Enio Yamamotu Ferreira Soares

COEFICIENTE DE ATRITO NO ENSAIO DO ANEL: ESTUDO DO EFEITO DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO, GRAU DE DEFORMAÇÃO E ADERÊNCIA DE MATERIAL À SUPERFÍCIE DA FERRAMENTA

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2013

Enio Yamamotu Ferreira Soares

COEFICIENTE DE ATRITO NO ENSAIO DO ANEL: ESTUDO DO EFEITO DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO, GRAU DE DEFORMAÇÃO E ADERÊNCIA DE MATERIAL À SUPERFÍCIE DA FERRAMENTA

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Titular Amilton Sinatora

São Paulo
2013

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de maio de 2013.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Soares, Enio Yamamotu Ferreira
Coeficiente de atrito no ensaio do anel: estudo do efeito da velocidade de deformação, grau de deformação e aderência de material à superfície da ferramenta / E.Y.F. Soares. – versão corr. -- São Paulo, 2013.
158 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Conformação mecânica 2. Ensaios dos materiais 3. Atrito 4. Desgaste dos materiais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

"*γνῶθι σεαυτόν*". *Conhece-te a ti mesmo*.
Inscrição no Pórtico do templo
de Apolo em Delfos, para lembrar
o homem de sua mortalidade.

Resumo

O ensaio do anel consiste na compressão de uma amostra em formato de anel com as proporções 6:3:2 (diâmetro externo; diâmetro interno; altura) que foi deformada em sua altura. Neste trabalho realizaram-se ensaios de compressão de anel para três ordens de grandeza de velocidades de deformação: 3,00; 0,30; 0,03 mm/s, e dois graus de redução na altura: 20% e 50%. Os ensaios foram realizados em duas condições, uma na qual os ensaios sucessivos foram realizados na mesma posição da ferramenta sem polimento da mesma e outra na qual entre ensaios consecutivos, as ferramentas foram polidas recuperando sua condição superficial inicial. Para cada condição ensaiada sobre superfície polida foram realizadas 10 réplicas. Para ensaios sobre superfície sem polimento intermediário foram realizadas 10 compressões de anéis consecutivas. As ferramentas foram fabricadas de aço ferramenta e os corpos de prova, anéis, em aço SAE 1020 nas dimensões 18 x 9 x 6 mm (raio externo, raio interno e altura). Nas observações das superfícies de trabalho bem como das microestruturas foi utilizado microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura.

Para os ensaios com polimento das ferramentas entre ensaios observou-se que: a) A elevação da redução de altura não resultou na variação do coeficiente de atrito para as três velocidades estudadas. b) Para 50% de deformação a elevação da velocidade resultou numa pequena, porém significativa redução do coeficiente de atrito. Para os ensaios sem polimento intermediário das ferramentas observou-se que: a) O aumento da redução de altura elevou significativamente o valor do coeficiente de atrito para as três velocidades estudadas. b) Para 20% de deformação a elevação da velocidade resultou numa pequena, porém significativa redução do coeficiente de atrito. A análise da superfície das ferramentas mostrou qualitativamente que nos ensaios sem polimento intermediário das ferramentas realizados com 50% de deformação a adesão do material do anel sobre a ferramenta era maior do que para os ensaios realizados com 20%. Atribuiu-se a elevação do coeficiente de atrito em relação aos ensaios com polimento intermediário das ferramentas à adesão de material.

Palavras-chave: ensaio de anel, coeficiente de atrito, conformação mecânica, baixas velocidades de deformação.

Abstract

The test consists of the compression of a ring-shaped sample in the proportion of 6:3:2 (outer diameter; inner diameter; thickness) that was deformed along its height. Ring compression tests were performed with conformation speed in three orders of magnitude: 3,00; 0,30; 0,03 mm/s, and two height reduction degrees: 20% and 50%. The experiments were performed in two different conditions: one in which successive tests were performed in the same tool position without polishing it, and another in which the tools were polished between successive tests, recovering its surface's initial condition. The test under the polished surface condition was repeated 10 times. For the test of surfaces without intermediate polishing, 10 consecutive ring compressions were performed. The dies were made of High Speed Steel and the specimens were made of SAE 1020 steel with dimensions of 18 x 9 x 6 mm (outer radius, inner radius and thickness). The working surface and the microstructures were analyzed with optical microscope and scanning electron microscope.

The tests with intermediate tool polishing presented the following results: a) an increase in the height reduction degree did not result in variation of the friction coefficient in the three studied conformation speed. b) In the tests with 50% of height reduction degree, an increase in the conformation speed resulted in a small but significant decrease in the friction coefficient. The tests without intermediate tool polishing showed that: a) an increase in the height reduction degree significantly increased the friction coefficient for the three studied conformation speed. b) In the tests with 20% of height reduction degree, an increase in the conformation speed resulted in a small but significant decrease in the friction coefficient. The qualitative analysis of the tool surface showed that in the tests without intermediate tool polishing performed with 50% of deformation, the adhesion of ring material on the tool was greater than in the tests with 20% of deformation. The increase in the friction coefficient in relation to the tests with intermediate polishing was attributed to adhesion of material.

Keywords: compression ring test, friction coefficient, mechanical forming, low conformation speed.

Sumário

FICHA CATALOGRÁFICA 3
LISTA DE FIGURAS 10
LISTA DE TABELAS 14
LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIAÇÕES 19
1 INTRODUÇÃO 21
1.1 Objetivo 22
2 REVISÃO DA LITERATURA 22
2.1 Desgaste 22
2.2 Desgaste por deslizamento 26
2.3 Oposição ao movimento - Atrito 30
2.4 Leis do atrito (oposição ao movimento) 31
2.5 Coeficiente de Atrito 31
2.6 Ensaio de compressão do anel 32
2.7 Cronologia dos estudos sobre o ensaio do anel 40
2.8 Ensaios alternativos 41
2.8.1 Tubo cônico 42
2.8.2 Cones contra-postos 44
3 MATERIAIS E MÉTODOS 48
3.1 Caracterização dos Materiais 48
3.1.1 Anel 48
3.1.2 Ferramentas 53
3.2 Métodos 56
3.2.1 Preparação dos corpos de prova (anéis) 56
3.2.2 Preparação das ferramentas 58
3.2.3 Prensa 60
3.2.3.1 Repetitividade da Prensa LFS 150 62
3.2.4 Medição das dimensões do anel deformado 64
3.2.5 Medição das microdurezas do Anel deformado 65
4 Planejamento Experimental 66
4.1 Configuração inicial da prensa 66
4.2 Planejamento dos experimentos 68
5 Resultados e Discussões 69
5.1 Experimentos com polimento intermediário 69

5.1.1 Deformação de 50% na altura com velocidade de 3,00 mm/s ...69
5.1.2 Deformação de 50% na altura com velocidade de 0,30 mm/s ...73
5.1.3 Deformação de 50% na altura com velocidade de 0,03 mm/s ...74
5.1.4 Deformação de 20% na altura com velocidade de 3,00 mm/s ...75
5.1.5 Deformação de 20% na altura com velocidade de 0,30 mm/s ...76
5.1.6 Deformação de 20% na altura com velocidade de 0,03 mm/s ...77
5.2 Experimentos sem polimento intermediário ...78
5.2.1 Deformação de 50% na altura com velocidade de 3 mm/s ...85
5.2.2 Deformação de 50% na altura com velocidade de 0,3 mm/s ...87
5.2.3 Deformação de 50% na altura com velocidade de 0,03 mm/s ...88
5.2.4 Deformação de 20% na altura com velocidade de 3 mm/s ...89
5.2.5 Deformação de 20% na altura com velocidade de 0,3 mm/s ...91
5.2.6 Deformação de 20% na altura com velocidade de 0,03 mm/s ...92
6 Análises estatísticas e discussões ...94
6.1 Ensaios sem marcas de desgaste anterior ...94
6.1.1 Efeito da velocidade e do grau de deformação no coeficiente de atrito ...94
6.2 Ensaios sem polimento intermediário ...100
6.2.1 Efeito da velocidade e do grau de deformação no coeficiente de atrito ...100
6.3 Ensaios sem polimento intermediário, perfil de microdureza ...105
7 Conclusões ...110
8 Trabalhos Futuros ...111
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ...112
10 Anexos ...117
10.1 Anexo A ...117
10.2 Anexo B ...120
10.3 Anexo C ...121
10.4 Anexo D ...122
10.5 Anexo E ...124
10.6 Anexo F ...126
10.7 Anexo G ...127
10.8 Anexo H ...128
10.9 Anexo I ...130

10.10 Anexo J 132
10.11 Anexo K 134
10.12 Anexo L 136
10.13 Anexo M 138
10.14 Anexo N 140
10.15 Anexo O 143
10.16 Anexo P – Manual de Operação da Prensa. 145
10.17 Anexo Q 156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. “Il Porcellino” (O Javali) estátua em frente ao "Mercato Nuovo" Florença – Itália, foto do site Verinha Tour. 23

Figura 2. A esquerda estátua "Condor" na praça Ramos de Azevedo no centro de São Paulo – Brasil, foto de Ardiles Moreira Portal G1. A direita detalhe da tradição popularmente conhecida como “dar dedinho”, foto do artista Igor Puorro. 23

Figura 3. Representação esquemática do Tribossistema, adaptado de Zum Gahr (1987).....25

Figura 4. Mecanismos de adesão, figura adaptada de Zum Gahr (1987). 28

Figura 5. Força F ocasionando movimento (a) rolamento e (b) deslizamento.....30

Figura 6. Representação esquemática das diferentes condições do anel (a) condição inicial do ensaio (sem deformação); (b) condição de baixo atrito; (c) condição de atrito alto. Figura adaptada de Porr (2009). 33

Figura 7. Valores de coeficiente de atrito obtidos para vários metais utilizando se as análises e equações de Schroeder e Webster (1949). Figura adaptada de (MALE E COCKCROFT, 1964). 35

Figura 8. Variações geométricas dos anéis ensaiadas nas mesmas condições dos discos. Figura adaptada de (MALE E COCKCROFT, 1964). 36

Figura 9. Curvas de calibração para o anel com geometria (6:3:2). Figura adaptada de (MALE E COCKCROFT, 1964).....37

Figura 10. Curva teórica de calibração do coeficiente de atrito interfacial "m". Figura adaptada de (MALE e DEPIERRE, 1970).....39

Figura 11. Corpo de prova inicial a) e corpo de prova final b) para o ensaio de tubo cônico. Figura adaptada de (BUENO, 2010). 42

Figura 12. Curvas de calibração para o ensaio do tubo cônico. Figura adaptada de (Bueno, 2010).....43

Figura 13. Geometria proposta para o ensaio, cones contrapostos. Figura de (PETERSEN et al., 1998).....44

Figura 14. Ensaios com altas pressões normais utilizando geometria de anel convencional. Modelo de atrito constante (linha cheia), modelo de Wanheim-Bay (linha tracejada) e dados experimentais. Figura adaptada de (PETERSEN et al., 1998). 45

Figura 15. Ensaio com baixas pressões normais utilizando geometria de anel convencional. Modelo de atrito constante (linha cheia), modelo de Wanheim-Bay (linha tracejada) e dados experimentais. Figura adaptada de (PETERSEN et al., 1998). 46

Figura 16. Ensaio com baixas pressões normais utilizando geometria de cones contrapostos. Modelo de atrito constante (linha cheia), modelo de Wanheim-Bay

(linha tracejada) e dados experimentais. Figura adaptada de (PETERSEN et al., 1998). 47

Figura 17. Desenho de fabricação do corpo de prova (anel).....48

Figura 18. Corpo de prova (anel). À esquerda anel visto de topo e a direita anel visto de perfil. 48

Figura 19. Microestrutura do aço utilizado na confecção de corpos de prova. Material foi polido e atacado com NITAL 3% por 3 minutos e observado em microscópio ótico.....50

Figura 20. Contagem da fração de pontos, utilizada para determinação de fração de perlita no aço. 51

Figura 21. Determinação da fração de perlita utilizando se uma ferramenta do software. 52

Figura 22. Na ilustração a esquerda está apresentado o porta ferramenta e a direita a ferramenta de aço ferramenta. 53

Figura 23. Microestrutura do aço ferramenta fundido. Material foi polido e atacado com VILLELA por 5 segundos e observado em microscópio ótico. 55

Figura 24. Perfil topográfico do anel após o lixamento sem orientação preferencial, com lixa de Mesh #320. 57

Figura 25. Perfil topográfico da ferramenta polida com abrasivo de 6 µm. 59

Figura 26. Curva típica de deslocamento em função do tempo de aquisição no modo deslocamento. 60

Figura 27. Curva típica de força de deformação em função do tempo de aquisição..61

Figura 28. Ilustração da vista geral da Prensa LFS 150, as principais unidades: estrutura, painel de controle e unidade hidráulica da prensa estão indicadas na figura. 61

Figura 29. Relógio comparador posicionado entre a mesa superior e inferior da prensa para o teste de repetitividade de movimentação. 62

Figura 30. Medição da altura da amostra deformada.....64

Figura 31. Medição do diâmetro interno da amostra deformada.....65

Figura 32. Desenho esquemático da localização das medições do perfil de dureza da amostra deformada. 66

Figura 33. Estereoscópia ótica da marca de desgaste deixada pelo anel ao ser conformado sobre a superfície da ferramenta polida. 78

Figura 34. MEV da região com marcas de desgaste do primeiro ensaio na ferramenta polida. 79

Figura 35. EDS da superfície da ferramenta sem a presença das marcas de desgaste (Região 1). 80

Figura 36. EDS da superfície da ferramenta com a presença das marcas de desgaste (Região 2). 81

Figura 37. Estereoscópia ótica do anel ao ser conformado sobre a superfície da ferramenta polida. 82

Figura 38. MEV da região com marcas de desgaste da superfície do anel. 82

Figura 39. EDS da superfície do anel com a presença das marcas de desgaste. 84

Figura 40. Gráfico dos resultados médios de coeficientes de atrito. 95

Figura 41. Teste de normalidade para ensaios sem marcas de desgaste anterior. 96

Figura 42. Interação dos dados médios de coeficiente de atrito, na análise ANOVA. 97

Figura 43. Efeitos principais nos valores médios do coeficiente de atrito. 98

Figura 44. Representação gráfica dos resultados médios de μ para ensaios realizados sem polimento intermediário. 101

Figura 45. Valores médios de μ para ensaios realizados com 50% de deformação nas três velocidades e nas duas condições superficiais propostas juntamente com os resultados de Leite (2010). 103

Figura 46. Valores médios de μ para ensaios realizados com 20% de deformação nas três velocidades e nas duas condições superficiais propostas juntamente com os resultados de Leite (2010). 104

Figura 47. Metalografia do primeiro ensaio da série de ensaios sem polimento intermediário. Material foi polido e atacado com NITAL 3% por 3 minutos e observado em microscópio ótico. 105

Figura 48. Metalografia do décimo ensaio da série de ensaios sem polimento intermediário. Material foi polido e atacado com NITAL 3% por 3 minutos e observado em microscópio ótico. 106

Figura 49. Detalhe das linhas de deformação na amostra após o ensaio. Material foi polido e atacado com NITAL 3% por 3 minutos e observado em microscópio ótico. 106

Figura 50. Perfil de dureza medido na linha central da amostra deformada. Seguindo a indicação de número 1 da Figura 32. 107

Figura 51. Perfil de dureza medido a 0,05 mm abaixo da superfície da amostra deformada. Seguindo a indicação de número 2 da Figura 32. 108

Figura 52. Perfil de dureza medido ao longo da altura da amostra deformada. Seguindo a indicação de número 3 da Figura 32. 109

Figura 53. Regiões de escoamento do material na amostra. Figura adaptada de (HAWKYARD E JONHSON, 1967). 117

Figura 54. Comparação entre as curvas teóricas de Hawkyard e Jonhson (1967) (linha tracejada) e as curvas práticas de Male e Cockcroft (1964) (linha contínua). Figura adaptada de (HAWKYARD E JONHSON, 1967). 119

Figura 55. Painel de elétrica da prensa, a flecha vermelha indica a chave de liga/deliga na lateral do painel. 146

Figura 56. Máquina livre para operação. Sem o calço de segurança e os enchimentos do porta ferramentas. 146

Figura 57. Chave seletora para ensaios de tração ou compressão e botoeira de liga/desliga do sistema hidráulico..... 147

Figura 58. Tela inicial do software de controle da prensa. 148

Figura 59. Tela inicial do programa de controle. 149

Figura 60. Detalhamento da tela principal do software de controle. 149

Figura 61. Tela de calibração do LVDT. 151

Figura 62. Programa para calibração do zero máquina, ou seja, este é o maior deslocamento possível para a máquina com um determinado par de ferramentas... 152

Figura 63. Exemplo de programa utilizado nos ensaios. 154

Figura 64. Comparação histórica do coeficiente de atrito em função da taxa de deformação. 156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Medição de macrodureza em anéis de SAE 1020. 49

Tabela 2. Contagem de fração de perlita na amostra de aço, utilizando o parâmetro de Fração de Pontos.....51

Tabela 3. Medição de macrodureza das ferramentas de aço ferramenta. 54

Tabela 4. Medição de microdureza matriz martensítica e do carboneto M7C3.....55

Tabela 5. Medição de rugosidade (Ra em µm) do anel após o lixamento, para obter uma topografia isotrópica na superfície do anel.....57

Tabela 6. Medição de rugosidade Ra da ferramenta polida com abrasivo de 6 µm...59

Tabela 7. A tabela apresenta os resultados dos ensaios de repetitividade, para cada velocidade foi realizada a leitura do LVDT e do relógio comparador. 63

Tabela 8. Tabela utilizada para cálculo de altura final média da amostra, as medições são feitas em quatro pontos distintos da amostra. 64

Tabela 9. Tabela utilizada para cálculo do diâmetro interno final médio da amostra, as medições são feitas em quatro pontos distintos da amostra.....65

Tabela 10. Retorno elástico combinado do equipamento e do corpo de prova, para cada uma das condições de ensaio.....67

Tabela 11. Arranjo experimental proposto para as velocidades, deformações, condições topográficas e repetições realizadas. 68

Tabela 12. Resultados adquiridos após o ensaio. 70

Tabela 13. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio..70

Tabela 14. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 71

Tabela 15. Resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário. 72

Tabela 16. Média dos resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário. 72

Tabela 17. Resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário. 73

Tabela 18. Média dos resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário. 73

Tabela 19. Resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário. 74

Tabela 20. Média dos resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário. 74

Tabela 21. Resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário. 75

Tabela 22. Média dos resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário. 75

Tabela 23. Resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário. 76

Tabela 24. Média dos resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário. 77

Tabela 25. Resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário. 77

Tabela 26. Média dos resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário. 78

Tabela 27. Evolução do desgaste em ensaios consecutivos. Fotos do ensaio com velocidade 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura da amostra. 85

Tabela 28. Resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário. 86

Tabela 29. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura. 86

Tabela 30. Média dos resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário. 86

Tabela 31. Resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário. 87

Tabela 32. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura. 87

Tabela 33. Média dos resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário. 88

Tabela 34. Resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário. 88

Tabela 35. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura. 89

Tabela 36. Média dos resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário. 89

Tabela 37. Resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário. 90

Tabela 38. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura. 90

Tabela 39. Média dos resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário. 91

Tabela 40. Resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário. 91

Tabela 41. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura. 92

Tabela 42. Média dos resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário. 92

Tabela 43. Resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário. 93

Tabela 44. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura. 93

Tabela 45. Média dos resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário. 93

Tabela 46. Coeficientes de atrito médios determinados para os ensaios com polimento intermediário. 94

Tabela 47. Tabela ANOVA (2 fatores) aplicada aos dados de coeficiente de atrito. .96

Tabela 48. Dados dos ensaios de deformação realizados sem polimento intermediário. 100

Tabela 49. Valores médios de μ para ensaios com e sem polimento intermediário. 102

Tabela 50. Comparativo entre processos de polimento variando o tamanho do grão abrasivo utilizado e considerando a rugosidade média (Ra) como parâmetro de comparação. 121

Tabela 51. Resultados complementares para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário. 121

Tabela 52. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 122

Tabela 53. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 122

Tabela 54. Resultados complementares para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário. 123

Tabela 55. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 123

Tabela 56. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 124

Tabela 57. Resultados complementares para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário. 124

Tabela 58. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 125

Tabela 59. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 125

Tabela 60. Resultados complementares para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário. 126

Tabela 61. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 126

Tabela 62. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 127

Tabela 63. Resultados complementares para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário. 127

Tabela 64. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 128

Tabela 65. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 128

Tabela 66. Resultados complementares para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário. 129

Tabela 67. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 129

Tabela 68. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 129

Tabela 69. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura. 130

Tabela 70. Resultados complementares para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário. 130

Tabela 71. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 131

Tabela 72. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 131

Tabela 73. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura. 131

Tabela 74. Resultados complementares para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário. 132

Tabela 75. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 132

Tabela 76. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 133

Tabela 77. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura. 133

Tabela 78. Resultados complementares para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário. 134

Tabela 79. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 134

Tabela 80. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 135

Tabela 81. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura. 135

Tabela 82. Resultados complementares para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário. 136

Tabela 83. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 136

Tabela 84. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 137

Tabela 85. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura. 137

Tabela 86. Resultados complementares para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário. 138

Tabela 87. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio. 138

Tabela 88. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio. 139

Tabela 89. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura. 139

Tabela 90. Dureza medida na linha média da altura da primeira amostra. 140

Tabela 91. Dureza medida a 0,05 mm abaixo da superfície da primeira amostra....141

Tabela 92. Dureza medida ao longo da altura da primeira amostra. 142

Tabela 93. Dureza medida na linha média da altura da décima amostra. 143

Tabela 94. Dureza medida a 0,05 mm abaixo da superfície da décima amostra.....144

Tabela 95. Dureza medida ao longo da altura da décima amostra. 145

Tabela 96. Tabela com os valores usados no gráfico da Figura 64. 158

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIAÇÕES

F	Força movente
N	Força Normal
p	Pressão Normal
μ	Coeficiente de atrito
τ_i	Tensão de cisalhamento interfacial
A_a	Área de contato aparente
τ_e	Tensão de escoamento em cisalhamento
σ_e	Tensão de escoamento em tração
EUA	Estados Unidos da América
PIB	Produto Interno Bruto
i.e.	Em outras palavras
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície
et al.	“et alia” (plural neutro) e outros
R_i	Raio interno
R_e	Raio externo
R_n	Raio neutro
H_0	Altura inicial
ΔH	Variação da altura
m	Coeficiente de atrito interfacial
D_{A0}	Diâmetro externo inicial do tubo cônico
D_{I0}	Diâmetro interno inicial do tubo cônico
H_0	Altura inicial do tubo cônico
D_{A1}	Diâmetro externo final do tubo cônico
D_{I1}	Diâmetro interno final do tubo cônico
H_1	Altura final do tubo cônico
t	altura do disco
R	raio do disco
σ_0	tensão de escoamento do material
σ_r	tensão principal radial
σ_θ	tensão principal angular

σ_z	tensão principal axial
l	comprimento do cilindro
r	raio do cilindro
r_b	raio externo do cilindro
r_a	raio interno do cilindro
r_n	raio neutro
x	relação entre o raio e o raio neutro
x_a	relação entre o raio interno e o raio neutro
x_b	relação entre o raio externo e o raio neutro
k	campo de tensões do material sob condição de tensionamento plano
αk	atrito na interface peça ferramenta
ton	toneladas = 10^6 gramas
LVDT	linear variable differential transformer
Hi	altura inicial da amostra
Hf	altura final da amostra
Δh%	deformação percentual da altura da amostra após ensaio
di	diâmetro interno inicial da amostra
df	diâmetro interno final da amostra
ΔD%	redução porcentual do diâmetro interno
Fmáx	força máxima de compressão (10^4N)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente competitividade dos mercados atuais, a cada dia torna-se mais importante o desenvolvimento e aplicação de técnicas mais eficientes e eficazes. Uma forma de alcançar este avanço tecnológico é o investimento e desenvolvimento de maquinário, ferramentas e parâmetros que tornem os processos mais eficazes.

Entender os efeitos das variáveis do processo no produto final é muito importante para o sucesso e o avanço tecnológico da indústria. Um bom exemplo é a indústria de conformação mecânica de metais na qual o atrito durante o processo de deformação interfere diretamente: na vida útil das ferramentas, qualidade final do produto, desempenho das ferramentas e capacidade dos equipamentos empregados.

Sendo assim o entendimento da dinâmica do atrito, suas principais causas e seus efeitos tornam-se de fundamental importância para a indústria, pois uma vez compreendida a influência de uma de suas variáveis, pode-se planejar os parâmetros de processo com o objetivo de:

a) Aumentar a vida útil da ferramenta e do maquinário, aumentando o tempo produtivo tanto da ferramenta quanto da máquina, o que resulta em um maior número de peças conformadas;

b) Aumentar a qualidade final das peças reduzindo as etapas de acabamento, diminuindo assim etapas do processo;

c) Melhorar o desempenho da ferramenta aumentando sua produtividade em uma mesma quantidade de horas e diminuindo a energia empregada para uma dada deformação, o que resulta na utilização de equipamentos de capacidade menor, e eventualmente preexistentes, poupando investimentos em equipamentos maiores e em consumo de energia; e

d) Diminuir o excedente de material descartado.

Todos estes reflexos do estudo deste único exemplo, o atrito, resultam em investimento melhor distribuído dentro da empresa e a diminuição dos custos de produção, aumentando as margens de lucro.

1.1 Objetivo

Em trabalho anterior realizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície LFS-USP por Leite (2010) foi constatado que a velocidade de deformação e a topografia da superfície da ferramenta têm influência no coeficiente de atrito metal-ferramenta para velocidades de deformação entre 3,00 e 0,30 mm/s e deformações entre 20% e 50% para ferramentas de aço ferramenta conformando anéis de aço baixo carbono. Este é um contraponto da análise desenvolvida por Male e Cockcroft (1964) que afirmam em seu trabalho que o coeficiente de atrito não sofre alterações significativas em seu valor para deformações entre 20% e 50% e diferentes materiais, quando ensaios são realizados sem lubrificação.

Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da velocidade de deformação e do grau de deformação da amostra no coeficiente de atrito (μ) para ferramentas de aços rápidos fundidos e anéis de aço baixo carbono para verificar os efeitos já observados na literatura. Os estudos serão realizados em ensaios no qual a superfície da ferramenta é polida antes do próximo ensaio e em ensaios sem o processo de polimento entre ensaios, para que seja avaliado o efeito da adesão de material na superfície da ferramenta no valor de μ.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Desgaste

O desgaste pode ser resumido como a modificação da forma original de um corpo por ação do tempo ou frequência de contato com outro corpo (LEITE, 2010). A percepção do dano ao material é intensificada com o passar do tempo uma vez que esta variável é diretamente proporcional ao tempo.

A Figura 1 ilustra a estátua de “El Porcellino” (O Javali), que repousa em frente ao “Mercato Nuovo” em Florença na Itália. Os turistas apoiam a mão sobre o focinho do javali, para atrair boa sorte, com maior frequência que no restante do corpo da estátua ocasionando, com o tempo, um maior desgaste do material neste local do que no restante da estátua.

Figura 1. “Il Porcellino” (O Javali) estátua em frente ao "Mercato Nuovo" Florença – Itália, foto do site Verinha Tour.

Outro exemplo no qual a variável dominante no desgaste é o tempo está ilustrado na Figura 2 a estátua “Condor” feita em bronze e localizada na Praça Ramos de Azevedo no centro de São Paulo, está posicionada no final da escadaria que dá acesso a praça. Pode-se observar na Figura 2 que todo o corpo da estátua está coberto por óxido que apresenta uma coloração verde escura, no entanto, o dedo médio da mão esquerda da obra visto em detalhe na imagem do lado direito da Figura 2, está polido e na cor original de bronze, pois as pessoas que descem a escadaria tem como superstição de boa sorte, “dar dedinho” para a obra de arte.

Figura 2. A esquerda estátua "Condor" na praça Ramos de Azevedo no centro de São Paulo – Brasil, foto de Ardiles Moreira Portal G1. A direita detalhe da tradição popularmente conhecida como “dar dedinho”, foto do artista Igor Puorro.

É importante lembrar que o desgaste mostrado nas Figura 1 e Figura 2 ocorre de forma não controlada. Geralmente não se atribui alterações controladas ao

desgaste, como por exemplo, as retiradas de material provocadas pelas ferramentas do artista ao dar forma à obra de arte. Para estudar de forma sistemática esta forma de degradação criou-se a Tribologia.

Tribologia (do grego *τρίβω* 'tribo' significando 'esfregar, atritar, friccionar', e *λόγος* 'logos' significando 'estudo') foi definida em 1966 como "a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e assuntos e práticas relacionados" ("*the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices*").

Obviamente, os pais da tribologia não esqueceram o atrito estático, exceto na definição da palavra. A tribologia une os campos da mecânica, física, química, materiais e os conhecimentos em lubrificação, atrito e desgaste para predizer o comportamento de sistemas físicos. Quando a tribologia considera organismos vivos ela é designada por biotribologia e incorpora princípios da medicina e das ciências biológicas.

Um valor substancial em dinheiro pode ser poupado caso sejam feitos investimentos em pesquisas tribológicas, por exemplo, os danos causados por desgaste e corrosão de materiais causam aos Estados Unidos da América (EUA) um prejuízo de centenas de bilhões de dólares (ASM Internacional, 2001), somente a corrosão de metais custa à economia dos EUA algo em torno de $300 bilhões de dólares americanos por ano, o que representa aproximadamente 4,2 % do PIB deste país. No entanto cerca de 40% deste custo poderia ser evitado caso fossem tomadas medidas preventivas a corrosão, daí a importância do investimento em pesquisas tribológicas.

Uma das possíveis definições de desgaste está na norma DIN 50320, " *progressive loss of material from the surface of a solid body due to mechanical action, i.e. the contact and relative motion against a solid, liquid or gaseous counterbody*" que pode ser traduzido como: a perda progressiva de material da superfície de um corpo por ação mecânica, em outras palavras devido ao contato e movimento relativo contra um contra-corpo sólido, líquido ou gasoso, como citado por Zum Gahr (1987).

Para a análise de um Sistema Tribológico, Tribossistema, é importante identificar cada elemento que compõe o Tribossistema como está apresentado na Figura 3.

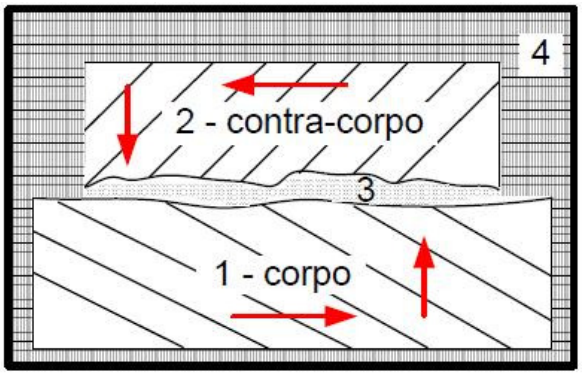


Figura 3. Representação esquemática do Tribossistema, adaptado de Zum Gahr (1987)

Na Figura 3: 1) Corpo, que é o objeto de estudo, 2) Contra-Corpo, elemento que aplica carga e realiza o movimento relativo em relação ao corpo, 3) Meio Interfacial, elemento sólido, liquido ou gasoso que se interpõe ao corpo e contra-corpo e 4) Meio Ambiente, meio externo que envolve o corpo e o contra-corpo. A estrutura do sistema é determinada pelos elementos, suas propriedades e interações, que podem mudar amplamente com o passar do tempo.

Na classificação do processo de desgaste dois aspectos fundamentais devem ser identificados. O primeiro é o movimento que se distingue entre: deslizamento, rolamento, oscilatório, impacto e erosivo que dependem da cinemática do sistema. O outro aspecto é o mecanismo de desgaste que pode ser: adesão, abrasão, a fadiga superficial e as reações triboquímicas (Zum Gahr, 1987) ou a combinação destes mecanismos. O Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) tem priorizado o estudo de desgaste por deslizamento ao longo de sua história, três são os fatores para este fato (LEITE, 2010):

a) Os processos de desgaste por rolamento e por deslizamento estão contemplados no desgaste por deslizamento;

b) O processo de desgaste por deslizamento possui um maior número de mecanismos que os demais processos (adesão, reações tribológicas e fadiga superficial); e

c) Na Engenharia Mecânica, área de atuação do LFS, o desgaste por deslizamento é o predominante.

Sendo assim no próximo item será mais bem detalhado o processo de desgaste por deslizamento.

2.2 Desgaste por deslizamento

Esta classificação baseia-se na cinemática do movimento e diz-se que o desgaste é "por deslizamento" quando os dois corpos deslizam um sobre o outro. Na maioria das aplicações práticas o deslizamento ocorre com lubrificação, ou seja, existe uma fina camada de lubrificante na interface entre os corpos. No entanto, em outras condições práticas importantes como em muitas operações de conformação plástica e de usinagem, o desgaste por deslizamento ocorre a seco.

A diferença entre desgaste por deslizamento e desgaste abrasivo não é a cinemática que pode ser de deslizamento para ambos os tipos de desgaste, mas no desgaste abrasivo há a presença de partículas duras que podem ser externas ao sistema ou provir dele. No primeiro caso o desgaste é classificado como desgaste abrasivo ou abrasão e no segundo caso quando a abrasão é identificada ela pode ser considerada um mecanismo do desgaste por deslizamento. Por exemplo, os debris no desgaste por deslizamento podem se transformar em partículas abrasivas, após encruamento. No desgaste por deslizamento atuam os mecanismos: deformação plástica com possível rompimento das junções entre os corpos, reações triboquímicas, fadiga superficial e, em alguns casos, a abrasão.

No mecanismo de adesão no contato entre picos de asperezas geram-se elevadas pressões de contato resultando em deformação plástica do material. Com a ruptura do filme de óxido pode ocorrer o colamento e formação de junções, a adesão. O movimento relativo entre corpo e contra-corpo causa deformação plástica e o

rompimento das junções. A posição na qual ocorrerá a ruptura depende das resistências relativas do corpo, do contra-corpo e da junção. No caso de um dos dois corpos ser “mais mole” que o outro, a ruptura ocorrerá no “mais mole”. Muitas são as teorias sobre adesão, Zum Garh (1987) propõe quatro grupos principais de mecanismos de adesão:

a) Bloqueio mecânico: este mecanismo de adesão é atribuído ao inter-travamento de irregularidades na superfície, a contribuição deste mecanismo para a adesão é mais efetiva em polímeros fibrosos ou no caso da penetração de polímero em estado líquido em micro fissuras em superfícies metálicas;
b) Difusão: átomos ou moléculas podem difundir através da interface entre dois corpos em contato, desde que haja solubilidade mútua entre os materiais. Esta teoria requer que macromoléculas ou segmentos de cadeias de polímeros possuam mobilidade suficiente e solubilidade mútua. Este mecanismo torna-se inviável para polímeros com crescente cristalinidade ou com cadeias cruzadas;
c) Eletrostática: esta teoria propõe uma transferência de elétrons através da interface de contato dos corpos com diferentes estruturas de bandas eletrônicas. Esta transferência eletrônica resulta na formação de uma dupla camada elétrica. Esta transferência depende da natureza de contato entre os corpos; e
d) Adsorção química: a adsorção ocorre na interface do contato, quando ligações fortes, como a metálica, iônica e covalente, são estabelecidas na interface. A contribuição deste mecanismo na adesão depende de fatores como limpeza e topografia da superfície.

Os principais mecanismos de adesão estão ilustrados na Figura 4:

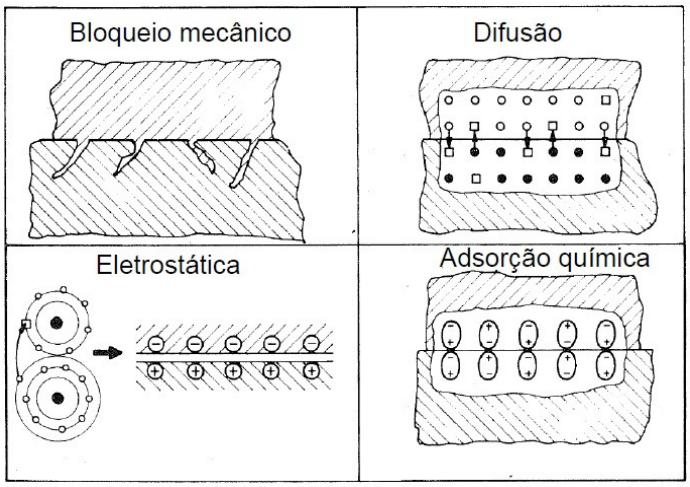


Figura 4. Mecanismos de adesão, figura adaptada de Zum Gahr (1987).

Outro fator fundamental para a adesão de material é a área real de contato, pois estas são as regiões nas quais efetivamente ocorrerá o contato, e caso ocorra a transferência de material esta será a origem do material transferido. A área real de contato é na maioria das vezes menor que a área aparente e determinar seu valor em função das variáveis que a afetam, tais como pressão de contato, propriedades dos materiais e condições topográficas, torna-se difícil, devido à estreita relação entre a área de contato real e os diversos mecanismos de desgaste.

Uma das dificuldades em modelar-se teoricamente esta área real de contato vem do fato de as superfícies terem topografia aleatória e serem opacas. O modelo clássico de contato estático e elasto-plástico em superfícies rugosas foi proposto por Greenwood e Willianson (1966), sendo este modelo utilizado até os dias de hoje para o desenvolvimento dos modelos teóricos de contato.

A transferência de material pode ocorrer do corpo para o contra-corpo, ou vice-versa. Rigney et al. (1984) observaram em seus ensaios conduzidos em tribômetro pino sobre disco, sob vácuo e diferentes combinações de pares tribológicos que a transferência de material é proporcional ao número de ciclos de deslizamento. Também concluíram que a região com transferência de material é somente uma fração da área aparente de contato e que o material aderido, apesar de ser em pequena quantidade, é suficiente para modificar as condições de contato.

A região com material transferido torna-se uma concentradora de tensões uma vez que ela é uma elevação topográfica nova possivelmente maior que a separação

entre corpos. Em decorrência, em torno dela o mecanismo de adesão tende a se acentuar catastroficamente (KERRIDGE, 1956). A evolução deste dano à superfície do material é intensificada com a sequência de contatos por deslizamento mesmo após poucos ciclos de deslizamento (RIGNEY, 1984), em alguns casos a intensidade deste dano pode iniciar outro mecanismo de desgaste, a abrasão.

A abrasão surge no desgaste por deslizamento caso o material transferido sofra o rompimento da junção, formando assim material particulado solto no sistema, chamado debri. Este debri possui alta dureza devido ao encruamento sofrido durante a deformação e pode causar o sulcamento em um dos corpos, preferencialmente, o de menor dureza.

Com os sucessivos ciclos de contato deslizante o comportamento do processo de desgaste sofre alterações e pode ser descrito em três estágios (LEITE, 2010):

a) Formação da área real de contato ou amaciamento das asperezas;
b) Desgaste em regime estacionário; e
c) Desgaste catastrófico dos componentes do tribossistema.

Frequentemente o mecanismo de adesão causa danos catastróficos no tribossistema e quantidades de material aderido que podem ser observadas a olho nu. Com esta intensidade de adesão e proporcionando danos que podem inutilizar a ferramenta o processo de desgaste passa a ser denominado *galling* que foi traduzido para o português por Mendes (2009) “esfolamento”.

A adesão é facilitada quando os componentes do par tribológico são similares, pois entre eles a difusão deve ser mais fácil. Outro fator que facilita a adesão é um dos corpos ter dureza baixa o que propicia a ruptura do filme de óxido para baixas forças médias e locais. Uma vez entendido que o desgaste por deslizamento é intensificado quanto maior for a similaridade entre o par tribológico, fica evidente que a utilização de um filme lubrificante no meio interfacial tem a capacidade de reduzir sensivelmente a ocorrência deste dano.

No entanto, a presença de lubrificante não garante a ausência de adesão, pois em condições como de contato não conforme (esfera e pista de rolamento) e grandes deformações plásticas (processos de conformação mecânica), as asperezas mais altas dos materiais podem tocar-se durante o deslizamento resultando em altas pressões de contato suficientes para romper o filme interfacial.

O presente trabalho pretende avaliar o desgaste por deslizamento em ferramentas de forjamento e a influência da adesão de material à superfície da ferramenta sem a presença de lubrificante.

Analisa-se a seguir o atrito no desgaste por deslizamento.

2.3 Oposição ao movimento - Atrito

Ian M. Hutchings (1992) em seu livro Trybology Friction and Wear of Engineering Materials define o Atrito como: [...]*the resistance encountered by one body in moving over another*[…] a resistência enfrentada por um corpo para mover-se em relação a outro, sendo esta resistência relacionada a eminência de movimento (atrito estático) ou uma resistência ao movimento propriamente dito. Esta definição de atrito abrange duas classes importantes de movimentos relativos: deslizamento ou rolamento. Há diferenças quanto à definição destas duas classes. No entanto, elas não são excludentes, uma vez que não há rolamento "puro", pois sempre ocorrerá uma parcela de deslizamento.

A Figura 5 ilustra a força tangencial F necessária para que a tendência ao movimento ocorra tanto no rolamento quanto no deslizamento, a razão entre a força F e a força normal N é conhecida como Coeficiente de atrito (μ) como representado na eq. 1.

$$F = \mu * N \Rightarrow \mu = {}^{F}\!/_{N} \tag{1}$$

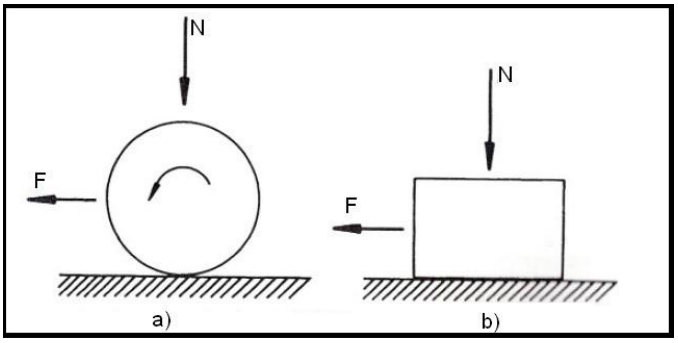


Figura 5. Força F ocasionando movimento (a) rolamento e (b) deslizamento.

A magnitude de μ varia dentro da faixa: 0,001 para contato de rolamento lubrificado a 10 para contato de deslizamento no vácuo (HUTCHINGS, 1992).

2.4 Leis do atrito (oposição ao movimento)

A observação empírica do atrito levou à formulação das *Leis do Atrito no Deslizamento* que foram redescobertas por Amontons em 1699, mas que já havia sido descritas por Leonardo da Vinci mais de 200 anos antes (HUTCHINGS, 1992).

As Leis do Atrito são:

(1) A força de atrito é proporcional à carga normal;

(2) A força de atrito é independente da área de contato aparente; e

(3) A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento. Esta última muitas vezes tem sua autoria atribuída a Coulomb.

2.5 Coeficiente de Atrito

Uma possibilidade de modelagem muito adotada pelos engenheiros mecânicos para definir o coeficiente de atrito proposta por Schey (1984) está representada na Eq. (2):

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau_i}{p} \tag{2}$$

Sendo F a força necessária para movimentar o corpo, N a força normal, τ_i é a tensão de cisalhamento interfacial e p é a pressão normal. Tanto τ_i quanto p são obtidos dividindo as forças pela área de contato aparente A_a entre os dois corpos. Para manter μ constante a tensão de cisalhamento interfacial (τ_i) deveria crescer na mesma taxa que a pressão na interface (p). No entanto, esta situação não é necessariamente realista para a conformação de metais. Quando τ_i aproxima-se do valor da tensão de escoamento em cisalhamento (τ_e) o material tem outra opção: ao invés de deslizar sobre a superfície da ferramenta, ela irá cisalhar internamente, enquanto a superfície permanece imóvel. Esta situação é definida como colamento (sticking friction).

De acordo com o critério de von Mises a tensão de escoamento em cisalhamento τ_e será equacionada como:

$$\tau_e = 0{,}577\sigma_e \tag{3}$$

Sendo σ_e a tensão de escoamento equivalente. Considerando uma condição comum na conformação de metais na qual a pressão de contato (p) é igual à tensão de escoamento em tração (σ_e):

$$\tau_e = 0{,}577\,p \tag{4}$$

Na condição de colamento onde τ_i é igual a τ_e:

$$\tau_i = 0{,}577\,p \tag{5}$$

Igualando se a Eq. (2) com a Eq. (5) tem se que o colamento ocorre quando μ=0,577. Em muitos processos de deformação a pressão interfacial (p) tem valores maiores que σ_e enquanto que τ_e permanece constante com o aumento de p. Por isso, o valor de μ aparentemente diminui (LEITE, 2010). Segundo Shey (1984) as dificuldades em estabelecer valores adequados de μ no colamento levaram os pesquisadores a descrever τ_i como sendo:

$$\tau_i = m * \tau_e \tag{6}$$

Onde m é o fator de cisalhamento interfacial que tem valor entre 0<m<1 para condições de colamento.

A medição da resistência ao movimento é tão importante quanto o seu modelamento. No capítulo seguinte será apresentado um dos métodos mais populares de medição de coeficiente de atrito (μ) utilizando-se ferramentas de conformação mecânica.

2.6 Ensaio de compressão do anel.

O ensaio de compressão do anel é um dos mais populares ensaios utilizados para caracterizar a resistência ao movimento em condições de deformação plástica para grandes volumes (SCHEY, 1984). Este fato é devido à simplicidade geométrica tanto do corpo de prova quanto da superfície da ferramenta utilizada como contra-corpo. Outra vantagem do ensaio do anel é sua utilização para estudos em altas temperaturas e grandes deformações, pois não requer medição direta de força, nem

requer valores de tensão de escoamento do material, sendo estes os valores mais difíceis de serem determinados em altas temperaturas e grandes deformações.

Este ensaio foi proposto por Kunogi em 1956 como citado no artigo de Male e Cockcroft (1964) com o intuito de avaliar de forma qualitativa os lubrificantes utilizados na extrusão a frio. O ensaio consiste na deformação de uma peça em formato de anel, como pode ser visto na Figura 6 (a), contra a superfície plana de uma ferramenta. O coeficiente de atrito pode ser determinado por meio da avaliação da deformação geométrica do anel.

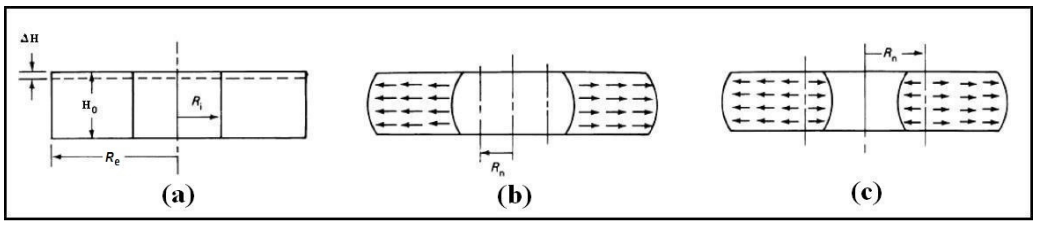


Figura 6. Representação esquemática das diferentes condições do anel (a) condição inicial do ensaio (sem deformação); (b) condição de baixo atrito; (c) condição de atrito alto. Figura adaptada de Porr (2009).

Caso o coeficiente de atrito (μ) seja zero o anel deve deformar como um disco e todos os seus pontos escoam em sentido ao raio externo, a partir de certo valor de μ pequeno e finito os pontos ainda escoam para fora, mas com um "escorregamento" menor. Quando μ tem um valor baixo o raio interno (R_i) da amostra tende a aumentar, como observado na Figura 6 (b). A partir de certo valor de μ o raio interno da amostra desloca-se no sentido do centro da amostra diminuindo o valor de R_i como pode ser visto na Figura 6 (c).

O raio neutro (R_n) representado na Figura 6 (b) e (c) é definido como o ponto no qual a partir de uma certa deformação axial, ocorre divisão do escoamento de material, pois é energeticamente favorável que uma parte do material escoe em direção a R_i, e que outra escoe em direção a R_e. O ponto da ferramenta que o contato coincide com R_n tem deslizamento igual a zero. Logo, também é um ponto de resistência ao movimento dada pelo coeficiente de atrito estático. Nas regiões circunvizinhas a R_n o material deslizará em relação a ferramenta com deslocamentos

cada vez maiores a medida que o ponto afasta-se de R_n, assumindo o valor do coeficiente de atrito cinemático em cada posição.

Schroeder e Webster (1949) modelaram matematicamente as relações de pressão por tensão de escoamento (p/σ_0) e raio de discos conformados pela altura do disco (R/t) e criaram um gráfico que apresenta no eixo da ordenadas (p/σ_0) e nas abscissas (R/t) e estão as curvas de μ. Ensaiaram discos de diferentes materiais e experimentalmente observaram que o material dos discos e a pressão aplicada na deformação dos corpos de prova não influenciavam no valor do coeficiente de atrito. Concluíram também que a aplicação do lubrificante fazia com que os coeficientes de atrito fossem semelhantes para os diferentes materiais.

Utilizando a proposta de ensaio de Kunogi e as análises e gráficos anteriormente citados (SCHOROEDER E WEBSTER, 1949), Male e Cockcroft (1964) estabeleceram duas condições limites para mensurar o μ. A primeira, utilizando anéis de cera, os quais eram conformados 2ºC abaixo da temperatura de fusão proporcionando assim uma excelente condição de lubrificação sendo este ponto estabelecido como μ=0. E a segunda condição na qual se assume aderência total de todos os pontos em contato, utilizando-se para isto anéis de alumínio conformados à temperatura superior a 500ºC. Pelo critério de escoamento adotado o μ deve ser igual ou superior a 0,57 para a segunda condição sendo este o valor máximo de μ.

Male e Cockcroft (1964) utilizaram ferramentas com diferentes acabamentos superficiais (diferentes topografias) e obtiveram as condições necessárias para determinar os valores intermediários de μ entre 0 e 0,57, que foram identificados segundo os seguintes critérios:

a. Foram feitos diversos ensaios em discos de diferentes materiais, com o intuito de determinar a força de deformação necessária para estabelecer determinada redução porcentual na altura, utilizando as análises de Schroeder e Webster (1949) e valores de tensão de escoamento obtidos experimentalmente por meio de compressão de cilindros altos (altura/diâmetro = 2), estabeleceram-se os valores de μ intermediários. Na Figura 7 observa se que mesmo para diferentes materiais o coeficiente de atrito μ permanece constante para deformações entre 20% e 50%, com exceção de aço e cobre conformados sem lubrificante.
b. Foram então realizados ensaios com o anel da mesma forma que foram ensaiados os discos dando origem assim às curvas de redução do diâmetro interno em função das variações geométricas do anel, como ilustrado na Figura 8.

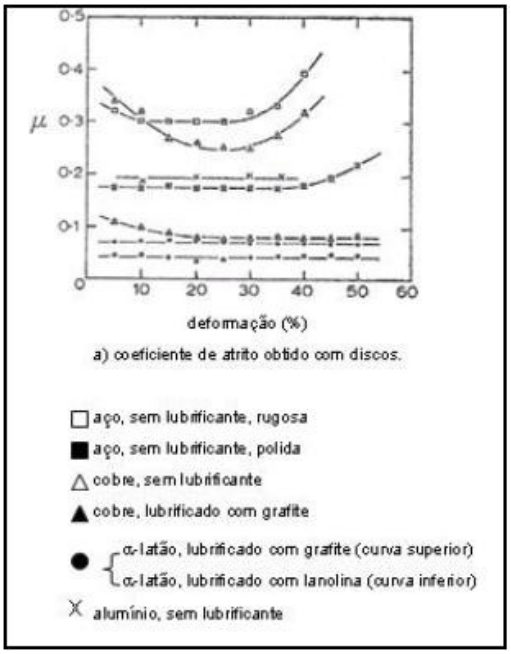


Figura 7. Valores de coeficiente de atrito obtidos para vários metais utilizando se as análises e equações de Schroeder e Webster (1949). Figura adaptada de (MALE E COCKCROFT, 1964).

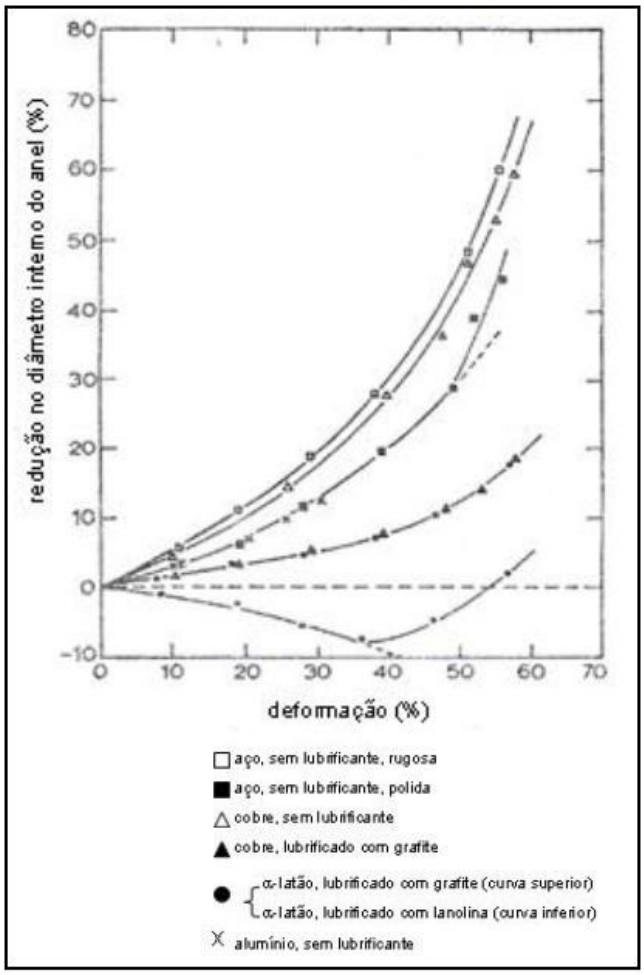


Figura 8. Variações geométricas dos anéis ensaiadas nas mesmas condições dos discos. Figura adaptada de (MALE E COCKCROFT, 1964).

Com base nesses resultados os autores (MALE E COCKCROFT, 1964) correlacionaram os valores de μ determinados pelo método de Schroeder e Webster (1949) – Figura 7 - e os valores experimentais de deformação determinados por eles mesmos – Figura 8 - e propuseram um procedimento para determinação do valor de μ mais simplificado, este método utiliza como entrada a redução da altura da amostra e a redução do diâmetro interno. Esta curva é apresentada na Figura 9.

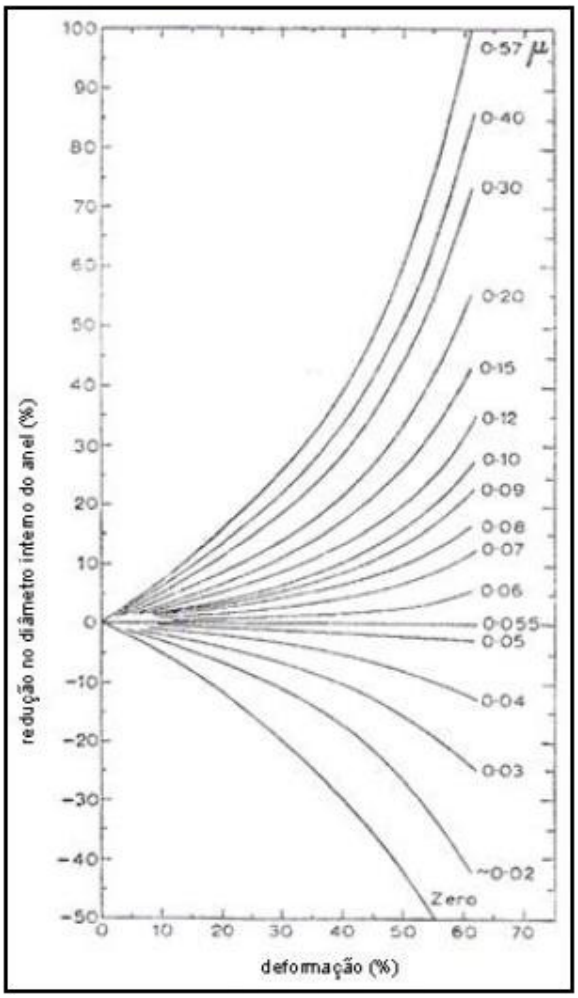


Figura 9. Curvas de calibração para o anel com geometria (6:3:2). Figura adaptada de (MALE E COCKCROFT, 1964).

Durante a realização dos experimentos os autores observaram que as dimensões do corpo de prova não alteravam o valor do coeficiente de atrito, uma vez que a análise é feita considerando-se as deformações porcentuais, desde que se respeitem as proporções entre as dimensões da amostra (6:3:2) sendo as dimensões aqui representadas: diâmetro externo; diâmetro interno e altura. Outras proporções de anéis são possíveis como, por exemplo: 6:3:1 e 6:2:1 (GOETZ et al., 1991), no entanto, devido a maior coerência dos resultados com as curvas proposta por Male e Cockcroft (1949) a proporção geométrica com a maior número de utilização é 6:3:2 (RUDKINS et al., 1996).

As curvas são válidas para $0,055<\mu<0,57$ e para $20\%<\Delta H<60\%$. Para deformações acima de 60% na altura, a deformação do material altera o valor do coeficiente de atrito.

Male e Cockcroft (1964) ensaiaram amostras de alumínio, cobre e aço baixo carbono em sistema não lubrificado e variando a taxa de deformação entre: 10^{-2}; 10 e $1,2x10^{3}$ s^{-1} e não constataram variação significativa no valor de μ, só notaram variação no coeficiente de atrito quando o sistema era lubrificado.

No período entre 1960 a 1970, muitos pesquisadores dedicaram-se à solução analítica das curvas desenvolvidas por Male e Cockcroft (1964). As principais obras relacionadas a esta época são Kudo (1960), Hawkyard e Johnson (1967), Avitzur (1968) e Rao e Sivaram (1993). Baseando-se no método do Limite Superior proposto por Avitzur (1968), Male e DePierre (1970) apresentaram sua solução matemática. Avitzur (1968) apresenta uma solução analítica para condições nas quais a tensão interfacial é constante entre o padrão de deformação do anel e o coeficiente de atrito interfacial.

Male e DePierre (1970) combinaram as análises e resultados obtidos experimentalmente por Male e Cockcroft (1964) com os resultados analíticos de Avitzur (1968) o que resultou nas curvas de coeficiente de atrito interfacial “m” para deformações geométricas de uma amostra com dimensões padrões, 6:3:2. Male e DePierre notaram que as curvas fornecem valores de “m” superiores aos determinados pela análise de Schroeder e Webster (1949). Dessa forma, recomendaram que ao aplicar o modelo de Avitzur (1968) fossem utilizadas amostras com 1/6 de altura, pois assim, o efeito de embarrilhamento (*barreling*), que são as deformações ocorridas na região equatorial, não levadas em conta no modelo de Avitzur (1968), eram minimizadas.

A Figura 10 apresenta as curvas de calibração do coeficiente de atrito interfacial “m” para uma geometria padrão de anel (6:3:2).

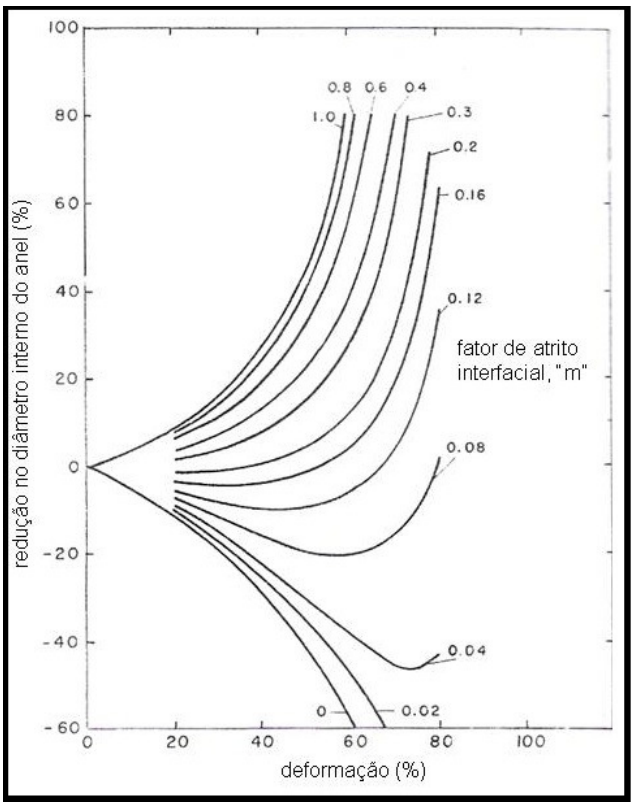


Figura 10. Curva teórica de calibração do coeficiente de atrito interfacial "m". Figura adaptada de (MALE e DEPIERRE, 1970).

Pelo fato de o ensaio do anel ser conveniente, pois somente necessitam da análise das deformações do corpo de prova e não requererem a determinação da tensão de escoamento, dureza ou qualquer outra propriedade do material, tornou-se um dos métodos mais populares para determinação do coeficiente de atrito na deformação de volume, como por exemplo: forjamento, extrusão e laminação (BÖESCH et al., 2011).

Outras aplicações deste ensaio são abundantes na literatura recente: (i) Shen et al. (1992), Sofuoglu et al. (2001), Bueno et al. (2010) e Böesch et al. (2011), concentram seus estudos na avaliação e teste de lubrificantes; (ii) teste de diferentes concentrações de lubrificantes diluídos podem ser encontrados nos estudos de Robinson et al. (2004) e Espinoza-Cantú et al. (2008) e (iii) efeito de altas temperaturas na conformação como pode ser visto em Venugopal et al. (1990), Hwu et al. (1993), Rao et al. (1993) e De Sanetis et al. (1997).

Estudos relacionados a propriedades físicas do tribo-par como, por exemplo: (i) utilização de diferentes materiais no corpo de prova foi utilizada primeiramente por Male e Cockcroft (1964) e depois estudada também por Goetz et al. (1991), Shen et al. (1992) e Sofuoglu et al. (2001); (ii) mudanças de materiais utilizados nas ferramentas são citados em trabalhos como Rao et al. (1993) e Cristino et al. (2011); (iii) análise do efeito da topografia do corpo de prova, anel, estudado por Hartley et al. (2007), Sahin et al. (2007) e Martins et al. (2011); (iv) efeitos da topografia das ferramentas encontrados em trabalhos de Dutton et al. (1999) e Cristino et al. (2011) e (v) efeito do revestimento das ferramentas com filmes finos estudado por Chiang et al. (2010).

E ainda em estudos de tecnologia de ponta como: (i) testes para determinação de coeficiente de atrito na conformação de materiais compósitos realizado por Wang et al. (2012); (ii) utilização de lubrificantes a base de vidro pra conformação em altas temperaturas (LI, 2000) e (iii) simulação por elementos finitos do ensaio como visto em Shen (1992), Petersen (1998), Dutton (1999) e Robinson (2004), entre outros.

Diante da importância e aplicabilidade do ensaio, este trabalho se propõe a investigar mediante experimentos controlados, a validade experimental dos resultados de Male e Cockcroft (1964) e, adicionalmente, o trabalho avalia os resultados daqueles autores para distintas taxas de deformação.

2.7 Cronologia dos estudos sobre o ensaio do anel

Cristino (2010) divide historicamente o estudo sobre o ensaio do anel em três períodos distintos:

O primeiro período (1954-1970) composto por estudos experimentais pioneiros direcionados por Kunogi (apud MALE E COCKCROFT, 1964) e Male e Cockcroft (1949) e pelas primeiras modelagens matemáticas por Kudo (1960), Hawkyard e Johnson (1968) que estão no Anexo A. Neste período os esforços concentravam-se no desenvolvimento de modelos teóricos baseados nos métodos do Fatiamento e método do Limite Superior (Slab e Upper Bound Methods) com o intuito de predizer a posição da superfície neutra e na geração das curvas de calibração do atrito.

No segundo período (1970-1990) revisam-se os modelos matemáticos pioneiros para entender suas condições de contorno e suas limitações, com foco no

desenvolvimento de simulações numéricas inovadoras na época, para reduzir as discrepâncias entre as estimativas teóricas e os resultados experimentais. Os estudos auxiliados por análises de elementos finitos ajudaram os pesquisadores a compreender diferentes parâmetros operacionais, tais como: encruamento, taxa de deformação, temperatura e lubrificação. Estes estudos resultaram ainda em novas curvas de calibração de atrito, como pode se observar no artigo de Rao e Sivaram (1993) que revisa e estuda este período.

O terceiro e último período (1990- até os dias atuais) no qual os pesquisadores têm por objetivo: (i) consolidar o conhecimento desenvolvido até o presente momento, combinando análises experimentais e modelamentos por elementos finitos gerando curvas de calibração de atrito, para diferentes modelos de atrito, em diferentes condições, reproduzindo os testes de compressão de anel. Fazem parte deste período obras de Petersen et al. (1998) e Tan (2002); (ii) desenvolvimento de geometrias novas e complementares para o ensaio de compressão do anel com o objetivo de caracterizar o atrito em condições de baixas e altas pressões normais de contato (PETERSEN, 1998) e (iii) caracterizar o mecanismo de atrito tendo-se em consideração a influência da topografia superficial e rugosidade na resistência ao movimento como observa se em Hu e Dean (2000), Mahrenholtz et al. (2005) e Sahin et al. (2007).

2.8 Ensaios alternativos

Com a evolução dos programas de simulação utilizados nos processos de conformação, tornou-se necessário o melhor entendimento das condições de atrito na interface entre peça e ferramenta, para que os resultados das simulações se tornassem mais precisos. Assim, novas pesquisas sobre o ensaio do anel foram incentivadas, buscando-se uma melhor adaptação dos modelos de atrito inseridos nos programas com valores obtidos experimentalmente (BÖESCH et al., 2011). Desse modo novas geometrias começaram a ser testadas e seus resultados comparados com os ensaios executados, dois exemplos destas geometrias alternativas são o ensaio do tubo cônico e o ensaio dos cones contra-postos.

2.8.1 Tubo cônico

Bueno (2010) relata que os primeiros a apresentarem o ensaio de compressão de tubo cônico como alternativa para a avaliação do coeficiente de atrito por meio de um método relativamente simples e semelhante ao ensaio do anel, foram Kopp e Phillip em 1992. Neste ensaio o corpo de prova é um cilindro oco, que em uma de suas extremidades tem a forma de um tronco de cone e é comprimido entre uma ferramenta de face plana (ferramenta inferior) e uma placa cônica (ferramenta superior).

A Figura 11 apresenta o corpo de prova do ensaio do tubo cônico.

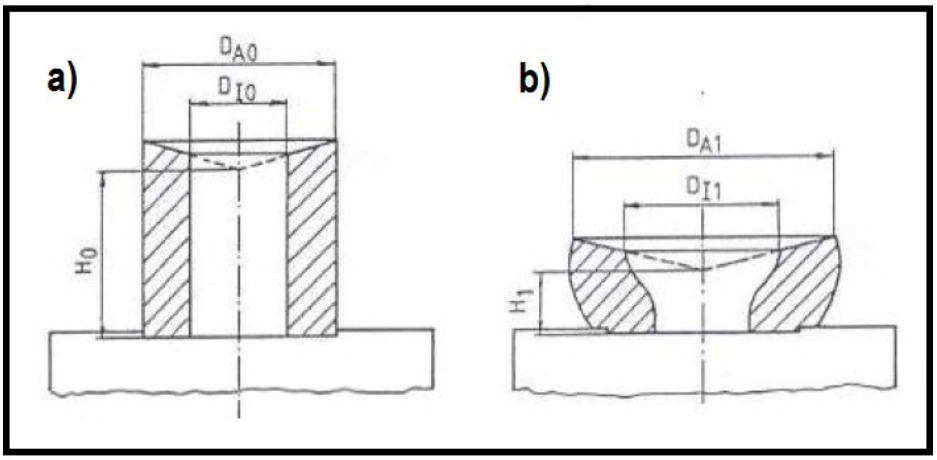


Figura 11. Corpo de prova inicial a) e corpo de prova final b) para o ensaio de tubo cônico. Figura adaptada de (BUENO, 2010).

Na Figura 11 a) estão representadas: D_{A0}, diâmetro externo inicial da amostra; D_{I0}, diâmetro interno inicial e H_0, altura inicial do tubo cônico. Na Figura 11 b) estão representadas: D_{A1}, diâmetro externo final da amostra; D_{I1}, diâmetro interno final e H1, altura final do tubo cônico.

Simulações são utilizadas para construção das curvas teóricas tendo no eixo das abcissas deformação em altura e no eixo das ordenadas a variação do diâmetro externo. Aplicando os resultados experimentais nas curvas de calibração é possível determinar o coeficiente do conjunto material-ferramenta-lubrificante (BUENO, 2010). A Figura 12 apresenta as curvas obtidas por simulação utilizando o método de

elementos finitos para o ensaio de tubo cônico, com ferramenta com ângulo de 25º, material: St37 e T= 1000ºC (BUENO, 2010).

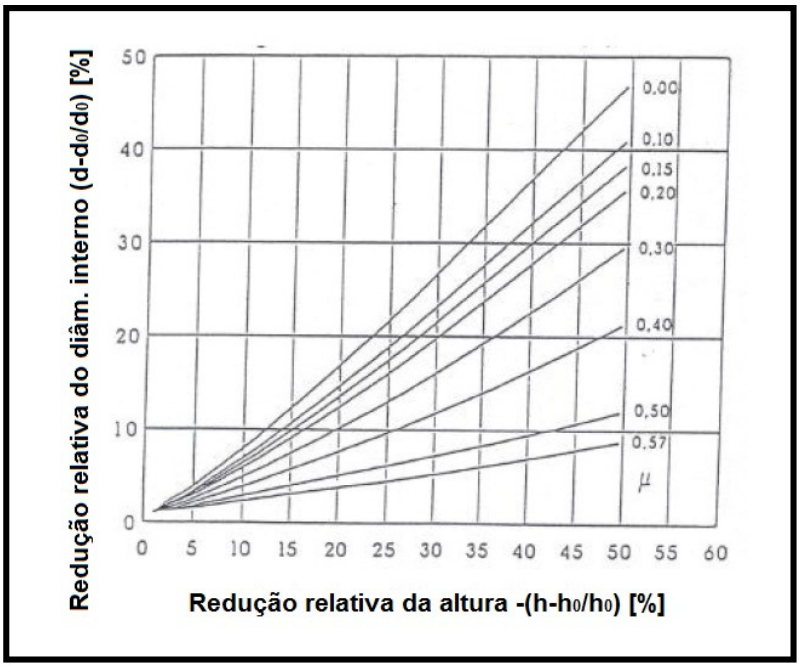


Figura 12. Curvas de calibração para o ensaio do tubo cônico. Figura adaptada de (Bueno, 2010).

Em sua análise comparativa entre os métodos do ensaio de tubo cônico e do ensaio do anel, Bueno (2010) conclui que os dois métodos apresentam valores coerentes de coeficiente de atrito somente quando o teste é realizado em temperaturas superiores a 450ºC, o que inviabiliza a aplicação do método de ensaio de tubo cônico para baixas temperaturas. Além de o ensaio do anel mostrar se vantajoso em relação ao tubo cônico pela simplicidade geométrica tanto do corpo de prova quanto da superfície da ferramenta, contra-corpo (SHEN, 1992), Bueno (2010) também destaca como vantagem do ensaio do anel, o custo inferior na confecção de corpos de prova uma vez que os anéis necessitam de menos material para serem produzidos que os tubos, o que para ensaios com materiais de custo elevado como ligas de Titânio ou ligas de Alumínio aeronáutico, tornam-se relevantes.

2.8.2 Cones contra-postos

Outra alternativa é proposta por Petersen, Martins e Bay (1998), que se baseiam nos métodos matemáticos do Upper-bound e Slab-method. Aplicados ao modelo de atrito de Wanheim-Bay (1976) nas simulações. Este modelo propõe a seguinte equação para o atrito:

$$\tau_i = f.\alpha.k \tag{7}$$

Onde f é o fator de atrito, variando entre 0 (condição sem atrito) até f=1 (condição de adesão), α é a relação entre a área de contato real e a área aparente entre a ferramenta e a peça e k é a tensão de cisalhamento puro.

Na prática o fator f é obtido experimentalmente e α é calculado por meio das expressões analíticas de Wanheim-Bay (1976).

Os autores (PETERSEN et al., 1998) concluíram que a nova geometria representada na Figura 13 é mais sensível para condições de tensão normal a baixos valores de pressão normal, $p/\sigma_0<1$ onde "p" é a pressão normal e σ_0 é a tensão de escoamento do material, e assim por meio de simulações em programas de elementos finitos são geradas as curvas de calibração do fator f em relação às deformações geométricas da amostra.

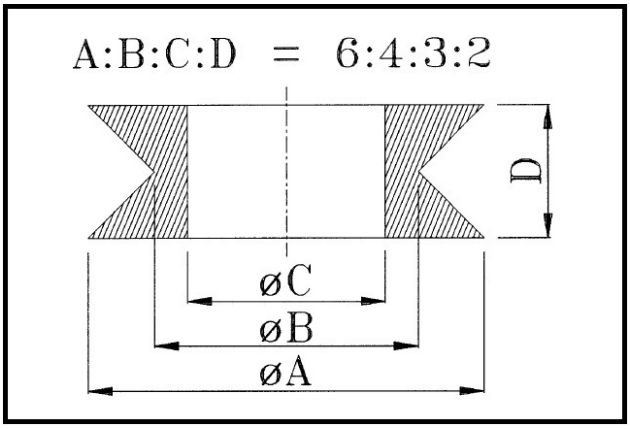


Figura 13. Geometria proposta para o ensaio, cones contrapostos. Figura de (PETERSEN et al., 1998).

Os próprios autores realizaram ensaios para comparar os resultados obtidos com a nova geometria proposta (Figura 13) com os resultados obtidos com a forma

convencional de anel. A Figura 14 apresenta os resultados das simulações utilizando o modelo de atrito constante (linha cheia), coeficiente de atrito utilizando o modelo de Wanheim-Bay proposto para a geometria alternativa (linha tracejada) e resultados experimentais para altas pressões normais com diferentes condições de oposição ao movimento, alcançadas utilizando dois lubrificantes: Querosene e MoS_2. Pode-se observar que para a geometria convencional, o modelo de atrito de Wanheim-Bay (linha tracejada) apresenta resultados bem coerentes uma vez que as linhas cheia e tracejada estão quase sobrepostas.

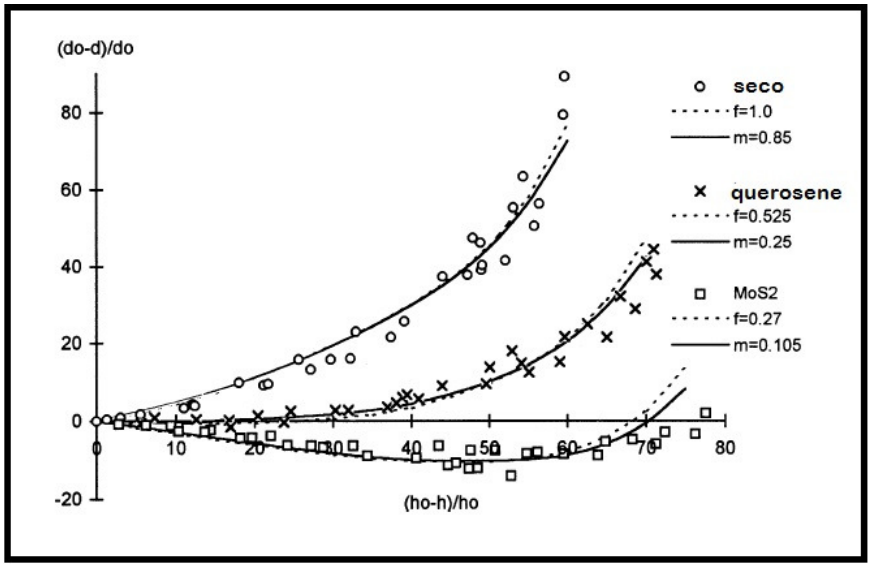


Figura 14. Ensaios com altas pressões normais utilizando geometria de anel convencional. Modelo de atrito constante (linha cheia), modelo de Wanheim-Bay (linha tracejada) e dados experimentais. Figura adaptada de (PETERSEN et al., 1998).

Observando a Figura 15 fica evidenciada a consideração dos autores com relação à baixa sensibilidade da geometria convencional quando é aplicada baixa pressão normal. Verifica-se que para a geometria convencional o modelo de atrito constante (linha cheia) apresenta valores maiores que os determinados para o modelo de Wanheim-Bay (linha tracejada). Esta diferença é facilmente notada para os valores do ensaio realizado na ausência de lubrificante.

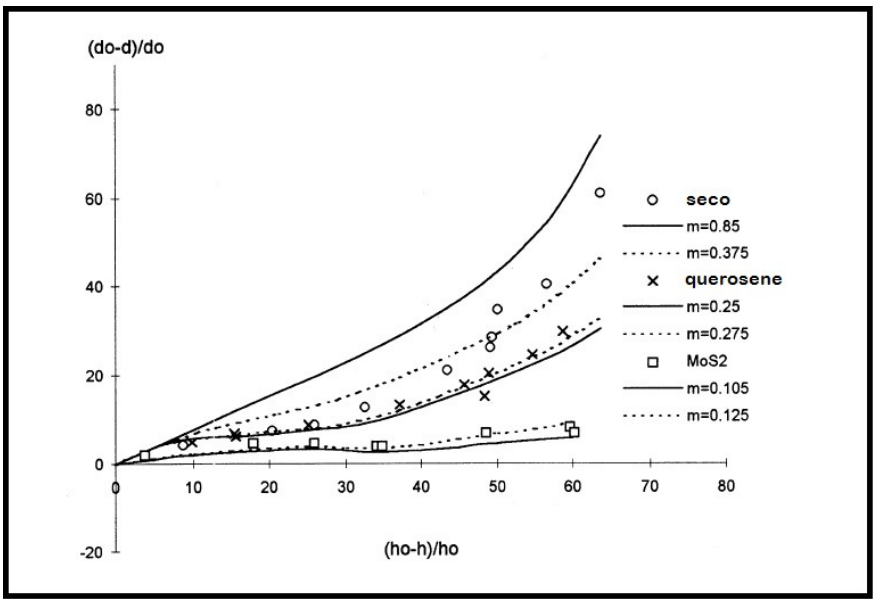


Figura 15. Ensaio com baixas pressões normais utilizando geometria de anel convencional. Modelo de atrito constante (linha cheia), modelo de Wanheim-Bay (linha tracejada) e dados experimentais. Figura adaptada de (PETERSEN et al., 1998).

Analisando a Figura 16 pode-se concluir que a dispersão entre os valores apresentados por cada modelo diminuiu, o que reforça a sensibilidade da geometria proposta na Figura 13, quando os ensaios são realizados com baixas pressões normais. Nota-se ao comparar as Figura 15 e Figura 16 que para ambas as geometrias o modelo de Wanheim-Bay apresenta valores mais coerentes com os valores determinados experimentalmente.

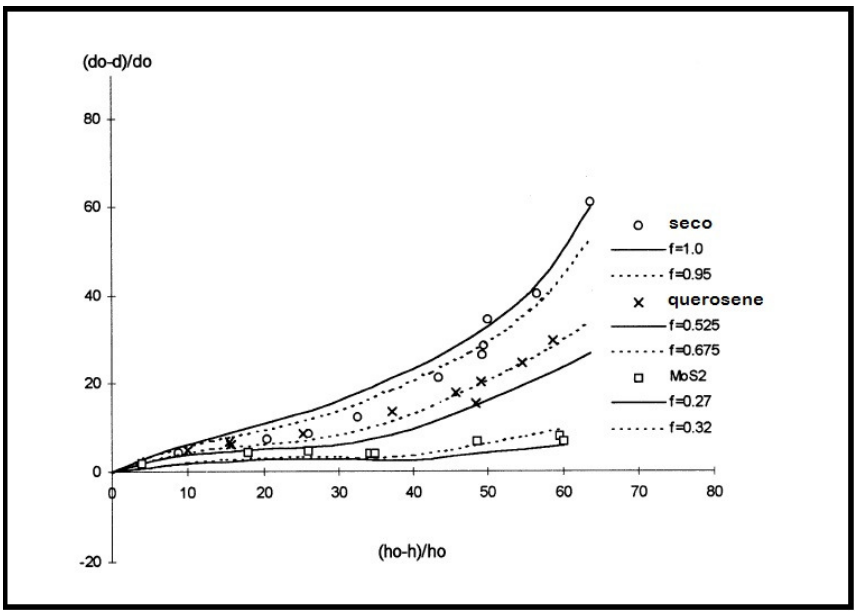


Figura 16. Ensaio com baixas pressões normais utilizando geometria de cones contrapostos. Modelo de atrito constante (linha cheia), modelo de Wanheim-Bay (linha tracejada) e dados experimentais. Figura adaptada de (PETERSEN et al., 1998).

Assim observando-se os resultados apresentados pode-se concluir que a geometria de cones contra-postos é complementar à geometria convencional de anel quando se quer avaliar a resistência ao movimento para baixa pressão na interface peça-ferramenta. No entanto, o ensaio do anel mostra-se vantajoso em relação à geometria de cones contra-postos pela simplicidade geométrica do corpo de prova, também a simplicidade de medição das deformações do corpo de prova ao final do ensaio e por sua aplicação em altas pressões, mais próximo do utilizado na indústria.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos Materiais

3.1.1 Anel

Os anéis foram produzidos em aço 1020 com as dimensões 18:9:6 mm com tolerâncias dimensionais de 0,01 mm, conforme desenho de fabricação da Figura 17. Mantiveram-se nos anéis a relação entre dimensões de 6:3:2 recomendada pela teoria (MALE e COCKCROFT, 1964) e amplamente utilizada na literatura.

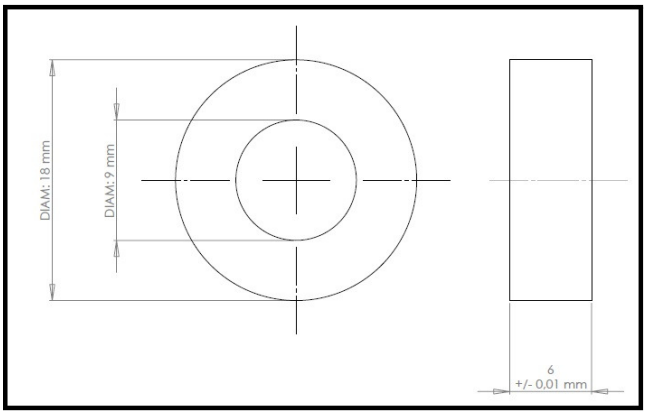


Figura 17. Desenho de fabricação do corpo de prova (anel).

A Figura 18 apresenta a fotografia de dois corpos de prova antes da deformação, à esquerda está uma vista de topo do corpo de prova e à direita está o anel fotografado de perfil.

Figura 18. Corpo de prova (anel). À esquerda anel visto de topo e a direita anel visto de perfil.

Foram realizadas dez medições de macrodureza no equipamento do fabricante Buehler Modelo VMT-7, chegando-se aos valores que estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Medição de macrodureza em anéis de SAE 1020.

Repetição	**Anel de aço**
	HV_{30}
1	170
2	174
3	182
4	174
5	171
6	167
7	170
8	172
9	172
10	171
Médias	172
Desvio Padrão	4
Coef. Var.	2 %

Como pode ser visto na Tabela 1, a macrodureza média dos anéis de aço é de aproximadamente 172 HV. A Figura 19 apresenta a metalografia feita em uma das amostras utilizadas para a confecção dos corpos de prova, a amostra foi cortada e embutida a quente, em seguida foi lixada com lixa mesh #320 e polida com abrasivos de 9, 6 e 3 µm e por fim a superfície foi atacada com NITAL 3% por aproximadamente 2 minutos para destacar a microestrutura.

A estrutura foi observada no microscópio Olympus BX60M e fotografada com uma câmera JVC modelo TK-C1380.

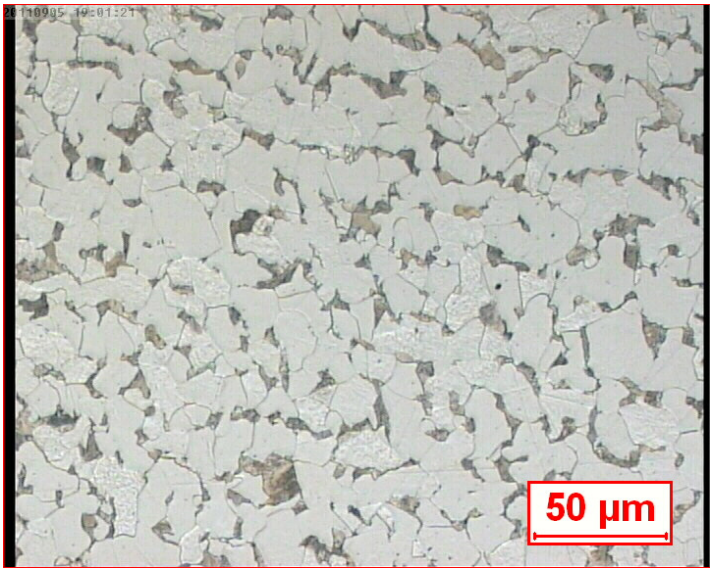


Figura 19. Microestrutura do aço utilizado na confecção de corpos de prova. Material foi polido e atacado com NITAL 3% por 3 minutos e observado em microscópio ótico.

Foi realizada uma metalografia quantitativa da amostra de aço utilizando o parâmetro de Fração de Pontos, no qual é contabilizado o número de pontos incidentes no objeto de interesse pelo número total de pontos de grade (PADILHA, 1997).

Foram utilizadas dez imagens de regiões diferentes da amostra para a determinação da média da fração de perlita. Com o auxílio do software Leica QWin, sobre cada uma das imagens é sobreposta uma grade e são contabilizados os pontos nos quais haja intersecção dos pontos da grade vertical com os pontos da grade horizontal.

A Figura 20 ilustra a contagem da fração de perlita em uma das fotos utilizadas, nesta mesma figura está destacada com uma seta vermelha a intersecção das grades que deve ser contabilizada.

Os dados coletados nas medições de fração de cada uma das fotografias podem ser observados na Tabela 2, utilizando-se o parâmetro de Fração de Pontos, pode-se determinar que 14,6% da microestrutura da amostra é composta por perlita e os 85,4% restantes é composto por ferrita (fase clara na Figura 19).

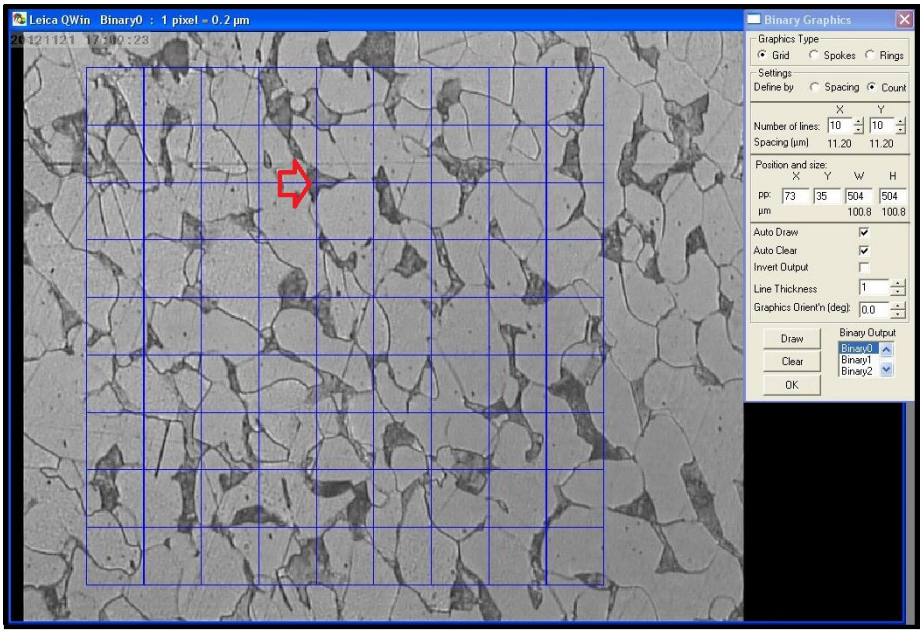


Figura 20. Contagem da fração de pontos, utilizada para determinação de fração de perlita no aço.

Tabela 2. Contagem de fração de perlita na amostra de aço, utilizando o parâmetro de Fração de Pontos.

Fotografia	**Anel de aço**
	Fração de Perlita
1	19
2	19
3	10
4	11
5	13
6	12
7	11
8	15
9	18
10	18
Médias	15
Desvio Padrão	4
Coef. Var.	25%

Empregando o software Leica QWin foi executado um procedimento de determinação da fração de perlita via software, neste procedimento foi utilizada a

fotografia identificada com o número 5 na Tabela 2, para se ter valores de referência. Neste procedimento, a fase que se deseja contabilizar deve ser identificada (pintada) manualmente, como pode ser observado na Figura 21, a fase a ser contabilizada está identificada com uma tonalidade de azul. Em seguida o software calcula automaticamente a fração da parte identificada.

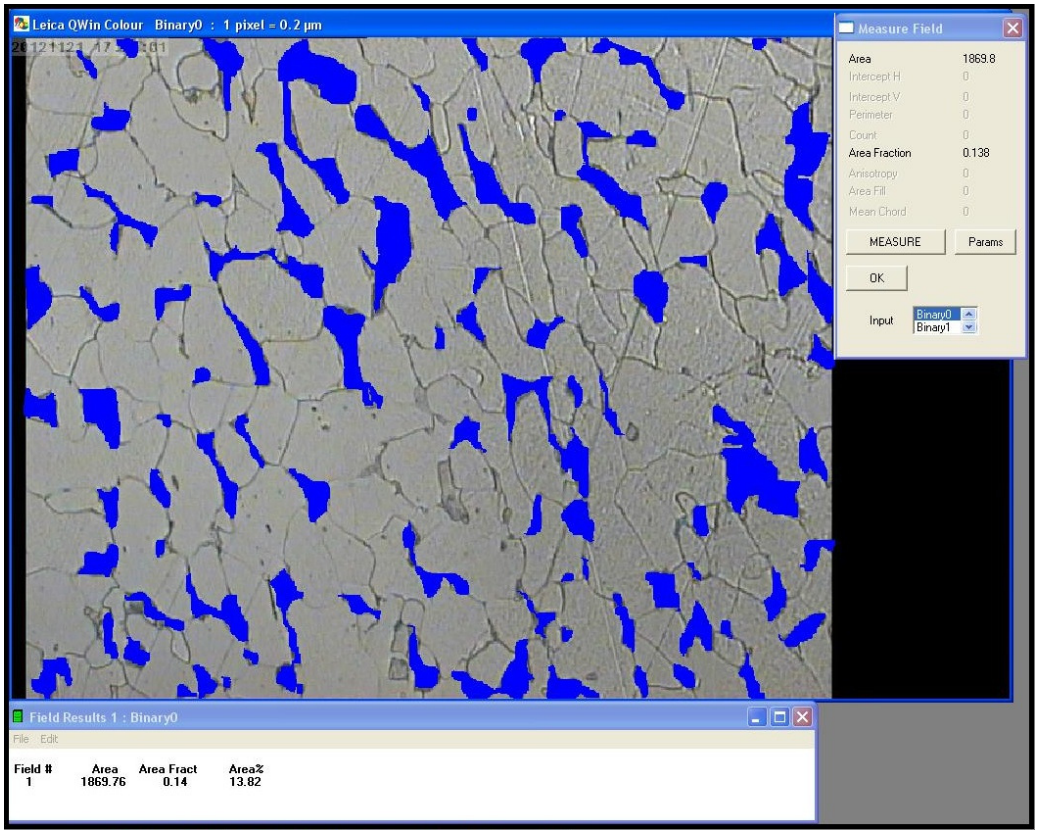


Figura 21. Determinação da fração de perlita utilizando se uma ferramenta do software.

Como resultado da determinação da fração por meio do software, obteve-se uma fração de 13,82%, que é somente 0,82% maior que a fração determinada pelo parâmetro de Fração de Pontos, o que confirma a coerências entre os dois métodos.

Foi realizada em uma amostra de cavaco, retirada de um anel, uma análise de carbono, efetuada pelo método de combustão, utilizando o equipamento do fabricante LECO modelo CS-300, esta análise mostrou que a porcentagem de carbono nos corpos de prova é de 0,20 +/- 0,01. Assim pode-se confirmar que o

material recebido e utilizado para a confecção dos corpos de prova é aço SAE 1020, pois seus valores de porcentagem de carbono e de dureza estão em conformidade com valores encontrados na literatura que são de 0,18-0,23 % de carbono e dureza entre 140-175 HV, disponível em catálogos de fabricantes que seguem a norma ABNT NBR NM 87:2000 substituta da norma ABNT NBR 6006:1994 que é a norma brasileira equivalente a SAE 1020.

3.1.2 Ferramentas

As ferramentas foram fabricadas em aço ferramenta fundido de formato cilíndrico com diâmetro de 50 mm e comprimento de 33 mm, para ser encaixada em um porta ferramenta, que por sua vez é fixado na prensa utilizada para realização dos ensaios. A Figura 22 mostra o porta ferramenta à esquerda da figura e a ferramenta à direita.

Figura 22. Na ilustração a esquerda está apresentado o porta ferramenta e a direita a ferramenta de aço ferramenta.

Foram produzidos 5 pares de ferramentas cilíndricas, que foram identificadas com a inicial “P” maiúscula, que significa: par, seguida do número que identifica este par e sua posição durante a compressão, se este é o contra-corpo superior (P1S) ou o contra-corpo inferior (P1I).

A medição de macrodureza da ferramenta está apresentada na Tabela 3, o valor médio encontrado para a macrodureza do aço ferramenta é de 735,1 HV.

Tabela 3. Medição de macrodureza das ferramentas de aço ferramenta.

Repetição	**Aço Ferramenta**
	HV_{30}
1	708
2	703
3	743
4	757
5	761
6	730
7	706
8	748
9	706
10	791
Médias	735
Desvio Padrão	30
Coef. Var.	4%

Uma das ferramentas teve sua superfície polida com abrasivos de 9, 6 e 3 µm e em seguida foi atacada com reagente Villela por aproximadamente 5 segundos, com a finalidade de destacar a microestrutura do aço ferramenta. Na Figura 23 apresenta-se a micrografia do aço ferramenta fundido, utilizado como contra-corpo.

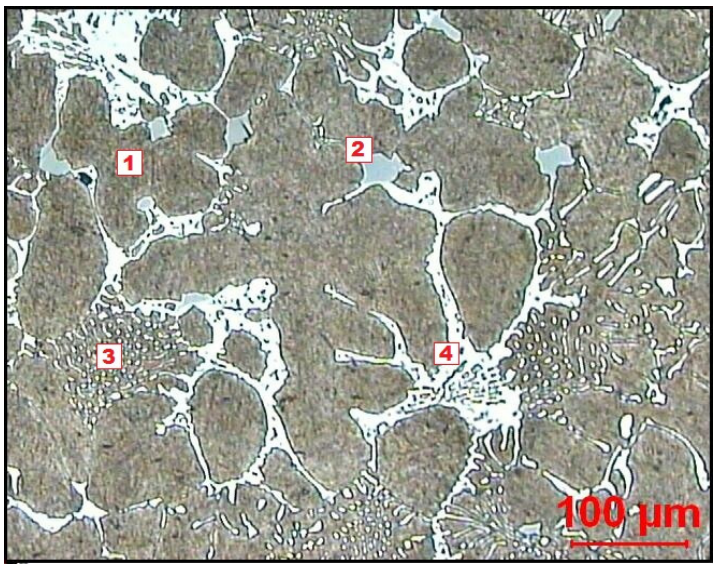


Figura 23. Microestrutura do aço ferramenta fundido. Material foi polido e atacado com VILLELA por 5 segundos e observado em microscópio ótico.

Tabela 4. Medição de microdureza matriz martensítica e do carboneto M7C3.

Repetição	**Aço Ferramenta**	
	Matriz Martensítiva ($HV_{0,1}$)	**M7C3 ($HV_{0,1}$)**
1	724	1168
2	702	1049
3	657	1049
4	642	1027
5	620	857
6	724	1225
7	698	1095
8	689	956
9	638	1120
10	729	880
11	787	1268
12	630	1254
13	720	825
14	657	1107
15	757	1225
Médias	692	1074
Desvio Padrão	50	145
Coef. Var.	7%	14%

Na Figura 23 estão identificados com números em vermelho os constituintes do material utilizado:

1) Matriz martensítica (DA SILVA, 2003);
2) Sulfeto de manganês, que pode ser observado em uma tonalidade de cinza mais claro que a matriz (SERANTONI, 2009);
3) Carboneto de vanádio (SERANTONI, 2009); e
4) Carboneto M7C3 (DA SILVA, 2003).

Os valores de microdureza, realizados no equipamento Buehler modelo 2103, da matriz martensítica e do carboneto M7C3 estão apresentados na Tabela 4.

Devido aos seus tamanhos reduzidos o carboneto de vanádio e o sulfeto de manganês não tiveram suas microdurezas medidas, uma vez que a marca de indentação tem tamanho maior que estes componentes, mesmo utilizando as cargas de indentação mais baixas disponíveis no equipamento. Observando-se a Tabela 4, verifica-se que a microdureza média da matriz martensítica é de 692 HV e a dureza média do carboneto M7C3 é 1074 HV, valores que são coerentes com os valores encontrados na literatura que são de 300-900 HV para a matriz martensítica e de 900-1300 HV para o carboneto M7C3 (MARIOT, 2010). A dureza do carboneto de vanádio é, da literatura, 2460-3150 HV (HUTCHINGS, 1992), porém não foram encontrados dados precisos sobre o sulfeto de manganês.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação dos corpos de prova (anéis)

Os anéis produzidos em aço com as dimensões 18:9:6 mm foram recebidos com tolerâncias dimensionais de usinagem de 0,01 mm. Foi feito processo de acabamento nas superfícies do anel utilizando-se para isso uma lixa de Mesh #320, realizando movimentos aleatórios com dois objetivos: (i) diminuir a tolerância dimensional da altura para +/- 0,005 mm, esta pequena tolerância na altura tem como objetivo minimizar a influência das dimensões da amostra na análise dos resultados das deformações; (ii) apagar as marcar de retífica deixadas no processo de usinagem do corpo de prova, impondo a superfície do anel uma topografia isotrópica, ou seja, sem nenhuma orientação predominante, pois como visto na literatura (MALE E COCKCROFT, 1964) qualquer anisotropia na superfície do anel pode causar a deformação preferencial do corpo de prova e alterar o resultado do ensaio. Após o

lixamento do anel obteve-se uma rugosidade média (Ra) na amostra de 0,032 µm, como pode ser observado na Tabela 5 o perfil topográfico do anel obtido com os resultados do perfilômetro Kosakalab modelo Surf-corder SE1700α estão apresentados no gráfico da Figura 24.

Tabela 5. Medição de rugosidade (Ra em µm) do anel após o lixamento, para obter uma topografia isotrópica na superfície do anel.

Repetição	**Lixamento isotrópico do anel**
	Ra (µm)
1	0,037
2	0,024
3	0,030
4	0,035
5	0,035
Médias	0,032
Desvio Padrão	0,005
Coef. Var.	16,3%

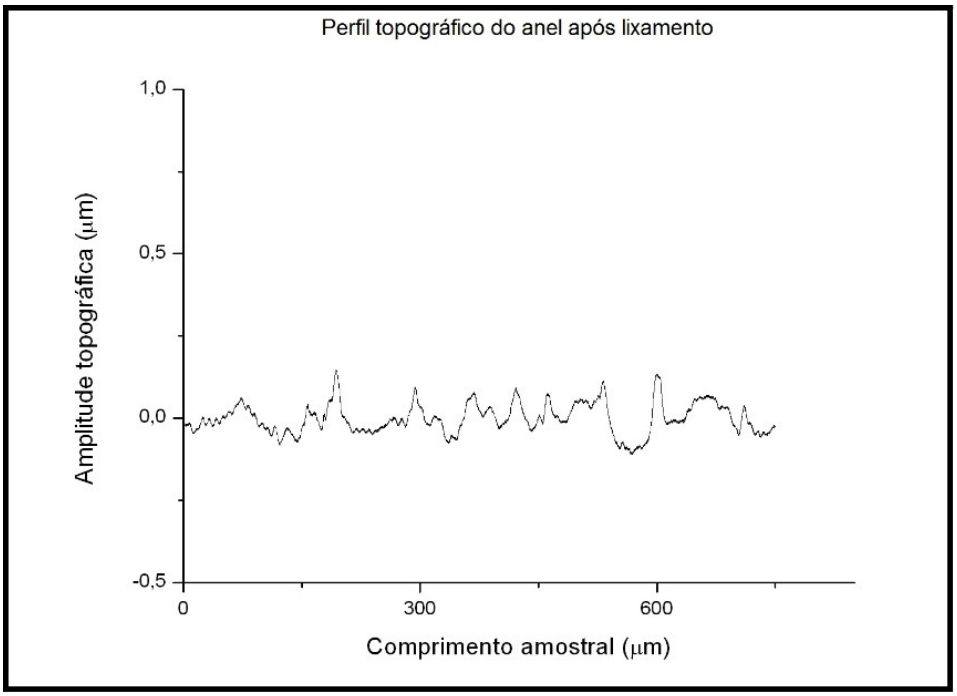


Figura 24. Perfil topográfico do anel após o lixamento sem orientação preferencial, com lixa de Mesh #320.

3.2.2 Preparação das ferramentas

As ferramentas foram preparadas utilizando a politriz automática Tegra Pol 25 da marca Struers, possibilitando o controle de parâmetros de processo como: tempo de lixamento, aplicação de carga e quantidade de abrasivo aplicado ao polimento com confiabilidade e repetitividade.

Os processos de lixamento e polimento são realizados simultaneamente em três ferramentas, sempre agrupadas como ferramentas superiores ou ferramentas inferiores. Por exemplo, ao mesmo tempo são preparadas as ferramentas P1S, P2S e P3S que são as ferramentas superiores, em uma próxima corrida de preparação é a vez das ferramentas P1I, P2I, e P3I (ferramentas inferiores). Este agrupamento no momento da preparação iguala o procedimento entre os pares de ferramentas.

No primeiro processo de polimento cada ferramenta foi lixada até a retirada das marcas de usinagem deixadas na fabricação e em seguida foram polidas. A cada ensaio, no qual deseja se estudar o coeficiente de atrito sem a interação das marcas deixadas pelo ensaio anterior, a ferramenta é novamente lixada até a retirada das marcas deixadas no processo de conformação e polida com abrasivos de 9 e 6 µm. Na preparação das ferramentas não foi necessário o polimento com abrasivo de 3 µm, pois um estudo prévio demonstrou que para este aço ferramenta com dureza de aproximadamente 730 HV os polimentos com abrasivos de 6 e 3 µm alcançam topografias superficiais semelhantes. Os dados deste estudo podem ser observados no Anexo B. Nos ensaios com polimento intermediários as ferramentas foram polidas após cada ensaio. A aferição da rugosidade das ferramentas, para controlar o processo de polimento, foi realizada após ser completada uma série com velocidade e grau de deformação definidos, ou seja, a cada 10 ensaios foi realizada uma medição de rugosidade para verificar a repetitividade do processo automatizado de polimento.

Após o polimento obteve-se uma rugosidade média (Ra) de 0,008 µm nas ferramentas como pode ser observado na Tabela 6. O perfil topográfico da ferramenta polida obtido com os resultados do perfilômetro Kosakalab modelo Surf-corder SE1700α estão apresentados no gráfico da Figura 25.

Tabela 6. Medição de rugosidade Ra da ferramenta polida com abrasivo de 6 µm.

Repetição	Ferramenta
	Ra (µm)
1	0,007
2	0,009
3	0,009
4	0,007
5	0,007
Médias	0,008
Desvio Padrão	0,001
Coef. Var.	14,04%

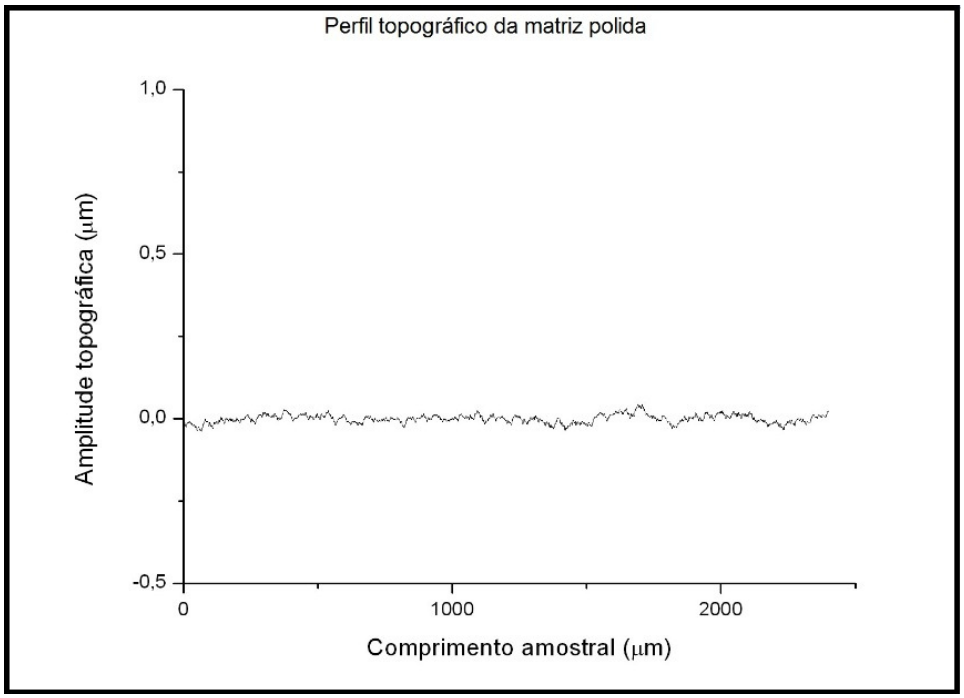


Figura 25. Perfil topográfico da ferramenta polida com abrasivo de 6 µm.

Comparando-se a Figura 24 que representa uma superfície com Ra= 0,032 µm e Figura 25 que representa uma superfície com Ra=0,008 µm, pode-se verificar que apesar de ambas as topografias serem aleatórias e isotrópicas, sendo este um efeito desejado, a amplitude dos picos na ferramenta (Figura 25) são menores que os picos encontrados na topografia do anel (Figura 24), sendo este fato atribuído aos acabamentos superficiais diferentes.

3.2.3 Prensa

O equipamento utilizado nos ensaios foi a Prensa LFS 150 com capacidade para 150 toneladas-força (10^4 N), instrumentada para medição de força com resolução de $0{,}01 \times 10^4$ N e resolução de deslocamento de 0,01 mm, com flexibilidade para execução de ensaios em compressão com a capacidade total da máquina, 150 tnf, e ensaios de tração com capacidade de 1×10^4 N. Por questões de segurança a Prensa LFS 150 teve sua capacidade limitada, por meio de uma válvula de segurança em 80×10^4 N, que, como visto em ensaios prévios e em referência (LEITE, 2010), é quase o dobro da maior força necessária no ensaio mais severo.

A prensa tem capacidade de operação em dois modos (i) deslocamento, neste modo de controle o alvo a ser atingido é uma posição programada pelo operador e a força aplicada pelo martelo hidráulico do equipamento é um resultado do deslocamento requisitado; (ii) força, neste modo de controle os papéis se invertem, a força neste modo é programada e o deslocamento passa a ser uma consequência do atendimento à requisição da força pré-determinada. Ambos os modos de operação permitem a aquisição de dados do deslocamento e da força. Uma curva típica deslocamento em função do tempo de aquisição é apresentada na Figura 26.

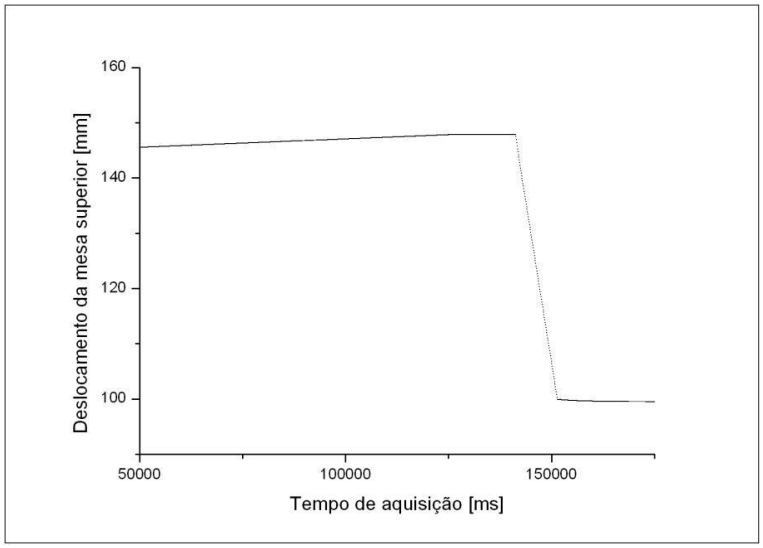


Figura 26. Curva típica de deslocamento em função do tempo de aquisição no modo deslocamento.

Simultaneamente à captação do deslocamento do martelo, o sistema de aquisição de dados registra a força aplicada durante o ensaio. Uma típica curva de força de deformação em função do tempo de aquisição é apresentada na Figura 27.

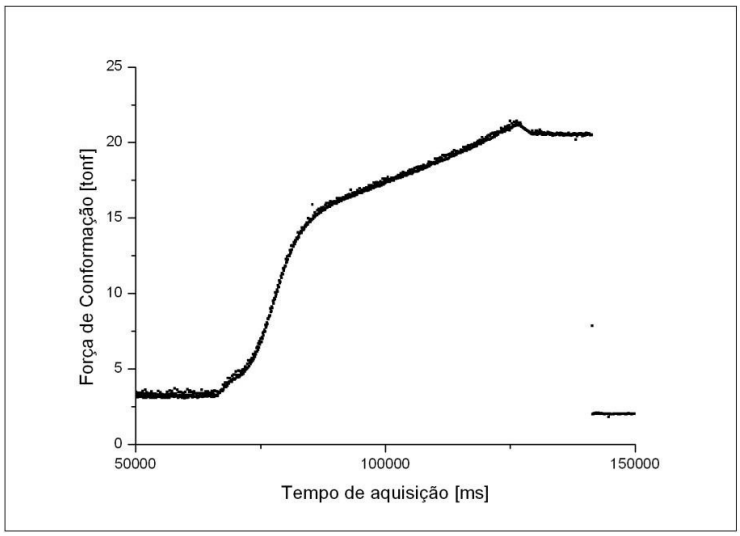


Figura 27. Curva típica de força de deformação em função do tempo de aquisição.

A Figura 28 apresenta uma vista geral da Prensa LFS 150 destacando seus principais componentes.

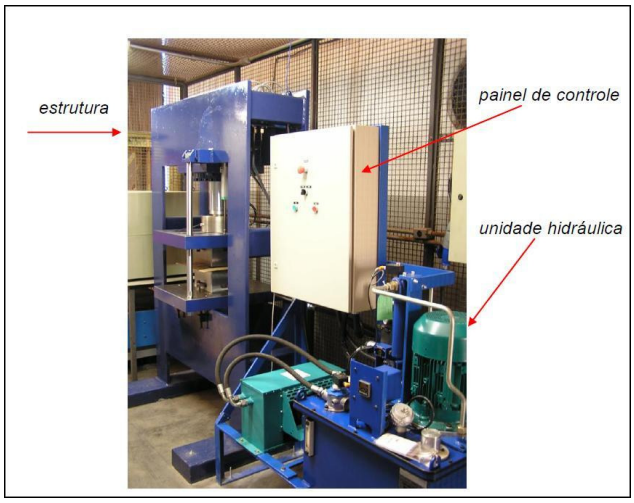


Figura 28. Ilustração da vista geral da Prensa LFS 150, as principais unidades: estrutura, painel de controle e unidade hidráulica da prensa estão indicadas na figura.

3.2.3.1 Repetitividade da Prensa LFS 150

Para determinar a repetitividade da prensa, que neste caso é considerada a capacidade da máquina de parar na mesma posição, um relógio comparador com resolução de 0,01 mm, foi posicionado sobre a mesa inferior da prensa, conforme ilustração da Figura 29.

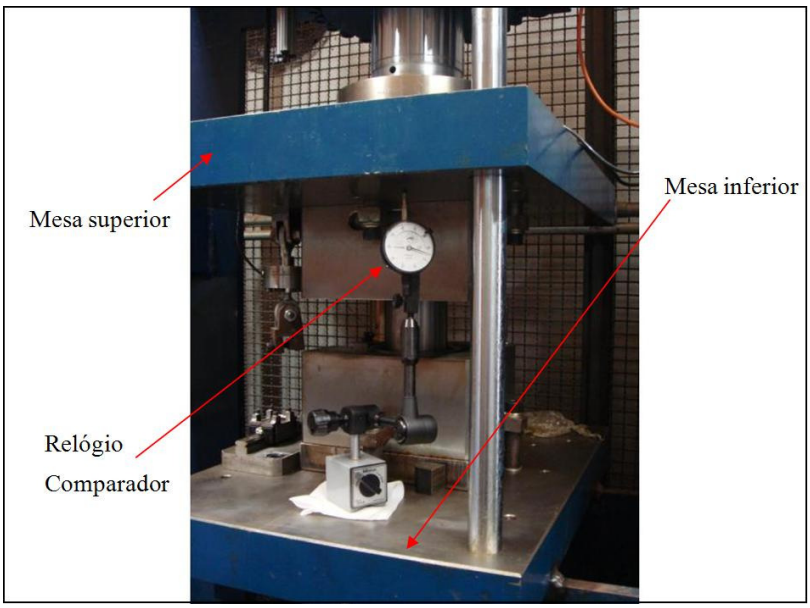


Figura 29. Relógio comparador posicionado entre a mesa superior e inferior da prensa para o teste de repetitividade de movimentação.

A prensa foi movimentada até uma posição arbitrária para que esta sirva como alvo a ser alcançado pela máquina quando programada em modo deslocamento, neste ponto o relógio comparador foi zerado.

O martelo da prensa foi elevado de forma a deixar o relógio comparador livre. A máquina, já em modo de controle para deslocamento, foi carregada com o valor necessário para que o indicador do relógio comparador retorne a posição zero e mantenha esta posição por 15 segundos, tempo necessário para a leitura do visor do relógio, ao final desta parada, a máquina retorna a posição inicial, na qual o relógio comparador está livre novamente. Este procedimento foi repetido dez vezes para cada uma das três velocidades a serem utilizadas nos experimentos. A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de repetitividade.

Tabela 7. A tabela apresenta os resultados dos ensaios de repetitividade, para cada velocidade foi realizada a leitura do LVDT e do relógio comparador.

Repetição	vel. 3 mm/s		vel. 0,3 mm/s		vel. 0,03 mm/s	
	LVDT	Rel. Comp.	LVDT	Rel. Comp.	LVDT	Rel. Comp.
1	49,55	0,03	49,55	0,00	49,55	0,00
2	49,55	0,00	49,55	-0,01	49,55	0,00
3	49,55	0,00	49,55	-0,01	49,55	0,01
4	49,55	0,00	49,55	-0,02	49,55	0,01
5	49,55	-0,01	49,55	-0,02	49,55	0,00
6	49,55	-0,02	49,55	-0,02	49,55	0,00
7	49,55	-0,02	49,55	-0,01	49,55	0,00
8	49,55	0,01	49,55	-0,02	49,55	0,00
9	49,55	0,01	49,55	-0,02	49,55	0,00
10	49,55	0,01	49,55	-0,02	49,55	0,00
Médias	49,55	0,00	49,55	-0,02	49,55	0,00
Desvio Padrão	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00

Para cada velocidade ensaiada foi realizado a leitura do LVDT (linear variable differential transformer), sensor para medição de deslocamento linear (fixado na prensa e responsável pela aquisição do sinal de deslocamento) e a medição do deslocamento relativo apresentado pelo relógio comparador. Na leitura dos dados apresentados na Tabela 7 pode-se verificar que a leitura apresentada pelo LVDT é sempre constante não importando a velocidade, ou seja, o alvo é sempre alcançado. Já as leituras apresentadas no relógio comparador demonstram que a prensa apresenta um pequeno “erro” ao locomover-se. No entanto, o equipamento é preciso em seus deslocamentos, uma vez que esta imprecisão de deslocamento é de no máximo três centésimos de milímetro (0,03 mm) e a menor deformação será de 1,2 mm que é quarenta vezes maior que a maior imprecisão.

3.2.4 Medição das dimensões do anel deformado

Após o ensaio cada corpo de prova teve sua altura aferida com um micrômetro digital com resolução de 0,001 mm, em quatro pontos distintos da amostra dispostos aproximadamente 90º um do outro. Na Figura 30 estão indicados em vermelho os pontos nos quais é feita cada medição da altura. Na Tabela 8 está apresentado o resultado da medição da altura nos pontos indicados na Figura 30 e como é calculada a média que será usada como valor de altura ao final da deformação.

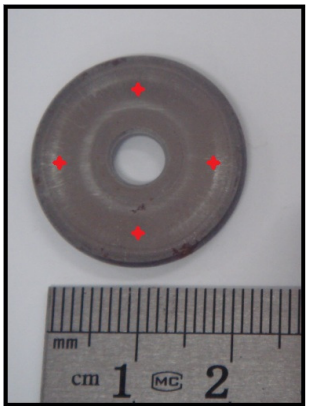


Figura 30. Medição da altura da amostra deformada.

Tabela 8. Tabela utilizada para cálculo de altura final média da amostra, as medições são feitas em quatro pontos distintos da amostra.

Ensaio	h1	h2	h3	h4	Média (mm)
1	4,232	4,231	4,238	4,238	4,235

O diâmetro interno foi medido com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, em quatro pontos distintos da amostra dispostos aproximadamente 45º um do outro. Na Figura 31 estão indicados com setas em vermelho os pontos nos quais é feita cada medição de diâmetro interno do anel deformado.

Figura 31. Medição do diâmetro interno da amostra deformada.

Tabela 9. Tabela utilizada para cálculo do diâmetro interno final médio da amostra, as medições são feitas em quatro pontos distintos da amostra.

Ensaio	df1	df2	df3	df4	Média (mm)
1	7,34	7,24	7,31	7,33	7,31

Na Tabela 9 está apresentado o resultado da medição do diâmetro interno do anel nos pontos indicados na Figura 31 e como é calculada a média que será usada como valor de diâmetro interno ao final da deformação.

3.2.5 Medição das microdurezas do Anel deformado

Para poder analisar como a deformação, em ensaios sem polimento intermediário, afeta o material foi medido o perfil de dureza na secção da amostra. Para isso as amostras foram preparadas metalograficamente e o perfil foi estabelecido conforme identificação mostrada na Figura 32.

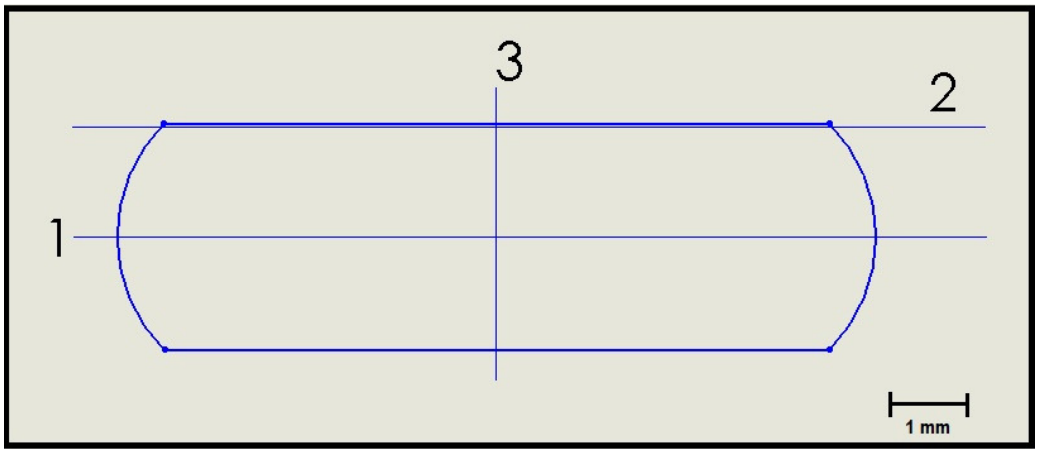


Figura 32. Desenho esquemático da localização das medições do perfil de dureza da amostra deformada.

Na Figura 32: (i) número 1: é a medição de dureza na linha média da amostra; (ii) número 2: é medição da dureza em uma linha a 50 µm abaixo da superfície e (iii) número 3: é a medição da dureza ao longo da altura da amostra no ponto identificado como sendo a linha neutra.

Todas as medidas de dureza deste item foram realizadas com uma carga de 490,3 mN utilizando um penetrador Vickers.

4 Planejamento Experimental

4.1 Configuração inicial da prensa

Após cada montagem uma folha de papel foi inserida entre as ferramentas para evitar que o contato direto da ferramenta superior contra a ferramenta inferior danifique as superfícies, em seguida as ferramentas foram comprimidas uma contra a outra com uma carga arbitrada de $15x10^4$ N, o valor desta primeira compressão em vazio foi arbitrado somente para que se tivesse um valor de referência que será utilizado em todos os pares de ferramentas antes de cada ensaio, o valor coletado do sensor de movimento linear, LVDT, passa a ser o ponto de referência (zero-zero), que significa que as ferramentas estariam em contato uma com a outra, ou seja, o

espaçamento entre as ferramentas é zero nesta condição. Este processo é repetido a cada troca de ferramenta.

Com este procedimento o cálculo do dado de entrada responsável por definir a movimentação da prensa é individualizado para cada par de ferramentas. Logo, as diferenças de tamanho entre ferramentas e possíveis alterações causadas por diferentes montagens não serão consideradas nos resultados.

Apesar de o equipamento ser projetado de forma robusta e rígida, deve-se considerar que todos os materiais utilizados na sua construção e também todas as suas junções, como por exemplo: soldas, encaixes e parafusos, conferem uma flexibilidade elástica ao equipamento que é intrínseca de cada montagem das ferramentas na prensa. Este comportamento elástico também é observado nos corpos de prova que ao serem comprimidos apresentam um retorno elástico que deve ser contabilizado para que a deformação final alcançada seja a desejada no presente estudo. O retorno elástico do material e da máquina é comumente chamado de *springback* da máquina ou retorno elástico.

Para que não haja influência da flexibilidade total do equipamento e do corpo de prova nos resultados, foi levantado o valor de retorno por retorno elástico para cada uma das velocidades, considerando as deformações, na compressão de uma amostra em condições de ensaio, os dados deste levantamento estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Retorno elástico combinado do equipamento e do corpo de prova, para cada uma das condições de ensaio.

Velocidade	**Grau de deformação**	**Efeito mola (mm)**
3,00 mm/s	50%	0,90
0,30 mm/s		2,20
0,03 mm/s		2,40
3,00 mm/s	20 %	0,36
0,30 mm/s		1,61
0,03 mm/s		1,76

Observando-se a Tabela 10, pode-se concluir que a diminuição da velocidade aumenta o retorno elástico do conjunto para ambos os graus de deformação. No

entanto, com 50% de deformação o retorno elástico para velocidades de deformação de 0,30 mm/s e 0,03 mm/s tem valores com uma diferença inferior a 10%, já para a velocidade de deformação de 3,00 mm/s, o retorno elástico é inferior a 50% do valor encontrado para as outras velocidades. Para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação esta diferença torna-se ainda mais evidente, pois o retorno elástico neste caso é inferior a 25% do valor encontrado para as velocidades de 0,30 mm/s e 0,03 mm/s.

4.2 Planejamento dos experimentos

Foi proposta para avaliação da análise feita por Male e Cockcroft (1964) a execução de três ordens de grandeza de velocidades, sendo elas: 3,00 mm/s, 0,30 mm/s e 0,03 mm/s, em duas porcentagens de deformação na altura da amostra 20% e 50%, que são os extremos de validade da teoria proposta, e em duas condições topográficas distintas: (i) ferramenta polida, condição de deformação sobre uma superfície de referência, ou seja, os ensaios são feitos sempre sobre a mesma condição de topografia; (ii) ferramenta com marcas de desgaste, as marcas de desgaste neste caso são as marcas deixadas pelo ensaio anterior na superfície da ferramenta que podem ser observadas mesmo a olho nu. Para assegurar confiabilidade estatística dos resultados para a topografia (i) foram propostos dez repetições de cada condição de velocidade e grau de deformação, (ii) propõem-se estudar o efeito no coeficiente de atrito na deformação sucessiva de 10 anéis sobre a ferramenta de aço ferramenta. A Tabela 11 apresenta o planejamento experimental.

Tabela 11. Arranjo experimental proposto para as velocidades, deformações, condições topográficas e repetições realizadas.

Velocidade	**Com polimento intermediário**		**Sem polimento intermediário**		**Total de ensaios**
	20%	**50%**	**20%**	**50%**	
3 mm/s	10	10	10	10	40
0,3 mm/s	10	10	10	10	40
0,03 mm/s	10	10	10	10	40
Total de ensaios	30	30	30	30	120

Foram realizados 20 ensaios para cada velocidade e 30 para cada grau de deformação em duas condições de topografia distintas, o que resulta num total de 120 ensaios de anel realizados. Para todos os ensaios realizados as deformações na altura da amostra obedecem ao critério: Δh +/- 2%.

5 Resultados e Discussões

Os resultados das medidas de coeficiente de atrito serão apresentados em duas séries, a primeira na qual os experimentos foram feitos removendo-se, mediante polimento, as marcas de desgaste das ferramentas e a segunda nas quais sucessivos ensaios foram feitos sem remoção das marcas de desgaste dos ensaios anteriores. Todas as leituras dos coeficientes de atrito feitas para cada ensaio apresentado neste item foram feitas por meio de leitura do ábaco de Male e Cockcroft (1964) conforme visto na Figura 9.

5.1 Experimentos com polimento intermediário

Para os experimentos desta série cada par de ferramentas foi utilizada uma única vez para cada deformação, este procedimento impede que um novo ensaio seja realizado sobre as marcas do ensaio anterior. Sempre que uma nova deformação foi realizada, a região da ferramenta utilizada para o ensaio estava polida. Neste trabalho intitula-se polimento intermediário o procedimento que tem por finalidade eliminar os danos observados na ferramenta após a compressão de um corpo de prova.

Apresentam-se primeiramente os resultados dos ensaios com 50% de deformação e em seguida os com 20% de deformação na altura.

5.1.1 Deformação de 50% na altura com velocidade de 3,00 mm/s

As Tabela 12 a Tabela 15 a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 3,00 mm/s e uma redução de 50% na altura da amostra.

Observou se na Tabela 12 que apesar de as ferramentas serem de tamanhos diferentes, (coluna “zero-zero”), o procedimento desenvolvido para reduzir os efeitos de acomodação da prensa (4.1 Configuração inicial da prensa) foi capaz de

identificar esta pequena diferença e corrigi-la em parte. A nomenclatura " zero- zero" define a posição na qual as ferramentas estão "fechadas", ou seja, é o máximo deslocamento possível para a prensa com este par de ferramentas, como visto nos materiais e métodos. A Tabela 12 e as outras similares apresentam: Identificação da ferramenta, zero máquina (zero-zero), alvo programado, força máxima de compressão, leitura do LVDT, tempo de acomodação da amostra quando conformada, altura da amostra medida após o ensaio e diferença entre a altura desejada e a altura alcançada.

Tabela 12. Resultados adquiridos após o ensaio.

Identificação da ferramenta	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P1	152,62	150,62	44,77	150,54	15	2,887	-0,11
P2	152,50	150,39	43,49	150,31		2,954	-0,05
P3	152,49	150,39	43,81	150,32		2,971	-0,03
P4	152,08	149,98	43,81	149,91		2,949	-0,05
P5	152,42	150,27	44,03	150,20		2,958	-0,04
P2	152,41	150,31	43,58	150,23		3,002	0,00
P1	152,55	150,45	42,69	150,37		2,959	-0,04
P3	152,42	150,32	44,54	150,24		3,019	0,02
P4	151,98	149,88	44,07	149,81		2,965	-0,04
P5	152,33	150,23	44,14	150,16		2,943	-0,06

Tabela 13. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Amostra ensaiada na ferramenta	h1	h2	h3	h4	Média (mm)	σh
P1	2,892	2,888	2,884	2,885	2,887	0,003
P2	2,954	2,956	2,955	2,952	2,954	0,001
P3	2,977	2,974	2,963	2,970	2,971	0,005
P4	2,935	2,944	2,963	2,952	2,949	0,010
P5	2,937	2,955	2,973	2,965	2,958	0,013
P2	2,996	3,009	3,008	2,996	3,002	0,006
P1	2,955	2,945	2,964	2,970	2,959	0,009
P3	3,020	3,014	3,020	3,022	3,019	0,003
P4	2,975	2,958	2,962	2,964	2,965	0,006
P5	2,935	2,922	2,956	2,958	2,943	0,015

A Tabela 13 apresenta as medições realizadas em quatro pontos diferentes de cada amostra, para calcular altura média final da amostra. As amostras foram identificadas pela ferramenta na qual foram conformadas, velocidade do ensaio e grau de deformação da amostra.

A Tabela 14 apresenta as medições realizadas em quatro pontos diferentes de cada amostra, para calcular o diâmetro interno médio final da amostra.

Tabela 14. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Amostra ensaiada na ferramenta	df1	df2	df3	df4	Média (mm)	σdf
P1	5,17	5,20	5,28	5,10	5,19	0,06
P2	5,38	5,33	5,34	5,36	5,35	0,02
P3	5,30	5,28	5,30	5,27	5,29	0,01
P4	5,28	5,38	5,34	5,41	5,35	0,05
P5	5,46	5,39	5,45	5,35	5,41	0,04
P2	5,53	5,68	5,50	5,44	5,54	0,09
P1	5,77	5,76	5,55	5,80	5,72	0,10
P3	5,49	5,42	5,37	5,35	5,41	0,05
P4	5,41	5,44	5,46	5,49	5,45	0,03
P5	5,71	5,67	5,42	5,48	5,57	0,12

A Tabela 15 reapresenta os dados de redução de altura média e o diâmetro interno médio, também fornece o dado de redução geométrica porcentual tanto para a redução de altura, quanto pra o diâmetro interno, apresenta o dado mais importante deste trabalho o valor do coeficiente de atrito obtido do gráfico da Figura 9 para cada um dos ensaios realizados e força máxima de deformação.

Tabela 15. Resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P1	6,000	2,887	50	52	9,00	5,19	42	0,26	44,77
P2		2,954		51		5,35	41	0,27	43,49
P3		2,971		50		5,29	41	0,28	43,81
P4		2,949		51		5,35	41	0,27	43,81
P5		2,958		51		5,41	40	0,26	44,03
P2		3,002		50		5,54	38	0,25	43,58
P1		2,959		51		5,72	36	0,21	42,69
P3		3,019		50		5,41	40	0,27	44,54
P4		2,965		51		5,45	39	0,24	44,07
P5		2,943		51		5,57	38	0,25	44,14

A Tabela 16 apresenta os valores médios dos dados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 3,00 mm/s e deformação na altura de 50 %. Verifica-se que a maior variação porcentual na redução de altura é de 2%, no entanto, mesmo mantendo-se o valor do grau de deformação da altura com uma pequena variação, o valor do coeficiente de atrito tem um coeficiente de variância de aproximadamente 7,5%. Como todos os valores de μ determinados estão dentro da faixa de valores limitada por três desvios padrões do valor médio de μ, considera-se uma dispersão baixa. Verifica-se também que o coeficiente de variação da força máxima de compressão é inferior a 2% o que comprova os cuidados experimentais tomados para realização dos ensaios.

Tabela 16. Média dos resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
3,00 mm/s	51	40	0,26	0,019	7,45	43,89	0,550	1,25

5.1.2 Deformação de 50% na altura com velocidade de 0,30 mm/s

As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 estão no Anexo C uma vez que estas não são utilizadas na discussão dos resultados.

Tabela 17. Resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P2	6,000	2,972	50	50	9,00	5,57	38	0,25	46,05
P2		2,933		51		5,10	43	0,28	46,43
P3		2,898		52		5,24	42	0,26	45,35
P4		2,948		51		5,13	43	0,28	46,15
P5		2,906		52		5,27	42	0,26	45,07
P1		3,008		50		5,24	42	0,28	46,36
P2		2,881		52		6,01	33	**0,18**	44,75
P3		3,015		50		5,12	43	0,29	46,81
P4		2,997		50		5,10	43	0,29	47,13
P5		3,004		50		5,12	43	0,29	46,66

A Tabela 18 apresenta a média dos dados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 0,30 mm/s e deformação na altura de 50 %. O coeficiente de variação do coeficiente de atrito foi de 11, 91% e esta amplitude se deve ao valor 0,18 obtido no sétimo ensaio. Caso este valor fosse hipoteticamente excluído o coeficiente de variação cairia para 5,16%. Pelo fato de a variável de entrada, deformação em altura da amostra, estar sobre controle (variação máxima de 2%), esta queda no valor do coeficiente de atrito pode ter sido causada por um fenômeno que não foi contabilizado neste estudo, no entanto, devido à robustez do planejamento experimental os resultados são aceitáveis.

Tabela 18. Média dos resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
0,30 mm/s	51	42	0,27	0,032	11,91	46,08	0,782	1,70

5.1.3 Deformação de 50% na altura com velocidade de 0,03 mm/s

As demais tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 referentes a este ensaio estão no Anexo D.

Por um erro de coleta dos dados fornecidos pela prensa, o dado de força da sexta linha da Tabela 19 foi perdido, porém sem prejuízo as análises deste trabalho.

Tabela 19. Resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P1	6,000	2,927	50	51	9,00	5,23	42	0,27	46,34
P2		2,955		51		5,23	42	0,27	44,14
P3		2,982		50		5,30	41	0,28	46,45
P4		2,965		51		4,85	46	0,30	47,12
P5		2,942		51		4,15	54	0,40	48,87
P1		2,974		50		4,91	46	0,34	48,26
P3		2,924		51		5,43	40	0,25	-
P2		2,995		50		4,79	47	0,35	47,63
P4		3,014		50		4,95	45	0,31	47,43
P5		2,985		50		4,90	46	0,34	48,78

Nota-se na Tabela 19 que utilizando uma baixa velocidade (0,03 mm/s) e uma grande deformação (50%), ocorreu uma maior dispersão dos resultados em relação às duas séries anteriores.

Analisando-se a Tabela 20 tem-se a impressão que a combinação baixa velocidade e alto grau de deformação têm uma grande influência nos fenômenos que alteram o valor do μ, fato este comprovado pelo alto valor de coeficiente de variação de μ.

Tabela 20. Média dos resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
0,03 mm/s	51	45	0,31	0,044	14,12	47,22	1,387	2,94

5.1.4 Deformação de 20% na altura com velocidade de 3,00 mm/s

As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para esta configuração de ensaio estão no Anexo E.

Nota-se curiosamente na Tabela 21 que utilizando uma alta velocidade de deformação (3,00 mm/s) e uma pequena deformação (20%), ocorreu uma grande dispersão dos resultados, o mesmo comportamento da Tabela 19, porém com a combinação inversa de velocidade e deformação.

Tabela 21. Resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P1	6,000	4,804	20	20	9,00	8,06	10	0,24	21,12
P2		4,780		20		8,06	10	0,24	20,62
P3		4,807		20		7,95	12	0,30	20,73
P4		4,770		21		8,04	11	0,28	21,32
P5		4,828		20		8,05	11	0,29	20,42
P1		4,901		18		8,19	9	0,26	20,60
P3		4,898		18		8,25	8	0,20	20,57
P4		4,862		19		8,26	8	0,19	20,67
P2		4,864		19		8,22	9	0,24	21,27
P5		4,843		19		8,18	9	0,24	21,03

Na Tabela 22 verifica-se novamente o alto valor de coeficiente de variação de μ, agora para a combinação de alta velocidade de deformação e pequeno grau de deformação, esta grande dispersão dos resultados contrasta com os valores de redução na altura que variam no máximo 2% em relação ao valor desejado e também contrastam com outro valor de resultado que é o de força máxima de compressão que tem coeficiente de variação de 1,46%.

Tabela 22. Média dos resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
3,00 mm/s	19	10	0,25	0,034	13,71	20,84	0,304	1,46

5.1.5 Deformação de 20% na altura com velocidade de 0,30 mm/s

As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para esta configuração de ensaio estão no Anexo F.

Tabela 23. Resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	**Hi (mm)**	**Hf (mm)**	**def. teórica %**	**Δh %**	**di (mm)**	**df (mm)**	**ΔD %**	**μ**	**Fmáx (10^4N)**
P1	6,000	4,791	20	20	9,00	8,03	11	0,27	21,23
P2		4,806		20		7,97	11	0,27	21,19
P3		4,806		20		7,98	11	0,27	20,93
P4		4,791		20		7,98	11	0,27	21,70
P5		4,798		20		7,88	11	0,30	21,60
P1		4,838		19		8,14	10	0,28	21,13
P2		4,856		19		8,17	9	0,24	21,36
P4		4,849		19		**8,07**	10	**0,28**	21,37
P3		4,848		19		**8,24**	8	**0,19**	21,65
P5		4,829		20		8,17	9	0,22	21,10

Breves considerações sobre a dispersão dos resultados:

i) Com todos os cuidados experimentais que foram tomados neste trabalho como: limpeza química e mecânica das ferramentas e dos corpos de prova antes de cada deformação, rugosidade (verificada por amostragem) tanto das ferramentas quanto dos corpos de prova, dureza do material empregado nas ferramentas e nos corpos de prova (verificado por amostragem), planicidade das ferramentas e dos corpos de prova (verificada unitariamente), confiabilidade das medições dos equipamentos e retorno elástico do conjunto amostra e equipamento para cada ensaio. Os valores de coeficiente de atrito variaram entre 0,30 e 0,19. Conclusão: Para se ter resultados tecnologicamente significativos, o número de repetições deve ser similar ao apresentado no presente trabalho.

ii) resultados da 8ª e 9ª linha:

Além dos cuidados/controles mencionados no item (i) as diferenças de coeficiente de atrito medidas, surpreendem, pois a diferença entre as deformação final nos dois ensaios foi de apenas um micrometro que é 10 vezes menor que a precisão de deslocamento da máquina e, entretanto, os coeficientes de atrito obtidos (0,28 e 0,19) diferenciam entre si de aproximadamente 3 desvios padrões amostrais.

Esta diferença nos permite duas conclusões: a) os experimentos precisam de maior controle durante sua realização. b) os resultados da literatura em geral obtidos com pequeno número de repetições precisam ser encarados com cuidado. Na Tabela 24 estão apresentados os dados médios destes ensaios.

Tabela 24. Média dos resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
0,30 mm/s	20	10	0,26	0,031	12,02	21,33	0,244	1,15

5.1.6 Deformação de 20% na altura com velocidade de 0,03 mm/s

As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para esta configuração de ensaio estão no Anexo G.

Tabela 25. Resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P4	6,000	4,818	20	20	9,00	8,15	9	0,22	21,95
P2		4,723		21		7,91	12	0,30	21,49
P3		4,757		21		8,01	11	0,28	20,40
P4		4,770		21		7,93	12	0,30	20,95
P5		4,775		20		7,88	12	0,30	21,42
P2		4,817		20		8,05	11	0,29	21,61
P3		4,824		20		8,02	11	0,29	21,17
P4		4,823		20		8,09	10	0,25	21,39
P1		4,855		19		8,10	10	0,28	22,25
P5		4,797		20		8,06	10	0,25	22,03

A Tabela 26 apresenta a resumo dos valores obtidos para esta configuração, é importante notar que comparando esta tabela, com as tabelas anteriores de ensaios realizados com velocidade de deformação 0,03 mm/s verifica-se que este é o menor coeficiente de variação no valor de μ, exatamente na combinação de menor velocidade e menor grau de deformação.

Tabela 26. Média dos resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
0,03 mm/s	20	11	0,28	0,026	9,34	21,47	0,518	2,41

5.2 Experimentos sem polimento intermediário

Para os experimentos realizados nesta série, cada par de ferramentas foi utilizado para comprimir sucessivamente 10 anéis, sem preparação da superfície da ferramenta entre compressões, ou seja, o segundo anel foi deformado na região da ferramenta que havia conformado o primeiro anel e o terceiro anel foi deformado na região da ferramenta que já havia deformado o primeiro e o segundo anéis e assim sucessivamente.

As marcas de desgaste após o ensaio podem ser observadas a olho nu, na Figura 33 está o registro observado com o estereoscópio Nikon SMZ800 e fotografado com a câmera Nikon DXM 1200F.

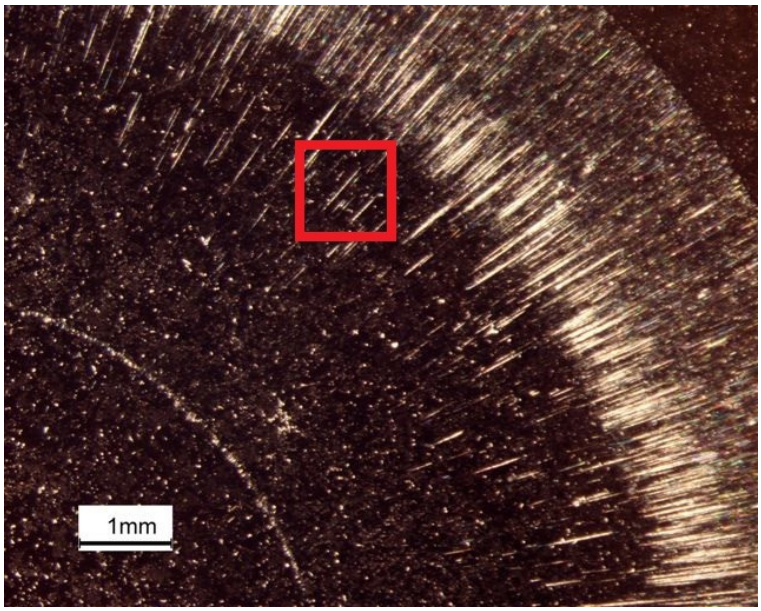


Figura 33. Estereoscópia ótica da marca de desgaste deixada pelo anel ao ser conformado sobre a superfície da ferramenta polida.

Em destaque na Figura 33 está a região que foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento XL-30 da marca Philips, com o objetivo de identificar o mecanismo de desgaste.

A Figura 34 apresenta o MEV da região em destaque na Figura 33.

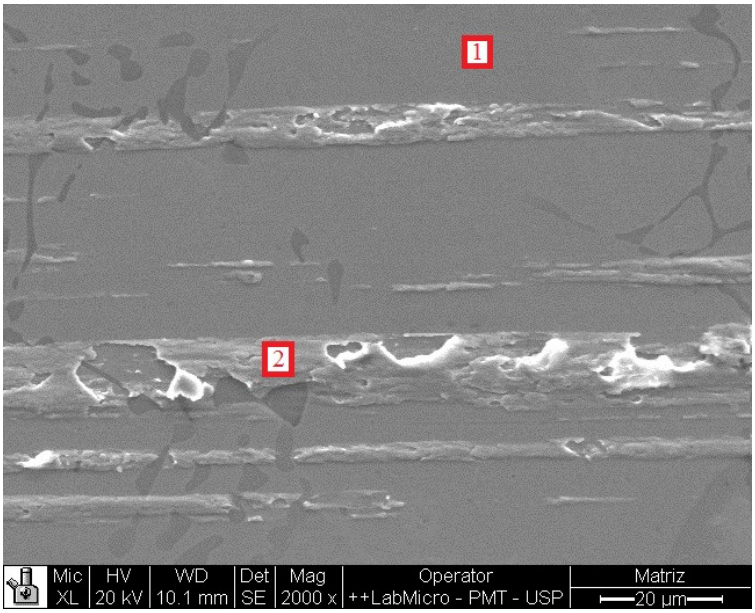


Figura 34. MEV da região com marcas de desgaste do primeiro ensaio na ferramenta polida.

Verifica-se na Figura 34 que nas regiões com a marca de desgaste existe uma região de material sobreposto à superfície da ferramenta que provavelmente é do material do corpo de prova. Há evidências de que o material transferido é interrompido sobre os carbonetos, ou seja, aparentemente o carboneto diminui a quantidade de material aderido. Para obter-se a confirmação da hipótese de adesão de material dos anéis à superfície da ferramenta, foi realizado uma Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) em duas regiões distintas da ferramenta identificada como: (Região 1) superfície da ferramenta sem adesão de material e (Região 2) superfície da ferramenta com adesão de material dos anéis. E assim obtiveram-se os seguintes resultados:

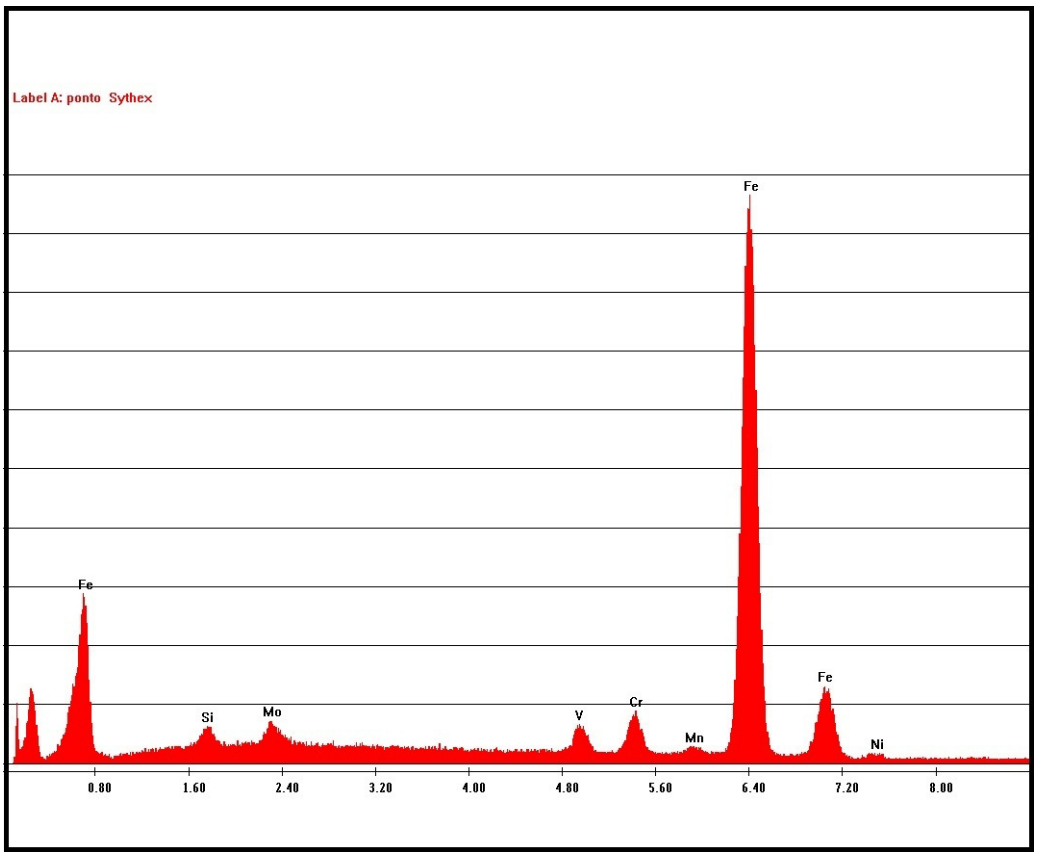


Figura 35. EDS da superfície da ferramenta sem a presença das marcas de desgaste (Região 1).

O EDS da Região 1 (Figura 35) apresenta dois picos de elemento Ferro que já era esperado, uma vez que a ferramenta é composta de aço ferramenta, e também apresenta picos de outros componentes como Molibdênio, Vanádio, Silício e Cromo que também são elementos presentes nesta liga e responsáveis pela formação dos carbonetos que aumentam a resistência ao desgaste. A Figura 34 sugere que o aumento de resistência ao desgaste dos aços talvez possa ser atribuído a diminuição da adesão do material do anel sobre a ferramenta. Este ponto, entretanto, não foi explorado neste trabalho.

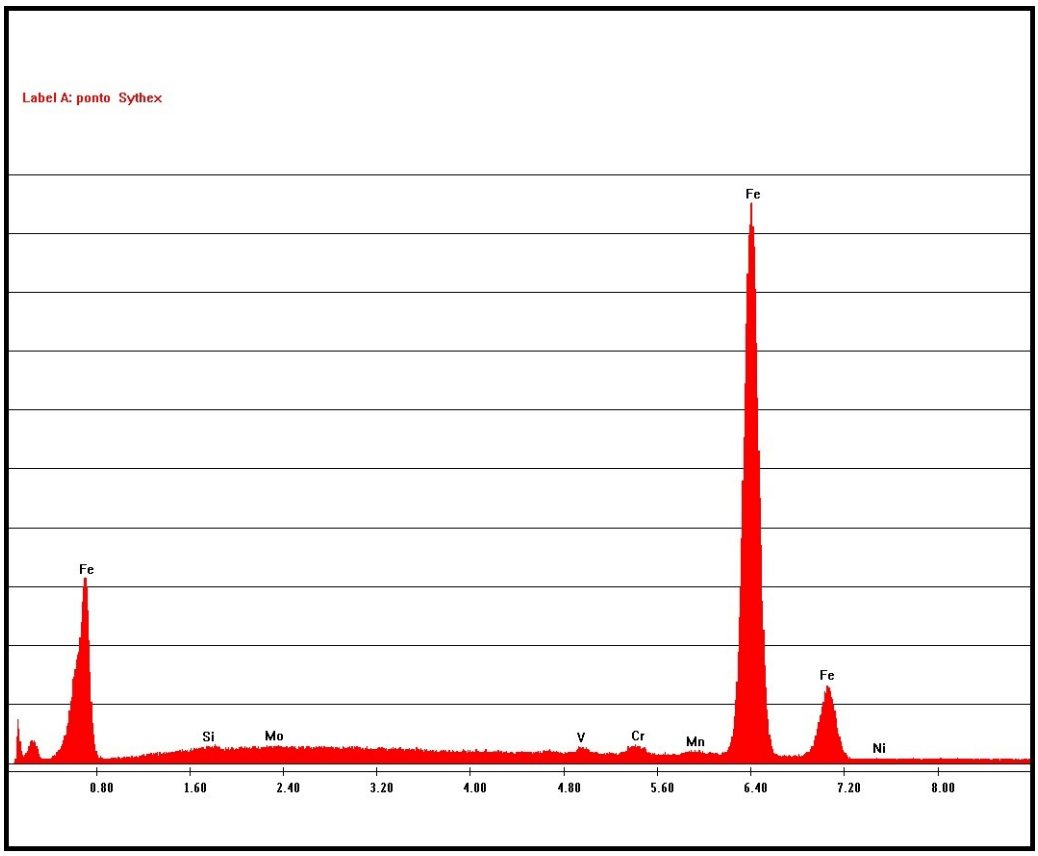


Figura 36. EDS da superfície da ferramenta com a presença das marcas de desgaste (Região 2).

O EDS da Região 2 (Figura 36) mostra também picos de elemento Ferro, mas não Molibdênio, Vanádio, Silício e Cromo, evidencia a adesão de material do corpo de prova que é composto somente por Ferro, ou seja, esta é uma região que existe sobreposição de material como está mostrado na Figura 34, porém são materiais diferentes.

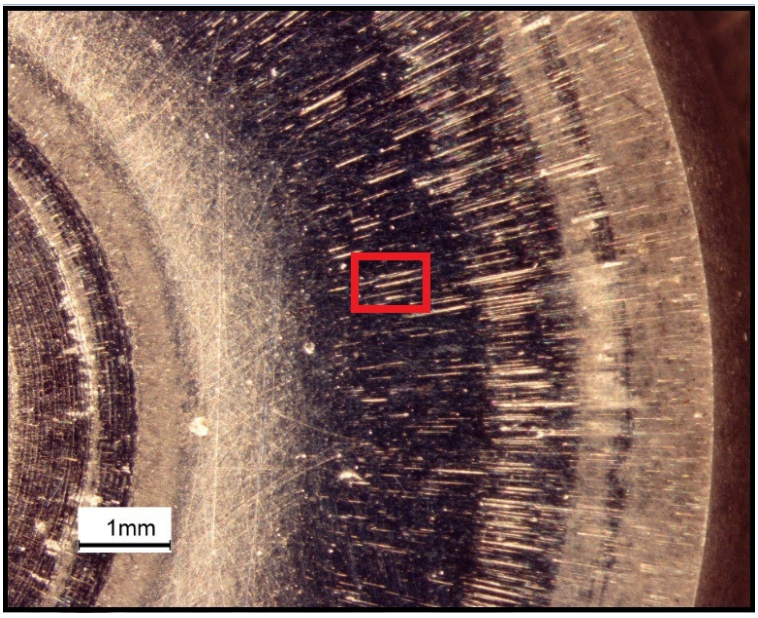


Figura 37. Estereoscópia ótica do anel ao ser conformado sobre a superfície da ferramenta polida.

A Figura 37 apresenta a estereoscopia ótica da superfície do anel após o primeiro ensaio. Em destaque nesta imagem está à região que foi analisada por microscopia eletrônica da varredura (MEV), com o objetivo de identificar a origem do material encontrado aderido na superfície da ferramenta.

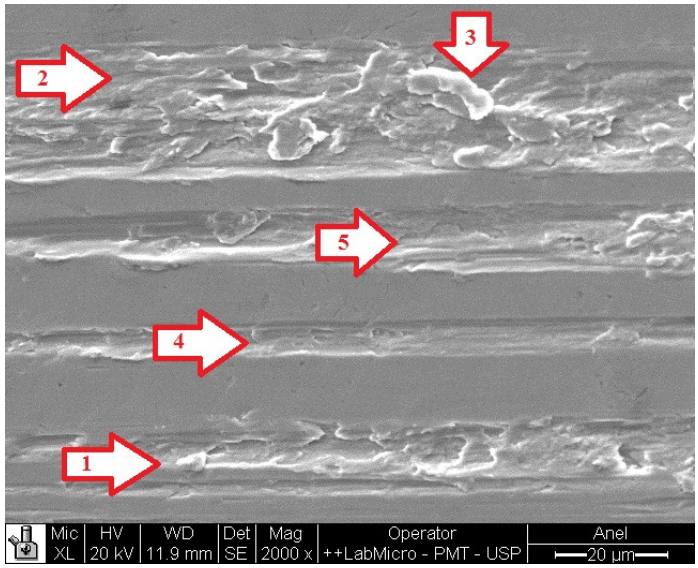


Figura 38. MEV da região com marcas de desgaste da superfície do anel.

Observa-se na Figura 38 que na superfície do anel as marcas de desgaste apresentam:

Flecha 1: Evidências de arrancamento de partículas do anel, provavelmente por adesão na ferramenta, deformação plástica devida ao escorregamento e ruptura com transferência do material para a ferramenta. A sucessão destes fenômenos resulta na formação deste sulco;

Flecha 2: As evidências de arrancamento (devido à adesão, deformação plástica e ruptura) são mais frequentes. Nesta marca de desgaste pode-se observar em destaque pela Flecha 3 um cenário com duas hipóteses: 1) o material do anel sofreu adesão na ferramenta, deformação plástica devida ao escorregamento, mas na ruptura a transferência de material foi parcial, parte do material sendo transferido e parte formou o empilhamento visto aqui; 2) aparentemente ocorreu a transferência do material que havia sido depositado na ferramenta, de volta para o anel. Estas hipóteses foram tecidas uma vez que foi realizada a prospecção por EDS das marcas de desgaste no anel e não foram encontrados traços de elementos de liga que fazem parte da composição da ferramenta.

As marcas indicadas pelas flechas 4 e 5 são mais similares a sulcos de abrasão, especialmente a indicada pela flecha 4. A ocorrência de abrasão pode ser explicada pela adesão de um debri na ferramenta, logo no inicio da deformação. Este debri teria agido como abrasivo ao longo da dimensão mostrada na Figura 38, não em forma de adesão, mas sim em forma de sulcamentos, sendo esta uma evidência da origem do material que está aderido à superfície da ferramenta. Pode-se verificar entre as flechas 4 e 5 uma região com aparência de platô “liso”, esta região é a região na qual não houve contato entre as superfície do anel com a superfície da ferramenta, não havendo assim a deformação desta região.

Foram realizadas análises por EDS em algumas partes do anel para localizar pontos os quais pudessem encontrar a transferência de material da ferramenta para o anel, mas não foi encontrado nenhum ponto que confirmasse esta hipótese. A Figura 39 é um EDS feito na parte interna do sulco encontrado no anel. Esta prospecção do material apresentou um resultado idêntico ao resultado alcançado na Figura 36, apresentando somente os picos de Ferro e não evidenciando a presença de nenhum outro elemento de liga, que estão bem evidentes no EDS da ferramenta,

reforçando que o material aderido à superfície da ferramenta é aço SAE 1020 do anel.

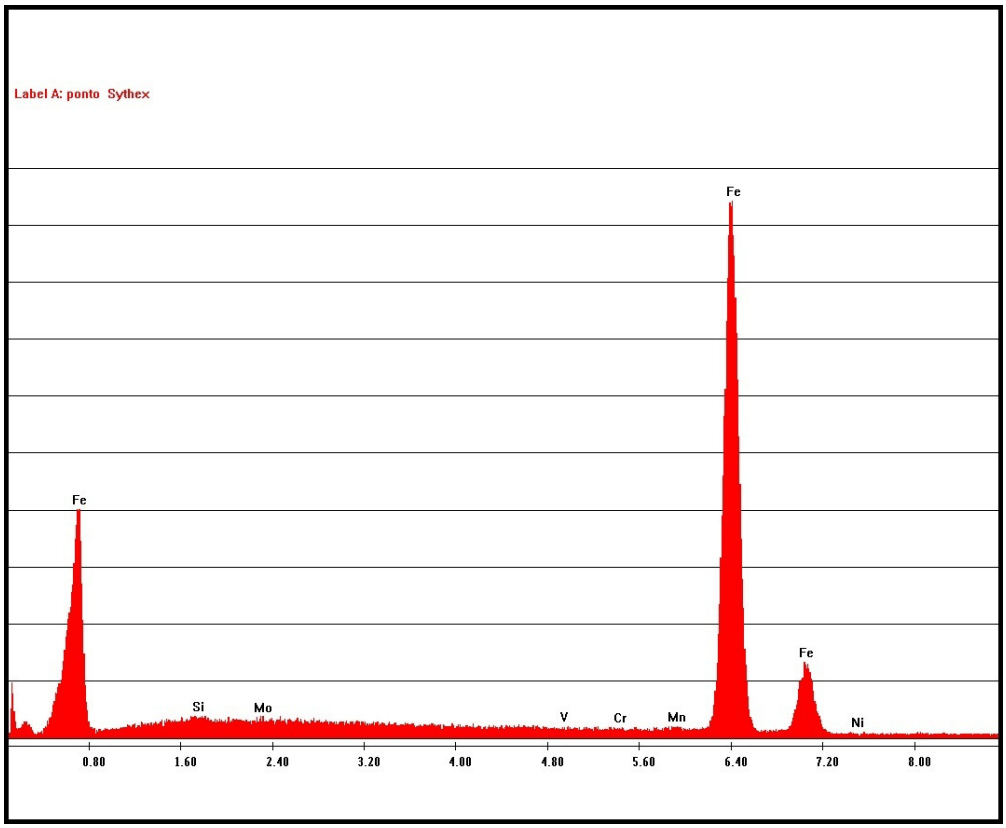


Figura 39. EDS da superfície do anel com a presença das marcas de desgaste.

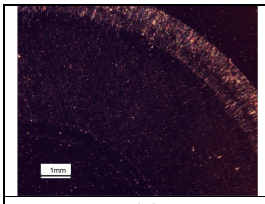
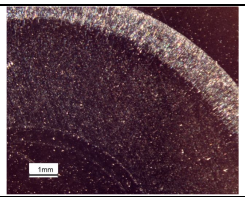
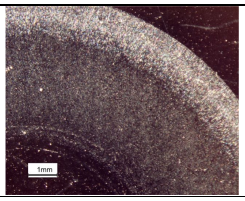
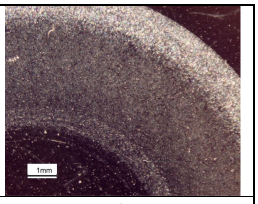
Estes ensaios diferenciam-se dos apresentados no subitem 5.1 por não haver nenhuma preparação da ferramenta entre um ensaio e outro. A identificação da ferramenta agora composta por 3 caracteres (P11) significa, por exemplo, que o par de ferramentas utilizado para os ensaios é o par P1 e o número adicional, neste caso 1, identifica a repetição correspondente a esta compressão de amostra. Por exemplo: P27 é o par de ferramentas número 2 e a sétima repetição. A identificação da décima repetição é feita por meio do número romano X, esta escolha tem por único objetivo manter a identificação das ferramentas em ensaios consecutivos com três caracteres.

O objetivo dos ensaios desenvolvidos neste item foi verificar o efeito das marcas de desgaste e do material transferido para a ferramenta no coeficiente de

atrito (μ). No primeiro ensaio as marcas de adesão são impressas na superfície da ferramenta, do primeiro para o segundo ensaio nota-se que a adesão de material aumenta, fato notado até o sexto ensaio a partir do qual μ "estabiliza".

Assim, para que se possam comparar os resultados obtidos de ensaios com polimento intermediário e ensaios realizados sem polimento intermediário, neste item foi feita uma média dos quatro últimos valores de μ (P17, P18, P19, P1X, por exemplo) que já se encontram dentro da região de ensaio estável e assim obteve-se o valor para μ médio em ensaios realizados sobre marcas de desgaste anterior. No trabalho de Male e Cockcroft (1964), os autores usaram procedimento idêntico, ou seja, considerou-se o valor do coeficiente de atrito somente após o sexto ensaio. Com isso será possível comparar os resultados deste trabalho com os da literatura.

Tabela 27. Evolução do desgaste em ensaios consecutivos. Fotos do ensaio com velocidade 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura da amostra.

			
P11	P12	P16	P1X

5.2.1 Deformação de 50% na altura com velocidade de 3 mm/s

As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para esta configuração de ensaio estão no Anexo H.

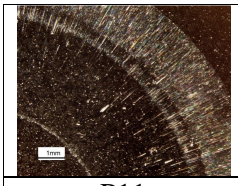
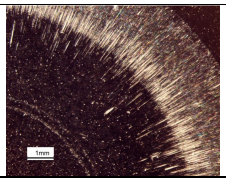
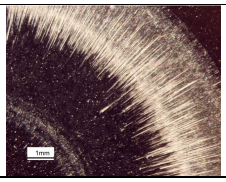
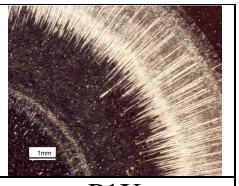
Observando a Tabela 28, verifica-se que a adesão de material na superfície da ferramenta altera o tribosistema, aumentando o coeficiente de atrito e também aumentando a força máxima de compressão.

Tabela 28. Resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P11	6,000	2,959	50	51	9,00	5,72	36	0,21	42,69
P12		2,972		50		5,41	40	0,27	43,99
P13		3,001		50		4,98	45	0,31	46,74
P14		3,017		50		4,80	47	0,35	46,33
P15		3,029		50		4,84	46	0,34	45,98
P16		3,022		50		4,75	47	0,35	45,46
P17		3,034		49		4,64	48	0,40	46,15
P18		3,033		49		4,65	48	0,40	46,35
P19		3,021		50		4,77	47	0,35	45,90
P1X		3,032		49		4,68	48	0,40	46,62

Na Tabela 29 estão apresentadas as fotos do primeiro, segundo, sexto e décimo ensaio, a tabela com o registro de todos os ensaios realizados sobre marcas de desgaste encontra-se no Anexo H.

Tabela 29. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura.

			
P11	P12	P16	P1X

Na Tabela 30 está apresentada a média dos quatro últimos ensaios com ferramenta “estabilizada”.

Tabela 30. Média dos resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
3,00 mm/s	50	48	0,39	0,022	5,59	46,26	0,264	0,57

5.2.2 Deformação de 50% na altura com velocidade de 0,3 mm/s

As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para esta configuração de ensaio estão no Anexo I.

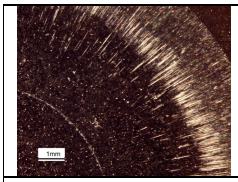
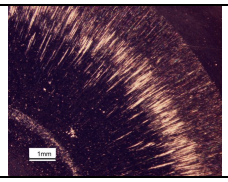
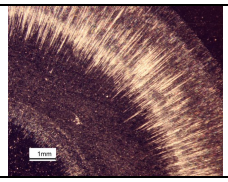
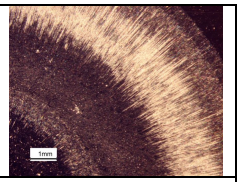
É interessante notar na Tabela 31 que ocorrem duas quedas no valor de μ, uma ocorre na primeira linha (P21) que é o primeiro ensaio sobre marcas de desgaste (ferramenta polida) e a outra ocorre na nona linha (P29), estas quedas possivelmente sejam atribuídas a fenômenos que não foram cobertos por este estudo, no entanto, os valores de coeficiente de atrito obedecem à tendência de aumento com a evolução da aderência de material na superfície da ferramenta como nos demais ensaios.

Tabela 31. Resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P21	6,000	2,881	50	52	9,00	6,01	33	0,18	44,75
P22		2,885		52		6,46	28	0,15	43,47
P23		2,954		51		5,28	41	0,27	45,88
P24		2,990		50		4,80	47	0,35	47,22
P25		3,007		50		4,52	50	0,39	48,19
P26		3,006		50		4,39	51	0,40	48,54
P27		2,993		50		4,53	50	0,39	48,10
P28		2,995		50		4,61	49	0,38	47,68
P29		2,975		50		4,92	45	0,31	47,34
P2X		3,005		50		4,42	51	0,40	49,00

Na Tabela 32 estão apresentadas as fotos do primeiro, segundo, sexto e décimo ensaio, a tabela com o registro de todos os ensaios realizados sobre marcas de desgaste encontra se no Anexo I.

Tabela 32. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura.

			
P21	P22	P26	P2X

A Tabela 33 apresenta a média dos quatro últimos resultados para ensaios realizados sobre marcas de desgaste, nota-se que, mesmo com esta queda abrupta do valor de μ ocorrida na nona linha, o coeficiente de variância para μ é inferior a 10% sendo este um resultado aceitável para trabalhos experimentais.

Tabela 33. Média dos resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
0,30 mm/s	50	49	0,37	0,035	9,56	48,03	0,621	1,29

5.2.3 Deformação de 50% na altura com velocidade de 0,03 mm/s

As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para esta configuração e o registro fotográfico de todos os ensaios realizados sobre marcas de desgaste de ensaio estão no Anexo J.

Observa-se na Tabela 34 uma pequena queda no valor de μ da primeira para a segunda repetição, mas o ensaio obedece à tendência de aumento do valor de μ com as repetições.

Tabela 34. Resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P31	6,000	2,924	50	51	9,00	5,43	40	0,25	-
P32		2,918		51		5,60	38	0,23	45,50
P33		2,974		50		4,54	50	0,39	47,54
P34		2,989		50		4,42	51	0,40	49,09
P35		2,998		50		4,51	50	0,39	48,75
P36		3,012		50		4,44	51	0,40	49,61
P37		3,025		50		4,44	51	0,40	49,89
P38		3,017		50		4,37	51	0,40	50,37
P39		3,016		50		4,40	51	0,40	50,27
P3X		3,007		50		4,45	51	0,40	49,79

Na Tabela 35 estão apresentadas as fotos do primeiro, segundo, sexto e décimo ensaios, observa-se que, mesmo com a evolução do desgaste comprovado na comparação entre P36 e P3X, o valor de μ permanece constante.

Tabela 35. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura.

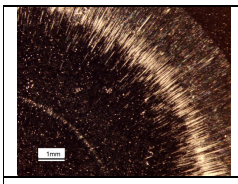
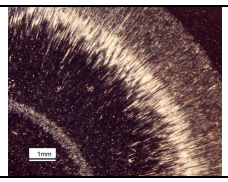
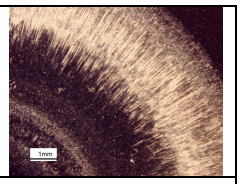
			
P31	P32	P36	P3X

Tabela 36. Média dos resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
0,03 mm/s	50	51	0,40	0,000	0,00	50,08	0,245	0,49

A Tabela 28, Tabela 31 e Tabela 34 apresentam um fato em comum, na coluna da força máxima de compressão (Fmáx) os resultados apresentam valores crescentes entre as primeiras repetições.

O valor médio dos quatro últimos ensaios foi sempre maior que o valor médio dos seis primeiros.

Este é um possível indício de que existe a influência de uma espécie de tribofilme, que se forma a partir da compressão sucessiva dos corpos de prova e adesão do material do anel à ferramenta e tornando-se estável após algumas repetições parece adquirir características estáveis e que controla os esforços de deformação.

5.2.4 Deformação de 20% na altura com velocidade de 3 mm/s

As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para esta configuração e o registro fotográfico de todos os ensaios realizados sobre marcas de desgaste de ensaio estão no Anexo K.

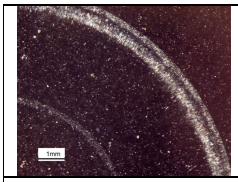
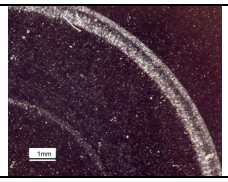
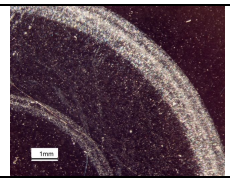
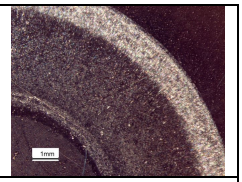
Observa-se na Tabela 37 que para a configuração com velocidade de 3 mm/s e grau de deformação na altura de 20% a repetição de ensaios sobre marcas de desgaste anteriores não apresenta uma mudança do tribosistema que seja suficiente para que haja uma alteração do valor de μ. Outro fato interessante a ser notado é que na sétima linha (P27) ocorre uma queda do valor de μ, o que aumenta o desvio padrão do valor de μ. No entanto, esta queda está dentro da variação de dois desvios padrões em relação ao valor médio.

Tabela 37. Resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P21	6,000	4,864	20	19	9,00	8,22	9	0,24	21,27
P22		4,843		19		8,10	10	0,28	21,59
P23		4,865		19		8,11	10	0,28	20,93
P24		4,856		19		8,15	9	0,24	20,71
P25		4,840		19		8,08	10	0,28	21,92
P26		4,865		19		8,08	10	0,28	20,88
P27		4,812		20		8,29	8	0,19	21,84
P28		4,781		20		8,20	9	0,22	21,27
P29		4,865		19		8,15	9	0,24	20,91
P2X		4,844		19		8,18	9	0,24	20,76

Observando-se a Tabela 38 nota-se que existem marcas de desgaste provocadas pela adesão de material do anel na ferramenta, e que este desgaste evolui com os ensaios consecutivos, no entanto, como já citado, estas marcas não são suficientes para alterar o valor de μ.

Tabela 38. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura.

			
P21	P22	P26	P2X

Na Tabela 39 está a média dos quatro últimos valores de μ para ensaios com velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação.

Tabela 39. Média dos resultados para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
3,00 mm/s	20	9	0,22	0,020	9,20	21,20	0,416	1,96

5.2.5 Deformação de 20% na altura com velocidade de 0,3 mm/s

As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para esta configuração e o registro fotográfico de todos os ensaios realizados sobre marcas de desgaste de ensaio estão no Anexo L.

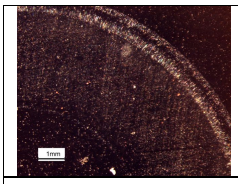
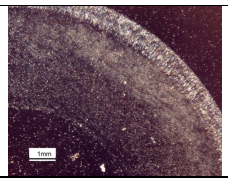
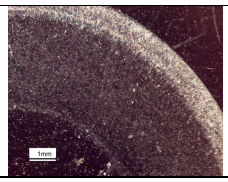
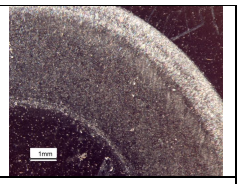
Tabela 40. Resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P31	6,000	4,848	20	19	9,00	8,24	8	0,19	21,65
P32		4,831		19		8,17	9	0,24	21,99
P33		4,842		19		8,07	10	0,28	22,07
P34		4,839		19		8,05	11	0,30	21,57
P35		4,836		19		8,03	11	0,30	21,47
P36		4,838		19		8,09	10	0,28	21,80
P37		4,839		19		8,07	10	0,28	21,93
P38		4,829		20		8,09	10	0,25	21,90
P39		4,827		20		8,19	9	0,22	21,13
P3X		4,829		20		8,03	11	0,27	21,16

Pode-se constatar que o primeiro coeficiente de atrito é o menor e que os valores seguintes estão muito próximos do valor médio de 0,26. Ou seja, exceto pelo primeiro valor o coeficiente de atrito não muda significativamente com a evolução do desgaste nas ferramentas para 20% de deformação na altura da amostra.

Na Tabela 41 verifica se que as marcas de desgaste intensificam-se com o aumento do número de repetições apresentando na décima repetição (P3X) uma marca de adesão bem definida.

Tabela 41. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura.

			
P31	P32	P36	P3X

Na Tabela 42 está a média dos quatro últimos valores de μ para ensaios com velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação.

Tabela 42. Média dos resultados para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
0,30 mm/s	19	10	0,26	0,023	8,99	21,53	0,385	1,79

5.2.6 Deformação de 20% na altura com velocidade de 0,03 mm/s

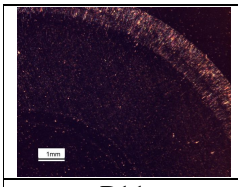
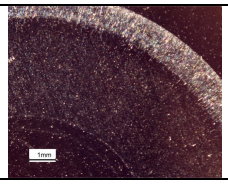
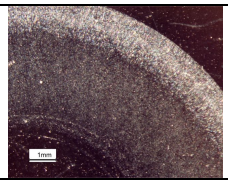
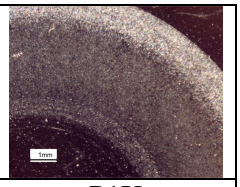
As tabelas similares a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para esta configuração e o registro fotográfico de todos os ensaios realizados sobre marcas de desgaste de ensaio estão no Anexo M.

Na Tabela 43, novamente, não se verifica alteração no valor de μ em consequência das compressões consecutivas apesar de como observado na Tabela 44, as marcas de desgaste provocadas pela adesão de material do anel na ferramenta sejam intensificadas com a sobreposição de ensaios.

Tabela 43. Resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	Hi (mm)	Hf (mm)	def. teórica %	Δh %	di (mm)	df (mm)	ΔD %	μ	Fmáx (10^4N)
P11	6,000	4,855	20	19	9,00	8,10	10	0,28	22,25
P12		4,828		20		8,08	10	0,25	21,35
P13		4,818		20		8,06	10	0,25	21,38
P14		4,815		20		8,10	10	0,25	21,97
P15		4,818		20		8,01	11	0,29	21,91
P16		4,814		20		8,01	11	0,29	21,28
P17		4,816		20		8,02	11	0,29	21,56
P18		4,822		20		7,92	12	0,30	21,95
P19		4,811		20		7,91	12	0,30	21,85
P1X		4,806		20		7,94	12	0,30	21,89

Tabela 44. Evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura.

			
P11	P12	P16	P1X

A Tabela 45 mostra os dados médios dos quatro últimos ensaios.

Tabela 45. Média dos resultados para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Vel.	red. (%)	def. (%)	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
0,03 mm/s	20	12	0,30	0,004	1,46	21,81	0,150	0,69

Os resultados das Tabela 37, Tabela 40 e Tabela 43, não apresentam indícios de mudanças da intensidade da força máxima de compressão (Fmáx), como os ensaios das Tabela 28, Tabela 31 e Tabela 34, logo, não há indícios que para esta deformação na altura da amostra haja formação de um, tribofilme capaz de influenciar no valor do coeficiente de atrito (μ).

6 Análises estatísticas e discussões

6.1 Ensaios sem marcas de desgaste anterior

6.1.1 Efeito da velocidade e do grau de deformação no coeficiente de atrito

Na Tabela 46 estão os coeficientes de atrito para todos os ensaios realizados com polimento da ferramenta entre ensaios. Na Figura 40 está apresentado o gráfico obtido dos dados da Tabela 46.

Tabela 46. Coeficientes de atrito médios determinados para os ensaios com polimento intermediário.

Vel. (mm/s)	Δh %	ΔD %	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Fmáx (10^4N)	σFmáx	Coef. Var Fmáx (%)
3,00	51	40	0,26	0,019	7,45	43,89	0,550	1,25
0,30	51	42	0,27	0,032	11,91	46,08	0,782	1,70
0,03	51	45	0,31	0,044	14,12	47,22	1,387	2,94
3,00	19	10	0,25	0,034	13,71	20,84	0,304	1,46
0,30	20	10	0,26	0,031	12,02	21,33	0,244	1,15
0,03	20	11	0,28	0,026	9,34	21,47	0,518	2,41

Nota-se pela Tabela 46 que o controle da variação da força e do retorno elástico da máquina permitiu que as medidas de coeficiente de atrito tivessem coeficiente de variação entre 7,45% e 14,12%, esta dispersão dos resultados é devida ao grande número de fenômenos que envolvem o atrito na interface material-ferramenta. O atrito na interface peça-ferramenta impõe restrições à deformação do material e em resposta o material deforma de modo a minimizar o gasto de energia, isso leva a deformações localizadas no material e em alguns casos a deformações não homogêneas (SCHEY, 1984), no entanto é importante notar que a redução na altura da amostra, não superou a variação média de 1% sendo que esta é a variável controlada nos ensaios e, tendo como resposta direta a força máxima de compressão, com coeficiente de variação máximo inferior a 3%, assegurando o cuidado experimental dos ensaios.

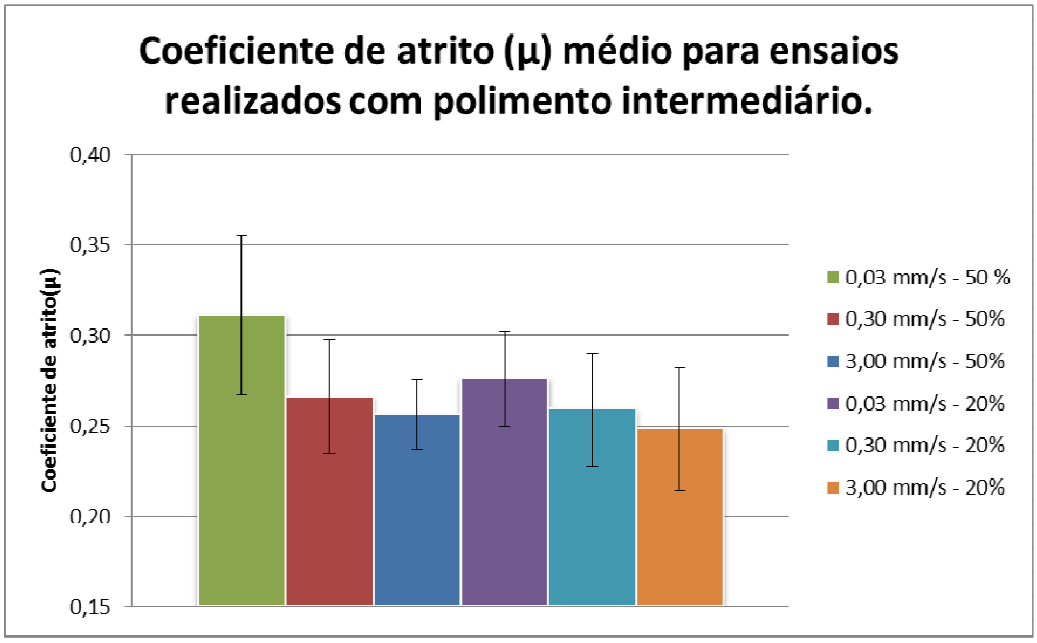


Figura 40. Gráfico dos resultados médios de coeficientes de atrito.

Analisando os resultados apresentados conclui-se que o valor dos coeficientes de atrito é igual para todas as configurações de ensaios propostas neste trabalho.

Assim, procedeu-se a análise global dos efeitos do grau de deformação e da taxa de deformação, empregando-se a análise de variância mostrada na Tabela 47, supondo como hipótese nula que nem o grau, nem a taxa de deformação afetam o coeficiente de atrito.

Para se proceder à análise estatística, os dados foram tratados em duas etapas utilizando o programa MiniTab.v.15®. Primeiramente verificou-se a adesão dos dados à distribuição normal e em seguida procedeu-se a análise de variância. A saída do software está na Figura 41.

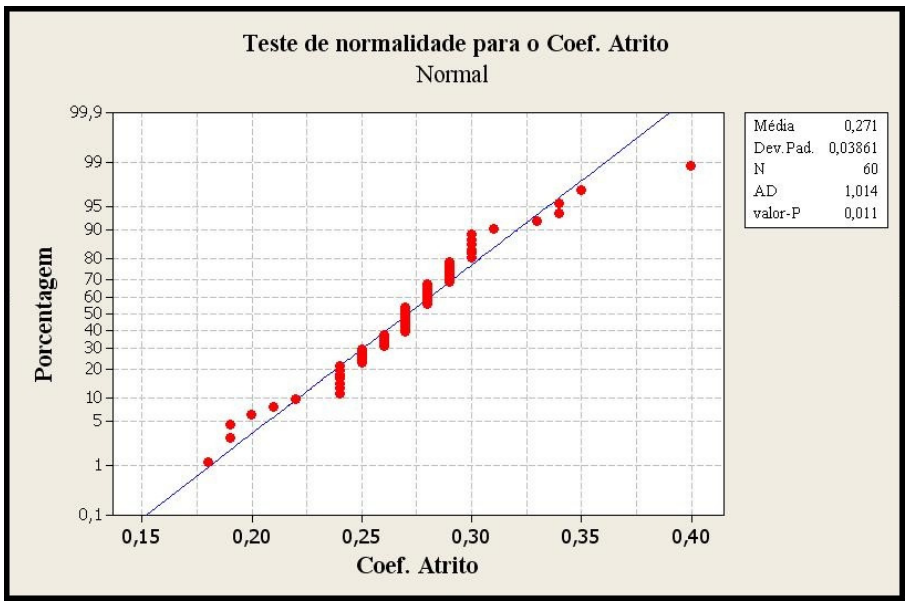


Figura 41. Teste de normalidade para ensaios sem marcas de desgaste anterior.

Observando a Figura 41 é possível notar que os pontos estão dispostos próximos à curva normal, com exceção do último ponto no canto superior direito. O fato dos pontos estarem próximos à reta normal e o valor de P, que está presente na legenda ser inferior a 0,05, indica que a distribuição adere a uma distribuição normal. Logo, pode-se declarar com 95% de certeza que a distribuição dos dados é normal e a análise ANOVA é válida. A Tabela 47 apresenta os dados da análise ANOVA de dois fatores aplicada a este trabalho.

Tabela 47. Tabela ANOVA (2 fatores) aplicada aos dados de coeficiente de atrito.

Variável	G.L.	SQ	QM	F	Valor de P
Velocidade	2	0,018623	0,009312	8,26	0,001
Deformação	1	0,004167	0,004167	3,70	0,060*
Interação	2	0,002523	0,001262	1,12	0,334*
Resíduo	54	0,060860	0,001127		
Total	59				

*p<0,05

A Tabela 47 estuda os efeitos das variáveis: velocidade, deformação, interação da velocidade e da deformação. Apresentando para este estudo: G.L. que é o número de graus de liberdade para cada variável, SQ que é a soma quadrática, QM que são os quadrados médios, F que é a razão F de cada variável e apresentando o valor de P

que será utilizado na análise. O valor de P crítico é 0,05, caso o valor de P<0,05 rejeita-se H_0, pode-se então afirmar com 95% de certeza que a hipótese nula está errada, ou seja, existem argumentos estatísticos suficientes para concluir que existe pelo menos uma média diferente, ou no caso da Interação entre fatores, conclui-se que há interação significativa. Caso valor de P≥0,05 aceita-se H_0, ou seja, existem argumentos suficientes para concluir que as médias são iguais, ou no caso da Interação entre fatores, conclui-se que não há interação significativa.

O valor de P da velocidade da Tabela 47 é 0,001, logo, neste caso, rejeita-se H_0 e conclui-se que a velocidade influencia o valor de μ. Já o valor de P para o grau de deformação é 0,060 e assim, aceita-se H_0, o grau de deformação não influencia no valor de μ. A interação entre as variáveis: velocidade e grau de deformação da amostra, como observado na mesma tabela tem valor de P=0,334 não sendo significativa considerando α=0,05.

Observando a Figura 42, pode-se concluir, tanto para os valores de velocidade quanto para os valores de grau de deformação estudados, não há o cruzamento de linhas em nenhum dos gráficos. Logo, não há interação entre velocidade e deformação.

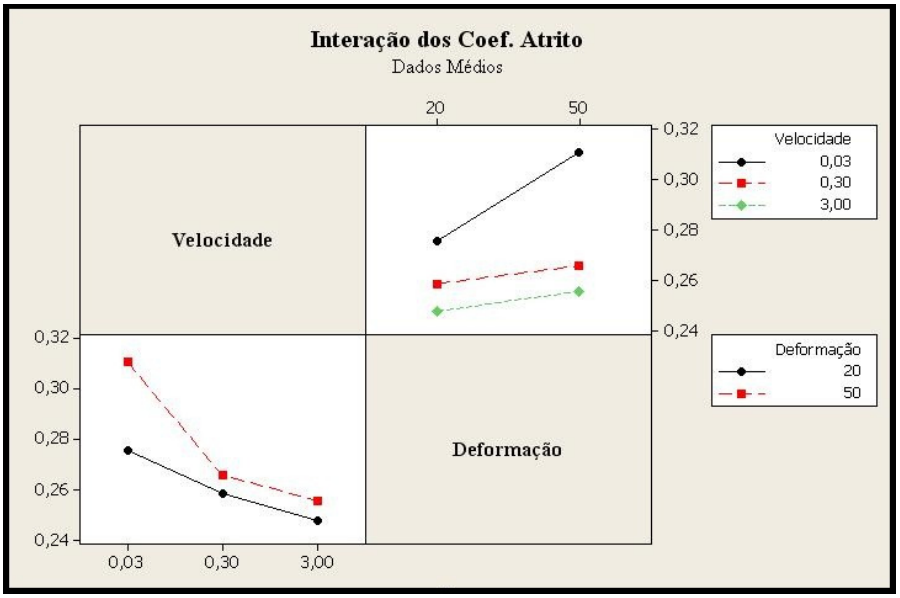


Figura 42. Interação dos dados médios de coeficiente de atrito, na análise ANOVA.

Nota-se que o coeficiente de atrito tem um aumento significativo para a velocidade de deformação 0,03 mm/s quando o grau de deformação aumenta de 20% para 50%. A Figura 43 apresenta os principais efeitos das variáveis nos valores médios de μ.

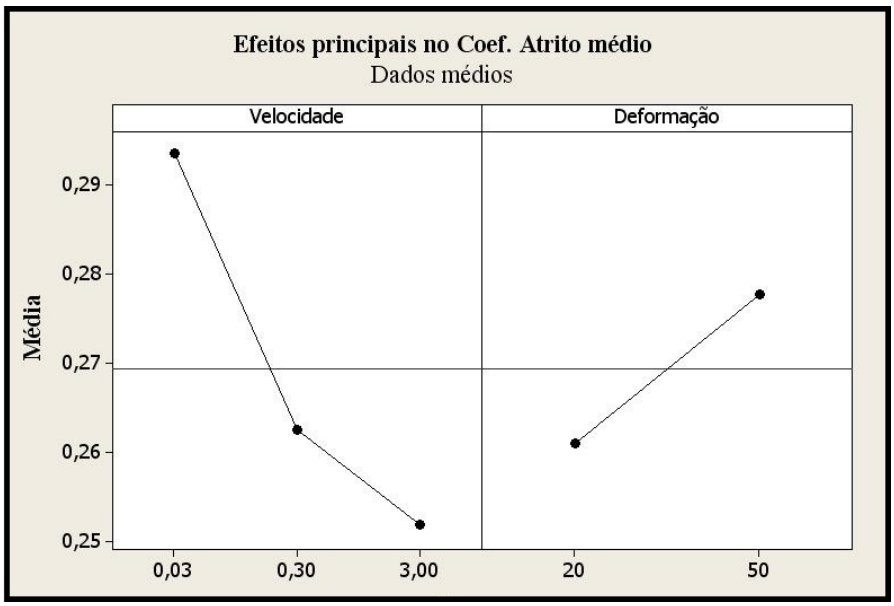


Figura 43. Efeitos principais nos valores médios do coeficiente de atrito.

Aparentemente, a variação do coeficiente de atrito com a velocidade de deformação é maior que sua variação com o grau de deformação. Entretanto, é muito importante lembrar que a variação do grau de deformação foi de uma vez e meia (150%) e a variação da velocidade de deformação foi de 100 vezes ou duas ordens de grandeza (9900%). Caso os aumentos fossem proporcionais o grau de deformação da amostra seria a variável mais importante.

A análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios, nos quais se empregaram ferramentas com as mesmas condições superficiais iniciais, ou seja, sem considerar os efeitos de conformações plásticas anteriores, apoiam a literatura de Male e Cockcroft (1964), Martins et al. (2011), Shen et al. (1992), Rao e Sivaram (1993), Rudkins et al. (1996) e Böesch et al. (2011) ao afirmarem que o grau de deformação da amostra não altera significativamente o valor do coeficiente de atrito.

No entanto, contraria a mesma literatura ao afirmar com base estatística que a velocidade de deformação das amostras altera significativamente o valor de μ. Para ambos os graus de deformação há uma tendência de diminuição do valor de μ com o aumento da velocidade de deformação. Os resultados trazem uma contribuição adicional ao mostrar que não há efeito de interação entre deformação e velocidade no âmbito das condições experimentais empregadas.

Por outro lado, embora os efeitos sobre o coeficiente de atrito sejam estatisticamente significativos, a variação do coeficiente de atrito médio nos ensaios sem marcas de desgaste de ensaios anteriores foi de no máximo 0,05 para ensaios com deformação de 50% e de no máximo 0,03 para ensaios com deformação de 20%. A variação do coeficiente de atrito médio para uma mesma velocidade considerando-se ambos os graus de deformação foi, por sua vez, de no máximo 0,03 analisando-se todo o conjunto de dados. Estas variações podem ser pouco importantes em aplicações práticas especialmente por que as ferramentas são utilizadas para conformar várias peças, condição distante das empregadas nestes ensaios.

Os trabalhos de Petersen et al.(1998) e Martins et al. (2011) conduziram a resultados semelhantes aos deste trabalho. Ou seja, a deformação não afeta o coeficiente de atrito quer as ferramentas sejam retrabalhadas - Petersen et al.(1998), Martins et al. (2011) e este trabalho - quer não sejam - Male e Cockcroft (1964), Rudkins et al. (1996) e Böesch et al. (2011). Por outro lado o trabalho de Leite (2010) mostrou que para ferramentas polidas de aço H13 e anéis de SAE 1020, havia diferença significativa do coeficiente de atrito em função do grau de deformação. A diferença absoluta foi semelhante à encontrada neste trabalho (μ=0,22 para ΔH=20% – μ=0,35 para ΔH=50%) e a significância estatística da diferença decorreu da pequena dispersão dos resultados obtidos.

O único trabalho a estudar o efeito da velocidade de deformação no coeficiente de atrito com retrabalho das ferramentas se deve a Leite (2010).

Em seu trabalho Leite (2010) encontra indícios que a velocidade de deformação influencia no valor de μ, no presente estudo encontrou-se argumentos estatísticos para concluir que a velocidade de deformação influencia o valor do μ.

No entanto, esta influência somente acontece quando a configuração 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura da amostra fazem parte da amostra analisada. Caso esta configuração de ensaio seja retirada, os valores médios de μ tornam-se estatisticamente iguais. Para ensaios quase estáticos (0,03 mm/s) o comportamento em baixa deformação na altura (20%) é similar ao comportamento das demais configurações, já para uma deformação grande em altura (50%) o mecanismo de desgaste sofre uma alteração que resulta no aumento do valor do coeficiente de atrito o estudo detalhado desta transição não faz parte do escopo deste projeto.

6.2 Ensaios sem polimento intermediário

6.2.1 Efeito da velocidade e do grau de deformação no coeficiente de atrito

A Tabela 48 apresenta os coeficientes de atrito determinados para cada ensaio da sequência, realizados sobre a marca do ensaio anterior.

Tabela 48. Dados dos ensaios de deformação realizados sem polimento intermediário.

Nº do ensaio	**Valor do μ obtido nos ensaios sequenciais.**					
	20%			**50%**		
	0,03 mm/s	**0,30 mm/s**	**3,00 mm/s**	**0,03 mm/s**	**0,30 mm/s**	**3,00 mm/s**
1	0,28	0,19	0,24	0,25	0,18	0,21
2	0,25	0,24	0,28	0,23	0,15	0,27
3	0,25	0,28	0,28	0,39	0,27	0,31
4	0,25	0,30	0,24	0,40	0,35	0,35
5	0,29	0,30	0,28	0,39	0,39	0,34
6	0,29	0,28	0,28	0,40	0,40	0,35
7	0,29	0,28	0,19	0,40	0,39	0,40
8	0,30	0,25	0,22	0,40	0,38	0,40
9	0,30	0,22	0,24	0,40	0,31	0,35
10	0,30	0,27	0,24	0,40	0,40	0,40
Valor médio dos últimos 4 ensaios	0,30	0,26	0,22	0,40	0,37	0,39
Desv. Padrão	0,004	0,023	0,020	0,000	0,035	0,022
Coef. de variância	1,46	8,99	9,22	0,00	9,56	5,59

O valor médio do coeficiente de atrito da Tabela 48 é determinado por meio da média dos quatro últimos valores da sequência, segundo o artigo clássico (MALE E COCKCROFT, 1964) a partir do 7º ensaio o valor de μ "estabiliza", ou seja, a adesão de material na superfície da ferramenta para de influenciar significativamente o valor do coeficiente de atrito.

A Figura 44 apresenta o gráfico dos resultados médios obtidos para ensaios realizados sobre marcas de desgaste de ensaios anteriores.

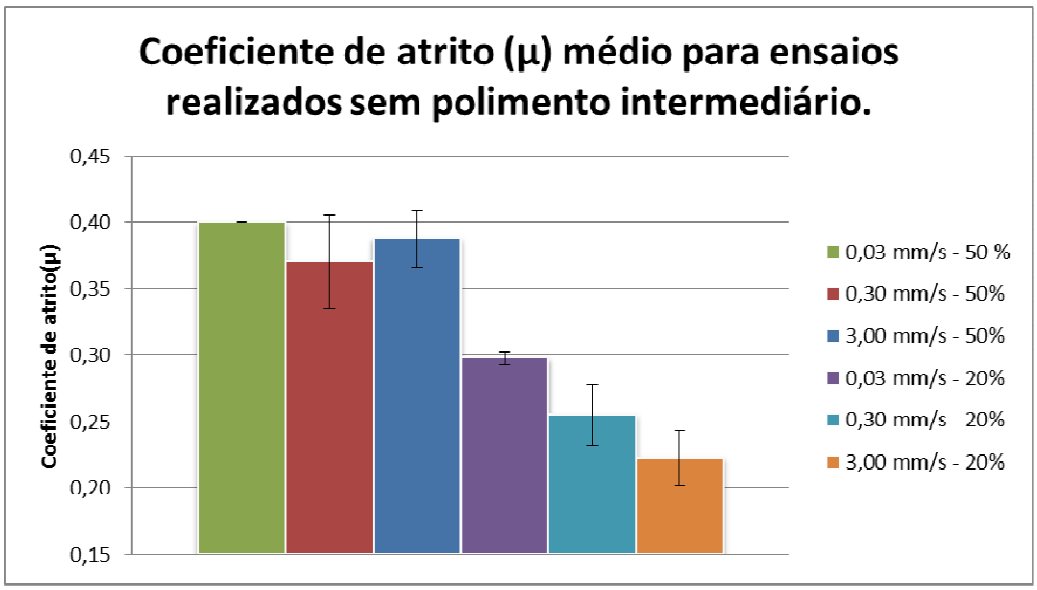


Figura 44. Representação gráfica dos resultados médios de μ para ensaios realizados sem polimento intermediário.

Verifica-se na Tabela 48 que os ensaios realizados sem polimento intermediário para 50% de deformação na altura, são independentes da velocidade, sendo coerente com a teoria clássica (MALE e COCKCROFT, 1964). Os trabalhos disponíveis na literatura que estudam diferentes velocidades como, por exemplo: Venugopal et al. (1990), Goetz (1991), Hwu et al. (1993) e Wang et al. (2012), utilizam em seus trabalhos a taxa de deformação, que é a divisão de velocidade pelo grau de deformação. Logo, não é possível separar o efeito destas duas variáveis. O material aderido à superfície da ferramenta, como pode ser observado nas fotografias apresentadas no item 5.2, mostra uma tendência a elevar valor do coeficiente de atrito

Nos ensaios com 20% de deformação o coeficiente de atrito não variou significativamente ao longo da sequência de ensaios para cada uma das velocidades. Ou seja, a adesão não causou variação no coeficiente de atrito tão intensa como nos ensaios com 50% de deformação. Nos ensaios com 20% de deformação a elevação da velocidade de deformação resultou na diminuição significativa do coeficiente de atrito.

Tabela 49. Valores médios de μ para ensaios com e sem polimento intermediário.

Configuração	Velocidade	Deformação	μ	σμ	Coef. Var. μ (%)	Identificação
Com polimento intermediário	3,00 mm/s	50%	0,26	0,019	7,45	C_3,00_50
	0,30 mm/s		0,27	0,032	11,91	C_0,30_50
	0,03 mm/s		0,31	0,044	14,12	C_0,03_50
	3,00 mm/s	20%	0,25	0,034	13,71	C_3,00_20
	0,30 mm/s		0,26	0,031	12,02	C_0,30_20
	0,03 mm/s		0,28	0,026	9,34	C_0,03_20
Sem polimento intermediário	3,00 mm/s	50%	0,39	0,022	5,59	S_3,00_50
	0,30 mm/s		0,37	0,035	9,56	S_0,30_50
	0,03 mm/s		0,40	0,000	0,00	S_0,03_50
	3,00 mm/s	20%	0,22	0,020	9,20	S_3,00_20
	0,30 mm/s		0,26	0,023	8,99	S_0,30_20
	0,03 mm/s		0,30	0,004	1,46	S_0,03_20

Na Figura 45 estão dispostos graficamente os dados médios de coeficiente de atrito para ensaios com 50% de deformação na altura da amostra, utilizando a cor verde estão apresentados os resultados determinados por Leite (2010) com ferramentas polidas de aço H13 e anéis de SAE 1020.

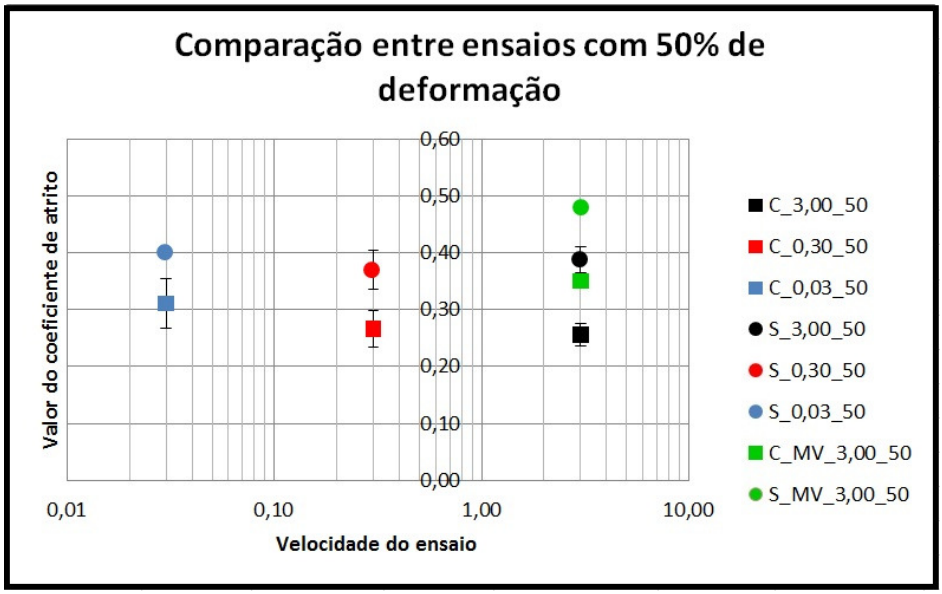


Figura 45. Valores médios de μ para ensaios realizados com 50% de deformação nas três velocidades e nas duas condições superficiais propostas juntamente com os resultados de Leite (2010).

Nota-se que para uma mesma velocidade de deformação os ensaios com polimento intermediário da ferramenta sempre apresentaram valores significativamente menores do que os obtidos nos ensaios sem polimento intermediário das ferramentas, resultados estes que também foram alcançados por Leite (2010). Nota-se também que a diferença entre os ensaios com e sem polimento intermediário, para ensaios com 3,00 mm/s e 50% de deformação, é de aproximadamente 15 unidades no coeficiente de atrito, tanto para o par ferramenta-corpo de prova deste trabalho, quanto para par utilizado por Leite (2010). A hipótese deste trabalho para explicar estas diferenças é que a adesão de material na superfície da ferramenta causa uma mudança significativa no valor de μ. Os resultados sugerem também que a adesão nas ferramentas suprimiu o efeito da velocidade de deformação constatado nos ensaios com polimento intermediário das ferramentas.

Na Figura 46 estão os dados médios de coeficiente de atrito para ensaios com 20% de deformação na altura da amostra.

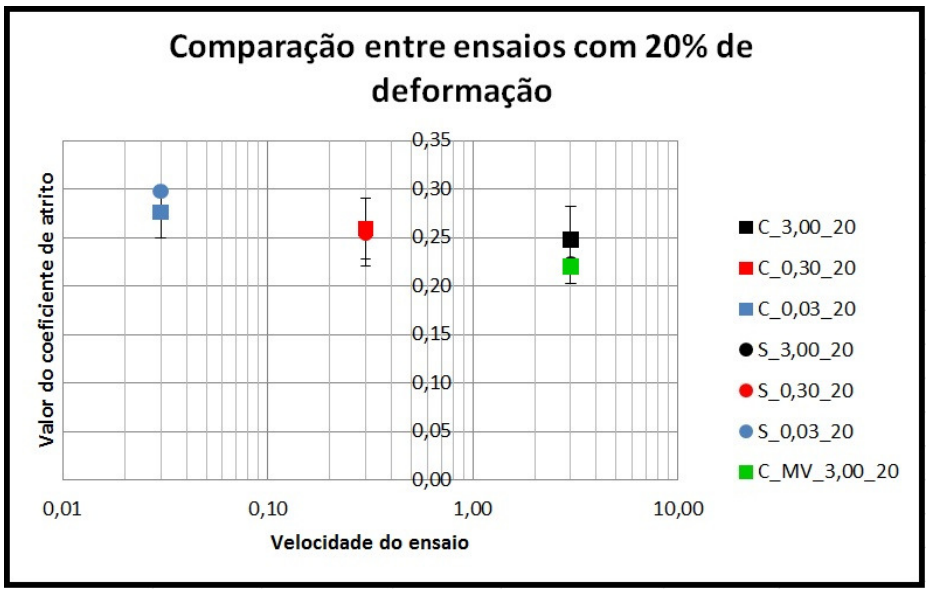


Figura 46. Valores médios de μ para ensaios realizados com 20% de deformação nas três velocidades e nas duas condições superficiais propostas juntamente com os resultados de Leite (2010).

Nota-se que para ΔH=20%, utilizando a mesma velocidade de deformação os ensaios com polimento intermediário da ferramenta não apresentaram valores significativamente diferentes do que os obtidos nos ensaios sem polimento intermediário das ferramentas. A hipótese deste trabalho é de que o efeito da adesão não foi suficiente para separar os resultados, nos dois casos houve diminuição do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de deformação. O resultado alcançado por Leite (2010) utilizando ferramentas de material diferente, identificado na cor verde, também não apresenta valor significativamente diferente dos alcançados neste trabalho para velocidade de 3,00 mm/s, a hipótese deste trabalho é que para este grau de deformação os materiais da ferramenta também não foi suficiente para alterar o valor do coeficiente de atrito.

6.3 Ensaios sem polimento intermediário, perfil de microdureza

Nos ensaios sem polimento intermediário foram mantidas as mesmas condições dos ensaios com polimento intermediário, com exceção da adesão de material na superfície da ferramenta, verificou-se que para ensaios com ΔH=50% uma mudança significativa no valor de μ. Para verificar influência do aumento do coeficiente de atrito nos corpos de prova testados, foi escolhido o ensaio de configuração: 0,30 mm/s e 50% de deformação da amostra, que é o ensaio com o maior aumento porcentual do valor de μ (122%).

A Figura 47 apresenta a metalografia do primeiro anel deformado na série de ensaios sem polimento intermediário e a Figura 48 apresenta a metalografia do décimo anel deformado para a mesma configuração. Em ambas as figuras as inscrições em vermelho: R_i significa raio interno da amostra e R_e significa raio externo.

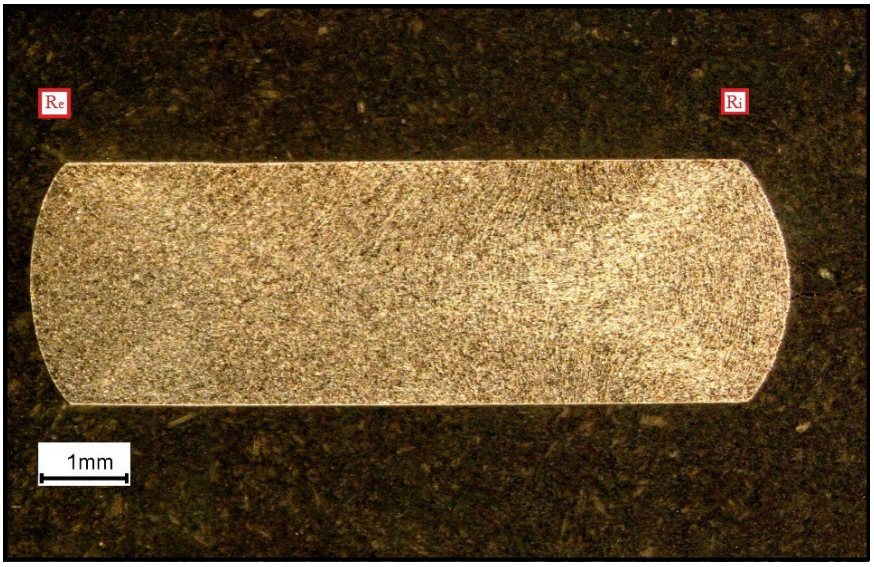


Figura 47. Metalografia do primeiro ensaio da série de ensaios sem polimento intermediário. Material foi polido e atacado com NITAL 3% por 3 minutos e observado em microscópio ótico.

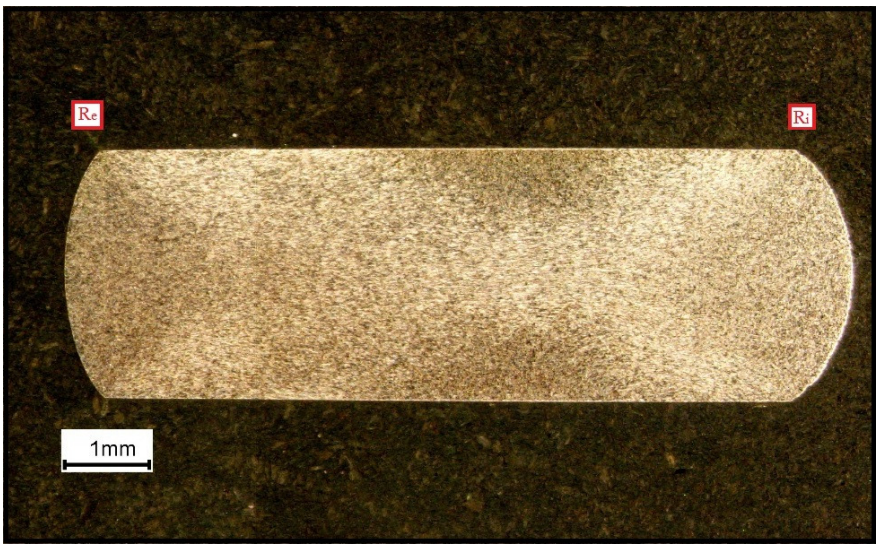


Figura 48. Metalografia do décimo ensaio da série de ensaios sem polimento intermediário. Material foi polido e atacado com NITAL 3% por 3 minutos e observado em microscópio ótico.

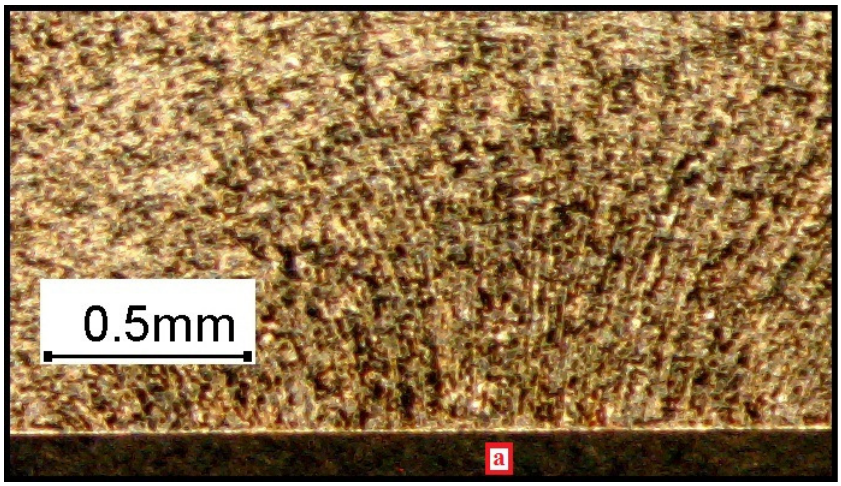


Figura 49. Detalhe das linhas de deformação na amostra após o ensaio. Material foi polido e atacado com NITAL 3% por 3 minutos e observado em microscópio ótico.

A Figura 49 apresenta em detalhe a região com a menor deformação da amostra. Esta região é comumente denominada região neutra ou linha neutra, nas modelagens matemáticas, assume-se que esta é uma região isenta de deformações. Pode-se observar que as linhas do material aparentemente tem sua origem no ponto

“a” em destaque na figura e vão curvando para a lateral direita ou para a lateral esquerda da fotografia. Esta região neutra é menos evidente na Figura 48.

Comparando a Figura 47 e a Figura 48, verifica-se que a décima repetição apresenta uma deformação maior na microestrutura, observa-se uma região mais clara em formato de “x” que percorre toda a secção da amostra, e não é tão evidente na Figura 47.

Assim, pelo fato desta região reagir de forma diferente ao ataque, será medida a microdureza das amostras do primeiro (Figura 47) e do décimo (Figura 48) ensaio realizado sobre marcas de desgaste anterior. O perfil foi estabelecido conforme identificação mostrada na Figura 32.

A Figura 50 apresenta o perfil de dureza central das duas amostras analisadas.

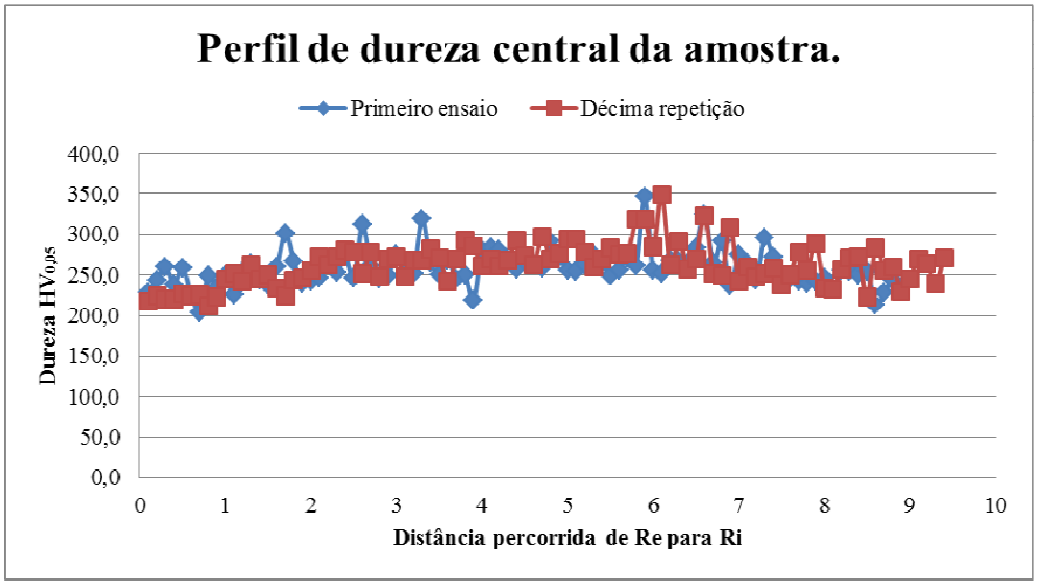


Figura 50. Perfil de dureza medido na linha central da amostra deformada. Seguindo a indicação de número 1 da Figura 32.

Em azul está apresentado o perfil de dureza do primeiro ensaio e em bordô está o perfil de dureza do décimo ensaio. Nesta figura verifica-se que os dois perfis de dureza estão praticamente sobrepostos e tem valores próximos a 250 HV em toda a extensão da amostra, logo, esta medida não é capaz de diferenciar as amostras.

A Figura 51 apresenta o perfil de dureza medido a 50 µm abaixo da superfície da amostra deformada.

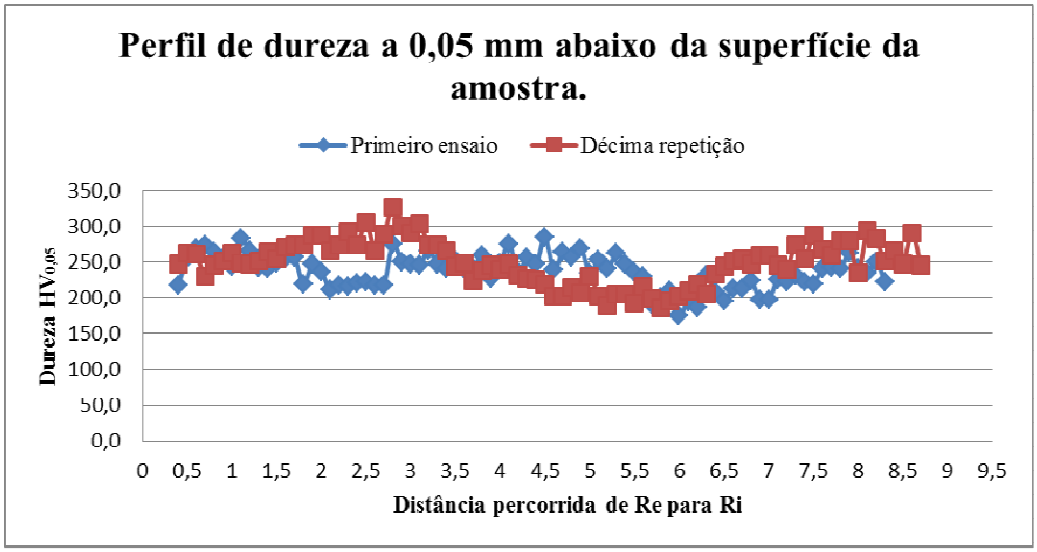


Figura 51. Perfil de dureza medido a 0,05 mm abaixo da superfície da amostra deformada. Seguindo a indicação de número 2 da Figura 32.

O perfil do décimo ensaio (bordô) apresenta valores mais altos de dureza, superando 300 HV nas regiões entre 2,5 mm e 3,0 mm. No entanto, a região com menor dureza que representa a área com menor deformação também é maior e mais fácil de localizar (entre 5,0 e 6,0 mm) e tem seu valor de aproximadamente 200 HV. Verifica-se que o perfil do primeiro ensaio indica um menor encruamento do material, pois tem valores menores de dureza, aproximadamente 250 HV, com uma região neutra entre 5,5 e 7,0 mm. Podendo assim diferenciar as amostras.

O terceiro perfil verificado foi medido na região identificada como linha neutra sendo apresentada na Figura 52.

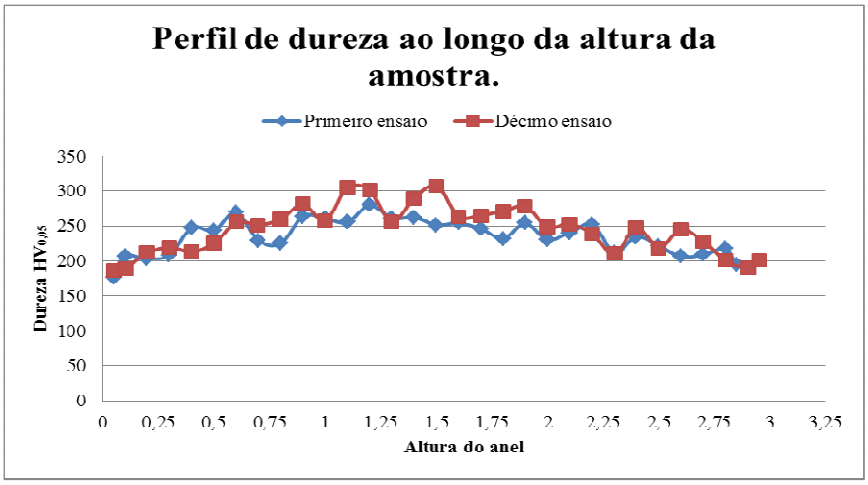


Figura 52. Perfil de dureza medido ao longo da altura da amostra deformada. Seguindo a indicação de número 3 da Figura 32.

Para a amostra do primeiro ensaio identificada na cor azul foi medida a 6 mm da borda externa e na amostra do décimo ensaio identificada na cor bordô foi medida a 5,8 mm da borda externa. Verifica-se em ambos os casos que o valor da dureza começa em valores baixos, aproximadamente 180 HV, e aumenta com a aproximação do centro da amostra e em seguida volta cair aproximando-se novamente do valor de dureza do anel antes da deformação (aproximadamente 172 HV). É possível verificar que uma possível linha média das durezas medidas na décima repetição (linha bordô) fica acima das medidas feitas na primeira repetição praticamente por toda a altura medida, evidenciando um maior encruamento do corpo de prova da décima repetição.

A única variação entre o ensaios das Figura 47 e Figura 48 é a adesão de material do anel na superfície da ferramenta, assim pode-se dizer que a interação entre o anel e a ferramenta, causada pelo aumento de material aderido, provoca a variação do valor de μ, a diferença no ataque para metalografia das amostras e o aumento do encruamento (elevação das durezas medidas), como pode ser verificado neste item.

As tabelas com os dados necessários para gerar os gráficos de perfil de dureza da primeira amostra da série de ensaios sobre marcas de desgaste estão apresentados nas tabelas do Anexo N e os dados para o perfil de dureza da décima amostra da série estão nas tabelas do Anexo O.

7 Conclusões

Nas condições experimentais deste trabalho, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

a) Com polimento entre ensaios:

- O grau de deformação (20 ou 50%) na altura da amostra não altera o coeficiente de atrito.

- A velocidade de deformação para (20% e 50%) não altera o coeficiente de atrito, exceto para 0,03 mm/s. A tendência do coeficiente de atrito é diminuir com o aumento da velocidade, porém esta tendência não é significativa, a diferença entre valores é pequena (9,7%).

b) Sem polimento entre ensaios:

- A adesão de material é evidente mesmo após o primeiro ensaio e é intensificada com as repetições.

- Há efeito do grau de deformação (20% ou 50%) sobre o coeficiente de atrito.

- Com 50% de deformação o coeficiente de atrito não muda com a velocidade, ao passo que para 20% de deformação o valor de μ varia com a mudança de velocidade de forma significativa.

c) Efeito da adesão de material:

- Com 20% de deformação na amostra a adesão de material não altera o μ, para ensaios com 50% de deformação o valor de μ aumenta.

d) O trabalho reiterou que quando os ensaios do anel são feitos em condições semelhantes às seguidas por Male e Cockcroft (1964) e outros pesquisadores (sem polimento da ferramenta entre ensaios) há efeito da variação do grau de deformação de 20% para 50%, no entanto não há efeito da velocidade de deformação sobre o coeficiente de atrito. Entretanto quando há polimento das ferramentas entre ensaios, não há diferença significativa do coeficiente de atrito em função da mudança do grau de deformação de 20% para 50%, mas há efeito da velocidade para os ensaios com 50% de deformação. Este trabalho atribui estas diferenças ao intenso

fenômeno de adesão do material do anel sobre a ferramenta. Nestes casos o valor do coeficiente de atrito é dado ao menos em parte pela energia necessária para formar, deformar e romper as junções anel-ferramenta.

e) Procedimento experimental:

- Como foi visto na Tabela 23 ensaios com deformações na altura estatisticamente iguais resultaram em valores de coeficientes de atrito diferentes aumentando a dispersão dos resultados. Esta discrepância de resultados ocorreu em ensaios que foram realizados exatamente nas mesmas condições experimentais, sendo assim o uso de valores de coeficientes de atrito da literatura deve ser feito com cautela.

8 Trabalhos Futuros

As medidas de coeficiente de atrito feitas no ensaio do anel neste trabalho e na literatura necessitam serem validadas com medidas em campo.

Sugere-se um estudo mais detalhado da relação dos mecanismos de atrito e os valores de coeficiente de atrito em função do grau de deformação e da velocidade de deformação.

Ampliar os resultados deste trabalho para outras faixas de velocidades de deformação mais utilizadas industrialmente.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

"IL PORCELLINO" (O Javali) estátua em frente ao "Mercato Nuovo" Florença – Itália, foto do site Verinha Tour. Disponível em: <http://verinhatour.com.br/site/?category_name=florenca> Acessado em: 20/01/2012.

ESTÁTUA "CONDOR" NA PRAÇA RAMOS DE AZEVEDO NO CENTRO DE SÃO PAULO – BRASIL, foto de Ardiles Moreira Portal G1. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2012/07/vendedor-diz-que-esta-com-dedo-de-estatua-do-centro-de-sp-desde-2010.html>. Acessado em: 20/01/2012.

ESTÁTUA "CONDOR" NA PRAÇA RAMOS DE AZEVEDO NO CENTRO DE SÃO PAULO – BRASIL, foto do artista Igor Puorro. Disponível em: <http://www.flickr.com/photos/igorpuorro/4136967161/>. Acessado em: 20/01/2012.

ASM INTERNATIONAL, *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. ASM Internacional, 2001.

AVITZUR, B., *Metal forming: processes and analysis*. New York: McGraw-Hill, 1968.

BAY, N., WANHEIM, T., *Real area of contact and friction stress at high pressure slinding contact*. Wear, Vol. 38, 1976, p. 201-209.

BÖESCH Jr., P., R., MATINS, V., SCHAEFFER, L., *Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão*. Revista Thema 08 (01), 2011.

BUENO, A., F., *Determinação do coeficiente de atrito para as ligas de alumínio AA6351 e de Titânio Ti6Al4V pelos métodos do anel e tubo cônico*, 2010, 119 p, Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CHIANG, L., F., HIROYUKI, H., WANG, J., Y., UESUGI, T., TAKIGAWA, Y., HIGASHI, K., *Investigation on dynamic friction properties of extruded AZ31 magnesium alloy using by ring upsetting method*. Materials Transaction, Vol. 51, No. 7, p 1249-1254, 2010.

CRISTINO, V., A., M., ROSA, P., A., R., MARTINS, P., A., F. *Surface roughtness and material strength of tribo-pairs in ring compressions tests*. Tribology International 44, p 134-143, jul. 2011.

DA SILVA, C., R., S. *Fadiga térmica de ferros fundidos brancos multicomponentes*, 2003, 154 p, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

DE SANETIS, A., M., FORCELLESE, A., ROBERTS, S., M., WITHERS, P., J., *Frictional behavior of Al359/SiC/20p composite under isothermal and non-isothermal hot-working conditions as a function of surface roughness*. Journal of Materials Processing Tecnology 72, p 195-200, 1997.

DUTTON, R., E., SEETHARAMAN, V., GOETZ, R., L., SEMIATIN, S., L., *Effect of flow softening on ring test calibration curves*. Material Science & Engineering A270, p 249-253, abr. 1999.

ESPINOZA-CANTÚ, V., GUERRERO-MATA, M., P., LOZANO, T., COLÁS, R., *Evaluation of the frictional characteristics of rolling emulsions*. Ingeniería Mecânica Tecnología y Desarrollo. Vol. 2, No. 6, p 200-204, 2008.

GOETZ, R., L., JAIN, V., K., MORGAN, J., T., WIERSCHKE, M., W., *Effect of material and processing conditions upon the ring calibration curves*. Wear 143, p 71-86, 1991.

GREENWOOD, J. A., WILLIAMSON, B. P., *Contact of nominally flat surfaces.* Proceeding of the Royal Society of London. Vol. 295, 1966, p 300-319.

HARTLEY, R., S., CLOETE, T., J., NURICK, G., N., *An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test.* International Journal of Impact Engineering 34, p 1705-1728, 2007.

HAWKYARD, J., B., JOHNSON, W., *An analysis of the changes in geometry of a short hollow cylinder during axial compression*. International Journal of Mechanical Science. Pergamon Press Ltd., Vol. 9, 1967, p 163-182.

HU, Z. M., DEAN, T., A., *A study of surface topography friction and lubricants in metal forming*. Internacional Journal of Machine Tools and Manufacture 40, 2000, p 1637-1649.

HUTCHINGS, I., M., *Tribology Friction and wear of engineering materials*, Butterworth-Heinemann, 1992.

HWU, Y., J., HSU, C., T., WANG, F. *Measurement of friction and the flow stress of steels at room and elevated temperatures by ring-compression tests*. Journal of Materials Processing Technology 37, 1993, p 319-335.

KERRIDGE, M., LANCASTER, J., K., *The Stages in a Process of Severe Metallic Wear*. Proceeding of the Royal Society of London. Vol. 236, 1956, p 250-264.

KUDO, H., *Some analytical and experimental studies of axi-symmtric cold forging and extrusio-I.* International Journal Mechanical Science. Vol. 2, 1960, p 102-127.

LEITE, M. V., *Conformação mecânica: Efeito da Topografia na transferência de material e no atrito*, 2010, 148 p, Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LI, L., X., PENG, D., S., LIU, J., A., LIU, Z., Q., JIANG, Y. *An experimental study of the lubrication behavior of A5 glass lubricant by means of the ring compression test*. Journal of Material Processing Technology 102, 2000, p 138-142.

MAHRENHOLTZ, O., BONTCHEVA, N., IANKOV, R., *Influence of surface roughness on friction during metal forming process.* Journal of Materials Processing Technology 159, 2005, p 9-16.

MALE, A. T., COCKCROFT, M. G., *A method for determination of coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation,* Journal of the Institute of Metals, 1964, p 38-46.

MALE, A. T., DEPIERRE, V., *Validity of mathematical solutions for determining friction from the ring compression test*, Journal of Lubrication Technology, 1970, p 389-395.

MARIOT, P., *Estudo do efeito do teor de molibdênio no endurecimento dos ferros fundidos brancos de alto cromo,* 2010, 121 p, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MATINS, V., MARGUTTI, D., M., BÖESCH Jr., P., R., BUENO, A., F., SCHAEFFER, L., *Avaliação da influência da rugosidade superficial sobre o atrito no ensaio de compressão do anel*. 66º ABM Congress, jul. 2011.

MENDES, M., A., R., S., *Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimentos de filmes finos utilizadas em operações de conformação a frio*, 2009, 73 p, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PADILHA, A., F., *Materiais de engenharia, microestrutura e propriedades*. Hemus, 1997.

PETERSEN, S., B., MARTINS, P., A., F., BAY, N., *An alternative ring test geometry for the evaluation of friction under low normal pressure*. Journal of Materials Processing Technology 79, p 14-24, 1998.

PORR, P., *Estudo sobre a influência da carga de deformação e do coeficiente de atrito nas propriedades do aço 1020*, 2009, 76 p, Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RAO, K., P., SIVARAM, K., *A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves*. Journal of Materials Processing Technology 37, p 295-318, 1993.

RIGNEY, D., A., CHEN, L., H., NAYLOR, M., G., S., ROSENFIELD, A., R., *Wear Processes in Sliding Systems.* Wear, 100, 1984, p 195-219.

ROBINSON, T., OU, H., ARMSTRONG, C., G., *Study on ring compression test physical modeling and FE simulation*. Journal of Materials Technology 153-154, p 54-59, 2004.

RUDKINS, N., T., HARTLEY, P., PILLINGER, I., PETTY, D., *Friction modeling and experimental observations in hot ring compression test.* Journal of Materials Processing Technology 60, p 349-353, 1996.

SAHIN, M., ÇETINARSLAN, C., S., AKATA, H., E., *Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials*. Material and Design 28, p 633-640, 2007.

SCHEY, J. A., *Tribology in Metalworking Friction, Lubrication and Wear*, American Society for Metals, 1984.

SCHROEDER, W., WEBSTER, D. A., *Press-Forging Thin Section: Effect of Friction, Area, and Thickness on Pressures Required,* Journal of Applied Mechanics, (1949), p 289-294.

SERANTONI, C., R., Nucleação e crescimento do eutético austenita/VC em ligas do sistema Fe-V-C, 2009, 153 p, Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SHEN, G., VEDHANAYAGAM, A., KROPP, E., ALTAN, T., *A method for evaluating friction using a backward extrusion-type forging*. Journal of Materials Processing Technology, 33, p 109-123, 1992.

SOFUOGLU, H., GEDIKLI, H., RASTY, J., *Determination of friction coefficient by employing the ring compression test*. Transaction of the ASME. Vol. 123, p 338-348, jul. 2001.

TAN, X., *Comparisons of friction models in bulk metal forming.* Tribology Internacional 35, 2002, p 385-393.

VENUGOPAL, P., VENUGOPAL, S., SEETHARAMAN, V., *Influence of strain rate and temperature on the friction factor of commercially pure titanium*. Journal of Materials Processing Technology 22, 1990, p 91-97.

WANG, H., SONG, Y., WANG, F., ZHANG, K., *Interfacial friction of ceramics at high temperature ring-compression test*. Material Science Forum, Vols. 704-705, 2012, p 967-972.

ZUM GAHR, K., H., *Microstructure and wear of materials.* New York, Elsevier, 1987.

10 Anexos

10.1 Anexo A

Curvas de calibração analítica no ensaio do anel

A primeira abordagem analítica das curvas de calibração para o ensaio do anel foi desenvolvida por Hawkyard e Johnson em 1967 (BÖESCH et al., 2011), até aquele momento não havia nenhuma análise matemática das curvas de calibração utilizando a teoria da plasticidade.

As análises de Kudo e Avitzur (apud Hawkyard e Johnson, 1967) concentravam se em identificar a posição do raio neutro como visto na Figura 53.

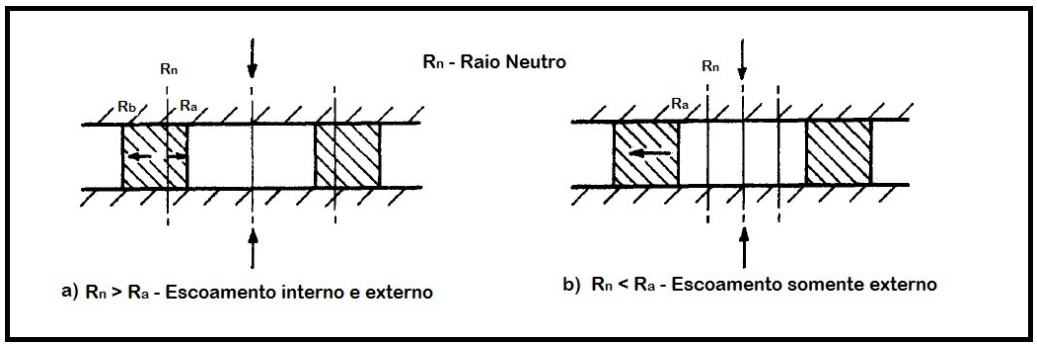


Figura 53. Regiões de escoamento do material na amostra. Figura adaptada de (HAWKYARD E JONHSON, 1967).

Hawkyard e Johnson (1967) propuseram uma solução alternativa ao método de Avitzur. Os autores propõem determinar o equilíbrio de tensões na amostra, considerando o raio neutro e assim deduzir as taxas de deformação. Em sua análise eles assumem que não haverá deformações não uniformes nos elementos sujeitos a resistência ao movimento e não haverá embarrilhamento. Na zona de escoamento externo a deformação angular de cada elemento da análise é zero, na região interna ocorre o escoamento interno e nomeiam σ_r, σ_θ e σ_z como as tensões principais deste pequeno cilindro. Assim estabeleceram como condições de sua análise:

(i) Cada elemento deve estar em equilíbrio estático;

(ii) As deformações plásticas principais e as tensões diferenciais obedecem a relação de Levy-Mises;

(iii) Material perfeitamente plástico e incompressível obedecendo ao critério de von Mises.

Na zona externa duas condições devem ser consideradas: (i) o material sofre escoamento interno para $r_n>r_a$; (ii) para $r_n \leq r_a$ não haverá escoamento interno, a pressão radial é zero, ou seja, $\sigma_{ra}=\sigma_{rb}=0$ tem se:

$$\sigma_{z_a} = \frac{k\left(1+3x_a\right)^2}{\left(1+3x_a{}^4\right)^{1/2}} \qquad \text{e} \qquad \sigma_{z_b} = \frac{k\left(1+3x_b\right)^2}{\left(1+3x_b{}^4\right)^{1/2}} \tag{8}$$

Sendo x_a o raio interno do anel, x_b o raio externo e k o campo de tensões.

Assim:

$$\frac{2\alpha r_a}{l} = \frac{x_a}{\left(x_b - x_a\right)} \cdot \ln\left[\frac{\left(1+3x_b^4\right)^{1/2}-1}{\left(1+3x_a{}^4\right)^{1/2}-1} \cdot \frac{x_a^2}{x_b^2}\right] \tag{9}$$

A Eq. (9) relaciona o raio neutro $r_n=r_a/x_a=r_b/x_b$ com a geometria externa r_a, r_b, l e a condição de atrito superficial αk para $r_n \leq r_a$.

Zona interna: Assumindo-se como condição limite $\sigma r_n/k$, para o escoamento interno (Eq. (10)) e externo (Eq. (11)) tem-se:

$$\frac{2\alpha r_n}{l}\left(x_b + x_a - 2\right) = \ln\left\{\frac{\left[\left(1+3x_b^4\right)^{1/2}-1\right]\cdot x_a^2}{\left[\left(1+3x_a{}^4\right)^{1/2}-1\right]\cdot x_b^2}\right\} \tag{10}$$

$$\frac{2\alpha r_n}{l}\cdot\frac{x_a}{\left(x_b + x_a - 2\right)} = \ln\left\{\frac{\left[\left(1+3x_b^4\right)^{1/2}-1\right]\cdot x_a^2}{\left[\left(1+3x_a{}^4\right)^{1/2}-1\right]\cdot x_b^2}\right\} \tag{11}$$

A Eq. (10) define o raio neutro em termos da deformação do cilindro para o fator de atrito quando $r_b>r_n\geq r_a$ e pode ser comparado com a Eq. (9) onde $r_b>r_a\geq r_n$. A condição comum $r_a=r_n$ reduz a Eq. (11) a:

$$\frac{2\alpha r_n}{l} = \frac{1}{x_b - 1} = \ln\left[\frac{\left(1+3x_b^4\right)^{1/2}-1}{x_b^2}\right] \tag{12}$$

A Eq. (12) é a equação particular para o caso de r_n ser o furo. Kudo e Avitzur chegaram à equação semelhante, porém utilizando a taxa de dissipação de energia.

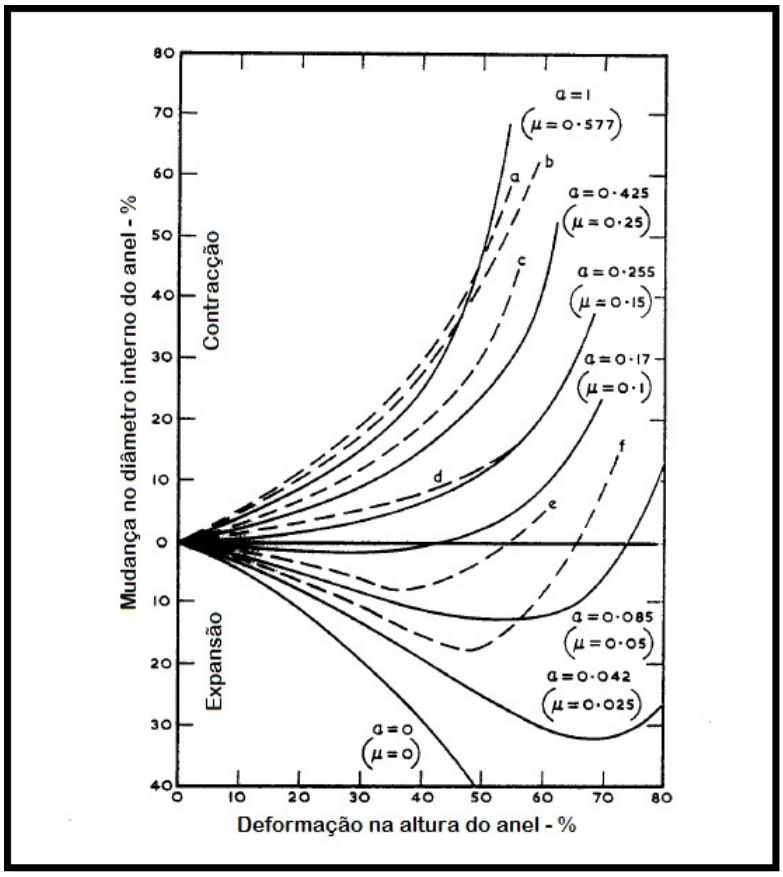


Figura 54. Comparação entre as curvas teóricas de Hawkyard e Jonhson (1967) (linha tracejada) e as curvas práticas de Male e Cockcroft (1964) (linha contínua). Figura adaptada de (HAWKYARD E JONHSON, 1967).

A Figura 54 compara os resultados das curvas analíticas desenvolvidas por Hawkyard e Jonhson (1967) apresentadas por meio das linhas tracejadas e as curvas práticas determinadas por Male e Cockcroft (1964). Pode-se notar que as curvas analíticas são compatíveis com as curvas práticas: (i) as curvas a, b, c e d da Figura 54, cujo valor de μ é alto, são compatíveis com a condição de colamento (α=1 e μ=0,577); (ii) para condições de μ baixo o comportamento de aumento do raio interno (curvas e, f) também é representado nas curvas analíticas.

As curvas analíticas foram obtidas para leis de atrito constante, na prática a resistência ao movimento muda com a tensão σ_z. Na compressão ocorrem na amostra simultaneamente regiões de colamento e regiões de deslizamento, provocando assim um campo de velocidades quase descontínuo (HAWKYARD E JONHSON, 1967). A teoria deste item é coerente com as curvas experimentais, no entanto, existe um desvio das curvas analíticas em relação às curvas práticas que ocorre principalmente com o aumento das taxas de deformação, os principais fatores responsáveis por este desvio são:

(i) endurecimento por deformação: a distribuição de deformações não é homogênea, o corpo de prova estará sujeito a um campo de tensões não uniforme ao ser comprimido e este comportamento tende a modificar o padrão de deformação;

(ii) embarrilhamento: a deformação equatorial conhecida como embarrilhamento, não foi considerada no modelo para que este fosse simplificado, no entanto, sua ocorrência pode influenciar na medição das deformações e nas conclusões finais sobre o coeficiente de atrito.

10.2 Anexo B

Foi realizado um estudo prévio com relação à rugosidade alcançada com polimento utilizando abrasivos de 6 e 3 μm e os resultados estão apresentados na Tabela 50.

Analisando a Tabela 50 pode-se verificar que as médias dos "Ra"s obtidos para as superfícies, uma polida com abrasivo de 6 μm e a outra com abrasivo de 3 μm são semelhantes. Considerando o desvio padrão das medidas é possível afirmar que pode se obter a mesma superfície, em termos de rugosidade média, com ambos os polimentos. Sendo assim não faz se necessário o polimento das ferramentas com abrasivo de 3 μm.

Tabela 50. Comparativo entre processos de polimento variando o tamanho do grão abrasivo utilizado e considerando a rugosidade média (Ra) como parâmetro de comparação.

Repetição	Abrasivo do polimento	
	3 µm	6 µm
1	0,007	0,007
2	0,009	0,009
3	0,005	0,009
4	0,010	0,007
5	0,005	0,007
Médias dos Ra´s (µm)	0,007	0,008
Desvio Padrão	0,002	0,001
Coef. Var.	31,67%	14,04%

10.3 Anexo C

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 0,30 mm/s e uma redução de 50% na altura da amostra. Nas Tabela 51, Tabela 52 e Tabela 53 os dados correspondentes ao ensaio P1, em destaque, não foram considerados nas análises, pois este foi o ensaio utilizado para a calibração da máquina.

Tabela 51. Resultados complementares para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P1	**152,87**	**151,63**	**66,31**	**151,34**		**2,498**	**-0,50**
P2	152,43	151,63	46,05	150,30		2,972	-0,03
P2	152,45	151,65	46,43	150,33		2,933	-0,07
P3	152,44	151,64	45,35	150,31		2,898	-0,10
P4	151,99	151,19	46,15	149,87		2,948	-0,05
P5	152,35	151,55	45,07	150,22	15	2,906	-0,09
P1	152,55	151,75	46,36	150,42		3,008	0,01
P2	152,43	151,63	44,75	150,31		2,881	-0,12
P3	152,41	151,61	46,81	150,28		3,015	0,01
P4	152,3	151,50	46,66	150,18		3,004	0,00
P5	147,20	146,40	44,29	145,12		3,035	0,04

Tabela 52. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P1	**2,500**	**2,492**	**2,498**	**2,503**	**2,498**
P2	2,974	2,973	2,968	2,971	2,972
P2	2,931	2,929	2,937	2,936	2,933
P3	2,893	2,892	2,903	2,904	2,898
P4	2,952	2,963	2,945	2,930	2,948
P5	2,919	2,888	2,902	2,915	2,906
P1	3,006	3,004	3,010	3,013	3,008
P2	2,884	2,885	2,877	2,877	2,881
P3	3,018	3,006	3,013	3,022	3,015
P4	2,996	2,998	2,993	3,002	2,997
P5	3,010	3,017	2,995	2,992	3,004

Tabela 53. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P1	**3,52**	**3,40**	**3,44**	**3,50**	**3,47**
P2	5,55	5,65	5,69	5,40	5,57
P2	5,11	5,16	5,15	4,99	5,10
P3	5,36	5,08	5,17	5,35	5,24
P4	5,11	5,17	5,11	5,13	5,13
P5	5,22	5,20	5,30	5,34	5,27
P1	5,20	5,22	5,31	5,23	5,24
P2	6,17	5,96	5,88	6,01	6,01
P3	5,14	5,05	5,17	5,12	5,12
P4	5,20	5,14	5,15	4,91	5,10
P5	5,20	5,14	4,99	5,14	5,12

10.4 Anexo D

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 0,03 mm/s e uma redução de 50% na altura da amostra. Nas Tabela 54, Tabela 55 e Tabela 56 os dados correspondentes ao ensaio P3, em destaque, não foram considerados nas análises, pois este foi o ensaio utilizado para a calibração da máquina.

Tabela 54. Resultados complementares para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P3	**152,47**	**151,44**	**37,78**	**149,94**		**3,183**	**0,18**
P1	152,59	151,99	46,34	150,50		2,927	-0,07
P2	152,44	151,77	44,14	150,27		2,955	-0,04
P3	152,41	151,81	46,45	150,32		2,982	-0,02
P4	152,02	151,42	47,12	149,93		2,965	-0,04
P5	152,38	151,78	48,87	150,29	15	2,942	-0,06
P1	152,57	151,97	48,26	150,48		2,974	-0,03
P3	152,43	151,83	-	150,34		2,924	-0,08
P2	152,42	151,82	47,63	150,33		2,995	-0,01
P4	151,94	151,34	47,43	149,85		3,014	0,01
P5	152,33	151,73	48,78	150,24		2,985	-0,01

Tabela 55. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P3	**3,189**	**3,187**	**3,178**	**3,176**	**3,183**
P1	2,913	2,934	2,942	2,917	2,927
P2	2,962	2,957	2,945	2,957	2,955
P3	2,979	2,979	2,986	2,985	2,982
P4	2,935	2,971	3,002	2,950	2,965
P5	2,948	2,922	2,943	2,954	2,942
P1	2,982	2,976	2,963	2,975	2,974
P3	2,926	2,922	2,921	2,927	2,924
P2	2,999	2,995	2,989	2,996	2,995
P4	3,031	3,010	2,999	3,016	3,014
P5	2,997	2,995	2,972	2,976	2,985

Tabela 56. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P3	**6,00**	**5,96**	**5,94**	**6,03**	**5,98**
P1	5,22	5,25	5,24	5,21	5,23
P2	5,25	5,24	5,24	5,20	5,23
P3	5,30	5,34	5,28	5,27	5,30
P4	4,87	4,84	4,86	4,81	4,85
P5	4,12	4,18	4,15	4,14	4,15
P1	4,98	4,91	4,86	4,87	4,91
P3	5,43	5,28	5,50	5,50	5,43
P2	4,74	4,76	4,82	4,84	4,79
P4	4,95	4,94	4,98	4,93	4,95
P5	4,89	4,90	4,88	4,92	4,90

10.5 Anexo E

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 3,00 mm/s e uma redução de 20% na altura da amostra.

Tabela 57. Resultados complementares para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P1	152,59	148,15	21,12	148,05	15	4,804	0,00
P2	152,42	147,98	20,62	147,90		4,780	-0,02
P3	152,4	147,96	20,73	147,88		4,807	0,01
P4	151,98	147,54	21,32	147,49		4,770	-0,03
P5	152,34	147,90	20,42	147,80		4,828	0,03
P1	152,6	148,16	20,60	148,00		4,901	0,10
P3	152,41	147,97	20,57	147,80		4,898	0,10
P4	151,98	147,54	20,67	147,40		4,862	0,06
P2	152,41	147,97	21,27	147,83		4,864	0,06
P5	152,33	147,89	21,03	147,76		4,843	0,04

Tabela 58. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P1	4,791	4,808	4,809	4,807	4,804
P2	4,782	4,782	4,781	4,776	4,780
P3	4,810	4,806	4,803	4,807	4,807
P4	4,768	4,756	4,776	4,779	4,770
P5	4,848	4,802	4,817	4,844	4,828
P1	4,910	4,878	4,901	4,915	4,901
P3	4,903	4,900	4,888	4,901	4,898
P4	4,870	4,870	4,846	4,,862	4,862
P2	4,864	4,858	4,866	4,866	4,864
P5	4,833	4,853	4,853	4,833	4,843

Tabela 59. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P1	8,05	8,07	8,06	8,06	8,06
P2	8,03	8,08	8,07	8,05	8,06
P3	7,95	7,93	7,97	7,93	7,95
P4	8,03	8,06	8,03	8,02	8,04
P5	8,04	8,06	8,04	8,07	8,05
P1	8,19	8,19	8,20	8,19	8,19
P3	8,26	8,23	8,24	8,28	8,25
P4	8,28	8,25	8,23	8,26	8,26
P2	8,24	8,21	8,24	8,19	8,22
P5	8,13	8,16	8,22	8,19	8,18

10.6 Anexo F

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 0,30 mm/s e uma redução de 20% na altura da amostra.

Tabela 60. Resultados complementares para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P1	152,57	149,39	21,23	148,02	15	4,791	-0,01
P2	152,43	149,24	21,19	147,88		4,806	0,01
P3	152,40	149,21	20,93	147,85		4,806	0,01
P4	151,96	148,77	21,70	147,41		4,791	-0,01
P5	152,32	149,13	21,60	147,77		4,798	-0,00
P1	152,56	149,37	21,13	148,01		4,838	0,04
P2	152,41	149,22	21,36	147,85		4,856	0,06
P4	151,99	148,80	21,37	147,44		4,849	0,05
P3	152,42	149,23	21,65	147,86		4,848	0,05
P5	152,33	149,14	21,10	147,78		4,829	0,03

Tabela 61. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P1	4,793	4,785	4,791	4,794	4,791
P2	4,810	4,812	4,800	4,802	4,806
P3	4,801	4,811	4,814	4,797	4,806
P4	4,783	4,801	4,802	4,778	4,791
P5	4,794	4,801	4,791	4,804	4,798
P1	4,840	4,841	4,836	4,835	4,838
P2	4,858	4,849	4,855	4,862	4,856
P4	4,853	4,835	4,849	4,860	4,849
P3	4,851	4,847	4,843	4,850	4,848
P5	4,838	4,837	4,817	4,824	4,829

Tabela 62. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P1	8,02	8,02	8,05	8,04	8,03
P2	7,99	7,98	7,94	7,98	7,97
P3	7,97	7,98	7,97	7,98	7,98
P4	7,97	8,00	7,94	8,01	7,98
P5	7,88	7,90	7,91	7,83	7,88
P1	8,18	8,13	8,13	8,11	8,14
P2	8,17	8,15	8,19	8,18	8,17
P4	8,07	8,06	8,10	8,05	8,07
P3	8,26	8,20	8,26	8,25	8,24
P5	8,17	8,17	8,15	8,19	8,17

10.7 Anexo G

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 0,03 mm/s e uma redução de 20% na altura da amostra. Nas Tabela 63, Tabela 64, e Tabela 65 os dados correspondentes ao ensaio P1, em destaque, não foram considerados nas análises, pois este foi o ensaio utilizado para a calibração da máquina.

Tabela 63. Resultados complementares para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura com polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P1	**152,62**	**150,22**	**25,41**	**148,73**		**4,235**	**-0,57**
P4	152,06	149,02	21,95	147,54		4,818	0,02
P2	152,49	149,52	21,49	148,04		4,723	-0,08
P3	152,49	149,45	20,40	147,97		4,757	-0,04
P4	152,03	148,99	20,95	147,52		4,770	-0,03
P5	152,38	149,34	21,42	147,86	15	4,775	-0,03
P2	152,46	149,42	21,61	147,94		4,817	0,02
P3	152,44	149,40	21,17	147,92		4,824	0,02
P4	151,99	148,95	21,39	147,48		4,823	0,02
P1	152,57	149,53	22,25	148,05		4,855	0,06
P5	152,35	149,31	22,03	147,83		4,797	0,00

Tabela 64. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P1	**4,232**	**4,231**	**4,238**	**4,238**	**4,235**
P4	4,809	4,827	4,829	4,808	4,818
P2	4,720	4,729	4,725	4,719	4,723
P3	4,750	4,753	4,758	4,768	4,757
P4	4,775	4,776	4,754	4,774	4,770
P5	4,782	4,785	4,773	4,758	4,775
P2	4,816	4,811	4,820	4,822	4,817
P3	4,822	4,821	4,827	4,827	4,824
P4	4,828	4,820	4,819	4,823	4,823
P1	4,864	4,844	4,849	4,863	4,855
P5	4,783	4,801	4,808	4,794	4,797

Tabela 65. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P1	**7,34**	**7,24**	**7,31**	**7,33**	**7,31**
P4	8,15	8,17	8,13	8,14	8,15
P2	7,92	7,90	7,90	7,91	7,91
P3	8,01	8,00	8,01	8,03	8,01
P4	7,94	7,92	7,92	7,92	7,93
P5	7,89	7,90	7,88	7,86	7,88
P2	8,05	8,06	8,03	8,04	8,05
P3	8,02	8,01	8,03	8,02	8,02
P4	8,09	8,09	8,08	8,08	8,09
P1	8,15	8,13	8,08	8,05	8,10
P5	8,06	8,06	8,06	8,05	8,06

10.8 Anexo H

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 3,00 mm/s e uma redução de 50% na altura da amostra, em ensaios sem polimento intermediário e o registro fotográfico da evolução do desgaste provocado pela adesão de material do anel na ferramenta.

Tabela 66. Resultados complementares para velocidade de 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P11	152,55	150,45	42,69	150,37	15	2,959	-0,04
P12	152,55	150,45	43,99	150,38		2,972	-0,03
P13	152,55	150,45	46,74	150,38		3,001	0,00
P14	152,55	150,45	46,33	150,37		3,017	0,02
P15	152,55	150,45	45,98	150,38		3,029	0,03
P16	152,55	150,45	45,46	150,38		3,022	0,02
P17	152,55	150,45	46,15	150,38		3,034	0,03
P18	152,55	150,45	46,35	150,38		3,033	0,03
P19	152,55	150,45	45,90	150,38		3,021	0,02
P1X	152,55	150,45	46,62	150,37		3,032	0,03

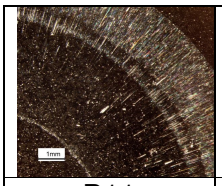
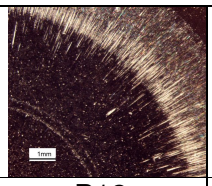
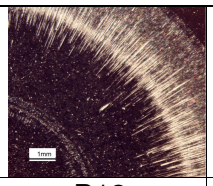
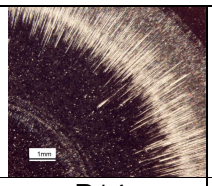
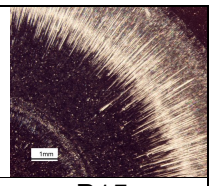
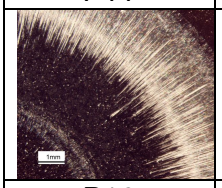
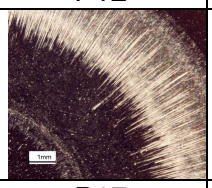
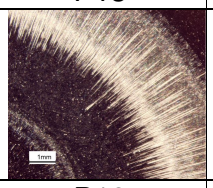
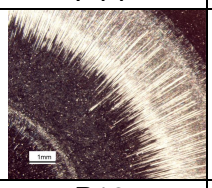
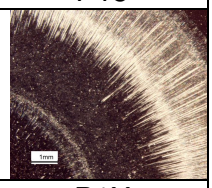
Tabela 67. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P11	2,955	2,945	2,964	2,970	2,959
P12	2,966	2,984	2,979	2,959	2,972
P13	3,011	3,001	2,987	3,005	3,001
P14	3,010	3,008	3,027	3,021	3,017
P15	3,033	3,021	3,022	3,038	3,029
P16	3,025	3,032	3,016	3,016	3,022
P17	3,040	3,024	3,027	3,043	3,034
P18	3,020	3,030	3,044	3,038	3,033
P19	3,031	3,027	3,008	3,018	3,021
P1X	3,043	3,027	3,038	3,018	3,032

Tabela 68. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P11	5,77	5,76	5,55	5,80	5,72
P12	5,49	5,50	5,33	5,30	5,41
P13	4,88	5,05	4,95	5,03	4,98
P14	4,82	4,83	4,82	4,72	4,80
P15	4,87	4,79	4,83	4,85	4,84
P16	4,72	4,76	4,79	4,74	4,75
P17	4,62	4,67	4,58	4,69	4,64
P18	4,66	4,65	4,67	4,63	4,65
P19	4,79	4,77	4,71	4,79	4,77
P1X	4,69	4,70	4,63	4,69	4,68

Tabela 69. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 3,00 mm/s e 50% de deformação na altura.

				
P11	P12	P13	P14	P15
				
P16	P17	P18	P19	P1X

10.9 Anexo I

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 0,30 mm/s e uma redução de 50% na altura da amostra, em ensaios sem polimento intermediário e o registro fotográfico da evolução do desgaste provocado pela adesão de material do anel na ferramenta.

Tabela 70. Resultados complementares para velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	**zero-zero (mm)**	**H progr. (mm)**	**Força (10^4N)**	**Leitura (mm)**	**Tempo (s)**	**H real (mm)**	**Diferença (mm)**
P21	152,43	151,63	44,75	150,31	15	2,881	-0,12
P22	152,43	151,63	43,47	150,29		2,885	-0,11
P23	152,43	151,63	45,88	150,30		2,954	-0,05
P24	152,43	151,63	47,22	150,30		2,990	-0,01
P25	152,43	151,63	48,19	150,31		3,007	0,01
P26	152,43	151,63	48,54	150,32		3,006	0,01
P27	152,43	151,63	48,10	150,31		2,993	-0,01
P28	152,43	151,63	47,68	150,31		2,995	-0,01
P29	152,43	151,63	47,34	150,30		2,975	-0,03
P2X	152,43	151,63	49,00	150,32		3,005	0,00

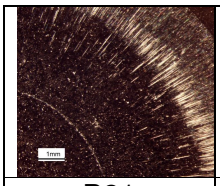
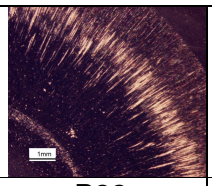
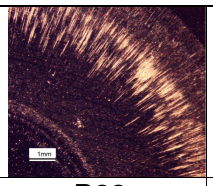
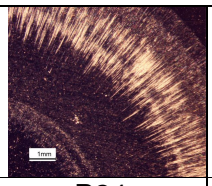
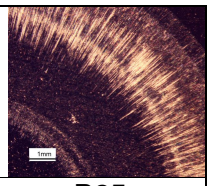
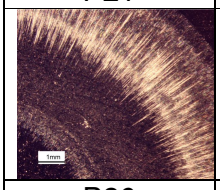
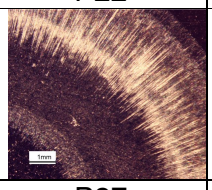
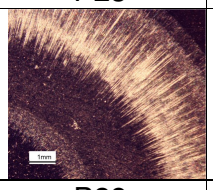
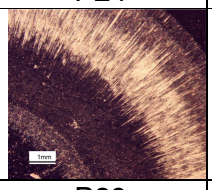
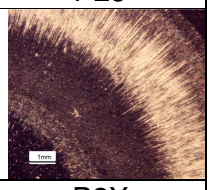
Tabela 71. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P21	2,884	2,885	2,877	2,877	2,881
P22	2,881	2,885	2,887	2,888	2,885
P23	2,954	2,958	2,950	2,955	2,954
P24	2,988	2,993	2,992	2,986	2,990
P25	3,007	3,007	3,003	3,010	3,007
P26	3,008	3,001	3,008	3,005	3,006
P27	2,989	2,996	2,996	2,989	2,993
P28	2,992	2,997	2,998	2,991	2,995
P29	2,971	2,976	2,977	2,974	2,975
P2X	3,006	3,009	2,999	3,005	3,005

Tabela 72. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P21	6,17	5,96	5,88	6,01	6,01
P22	6,37	6,48	6,57	6,42	6,46
P23	5,30	5,32	5,29	5,22	5,28
P24	4,92	4,72	4,83	4,72	4,80
P25	4,53	4,49	4,52	4,54	4,52
P26	4,44	4,44	4,31	4,37	4,39
P27	4,53	4,54	4,53	4,53	4,53
P28	4,64	4,53	4,61	4,66	4,61
P29	4,91	4,93	4,86	4,98	4,92
P2X	4,46	4,45	4,38	4,40	4,42

Tabela 73. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura.

				
P21	P22	P23	P24	P25
				
P26	P27	P28	P29	P2X

10.10 Anexo J

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 0,03 mm/s e uma redução de 50% na altura da amostra, em ensaios sem polimento intermediário e o registro fotográfico da evolução do desgaste provocado pela adesão de material do anel na ferramenta.

Tabela 74. Resultados complementares para velocidade de 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P31	152,43	151,83	-	150,34	15	2,924	-0,08
P32	152,43	151,83	45,50	150,33		2,918	-0,08
P33	152,43	151,83	47,54	150,33		2,974	-0,03
P34	152,43	151,83	49,09	150,34		2,989	-0,01
P35	152,43	151,83	48,75	150,34		2,998	0,00
P36	152,43	151,83	49,61	150,34		3,012	0,01
P37	152,43	151,83	49,89	150,34		3,025	0,02
P38	152,43	151,83	50,37	150,34		3,017	0,02
P39	152,43	151,83	50,27	150,34		3,016	0,02
P3X	152,43	151,83	49,79	150,34		3,007	0,01

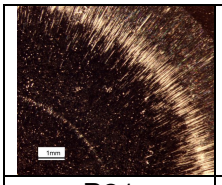
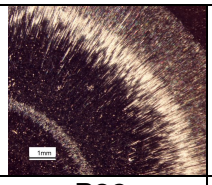
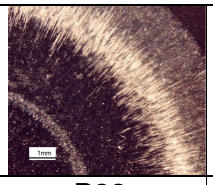
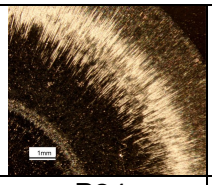
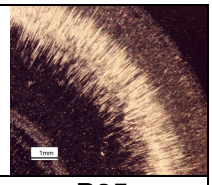
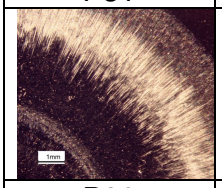
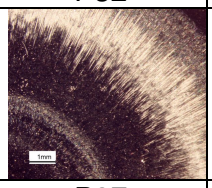
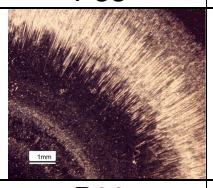
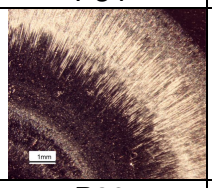
Tabela 75. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P31	2,926	2,922	2,921	2,927	2,924
P32	2,914	2,917	2,923	2,918	2,918
P33	2,975	2,972	2,973	2,975	2,974
P34	2,985	2,991	2,993	2,988	2,989
P35	2,996	3,000	3,001	2,995	2,998
P36	3,015	3,013	3,009	3,012	3,012
P37	3,021	3,033	3,025	3,019	3,025
P38	3,015	3,013	3,018	3,020	3,017
P39	3,010	3,016	3,022	3,016	3,016
P3X	3,005	3,005	3,010	3,009	3,007

Tabela 76. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P31	5,43	5,28	5,50	5,50	5,43
P32	5,75	5,65	5,42	5,57	5,60
P33	4,60	4,51	4,56	4,48	4,54
P34	4,49	4,41	4,39	4,37	4,42
P35	4,51	4,48	4,55	4,50	4,51
P36	4,45	4,44	4,46	4,42	4,44
P37	4,41	4,46	4,46	4,42	4,44
P38	4,38	4,36	4,36	4,39	4,37
P39	4,39	4,39	4,40	4,41	4,40
P3X	4,45	4,45	4,46	4,43	4,45

Tabela 77. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,03 mm/s e 50% de deformação na altura.

				
P31	P32	P33	P34	P35
				
P36	P37	P38	P39	P3X

10.11 Anexo K

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 3,00 mm/s e uma redução de 20% na altura da amostra, em ensaios sem polimento intermediário e o registro fotográfico da evolução do desgaste provocado pela adesão de material do anel na ferramenta.

Tabela 78. Resultados complementares para velocidade de 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P21	152,41	147,97	21,27	147,83	15	4,864	0,06
P22	152,41	147,97	21,59	147,84		4,843	0,04
P23	152,41	147,97	20,93	147,83		4,865	0,06
P24	152,41	147,97	20,71	147,83		4,856	0,06
P25	152,41	147,97	21,92	147,85		4,840	0,04
P26	152,41	147,97	20,88	147,82		4,865	0,07
P27	152,41	147,97	21,84	147,89		4,812	0,01
P28	152,41	147,97	21,27	147,91		4,781	-0,02
P29	152,41	147,97	20,91	147,82		4,865	0,07
P2X	152,41	147,97	20,76	147,83		4,844	0,04

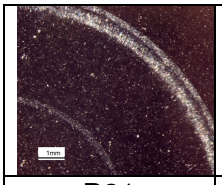
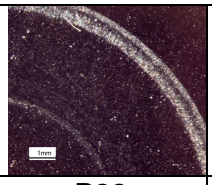
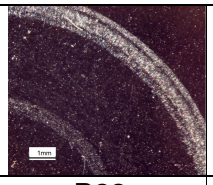
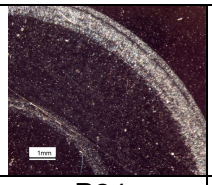
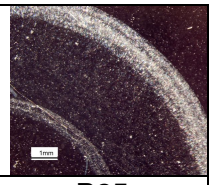
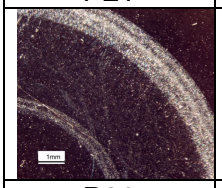
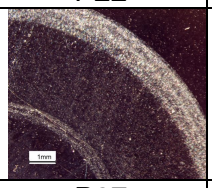
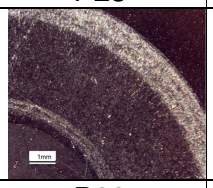
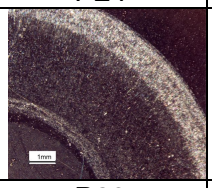
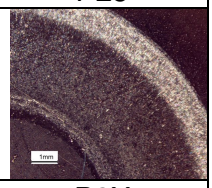
Tabela 79. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P21	4,864	4,858	4,866	4,866	4,864
P22	4,847	4,843	4,838	4,845	4,843
P23	4,867	4,868	4,861	4,862	4,865
P24	4,858	4,860	4,855	4,852	4,856
P25	4,844	4,839	4,835	4,841	4,840
P26	4,868	4,867	4,860	4,865	4,865
P27	4,815	4,812	4,806	4,813	4,812
P28	4,782	4,785	4,781	4,775	4,781
P29	4,862	4,863	4,870	4,866	4,865
P2X	4,847	4,841	4,839	4,848	4,844

Tabela 80. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P21	8,24	8,21	8,24	8,19	8,22
P22	8,08	8,11	8,09	8,12	8,10
P23	8,12	8,10	8,12	8,10	8,11
P24	8,12	8,10	8,22	8,17	8,15
P25	8,05	8,09	8,10	8,09	8,08
P26	8,10	8,08	8,06	8,09	8,08
P27	8,31	8,26	8,29	8,30	8,29
P28	8,19	8,21	8,20	8,19	8,20
P29	8,15	8,16	8,16	8,14	8,15
P2X	8,18	8,14	8,18	8,20	8,18

Tabela 81. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 3,00 mm/s e 20% de deformação na altura.

				
P21	P22	P23	P24	P25
				
P26	P27	P28	P29	P2X

10.12 Anexo L

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 0,30 mm/s e uma redução de 20% na altura da amostra, em ensaios sem polimento intermediário e o registro fotográfico da evolução do desgaste provocado pela adesão de material do anel na ferramenta.

Tabela 82. Resultados complementares para velocidade de 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P31	152,42	149,23	21,65	147,86	15	4,848	0,05
P32	152,42	149,23	21,99	147,87		4,831	0,03
P33	152,42	149,23	22,07	147,87		4,842	0,04
P34	152,42	149,23	21,57	147,86		4,839	0,04
P35	152,42	149,23	21,47	147,87		4,836	0,04
P36	152,42	149,23	21,80	147,86		4,838	0,04
P37	152,42	149,23	21,93	147,86		4,839	0,04
P38	152,42	149,23	21,90	147,87		4,829	0,03
P39	152,42	149,23	21,13	147,87		4,827	0,03
P3X	152,42	149,23	21,16	147,86		4,829	0,03

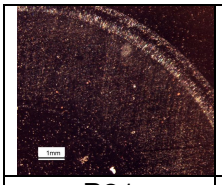
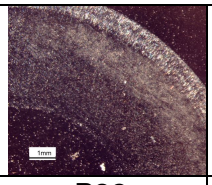
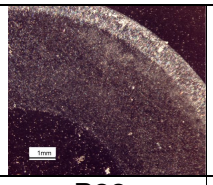
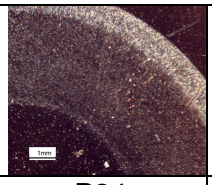
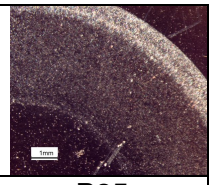
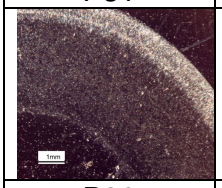
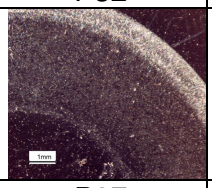
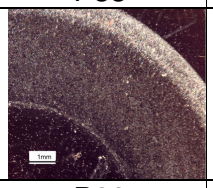
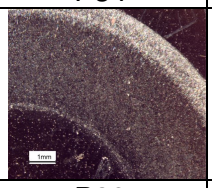
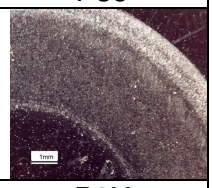
Tabela 83. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P31	4,851	4,847	4,843	4,850	4,848
P32	4,835	4,831	4,826	4,833	4,831
P33	4,840	4,836	4,844	4,846	4,842
P34	4,838	4,834	4,841	4,844	4,839
P35	4,830	4,836	4,840	4,836	4,836
P36	4,836	4,842	4,841	4,833	4,838
P37	4,842	4,834	4,839	4,840	4,839
P38	4,833	4,832	4,825	4,827	4,829
P39	4,827	4,831	4,828	4,823	4,827
P3X	4,834	4,828	4,823	4,829	4,829

Tabela 84. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P31	8,26	8,20	8,26	8,25	8,24
P32	8,20	8,19	8,15	8,13	8,17
P33	8,09	8,07	8,09	8,02	8,07
P34	8,05	8,04	8,05	8,05	8,05
P35	8,02	8,03	8,02	8,04	8,03
P36	8,09	8,08	8,09	8,11	8,09
P37	8,08	8,07	8,07	8,06	8,07
P38	8,09	8,11	8,10	8,05	8,09
P39	8,20	8,19	8,18	8,20	8,19
P3X	8,04	8,07	7,98	8,04	8,03

Tabela 85. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,30 mm/s e 20% de deformação na altura.

				
P31	P32	P33	P34	P35
				
P36	P37	P38	P39	P3X

10.13 Anexo M

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com velocidade de deformação de 0,03 mm/s e uma redução de 20% na altura da amostra, em ensaios sem polimento intermediário e o registro fotográfico da evolução do desgaste provocado pela adesão de material do anel na ferramenta.

Tabela 86. Resultados complementares para velocidade de 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura sem polimento intermediário.

Ident.	zero-zero (mm)	H progr. (mm)	Força (10^4N)	Leitura (mm)	Tempo (s)	H real (mm)	Diferença (mm)
P11	152,57	149,53	22,25	148,05	15	4,855	0,06
P12	152,57	149,53	21,35	148,05		4,828	0,03
P13	152,57	149,53	21,38	148,05		4,818	0,02
P14	152,57	149,53	21,97	148,05		4,815	0,02
P15	152,57	149,53	21,91	148,05		4,818	0,02
P16	152,57	149,53	21,28	148,05		4,814	0,01
P17	152,57	149,53	21,56	148,05		4,816	0,02
P18	152,57	149,53	21,95	148,05		4,822	0,02
P19	152,57	149,53	21,85	148,04		4,811	0,01
P1X	152,57	149,53	21,89	148,05		4,806	0,01

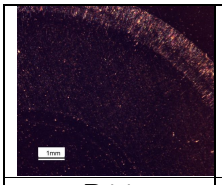
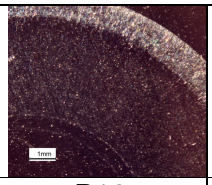
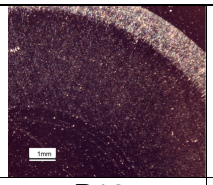
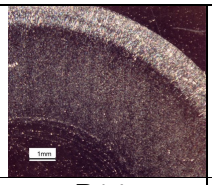
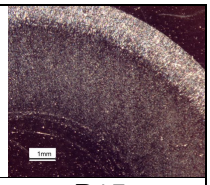
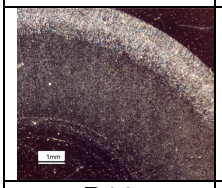
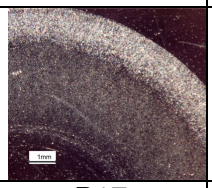
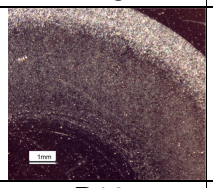
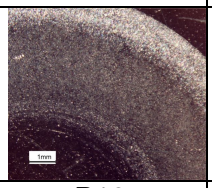
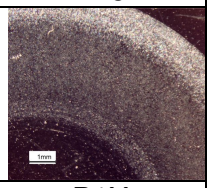
Tabela 87. Determinação da altura média final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	h1	h2	h3	h4	média
P11	4,864	4,844	4,849	4,863	4,855
P12	4,842	4,826	4,811	4,834	4,828
P13	4,824	4,799	4,820	4,830	4,818
P14	4,807	4,829	4,823	4,802	4,815
P15	4,809	4,832	4,828	4,803	4,818
P16	4,826	4,813	4,795	4,822	4,814
P17	4,820	4,830	4,815	4,800	4,816
P18	4,818	4,816	4,833	4,819	4,822
P19	4,805	4,827	4,817	4,796	4,811
P1X	4,789	4,814	4,820	4,800	4,806

Tabela 88. Determinação do diâmetro interno médio final (mm) da amostra depois do ensaio.

Ident.	df1	df2	df3	df4	média
P11	8,15	8,13	8,08	8,05	8,10
P12	8,08	8,07	8,08	8,08	8,08
P13	8,05	8,07	8,06	8,05	8,06
P14	8,10	8,10	8,09	8,09	8,10
P15	8,01	8,02	8,02	8,00	8,01
P16	8,00	8,01	8,02	8,02	8,01
P17	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02
P18	7,92	7,91	7,92	7,91	7,92
P19	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91
P1X	7,93	7,94	7,93	7,94	7,94

Tabela 89. Documentação da evolução da marca de desgaste para ensaios com vel. 0,03 mm/s e 20% de deformação na altura.

				
P11	P12	P13	P14	P15
				
P16	P17	P18	P19	P1X

10.14 Anexo N

Tabelas utilizadas para gerar os gráficos de perfis de dureza do item 6.3.

A Tabela 90 mostra o anel deformado para o primeiro ensaio da série sem polimento intermediário, com velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação na altura da amostra. Dureza medida com carga de 490,3 mN e penetrador Vickers.

Tabela 90. Dureza medida na linha média da altura da primeira amostra.

Dureza $HV_{0,05}$							
Posição	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**
0,1	228,3	2,3	252,8	4,5	266,5	6,7	265,1
0,2	243,8	2,4	273,8	4,6	263,7	6,8	291,0
0,3	259,5	2,5	246,3	4,7	258,1	6,9	236,5
0,4	237,7	2,6	311,5	4,8	291,0	7,0	275,3
0,5	258,1	2,7	260,9	4,9	270,9	7,1	263,7
0,6	226,1	2,8	245,0	5,0	255,4	7,2	243,8
0,7	203,4	2,9	248,9	5,1	254,1	7,3	295,9
0,8	248,9	3,0	275,3	5,2	262,3	7,4	272,3
0,9	234,1	3,1	251,5	5,3	275,3	7,5	247,6
1,0	248,9	3,2	251,5	5,4	263,7	7,6	245,0
1,1	226,1	3,3	318,9	5,5	248,9	7,7	242,5
1,2	240,1	3,4	265,1	5,6	255,4	7,8	238,9
1,3	263,7	3,5	250,2	5,7	270,9	7,9	242,5
1,4	243,8	3,6	268,0	5,8	260,9	8,0	246,3
1,5	237,7	3,7	245,0	5,9	346,8	8,1	234,1
1,6	259,5	3,8	250,2	6,0	255,4	8,2	255,4
1,7	301,0	3,9	218,4	6,1	251,5	8,3	254,1
1,8	266,5	4,0	279,9	6,2	268,0	8,4	250,2
1,9	238,9	4,1	283,0	6,3	266,5	8,5	254,1
2,0	242,5	4,2	279,9	6,4	263,7	8,6	213,2
2,1	246,3	4,3	269,4	6,5	283,0	8,7	228,3
2,2	268,0	4,4	256,8	6,6	324,6	8,8	243,8

Tabela 91. Dureza medida a 0,05 mm abaixo da superfície da primeira amostra.

Dureza $HV_{0,05}$							
Posição	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**
0,1	-	2,3	215,3	4,5	284,5	6,7	213,2
0,2	-	2,4	220,6	4,6	238,9	6,8	223,8
0,3	-	2,5	222,7	4,7	263,7	6,9	197,8
0,4	217,4	2,6	217,4	4,8	256,8	7,0	196,9
0,5	254,1	2,7	217,4	4,9	269,4	7,1	224,9
0,6	269,4	2,8	275,3	5,0	234,1	7,2	221,7
0,7	273,8	2,9	250,2	5,1	252,8	7,3	231,8
0,8	263,7	3,0	246,3	5,2	240,1	7,4	222,7
0,9	255,4	3,1	245,0	5,3	262,3	7,5	219,5
1,0	243,8	3,2	266,5	5,4	247,6	7,6	241,3
1,1	283,0	3,3	246,3	5,5	236,5	7,7	242,5
1,2	265,1	3,4	240,1	5,6	230,6	7,8	240,1
1,3	242,5	3,5	252,8	5,7	191,5	7,9	262,3
1,4	241,3	3,6	240,1	5,8	200,5	8,0	240,1
1,5	248,9	3,7	241,3	5,9	209,2	8,1	234,1
1,6	254,1	3,8	259,5	6,0	176,0	8,2	250,2
1,7	256,8	3,9	227,2	6,1	194,2	8,3	222,7
1,8	219,5	4,0	248,9	6,2	185,6	8,4	-
1,9	246,3	4,1	275,3	6,3	231,8	8,5	-
2,0	236,5	4,2	236,5	6,4	208,2	8,6	-
2,1	211,2	4,3	256,8	6,5	195,9	8,7	-
2,2	217,4	4,4	246,3	6,6	212,2	8,8	-

Os espaços nos quais não existem dados na Tabela 91 são devido ao fato de a amostra sofrer embarrilamento, ou seja, após a deformação o diâmetro da borda é menor que o diâmetro do centro da amostra como pode ser observado na Figura 32.

Tabela 92. Dureza medida ao longo da altura da primeira amostra.

Dureza $HV_{0,05}$							
Posição	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**
0,05	176,8	0,8	224,9	1,6	254,1	2,4	234,1
0,1	207,2	0,9	263,7	1,7	246,3	2,5	221,7
0,2	203,4	1,0	260,9	1,8	231,8	2,6	206,3
0,3	208,2	1,1	255,4	1,9	254,1	2,7	209,2
0,4	247,6	1,2	279,9	2,0	230,6	2,8	217,4
0,5	243,8	1,3	260,9	2,1	240,1	2,85	194,2
0,6	269,4	1,4	262,3	2,2	252,8	-	-
0,7	229,4	1,5	251,5	2,3	212,2	-	-

Os espaços vazios na Tabela 92 são somente para manter a simetria da tabela.

10.15 Anexo O

Tabelas utilizadas para gerar os gráficos de perfis de dureza do item 6.3. Décimo ensaio da série de ensaios sem polimento intermediário, velocidade de 0,30 mm/s e 50% de deformação. Medida com carga de 490,3 mN e penetrador Vickers.

Tabela 93. Dureza medida na linha média da altura da décima amostra.

Dureza $HV_{0,05}$							
Posição	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**
0,1	217,4	2,5	278,3	4,9	276,8	7,3	251,5
0,2	223,8	2,6	251,5	5,0	294,2	7,4	258,1
0,3	219,5	2,7	278,3	5,1	294,2	7,5	237,7
0,4	220,6	2,8	247,6	5,2	278,3	7,6	250,2
0,5	227,2	2,9	269,4	5,3	259,5	7,7	278,3
0,6	223,8	3,0	272,3	5,4	269,4	7,8	255,4
0,7	224,9	3,1	247,6	5,5	283,0	7,9	289,3
0,8	212,2	3,2	268,0	5,6	275,3	8,0	234,1
0,9	222,7	3,3	268,0	5,7	276,8	8,1	232,9
1,0	245,0	3,4	281,4	5,8	318,9	8,2	256,8
1,1	251,5	3,5	270,9	5,9	318,9	8,3	270,9
1,2	242,5	3,6	242,5	6,0	284,5	8,4	272,3
1,3	262,3	3,7	269,4	6,1	348,9	8,5	222,7
1,4	245,0	3,8	292,6	6,2	262,3	8,6	283,0
1,5	250,2	3,9	286,1	6,3	291,0	8,7	255,4
1,6	234,1	4,0	260,9	6,4	256,8	8,8	259,5
1,7	223,8	4,1	269,4	6,5	269,4	8,9	229,4
1,8	243,8	4,2	260,9	6,6	322,7	9,0	245,0
1,9	246,3	4,3	268,0	6,7	251,5	9,1	269,4
2,0	255,4	4,4	292,6	6,8	248,9	9,2	263,7
2,1	272,3	4,5	273,8	6,9	308,0	9,3	238,9
2,2	262,3	4,6	262,3	7,0	242,5	9,4	270,9
2,3	272,3	4,7	297,6	7,1	259,5	9,5	-
2,4	279,9	4,8	269,4	7,2	247,6	9,6	-

Tabela 94. Dureza medida a 0,05 mm abaixo da superfície da décima amostra.

Dureza $HV_{0,05}$							
Posição	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**
0,1	-	2,5	304,4	4,9	207,2	7,3	273,8
0,2	-	2,6	266,5	5,0	229,4	7,4	254,1
0,3	-	2,7	289,3	5,1	202,4	7,5	287,7
0,4	246,3	2,8	326,5	5,2	189,9	7,6	268,0
0,5	262,3	2,9	299,3	5,3	204,3	7,7	259,5
0,6	260,9	3,0	291,0	5,4	205,3	7,8	279,9
0,7	230,6	3,1	302,7	5,5	192,4	7,9	279,9
0,8	245,0	3,2	273,8	5,6	216,3	8,0	234,1
0,9	251,5	3,3	273,8	5,7	198,7	8,1	294,2
1,0	262,3	3,4	266,5	5,8	186,4	8,2	283,0
1,1	248,9	3,5	243,8	5,9	195,1	8,3	251,5
1,2	247,6	3,6	248,9	6,0	202,4	8,4	266,5
1,3	251,5	3,7	223,8	6,1	210,2	8,5	247,6
1,4	263,7	3,8	237,7	6,2	218,4	8,6	291,0
1,5	255,4	3,9	245,0	6,3	205,3	8,7	245,0
1,6	270,9	4,0	238,9	6,4	232,9	8,8	273,8
1,7	273,8	4,1	246,3	6,5	243,8	8,9	254,1
1,8	273,8	4,2	231,8	6,6	251,5	9,0	287,7
1,9	287,7	4,3	227,2	6,7	255,4	9,1	268,0
2,0	287,7	4,4	224,9	6,8	247,6	9,2	259,5
2,1	265,1	4,5	218,4	6,9	259,5	9,3	279,9
2,2	273,8	4,6	201,5	7,0	259,5	9,4	279,9
2,3	292,6	4,7	201,5	7,1	245,0	9,5	-
2,4	273,8	4,8	214,3	7,2	238,9	9,6	-

Tabela 95. Dureza medida ao longo da altura da décima amostra.

Dureza $HV_{0,05}$							
Posição	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**	**Posição**	**Medida**
0,05	186,4	0,8	259,5	1,6	263,7	2,4	247,6
0,1	188,1	0,9	281,4	1,7	265,1	2,5	218,4
0,2	211,2	1,0	256,8	1,8	270,9	2,6	245,0
0,3	219,5	1,1	304,4	1,9	278,3	2,7	228,3
0,4	213,2	1,2	301,0	2,0	248,9	2,8	200,5
0,5	224,9	1,3	255,4	2,1	252,8	2,9	189,8
0,6	255,4	1,4	289,3	2,2	238,9	2,95	200,5
0,7	251,5	1,5	308,0	2,3	210,2	-	-

10.16 Anexo P – Manual de Operação da Prensa.

Este é um guia prático para programação e operação da prensa utilizada nos ensaios.

Ligando a máquina.

Ligar o painel Elétrico da máquina na chave de liga/desliga que está localizada na lateral do painel como indicado pela flecha vermelha na Figura 55.

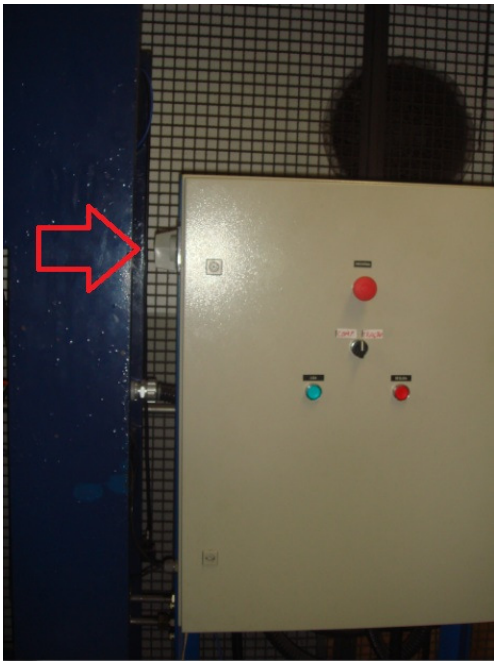


Figura 55. Painel de elétrica da prensa, a flecha vermelha indica a chave de liga/deliga na lateral do painel.

Retirar o calço de segurança e os enchimentos de dentro do porta ferramenta, deixando a máquina livre para operar. Os enchimentos do porta ferramenta são colocados para evitar que sujeira fique depositada dentro do porta ferramenta.

Figura 56. Máquina livre para operação. Sem o calço de segurança e os enchimentos do porta ferramentas.

Pelo fato de a prensa ficar localizada fora do laboratório, em uma área de livre circulação e protegida somente por uma estrutura feita com grades assemelhando-se a uma “gaiola”, o computador que contém o software que controla a prensa é guardado dentro do armário que está em frente a máquina.

O computador deve ser retirado de dentro do armário e montado para que possa controlar a máquina. A comunicação entre o comando da prensa e o computador é feita por meio de um cabo de rede padrão Ethernet com crossover, este cabo está fixado na estrutura da “gaiola” e após o computador estar montado este cabo deve ser ligado na placa de rede do computador.

Por se tratar de uma prensa hidráulica, antes de ligar a bomba hidráulica do sistema é muito importante verificar o nível do reservatório de óleo hidráulico, caso este esteja baixo deve ser completado com óleo hidráulico Lubrax Hydra 68. Deve-se também observar todas as conexões e mangueiras do sistema que interligam o reservatório e o pistão da prensa, procurando por vazamentos. Caso seja detectado algum vazamento a mangueira deve ser trocada por uma mangueira de especificação similar ou no caso das conexões, estas devem ser reapertadas.

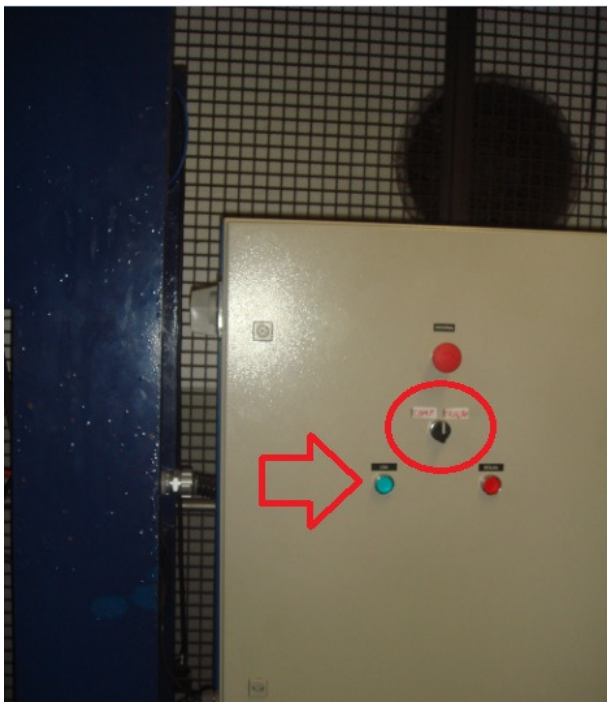


Figura 57. Chave seletora para ensaios de tração ou compressão e botoeira de liga/desliga do sistema hidráulico.

Para ensaios de compressão a chave seletora de modo de operação da prensa deve estar na posição tração ou na posição intermediária, caso contrário a chave deve estar na posição tração. A Figura 57 apresenta em destaque dentro do circulo a chave seletora de modo de operação da prensa e indicada com uma flecha o botão de liga (verde) do sistema hidráulico, ao lado do botão de desliga (vermelho). Acima do círculo da chave seletora de módulo está localizada a botoeira de parada emergencial.

Assim que o computador é inicializado, é necessária uma senha para ser feito o login no usuário Enio. A senha é: lfs. Na área de trabalho do computador está localizada uma planilha chamada Controle de Utilização, nela devem ser inseridos dados como: data, início e término da utilização, tempo total de utilização, descrição do ensaio, força máxima dos ensaios e número de peças conformadas. Esta planilha deve ser preenchida todas as vezes que a prensa for utilizada para se ter um controle do número de horas de trabalho da prensa.

O software de controle da máquina é o HMI.app que também se encontra na área de trabalho do computador.

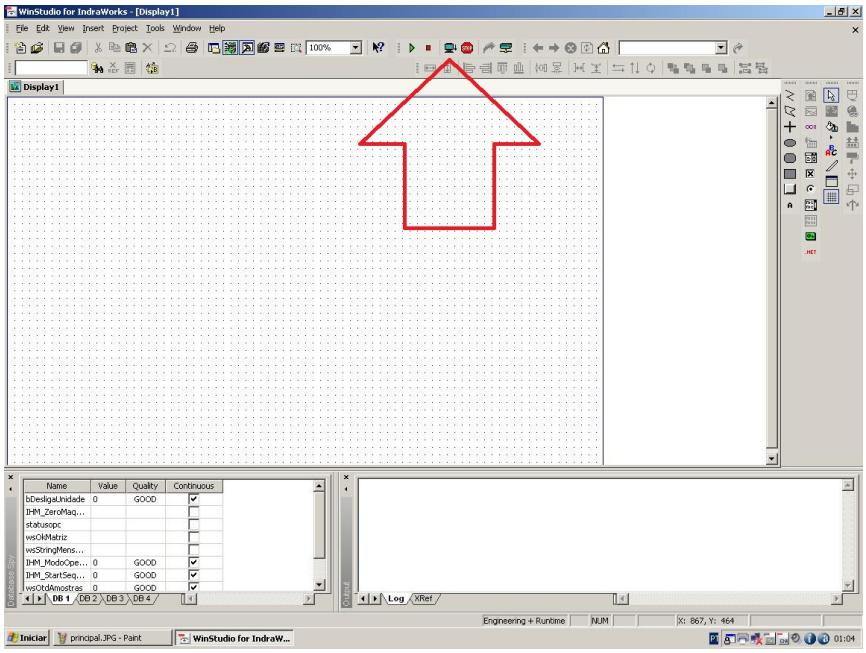


Figura 58. Tela inicial do software de controle da prensa.

Para iniciar a interface de controle deve-se utilizar o ícone indicado na tela da Figura 58.

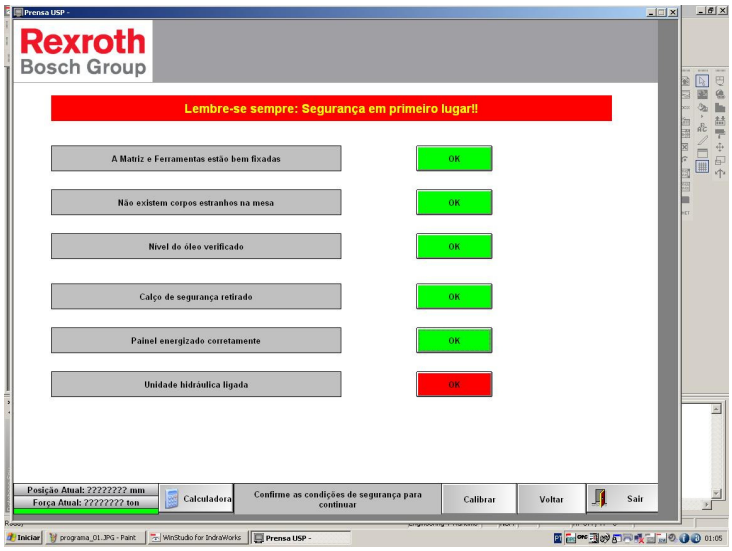


Figura 59. Tela inicial do programa de controle.

Depois de inicializado o programa a primeira tela apresentada é a da Figura 59, os itens devem ser selecionados mudando sua cor de vermelho para verde, para que o acesso ao programa de controle seja efetivado.

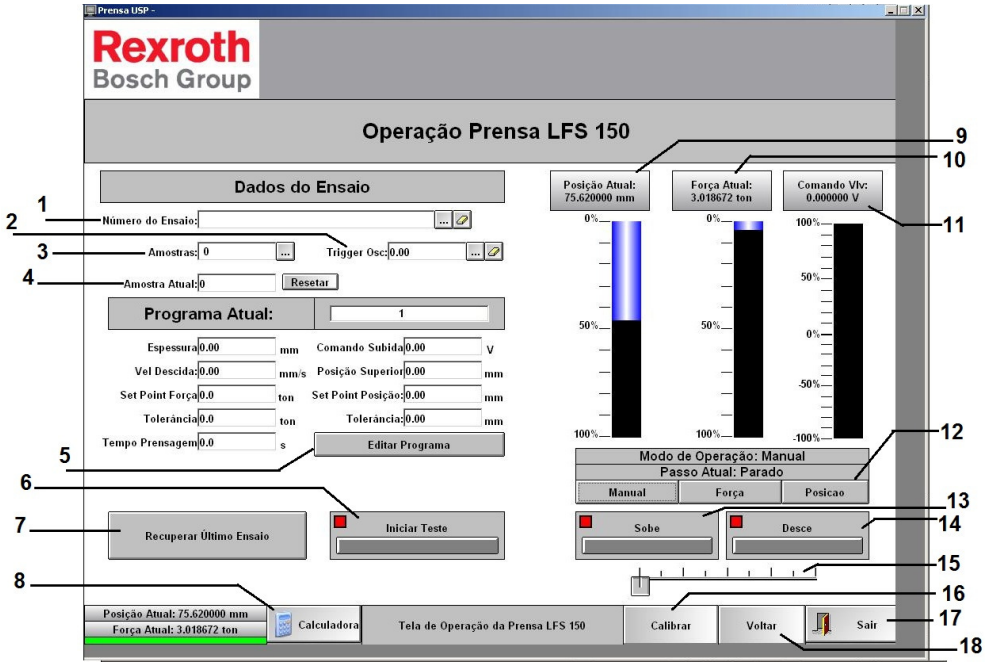


Figura 60. Detalhamento da tela principal do software de controle.

A Figura 60 apresenta o detalhamento da tela principal do software de controle da prensa:

1 – Identificação por número do Ensaio.

2 – Gatilho para início da aquisição de dados pelo software. Este dado leva em consideração a leitura do LVDT.

3 – Amostras: Número de ensaios programados.

4 – Número atual entre as programadas no item 3.

5 – Configuração dos parâmetros do ensaio.

6 – Botão de início dos testes.

7 – Botão para recuperação as informações coletadas no ensaio.

8 – Atalho para a calculadora.

9 – Indicação da leitura instantânea da posição informada pelo LVDT.

10 - Indicação da leitura instantânea da força informada pela célula de carga.

11 - Indicação da leitura instantânea da tensão aplicada na válvula responsável por comandar o pistão hidráulico.

12 – Modo de operação da prensa: manual, controle de força ou controle de posição.

13 – Comando de subida para a prensa operando em manual.

14 – Comando de descida para a prensa operando em manual.

15 – Controle de proporcionalidade para velocidade, quanto mais para a direita maior a velocidade de deformação da prensa.

16 – Botão que permite a calibração do LVDT da prensa.

17 – Botão que finaliza e fecha o programa da prensa.

18 – Botão voltar têm a função de voltar da tela de calibração ou da tela de programação para a tela de operação

O primeiro passo para realização de um ensaio é a calibração do LVDT.

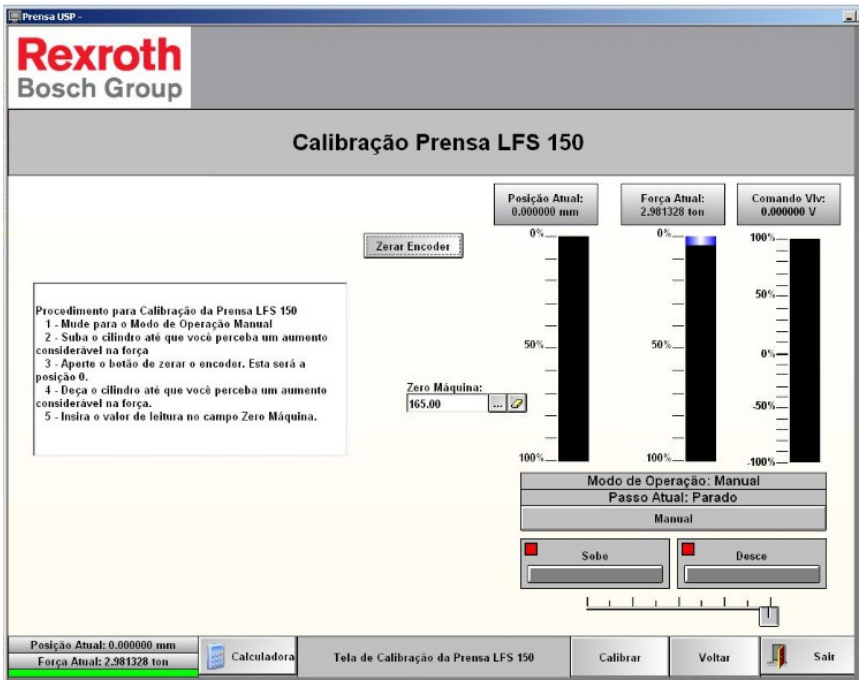


Figura 61. Tela de calibração do LVDT.

A Figura 61 ilustra a tela que será apresentada caso o botão 16 – Calibrar seja pressionado. Para a calibração do LVDT, deve-se selecionar o módulo manual, único disponível no item 12 e aumentar a velocidade de operação deslocando o seletor do item 15, todo para a direita e movimentar o pistão hidráulico até a mais alta posição permitida, utilizando o botão "zerar encoder" deve-se referir este ponto como sendo o ponto de deslocamento zero e o deslocamento máximo será o valor indicado no combo box Zero Máquina, este último valor será calibrado para cada um dos pares das ferramentas, mas por enquanto deve permanecer com o valor original.

Fato importante registrado durante os estudos deste trabalho: notou-se o óleo hidráulico da prensa deve ser aquecido antes de o ensaio ser realizado, pois, assim, a prensa realiza os ensaios com maior exatidão no posicionamento, quando operados em modo de controle de posição. Neste aquecimento a temperatura do óleo hidráulico deve estar entre 36 a 38°C esta temperatura pode ser identificada pelo termômetro posicionado na parte superior do sistema hidráulico. Para realizar o aquecimento do sistema, a máquina deve ser movimentada com velocidade de 0,03 mm/s. Para esta velocidade a válvula de controle de deslocamento do pistão

hidráulico tem uma perda de carga alta, o que resulta no aquecimento do óleo. Após este aquecimento o ensaio pode ser iniciado.

Calibração do zero-máquina.

Reposicionar o calço de segurança na mesa da prensa.

Colocar o par de ferramentas para o dado ensaio, tomando cuidado para não sujar a superfície da ferramenta. Primeiro deve-se posicionar a ferramenta superior, depois a ferramenta inferior.

Depois de colocada a ferramenta na posição do ensaio, uma folha de papel deve ser colocada entre as superfícies das ferramentas para a realização da calibração do zero máquina sem danificar as superfícies, deve-se lembrar de retirar o calço de segurança antes de iniciar o ensaio.

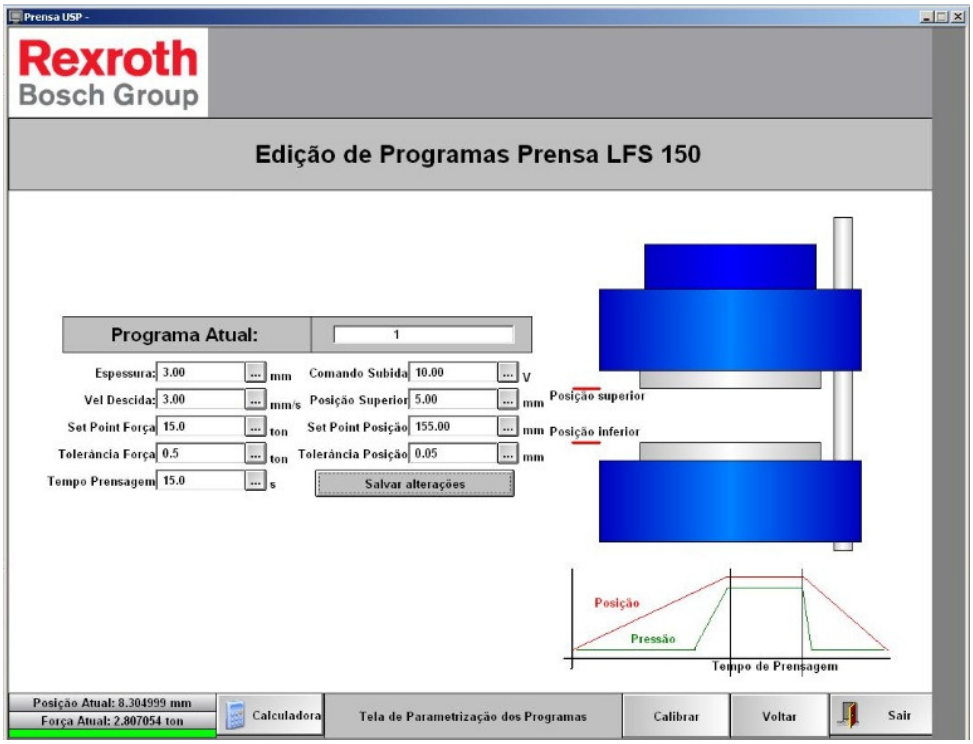


Figura 62. Programa para calibração do zero máquina, ou seja, este é o maior deslocamento possível para a máquina com um determinado par de ferramentas.

Com o auxílio do item 5 da Figura 60, “Editar programa”, pode se configurar o programa da Figura 62, definindo uma velocidade de descida de 3 mm/s (velocidade

máxima da prensa) e um set point de força de 15 toneladas, adotado como referência e utilizado nos diferentes pares de matrizes. Os demais parâmetros foram adotados como valores de referência. A seguir descreve-se cada um destes parâmetros:

Espessura: 3,00 mm. Define a espessura do corpo de prova que será ensaiado, em modo Força a prensa desloca-se em alta velocidade até o valor do zero máquina menos a espessura, quando chega a este valor a prensa supostamente encostaria na superfície da amostra, a partir deste momento a prensa desloca-se lentamente controlando a força aplicada. Este campo fica inativo quando a máquina estiver operando em modo de controle posição.

Velocidade de descida: 3,00 mm/s. Define qual a velocidade a prensa irá se deslocar quando estiver operando em modo de controle de deslocamento.

Set point força: 15,0 ton. Define qual a força aplicada que será o objetivo quando a máquina operar em modo de controle de força. Este parâmetro torna-se inativo no modo de controle de deslocamento.

Tolerância da força: 0,5 ton. Define qual a máxima variação tolerada quando o ensaio de controle de força for realizado.

Tempo Prensagem: 15 s. Define o tempo que a prensa irá ficar estática durante a realização do ensaio para que haja acomodação do material deformado.

Comando de Subida: 10 V. Define qual a velocidade de retorno da prensa, porém o valor deve ser inserido em volts. Zero volts seria 0 mm/s de deslocamento e dez volts a velocidade máxima de deslocamento de 3,5 mm/s.

Posição Superior: 5,00 mm. Define a posição indicada pelo LVDT, na qual a máquina deve permanecer ao encerrar o ensaio.

Set Point de posição: 155 mm. Define qual a posição que a máquina terá como objetivo quando estiver operando em modo de controle de posição. Este parâmetro fica inutilizado quando a máquina opera em modo de controle de força.

Tolerância de posição: 0,05 mm. Define qual a máxima variação tolerada quando o ensaio de controle de deslocamento for realizado.

Ao clicar no botão de Salvar alterações, o programa será definido e retorna-se a tela da Figura 60.

Mantendo-se o papel entre as ferramentas, seleciona-se o modo de operação para controle de força e em seguida com o auxílio do botão Iniciar teste do item 6 da Figura 60 inicia-se a determinação do zero máquina.

Ao final do deslocamento as matrizes irão se encontrar e serão pressionadas uma contra a outra até alcançar a força de 15 toneladas. A leitura realizada no item 9 (Posição Atual) é o valor que deve ser inserido no Zero Máquina da tela de calibração da Figura 61.

Para realizar a configuração do programa de controle de posição, deve-se realizar os mesmos passos apontados para a configuração da calibração, atentando-se para a seleção do módulo de controle estar em Posição (item 12).

Configurando um ensaio realizado neste ensaio.

Para cada ensaio realizado o zero-máquina, representado nas tabelas de dados deste trabalho como sendo zero-zero, foi reavaliado a cada novo par de ferramentas.

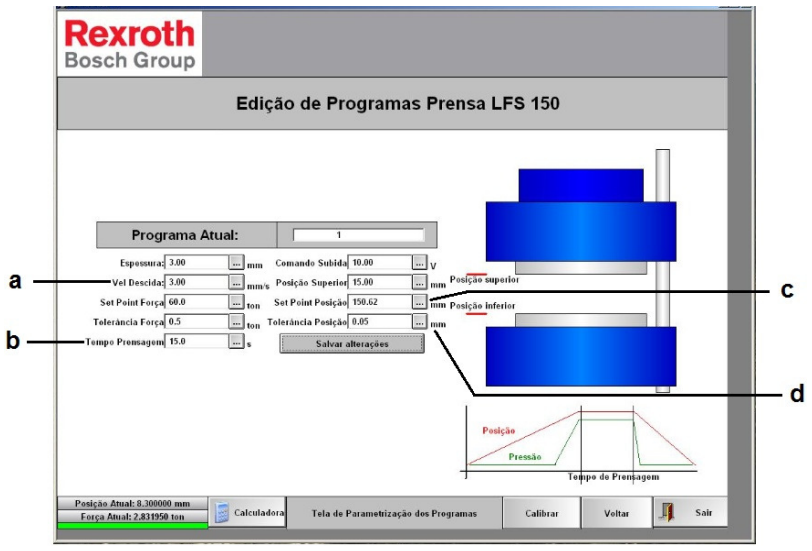


Figura 63. Exemplo de programa utilizado nos ensaios.

Na Figura 63 estão destacados os principais itens que devem ser configurados para os ensaios realizados.

Item a – Velocidade de descida da prensa: deve seguir a especificação de cada conjunto de ensaios.

Item b – Tempo de prensagem: este valor foi definido como sendo uma acomodação de 15 s, logo, deve permanecer constante nos ensaios.

Item c – Set point de posição: será programado segundo o grau de deformação desejado e levando em consideração a calibração do zero máquina para cada par de ferramentas.

Item d – Tolerância de Posição: em uma prospecção prévia verificou-se que o menor valor de tolerância alcançado por esta prensa é de 0,05 mm. Assim, este valor foi definido e padronizado para todos os ensaios.

Captura de dados.

Para a captura dos dados coletados durante o ensaio é muito importante definir primeiro a posição indicado pelo LVDT, na qual a captura de dados será iniciada. Esta configuração deve ser feita no item 2 da Figura 60 e o valor inserido corresponde ao valor do LVDT ao qual deseja-se o início da captura dos dados. Após iniciada a captura, serão coletados 5 minutos de dados a uma frequência de 10 Hz. Terminada a captura dos dados, deve-se acionar o botão do item 7 (Recuperar último ensaio) da Figura 60. O arquivo com os dados captados será salvo sob o nome: data.txt no diretório D:\PrensaUSP\FTP. É muito importante renomear este arquivo, pois, caso seja feita outra recuperação de dados o arquivo será substituído pela nova leitura.

O arquivo de leitura é um arquivo de bloco de notas que contém três colunas: a primeira é o tempo de aquisição em milissegundos, a segunda é a posição da prensa lida no LVDT para o referido tempo e a terceira coluna é a força lida na célula de carga para o referido tempo de aquisição.

Encerrado o ensaio, o pistão hidráulico deve ser posicionado em uma altura de aproximadamente 5 mm possibilitando o posicionamento do calço de segurança, o sistema hidráulico deve ser desligado e em seguida desligar o comando elétrico da prensa. A máquina deve ser limpa, o enchimento de proteção deve ser recolocado dentro do porta ferramenta para evitar que ocorra depósito e acúmulo de sujeira.

O técnico responsável pelo laboratório deve ser chamado, e inspecionará as condições que o equipamento foi deixado, caso esteja tudo correto, o equipamento deverá ser coberto com uma lona para melhor protegê-lo.

A planilha de horas deve ser atualizada, salva e encerrada, o computador deve ser desligado e guardado dentro do armário. A “gaiola” deve ser trancada e a chave entregue ao técnico responsável pelo laboratório.

10.17 Anexo Q

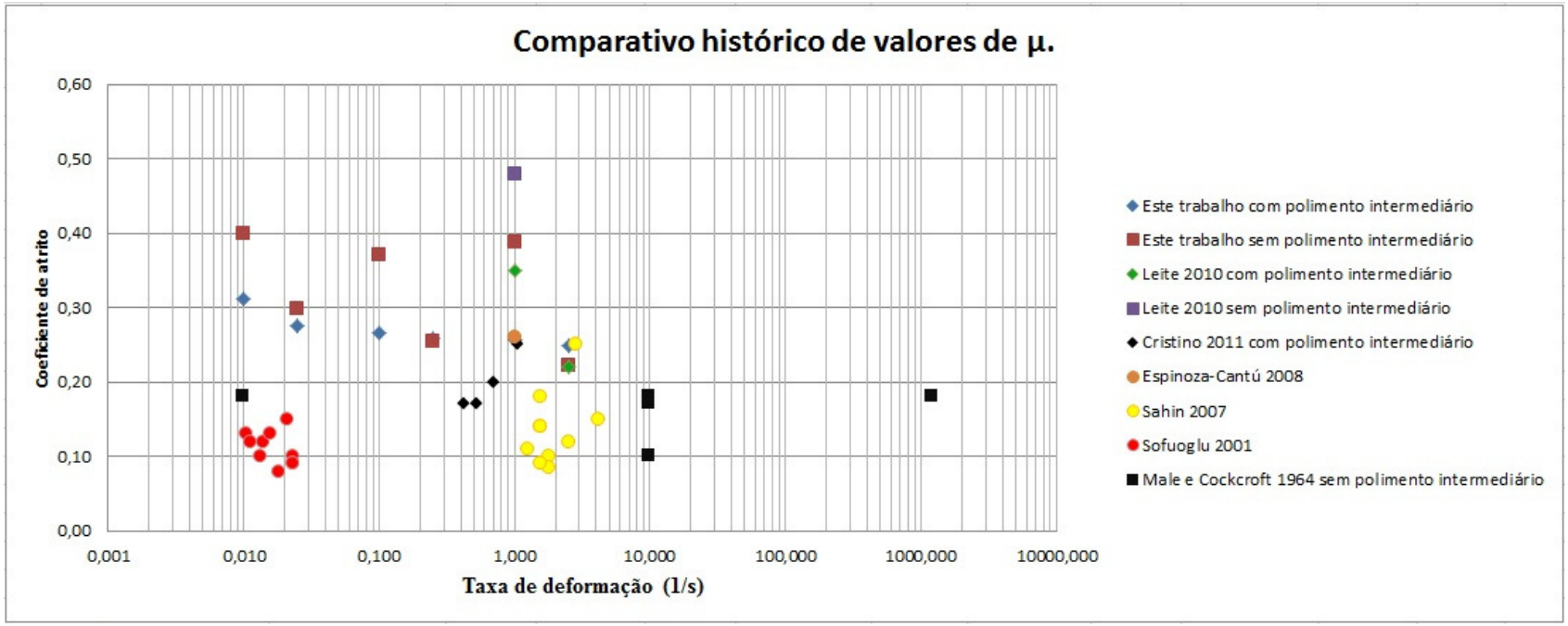


Figura 64. Comparação histórica do coeficiente de atrito em função da taxa de deformação.

A Figura 64 ilustra um comparativo entre os dados determinados neste trabalho e os dados encontrados na literatura pesquisada.

Observa-se que os resultados de coeficiente de atrito não apresentam uma concentração de resultados evidente. Estes resultados tem a tendência de serem coerentes quando observados separadamente por autor, como por exemplo, a concentração de resultados de Sahin 2007 ou de Sofuoglu 2001. Uma das hipóteses para esta aglomeração dividida por autor pode ser o fato de os tribo-pares de cada um dos autores serem diferentes.

Por outro lado, como visto neste trabalho a velocidade de deformação tem uma interação independente do grau de deformação da amostra, logo a comparação dos resultados utilizando a taxa de deformação pode não evidenciar resultados importantes como o que foi visto neste trabalho para ensaios sem polimento intermediário, no qual o aumento do grau de deformação de 20% para 50% apresentou uma mudança significativa do valor do coeficiente de atrito.

A Tabela 96 apresenta a série de dados utilizados no gráfico da Figura 64.

Tabela 96. Tabela com os valores usados no gráfico da Figura 64.

Taxa de deformação	Replicas	μ	Polimento intermediário	Tribo Par	Referência
1,000	10	0,26	Com polimento	1020-Aço Ferramenta	Este Trabalho
0,100		0,27			
0,010		0,31			
2,500		0,25			
0,250		0,26			
0,025		0,28			
1,000		0,39	Sem polimento		
0,100		0,37			
0,010		0,40			
2,500		0,22			
0,250		0,26			
0,025		0,30			
1,000	1	0,35	Com polimento	1020-H13	Leite 2010
2,500		0,22			
1,000		0,48	Sem polimento		
1,063	2	0,25	Com polimento	Chumbo-AISI 316L	Cristino 2011
0,708		0,20			
0,531		0,17			
0,425		0,17			
1,00		0,26		AISI 1006-Aço	Espinoza 2008
2,840		0,25		AISI 1020-H13	Sahin 2007
1,563		0,18			
2,500		0,12		SAE D2-H13	
1,563		0,14			
4,167		0,15		EN60SiCr8-H13	
1,563		0,14			
1,786		0,10		Aluminio-H13	
1,250		0,11			
1,786		0,09		CuZn60Pb2-H13	
1,563		0,09			
0,010		0,13		Alumínio-Acrílico	Sofuoglu 2001
0,014		0,12			
0,023		0,10			
0,013		0,10		Cobre-Acrílico	
0,023		0,09			
0,021		0,15		Bronze-Acrílico	
0,016		0,13			
0,011		0,12			
0,023		0,09		Latão-Acrílico	
0,018		0,08			
0,01	Mínimo 6	0,18	Sem polimento	Alumínio-Aço 1%C e 2%Mn	Male e Cockcroft 1964
10		0,18	Sem polimento		
1200		0,18	Sem polimento		
10		0,17	Sem polimento	Aço baixo carbono-Aço 1%C e 2%Mn	
10		0,10	Sem polimento	Latão 70:30-Aço 1%C e 2%Mn	
10		0,17	Sem polimento	Cobre-Aço 1%C e 2%Mn	