os coeficientes de atrito 0,20 e 0,40.	49
4.2	<i>Força de indentação x Profundidade da indentação</i> , ensaios 03 e 04.	50
4.3	<i>Força de indentação x profundidade da indentação</i> , ensaios 07 e 08.	51
4.4	<i>Força de indentação x profundidade da indentação</i> , ensaios 19 e 20.	52
4.5	<i>Força de indentação x profundidade da indentação</i> , ensaios 23 e 24.	53
4.6	Distribuições das <i>tensões efetivas</i> para cada ensaio simulado numericamente até a profundidade de 0,85mm.	56
4.7	Distribuições das <i>deformações plásticas efetivas</i> para cada ensaio simulado numericamente até a profundidade de 0,85mm.	57
4.8	Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a <i>força de indentação</i> .	61
4.9	Gráfico de Pareto dos efeitos sobre a <i>força de indentação</i> .	62
4.10	Gráfico dos principais efeitos sobre a <i>força de indentação</i> .	62
4.11	Gráfico das interações sobre a <i>força de indentação</i> .	63
4.12	Histograma dos resíduos sobre a <i>força de indentação</i> .	64
4.13	Curvas de <i>força de indentação x profundidade</i> correspondendo as <i>folgas</i> <i>para indentação</i> de: 0,20, 0,31, 0,44, 0,56mm. <i>Espessura do tubo</i> : 0,85mm.	66
4.14	Curvas de <i>força de indentação x profundidade</i> correspondendo as <i>folgas</i> <i>para indentação</i> de: 0,70, 0,84, 0,96mm. <i>Espessura do tubo</i> : 0,85mm.	67

4.15	Curvas de <i>força de indentação x profundidade</i> correspondendo as <i>folgas para indentação</i> de: 0,20, 0,31, 0,44 e 0,56mm. <i>Espessura do tubo</i> : 1,85mm.	69
4.16	Curvas de <i>força de indentação x profundidade</i> correspondendo as <i>folgas para indentação</i> de: 0,70, 0,84, 0,96mm. <i>Espessura do tubo</i> : 1,85mm.	70
4.17	Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a <i>força de extração</i>	75
4.18	Pareto dos efeitos sobre a <i>força de extração</i> .	75
4.19	Gráfico dos principais efeitos sobre a <i>força de extração</i> .	76
4.20	Gráfico dos efeitos das interações sobre a <i>força de extração</i> .	76
4.21	Histograma dos resíduos para <i>força de extração</i> .	77
4.22	Valores médios da <i>força de extração da esfera X folga de indentação</i> para as <i>espessuras dos tubos</i> : 0,85mm e 1,25 mm.	81
4.23	Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a <i>folga da esfera</i> .	84
4.24	Gráfico de Pareto dos efeitos sobre a <i>folga da esfera</i> .	84
4.25	Gráfico dos principais efeitos, destacando-se as variáveis de maior influência sobre a <i>folga da esfera</i> .	85
4.26	Gráfico dos efeitos das interações sobre a <i>folga da esfera</i> .	86
4.27	Curvas de <i>força de indentação X profundidade</i> para as amostras 03, 04, 07, 08, 19, 20, 23 e 24 obtidas para os métodos numérico e experimental.	92
4.28	Localização das regiões da indentação fotografadas no MEV: (a) punção esférico; (b) punção quadrado.	93
4.29	Imagem obtida por MEV da amostra 07, punção 01, observa-se a superfície usinada do cp 07 anterior ao cravamento, e que representa todos os cps.	94
4.30	Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 04: (a) vista da indentação, (b) formação de micro fissuras no vértice da indentação, (c) sulco de usinagem remanescente próximo à parede lateral da indentação, (d) sulcos de usinagem remanescentes na área central da indentação.	95
4.31	Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 07: (a) vista da indentação, (b) formação de micro fissuras no vértice da indentação, (c) micro-fissura próxima a área lateral do punção, (d) sulcos de usinagem remanescente na área central.	96

4.32	Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 11: (a) vista da indentação, (b) formação de micro fissuras no vértice da indentação (c) sulcos de usinagem remanescentes na área próxima a parede do lado oposto à esfera, (d) micro-fissuras no centro da indentação.	97
4.33	Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 16: (a) vista da indentação, (b) formação de micro-fissuras no vértice da indentação, (c) aspecto da superfície lateral, (d) sulcos de usinagem na área central da indentação.	98
4.34	Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 19: (a) vista da indentação com trinca, (b) sulcos de usinagem com os picos prensados pelo punção, (c) no lado oposto à indentação pode ser visto provavelmente o início da trinca mostrada na vista (a), (d) sulcos de usinagem no centro da indentação.	99
4.35	Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 24: (a) vista da indentação, (b) lado da esfera com sulcos de usinagem prensados pelo punção, (c) lado oposto à esfera com sulcos de usinagem com os picos prensados pelo punção, (d) centro da indentação com os picos dos sulcos de usinagem prensados pelo punção, podendo ser uma micro-fissura.	100
4.36	Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 28: (a) vista da indentação, (b) no lado da esfera verifica-se arraste de material pelo punção, (c) no lado oposto à esfera verifica-se superfície rugosa com arraste de material pelo punção, (d) micro-fissuras, variando de 20 a 40 μm de comprimento, localizada no centro da indentação.	101
4.37	Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 31: (a) vista da indentação, (b) lado da esfera apresentando arraste de material pelo punção, (c) lado oposto à esfera apresentando arraste de material pelo punção, (d) centro da indentação com micro fissuras ocasionadas pelo arraste do punção.	102
A.1	Dimensões básicas do punção esférico e do punção quadrado para o cálculo da área e do volume das indentações feitas pelos mesmos.	114
A.2	Diferença entre os volumes das indentações produzidas por punção quadrado e por punção esférico.	116
A.3	Diferença entre as superfícies das indentações produzidas por punção quadrado e por punção esférico.	116

Lista de Tabelas

3.1	Variáveis e níveis empregados no planejamento experimental preliminar.	28
3.2	Composição Química do Aço AISI 12L14 - MATWEB, 2006.	40
3.3	Ordem e condições empregadas nos ensaios de cravamento.	43
3.4	Ordem e condições empregadas nos ensaios de extração de esferas.	45
4.1	Ensaio simulado numericamente.	48
4.2	Resumo dos resultados da simulação numérica.	54
4.3	Experimento fatorial $2^{6-1} - \frac{1}{2}$ fracionado – variável de resposta: <i>força de indentação</i> .	59
4.4	Resultado da análise de variância para <i>força de indentação</i>	60
4.5	Teste de hipóteses para <i>força de indentação e espessura do tubo: 0,85mm</i> .	68
4.6	Teste de hipóteses para <i>força de indentação e espessura do tubo: 1,25mm</i> .	71
4.7	Experimento fatorial $2^{5-1} - \frac{1}{2}$ fracionado – variável de resposta <i>força de extração</i> .	73
4.8	Resultado da análise de variância para <i>força de extração</i> .	74
4.9	Resultados do teste de hipóteses para <i>força de extração e espessura do tubo: 0,85mm</i> .	79
4.10	Resultados do teste de hipóteses para <i>força de extração e espessura do tubo: 1,25mm</i> .	80
4.11	Resultado de teste de hipóteses para <i>força de extração</i> .	81
4.12	Experimento fatorial $2^{6-1} - \frac{1}{2}$ fracionado – variável de resposta <i>folga da esfera</i> .	82
4.13	Resultados de análise de variância para <i>folga da esfera</i> .	83
4.14	Resultados do teste de hipóteses para <i>folga da esfera e espessura do tubo: 1,25mm</i> .	88
4.15	Resumo das análises estatísticas dos planejamentos experimentais.	89

4.16	Força de indentação obtida para método numérico e experimental, considerando a <i>profundidade de indentação</i> igual a 0,85mm.	90
4.17	Legenda dos cps cravados e analisados no MEV.	93
4.18	Resumo dos resultados obtidos na análise por MEV.	103
A.1	Volume V_q e superfície S_q da indentação feita pelo punção quadrado.	114
A.2	Volume V_e e superfície S_e da indentação feita pelo punção esférico.	114
A.3	Diferenças entre os volumes e as superfícies de indentações feitas pelos punções quadrado e esférico.	115

Nomenclatura

Letras Latinas

<i>A</i>	Distância do centro do punção até onde termina a área plana do mesmo	[]
<i>a</i>	Largura inferior da indentação feita pelo punção quadrado	[mm]
<i>a</i>	Número de diferentes níveis ou tratamentos	[]
ABI	“Automated Ball Indentation” – Penetrador Esférico Automatizado	[]
AISI	“American Iron and Steel Institute” – Instituto Americano do ferro e aço	[]
ANOVA	Análise de Variância	[]
<i>B</i>	Distância do centro do punção até o limite do contato do punção.	[]
<i>b</i>	Largura superior da indentação feita pelo punção quadrado	[mm]
<i>c</i>	Altura máxima da parte esférica feita pelo punção esférico	[mm]
<i>cp(s)</i>	Corpo(s) de prova	[]
<i>d</i>	Diâmetro da impressão	[mm]
<i>D</i>	Diâmetro da ponta esférica do punção	[mm]
<i>dc</i>	Distância entre o centro da esfera e o centro do punção	[mm]
<i>De</i>	Diâmetro da esfera	[mm]
<i>Di</i>	Diâmetro inferior do cone da indentação feita pelo punção esférico	[mm]
<i>Ds</i>	Diâmetro superior do cone da indentação feita pelo punção esférico	[mm]
<i>e</i>	Espessura da chapa embutida	[]
<i>E</i>	Módulo de elasticidade	[]
<i>F ind.</i>	Força de indentação	[N]
<i>f</i>	Folga para indentação	[mm]

F	Valor na distribuição de Fisher-Snedecor	[]
<i>Fa</i>	Força de atrito	[N]
<i>Femb.</i>	Força de embutimento	[]
<i>Fi</i>	Fator de intensidade	[N]
<i>FImax</i>	Força de indentação máxima	[N]
<i>Fn</i>	Força normal	[N]
Fo	Valor na distribuição de Fisher-Snedecor calculado	[]
GL	Grau de liberdade	[]
<i>h</i>	Profundidade de indentação	[mm]
HB	Dureza Brinell	[]
<i>hf</i>	Profundidade de fratura	[mm]
<i>IEF</i>	“Indentation Energy to Fracture” – Energia de Penetração para Fraturar	[]
IF	“Interstitial Free” – Livre de intersticiais	[]
<i>Ka</i>	Constante de profundidade do embutimento	[]
<i>Kb</i>	Const. de retenção da chapa (prensa-chapa)	[]
L	Largura do punção	[mm]
<i>L</i>	Soma dos comprimentos retilíneos do punção	[]
LVDT	“Linear Variable Differential Transducer” – Transdutor diferencial	[]
MEF	Método de elementos finitos	[]
MEV	Microscópio eletrônico por varredura	[]
<i>mLD</i>	Inclinação da curva de profundidade de indentação X carga	[]
MS	“Mean square” - Média dos quadrados	[]
n	Número de réplicas	[]
N	Produto do número de réplicas (n) pelo número de níveis (a)	[]
NA	Não avaliado	[]
<i>P</i>	Força de compressão / penetração	[N]
<i>p</i>	Profundidade da indentação	[mm]
PAN	Planejamento aleatorizado por níveis	[]
Q	Força cíclica de cisalhamento	[N]
<i>r</i>	Raio de ponta do punção	[mm]
<i>R</i>	Raio dos vértices do punção	[mm]

r^{-1}	Curvatura da ferramenta	[1/mm]
r'	Raio nas arestas do punção	[mm]
Ra	Rugosidade	[μ m]
Rd	Raio da esfera	[mm]
S^2	Desvio padrão	[]
Se	Superfície da indentação feita por punção esférico	[mm ²]
SIF	Fator de Intensidade de Pressão	[]
Sq	Superfície da indentação feita por punção quadrado	[mm ²]
SS	Soma dos quadrados	[]
SSE	Soma dos quadrados referentes ao erro	[]
SStrat.	Soma dos quadrados de um tratamento	[]
t	Espessura da parede do tubo	[mm]
t_0	Valor na distribuição t de Student calculado	[]
Tr	Tensão de ruptura	[]
v	Índice da tabela da distribuição t de Student	[]
V	Volume diferencial	[]
v_1, v_2	Índices da tabela da distribuição Fisher-Snedecor	[]
valor-P	Valor de probabilidade	[]
Ve	Volume ocupado pela indentação feita por punção esférico	[mm ³]
Vq	Volume ocupado pela indentação feita por punção quadrado	[mm ³]
W	Energia de deformação	[]
w	Largura do contato do punção	[mm]

Letras Gregas

α_1	Ângulo de assento da indentação	[]
α	Índice de significância	[]
β	Ângulo da ponta do punção	[rd]
μ	Coefficiente de atrito	[]
μ_1, μ_2	Médias a serem comparadas em teste de hipóteses	[]
ν	Razão de poisson	[]

σ_f	Tensão crítica de fratura por clivagem	[]
σ_{fr}	Tensão de fratura representativa	[]
$\sigma_{efet.max}$	Tensão efetiva máxima	[MPa]
$\varepsilon_{p\ efet}$	Deformação efetiva máxima	[]

Capítulo 1

Introdução

Para atender à crescente necessidade de fornecimento de produtos com baixo custo e alto nível de qualidade, a Engenharia de Manufatura tem desenvolvido e buscado alternativas simples na construção e montagem de elementos de máquinas e peças automotivas. Elementos mecânicos para fixação tais como parafusos, anéis elásticos e rebites têm sido muito utilizados, todavia dependendo da aplicação os mesmos se tornam custosos e não muito confiáveis ao longo do tempo.

Neste trabalho é apresentada uma alternativa para o projeto de elementos mecânicos que requerem a transmissão de movimentos de rotação numa dada articulação, como o exemplo da figura 1.1 (a) e (b), que apresenta a articulação da haste do pedal de freio de automóveis.

Com a utilização de um anel elástico para a retenção da haste, tem-se a necessidade de usinagem precisa e custosa para o canal de alojamento do anel elástico de maneira que sejam mantidas as tolerâncias de folga da articulação.

No caso específico de pedais de freios de automóveis, a folga da articulação é de extrema importância, pois se for menor que 0,02mm, dado prático de processo de fabricação usual, poderá reter o movimento do pedal de frenagem e afetar a válvula de controle de vácuo no amplificador de força de frenagem. Outro requisito é que se a folga da articulação for maior que 0,15mm, serão gerados ruídos indesejáveis e não aceito pelo mercado consumidor.

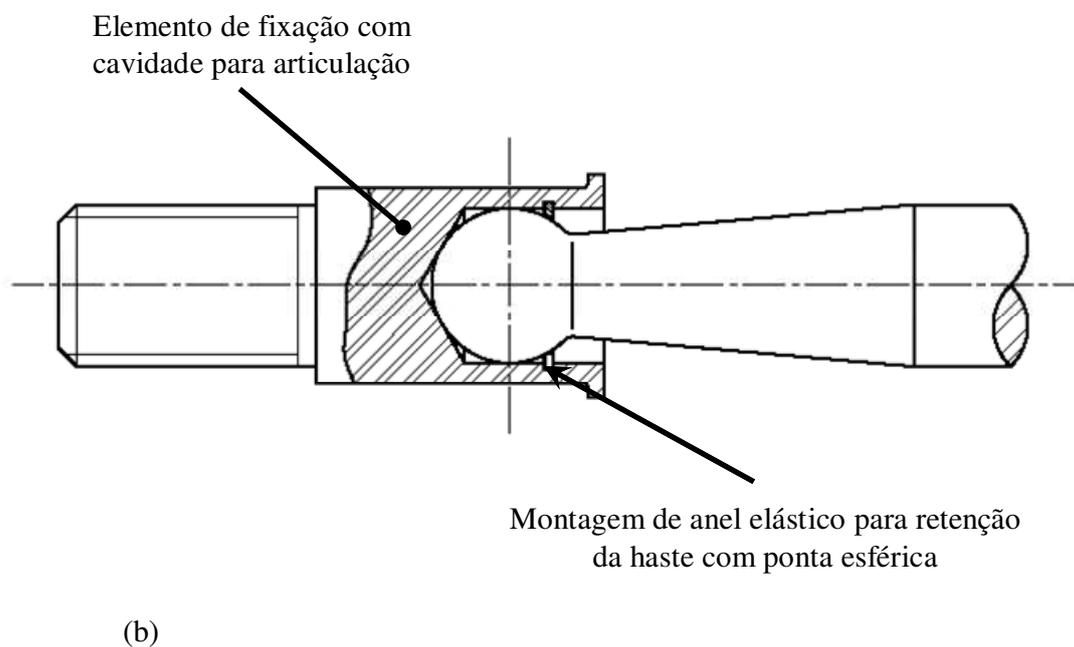
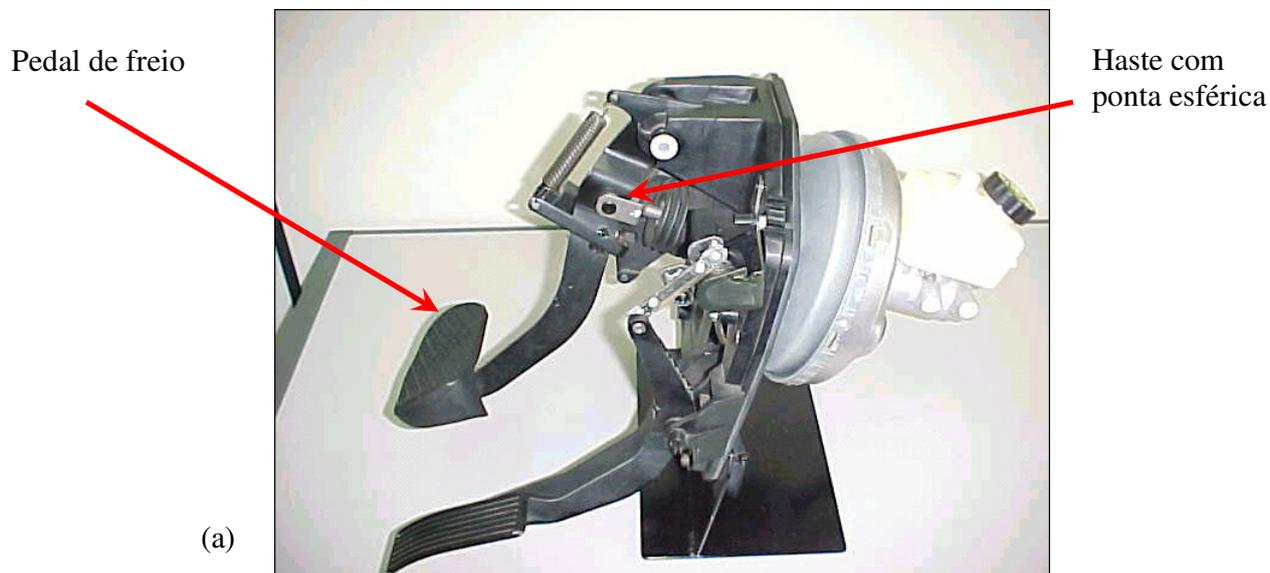


Figura 1.1 – (a) Conjunto de acionamento de freio automotivo, (b) Elemento mecânico de fixação com cavidade para alojamento de ponta esférica de haste articulada retida através da utilização de anel elástico.

Como solução alternativa de baixo custo para o projeto mencionado acima tem-se o processo de manufatura por cravamento, que elimina a usinagem extra-precisa, não requer qualquer pré ou pós-tratamento térmico para correção de distorções, e também elimina a necessidade do anel elástico e conseqüentemente elimina a possibilidade de falha na montagem desse anel.

Outras vantagens que podem ser citadas são:

1. O uso de componentes tubulares com pré-tratamento superficial, como por exemplo oxidação negra, que pode após o cravamento, seguir direto para a linha de montagem final,
2. A ausência de cavacos, pó ou fumaça no processamento, que possibilita um meio ambiente de trabalho seguro e livre de substâncias nocivas ao operador.

O processo de cravamento é um processo mecânico de conformação a frio que dispensa a utilização de matriz de conformação, pois somente é necessária a utilização de um punção cravador (penetrador). A conformação dá-se com o cravador deformando o material na forma de uma pequena calota sobre a própria superfície de apoio do elemento mecânico, no caso, a superfície esférica da haste.

Em contrapartida, com a utilização do processo de cravamento deve-se garantir o não aparecimento de trincas passantes durante o cravamento que inviabilizam totalmente a aplicação do produto e que a força de extração da haste articulada atenda os esforços especificados.

Normalmente, as condições de cravamento não são especificadas no projeto do produto, o que leva a certa liberdade operacional para manufaturá-lo, com conseqüente risco de não se satisfazer as exigências de conforto e segurança do cliente.

O processo de cravamento de componentes tubulares apresenta pouco material bibliográfico a respeito das principais variáveis de influência no nível de manufatura. Desse modo, o objetivo principal deste projeto é estudar algumas variáveis envolvidas no processo de cravamento a frio

de elementos mecânicos em hastes com ponta esférica, como apresentado na figura 1.2, de modo a torná-lo um processo de manufatura mais robusto que atenda a contento os requisitos de qualidade e segurança. Como objetivos complementares têm-se:

1. Projeto, construção e montagem de dispositivo para simulação física do cravamento em questão de modo que permita a execução de análise experimental deste processo,
2. Desenvolvimento de um modelo numérico, baseado no método dos volumes finitos, que fornecerá subsídios para verificar as variáveis mais importantes,
3. Verificação da presença de *trincas* nas indentações, de *folgas* no cravamento, determinação da curva de *força de indentação X profundidade* e da *força de extração da esfera*, em função das variáveis de influência definidas.

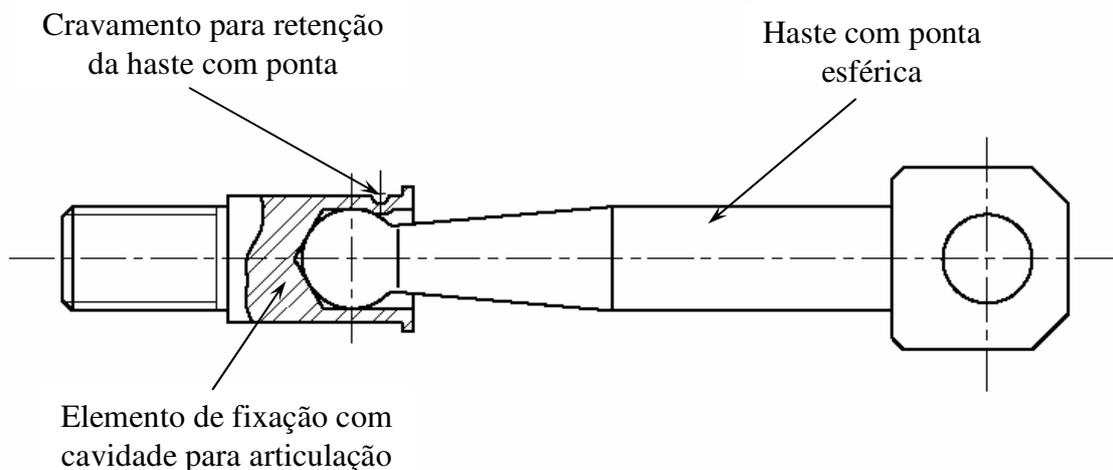


Figura 1.2 – Elemento mecânico fixado na ponta esférica através de processos de cravamento.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Diversos artigos foram consultados para verificar quais métodos e modelos haviam sido desenvolvidos para processos de conformação similares ao cravamento estudado neste projeto, todavia não foram encontrados artigos específicos deste assunto. Foram então pesquisados artigos relacionados ao processo de cravamento, que analisam algumas variáveis propostas neste estudo, e considerados conhecimentos práticos do autor, adquiridos na vivência com o processo industrial estudado.

A seguir são descritos os artigos pesquisados que abordam algumas variáveis que têm influência no aparecimento de trincas no processo de cravamento.

2.1 – Influência da Profundidade na Energia de Penetração Crítica

Segundo Murty *et al.*, (1998), num processo de indentação, as tensões no centro da superfície de contato do corpo-de-prova abaixo da ponta do punção de cravamento são compressivas, enquanto que as tensões defronte à ponta da trinca na fratura desse corpo de prova são trativas. Assim, eles supõem que embora as cargas compressivas da indentação não promovam fratura, um estado triaxial de tensões é introduzido no material através do processo de penetração, no caso desse trabalho associado ao cravamento.

Os conceitos da teoria de elasticidade e resultados obtidos em análises computacionais preliminares mostram que as tensões triaxiais presentes na ponta da trinca em um corpo-de-prova para ensaios de tenacidade são similares às que estão presentes na região da fratura próxima do

centro de contato superficial logo abaixo do penetrador ou punção de cravamento, (Timoshenko *et al.*, 1970 e Byun *et al.*, 1998). Portanto, o material nessa região experimenta um estado de tensão similar ao experimentado pelo material na ponta da trinca.

A energia de deformação no centro da impressão pode ser então comparada à que se localiza em frente da ponta da trinca. Assim, pode ser postulado que a energia de penetração por unidade de área de contato até uma tensão crítica de fratura é relacionada à energia de fratura de um material na região de início da fratura, ou seja, na região de transição observada em ensaios de tenacidade à fratura, (Haggag *et al.*, 1998).

O modelo de *Energia de Penetração para Fratura* definido por Murty *et al.*, (1998), supõe condições para que ocorra a fratura se a tensão gerada pelo penetrador esférico exceder a tensão crítica de fratura por clivagem (σ_f). A partir desse critério, tem-se que se o valor da tensão no ponto de contato é conhecido como uma função da *profundidade da penetração*, de modo que a profundidade na qual a tensão de penetração excedeu σ_f possa ser calculada.

Se a energia acumulada no material pelo avanço do penetrador pode ser determinada como uma função desse avanço, então a energia acumulada até a suposta tensão de fratura também pode ser prevista. Essa energia crítica para que ocorra a fratura é denominada Energia de Penetração para Fraturar ou *Indentation Energy to Fracture – IEF*, em inglês. A relação entre a tensão de escoamento relativa ao ABI e a profundidade é linear, como mostrado na Figura 2.1, o que permite fazer uma fácil extrapolação.

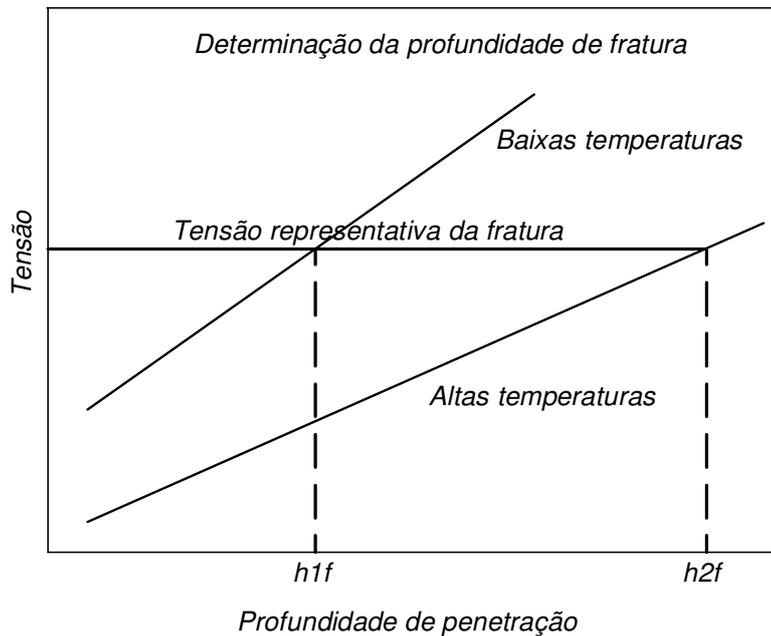


Figura 2.1 – Representação da determinação da profundidade de fratura em função da tensão de penetração versus *profundidade de penetração* em baixas e altas temperaturas, adaptado de Murty *et al.*, (1998).

A determinação da IEF requer que sejam calculadas:

1. A relação entre a tensão de escoamento relativa ao uso de um *Penetrador Esférico Automatizado*¹ e a *profundidade da penetração*,
2. A relação entre a deformação para escoamento relativa ao uso do *Penetrador Esférico Automatizado* e a deformação causada pela pressão normal no ponto de contato,
3. O valor da tensão crítica para fratura por clivagem e,
4. A relação entre a energia acumulada no material pelo avanço do penetrador em função da *profundidade de penetração*.

¹ *Penetrador Esférico Automatizado* (“Automated Ball Indentation – ABI”): o penetrador é movido numa velocidade constante contra o material de teste com cargas e descargas parciais múltiplas e progressivas aplicadas sucessivamente no mesmo local de penetração.

Pela teoria da elasticidade, a relação entre a tensão de escoamento derivada de ABI e a pressão média no ponto de contato foi estimada como de aproximadamente dois terços segundo Haggag *et al.*, (1998). Essa relação pode ser usada para relacionar a tensão de fratura crítica e uma tensão representativa do processo. Em vez de converter a tensão de escoamento na indentação para valores de pressão média, σ_f pode ser convertida para uma tensão de escoamento associada ao ABI e denominada tensão de fratura representativa (σ_{fr}), equação 2.1:

$$\sigma_{fr} = 2/3\sigma_f \quad [2.1]$$

A tensão representativa, como definida na expressão acima é a tensão crítica para fratura verificada para tensão de escoamento com o ABI e intercepta a linha de regressão da curva de escoamento no valor correspondente de profundidade de penetração como mostra a Figura 2.1. Esta profundidade delimita o ponto no qual o estado de tensão para fratura existente à frente do penetrador e é denominada “profundidade de fratura”, hf .

A energia de penetração para fraturar – IEF , ou energia acumulada no material na profundidade de fratura é obtida pela integração da tensão de escoamento do ABI acima da profundidade prevista para ocorrer a fratura. A derivação supõe que a tensão de deformação plástica é igual à pressão média, equação 2.2.

$$\sigma_i = \frac{4.P}{\pi.d^2} \quad [2.2]$$

A carga de penetração na fratura, P , é igual ao valor da inclinação da curva de profundidade, mLD , vezes a profundidade, i.e., $P = mLD.h$ e o diâmetro da impressão (d) pode ser calculado a partir da profundidade de penetração como:

$$d = 2\sqrt{Dh - h^2} \quad [2.3]$$

A expressão resultante para a IEF é denominada de logaritmo natural da profundidade de fratura e é dada por:

$$IEF = \int_0^{hf} \sigma(h)dh, \text{ ou } IEF = \int_0^{hf} \left[\frac{mLD}{\pi(Dh - h^2)} \right] \cdot dh = \frac{mLD}{\pi} \cdot \ln \left[\frac{D}{(D - hf)} \right] \quad [2.4]$$

2.2 – Influência da Geometria da Punção na Propagação da Trinca

O uso de punções com a extremidade plana em testes de indentação da resistência a fratura demanda um preciso conhecimento do estado induzido de tensões internas, bem como da distribuição da pressão de contato.

No trabalho de Ciavarella *et al.*, (1997), para estudo da influência de arestas arredondadas em indentações feitas por punções planos que têm a aplicação particular em testes de fadiga por fricção, é mencionado que para um perfeito contato plano, a pressão de contato interfacial é muito sensível a pequenas variações na *geometria* da superfície de contato, particularmente à presença de pequenas partículas próximos das arestas do punção. Se, entretanto, as arestas do punção são arredondadas, conforme figura 2.2a, muitos destes problemas desaparecem, pois existe menor tendência de uma pequena partícula interferir no deslizamento do punção, e a pressão de contato cai continuamente até zero nas bordas de contato.

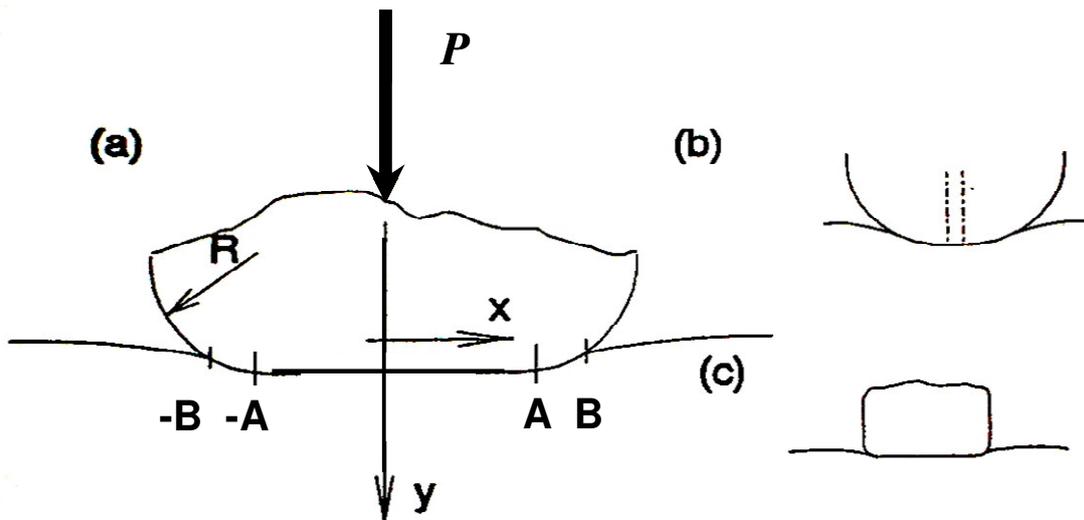


Figura 2.2 – (a) Geometria do punção, (b) limite semi-circular, (c) limite próximo de punção plano (adaptado de Ciaveralla, *et al.*, 1997).

A parte reta, ou melhor, plana do punção é dada pela distância “A” e os vértices são dados pelo raio “R”, a forma final se aproxima de uma parábola, de modo que nas extremidades tem-se um problema que pode ser analisado pela Teoria Hertz de contato elástico, que assume que dois corpos sólidos cilíndricos colocados em contato e se forem submetidos a uma carga de compressão colinear, normal à área de contato, apresentam na vizinhança de contato uma área plana devido à deformação sofrida pelos corpos, (Lubkin, 1962).

Nos casos onde A/R é pequeno, figura 2.2b, bem como quando a zona de contato se estende somente a uma pequena parte dentro da parte curva do punção, a idealização da parte semi-plana é justificada, já que as extremidades do punção suportarão a área de contato do mesmo modo que no modelo de Hertz.

Outro caso a ser considerado é aquele em que A/R torna-se grande, figura 2.2c, o que implica que o raio de curvatura das arestas é reduzido, tanto que toda a *geometria* transforma-se gradativamente numa forma retangular.

A figura 2.3 apresenta valores da distribuição de pressão adimensional: $-p(x)B/P$, sendo B o comprimento da superfície de contato do punção, para faixa A/B de 0,0 a 0,9, em intervalos de 0,1, isto é, do modelo de Hertz $A/B = 0,0$, até a um valor muito próximo ao completo contato plano.

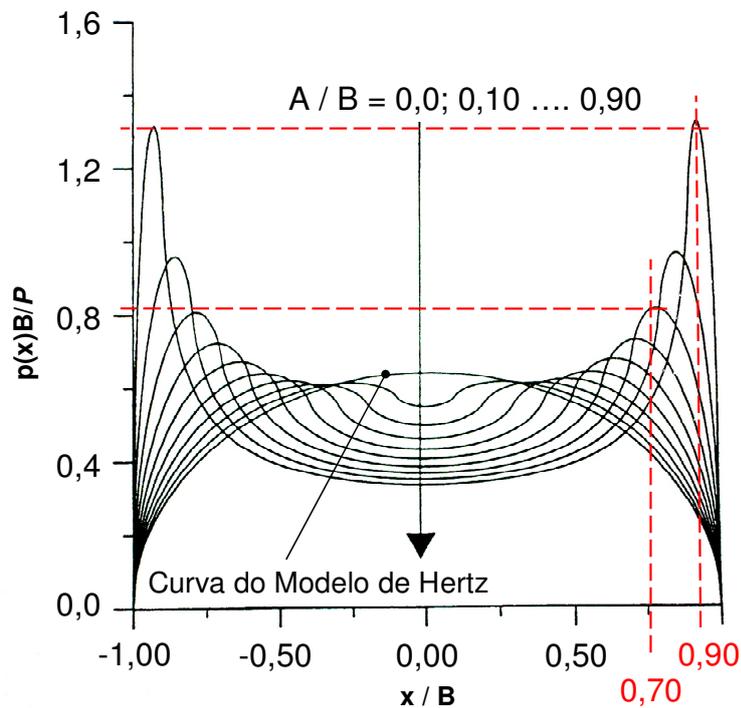


Figura 2.3 – Distribuição de pressão em função de A/B para modelo físico dos punções indentadores a serem utilizados em modelo experimental, modificado de Ciaveralla, *et al.*, (1997).

Pode-se notar que o aumento de pressão é muito lento, conforme a *geometria* progride em direção ao caso do punção plano, por exemplo: para um punção com uma relação $A/B < 0,7$, a máxima pressão é menos que 33% acima da curva do modelo de Hertz.

Com A/B acima de 0,9, a pressão de contato máxima é justamente o dobro do valor de Hertz. Nota-se também que a pressão adimensional $-p(x)B/P$ no centro da área de contato tende ao valor $1/\pi$, prevista pela solução singular do punção rígido, sendo que a diferença observada no comportamento da pressão conforme o limite $A/B \rightarrow 1$ é concentrada e, próxima às arestas de contato.

Na fadiga por atrito tem-se um ponto preocupante com respeito ao comportamento do crescimento da trinca. A trinca usualmente inicia-se nas vizinhanças da aresta de contato, (Kim,

et al., 2001), cresce obliquamente à direção de carregamento, e finalmente sob fadiga, passa dessa direção para a direção do carregamento. Os autores concluíram que a *geometria do punção* indentedor, aresta arredondada ou aresta plana tem grande influência na fadiga por atrito.

Segundo Mindlin, (1949), os fatores de intensidade de tensão (do inglês *SIFs: Stress Intensity Factors*) para início de trinca na aresta, figura 2.4, provenientes do contato da aresta de um punção em sua região plana, podem ser representados pela composição de uma força constante normal com um cisalhamento cíclico sob uma condição de escorregamento parcial.

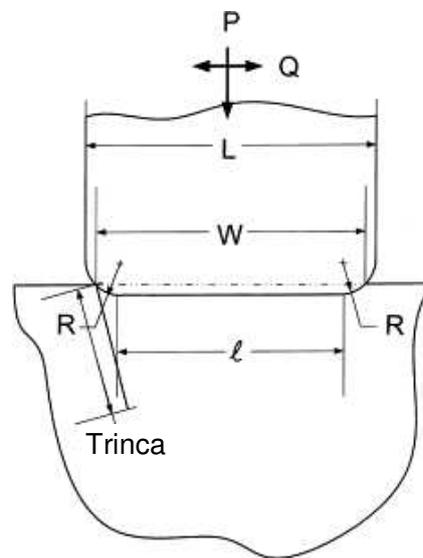


Figura 2.4 – Representação do início de uma trinca pela indentação com punção plano sob ação de Força de Compressão P e Força cíclica de Cisalhamento Q , extraída de Kim, *et al.*, (2001).

A densidade de energia de deformação mínima também pode ser aplicada para investigar a direção da propagação da trinca. Uma condição de escorregamento parcial foi encontrada pelos autores na vizinhança da transição da região de aderência para a região de deslizamento determinada pelo arredondamento da aresta.

Numa situação de carregamento nos punções de cravamento, espera-se que, a trinca se inicie a partir do arraste de material pelas arestas do punção de cravamento, tomando-se como base as distribuições de pressões representadas na figura 2.3. Também se pode assumir que essa trinca inicial se propague para o local onde a densidade de energia de deformação é relativamente

mínima, que é o local onde a dilatação da trinca eliminaria a energia de distorção. Essas condições determinam a direção e o comprimento de propagação da trinca.

A densidade de energia de deformação, num estado de tensão plana, para uma situação semelhante no estudo da influência da *geometria de punção* semi-plano realizada por Kim, *et al.*, (2001), é definido como:

$$\frac{dW}{dV} = \frac{(1+\nu)}{E} \left| \frac{(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2)}{2} - \frac{\nu}{2} (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2) + \tau_{xy}^2 \right| \quad [2.5]$$

Onde W é energia de deformação armazenada em um elemento de volume diferencial $dV=dx.dy.l$

E e ν são o módulo elástico e a razão de Poisson do semi-plano, respectivamente.

Também empregando o método de Muskhelishvili, (1977), para determinar o campo de tensões, Ciavarella *et al.*, (1998), apresentam um modelo para avaliar problemas de contato para a penetração de um punção com extremidade arredondada, e concluem que as tensões presentes no contato calculadas pelo método proposto representam cerca de 60% do valor encontrada para um caso Hertziano equivalente, o que significa que mesmo indentadores com pequenos raios de curvatura influenciam significativamente o campo de tensões na região de contato.

Goryacheva *et al.*, (2002) utilizando o método desenvolvido por Muskhelishvili baseado em funções que descrevem a geometria do contato e as condições de deslizamento na interface, estudaram o deslizamento parcial com um punção de perfil inclinado e com cantos arredondados, com o objetivo de analisar a distribuição das tensões trativas causadas pelo deslizamento e que poderiam levar à formação de trincas superficiais.

Argatov, (1999), apresenta um modelo baseado no método de expansões assintóticas desenvolvido para analisar a indentação de um corpo elástico, por um punção na forma de um parabolóide elíptico.

Empregando método semelhante, Jaffar, (2002), elaborou um modelo para a análise do contato sem atrito entre uma superfície rígida e penetradores com dois formatos, um de topo plano com arestas arredondadas, e outro cônico com a extremidade arredondada, que são formatos similares aos propostos para os penetradores que serão utilizados neste trabalho.

Suas conclusões são mais voltadas para a análise do modelo desenvolvido em relação à convergência das funções assintóticas obtidas, mas de todo modo, é um artigo interessante por abordar a influência da *geometria* dos penetradores no campo de tensões gerado na superfície de contato.

Dini e Nowell, (2003), apresentam um modelo baseado na formulação Hertziana com o objetivo de determinar o coeficiente de atrito na região de deslizamento para o contato de uma superfície plana com uma superfície curva, que é uma *geometria* de contato similar à encontrada no cravamento com punções esféricos.

Hwu e Fan, (1998), utilizam o método de funções implícitas para analisar o funcionamento de indentação empregando a analogia com problemas que envolvem trincas superficiais. Os autores concluem que obtiveram boas aproximações entre os dois problemas que consideraram análogos e consideram que esse método pode ser aplicado a outros problemas similares que envolvam contato metálico.

Sburlati, (2002), apresenta um método com soluções explícitas para a análise do contato entre um indentador rígido e uma placa, e conclui que ao assumir um gradiente para a distribuição de pressões na superfície de contato, obteve resultados considerados satisfatórios que mostraram que no caso estudado, para cargas normais variando até 700 N, apesar de atingir profundidades da ordem de 0,4mm, a *geometria* da extremidade dos penetradores não pode ser considerado um fator de influência significativo.

Já Zeng e Chiu, (2001), apresentam um método experimental para avaliação das curvas de *força versus profundidade de penetração* em que apresentam um dispositivo adequadamente instrumentado. Para avaliar os resultados obtidos nos experimentos em que ensaiaram 14

diferentes materiais, com módulo de elasticidade entre 3 e 650 GPa e dureza entre 0,1 e 30 GPa, os autores também desenvolveram um modelo com o *método de elementos finitos* (MEF).

2.3 – Influência do Acabamento dos Punções Cravadores

A falta de conhecimento do comportamento do atrito durante as operações de conformação é uma séria deficiência no estado da arte atual. Um bom entendimento sobre o atrito é de primordial importância para melhorar a precisão dos métodos de simulação, por exemplo, dos processos de conformação de chapas de aço, como discutido por Han, (1997).

O comportamento do atrito é conhecido ser uma função complexa de diversas variáveis que interagindo, variam constantemente durante o processo de conformação. Portanto, é importante estudar o comportamento do atrito e estimar o coeficiente de atrito dentro de condições que podem representá-lo nos processos reais de conformação de chapas de aço.

Dentre essas condições apontadas, incluem-se as pressões de contato, a intensidade das deformações, a *geometria* das ferramentas, a velocidade de conformação, a rugosidade das peças em contato, a velocidade de deslizamento relativa e as condições de lubrificação.

Um bom ensaio para avaliação do comportamento do atrito na estampagem de chapas metálicas tem que representar a situação real na operação de conformação de chapa metálica tão próximo quanto possível.

No trabalho de Han foi elaborado um ensaio de atrito que considerou os diversos raios de suavização das matrizes e dos punções de modo a estudar-se a influência da *geometria* das ferramentas sobre o comportamento do atrito.

Neste ensaio, é aplicada uma tensão de tração na tira enquanto ela é deformada sob condições de dobramento similares às encontradas na estampagem profunda, o que representa razoavelmente o maior atrito sobre os raios das ferramentas sob condições reais de conformação, devido ao grande deslocamento causado pelo deslizamento do metal sobre a superfície das ferramentas.

Foram realizados ensaios com três tipos de chapas de aço: um IF (livre de intersticiais), galvanizada por imersão e eletro-galvanizada. Cada chapa foi ensaiada para diversos raios de ferramenta, entre 0 e 100mm, com o fim de investigar a resposta do atrito para estes parâmetros, sob condições de pressão interfaciais similares às observadas na estampagem.

A análise dos resultados obtidos mostrou que no geral, o coeficiente de atrito aumenta conforme a curvatura da ferramenta ($1/r$) aumenta, independentemente do tipo de aço ensaiado.

O aço galvanizado por imersão apresentou a maior média para o coeficiente de atrito. Já o aço IF apresentou os maiores valores de coeficiente de atrito e a maior influência do raio de curvatura do punção, enquanto o aço eletro-galvanizado apresentou os menores valores de coeficiente de atrito e a menor influência do raio de curvatura.

Outro aspecto analisado pelo autor foi a modificação da *rugosidade* das chapas após o ensaio de atrito, concluindo que essa *rugosidade* é fortemente influenciada pelo tipo de revestimento da chapa de aço, bem como pelo raio de curvatura. Novamente, o aço IF, sem revestimento, apresentou a pior condição de rugosidade após o ensaio, o que é coerente com o aumento significativo observado para o coeficiente de atrito nos ensaios com esse aço.

Muitos estudos sobre coeficiente de atrito têm sido realizados na comparação qualitativa das características de atrito considerando a rugosidade das peças em contato, como é o exemplo do trabalho de Lee *et al.*, (2002), no qual os autores empregam o ensaio de tração e a análise de *rugosidade* para investigar a influência das propriedades dos materiais em contato.

Para avaliar o coeficiente de atrito, um dispositivo de ferramentas planas foi projetado. Os ensaios foram realizados com sete diferentes lubrificantes de estampagem, além de amostras isentas de lubrificante em sua superfície. Os autores concluíram que existe uma correlação entre a *rugosidade* e o coeficiente de atrito, e que para valores de Ra entre 0,5 e 1 μ m o *coeficiente de atrito* é relativamente baixo.

O aspecto da curva mostrada na figura 2.5 pode ser devido à redução do número de bolsões de óleo na superfície de baixa rugosidade, ao aumento da deformação plástica e a fácil destruição da cobertura do filme lubrificante na superfície de alta rugosidade.

Quando a viscosidade do lubrificante torna-se alta, o coeficiente de atrito é baixo, como pode ser visto na figura 2.5 com os resultados desses autores.

Lubrificantes de baixas viscosidades têm menores forças coercivas do que óleos de alta viscosidade de modo que a cobertura do filme lubrificante é facilmente destruída e o coeficiente de atrito torna-se alto.

Por outro lado, óleos de alta viscosidade têm alta força coerciva de modo que são capazes de manter uma cobertura do filme de lubrificação por um longo tempo.

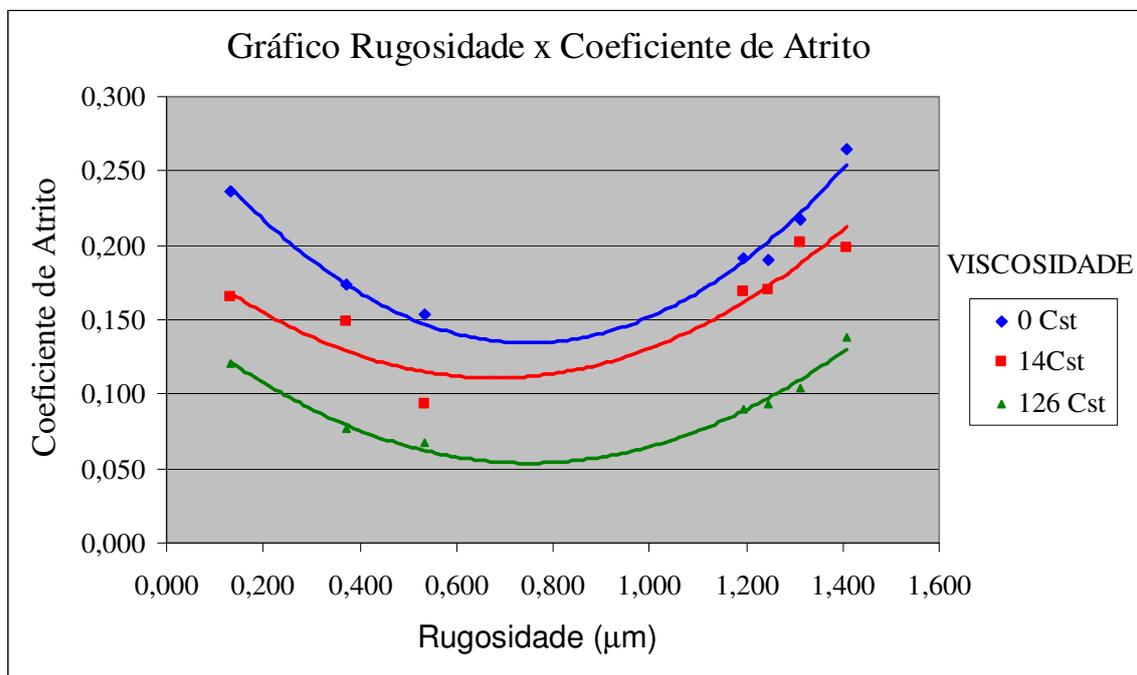


Figura 2.5 – Influência da *rugosidade* sobre o coeficiente de atrito com lubrificantes de diferentes viscosidades cinemáticas – adaptado de Lee *et al.*, (2002).

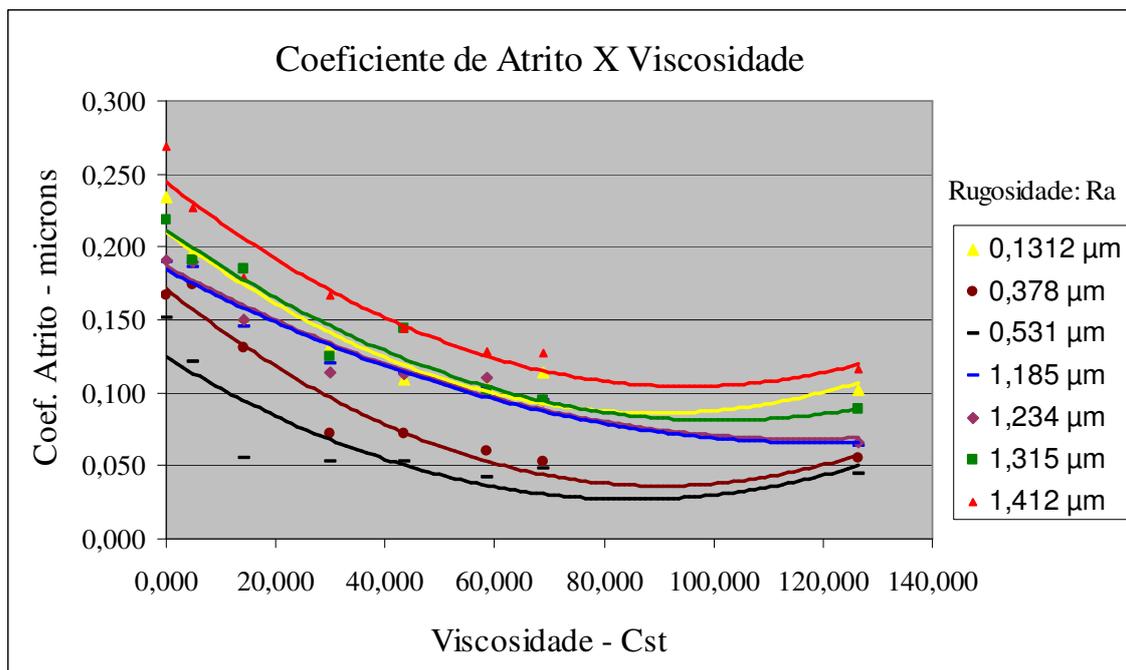


Figura 2.6 – Influência da viscosidade do lubrificante sobre o coeficiente de atrito para superfícies com diferentes rugosidades, adaptado Lee *et al.*, (2002).

Resultados semelhantes foram obtidos por outros pesquisadores como Gaspar e Ramalho, (2002), que estudaram os mecanismos de aderência superficial (“fretting”) em chapas de aço galvanizado e concluíram que a camada galvanizada não influencia decisivamente o modo de deslizamento, e conseqüentemente as condições de atrito. Segundo suas conclusões, a pressão imposta na interface é a variável mais influente nesse caso.

Malzbender e de With, (1999), estudaram o deslizamento com indentação, para simular o fenômeno de desgaste por aragem (“plowing”), para avaliar o coeficiente de atrito e o modo de fratura em superfícies revestidas. Para tanto, eles desenvolveram um método analítico-experimental em que consideraram fatores como o módulo de elasticidade dos revestimentos, sua dureza e tenacidade à fratura.

Os resultados obtidos nesse modelo para o coeficiente de atrito mostraram-se próximos dos obtidos experimentalmente e os autores também concluíram que esse coeficiente é fortemente influenciado pela espessura do revestimento, sendo elevado quando camadas pouco espessas são empregadas.

2.4 – Influência do Posicionamento do Punção em Relação à Esfera

No artigo de Shirgaokar *et al.*, (2003), é descrito o cravamento de tubo metálico cilíndrico em projétil bélico depois de sua montagem. São utilizados seis cravadores que são empurrados por dispositivo específico de manufatura. O tubo é deformado pelos cravadores para preencher uma ranhura usinada no projétil.

A qualidade do cravamento é crítica no desempenho final da montagem, nos parâmetros de performance balística e é avaliada pelo ensaio de extração do projétil do tubo, no qual se mede a *força* necessária para essa *extração*.

Foram avaliadas seis posições distintas para os punções cravadores em relação ao centro da ranhura do projétil e como resultado obteve-se a condição ótima para a posição do punção cravador de modo a se obter o afinamento mínimo na *espessura da parede do tubo* após o cravamento e o maior resultado para a *força de extração* do projétil.

Um dos objetivos dos autores foi determinar um posicionamento ótimo, figura 2.7, entre os punções cravadores e a ranhura usinada no projétil, tendo demonstrado que a variação deste *posicionamento* tem grande influência na *força de extração* do projétil.

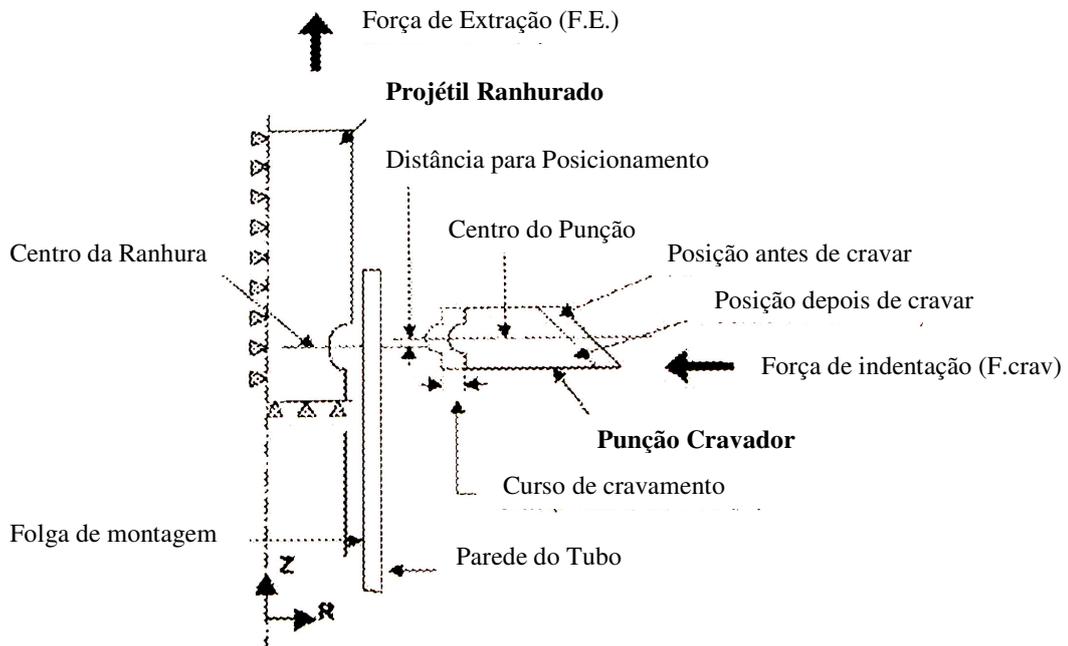


Figura 2.7 – *Posicionamento do punção em relação à ranhura do projétil*, adaptado de Shirgaokar *et al.*, (2003).

Nesse trabalho, que também trata de cravamento de componentes tubulares, embora seja utilizado em produtos de conceitos diferentes, tem-se no que se refere ao apoio do material cravado, uma situação semelhante no que diz respeito à posição do punção cravador em relação à esfera e à necessidade de realização de *ensaio de extração* dessa esfera, de modo que a *posição do penetrador* foi considerada uma variável a ser estudada.

Capítulo 3

Neste capítulo serão apresentados os diversos procedimentos empregados para a análise do cravamento, relacionados ao modelo físico, ao modelo numérico e ao planejamento experimental empregado.

3.1 – Modelo Físico

O cravamento estudado é um processo de conformação plástica que utiliza punções cravadores com forma retangular, esférica ou combinação de ambas, de modo que sejam conformadas pequenas indentações igualmente espaçadas em um corpo tubular cilíndrico com o objetivo de que essas indentações possam reter a ponta esférica de uma haste.

Para se ter uma melhor compreensão do processo de cravamento e das variáveis envolvidas, foi elaborado um modelo físico simplificado que representa o processo de cravamento, que pode ser visto na figura 3.1.

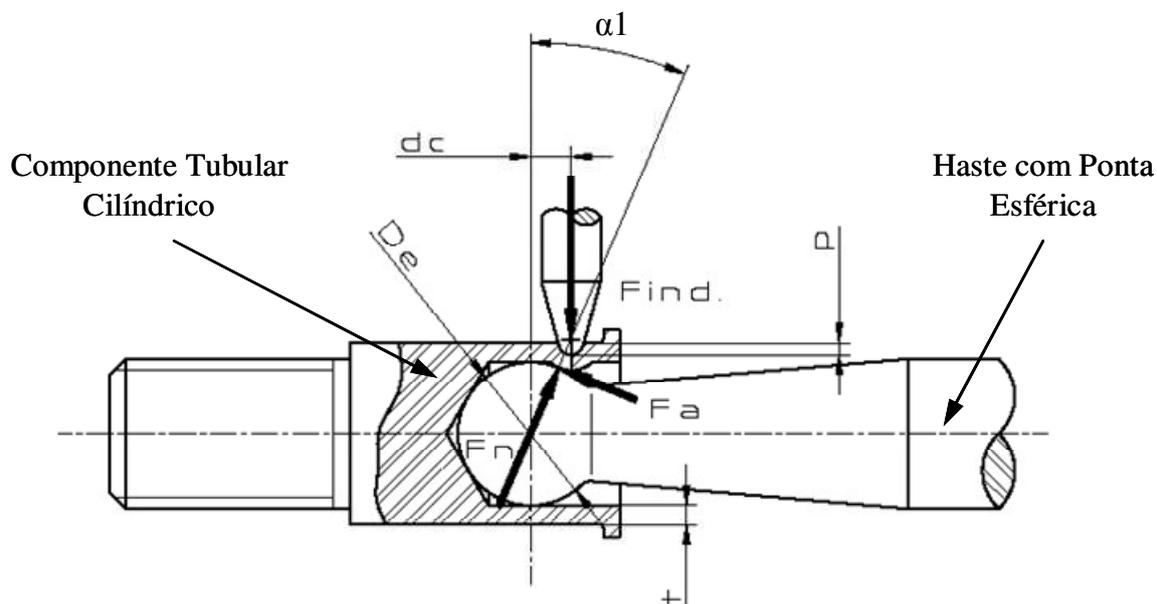


Figura 3.1 – Representação da composição de forças no cravamento, no instante em que a parede conformada apóia-se sobre a esfera.

Onde:	$F_{ind.}$	Força de indentação	r	Raio de ponta punção
	F_a	Força de Atrito	μ	Coefficiente de atrito
	F_n	Força Normal	De	Diâmetro da Esfera
	p	Profundidade da indentação	t	Espessura da parede do tubo
	$\alpha 1$	ângulo de assento da calota		
	dc	distância entre o centro da esfera e o centro do punção		

Da análise estática do modelo físico mostrado na figura 3.1, utilizando conceito físico do Plano Inclinado, têm-se as seguintes expressões:

$$F_a = \mu \cdot F_n \quad [3.1]$$

$$\cos \alpha 1 = \frac{F_n}{F_{ind.}} \quad [3.2]$$

$$tg \alpha 1 = \frac{dc}{\left[\frac{De}{2} + [(t - p) + r] \right]} \quad [3.3]$$

$$tg \alpha 1 = \frac{\text{sen } \alpha 1}{\cos \alpha 1} \quad [3.4]$$

Substituindo 3.4 em 3.3 Tem-se:
$$\frac{\text{sen}\alpha 1}{\text{cos}\alpha 1} = \frac{dc}{\left[\frac{De}{2} + [(t-p)+r] \right]} \quad [3.5]$$

Substituindo 3.2 em 3.5, tem-se que:

$$Fn = Find \cdot \text{sen}\alpha 1 \left(\frac{\frac{De}{2} + [t-p] + r}{dc} \right) \quad [3.6]$$

Então

$$Fa = \mu \cdot \left[\frac{Find \cdot \text{sen}\alpha 1}{dc} \right] \cdot \left[\frac{De}{2} + t - p + r \right] \quad [3.7]$$

$$Find. = \frac{Fa \cdot dc}{\mu \text{sen}\alpha 1} \cdot \frac{1}{\left[\frac{De}{2} + t - p + r \right]} \quad [3.8]$$

Portanto a força de indentação é função das seguintes variáveis:

1. *Força de atrito entre o contato da esfera e a superfície externa,*
2. *Diâmetro da esfera,*
3. *Espessura da parede do componente tubular,*
4. *Geometria do punção,*
5. *Profundidade da indentação,*
6. *Distância entre o centro da esfera e o punção.*

É importante lembrar que quatro dessas variáveis, são também descritas na revisão bibliográfica, e através de vivência prática no processo de cravamento, foi verificado que as seis variáveis mencionadas têm influência qualitativa e algumas são controladas dimensionalmente como, por exemplo, a *profundidade da indentação* e a *geometria do punção*.

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, que é prever algumas condições de processo para os quais o cravamento se torne robusto, e forneça produtos isentos de defeitos e que atendam

os requisitos de produto quanto a ausência de trincas passantes, quanto à força de extração da haste e quanto a folga axial, foram escolhidas essas seis variáveis de influência para realização de experimentos que permitam avaliar o grau de influência que cada variável possui e assim controlar o processo de maneira otimizada.

Particularmente a *distância do centro da esfera ao centro do punção* (dc) e o *diâmetro da esfera* (De) determinam a *folga para indentação* (f) entre a superfície da esfera e o diâmetro interno do tubo.

A *folga para indentação* é função do diâmetro da esfera e representa o grau de liberdade que o material terá à deformação de indentação, i.e., considerando uma mesma *profundidade de indentação*, quanto maior a *folga para indentação* maior a liberdade para o material deformar-se plasticamente antes de atingir a superfície da esfera; o inverso também é verdadeiro.

Como pode ser visto na figura 3.2, tem-se:

Raio da esfera: Rd

Distância entre centros: dc

Folga para indentação: f

Aplicando o Teorema de Pitágoras:

$$Rd^2 = (Rd - f)^2 + dc^2 \quad [3.9] \quad \text{então: } f^2 - 2Rdf + dc^2 = 0 \quad [3.10]$$

Resolvendo como equação do 2º tipo: $ax^2 + bx + c = 0$

$$\text{Tem-se que: } f = Rd + /- \sqrt{Rd^2 - dc^2} \quad [3.11]$$

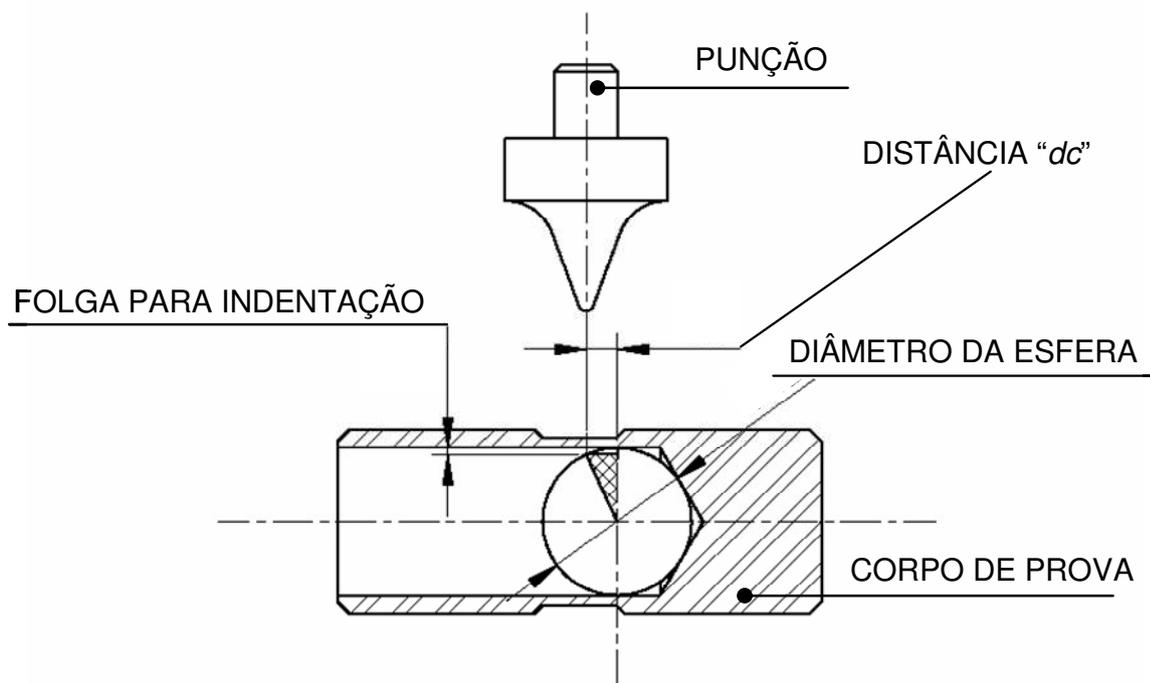


Figura 3.2 – Representação da variável *folga para indentação* em função da distância entre os centros do punção e da esfera.

Analisando o cravamento de forma análoga ao embutimento profundo, tem-se que no embutimento de uma cuba retangular, a força requerida pode ser calculada pela seguinte expressão extraída de Metals Handbook, (1969):

$$F_{emb} = eTr(2\pi rKa + LKb) \quad [3.12]$$

onde:	F_{emb} :	Força de embutimento
	L :	Soma dos comprimentos retilíneos do punção
	e :	Espessura da chapa embutida
	Ka :	Constante de profundidade do embutimento
	Tr :	Tensão de ruptura
	Kb :	Const. de retenção da chapa (prensa-chapa)
	r' :	Raio nas arestas do punção

Essa expressão pode ser empregada para obter valores aproximados para a *força de indentação*, mas não é a mais adequada para esse fim.

3.2 – Método Numérico – Método dos Volumes Finitos

Para a avaliação do processo de cravamento e definição a priori das principais variáveis de influência sobre o processo, foi elaborado um modelo baseado no método de volumes finitos empregando o software MSC.Superforge 2005.

Este programa foi escolhido por estar disponível no Laboratório de Conformação Mecânica, por apresentar uma interface amigável baseada na programação por objetos, e por empregar um método de solução que tem apresentado bons resultados para a simulação de processos de conformação de volumes, como é o caso do cravamento.

A figura 3.3 apresenta a tela do programa para o modelo elaborado para o cravamento. Nessa figura pode ser observado o modelo empregado que consiste do penetrador com ponta esférica (cor verde), da esfera interna (em azul) e do corpo-de-prova a ser cravado (em vermelho).

A prensa adotada para a simulação representa a prensa hidráulica empregada nos ensaios com velocidade média de 0,25 mm/s.

Para caracterizar as condições de atrito nas interfaces penetrador-cps e esfera-cps adotou-se um coeficiente de Coulomb igual a 0,2. A temperatura ambiente de 20 °C foi adotada considerando-se o processo como realizado a frio.

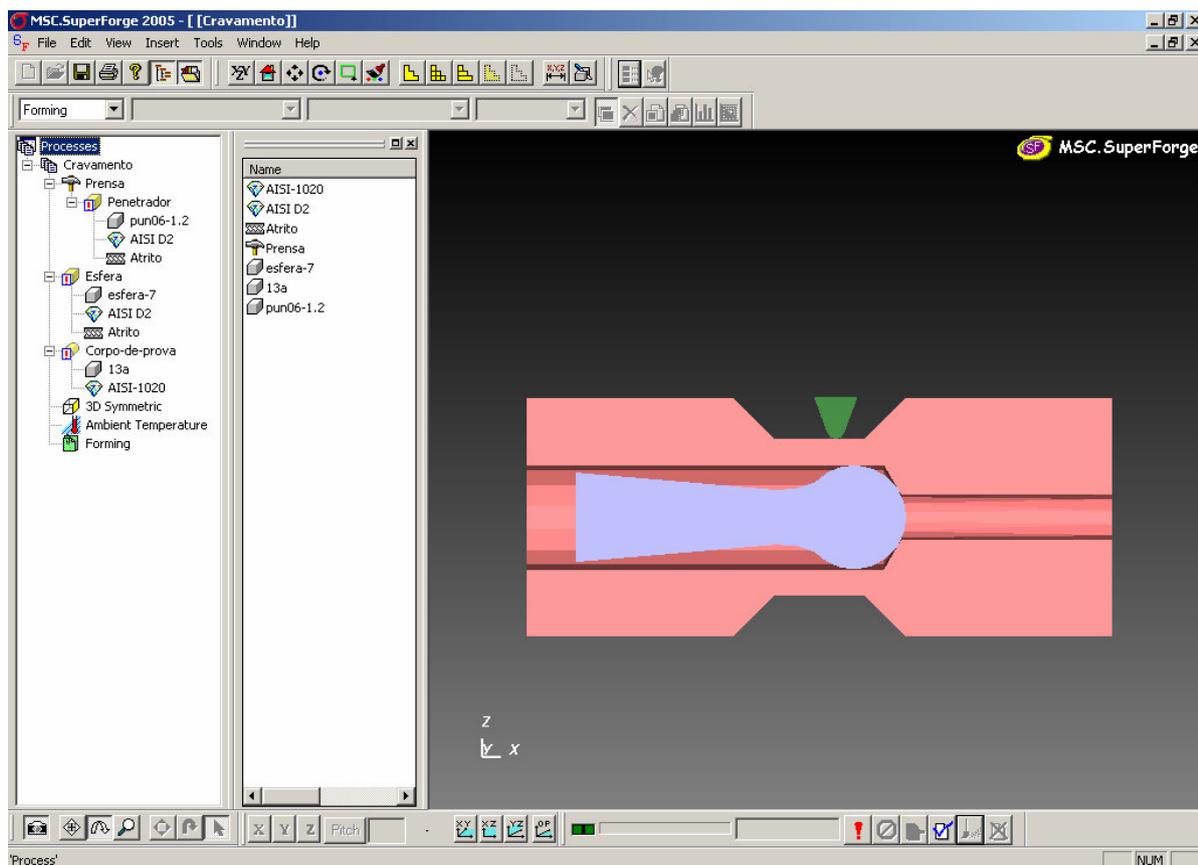


Figura 3.3 – Exemplo de tela do programa MSC.Superforge 2005.

Para os corpos-de-prova foi definido o aço AISI 12L14 na condição laminado a quente, usualmente utilizado nesse tipo de produto e o aço AISI D2 beneficiado para as ferramentas.

Para minimizar o tempo para solução do modelo definiu-se a simetria dos sólidos em relação ao plano mediano longitudinal, como mostrado à direita da figura 3.3. Em todos os modelos o tamanho do lado do elemento de volume foi adotado igual a 0,3mm.

Foram elaborados modelos considerando cinco das seis variáveis propostas no plano de trabalho inicial e que estão apresentadas na tabela 3.1 e se referem às dimensões apresentadas na figura 3.4.

Tabela 3.1 – Variáveis e níveis empregados no planejamento experimental preliminar.

VARIÁVEIS	NÍVEL 1	NÍVEL 2
1. Geometria do punção	Esférica	Quadrada
2. Folga para indentação “ <i>f</i> ”	0,25 mm	0,75 mm
3. Profundidade da indentação “ <i>p</i> ”	0,50 mm	0,85 mm
4. Espessura da parede tubular “ <i>t</i> ”	0,85 mm	1,25 mm
5. Diâmetro da Esfera “ <i>De</i> ”	7,00 mm	12,00 mm
6. Rugosidade do punção	Ra 0,25 µm	Ra 2,5 µm

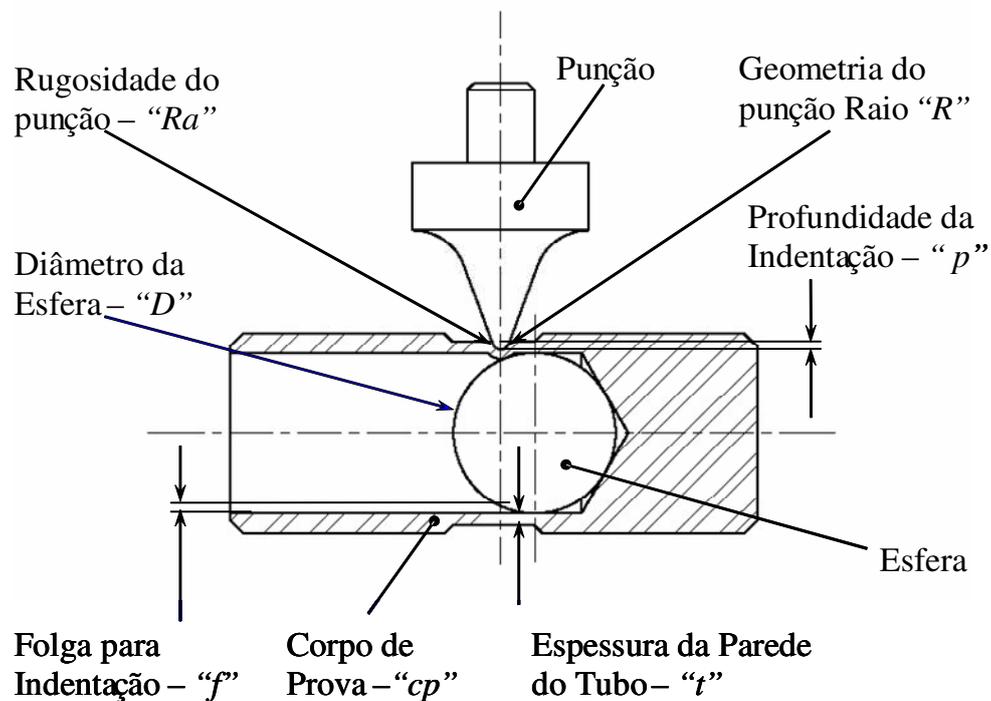


Figura 3.4 – Dimensões características do processo de cravamento.

A variável *rugosidade do punção* não pode ser modelada no programa utilizado, porém sabe-se que existe uma relação entre rugosidade e coeficiente de atrito conforme descrito por Lee *et al.*, (2002), e mostrado na figura 2.5.

3.2 – Método Experimental e Materiais

3.3.1 – Planejamento Experimental Preliminar

As variáveis de influência foram selecionadas baseando-se na revisão literária exposta no Capítulo 2, no modelo físico, no método numérico exposto no Capítulo 3 e na experiência anterior do autor.

Como variáveis de influência selecionadas têm-se:

1. *Espessura da parede do tubo;*
2. *Profundidade de indentação*, que determina a folga na articulação e tem grande influência na nucleação de trincas como se discutiu na revisão literária no item 2.1;
3. *Folga para indentação*, localizada entre diâmetro interno do corpo de prova e a esfera, medida na linha de centro do punção cravador;
4. *Rugosidade do punção;*
5. *Geometria do punção;*
6. *Diâmetro da esfera.*

Além destas variáveis de influência, tem-se a variável *dureza do material*, neste trabalho foi considerada uma variação de dureza de 25 Brinell para os corpos de prova. Assumindo-se que a variação de dureza seja inerente ao processo de modo que pode ser verificada em lotes de mesma corrida.

Considerando-se todas estas variáveis, foi planejada a realização de um primeiro conjunto de experimentos num planejamento fatorial fracionado 2^{6-1} , Montgomery *et al.*, (1991), ou seja, seis variáveis de influência com dois níveis para cada variável.

A escolha do experimento fatorial como primeira análise das variáveis escolhidas foi feita levando-se em consideração os aspectos:

1. Verificação da influência das variáveis quando as mesmas estão atuando em conjunto;
2. Verificação das interações de maior importância entre as variáveis estudadas;
3. Redução de custos e tempo, pois foi possível fracionar pela metade as combinações possíveis entre as variáveis de influência.

Na condição de fracionado $\frac{1}{2}$, tem-se uma resolução VI. Nesse caso, o planejamento de experimentos permite verificar os efeitos das variáveis principais, os efeitos das interações entre duas ou três variáveis simultaneamente. A seguir são apresentadas as definições dos níveis a serem estudados:

- I. *Espessura da parede do tubo* - os níveis: 0,85mm e 1,25mm abrangem o limite inferior e superior de tolerância usualmente especificada para a parede do tubo quando se utiliza esfera de diâmetro de 7 a 12 mm;
- II. *Profundidade da indentação* - níveis: 0,50mm e 0,85mm, tomados a partir da profundidade utilizada como parâmetro do processo industrial;
- III. *Folga para indentação* - níveis: 0,25mm e 0,75mm, que também representam as condições limites verificadas na prática industrial;
- IV. *Rugosidade do punção* - níveis: Ra: 0,25 μm (polido) e Ra: 2,50 μm (jateado), o polimento é primordial para evitar-se o aparecimento de trincas no cravamento;
- V. *Geometria do punção* - níveis: quadrado com perfil de tronco de pirâmide, sem raio de arredondamento (Raio 0) e esférico (Raio 1), considerado situações extremas da forma geométrica, conforme mostrado na revisão bibliográfica;

VI. *Diâmetro da esfera* - níveis: 7 e 12 mm, pois têm-se informações práticas de que para diâmetros de esfera menor que 9mm, a frequência do aparecimento de trincas durante o processo é maior e portanto aumenta o índice de refugo.

Neste planejamento experimental foram definidas as seguintes variáveis de resposta, que foram avaliadas após a realização dos ensaios com o dispositivo de cravamento:

- (a) Em função da *profundidade da indentação*, pois sabe-se que a energia de penetração para fratura é função da *profundidade da indentação*;
- (b) *Força para extração* da esfera após o cravamento, que é um requisito funcional do produto;
- (c) Medição da *folga resultante entre esfera e corpo tubular* após o cravamento, também um requisito funcional do produto, e que deve se apresentar entre 0,02 e 0,15mm, como apresentado nas justificativas deste trabalho.

Após a execução dos ensaios de cravamento foi feita a verificação dos dados obtidos através da Análise de Variância – ANOVA, disponível no software comercial Minitab versão 2000, que permite calcular a significância dos efeitos das variáveis estudadas bem como sua ordem de influência na variável de resposta força de indentação.

Caso não houvesse significância de nenhuma variável de influência estudada, pelo fluxograma seriam verificadas e definidas outras possíveis variáveis e seria retomado o planejamento de outros experimentos.

Havendo significância, foi procedida a medição da *folga entre a esfera e o tubo*. Após essa medição, também foi feita a verificação dos dados obtidos através de Análise de Variância – ANOVA e, foram calculadas as significâncias dos efeitos das variáveis de influência estudadas e obtido o nível de significância nos resultados da variável de resposta *folga para indentação*.

Da mesma maneira, caso não houvesse significância para essa variável de resposta, novamente seriam verificadas e definidas outras possíveis variáveis e retomado o planejamento de outro experimento.

A *análise de fratura nas indentações* foi feita após a medição da *folga da esfera*. Esta análise consiste na verificação de presença de trincas com um microscópio eletrônico de varredura – MEV, e foi realizada no Laboratório de caracterização do DEMA-FEM.

Como requisito funcional do produto, tem-se que ele deve estar isento de trincas passantes de quaisquer dimensões, pois as mesmas causam a perda de vácuo no sistema em que o componente tubular será montado. Para *verificação de trincas passantes* foi feito um *ensaio de vazamento* para avaliar a perda de vácuo durante um período de tempo específico.

Com os dados obtidos para todos cps, foi identificada a condição mais crítica no cravamento na qual aparecem trincas e micro-trincas, validando a hipótese de que para um cravamento que apresente como resultado uma maior *força de indentação*, tem-se o aumento da probabilidade do aparecimento de trinca, (vide item 2.2 – Influência da Geometria da Punção na Propagação da Trinca).

Uma vez feita a análise de fratura, foram feitos os ensaios de *extração da esfera*. A verificação dos dados obtidos também foi feita através de Análise de Variância – ANOVA, na qual foram calculadas as significâncias e a ordem de influência dos efeitos das variáveis estudadas.

Caso não fosse verificada significância para as variáveis estudadas o planejamento de experimentos seria refeito. Após o término dos primeiros experimentos fatoriais fracionados, foi feito o *ensaio de vazamento* para verificação da existência de trinca passante.

O planejamento experimental está descrito de forma sumarizada no fluxograma da figura 3.5.

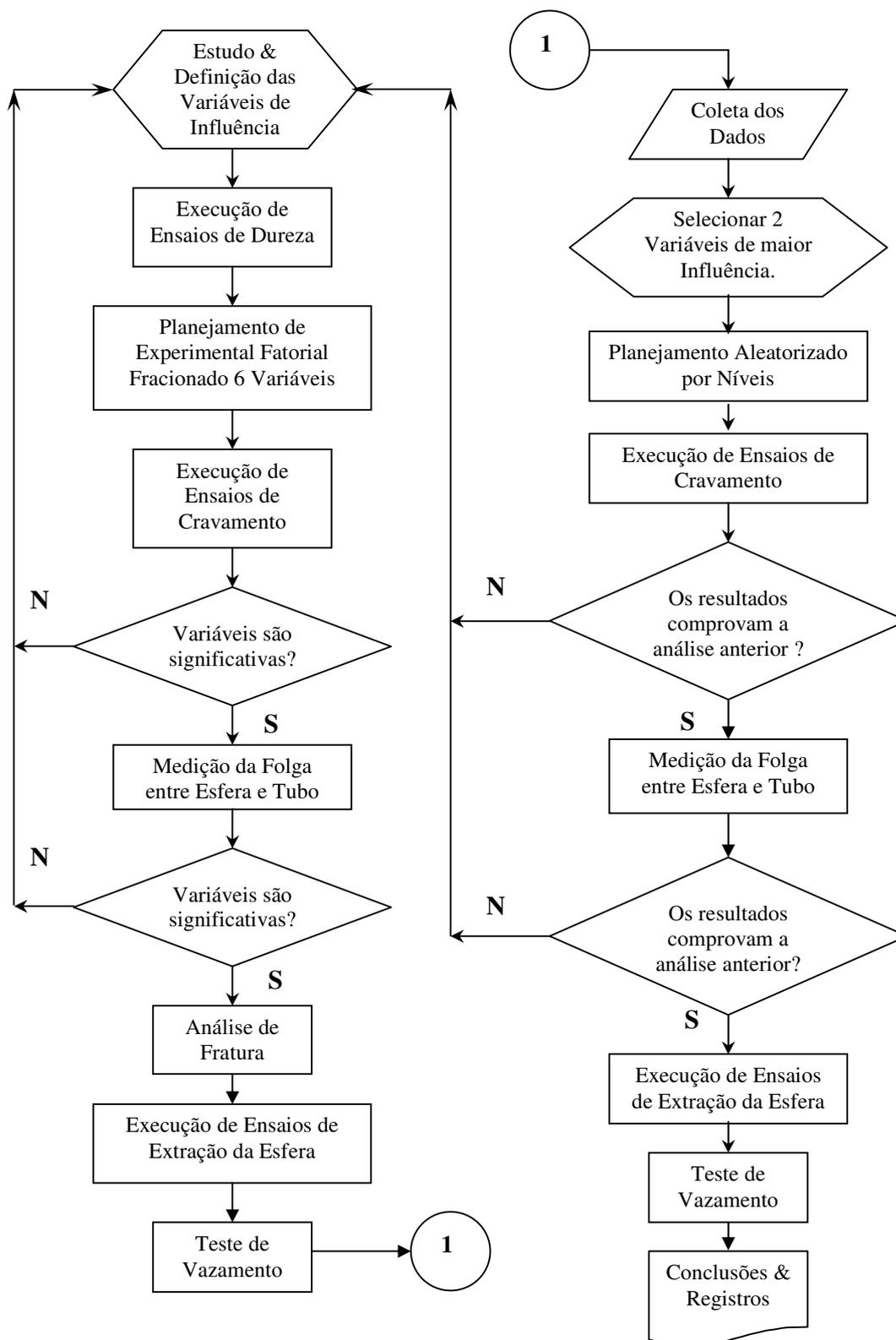


Figura 3.5 – Fluxograma do planejamento experimental

3.3.2 – Planejamento Aleatorizado por Níveis

Todos os resultados desses ensaios foram coletados e baseando-se no nível de significância de cada variável de influência estudada, foram selecionadas as duas variáveis de maior influência e foi planejado o segundo conjunto de experimentos baseado no planejamento aleatorizado por níveis com os objetivos de:

1. Validar os resultados do planejamento fatorial fracionado preliminar,
2. Replicar alguns ensaios,
3. Ter um melhor detalhamento da influência das duas principais variáveis estudadas.

Tendo reduzido o estudo para duas variáveis de influência, foram executados novos ensaios de cravamento, de medição da *folga para indentação*, medição da *folga entre a esfera e o componente tubular* e *ensaios de vazamento*, verificando-se a consistência dos resultados obtidos através da Análise de Variância – ANOVA.

Caso houvesse algum experimento que não apresentasse significância para alguma variável escolhida, seria feito novo planejamento e execução de ensaios.

3.3.3 – Dispositivo de Cravamento

Para a realização dos ensaios de cravamento, foram projetados, construídos e montados os componentes do dispositivo de cravamento de acordo com o desenho do projeto que pode ser visto na figura 3.6 e está detalhado no relatório FAPESP, processo N°2004/00972-3.

O dispositivo de cravamento foi concebido para realizar ensaios de:

1. Cravamento do corpo de aço em esfera de diâmetros 7 e 12 mm;
2. Extração (“pull out”) da esfera após o cravamento.

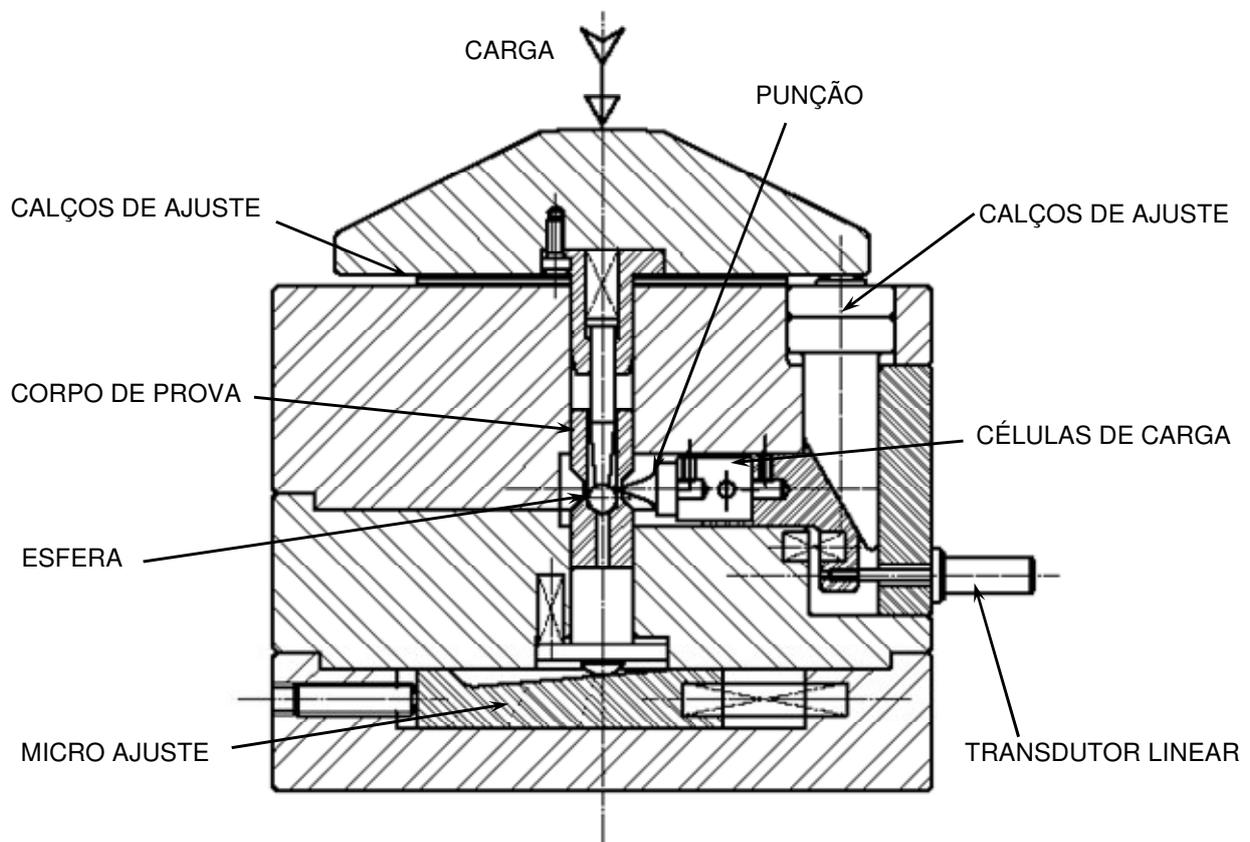


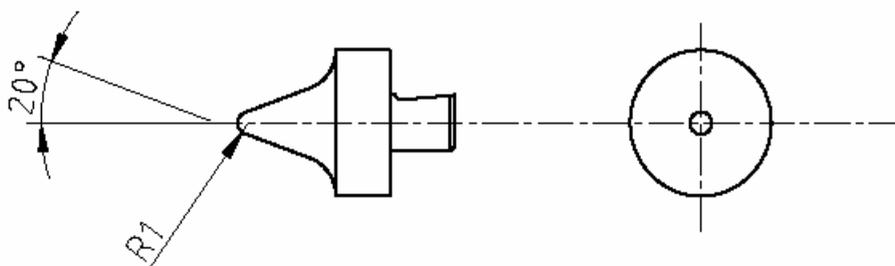
Figura 3.6 – Desenho em corte do dispositivo para cravamento utilizado nos ensaios.

Esse dispositivo consta de três punções de cravamento para cravar três indentações, com profundidades controláveis, na superfície tubular externa do corpo de prova.

Foi definida a utilização de três punções para o cravamento, pois isso possibilita uma condição de três apoios para a esfera, com estabilidade para medição da *folga da esfera* e da *força de extração* da esfera após cravamento.

Na figura 3.7 são apresentadas as duas formas geométricas para os punções: esférica e quadrada com perfil de tronco de pirâmide.

PUNÇÃO ESFÉRICO



PUNÇÃO QUADRADO

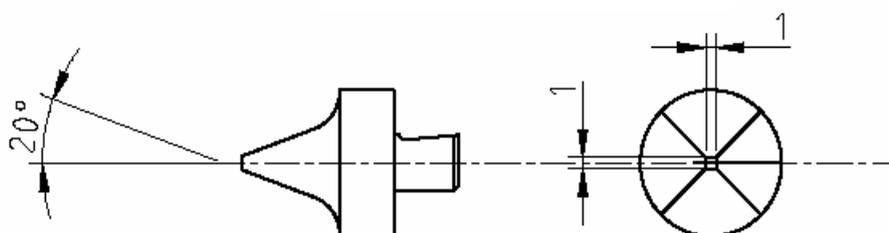


Figura 3.7 – Dimensões principais e geometria dos punções utilizados.

O dispositivo permite:

- 1.O ajuste do *posicionamento dos punções* cravadores em relação ao centro da esfera do punção,
- 2.O ajuste da *profundidade da indentação*,
- 3.A equalização das três indentações na preparação dos experimentos.

As figuras 3.8 e 3.9 apresentam o dispositivo construído e alguns detalhes de seus componentes.

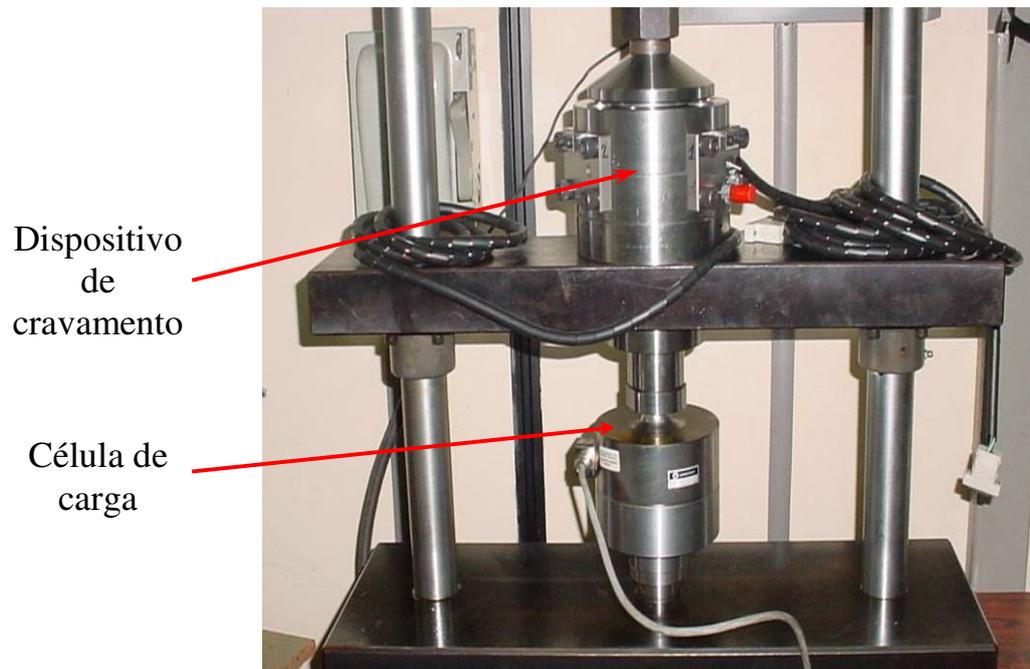


Figura 3.8 – Dispositivo de cravamento montado em prensa hidráulica vertical.

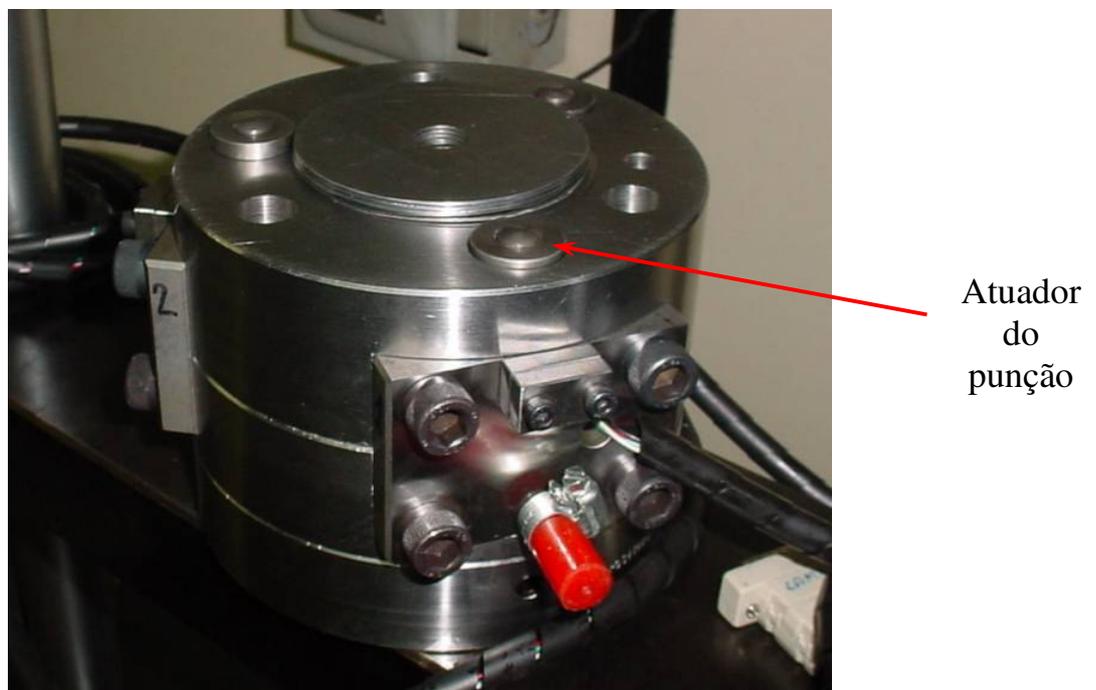


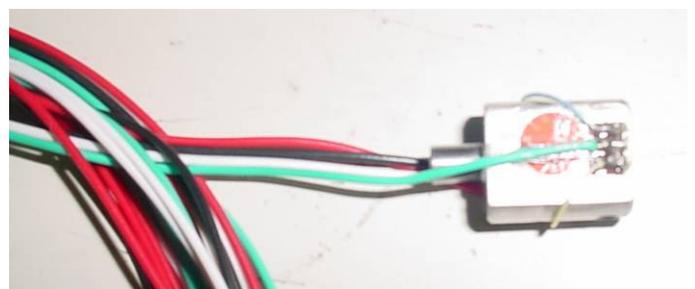
Figura 3.9 – Vista do dispositivo de cravamento com detalhes dos atuadores dos punções.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10 – (a) Vista do posicionador das esferas
(b) Penetrador de ponta esférica
(c) Célula de carga do penetrador

Para a medição do deslocamento dos punções durante o cravamento, foram confeccionados transdutores de deslocamento, lâminas de aço mola com extensômetros elétricos, como mostrado na figura 3.11.

Após alguns ensaios, observou-se que esses dispositivos não eram adequados para a medida correta dos deslocamentos encontrados nos ensaios.

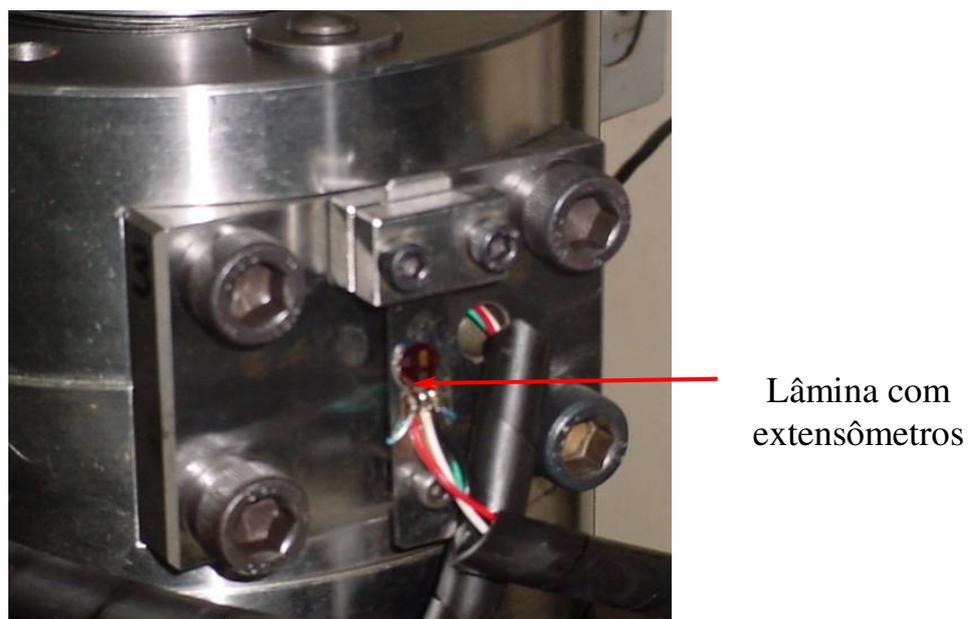


Figura 3.11 – Lâmina com extensômetros elétricos para medida do deslocamento dos punções.

Desse modo, optou-se por realizar essa medida com um dispositivo LVDT disponível no laboratório e que permite leituras de deslocamentos de até 200 mm. Esse dispositivo foi acoplado no componente vermelho de Plastiprene® mostrado nas figuras 3.8 e 3.9.

Uma célula de carga foi acoplada em um dos punções de modo que foi possível a obtenção de resultados da *força de indentação* necessária para o cravamento em cada condição ensaiada. A célula de carga foi calibrada empregando-se uma célula aferida, com precisão de 0,05%, e capacidade de 100kN, disponível na prensa em que o dispositivo foi montado, figura 3.8.

Para ajustar o posicionamento dos punções em relação ao centro da esfera e proceder a equalização dos mesmos, foi utilizado um paquímetro de 150mm com precisão de 0,05mm, marca Mitutoyo.

Com a utilização do transdutor linear fixado diretamente no punção e da célula de carga acoplada no punção, a *profundidade de penetração do punção* pôde ser medida em função de seu deslocamento e desse modo foram obtidos resultados da *força de indentação* em função da

profundidade de penetração. Para obtenção “on line” dos resultados dos ensaios, o transdutor linear e as células de carga foram conectados ao sistema de aquisição de dados Spider 8 – Catman.

Com o dispositivo descrito foi possível levantar a curva *força de indentação x profundidade* para todos os experimentos e os resultados encontrados são apresentados e discutidos no próximo capítulo.

Desde que a tensão de escoamento do material a ser cravado é uma função somente da deformação, pode-se considerar que o valor da velocidade de avanço do punção não afeta o comportamento da deformação ou da *força de indentação*, (Shirgaokar *et al.*,2001).

Considerando essa premissa, e os valores das *profundidades* utilizadas nos ensaios (0,50 e 0,85mm), e objetivando obter precisão na forma da curva *força de indentação x profundidade da indentação*, foi adotada uma velocidade média de avanço do punção igual a 0,25mm/s, com uma frequência de aquisição de dados de 1/25 segundo.

3.3.4 – Material dos corpos-de-prova

A - Composição Química

O material utilizado para os ensaios de cravamento a frio foi o aço AISI 12L14 equivalente ao 9SMnPb28 – DIN1651 – laminado a quente, tabela 3.2, que é um aço recomendado para usinagem em tornos automáticos, de alta velocidade, utilizados na produção seriada de peças de pequeno e médio porte. A análise por micro-sonda no MEV comprovou a composição especificada para esse material.

Tabela 3.2 – Composição Química do Aço AISI 12L14 - MATWEB, 2006.

Classificação	Composição Química (% de massa)					
	C	Fe	Mn	P	Pb	S
Especificação AISI 12L14 (9SMNPB28)	Max. 0,15	97,91- 98,70	0,85 - 1,15	0,04 - 0,09	0,15 - 0,35	0,26 - 0,35
Valores encontrados na micro-sonda pelo MEV	NA	98,67	0,85	NA	0,30	NA

B- Dureza

A faixa de dureza medida para esse material foi de 114 a 140 HB e esses resultados com o durômetro Otto Wolpert-Werke GmbH, tipo Testor HT Super, ano 1972, carga de 187,5 kgf e esfera de 2,5mm de diâmetro.

Como essa variação da dureza é normalmente encontrada em um lote de produção de mesma corrida de laminação, obedecendo a uma variação estatística normal, foi assumido que essa faixa de variação é uma condição inerente ao processo, considerando-se também o fato de que para um controle da faixa de dureza menor que 25 Brinell tornaria o processo custoso e inviável em função de ser necessária a inspeção da dureza em praticamente em 100% das peças.

3.3.5 – Rugosidade dos Corpos de Prova

A rugosidade nos corpos de prova foi obtida por torneamento, com rugosidade em torno de $3,00 \mu m$, objetivando uma condição econômica e que permita o fácil deslizamento dos punções que conformarão o cravamento.

O componente mecânico industrial que sofre a conformação da indentação pode ter uma cobertura de oxidação negra. Todavia neste trabalho, foi considerada a conformação no aço sem cobertura para facilitar o estudo óptico para identificação de possíveis trincas após o cravamento.

Os corpos-de-prova foram fabricados, segundo as especificações apresentadas na figura 3.12 e a figura 3.13 apresenta alguns exemplares, já com as indentações dos punções. Os cps 13A e 13C têm indentações quadradas com profundidade de 0,85mm os cps 13B e 13D estão com indentações esféricas com profundidade de 0,85mm.

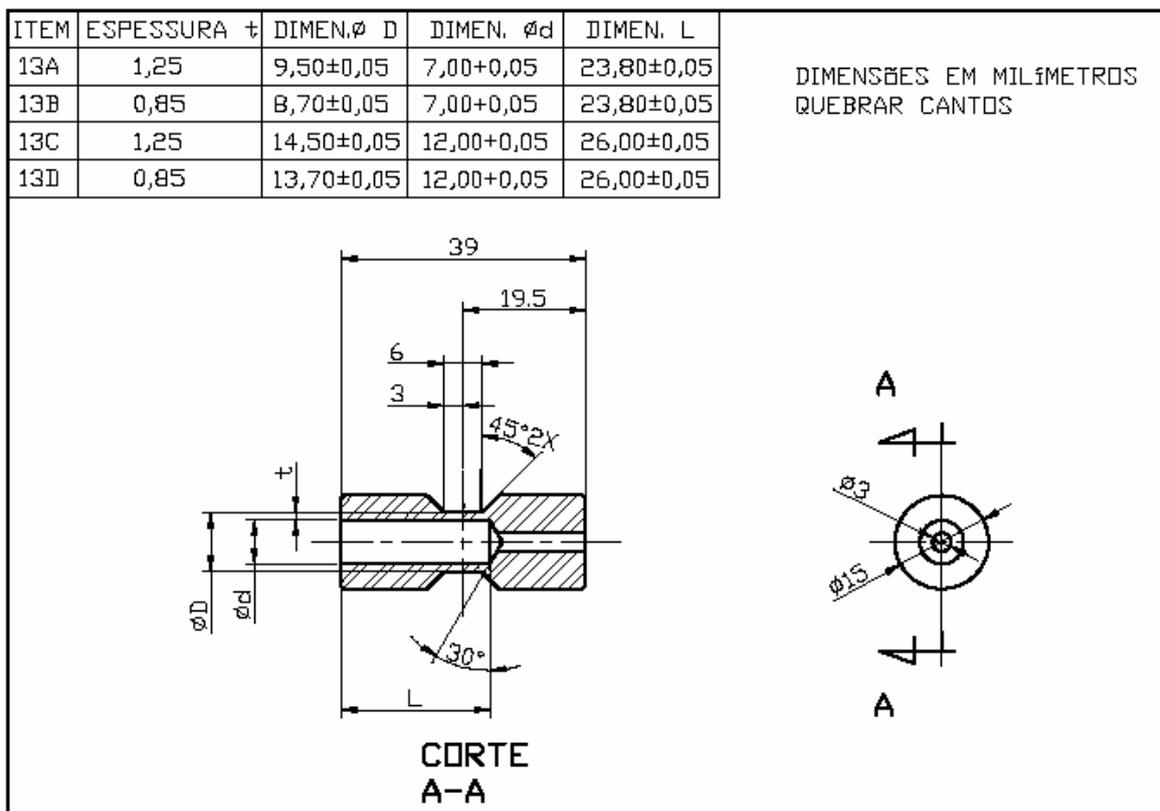


Figura 3.12 – Especificação dimensional dos corpos de prova

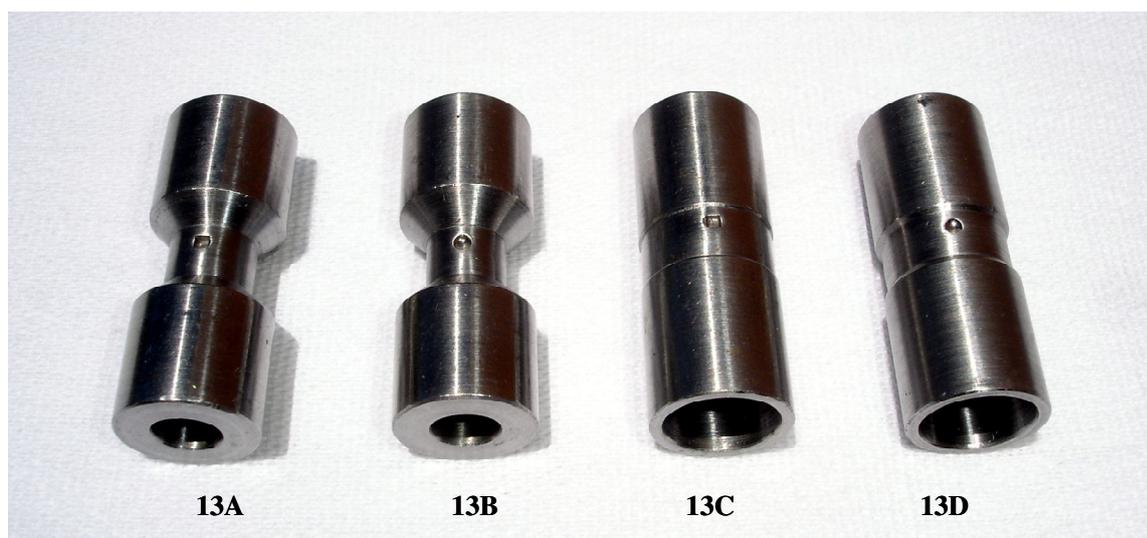


Figura 3.13 – Corpos-de-prova empregados nos ensaios de cravamento.

3.4 – Descrição dos Ensaios

3.4.1 – Ensaio de Cravamento

Considerando as seis variáveis de influência definidas no item 3.4.1, cada uma dessas variáveis foi avaliada em dois níveis num planejamento fatorial fracionado 2^{6-1} , tendo como variável de resposta a *força de indentação*, realizando-se apenas um ensaio para cada uma das combinações fatoriais apresentadas na tabela 3.3, experimento fatorial $2^{6-1} - 1/2$ fracionado.

Tabela 3.3 – Ordem e condições empregadas nos ensaios de cravamento.

	Ensaios	Espessura do Tubo (mm)	Profundidade da Indentação (mm)	Folga para Indentação (mm)	Rugosidade Ra (μm)	Geometria do Punção Raio (mm)	Diâmetro da Esfera (mm)
Q U P U D N R Ç A D O	1	0,85	0,50	0,25	0,25	0	7
	2	1,25	0,50	0,25	0,25	0	12
	3	0,85	0,85	0,25	0,25	0	12
	4	1,25	0,85	0,25	0,25	0	7
	5	0,85	0,50	0,75	0,25	0	12
	6	1,25	0,50	0,75	0,25	0	7
	7	0,85	0,85	0,75	0,25	0	7
	8	1,25	0,85	0,75	0,25	0	12
Q U P U D N R Ç A D O	9	0,85	0,50	0,25	2,5	0	12
	10	1,25	0,50	0,25	2,5	0	7
	11	0,85	0,85	0,25	2,5	0	7
	12	1,25	0,85	0,25	2,5	0	12
	13	0,85	0,50	0,75	2,5	0	7
	14	1,25	0,50	0,75	2,5	0	12
	15	0,85	0,85	0,75	2,5	0	12
	16	1,25	0,85	0,75	2,5	0	7
E S P U É N R Ç I Ã C O	17	0,85	0,50	0,25	0,25	1	12
	18	1,25	0,50	0,25	0,25	1	7
	19	0,85	0,85	0,25	0,25	1	7
	20	1,25	0,85	0,25	0,25	1	12
	21	0,85	0,50	0,75	0,25	1	7
	22	1,25	0,50	0,75	0,25	1	12
	23	0,85	0,85	0,75	0,25	1	12
	24	1,25	0,85	0,75	0,25	1	7
E S P U É N R Ç I Ã C O	25	0,85	0,50	0,25	2,5	1	7
	26	1,25	0,50	0,25	2,5	1	12
	27	0,85	0,85	0,25	2,5	1	12
	28	1,25	0,85	0,25	2,5	1	7
	29	0,85	0,50	0,75	2,5	1	12
	30	1,25	0,50	0,75	2,5	1	7
	31	0,85	0,85	0,75	2,5	1	7
	32	1,25	0,85	0,75	2,5	1	12

O valor considerado como resultado de cada ensaio foi a máxima *força de indentaçã*o medida em cada combinação, de modo que foi possível avaliar qual a combinação de níveis exigiu maior quantidade de energia para que o cravamento fosse executado.

Com relação à variável *geometria do punçã*o foram levados em consideração a superfície da indentação e o volume de material deslocado em função da profundidade da indentação. No Apêndice “A” encontra-se o cálculo de equivalência de volume e superfície da indentação para ambos os punções.

Como para o punção esférico foi adotado uma raio de 1mm e para o punção quadrado, lados com 1mm, tem-se que o volume do punção esférico é em média 4,34% maior que o volume do punção quadrado, e a superfície do punção esférico é em média 0,45% menor que a superfície do punção quadrado.

3.4.2 – Ensaio de Extração de Esferas

Como proposto no plano de trabalho inicial, a *força de extraçã*o da esfera é uma variável de resposta importante, pois pode ser associada à força de extração da haste do freio que é um dos requisitos do produto.

Para avaliar essa *força de extraçã*o foi empregado o mesmo dispositivo já apresentado inicialmente, utilizando-se um punção para empurrar a esfera pelo furo de menor diâmetro do CP e a célula de carga de 100 kN para medir a *força de extraçã*o com precisão de 0,05%.

A velocidade de extração adotada foi de 0,40 mm/s com freqüência de aquisição dos dados igual a 1/25 segundos.

Durante os ensaios de extração da esfera foram perdidos alguns valores da *força de extraçã*o referentes ao punção de geometria quadrada. Todavia, considerando que os resultados obtidos nos ensaios de cravamento para a variável geometria do punção apresentaram uma condição crítica de conformação para a forma quadrada, isto é, uma maior força de indentação,

ver item 4.3.1, foi então fixada a variável *geometria do punção* no nível forma esférica de raio igual a 1mm.

Portanto, para esses ensaios foram consideradas cinco variáveis de influência: *espessura do tubo; profundidade; folga para indentação; rugosidade e diâmetro da esfera*, sendo que cada uma das variáveis foi avaliada em dois níveis num planejamento fatorial fracionado 2^{5-1} .

Com a variável de resposta *força de extração* de esferas, tem-se as combinações fatoriais apresentadas na tabela 3.4, experimento fatorial 2^{5-1} - ½ fracionado.

Tabela 3.4 – Ordem e condições empregadas nos ensaios de extração de esferas.

	Ensaio	Espessura do Tubo (mm)	Profundidade Média Real - Medida - (mm)	Folga para Indentação (mm)	Rugosidade Ra (µm)	Geometria do Punção Raio (mm)	Diâmetro da Esfera (mm)
PUNÇÃO ESFÉRICO POLIDO	17	0,85	0,40	0,25	0,25	1	12
	18	1,25	0,40	0,25	0,25	1	7
	19	0,85	0,80	0,25	0,25	1	7
	20	1,25	0,80	0,25	0,25	1	12
	21	0,85	0,40	0,75	0,25	1	7
	22	1,25	0,40	0,75	0,25	1	12
	23	0,85	0,80	0,75	0,25	1	12
	24	1,25	0,80	0,75	0,25	1	7
PUNÇÃO ESFÉRICO JATEADO	25	0,85	0,40	0,25	2,5	1	7
	26	1,25	0,40	0,25	2,5	1	12
	27	0,85	0,80	0,25	2,5	1	12
	28	1,25	0,80	0,25	2,5	1	7
	29	0,85	0,40	0,75	2,5	1	12
	30	1,25	0,40	0,75	2,5	1	7
	31	0,85	0,80	0,75	2,5	1	7
	32	1,25	0,80	0,75	2,5	1	12

3.4.3 – Medição da Folga da Esfera após o Cravamento

Após os ensaios de cravamento, foram utilizados os mesmos Cps para medição da *folga entre a esfera e o diâmetro interno do tubo*, sendo também consideradas as seis variáveis de influência definidas no item 3.4.1, tendo como variável de resposta a *folga da esfera*, com as combinações fatoriais apresentadas na tabela 3.3.

Como descrito no planejamento experimental, a *folga da esfera* após o cravamento, também é uma variável de resposta importante, pois se for maior que 0,15mm pode causar nível de ruído excessivo e se for menor que 0,02mm causará o travamento do acionamento.

Para avaliar a *folga da esfera* após o cravamento foi utilizado um método de medição que consiste em:

- 1°. Certificar-se de que a esfera esteja assentada no fundo do furo do Cps;
- 2°. Medir a distância do topo da esfera até o topo da superfície lateral do Cps;
- 3°. Empurrar a esfera de encontro às projeções das indentações através de pino e martetele de 50 gramas;
- 4°. Executar novamente o item 2°;
- 5°. Calcular a *folga da esfera*, que será a diferença entre a primeira medida e a segunda medida, acima descritas.

3.4.4 – Análise de Trincas – Microscopia Eletrônica de Varredura

Considerando que um dos objetivos deste trabalho é avaliar algumas variáveis envolvidas no processo de cravamento de modo a evitar o surgimento de trincas passantes, a análise apresentada demonstrou a importância de se garantir uma *folga para indentação* adequada, que é a folga entre a superfície da esfera e o diâmetro interno do tubo.

Esta *folga para indentação*, como já foi mencionado no item 3.1, figura 3.2, é função do posicionamento do punção durante o cravamento, pois uma variação indesejável desse posicionamento causa uma variação da folga entre o produto cravado e a esfera, o que pode levar a um aumento significativo da força de indentação e conseqüentemente, a um maior risco de elevação e concentração de tensões com a nucleação e propagação de trincas na região deformada.

Com o objetivo de avaliar a rugosidade de cravamento para verificar a presença de trincas e associá-las às condições empregadas nos ensaios, essas superfícies foram analisadas no

microscópio eletrônico de varredura JEOL JXA-840 A do Laboratório de Caracterização de Materiais do DEMA-FEM-UNICAMP.

3.4.5 – Ensaio de Vazamento

Para verificação da presença de trincas passantes após o cravamento, foi realizado o *ensaio de vazamento* em todos cps descritos nos experimentos fatoriais fracionados e experimentos aleatorizados por níveis, seguindo o procedimento:

1. Sistema com pressão negativa constante de 25 polegadas de Hg ou 635 mm de Hg;
2. Verificada a estabilização da pressão do sistema, i.e., sem a montagem de cp, observou-se que a pressão negativa cai de 25 para 21 polegadas de Hg em 10 segundos e a partir deste ponto, após 60 segundos, a queda observada foi de 1 polegada de Hg;
3. Após os cps serem submetidos à pressão de 25 polegadas de Hg, procedeu-se a estabilização após 10 seg e verificou-se a queda de pressão.
4. Se a queda foi maior que 1 polegada de Hg em 60 seg. considerou-se que o CP possuía uma trinca passante.

Para o ensaio de vazamento foi utilizada uma rede de vácuo industrial mantida por uma bomba de vácuo marca Dositec, modelo DVM 250/100 - ano de fabricação: 04/2001 e o monitoramento da estabilização e queda de pressão foram feitos através da utilização de manômetro de vácuo marca Willy, modelo NWR - escala de 0 a 30 Pol.Hg, precisão de 2%.

Capítulo 4

Análise de Resultados

4.1 – Método Numérico

A simulação numérica foi feita considerando as variáveis de influência: *espessura do tubo, folga para indentação, geometria do punção e diâmetro da esfera* obedecendo aos mesmos níveis que foram utilizados no planejamento experimental, como pode ser visto na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Ensaio simulados numericamente.

	Ensaio	Espessura do Tubo (mm)	Folga para Indentação (mm)	Geometria do Punção Raio (mm)	Diâmetro da Esfera (mm)
Punção Quadrado	3	0,85	0,25	0	12
	4	1,25	0,25	0	7
	7	0,85	0,75	0	7
	8	1,25	0,75	0	12
Punção Esférico	19	0,85	0,25	1	7
	20	1,25	0,25	1	12
	23	0,85	0,75	1	12
	24	1,25	0,75	1	7

Para a análise do método numérico, foi levantada a curva *força de indentação X profundidade da indentação*, e foi considerado como profundidade máxima o valor de 0,85mm, que é equivalente ao nível 2 dessa variável.

Foram comparadas pelo modelo numérico as *forças de indentação* utilizando para o coeficiente de atrito os valores 0,20 e 0,40, como pode ser visto na figura 4.1, sendo que a diferença menor que 2,5% entre as forças obtidas não foi considerada significativa, e pode ser atribuída ao pouco movimento relativo entre o punção e a superfície do cp.

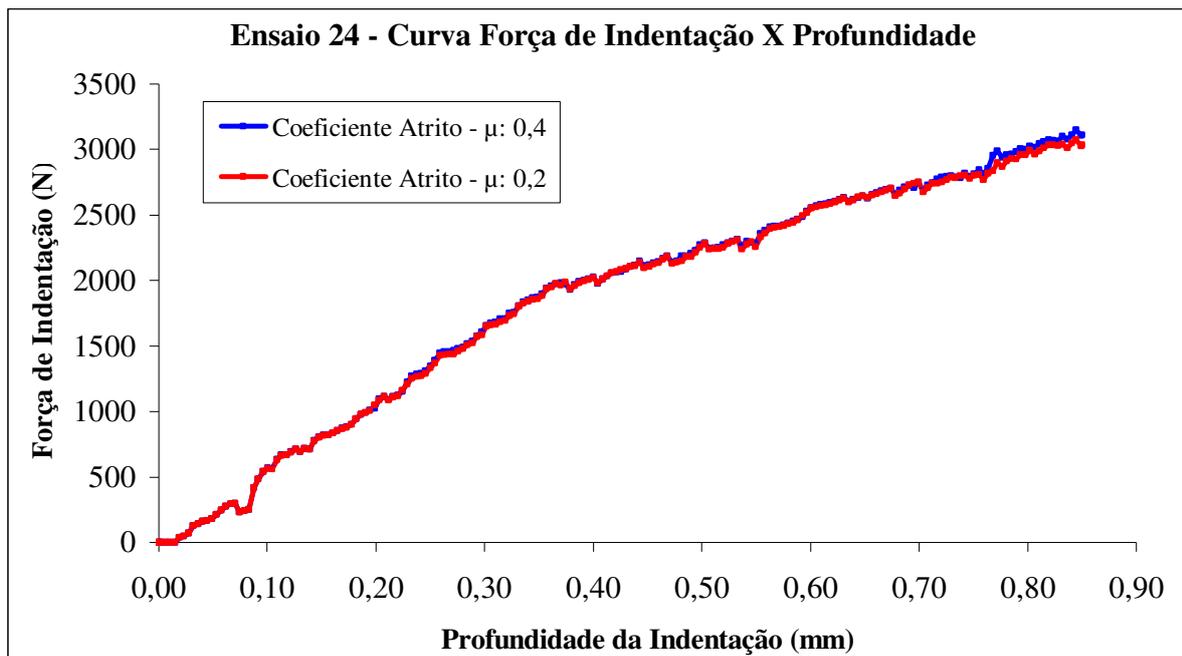


Figura 4.1 – Resultados da simulação numérica para cravamento referente ao ensaio 24, considerando os coeficientes de atrito 0,20 e 0,40.

As figuras 4.2 e 4.3 apresentam os resultados de força de indentação em função da profundidade, para um punção quadrado. Na figura 4.2 têm-se os ensaios 03 e 04 que apresentam em comum a *folga* de 0,25mm entre a superfície da esfera e o diâmetro interno do tubo. A diferença observada nesses ensaios é quanto ao aspecto da curva da força sobre a esfera.

Para esses ensaios, na *profundidade de indentação* aproximadamente igual a 0,20mm tem-se um ponto na curva onde sua inclinação aumenta, mostrando um aumento do gradiente força/profundidade. Isso provavelmente ocorra devido ao início da deformação do material sobre a superfície da esfera, prosseguindo até a profundidade de 0,80mm.

Nota-se também que no início do processo de cravamento, o ensaio 04 apresenta uma maior *força de indentação* até uma profundidade próxima de 0,50mm, que pode ser justificada pela espessura maior do tubo. Todavia, após essa profundidade a inclinação e o crescimento das curvas tornam-se similares, não apresentando mais a influência significativa da *espessura do tubo* na inclinação e crescimento da curva.

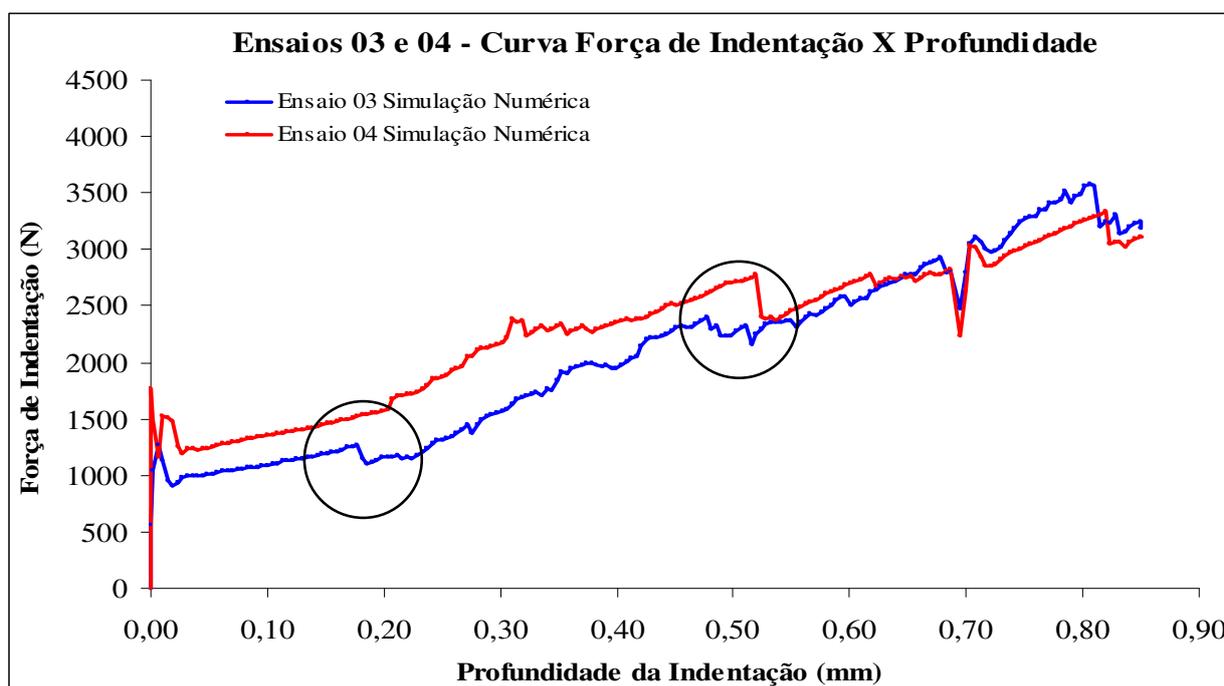


Figura 4.2 – *Força de indentação x Profundidade da indentação*, ensaios 03 e 04.

Na figura 4.3 têm-se os ensaios 07 e 08, que possuem em comum a *folga para indentação* de 0,75mm entre a superfície da esfera e a *geometria do punção* que é quadrada.

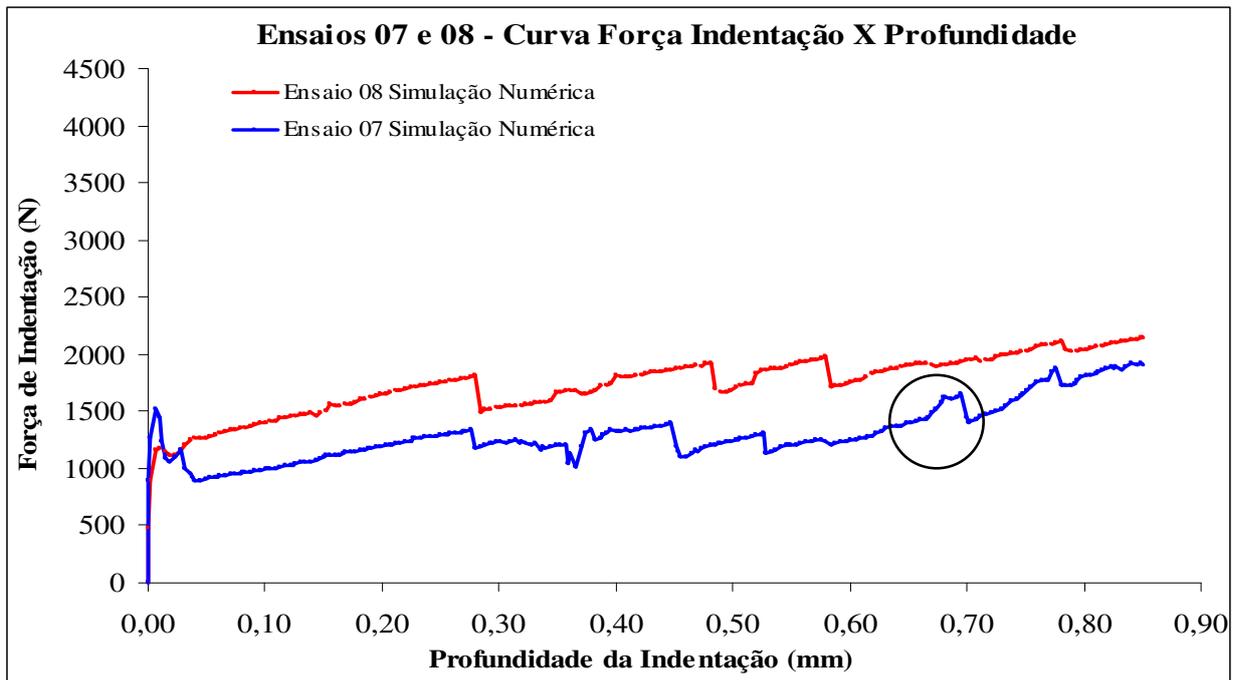


Figura 4.3 – Força de indentação x profundidade da indentação, ensaios 07 e 08.

As curvas *força de indentação X profundidade* desses ensaios, embora estejam em níveis distintos, apresentam praticamente uma mesma inclinação até a profundidade próxima de 0,70mm, sendo que a partir dessa profundidade a amostra 07 apresenta um leve aumento na inclinação da curva, que porém não foi considerado significativo.

Uma importante observação é que a amostra 08, comparativamente à amostra 07, tem uma *espessura do tubo* maior, e embora utilizem *diâmetros de esferas* diferentes, apresentou um nível mais alto para a *força de indentação* até a profundidade próxima de 0,70mm. Essa mudança na inclinação da curva pode estar associada ao momento em que o material do cp deformado pelo punção, se apóia sobre a superfície da esfera, elevando levemente a solitação sobre a superfície da esfera.

Comparando os ensaios 03 e 04 com os ensaios 07 e 08, observa-se uma grande diferença na inclinação das curvas, sendo que as curvas correspondentes aos ensaios 03 e 04 são mais inclinadas e, portanto apresentam uma maior *força de indentação* para a profundidade final de

0,85mm, o que pode ter ocorrido devido a diferença da *folga para indentação* entre os dois grupos de ensaios.

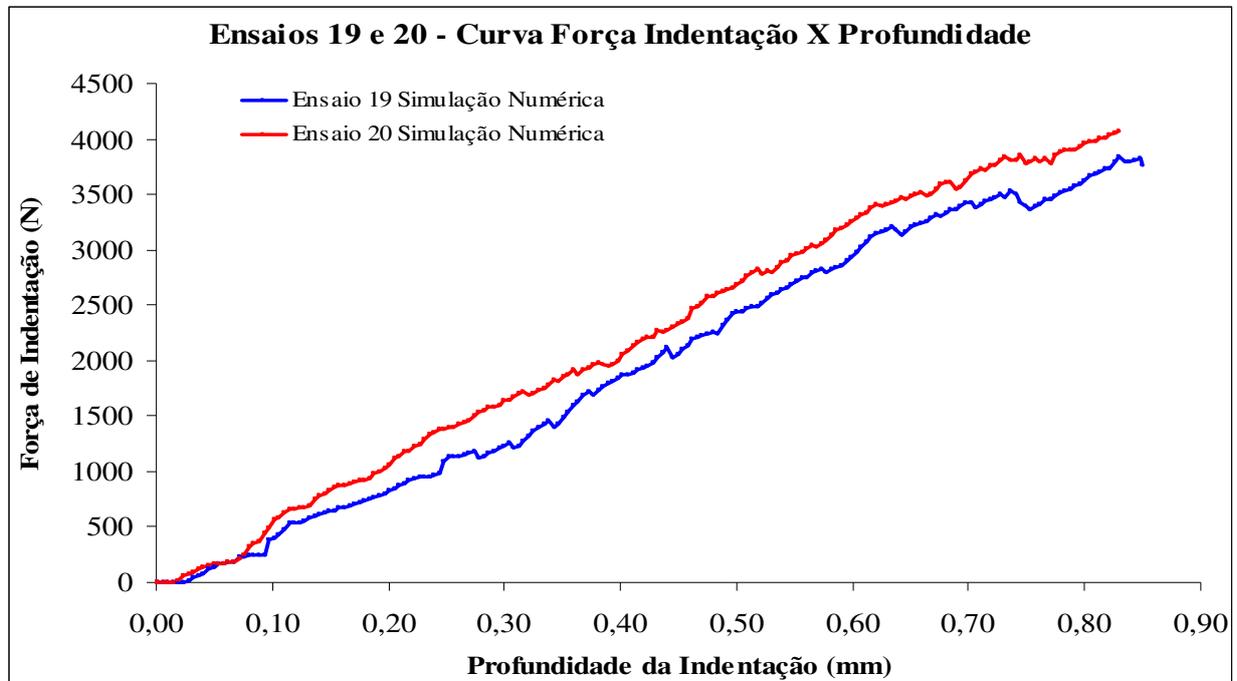


Figura 4.4 – *Força de indentação x profundidade da indentação*, ensaios 19 e 20.

As figuras 4.4 e 4.5 apresentam os resultados de *força de indentação* em função da *profundidade da indentação* para um punção esférico.

Na figura 4.4 têm-se os ensaios 19 e 20, que possuem em comum a *folga para indentação* que é 0,25mm. Nesses ensaios, a inclinação das curvas *força de indentação X profundidade* apresentou-se uniforme até a profundidade de 0,85mm, não apresentando pontos de inflexão nesse intervalo.

O ensaio 20, embora apresente uma curva com mesma inclinação do ensaio 19, possui um nível mais alto de força e que está relacionado à maior *espessura da parede do tubo* utilizada nesse ensaio.

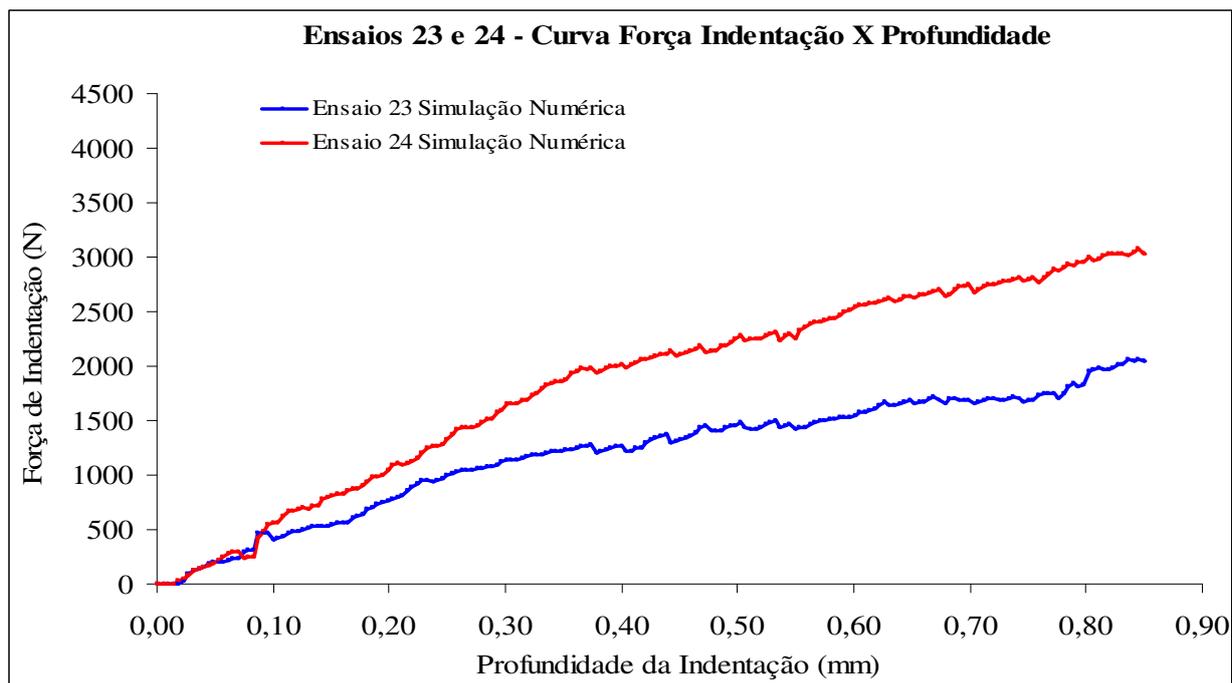


Figura 4.5 – Força de indentação x profundidade da indentação, ensaios 23 e 24.

Na figura 4.5 têm-se os ensaios 23 e 24, que possuem em comum a *folga para indentação* de 0,75mm e a *geometria do punção* que é esférica.

O ensaio 23 tem a espessura de 0,85mm na parede do tubo, como ocorre nos ensaios 3, 7 e 19, sendo que os mesmos apresentam um gradiente força/profundidade menor comparado aos ensaios em que tem a espessura de 1,25mm na parede do tubo, a despeito do *diâmetro da esfera* ser diferente entre esses ensaios, ficando evidenciado que a variável *espessura do tubo* tem maior influência na *força de indentação* que a variável *diâmetro da esfera*.

Uma observação que foi feita na curva do ensaio 23 é que a inclinação da mesma diminui após a profundidade próxima de 0,38mm enquanto que para o ensaio 24 a inclinação diminui após a profundidade próxima de 0,25mm. A mudança nas inclinações das curvas pode estar relacionada à *espessura do tubo*, i.e, o ensaio 24 que tem a espessura maior no cp, permite que o punção se aprofunde mais antes que se inicie a deformação do tubo em áreas que estão nas proximidades da indentação.

Outra particularidade dos ensaios analisados no método numérico é que para os ensaios 03, 04, 07 e 08, indentados com punção quadrado, as curvas se iniciam com aproximadamente 1000N de força de indentação para a profundidade próxima de zero, enquanto que para as amostras 19, 20, 23 e 24, indentados com punção esférico, as curvas se iniciam no ponto zero de força e zero de profundidade, isso pode estar relacionado ao atraso na operação dos cálculos numéricos utilizados pelo software gerando esta imprecisão.

Na tabela 4.2 são apresentados os resultados da simulação numérica. Nessa tabela consta para cada ensaio, a *força máxima de indentação*, a *tensão efetiva máxima*, a *relação tensão efetiva máxima / tensão de escoamento* e a *deformação plástica efetiva*.

Todos os parâmetros apresentados na tabela de resultados apresentam o mesmo efeito na energia de deformação, i.e., os valores de cada parâmetro aumentam conforme a profundidade da indentação aumenta, o que permite então o cálculo de um fator que relaciona esses parâmetros, denominado *fator de intensidade (Fi)*, que obedece a seguinte igualdade:

$$Fi = \frac{FI_{\max} \cdot \sigma_{\text{efet.max}} \cdot \epsilon p_{\text{efet}}}{\sigma_0}$$

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados da simulação numérica.

Resultados da Simulação Numérica					
Ensaio	Força de Indentação Máxima FI_{\max} (N)	Tensão Efetiva Máxima $\sigma_{\text{efet.max}}$ (MPa)	Relação $\sigma_{\text{efet.max}} / \sigma_0$	Deformação Plástica Efetiva Máxima ϵp_{efet}	Fator de Intensidade (Fi) x 10 ³ N
3	3242	875,20	3,72	0,904	10,91
4	3116	852,40	3,63	0,722	8,16
7	1929	780,80	3,32	0,441	2,83
8	2146	758,20	3,23	0,367	2,54
19	3838	878,70	3,74	0,938	13,46
20	4073	820,50	3,49	0,598	8,50
23	2047	750,30	3,19	0,343	2,24
24	3028	783,80	3,34	0,448	4,52

Em função do *fator de intensidade*, pode-se dizer que os ensaios 19, 03, 20 e 04 apresentaram na simulação numérica as maiores solicitações. A variável comum a esses ensaios é a *folga de indentação* de 0,25mm, que causa uma maior deformação do material e pode provocar o aparecimento de trincas passantes.

São apresentadas na figura 4.6 as distribuições das tensões efetivas para cada ensaio simulado numericamente na situação final do processo de cravamento e, na figura 4.7, as deformações plásticas efetivas para cada ensaio simulado.

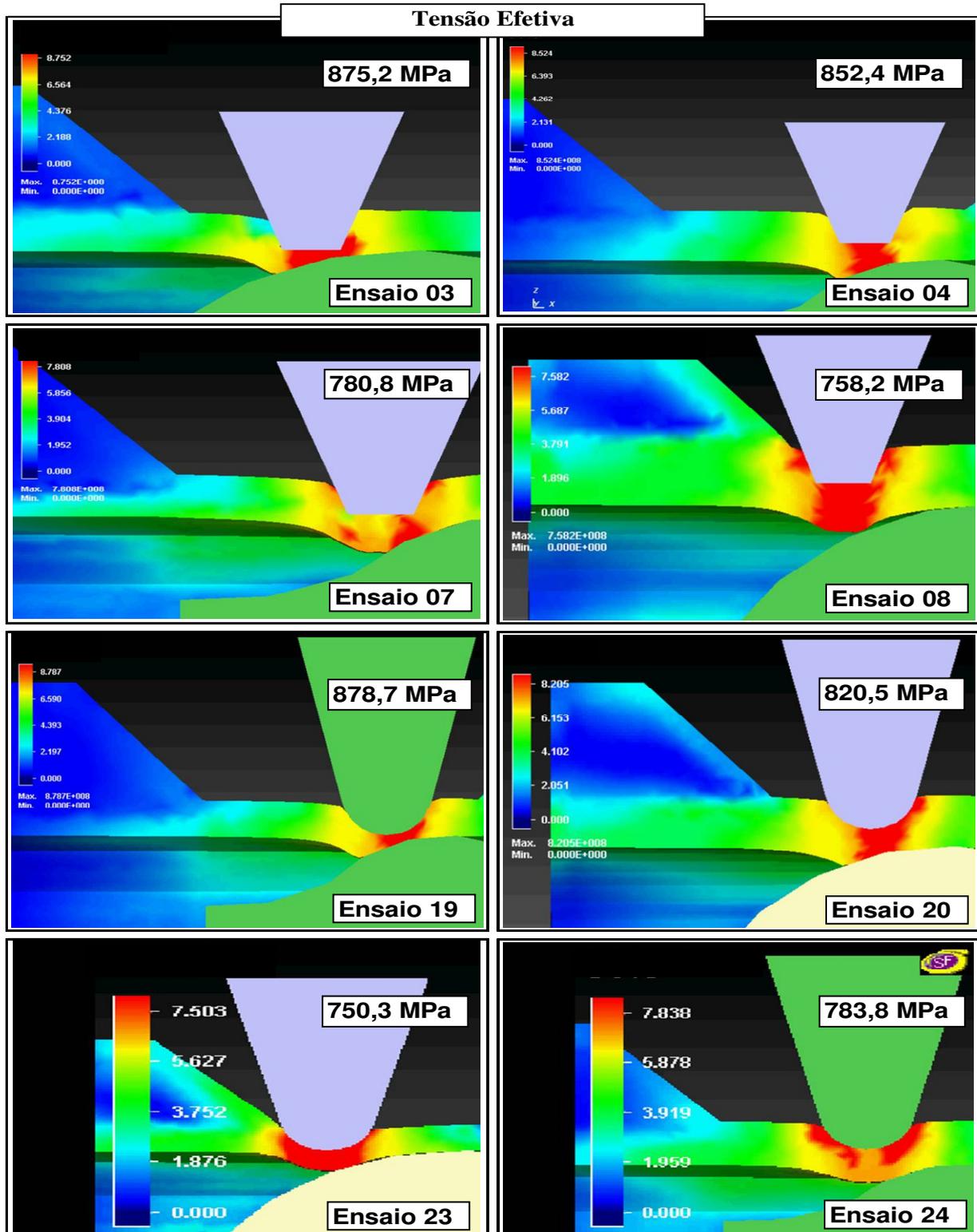


Figura 4.6 – Distribuições das *tensões efetivas* para cada ensaio simulado numericamente até a profundidade de 0,85mm. Em destaque o valor da *máxima tensão efetiva* encontrada.

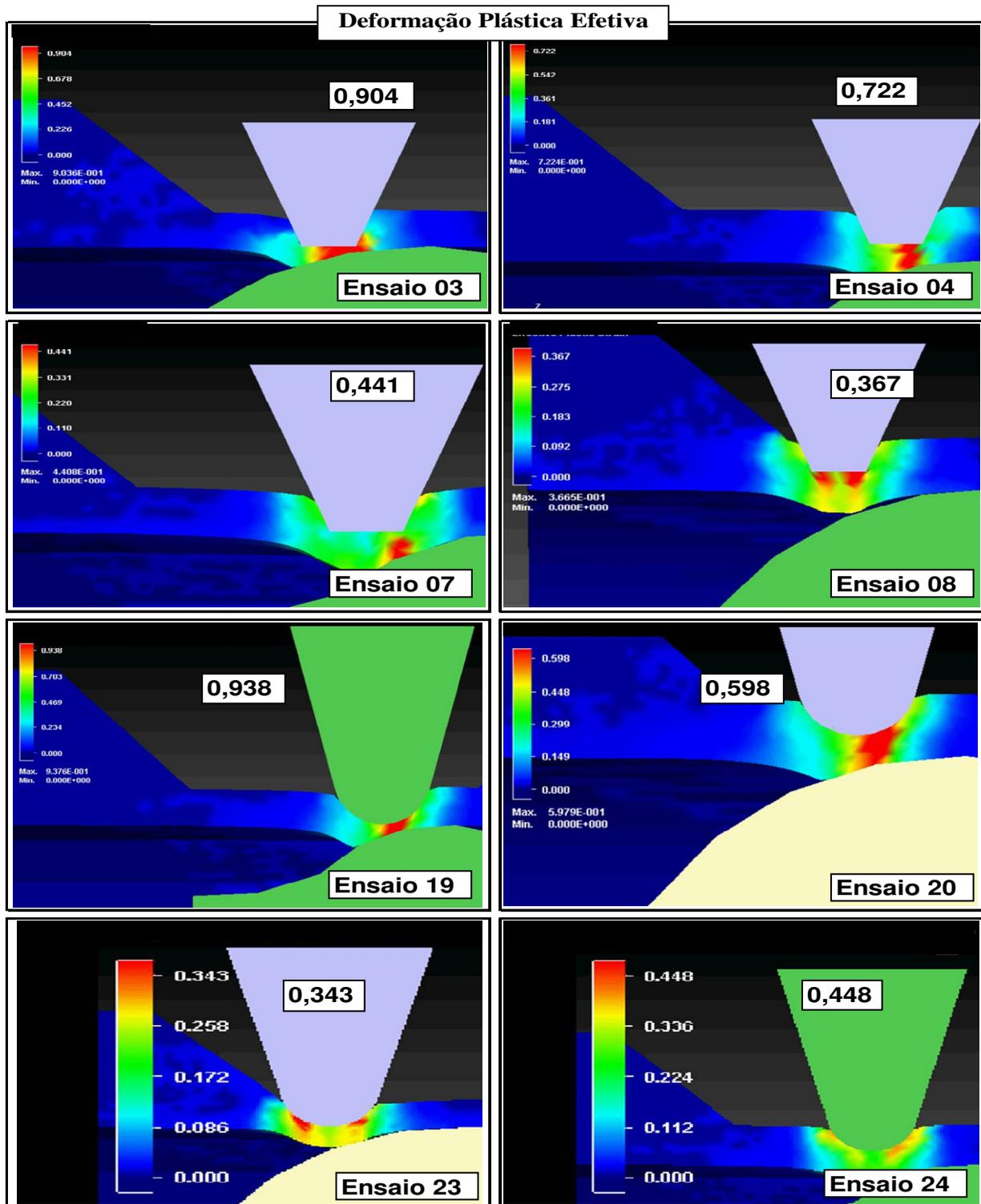


Figura 4.7 – Distribuições das *deformações plásticas efetivas* para cada ensaio simulado numericamente até a profundidade de 0,85mm. Em destaque o valor da *máxima deformação efetiva* encontrada.

4.1 – Método Experimental

4.2.1 – Precisão Dimensional do Dispositivo de Cravamento

A regulagem da *folga para indentação*, obtida indiretamente pela regulagem da distância do centro da esfera ao centro do punção, apresentou o erro de $\pm 0,12\text{mm}$ para o nível da *folga de indentação* de $0,25\text{mm}$ e $\pm 0,22\text{mm}$ para o nível da *folga de indentação* de $0,75\text{mm}$.

A despeito desses erros na obtenção da *força para indentação*, o máximo valor medido no nível de $0,25\text{mm}$ foi $0,37\text{mm}$ e não ultrapassou o mínimo valor medido no nível de $0,75\text{mm}$ que foi $0,53\text{mm}$, validando a diferença entre os níveis, que foi condição necessária para realização dos ensaios fatoriais.

O erro na *profundidade de indentação* foi de $\pm 0,12\text{mm}$ para os níveis de $0,50$ e $0,85\text{mm}$, portanto o valor máximo $0,62\text{mm}$ para o nível de $0,50\text{mm}$, não ultrapassou o valor mínimo $0,73\text{mm}$ para o nível de $0,85\text{mm}$, validando assim a diferença entre esses níveis.

4.2.2 – Primeiro Conjunto de Ensaio de Cravamento

Análise da Força de Indentação

A tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos no primeiro conjunto de ensaios de cravamento relativos ao experimento fatorial fracionado I, que teve por objetivo analisar seis variáveis de influência: *espessura do tubo*; *profundidade da indentação*; *folga para indentação* (folga entre esfera e o diâmetro Interno do tubo); *rugosidade*; *geometria do punção*; *diâmetro da esfera*, tendo como variável de resposta a *força de indentação* (N).

Tabela 4.3 – Experimento fatorial 2^{6-1} – $\frac{1}{2}$ fracionado – variável de resposta: *força de indentação*.

	Ensaio	Espessura do Tubo (mm)	Profundidade da Indentação (mm)	Folga para Indentação (mm)	Rugosidade Ra (μm)	Geometria do Punção Raio (mm)	Diâmetro da Esfera (mm)	Força de Indentação (N)
Q U P A U D N R Ç A D O O	1	0,85	0,50	0,25	0,25	0	7	2859
	2	1,25	0,50	0,25	0,25	0	12	2950
	3	0,85	0,85	0,25	0,25	0	12	4606
	4	1,25	0,85	0,25	0,25	0	7	5763
	5	0,85	0,50	0,75	0,25	0	12	1679
	6	1,25	0,50	0,75	0,25	0	7	3374
	7	0,85	0,85	0,75	0,25	0	7	3680
	8	1,25	0,85	0,75	0,25	0	12	3521
Q U P A U D N R Ç A D O O	9	0,85	0,50	0,25	2,5	0	12	3029
	10	1,25	0,50	0,25	2,5	0	7	4620
	11	0,85	0,85	0,25	2,5	0	7	4557
	12	1,25	0,85	0,25	2,5	0	12	4832
	13	0,85	0,50	0,75	2,5	0	7	3006
	14	1,25	0,50	0,75	2,5	0	12	2633
	15	0,85	0,85	0,75	2,5	0	12	2041
	16	1,25	0,85	0,75	2,5	0	7	5906
E S P F U É N R Ç I A C O O	17	0,85	0,50	0,25	0,25	1	12	2047
	18	1,25	0,50	0,25	0,25	1	7	3657
	19	0,85	0,85	0,25	0,25	1	7	4238
	20	1,25	0,85	0,25	0,25	1	12	4164
	21	0,85	0,50	0,75	0,25	1	7	2083
	22	1,25	0,50	0,75	0,25	1	12	2126
	23	0,85	0,85	0,75	0,25	1	12	1695
	24	1,25	0,85	0,75	0,25	1	7	4427
E S P F U É N R Ç I A C O O	25	0,85	0,50	0,25	2,5	1	7	2248
	26	1,25	0,50	0,25	2,5	1	12	2904
	27	0,85	0,85	0,25	2,5	1	12	3994
	28	1,25	0,85	0,25	2,5	1	7	6111
	29	0,85	0,50	0,75	2,5	1	12	1370
	30	1,25	0,50	0,75	2,5	1	7	3100
	31	0,85	0,85	0,75	2,5	1	7	2788
	32	1,25	0,85	0,75	2,5	1	12	3091

4.2.2.1 – Análise de Variância – Força de Indentação

Na análise de variância para *força máxima de indentação*, obteve-se os resultados apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultado da análise de variância para *força de indentação*

Fontes	GL	SS	SS Ajustado	MS Ajustado	Fo	valor-P
Espessura	1	9308534	9308534	9308534	37,66	0,000
Profundidade	1	14754670	14754670	14754670	59,7	0,000
Folga p/ Indentação	1	8059109	8059109	8059109	32,61	0,000
Rugosidade	1	353010	353010	353010	1,43	0,243
Geometria	1	2538568	2538568	2538568	10,27	0,004
Diâmetro da Esfera	1	7737195	7737195	7737195	31,3	0,000
Erro	25	6179140	6179140	247166		
Total	31	48930225				

Analisando a distribuição F, pode-se determinar a probabilidade de significância estatística para as variáveis de influência.
Tem-se que:

Valor de F-tabelado => Grau de liberdade (GL) para cada fator =1
GL para o Erro = 25
Significância = 10%
F = 2,92

Ao observar-se na tabela 4.4, todos os fatores que apresentarem $F_o > F$ tabelado = 2,92 tem-se a indicação de que há menos de 10% de risco de assumir que os mesmos são significantes quando de fato não são.

Com significância de 10% as variáveis de influência: *espessura de parede do tubo, profundidade de indentação, folga para indentação, geometria do punção e diâmetro da esfera* são causas de variações na *força de indentação*, enquanto que a variável *rugosidade superficial* não apresentou significância estatística.

Após o cálculo da significância de cada variável estudada e das interações até 3ª ordem, foram levantados através do software Minitab 2000, os gráficos apresentados a seguir.

Gráfico de Probabilidade Normal dos Efeitos

$\alpha = 0,10$

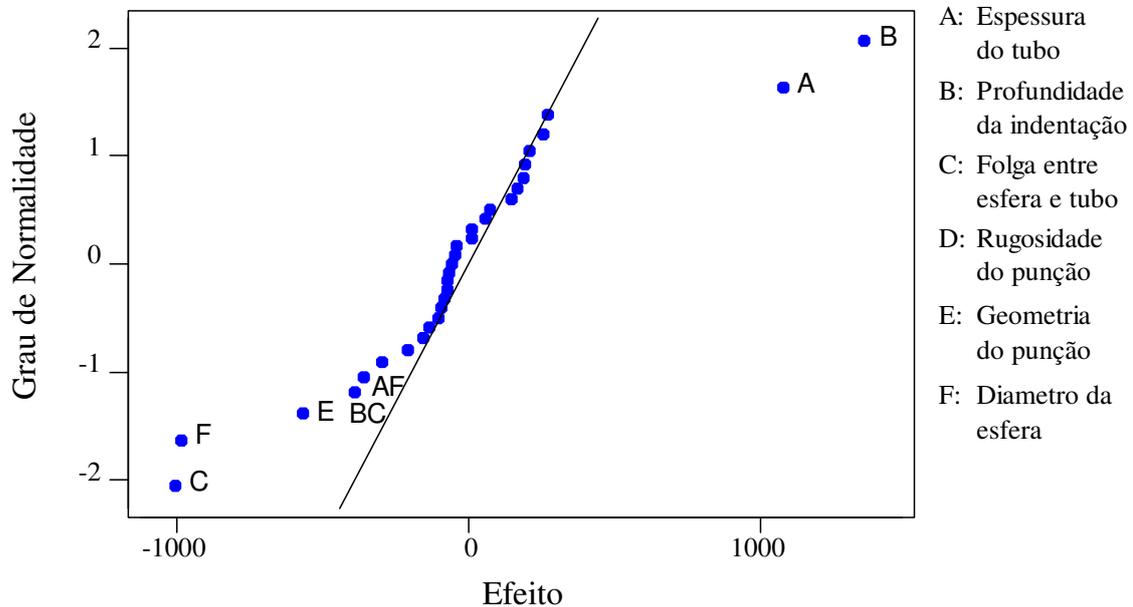


Figura 4.8 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a *força de indentação*.

O gráfico da figura 4.8 é usado para comparar a magnitude relativa e a significância estatística dos efeitos principais das variáveis e dos efeitos das interações. O software MINITAB desenha a linha para indicar onde os pontos seriam esperados não houvesse efeitos significativos. Os efeitos significativos ficam localizados longe e bem além da linha de não significância dos efeitos. Os pontos distantes da reta Normal são causas especiais e significam que quanto mais distante a variável estiver da reta de normalidade, maior o efeito na *força de indentação* e por conseguinte no processo de cravamento. Quanto menos inclinada for a reta maior a consistência do experimento.

Na figura 4.9, tem-se o gráfico de Pareto dos trinta maiores efeitos observados no experimento, sendo que as variáveis e interações com significância para α de 10% estão localizadas para além da linha vermelha, destacando-se as interações de 2ª ordem: *profundidade x folga p/ Indentação e espessura da parede do tubo x diâmetro da esfera*, que também são significativas.

Gráfico de Pareto dos Efeitos

$\alpha = 0,10$

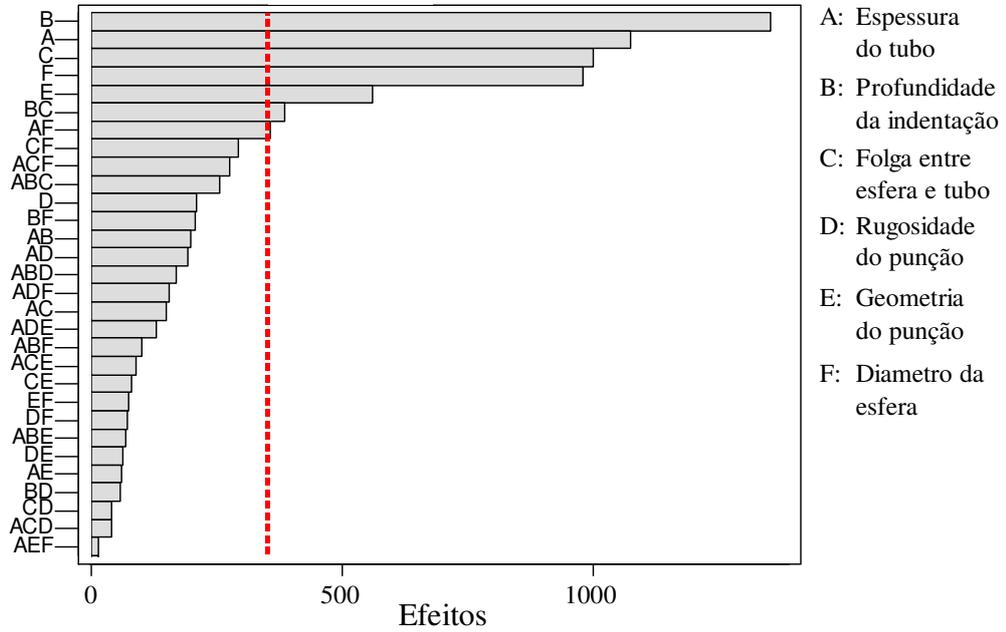


Figura 4.9 – Gráfico de Pareto dos efeitos sobre a *força de indentação*.

Principais Efeitos para: Força de Indentação (N)

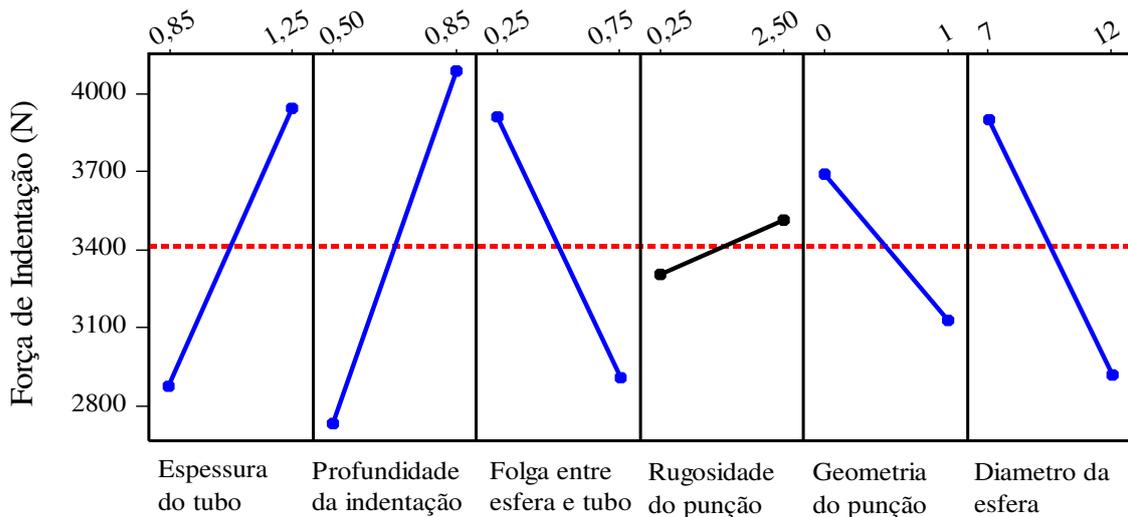


Figura 4.10 – Gráfico dos principais efeitos sobre a *força de indentação*.

Gráfico das interações para Força de Indentação (N)

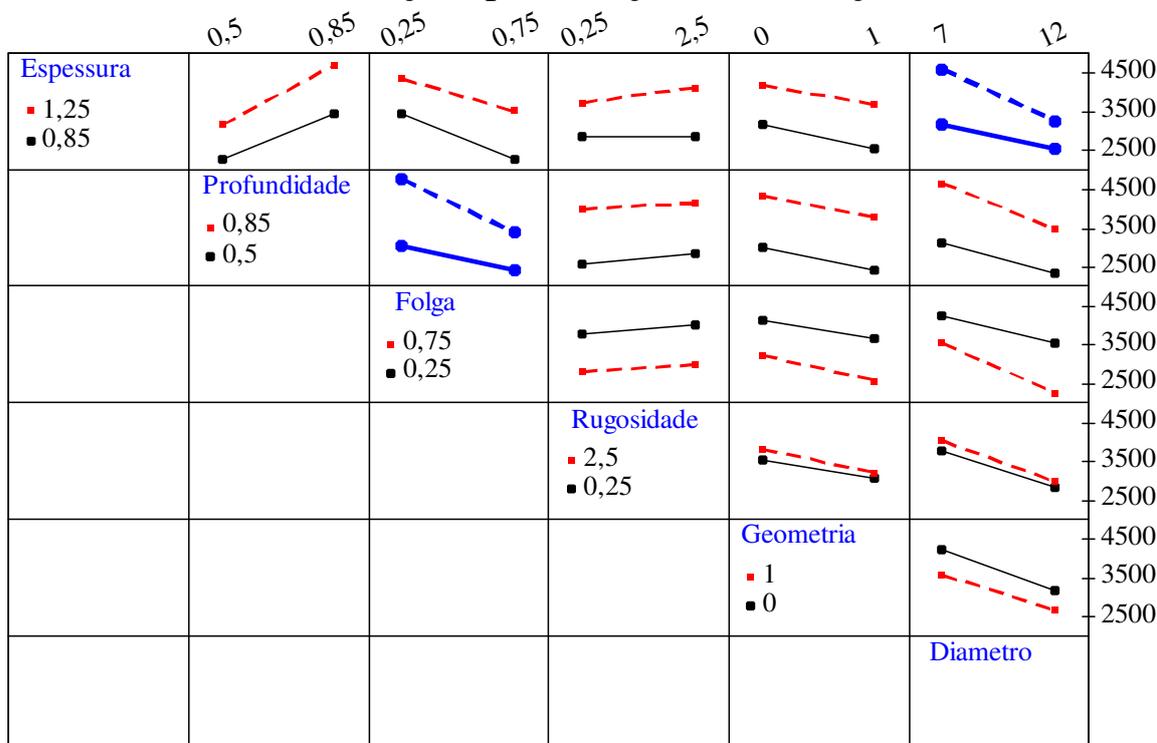


Figura 4.11 – Gráfico das interações sobre a *força de indentação*.

Na figura 4.10 são destacados em cor azul os efeitos das variáveis de maior significância no processo de cravamento, e na figura 4.11 são destacadas em cor azul as interações que produziram efeito de maior significância: a *profundidade x folga p/ indentação* e a *espessura do tubo x diâmetro da esfera*.

Nesse experimento, embora o total de amostras seja 32, inferior a 50 observações que é um valor adequado para avaliar a normalidade pelo histograma, observa-se um alto grau de normalidade, como se verifica na figura 4.12.

Se o mesmo apresentasse uma alta frequência para um dado valor distante da média ou apresentasse dois ou mais picos, poderia indicar a presença de uma importante variável não considerada entre as variáveis estudadas.

Histograma dos Resíduos

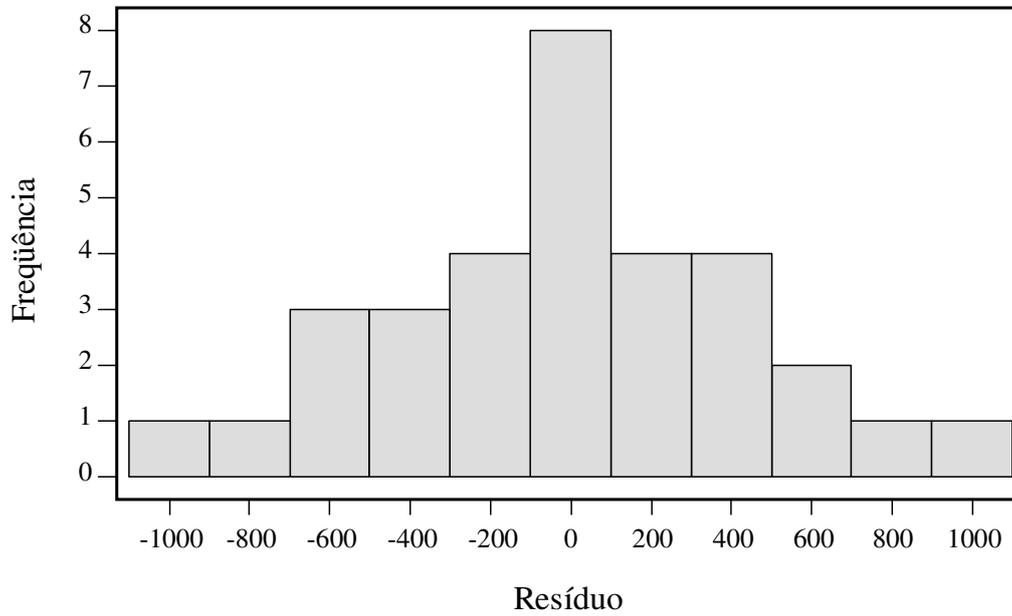


Figura 4.12 – Histograma dos resíduos sobre a *força de indentação*.

Este fato também mostra consistência que houve na escolha das variáveis e que a faixa de Dureza utilizada (114 a 135 HB) não representa uma variável de influência significativa.

4.2.2.2 – Análise dos efeitos dos níveis – Força de Indentação

Considerando que para os experimentos realizados não houve replicações das amostras e com a finalidade de confirmar os resultados obtidos nos experimentos fatoriais fracionados, foram realizados experimentos aleatorizados por níveis - PAN.

Para tanto foram considerados os resultados descritos no tópico 4.2.2 que relacionam os valores da *força de indentação* para as diversas combinações possíveis das variáveis de influência, e que permitiram seguinte avaliação:

1. A *rugosidade* dos punções não é significativa ao nível de 10%, de modo que foi considerada como variável fixa, adotando-se a rugosidade de polimento Ra 0,25 μ m, por apresentar menor valor para a força de indentação;
2. A *geometria do punção* tem significativa influência na *força de indentação*, de modo que foi fixado o nível do punção esférico, por apresentar um menor valor para a *força de indentação*;
3. O *diâmetro da esfera* tem grande influência na *força para indentação*, tendo sido fixado o nível do *diâmetro da esfera* igual a 12 mm, por também apresentar o menor valor para a *força de indentação*;
4. A *folga para indentação* tem grande influência na *força para indentação*, e foi escolhido como variável a ser estudada em sete níveis: 0,20; 0,31; 0,44; 0,56; 0,70; 0,84 e 0,96mm;
5. A *espessura do tubo* tem grande influência na *força de indentação*, e também foi escolhida como variável a ser estudada em dois níveis: 0,85 e 1,25mm;
6. A *profundidade da indentação* tem alta influência na *força de indentação* e para avaliá-la, foi levantada a curva *força x profundidade* para todos os experimentos, sendo o maior nível dessa variável associado à profundidade máxima de 0,85mm;

As figuras 4.13 e 4.14 apresentam as curvas *força de indentação x profundidade* obtidas para os 7 níveis estabelecidos para a variável de influência *folga para indentação*, sendo a espessura do tubo: 0,85mm.

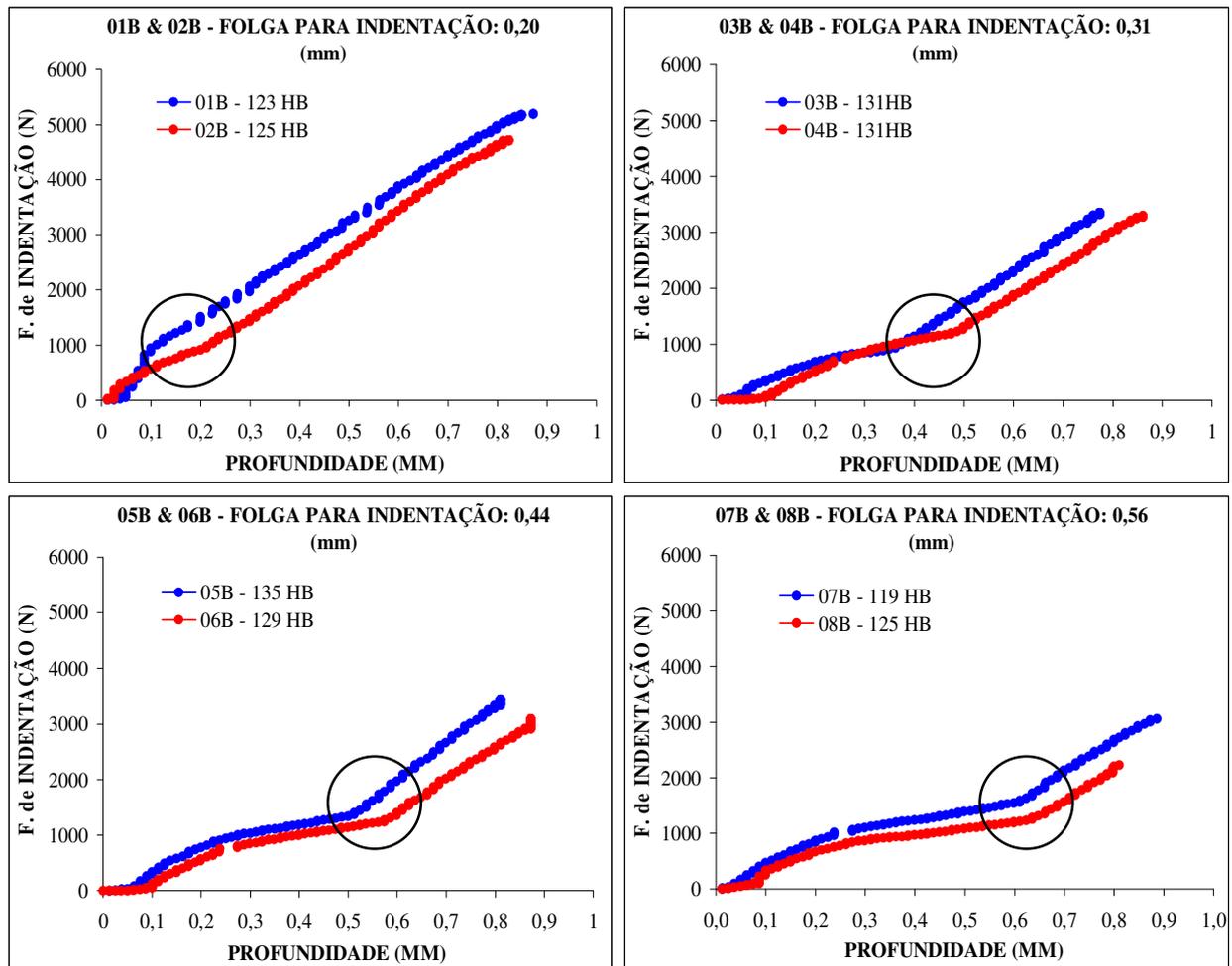


Figura 4.13 – Curvas de *força de indentação x profundidade* correspondendo as *folgas para indentação* de: 0,20; 0,31; 0,44 e 0,56mm. *Espessura do tubo*: 0,85mm.

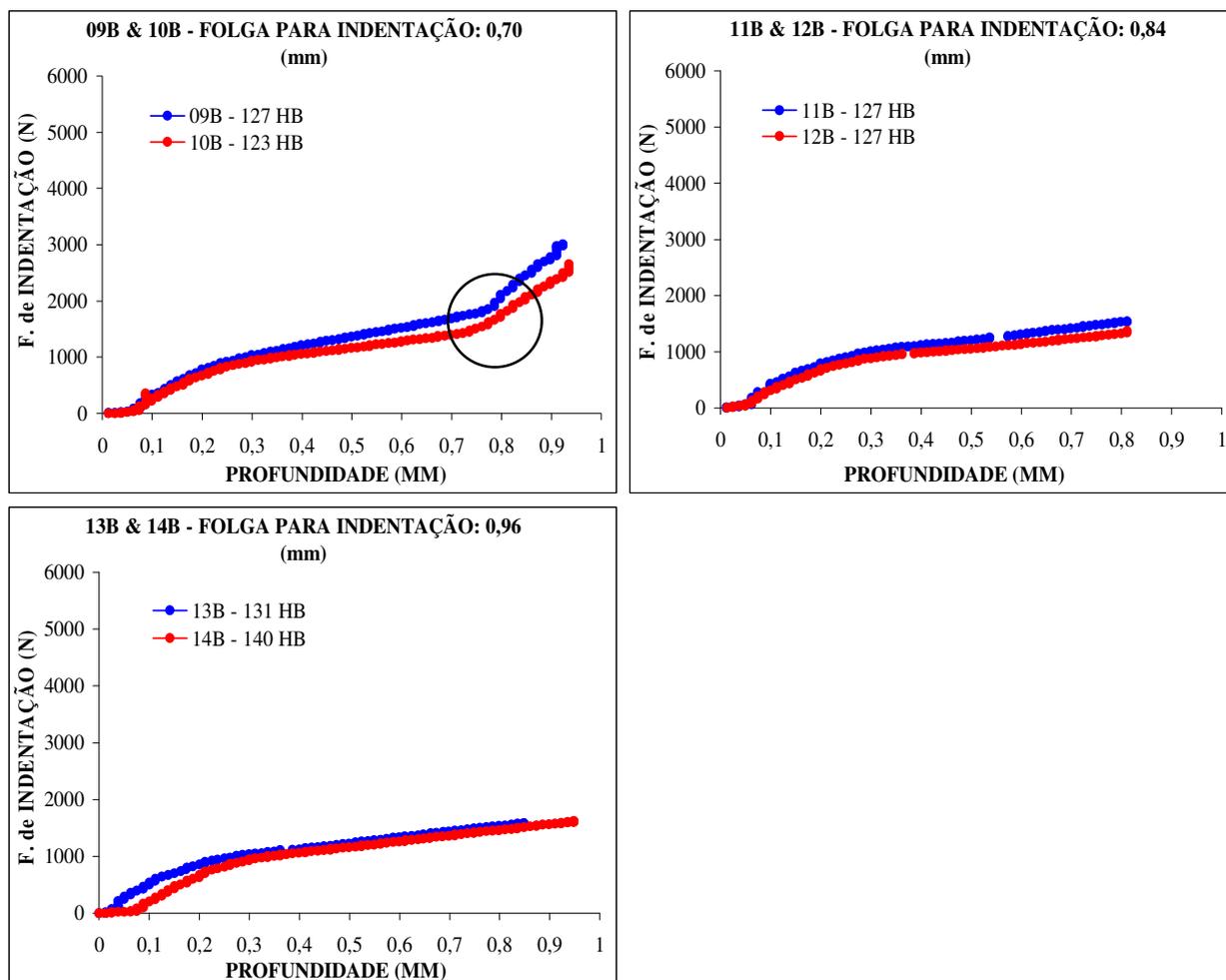


Figura 4.14 – Curvas de *força de indentação x profundidade* correspondendo as *folgas para indentação* de: 0,70; 0,84; 0,96mm. *Espessura do tubo*: 0,85mm.

Nas curvas de *força de indentação x profundidade*, figuras 4.13 e 4.14, para a espessura de 0,85mm, podem ser vistos pontos de inflexão nas *folgas para indentação* de 0,20; 0,31; 0,44; 0,56 e 0,70mm.

O ponto de inflexão relaciona-se com a profundidade em que a curva tem um aumento de inclinação, que ocorre após o contato do material sobre a superfície da esfera, o que caracteriza uma maior energia de deformação no processo, que poderá causar a nucleação de trincas, e portanto, deve ser evitada.

As curvas *força de indentação x profundidade* nas *folgas para indentação*: 0,84 e 0,96mm apresentaram um crescimento constante e uniforme com menor taxa de crescimento para a *força de indentação* e conseqüente menor energia de deformação, que deve ser o objetivo no controle do processo de cravamento. Foi feito teste de hipótese para verificação da significância da variável *folga de indentação*. A tabela 4.5 apresenta os resultados do teste de hipóteses.

Tabela 4.5 – Teste de hipóteses para *força de indentação e espessura do tubo*: 0,85mm.

Teste de Hipótese					
Espessura do Tubo:		0,85mm			
Variável Resposta:		FORÇA de INDENTAÇÃO (N)			
NÍVEIS	NÍVEL	OBSERVAÇÕES		TOTAIS	MÉDIAS
	FOLGA PARA INDENTAÇÃO	1	2		
1	0,20	4976,36	4639,51	9615,87	4807,93
2	0,31	3351,55	3003,37	6354,92	3177,46
3	0,44	3275,12	2575,93	5851,05	2925,52
4	0,56	2635,38	2207,95	4843,32	2421,66
5	0,70	2106,04	1766,35	3872,39	1936,19
6	0,84	1525,75	1321,94	2847,69	1423,84
7	0,96	1537,07	1460,64	2997,71	1498,86
				36382,95	2598,78
a = 7		S ² =		1153,59	
n = 2		S _{Strat} /(a-1) =		2794232,55	
N = n*a		SSE/(N-a) =		76358,91	
N = 14		F_o =		36,59	
a-1 = 6		F 0.01, v1,v2			
N-a = 7		v1 =		6	
		v2 =		7	
SST 17.299.907,70		F 0.01, 6,7 =		7,19	
S _{strat} 16.765.395,31					
SSE 534.512,39					

Como F_o foi maior que $F_{0,01;6;7}$, conclui-se que a *folga para indentação* é significativa para $\alpha = 1\%$, para *espessura do tubo* igual a 0,85mm e, confirmando a análise do item 4.2.2.1.

As figuras 4.15 e 4.16 apresentam as curvas *força de indentação x profundidade* obtidas para os 7 níveis estabelecidos para a variável de influência *folga para indentação*, sendo a *espessura do tubo*: 1,25mm.

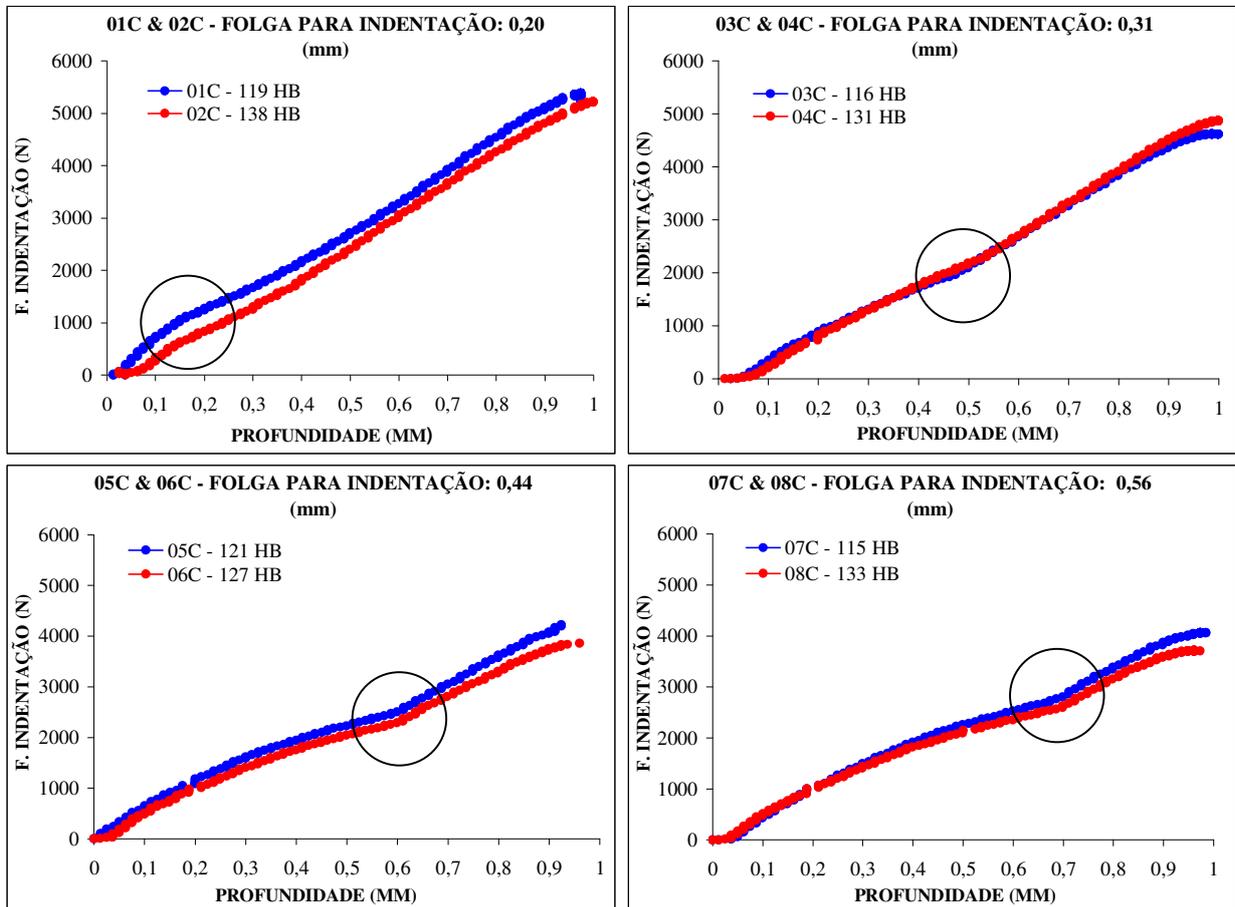


Figura 4.15 - Curvas de *força de indentação x profundidade* correspondendo as *folgas para indentação* de: 0,20; 0,31; 0,44 e 0,56mm. *Espessura do tubo*: 1,85mm.

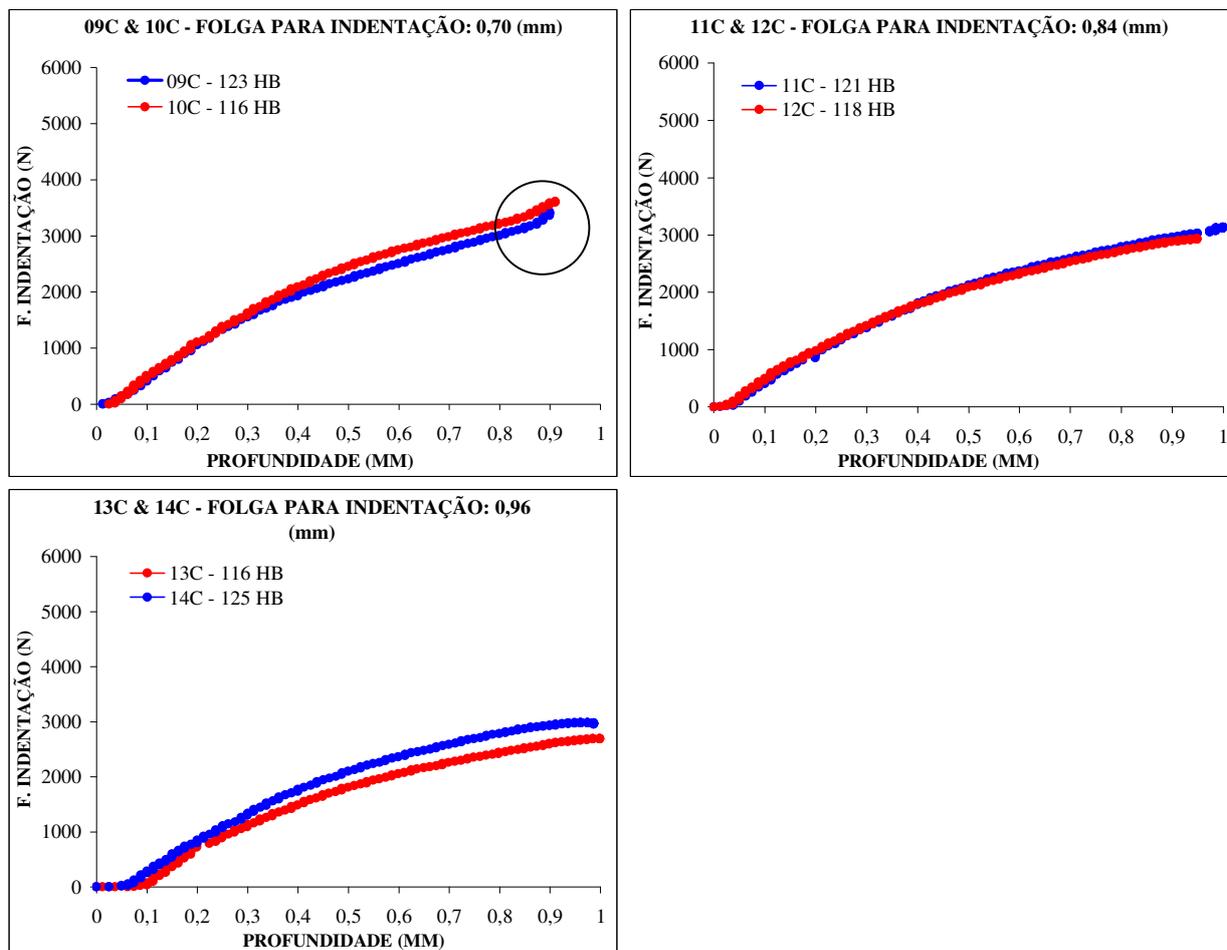


Figura 4.16 – Curvas de *força de indentação x profundidade* correspondendo as *folgas para indentação* de: 0,70; 0,84; 0,96mm. *Espessura do tubo*: 1,85mm.

Nas curvas de *força de indentação x profundidade*, figuras 4.15 e 4.16, para espessura de 1.85mm, podem ser vistos pontos de inflexão nas *folgas para indentação* 0,20; 0,31; 0,44; 0,56 e 0,70mm.

As mesmas observações mencionadas para o experimento realizado para espessura de 0,85mm quanto aos pontos de inflexão são também válidas para a espessura de 1,25mm. Foi feito teste de hipótese para verificação da significância da variável *folga para indentação*.

A tabela 4.6 apresenta os resultados do teste de hipóteses.

Tabela 4.6 – Teste de hipóteses para *força de indentação e espessura do tubo*: 1,25mm.

Teste de Hipótese					
Espessura do Tubo:		1,25 MM			
Variável Resposta:		FORÇA de INDENTAÇÃO (N)			
NÍVEIS	NÍVEL	OBSERVAÇÕES		TOTAIS	MÉDIAS
	FOLGA PARA INDENTAÇÃO	1	2		
1	0,20	4534,77	4263,03	8797,80	4398,90
2	0,31	3832,76	3909,19	7741,94	3870,97
3	0,44	3578,00	3306,26	6884,27	3442,13
4	0,56	3388,37	3156,22	6544,59	3272,30
5	0,70	3003,33	3221,31	6224,64	3112,32
6	0,84	2776,92	2720,29	5497,21	2748,61
7	0,96	2442,89	2785,40	5228,29	2614,14
				46918,75	3351,34
a = 7		S ² =		612,64	
n = 2		SS _{Strat} /(a-1) =		781924,05	
N = n*a		SSE/(N-a) =		26818,34	
N = 14		F_o =		29,16	
a-1 = 6					
N-a = 7					
SST 4.879.272,73		F 0.01, v1,v2			
S _{strat} 4.691.544,32		v1 =		6	
SSE 187.728,41		v2 =		7	
		F 0.01, 6,7 =		7,19	

Como F_o foi maior que $F_{0,01;6;7}$, conclui-se que a *folga para indentação* é significativa para $\alpha = 1\%$, para *espessura do tubo* igual a 1,25mm e, confirmando a análise do item 4.2.2.1.

4.2.3 – Segundo Conjunto de Ensaio de Cravamento

Análise da Força de Extração da Esfera

Para a realização dos ensaios de extração da esfera e medição da *força de extração* foram considerados os seguintes aspectos:

1. O resultado do primeiro conjunto de ensaios de cravamento, em que se observa uma maior solicitação à resistência do material para o punção de forma quadrada;
2. O alto custo dos cps utilizados nos experimentos.

Assim, para todos os ensaios adotou-se para a variável de influência *geometria da punção*, a forma esférica.

Uma particularidade verificada em todos os ensaios do experimento fatorial fracionado I foi a diferença entre a *profundidade da indentação* máxima conseguida na obtenção das curvas *força de indentação x profundidade* e a *profundidade* real medida após cada ensaio.

Essa diferença entre a profundidade medida pelo transdutor linear no levantamento da curva e a profundidade medida com relógio comparador após o cravamento, ficou em média de 0,17mm, i.e., para uma profundidade real de 0,40mm, o correspondente valor encontrado na curva foi em média 0,56mm e para uma profundidade real de 0,80mm, o valor encontrado na curva foi em média 0,98mm. Esse fato se deve a dois fatores:

1. Efeito mola do corpo do cp, devido às deformações elásticas internas presentes nas áreas próximas à indentação, que tendem a retornar ao estado anterior à deformação,
2. Efeito mola na indentação, igualmente devido às deformações elásticas presentes na própria indentação.

Considerando essa diferença, foi medida a profundidade de indentação de cada cp após o levantamento das curvas de *força de indentação X profundidade* e estabelecido os níveis corretos de profundidade para a variável de resposta *força de extração da esfera*, como mostrado na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Experimento fatorial $2^{5-1} - \frac{1}{2}$ fracionado – variável de resposta *força de extração*.

	Ensaios	Espessura do Tubo (mm)	Profundidade Média Real - Medida - (mm)	Folga para Indentação (mm)	Rugosidade Ra (μ m)	Geometria do Punção Raio (mm)	Diâmetro da Esfera (mm)	Resposta Força de Extração da Esfera (N)
PUNÇÃO ESFÉRICO POLIDO	17	0,85	0,40	0,25	0,25	1	12	506
	18	1,25	0,40	0,25	0,25	1	7	1417
	19	0,85	0,80	0,25	0,25	1	7	1548
	20	1,25	0,80	0,25	0,25	1	12	1858
	21	0,85	0,40	0,75	0,25	1	7	1012
	22	1,25	0,40	0,75	0,25	1	12	899
	23	0,85	0,80	0,75	0,25	1	12	1346
	24	1,25	0,80	0,75	0,25	1	7	3067
PUNÇÃO ESFÉRICO JATEADO	25	0,85	0,40	0,25	2,5	1	7	971
	26	1,25	0,40	0,25	2,5	1	12	750
	27	0,85	0,80	0,25	2,5	1	12	1375
	28	1,25	0,80	0,25	2,5	1	7	2596
	29	0,85	0,40	0,75	2,5	1	12	709
	30	1,25	0,40	0,75	2,5	1	7	1673
	31	0,85	0,80	0,75	2,5	1	7	1876
	32	1,25	0,80	0,75	2,5	1	12	1757

4.2.3.1 – Análise de Variância – Força de Extração

Na análise de variância para a *força de extração*, obteve-se os resultados apresentados na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultado da análise de variância para *força de extração*.

Fonte	GL	SS	SS Ajustado	MS Ajustado	Fo	valor-P
Espessura	1	1365392	1365392	1365392	23,29	0,001
Profundidade	1	3502512	3502512	3502512	59,74	0,000
Folga p/ Indentação	1	108570	108570	108570	1,85	0,204
Rugosidade	1	182	182	182	0,00	0,957
Diâmetro	1	1537600	1537600	1537600	26,23	0,000
Erro	10	586303	586303	58630		
Total	15	7100560				

Analisando a distribuição F, pode-se determinar a probabilidade de significância estatística para as variáveis de influência.
Tem-se que:

Valor de F-tabelado => Grau de liberdade (GL) para cada fator =1
GL para o Erro = 10
Significância = 10%
F = 3,28

Ao observar-se na tabela 4.8, todos os fatores que apresentarem $F_o > F$ tabelado = 3,28 tem se a indicação de que há menos de 10% de risco de assumir que os mesmos são significantes quando de fato não são.

Com significância de 10% as variáveis de influência: *espessura de parede do tubo*, *profundidade de indentação*, e *diâmetro da esfera* são causas de variações na *força de indentação*. Na figura 4.17, os pontos distantes da reta Normal são causas especiais e, portanto maior serão seus efeitos na *força de extração da esfera*.

Na figura 4.18 são mostradas as variáveis de maiores significância, que apresentam efeitos à direita da linha tracejada vermelha e que são: *profundidade de indentação*, *diâmetro da esfera* e *espessura da parede do tubo*., o que é comprovado pelo gráfico dos efeitos da figura 4.19.

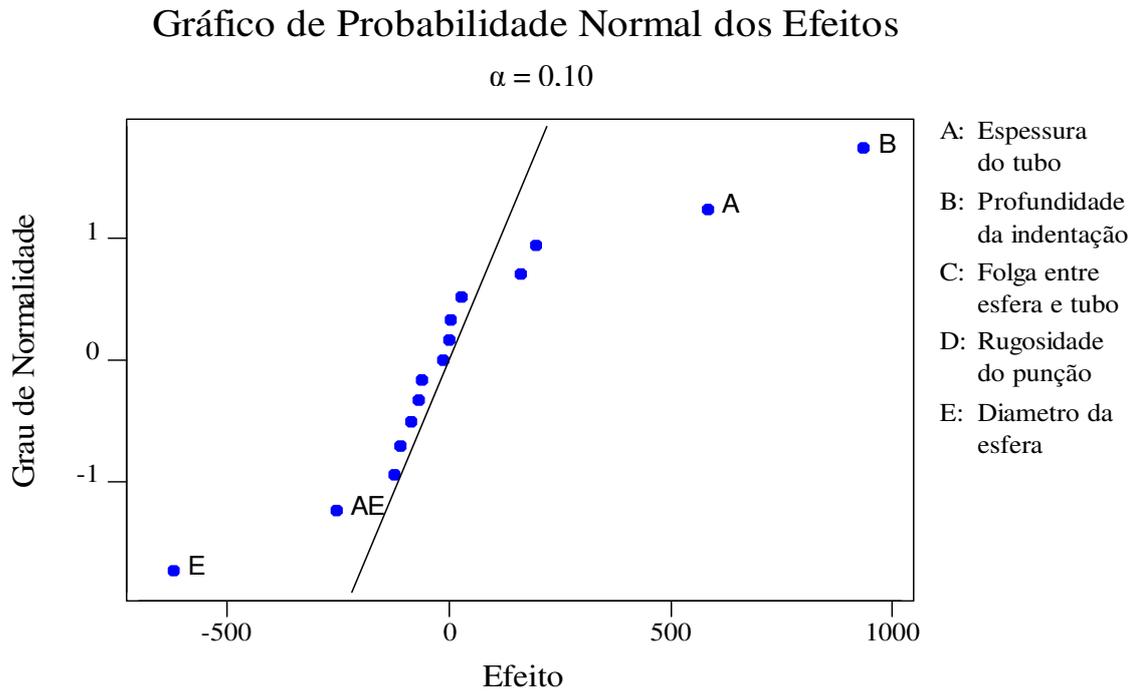


Figura 4.17 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a *força de extração*

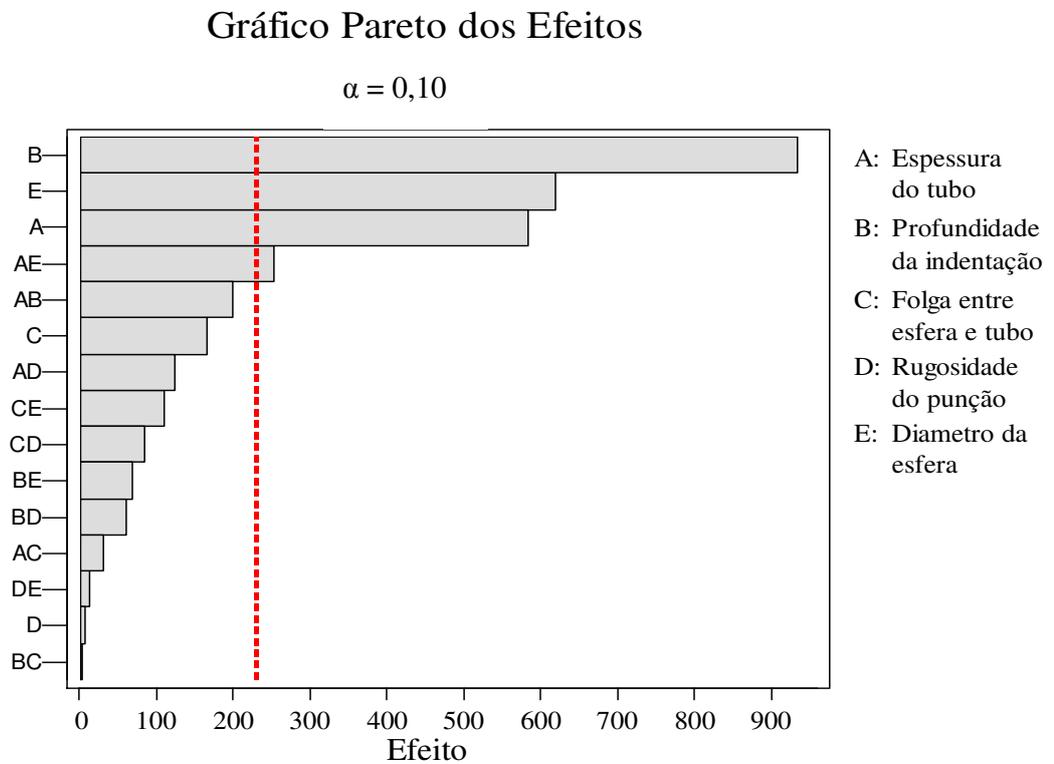


Figura 4.18 – Pareto dos efeitos sobre a *força de extração*.

Principais Efeitos para: Força de Extração (N)

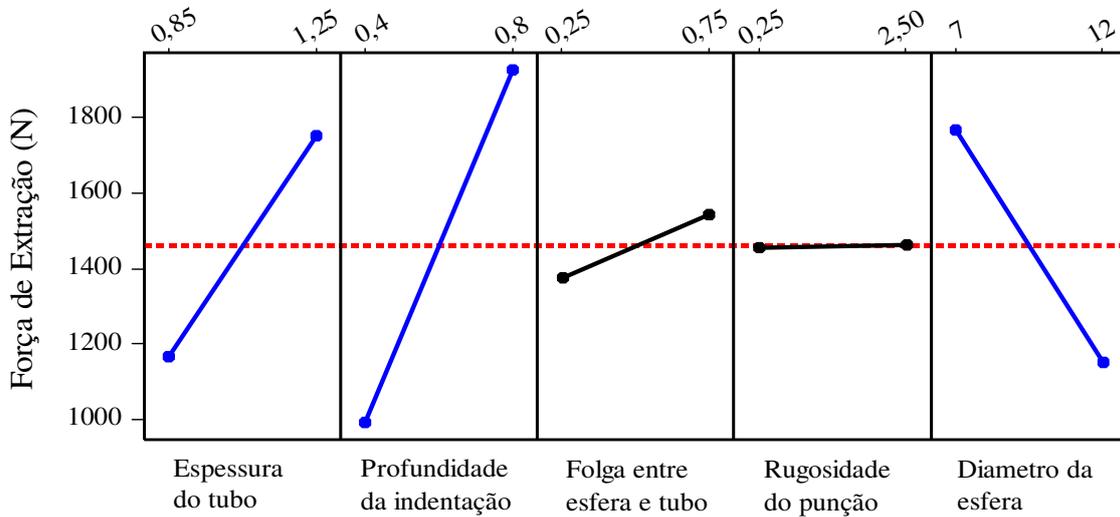


Figura 4.19 – Gráfico dos principais efeitos sobre a *força de extração*.

Gráfico das interações para Força de Extração (N)

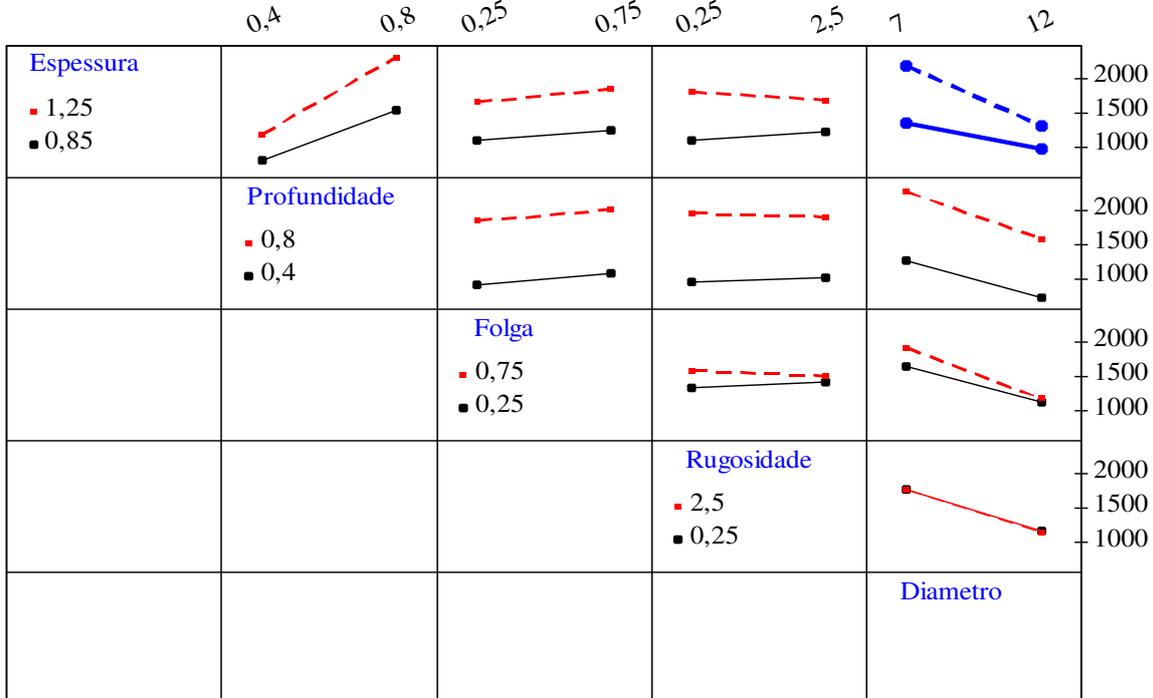


Figura 4.20 – Gráfico dos efeitos das interações sobre a *força de extração*. No destaque a principal interação sobre a *força de extração*.

Na figura 4.20 destaca-se em cor azul a interação que produziu o efeito de maior significância: *profundidade de indentação x folga p/ indentação* e na figura 4.21 tem-se o histograma dos resíduos referentes à *força de extração*.

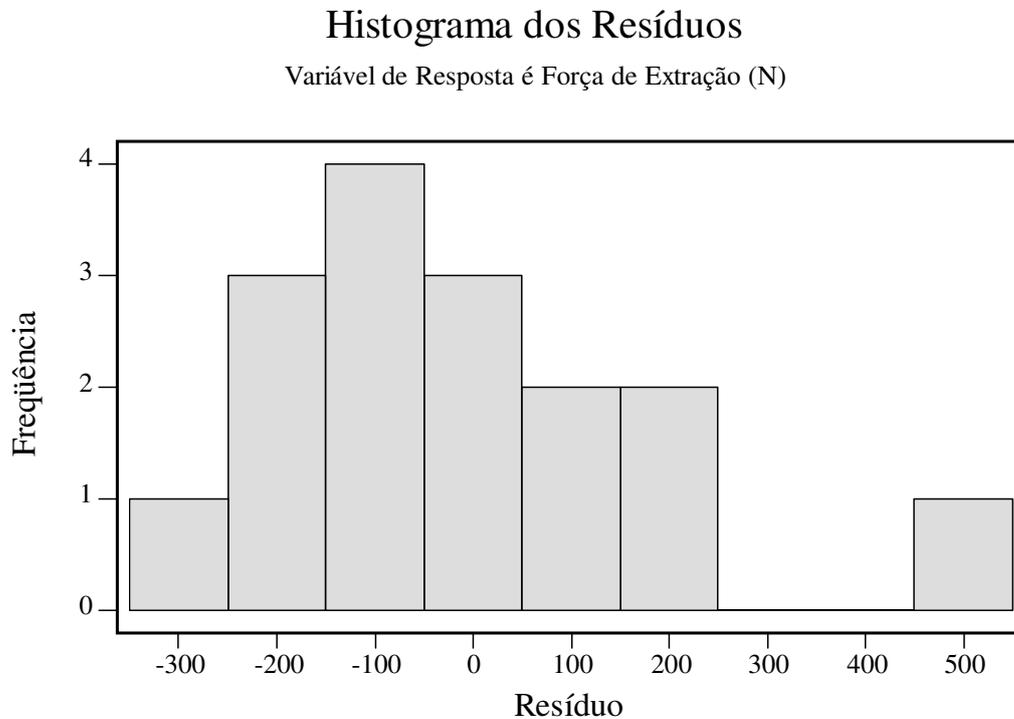


Figura 4.21 – Histograma dos resíduos para *força de extração*.

Nesse experimento, o total de amostras é 16, muito inferior às 50 observações necessárias, que é um valor mínimo para avaliar a normalidade pelo histograma.

Nesse ensaio observa-se que os valores médios apresentaram-se ligeiramente deslocados do centro, porém o histograma não apresentou uma alta frequência para um dado valor distante da média nem dois ou mais picos, o que poderia indicar a presença de outra importante variável não considerada em adição às variáveis estudadas e que poderia influenciar na resposta, esses resultados também confirmam a consistência na escolha das variáveis e na faixa de dureza utilizada (114 a 135 HB).

4.2.3.2 – Análise dos efeitos dos níveis – Força de Extração

Considerando que para os experimentos realizados não houve replicações das amostras e com a finalidade de confirmar os resultados obtidos nos experimentos fatoriais fracionados, foram realizados novos experimentos num planejamento aleatorizados por níveis (PAN).

Para tanto, foram considerados os resultados descritos no tópico 4.2.3.1, que relacionam os valores da *força de extração* da esfera para as diversas combinações possíveis das variáveis de influência e que permitiram a seguinte avaliação.

1. A *rugosidade* dos punções não é significativa ao nível de 10% de modo que foi considerado como variável fixa, adotando-se a rugosidade de polimento Ra 0,25 μ m, por apresentar um menor valor para a *força de indentação*;
2. A *geometria do punção* foi considerada como variável fixa o punção esférico, por apresentar um menor valor para a *força de indentação*;
3. O *diâmetro da esfera* tem grande influência na força de extração e é muito significativo, tendo sido fixado o nível do diâmetro da esfera igual a 12mm, por também apresentar o menor valor para a *força de indentação*;
4. A *folga para indentação* não é significativa. Todavia como a mesma tem influência na *força de indentação*, como já foi comprovado no item 4.3.1, e como não se conhece um campo de variação aceitável para essa variável no processo de cravamento, essa variável foi estudada também nos níveis: 0,20; 0,31; 0,44; 0,56; 0,70; 0,84 e 0,96mm;
5. A *espessura do tubo* tem grande influência na *força de extração*, e pode variar no processo produtivo, foi escolhida como variável a ser estudada em dois níveis: 0,85 e 1,25mm;
6. A *profundidade da indentação* tem alta influência na *força de extração*, porém foi fixada uma profundidade real de 0,80mm em função dos valores obtidos no primeiro conjunto de ensaios

para *força de extração* da esfera, que foi próximo de 3000 N para 3 indentações equidistantes. O valor normalmente especificado para *força de extração* varia de 6000 a 8000 N para 6 indentações equidistantes. Foi feito teste de hipótese para verificação da significância da variável *folga de indentação*, as tabela 4.9 e 4.10 apresentam os resultados.

Tabela 4.9 – Resultados do teste de hipóteses para *força de extração* e *espessura do tubo*: 0,85mm.

Teste de Hipóteses					
Espessura do Tubo:		0,85 MM			
Variável Resposta:		FORÇA de EXTRAÇÃO da ESFERA (N)			
NÍVEIS	NÍVEL	OBSERVAÇÕES		TOTAIS	MÉDIAS
	FOLGA PARA INDENTAÇÃO	1	2		
1	0,20	1333,80	1143,26	2477,05	1238,53
2	0,31	1208,76	1232,57	2441,33	1220,66
3	0,44	1274,25	1226,62	2500,87	1250,44
4	0,56	1309,98	1315,93	2625,91	1312,96
5	0,70	1387,39	1429,07	2816,46	1408,23
6	0,84	1387,39	1333,80	2721,19	1360,59
7	0,96	1363,57	1512,44	2876,01	1438,00
				18458,82	1318,49
		a = 7	S ² =		97,05
		n = 2	SS _{Strat} /(a-1) =		14911,86
		N = n*a	SSE/(N-a) =		4710,49
		N = 14	F_o =		3,17
		a-1 = 6			
		N-a = 7			
		SST	122.444,60	F 0.01, v1,v2	
		S _{strat}	89.471,15	v1 =	6
		SSE	32.973,46	v2 =	7
				F 0.01, 6,7 =	7,19

Como F_o foi menor que $F_{0,01;6;7}$, conclui-se que a *folga para indentação* não é significativa para a *força de extração*, com $\alpha = 1\%$ e *espessura do tubo* igual a 0,85mm, confirmando a análise do item 4.2.3.1.

Tabela 4.10 – Resultados do teste de hipóteses para *força de extração e espessura do tubo*: 1,25mm.

Teste de Hipóteses					
Espessura do Tubo:		1,25 MM			
Variável Resposta:		FORÇA de EXTRAÇÃO da ESFERA (N)			
NÍVEIS	NÍVEL	OBSERVAÇÕES		TOTAIS	MÉDIAS
	FOLGA PARA INDENTAÇÃO	1	2		
1	0,20	1732,75	1697,02	3429,77	1714,89
2	0,31	1875,65	1863,74	3739,40	1869,70
3	0,44	1976,88	1816,12	3793,00	1896,50
4	0,56	1887,56	1917,34	3804,90	1902,45
5	0,70	1982,84	2078,11	4060,95	2030,47
6	0,84	2101,93	2030,47	4132,40	2066,20
7	0,96	1941,15	1982,84	3923,99	1962,00
				26884,40	1920,31
a = 7		S ² =		118,86	
n = 2		SS _{Strat} /(a-1) =		26934,91	
N = n*a		SSE/(N-a) =		3147,95	
N = 14		F_o =		8,56	
a-1 = 6					
N-a = 7					
		F 0.01, v1,v2			
SST		183.645,10		v1 = 6	
S _{strat}		161.609,47		v2 = 7	
SSE		22.035,63		F 0.01, 6,7 = 7,19	

Como F_o foi maior que $F_{0,01;6;7}$, conclui-se que a *folga para indentação* é significativa para a *força de extração*, com $\alpha = 1\%$ e *espessura do tubo* igual a 1,25mm, indicando uma diferença na significância quando comparada com a *espessura do tubo* igual a 0,85mm. Para verificar se as *médias da força de extração da esfera* são diferentes para as *espessuras do tubo*: 0,85 e 1,25mm, analisou-se o seguinte teste de hipóteses, obtendo-se os resultados da tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultado de teste de hipóteses para *força de extração*.

Ho:	$(\mu_1) 0,85\text{mm} = (\mu_1) 1,25\text{mm}$	$t_0:$	-153,25
H1:	$(\mu_2) 0,85\text{mm} < (\mu_2) 1,25\text{mm}$	$v_1:$	69,88
Y 1:	1318 N	$t_{0,01;70}:$	2,38
Y 2:	1920 N		
S ² 1:	97,05	$t_0 < -t_{0,01, 70}$	
S ² 2:	118,86	Logo	$-153,25 < -2,38$

Como t_0 foi menor que $t_{0,01; 70}$, conclui-se que a *força de extração* é significante menor para a espessura de 0,85mm em comparação com a espessura de 1,25mm, utilizando $\alpha = 1\%$. Para efeito comparativo, na figura 4.22 é apresentado o gráfico *força de extração x folga para indentação* para as *espessuras do tubo*: 0,85 e 1,25mm.

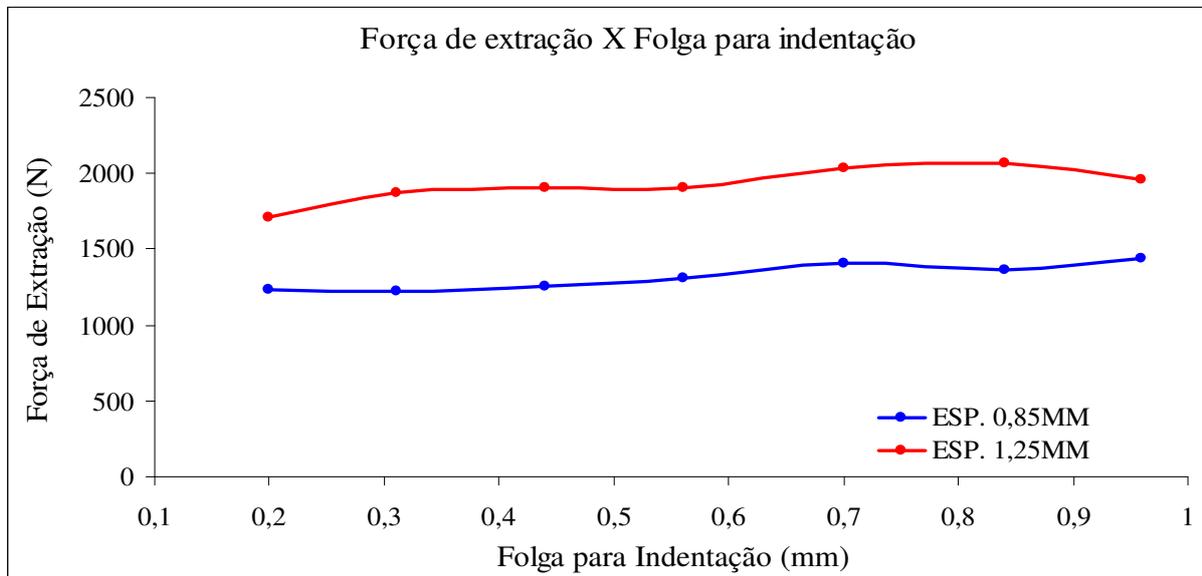


Figura 4.22 – Valores médios da *força de extração da esfera X folga de indentação* para as *espessuras dos tubos*: 0,85mm e 1,25mm.

Observando-se os valores F_0 e t_0 mostrados nas tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 e os resultados mostrados na figura 4.22, verifica-se que a *espessura do tubo*, para os níveis de 0,85 e 1,25mm, apresenta, uma diferença média de 600N na *força de extração da esfera*. Já a *folga para indentação*, para os níveis de 0,20 a 0,96mm, apresenta, um incremento médio na *força de extração* de aproximadamente 250N.

4.2.4 – Terceiro Conjunto de Ensaios de Cravamento

Análise da Folga da Esfera

A tabela 4.12 apresenta os resultados das *folgas da esfera* obtidos nos ensaios realizados de acordo com o procedimento descrito no item 3.5.3 deste trabalho.

Tabela 4.12 – Experimento fatorial 2^{6-1} – $\frac{1}{2}$ fracionado – variável de resposta *folga da esfera*.

	Ensaios	Espessura do Tubo (mm)	Profundidade (mm)	Folga para Indentação (mm)	Rugosidade Ra (μm)	Geometria do Punção Raio (mm)	Diâmetro da Esfera (mm)	Folga da Esfera (mm)
Q P U A N D Ç A O D O	1	0,85	0,40	0,25	0,25	0	7	0,00
	2	1,25	0,40	0,25	0,25	0	12	0,25
	3	0,85	0,80	0,25	0,25	0	12	0,00
	4	1,25	0,80	0,25	0,25	0	7	0,00
	5	0,85	0,40	0,75	0,25	0	12	0,30
	6	1,25	0,40	0,75	0,25	0	7	0,00
	7	0,85	0,80	0,75	0,25	0	7	0,00
	8	1,25	0,80	0,75	0,25	0	12	0,00
Q P U A N D Ç A O D O	9	0,85	0,40	0,25	2,5	0	12	0,15
	10	1,25	0,40	0,25	2,5	0	7	0,00
	11	0,85	0,80	0,25	2,5	0	7	0,00
	12	1,25	0,80	0,25	2,5	0	12	0,00
	13	0,85	0,40	0,75	2,5	0	7	0,00
	14	1,25	0,40	0,75	2,5	0	12	1,05
	15	0,85	0,80	0,75	2,5	0	12	0,00
	16	1,25	0,80	0,75	2,5	0	7	0,00
E P S U F N É Ç R I O C O	17	0,85	0,40	0,25	0,25	1	12	0,05
	18	1,25	0,40	0,25	0,25	1	7	0,00
	19	0,85	0,80	0,25	0,25	1	7	0,00
	20	1,25	0,80	0,25	0,25	1	12	0,00
	21	0,85	0,40	0,75	0,25	1	7	0,00
	22	1,25	0,40	0,75	0,25	1	12	1,05
	23	0,85	0,80	0,75	0,25	1	12	0,00
	24	1,25	0,80	0,75	0,25	1	7	0,00
E P S U F N É Ç R I O C O	25	0,85	0,40	0,25	2,5	1	7	0,00
	26	1,25	0,40	0,25	2,5	1	12	0,25
	27	0,85	0,80	0,25	2,5	1	12	0,00
	28	1,25	0,80	0,25	2,5	1	7	0,00
	29	0,85	0,40	0,75	2,5	1	12	0,45
	30	1,25	0,40	0,75	2,5	1	7	0,00
	31	0,85	0,80	0,75	2,5	1	7	0,00
	32	1,25	0,80	0,75	2,5	1	12	0,00

4.2.4.1 - Análise de Variância – Folga da Esfera

A tabela 4.13 apresenta os resultados da análise de variância para a variável de resposta *folga da esfera*.

Tabela 4.13 – Resultados de análise de variância para *folga da esfera*.

Fonte	GL	SS	SS Ajustado	MS Ajustado	Fo	valor-P
Espessura	1	0,08508	0,08508	0,08508	1,72	0,201
Profundidade	1	0,39383	0,39383	0,39383	7,98	0,009
Folga p/ Indentação	1	0,14445	0,14445	0,14445	2,93	0,100
Rugosidade	1	0,00195	0,00195	0,00195	0,04	0,844
Geometria	1	0,00008	0,00008	0,00008	0,00	0,969
Diâmetro	1	0,39383	0,39383	0,39383	7,98	0,009
Erro	25	1,23445	1,23445	0,04938		
Total	31	2,25367				

Analisando a distribuição F, pode-se determinar a probabilidade de significância estatística para as variáveis de influência.
Tem-se que:

Valor de F-tabelado => Grau de liberdade (GL) para cada fator =1
GL para o Erro = 25
Significância = 10%
F = 2,92

Ao observar-se na tabela 4.13, todos os fatores que apresentarem $F_o > F$ tabelado = 2,92 tem-se a indicação de que há menos de 10% de risco de assumir que os mesmos são significantes quando de fato não são.

Portanto, com significância de 10%, as variáveis de influência: *profundidade de indentação, diâmetro da esfera e folga para indentação* são causas de variações na *folga da esfera* após cravamento.

Na figura 4.23, os pontos distantes da reta Normal são causas especiais e significam que a variável tem grande influência na *folga da esfera* após o cravamento.

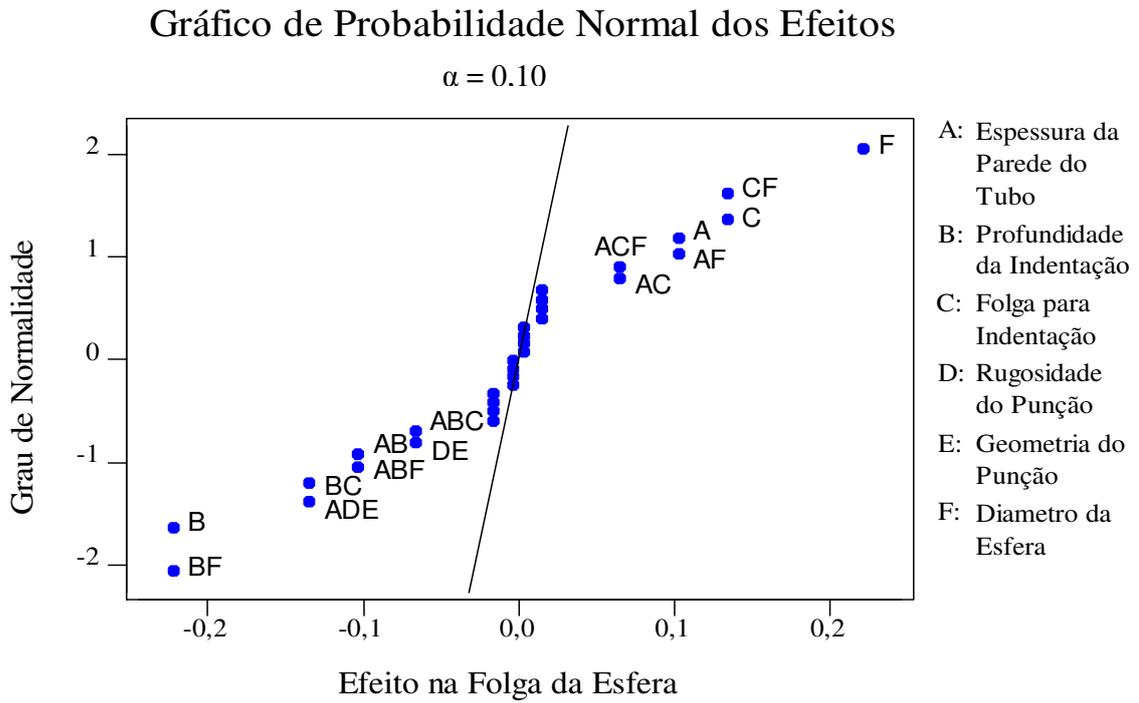


Figura 4.23 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a *folga da esfera*.

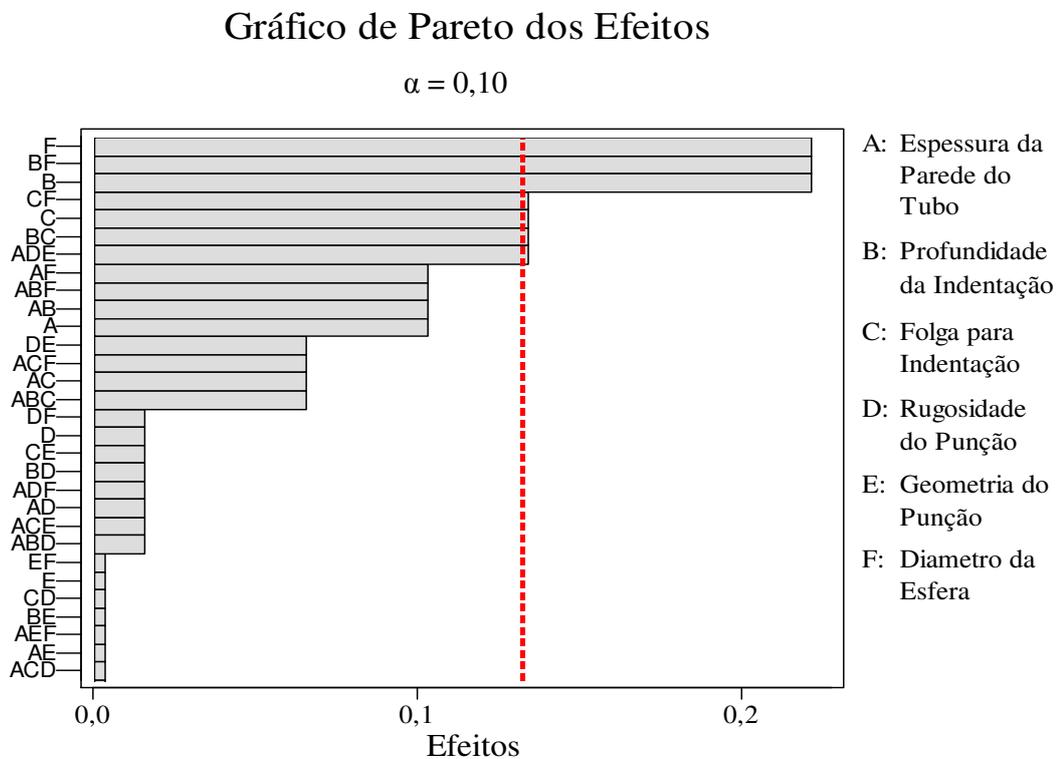


Figura 4.24 – Gráfico de Pareto dos efeitos sobre a *folga da esfera*.

A figura 4.24 mostra as variáveis que apresentam efeitos que ultrapassam a linha tracejada vermelha para um nível de t_m-se significância de 10%, o que é confirmado nos gráficos das figuras 4.25 e 4.26.

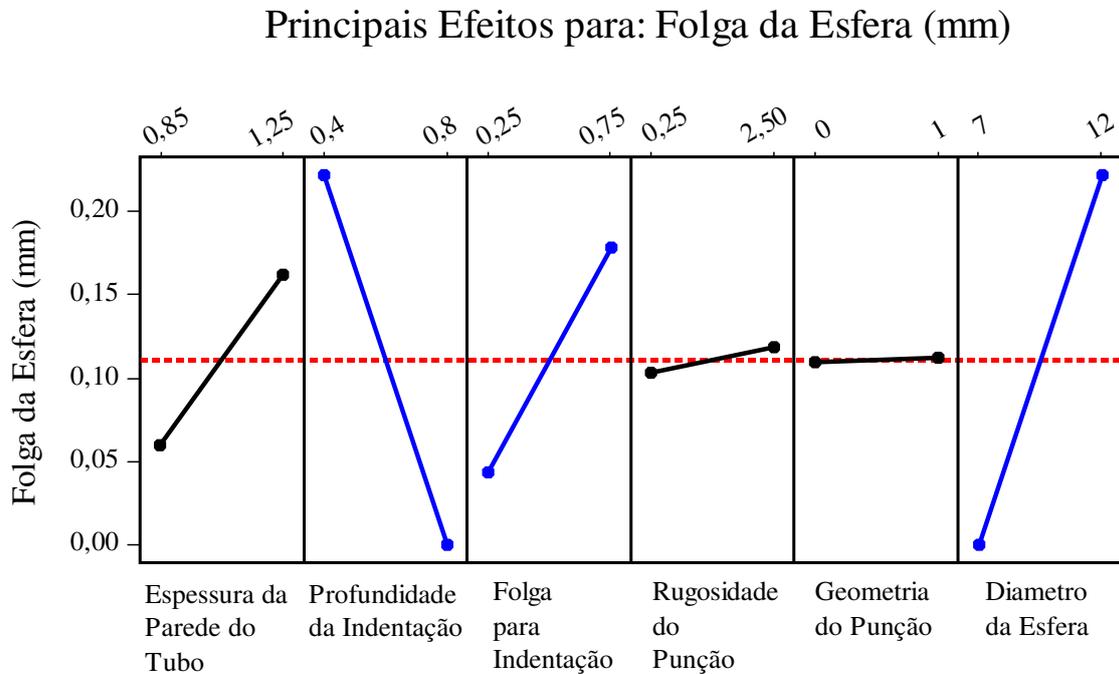


Figura 4.25 – Gráfico dos principais efeitos, destacando-se as variáveis de maior influência sobre a folga da esfera.

Na figura 4.25 são destacados em cor azul os efeitos de maior significância para a variável de resposta *folga da esfera*, correspondentes às variáveis: *profundidade da indentação*, *folga para indentação* e *diâmetro da esfera*, no processo de cravamento.

Na figura 4.26 são destacadas em cor azul as interações que produziram os efeitos de maior significância: *profundidade de indentação x diâmetro da esfera*, *profundidade de indentação x folga para indentação* e *folga para indentação x diâmetro da esfera*.

Fato que merece importância e pode visto também nessa figura é que para profundidade de 0,80mm a folga é igual a zero para qualquer alteração nas demais variáveis estudadas.

Gráfico das Interações para: Folga da Esfera (mm)

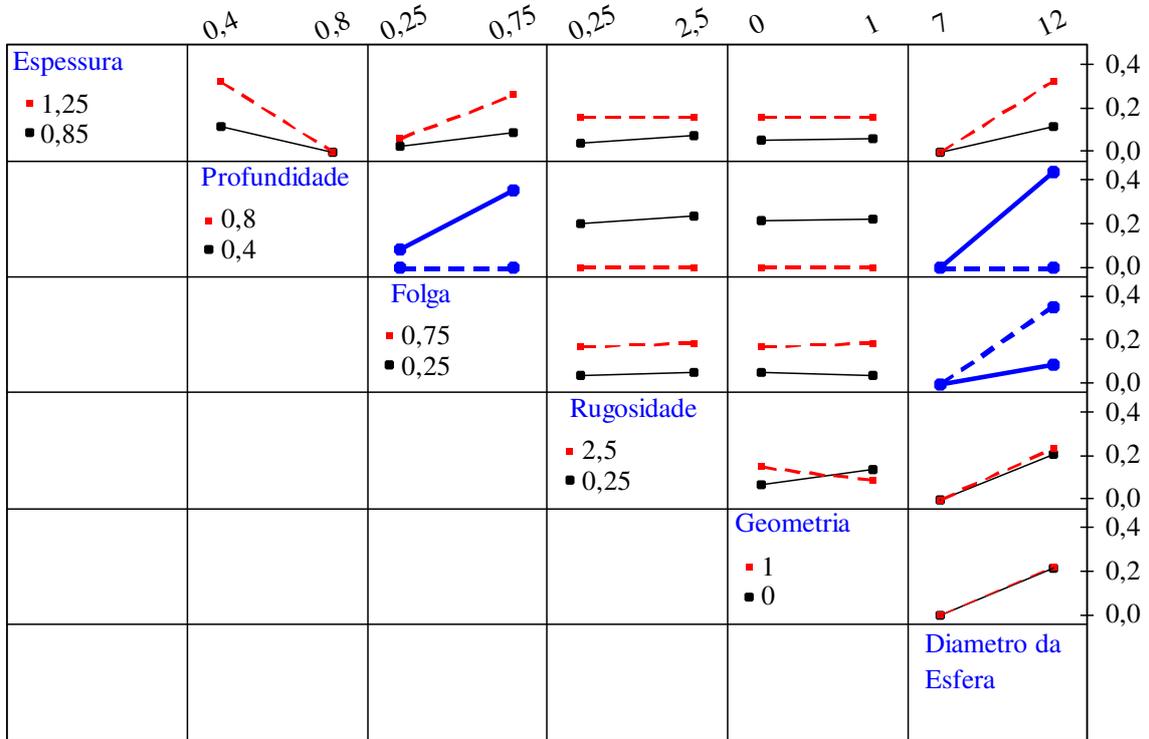


Figura 4.26 – Gráfico dos efeitos das interações sobre a *folga da esfera*. No destaque as principais interações sobre a *folga da esfera*.

4.2.4.2 – Análise dos Efeitos dos Níveis

Folga da Esfera

Considerando que para os experimentos realizados não houve replicações das amostras, e com a finalidade de confirmar os resultados obtidos nos experimentos fatoriais fracionados realizados, foram realizados novos experimentos num planejamento aleatorizados por níveis.

Para tanto, foram considerados os resultados descritos no tópico 4.2.4.1 – Análise de Variância para *folga da esfera* e as observações descritas a seguir:

1. A *rugosidade* dos punções não é significativa ao nível de 10% de significância de modo que foi considerado como variável fixa obtendo-se a rugosidade de polimento Ra 0,25 μ m, por apresentar o menor valor para a *força de indentação* e conseqüente redução na energia de fratura;
2. A *geometria do punção* não é significativa ao nível de 10% de significância, e foi considerado como variável fixa o punção esférico, por causar menor valor para a *força de indentação*;
3. O *diâmetro da esfera*: tem grande influência na *folga da esfera*, sendo considerado como variável fixa o diâmetro de 12 mm, por apresentar menor valor para a *força de indentação*;
4. A *folga para indentação* tem influência significativa na *folga da esfera* e foi considerado como variável a ser estudada em sete níveis: 0,20; 0,31; 0,44; 0,56; 0,70; 0,84 e 0,96mm;
5. A *profundidade da indentação* tem grande influência na *folga da esfera*, e foi considerado profundidade real o valor de 0,80mm, como realizado no item 4.3.6.

Em todos os experimentos realizados para a espessura da parede do tubo de 0,85mm não foi verificado a presença da *folga da esfera* após o cravamento.

Já para a espessura da parede do tubo de 1,25mm foram obtidos os resultados apresentados na tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resultados do teste de hipóteses para *folga da esfera e espessura do tubo*: 1,25mm.

Teste de Hipótese					
Espessura do Tubo:		1,25 MM			
Variável Resposta:		FOLGA da ESFERA (mm)			
NÍVEIS	NÍVEL	OBSERVAÇÕES		TOTAIS	MÉDIAS
	FOLGA PARA INDENTAÇÃO	1	2		
1	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,84	0,05	0,00	0,05	0,03
7	0,96	0,15	0,10	0,25	0,13
				0,30	0,02
a = 7 n = 2 N = n*a N = 14 a-1 = 6 N-a = 7		SStrat./(a-1) = 0,0043452 SSE/(N-a) = 0,0003571 Fo = 12,17			
SST 0,03 SStrat. 0,03 SSE 0,00		F 0.01, v1,v2 v1 = 6 v2 = 7 F 0.01, 6,7 = 7,19			

Como F_o foi maior que $F_{0,01;6;7}$, conclui-se que a *folga para indentação* é significativa para $\alpha = 1\%$, para *espessura do tubo* igual a 1,25mm e, confirmando a análise do item 4.2.4.1.

4.2.5 – Resumo dos Resultados dos Experimentos Fatoriais Fracionados

A tabela 4.15 apresenta os resultados das análises estatísticas de todos os experimentos fatoriais e experimentos aleatorizados por níveis apresentados anteriormente.

Na simbologia adotada, o sentido das setas indica a melhor otimização que pode ser feita no processo quanto às seis variáveis estudadas.

Tabela 4.15 – Resumo das análises estatísticas dos planejamentos experimentais.

VARIÁVEIS	NÍVEIS	OBJETIVO			CONCLUSÃO
		Força Resistência à Indentação ↓	Força de Extração ↑	Folga da Esfera ↓	
PROFUNDIDADE DA INDENTAÇÃO (MM)	0,40	↓			VARIÁVEL DE CONTROLE NO PROCESSO
	0,80		↑	↓	
ESPESSURA DO TUBO (MM)	0,85	↓		NÃO SIGNIFICATIVA	VARIÁVEL FIXA MEDIANTE NECESSIDADE DO PROJETO DO PRODUTO
	1,25		↑		
FOLGA PARA INDENTAÇÃO (MM)	0,25		NÃO SIGNIFICATIVA	↓	VARIÁVEL DE CONTROLE NO PROCESSO
	0,75	↓			
DIÂMETRO DA ESFERA (MM)	7,00		↑	↓	VARIÁVEL FIXA MEDIANTE NECESSIDADE DO PROJETO DO PRODUTO
	12,00	↓			
GEOMETRIA DO PUNÇÃO (FORMA)	QUADRADO		NÃO SIGNIFICATIVA	NÃO SIGNIFICATIVA	VARIÁVEL FIXA - FORMA ESFÉRICA
	ESFÉRICO	↓			
RUGOSIDADE DO PUNÇÃO (Ra)	0,25	NÃO SIGNIFICATIVA	NÃO SIGNIFICATIVA	NÃO SIGNIFICATIVA	VARIÁVEL FIXA - SUPERFÍCIE POLIDA
	2,50				

Desta forma conclui-se que as melhores condições de processo são representadas por:

1. Com o aumento da *profundidade da indentação* obtém-se uma maior *força de extração* para a esfera e uma menor *folga da esfera* após o cravamento, porém a *força de indentação* aumenta podendo ocasionar trincas na região indentada;
2. Com o aumento da *espessura do tubo* consegue-se também aumentar a *força de extração* da esfera sem alterar significativamente a *folga da esfera*;

3. Com o aumento da *folga para a indentação* a *força de extração* não se altera significativamente e a *força de indentação* diminui, devendo portanto ser objetivado por reduzir a probabilidade de trincas;

4. Comparativamente, a *esfera de diâmetro* de 12mm apresentou menor *força de indentação*, portanto, apresenta menor probabilidade de gerar trincas. Em contrapartida a esfera de 7mm apresentou maior *força de extração* da esfera e menor *folga da esfera*;

5. A *geometria* esférica do punção diminuiu significativamente a *força de indentação*, porém para a *força de extração* e para a *folga da esfera* não é significativa;

6. A *rugosidade* do punção não apresentou influência significativa para a *força de indentação*, para a *força de extração* e para a *folga de indentação*.

4.3 – Análise Comparativa da Força de Indentação – Métodos Numérico e Experimental

Uma vez obtidos os resultados pelo método numérico e pelo método experimental, apresentados na tabela 4.16, foi possível fazer uma análise comparativa entre os mesmos.

Tabela 4.16 – Força de indentação obtida para métodos numérico e experimental, considerando a *profundidade de indentação* igual a 0,85mm.

	Número do Ensaio	Espessura do Tubo (mm)	Folga entre Esfera e D. Interno do Tubo (mm)	Geometria do Punção Raio (mm)	Diâmetro da Esfera (mm)	Força de Indentação M.Numérico (N)	Força de Indentação M. Experimental (N)	Diferença no Resultado (N)	Diferença no Resultado (%)
P. Quadrado	3	0,85	0,25	0	12	3190	4605	1415	31%
	4	1,25	0,25	0	7	3115	5763	2648	46%
	7	0,85	0,75	0	7	1914	3680	1766	48%
	8	1,25	0,75	0	12	2142	3521	1379	39%
P. Esférico	19	0,85	0,25	1	7	3838	4237	399	9%
	20	1,25	0,25	1	12	4073	4164	91	2%
	23	0,85	0,75	1	12	2040	1695	-345	20%
	24	1,25	0,75	1	7	3037	4427	1390	31%

Comparando-se esses valores e as curvas de *força de indentação X profundidade*, figura 4.29, observa-se para o punção de forma quadrada uma grande diferença entre a forma dessas curvas bem como dos resultados obtidos.

Para esse punção, as *forças de indentação* obtidas no método numérico para as amostras 03, 04, 07 e 08 na profundidade de 0,85mm são de 31 a 48% menor que as *forças de indentação* obtidas no método experimental.

Em contra partida, para o punção esférico os resultados obtidos para as *forças de indentação* são mais próximos, tanto que para as amostras 19, 20 e 23 as curvas praticamente se coincidem, como observa-se na figura 4.27.

Para as amostras: 19, 20, a diferença entre os resultados obtidos para a *profundidade de indentação* de 0,85mm variou de 2 a 9%.

A amostra 23 apresentou para o método numérico uma curva *força de indentação X profundidade* coincidente com a curva obtida para o método experimental, porém, na profundidade de 0,85mm a diferença entre os resultados foi de 20%.

Para a amostra 24, as formas dessas curvas são semelhantes, porém com inclinações diferentes, sendo que a diferença entre os resultados obtidos na profundidade de 0,85mm foi de 30%.

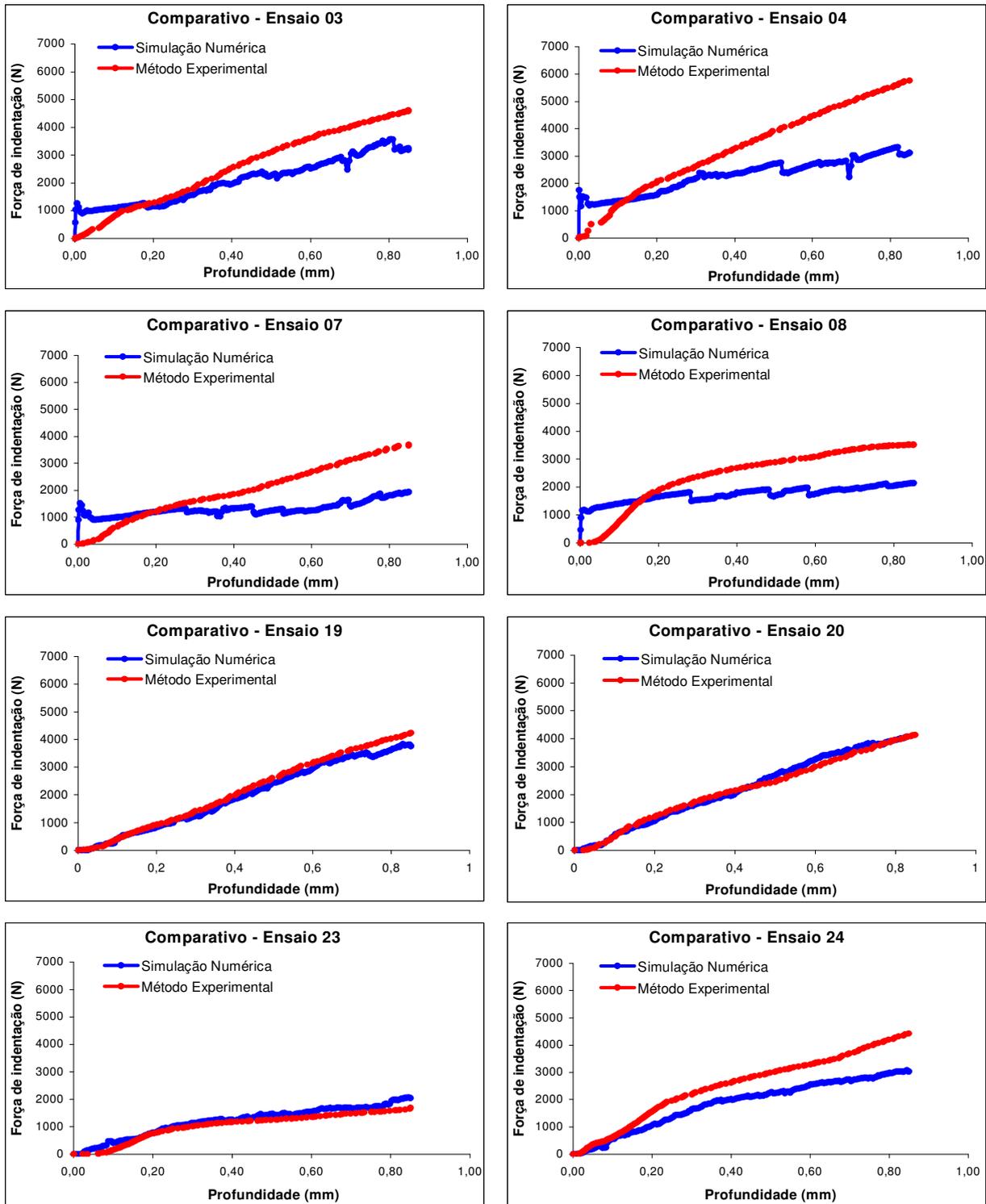


Figura 4.27 - Curvas de *força de indentação X profundidade* para as amostras 03, 04, 07, 08, 19, 20, 23 e 24 obtidas para os métodos numérico e experimental.

4.4 – Análise Visual de Presença de Trincas por Microscopia Eletrônica de Varredura

A tabela 4.17 apresenta os cps analisados segundo o procedimento descrito no item 3.4.4.

Tabela 4.17 – Legenda dos cps cravados e analisados no MEV.

Corpos de	Tipo de Punção
04 e 07	Punção Quadrado Polido
11 e 16	Punção Quadrado Jateado
19 e 24	Punção Esférico Polido
28 e 31	Punção Esférico Jateado

Esses cps, todos cravados com *esfera de diâmetro* igual a 7 mm foram escolhidos, pois comprovou-se pela análise das curvas de *força de indentação x profundidade* obtidas no experimento fatorial fracionado I, que a variável *diâmetro da esfera* causa uma maior concentração de tensões devido a sua forma *geométrica*, já que comparada com a esfera de 12 mm de diâmetro, a esfera de 7 mm tem uma menor superfície de apoio durante o cravamento.

Na figura 4.28 são mostrados os locais onde foram feitas as fotos MEV.

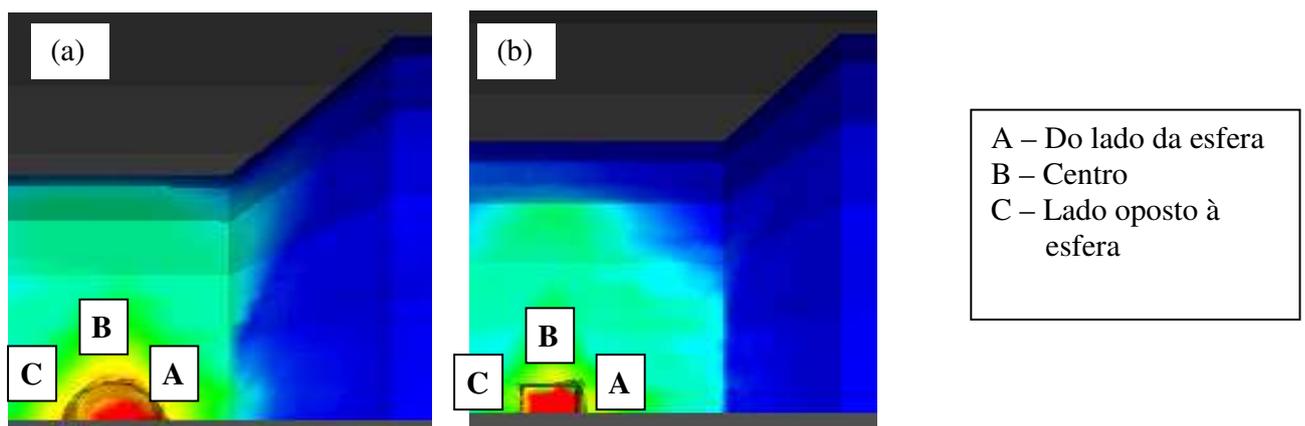


Figura 4.28 – Localização das regiões da indentação fotografadas no MEV: (a) punção esférico; (b) punção quadrado.

A figura 4.29 apresenta foto da superfície usinada do corpo de prova, na qual são notados sulcos provenientes do torneamento cilíndrico dessa região, com rugosidade Ra na faixa de 2,50 a 3,50.

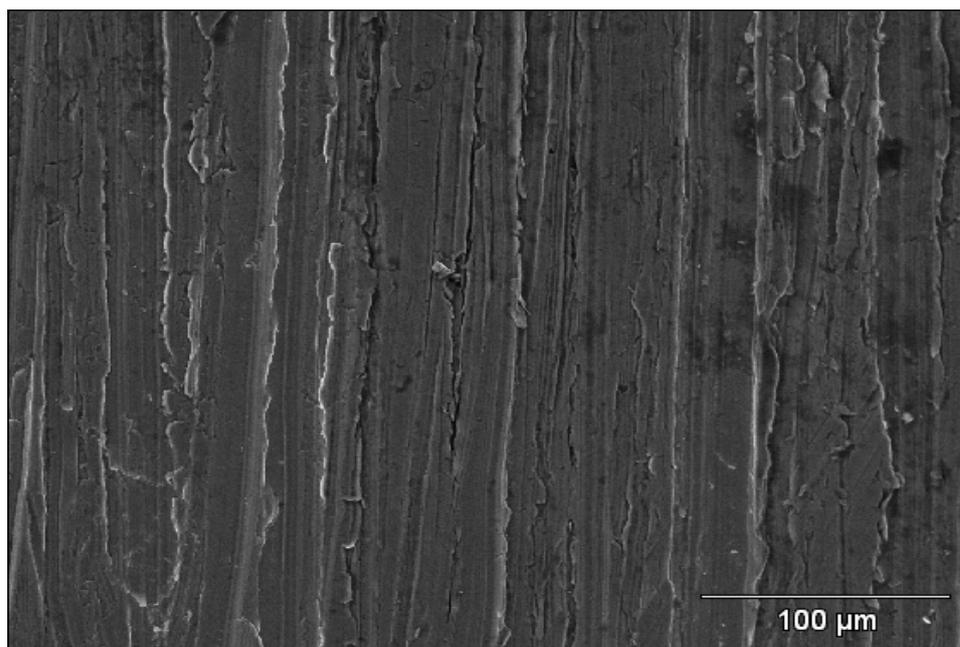
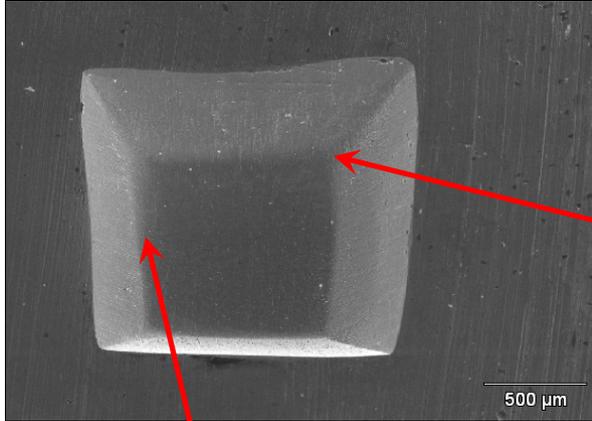


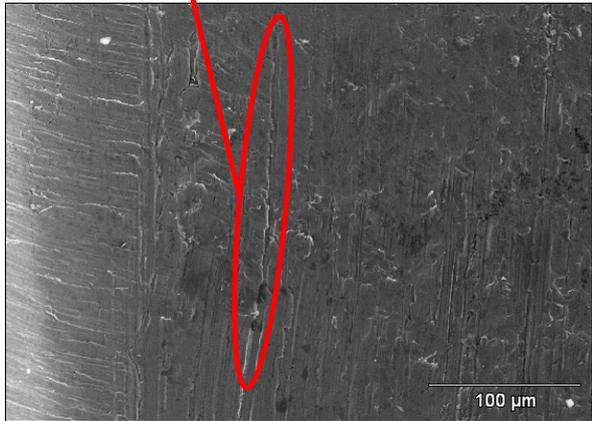
Figura 4.29 – Imagem obtida por MEV da amostra 07, punção 01, observa-se a superfície usinada do cp 07 anterior ao cravamento, e que representa todos os cps.

Ensaio 04

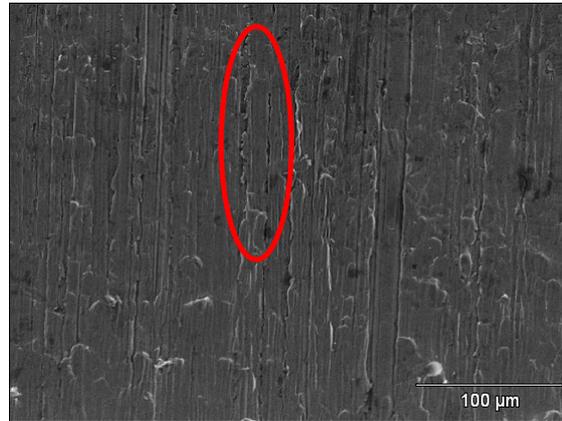
(a) Punção quadrado e polido



(b) Vértice do lado da esfera (A)



(c) Lado oposto à esfera (C)



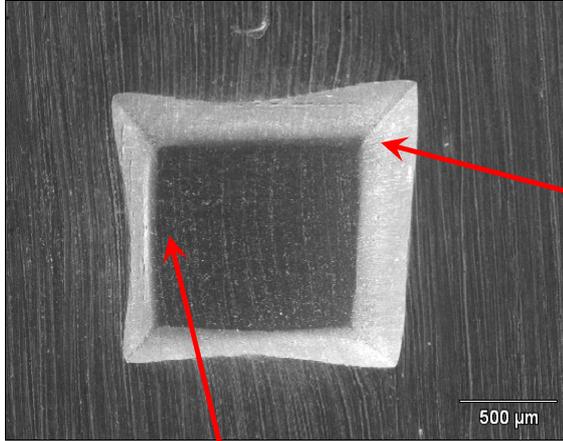
(d) Centro da indentação (B)

Figura 4.30 – Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 04: (a) vista da indentação, (b) formação de micro fissuras no vértice da indentação, (c) sulco de usinagem remanescente próximo à parede lateral da indentação, (d) sulcos de usinagem remanescentes na área central da indentação.

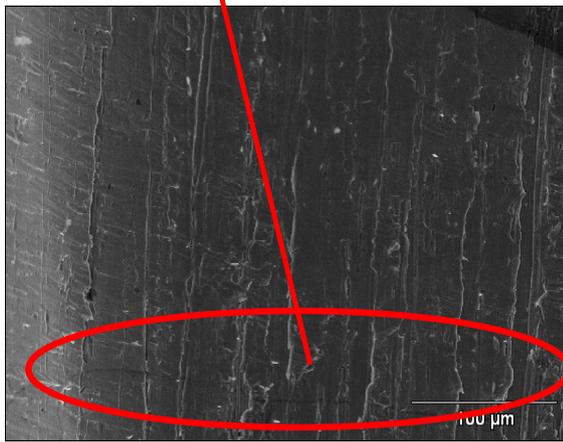
Na figura 4.30 verifica-se uma indentação em forma tronco de pirâmide, com uma textura pouco rugosa devido ao uso de um punção polido com rugosidade R_a de $0,25\mu\text{m}$, com micro fissuras de $60\mu\text{m}$ de comprimento no vértice da indentação.

Ensaio 07

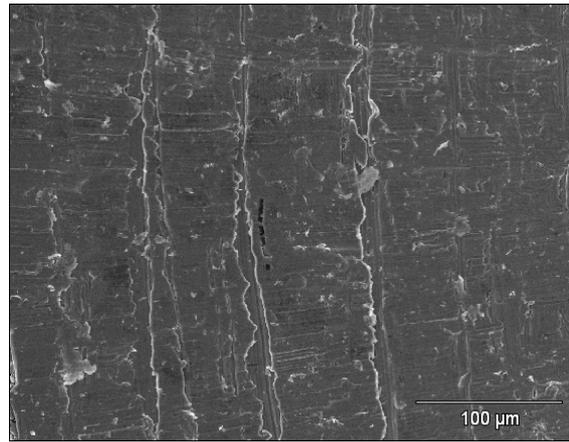
(a) Punção quadrado e polido



(b) Vértice do lado da esfera (A)



(c) Lado oposto à esfera (C)



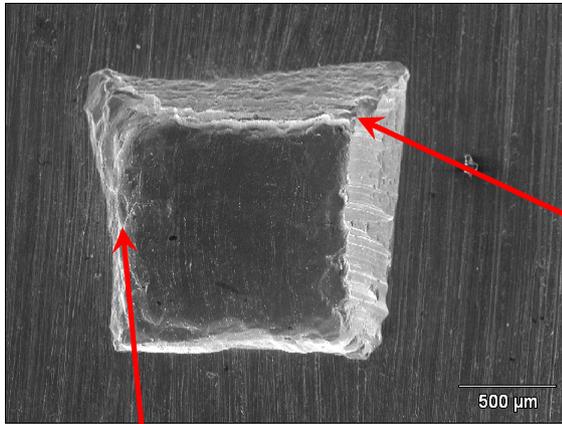
(d) Centro da indentação (B)

Figura 4.31 – Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 07: (a) vista da indentação, (b) formação de micro fissuras no vértice da indentação, (c) micro-fissura próxima a área lateral do punção, (d) sulcos de usinagem remanescente na área central.

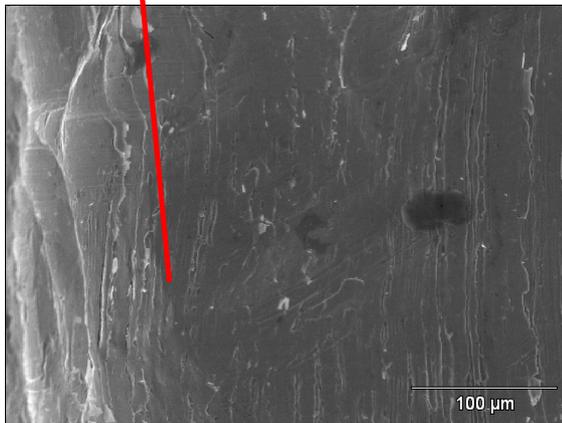
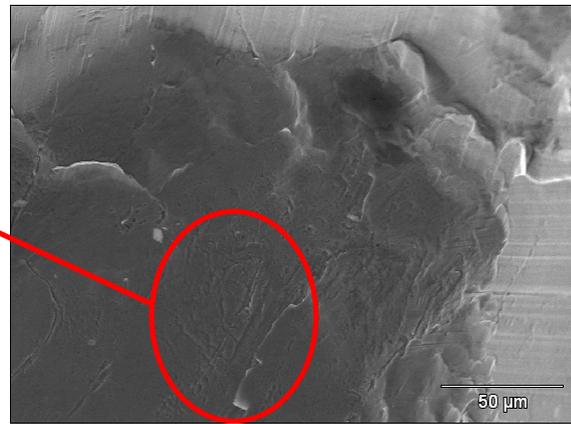
Na figura 4.31 também verifica-se a indentação em forma de tronco de pirâmide, com uma textura lisa devido ao uso de um punção polido com rugosidade R_a de $0,25\mu\text{m}$, foram observadas fissuras no vértice da indentação de $100\mu\text{m}$ de comprimento e uma micro trinca com mais de $300\mu\text{m}$ de comprimento, no sentido perpendicular ao sentido dos sulcos de usinagem.

Ensaio 11

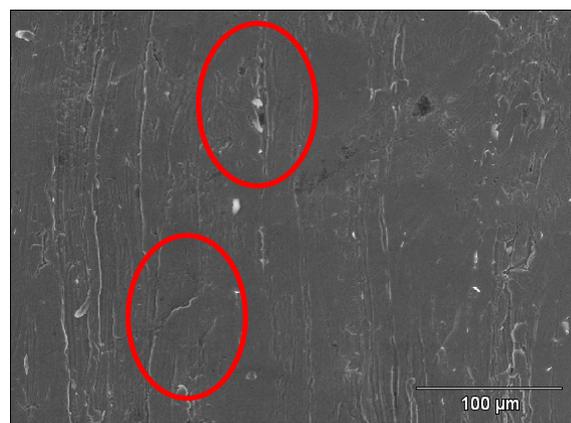
(a) Punção quadrado e jateado



(b) Vértice do lado da esfera (A)



(c) Lado oposto ao da esfera (C)



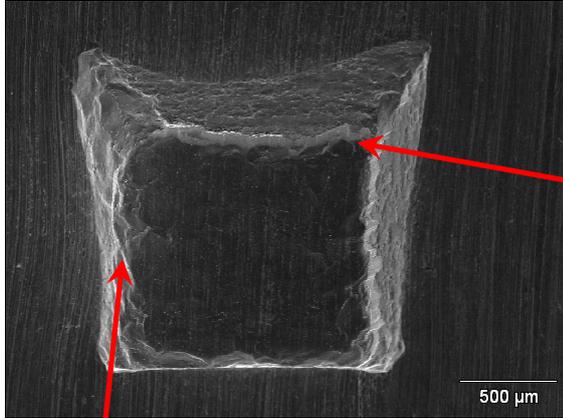
(d) Centro da indentação (B)

Figura 4.32 – Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 11: (a) vista da indentação, (b) formação de micro fissuras no vértice da indentação (c) sulcos de usinagem remanescentes na área próxima a parede do lado oposto à esfera, (d) micro-fissuras no centro da indentação.

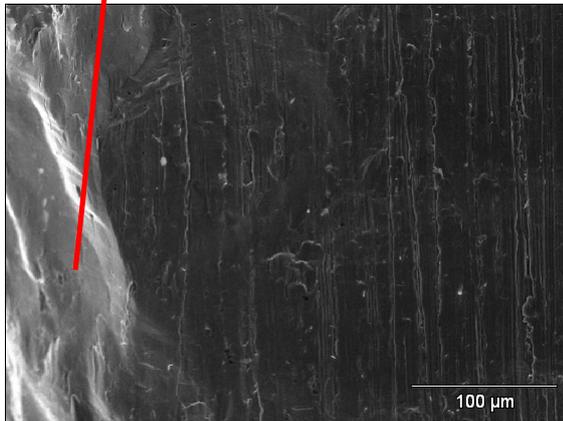
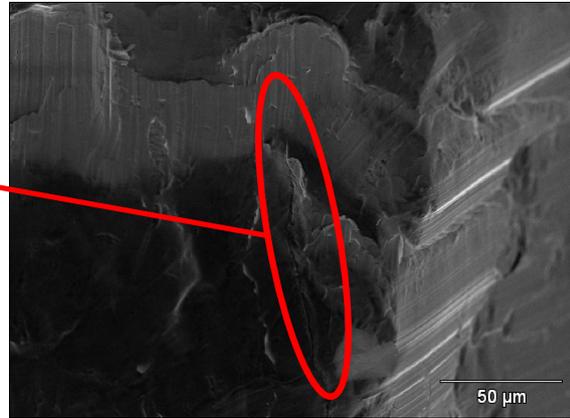
Nas fotos da figura 4.32 é observada a textura mais rugosa presente nas faces da indentação, causada pela rugosidade R_a de 2,50 μm na extremidade do punção. No vértice da indentação podem ser observadas micro-fissuras de 50μm de comprimento e no centro da indentação igualmente, pode ser visto micro-fissuras de 100μm de comprimento.

Ensaio 16

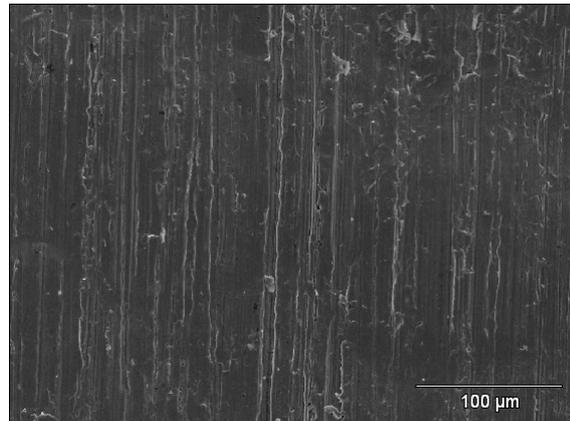
(a) Punção quadrado e jateado



(b) Vértice do lado da esfera (A)



(c) Lado oposto à esfera (C)



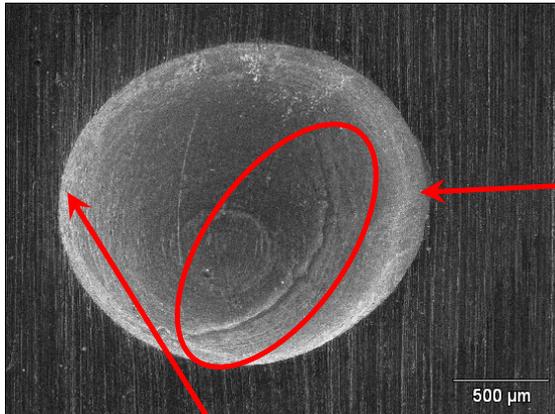
(d) Centro da indentação (B)

Figura 4.33 – Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 16: (a) vista da indentação, (b) formação de micro-fissuras no vértice da indentação, (c) aspecto da superfície lateral, (d) sulcos de usinagem na área central da indentação.

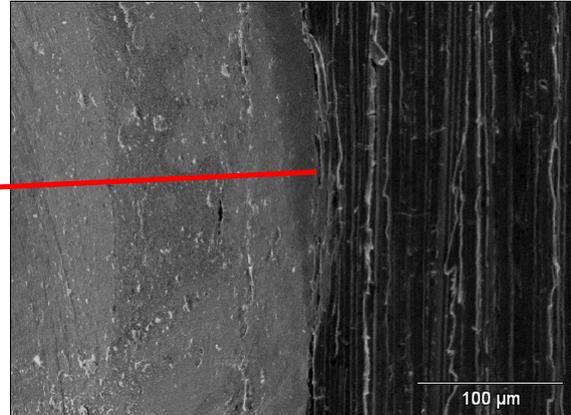
Como na figura anterior, também é observada nas fotos da figura 4.33 a textura mais rugosa presente nas faces da indentação, causada pela rugosidade Ra de 2,5μm na extremidade do punção. No vértice da indentação podem ser observadas micro-fissuras de 120μm de comprimento.

Ensaio 19

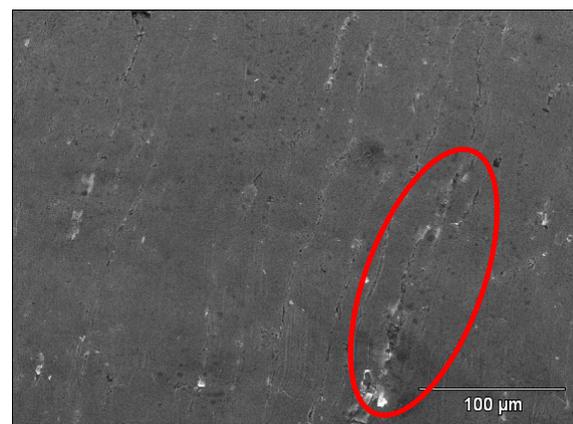
(a) Punção esférico e polido



(b) Lado da esfera (A)



(c) Lado oposto ao da esfera (C)



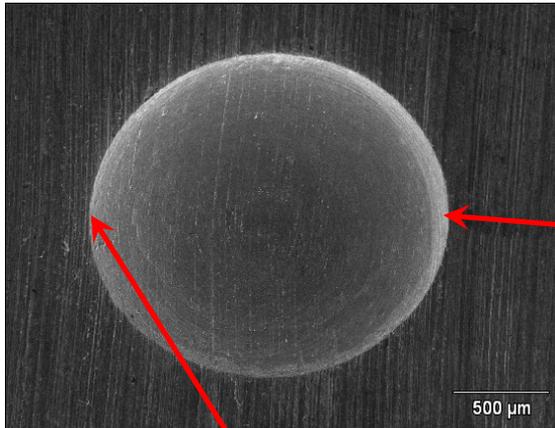
(d) Centro da indentação (B)

Figura 4.34 – Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 19: (a) vista da indentação com trinca, (b) sulcos de usinagem com os picos prensados pelo punção, (c) no lado oposto à indentação pode ser visto provavelmente o início da trinca mostrada na vista (a), (d) sulcos de usinagem no centro da indentação.

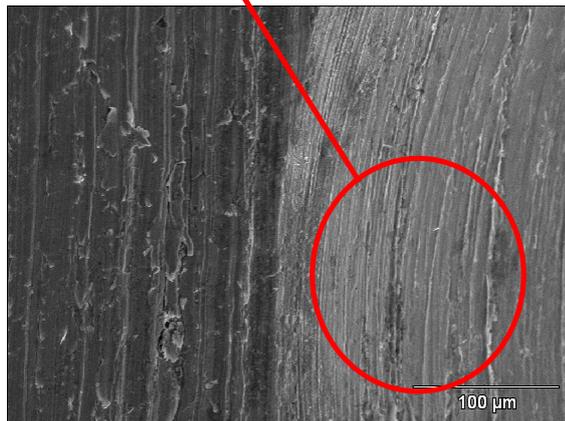
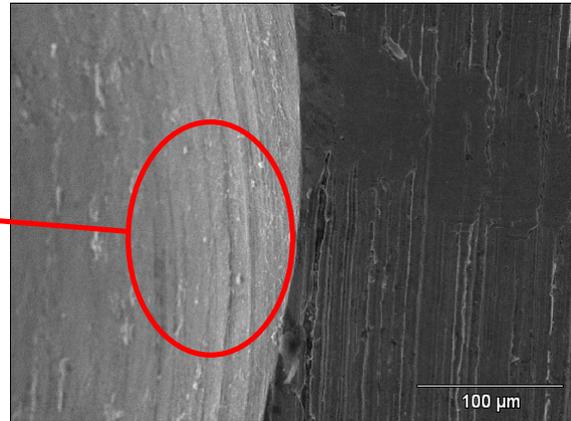
Na figura 4.34 é observado a indentação em forma de calota esférica, com uma textura lisa devido ao uso de um punção com rugosidade Ra de 0,25μm. Em (a) observa-se uma trinca superficial com cerca de 1500μm de comprimento.

Ensaio 24

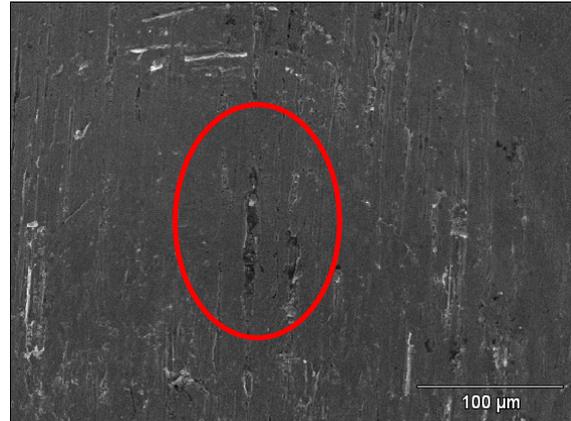
(a) Punção esférico e polido



(b) Lado da esfera (A)



(c) Lado oposto à esfera. (C)



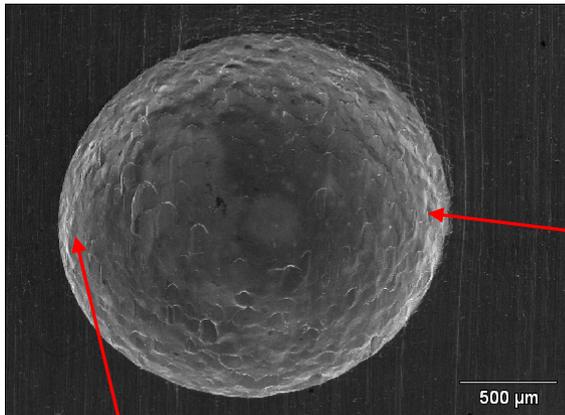
(d) Centro da indentação (B)

Figura 4.35 – Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 24: (a) vista da indentação, (b) lado da esfera com sulcos de usinagem prensados pelo punção, (c) lado oposto à esfera com sulcos de usinagem com os picos prensados pelo punção, (d) centro da indentação com os picos dos sulcos de usinagem prensados pelo punção

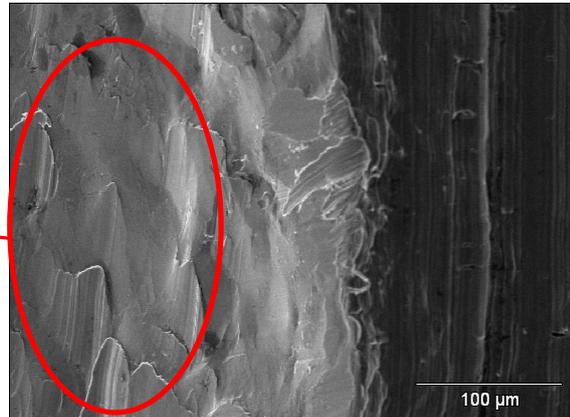
Na figura 4.35 observa-se a indentação em forma de calota esférica, com uma textura pouco rugosa devido ao uso de um punção com rugosidade R_a de $0,25\mu\text{m}$, com os sulcos provenientes de usinagem.

Ensaio 28

(a) Punção esférico e jateado



(b) Lado da esfera (A)



(c) Lado oposto à esfera (C)

(d) Centro da indentação (B)

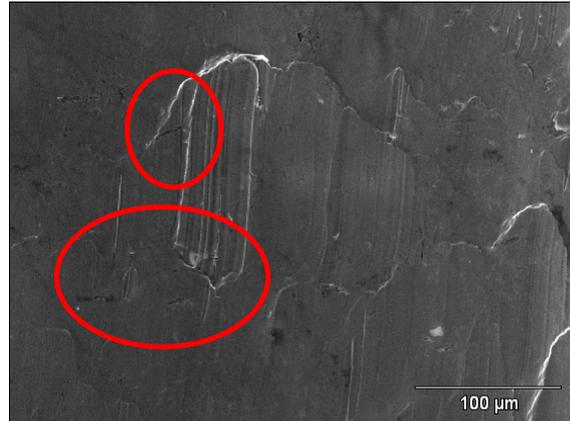
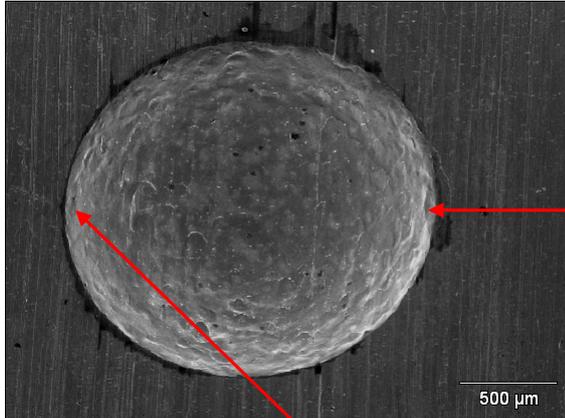


Figura 4.36 – Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 28: (a) vista da indentação, (b) no lado da esfera verifica-se arraste de material pelo punção, (c) no lado oposto à esfera verifica-se superfície rugosa com arraste de material pelo punção, (d) micro-fissuras, variando de 20 a 40 μm de comprimento, localizada no centro da indentação.

Nas figuras 4.36 e 4.37 são observadas as texturas mais rugosas presentes nas faces da indentação, causadas pela rugosidade R_a de $2,50\mu\text{m}$ na extremidade do punção. Nessa textura rugosa pode-se observar o arraste de material devido ao alto atrito provocado pela superfície rugosa do punção e a presença de micro-fissuras com 20 a $40\mu\text{m}$ de comprimento.

Ensaio 31

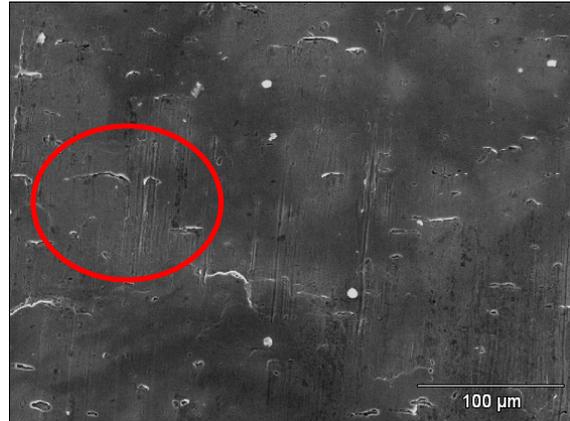
(a) Punção esférico e jateado



(b) Lado da esfera (A)



(c) Lado oposto à esfera (C)



(d) Centro da indentação (B)

Figura 4.37 – Imagens obtidas por MEV para o cp do ensaio 31: (a) vista da indentação, (b) lado da esfera apresentando arraste de material pelo punção, (c) lado oposto à esfera apresentando arraste de material pelo punção, (d) centro da indentação com micro fissuras ocasionadas pelo arraste do punção.

A tabela 4.18 apresenta um resumo dos resultados obtidos na análise com o Microscópio Eletrônico de Varredura.

Tabela 4.18 – Resumo dos resultados obtidos na análise por MEV.

Ensaio	Variáveis de Influência							Características das trincas
	Espessura do tubo (mm)	Folga para Indentação (mm)	Rugosidade (Ra)	Geometria do Punção Raio (mm)	Profund. de Indentação Real (mm)	Dureza Brinell (HB)	Força de Indentação (N)	
4	1,25	0,25	0,25	0	0,82	119	5763	Micro-fissura no vértice: 60µm
7	0,85	0,75	0,25	0	0,91	118	3680	Micro-fissura de 100µm no vértice e de 300µm no sentido perpendicular aos sulcos de usinagem
11	0,85	0,25	2,5	0	0,90	119	4557	Micro-fissura no vértice: 40µm
16	1,25	0,75	2,5	0	0,89	118	5906	Micro-fissura no vértice: 120µm
19	0,85	0,25	0,25	1	0,85	115	4238	Micro-fissura de aproximadamente 1500µm - sentido: radial
24	1,25	0,75	0,25	1	0,82	118	4427	Micro-fissuras provenientes de sulcos de usinagem
28	1,25	0,25	2,5	1	0,80	118	6111	Micro-fissura de 20µm a 40µm no sentido perpendicular aos sulcos de usinagem
31	0,85	0,75	2,5	1	0,81	125	2788	Micro-fissura: 20µm a 40µm no sentido perpendicular aos sulcos de usinagem

Todos os cps apresentaram fissuras na superfície indentada, sejam nos vértices das indentações feitas por punções quadrados, sejam nas superfícies das indentações feitas pelo punção de *geometria* esférica.

Grande parte das micro-fissuras verificadas por MEV ocorre em função dos sulcos de remanescentes da usinagem do cp.

A dificuldade de se caracterizar as micro-fissuras e correlacioná-las com possíveis trincas que possam causar a falha do cp, não permitem afirmar se a partir dos resultados do MEV quais seriam as melhores condições para o processo de cravamento.

4.5 – Resultados dos Ensaios de Vazamento

Para verificação da presença de trincas passantes após o cravamento, foram realizados ensaios de vazamento seguindo o procedimento descrito no item 3.5.5 em todos cps obtidos nos experimentos fatoriais fracionados e nos experimentos aleatorizados por níveis.

Como resultado observa-se que não houve queda de pressão acima de 1 polegada de Hg no tempo de 60 segundos para nenhum dos cps analisados, concluindo-se que todas as microfissuras verificadas por MEV não possuem características de fissuras passantes ou trincas passantes.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

5.1 – Conclusões sobre o Dispositivo de Cravamento

A despeito do dispositivo de cravamento apresentar uma considerável variação para a obtenção da *folga para indentação* e para a *profundidade de indentação*, o mesmo permitiu satisfatoriamente a execução dos ensaios propostos pelo método experimental através da regulação e controle da *folga para indentação*, da medição da *profundidade da indentação*, da medição da *força de indentação* e da flexibilidade para utilização de punção com diferentes *formas geométricas e rugosidade*.

5.2 – Conclusões dos Resultados dos Experimentos Fatoriais Fracionados

1. A variável *diâmetro da esfera* tem diferentes efeitos sobre as variáveis de resposta estudadas. Considerando que o requisito funcional do projeto de ausência de trincas passantes seja primordial, a utilização de esfera com diâmetro de 12mm é recomendável no processo de cravamento em relação à esfera de 7mm, pois apresenta menores *forças de indentação*, o que deve causar um acúmulo de tensões internas logo abaixo da indentação. Todavia quando se deseja um aumento na *força de extração da esfera* e redução da *folga da esfera*, a esfera de 7mm apresenta melhores resultados;

2. As variáveis *espessura do tubo* e *folga para indentação* devem ter um controle mandatório no processo de cravamento, pois são características críticas, já que apresentam influência significativa nas variáveis de resposta *força de indentação* e *força de extração da esfera*;
3. A variável de *influência geometria* do punção tem influência significativa na *força de indentação*, sendo que a forma esférica oferece uma menor *força de indentação* e portanto é recomendável que os punções cravadores possuam formas arredondadas;
4. A variável de influência *profundidade de indentação* é a variável de maior influência na *força de indentação*. Assim, no processo de cravamento deve-se buscar a máxima profundidade admissível para garantir a não formação de fissuras.
5. As variáveis de influência: *profundidade de indentação*, *diâmetro da esfera* e *folga para indentação* são causas de variações na *folga da esfera* após cravamento.
6. Para o dimensionamento das especificações de processos para um dado *diâmetro de esfera*, num processo de cravamento similar ao apresentado, é mandatório a verificação gráfica considerando: o posicionamento e *profundidade da indentação*, tomando-se o cuidado em considerar a *folga para indentação* necessária para dar liberdade à conformação do material sem gerar acúmulo de tensões indesejáveis que poderão gerar fissura ou trincas, maximizando a *força de extração* da esfera através do aumento da *espessura do tubo* e permitindo uma folga entre o tubo e a esfera adequada de 0,05mm a 0,15mm em função do controle da *profundidade da indentação*.

5.3 – Conclusões dos Resultados dos Experimentos Aleatorizados por Níveis

1. A variável de resposta *força de indentação* é, ao nível de significância de 1%, influenciada pela variável de processo *folga para indentação* no intervalo estudado de 0,20 a 0,96mm, tendo como fator relevante nas curvas *força de indentação x profundidade* o aparecimento de ponto de inflexão devido à reação oferecida pela esfera na penetração. As curvas *força de indentação x profundidade* nas folgas para indentação: 0,84 e 0,96mm apresentaram um crescimento constante

e uniforme com menor taxa de crescimento para a *força de indentação* e conseqüente menor energia de deformação, isto deve ser objetivado no controle do processo de cravamento.

2. A variável de resposta *força de extração* é influenciada pelas variáveis de influência *espessura do tubo* e *folga para indentação*, sendo que a *espessura do tubo*, para os níveis de 0,85 e 1,25mm, apresentou, ao nível de significância de 1%, uma diferença média de 600N na *força de extração da esfera*. Já a *folga para indentação*, para os níveis de 0,20 a 0,96mm, apresentou, ao nível de significância de 1%, um incremento médio na *força de extração* de aproximadamente 250N.

3. A variável de resposta *folga da esfera*, após o cravamento, é influenciada pela variável de processo *folga para indentação* ao nível da espessura do tubo igual a 1,25mm e ao nível de profundidade de indentação igual 0,80mm não foi verificada *folga da esfera* para o nível da espessura do tubo igual a 0,85mm.

5.4 - Conclusões dos Resultados do Método Numérico

1. Tanto a *força de indentação* como a *tensão efetiva* e a *deformação plástica efetiva* foram maximizadas quando utilizado o valor mínimo para a variável de influência *folga para indentação*. Em contrapartida, quando a *folga para indentação* aumenta, a *força de indentação* juntamente com a *tensão efetiva* e a *deformação plástica* são reduzidas. Utilizando o índice *fator de intensidade* concluiu-se que a variável *folga para indentação* é a de maior influência na *força de indentação*, *tensão efetiva* e *deformação efetiva* quando comparada com as variáveis de influência: *espessura da parede do tubo* e *forma geométrica do punção*.

2. Em análise comparativa entre o método numérico e o método experimental, foi verificado uma significativa diferença entre os resultados obtidos para punção de *forma quadrada*. Para o punção de *forma quadrada* a diferença de resultado chegou a 48% enquanto que para o punção de *forma esférica* tanto a forma da curva *força de indentação x profundidade* como os resultados obtidos para a *força de indentação* foram muito próximos: dois ensaios com diferença da *força de indentação* abaixo de 10% e dois ensaios com a força de indentação sendo 20 e 30% diferentes

dos correspondentes ensaios experimentais. Conclui-se que o modelo numérico apresentado com a utilização do software MSC.Superforge 2005 não apresentou equivalência de resultado para a *força de indentação* quando se utiliza punção de *forma quadrada*.

5.5 - Conclusões dos Resultados da Análise MEV e Teste de Vazamento

1. Todas as amostras analisadas apresentaram a presença dos sulcos remanescentes da usinagem, e supõe-se que esses sulcos podem dar origem às trincas e fissuras, considerando-se que muitas delas apresentaram-se na mesma direção desses sulcos.
2. Todas as amostras que foram indentadas com *punção quadrado* apresentaram micro fissuras nos vértices, sendo que uma delas apresentou uma trinca perpendicular ao sentido dos sulcos de usinagem, evidenciando uma alta deformação plástica.
3. Em função de ser incerto a caracterização das micro-fissuras e correlacioná-las com possíveis trincas que possam causar a falha do cp, não se pode afirmar a partir dos resultados do MEV, quais seriam as melhores condições para o processo de cravamento.
4. Embora todos os cps apresentem certa quantidade de micro-fissuras na região da indentação, após a realização de teste de vazamento utilizando pressão negativa, não foi detectado cps com vazamento, portanto todas as micro-fissuras identificadas não são passantes, o que pode permitir a utilização de componentes numa situação similar não afetando a funcionalidade do produto.
5. Nas amostras em que foram feitas as indentações com a utilização de punção esférico com maior rugosidade, foram observadas texturas mais rugosas presentes nas superfícies da indentação, isso foi causado pelo grande atrito gerado entre as superfícies provocando o arraste de material e conseqüente presença de micro-fissuras, sendo portanto indicado a utilização de punção com a superfície polida no processo de cravamento.

5.6 – Sugestões para Trabalhos Futuros

1. A relação *profundidade de indentação / espessura do tubo* denota importância, pois para mesma *profundidade de indentação* em espessuras diferentes foi verificado resultados diferentes para a *folga da esfera*;
2. A variável de influência *efeito mola* do material poderá ser estudada futuramente, pois durante a execução dos experimentos verificou-se que a *profundidade de penetração* real medida após os ensaios foi menor que a verificada no transdutor de variação linear – LVDT em todos os cps estudados;
3. O *afinamento da espessura* na região da indentação pode ter influência significativa na *força de extração da esfera* e na nucleação de trincas indesejáveis;
4. O *número de indentações* utilizado pode ser aumentado para quatro, cinco e seis, portanto torna-se necessário verificar a influência desta variável na *força de extração* e na *folga da esfera*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Argatov, I.I., The indentation of a punch in the form of an elliptic paraboloid into the plane boundary of an elastic body, *J. App. Maths. Mechanics*, 63, No 4 (1999), pp. 641-649.

Byun, T. S., Kim, J. W. and Hong J. H., A Theoretical Model for Determination of Fracture Toughness of Reactor Pressure Vessel Steels in the Transition Region from Automated Ball Indentation Test, *Journal of Nuclear Materials*, 252 (1998), pp. 187-194.

Ciavarella, M., Hills, D.A., Monno, G., The influence of rounded edges on indentation by a flat punch, *Instn Mech Engrs*, (1997), pp. 319-327.

Dally, J.W., Riley, W.F. e Mc Connelli, K.G., *Instrumentation for Engineering Measurements*, John Wiley and Sons, 2ª edição, 1993, in.

Dini, D., Nowell D., Prediction of the slip zone friction coefficient in flat and rounded contact, *Wear* 254 (2003), pp. 364–369.

Gaspar, M.C., Ramalho, A., Fretting behaviour of galvanised steel, *Wear* 252 (2002), pp. 199–209.

Goryacheva, I.G., Murthy, H. , T.N. Farris, Contact problem with partial slip for the inclined punch with rounded edges, *International Journal of Fatigue*, 24 (2002), pp. 1191–1201.

- Haggag, F.M., Byun, T.S., Hong, J.H., Miraglia, P.Q. e Murty, K.L. (1998), Indentation energy to fracture (IEF) parameter for characterization of DBTT in carbon steels using nondestructive automated ball indentation (ABI) technique, *Scripta Met and Mater.*, 38 (1998), pp. 645 - 651.
- Han, S.S., The influence of tool geometry on friction behavior in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 63 (1997), pp. 129-133.
- Hwu, C., Fan, C.W., Solving the punch problems by analogy with the interface crack problems, *Int. J. Solids Structures*, 35, No 30 (1998), pp. 3945-3960.
- Jaffar, M.J., Frictionless contact between an elastic layer on a rigid base and a circular flat-ended punch with rounded edge or a conical punch with rounded tip, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44 (2002), pp. 545–560.
- Kim, H.-K., Lee, S.-B., Influence of indenter geometry on half-plane with edge crack subjected to fretting condition – *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 36 (2001), pp. 125–139.
- Lee, B.H., Keum, Y.T., Wagoner, R.H., Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming, *Journal of Material Processing Technology* 130-131 (2002), pp. 60-63.
- Lubkin, J.L., Contact Problems, *Handbook of Engineering Mechanics*, Mc-Graw –Hill Book Company, New York 42 (1962), pp. 1-12
- Malzbender, J., With, G. Sliding indentation, friction and fracture of a hybrid coating on glass, *Wear*, 236 (1999), pp. 355–359.
- Metals Handbook, American Society for Metals – Forming 8a. ed. Vol. 4 (1969), pp. 162-193.

Mindlin, R.D., Compliance of elastic bodies in contact, *J. Appl. Mech.* (1949), 16, pp. 259-268, in.

Murty, K.L., Mathew, M.D., Miraglia, P. Q., Shah, V.N., e Haggag, F.M, Non-destructive evaluation and fracture properties of materials using stress-strain microprobe, North Caroline State University, Materials Research Society, Pennsylvania, USA (1998), pp. 327–337.

Mushkelishvili, N.I., *Singular Integral Equation* (Traduzido por Radock, J.R.M.) – Noordhoff International Publishing (1977), in.

Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, 3^a ed., John Wiley and Sons, 1991, in.

Montgomery, D.C., Runger, G.C., *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley and Sons, 1994, in.

Sburlati, R., The contact between a foam core sandwich plate and a rigid indenter, *Composites, Part B*, 33 (2002), pp. 325-332.

Shirgaokar, M., Cho H., Ngaile G., Altan, T., Yu, J.-H., Balconi J., Rentfrow R., Worrell, W.J. Optimization of mechanical crimping to assemble tubular components, *Journal of Materials Processing Technology* 146 (2004), pp. 35-43.

Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., *Theory of Elasticity*, 3a. edição, McGraw Hill, (1970), pp. 409-414.

Zeng, K., Chiu, C.-h., An analysis of load-penetration curves from instrumented indentation, *Acta Materialia Inc. Published by Elsevier Science Ltd.* 49 (2001), pp. 3539-3551.

ANEXO A

Análise de Equivalência de Volume e Superfície de Indentação

A equivalência do volume e da superfície das indentações feitas pelos punções utilizados nos experimentos deste trabalho, figura A.1, foi verificada através dos resultados descritos nas tabelas A.1 e A.2.

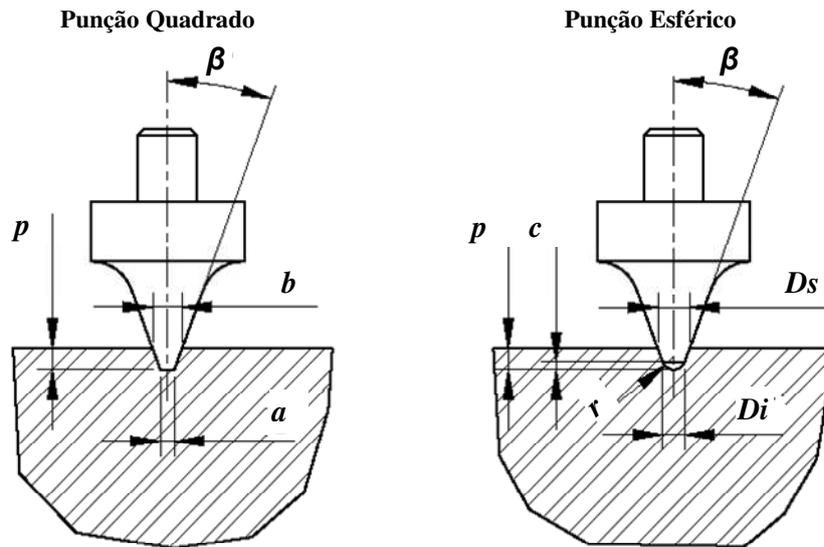


Figura A.1 – Dimensões básicas do punção esférico e do punção quadrado para o cálculo da área e do volume das indentações feitas pelos mesmos.

Tabela A.1 – Volume V_q e superfície S_q da indentação feita pelo punção quadrado.

PUNÇÃO	PROFUNDIDADE "p" (mm)	ÂNGULO "β" (°)	ÂNGULO "β" EM Radianos	LARGURA INFERIOR "a" (mm)	LARGURA SUPERIOR "b" (mm)	AREA INFERIOR "a x a" (mm²)	AREA SUPERIOR "b x b" (mm²)	VOLUME "Vq" (mm³)	SUPERFÍCIE "Sq" (mm²)
QUADRADO	0,5	20	0,3491	1,00	1,364	1,000	1,860	0,704	3,364
	0,85	20	0,3491	1,00	1,619	1,000	2,620	1,484	5,452

Sendo:

$$V_q = \frac{P}{3} \cdot [(a \cdot a) + (b \cdot b) + (\sqrt{(a \cdot a) \cdot (b \cdot b)})] \quad [A.1]$$

$$S_q = \left[\frac{(a+b)}{2} \cdot p \right] \cdot 4 + (a \cdot a) \quad [A.2]$$

Tabela A.2 – Volume V_e e superfície S_e da indentação feita pelo punção esférico.

PUNÇÃO	PROFUNDIDADE "p" (mm)	ÂNGULO "β" (°)	ÂNGULO "β" EM Radianos	RAIO "r" (mm)	ALTURA MAX. CALOTA "c" (mm)	RAIO INFERIOR DO CONE "Di/2" (mm)	RAIO SUPERIOR DO CONE "Ds/2" (mm)	M (mm)	VOLUME "Ve" (mm³)	SUPERFÍCIE "Se" (mm²)
ESFÉRICO	0,5	20	0,3491	1	-	-	-	-	0,654	3,142
	0,85	20	0,3491	1	0,658	0,940	1,010	0,204	1,635	5,386

Para profundidade de indentação até 0,658mm foram utilizadas as seguintes equações:

$$V_e = \pi \cdot p^2 \cdot \left[r - \frac{p}{3} \right] \quad [A.3] \quad S_e = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot c \quad [A.4]$$

Para profundidade de indentação acima de 0,658mm foram utilizadas as seguintes equações:

$$V_e = \pi \cdot c^2 \cdot \left[r - \frac{c}{3} \right] + \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (p-c) \cdot \left[\left(\frac{D_s}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_i}{2} \cdot \frac{D_s}{2} \right) + \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right] \quad [A.5]$$

$$S_e = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot c + \pi \cdot M \cdot \left(\frac{D_i}{2} + \frac{D_s}{2} \right) \quad [A.5] \quad M = (p-c) / \cos\beta \quad [A.6]$$

A diferença entre os volumes e as superfícies de indentações feitas por punção quadrado e por punção esférico é apresentada na tabela A.3.

Tabela A.3 – Diferenças entre os volumes e as superfícies de indentações feitas pelos punções quadrado e esférico.

PROFUNDIDADE "p" (mm)	VOLUME					SUPERFÍCIE				
	VOLUME TRONCO PIRÂMIDE (mm³)	VOLUME ESFÉRICO (mm³)	DIFERENÇA (mm³)	MÉDIA (mm³)	% DESVIO MÉDIO	SUPERFÍCIE TRONCO PIRÂMIDE (mm²)	SUPERFÍCIE ESFERICA (mm²)	DIFERENÇA (mm²)	MÉDIA (mm²)	% DESVIO MÉDIO
0,5	0,704	0,654	0,050	0,679	7%	3,363	3,141	0,222	3,252	7%
0,6	0,900	0,905	-0,005	0,903	-1%	3,924	3,77	0,154	3,847	4%
0,7	1,117	1,188	-0,071	1,153	-6%	4,513	4,665	-0,152	4,589	-3%
0,8	1,356	1,505	-0,149	1,431	-10%	5,13176	5,266	-0,134	5,199	-3%
0,85	1,484	1,672	-0,188	1,578	-12%	5,452	5,599	-0,147	5,526	-3%
				MÉDIA	-4,34%				MÉDIA	0,45%

A tabela A.3 contempla os níveis da variável de influência profundidade de indentação que foram estudadas neste trabalho e estão situados no intervalo de 0,50 a 0,85mm.

A diferença entre os volumes da indentação e as superfícies da indentação são apresentados graficamente nas figuras A.2 e A.3

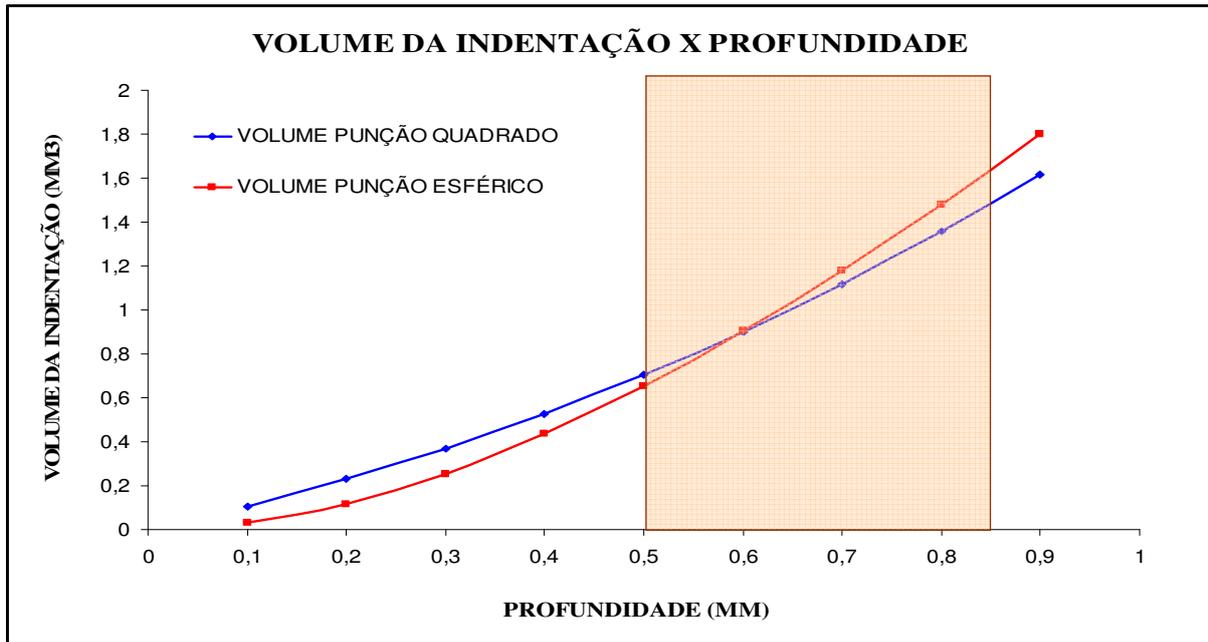


Figura A.2 – Diferença entre os volumes das indentações produzidas por punção quadrado e por punção esférico. No destaque região onde estão situados os níveis da profundidade utilizados no método experimental.

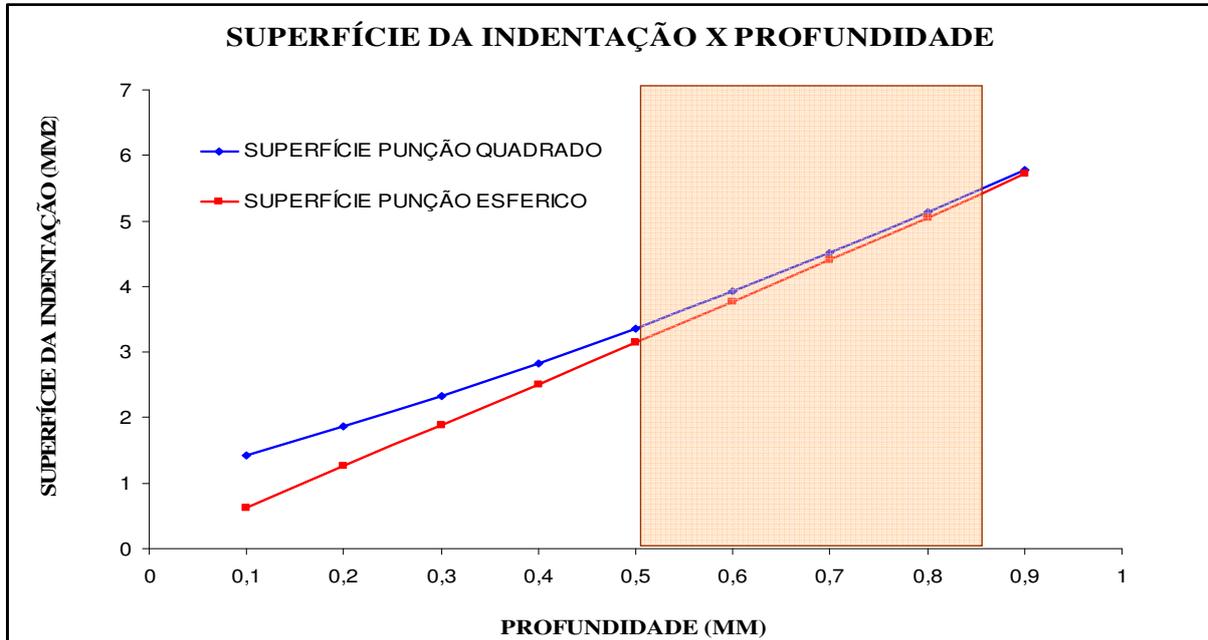


Figura A.3 – Diferença entre as superfícies das indentações produzidas por punção quadrado e por punção esférico. No destaque região onde estão situados os níveis da profundidade utilizados no método experimental.