

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ESTUDO DO EFEITO DA CARGA NO COMPORTAMENTO AO  
DESGASTE DE FERRAMENTAS PARA CONFORMAÇÃO A FRIO

Felipe Barros Delphino

SÃO PAULO  
2010

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DO EFEITO DA CARGA NO COMPORTAMENTO AO  
DESGASTE DE FERRAMENTAS PARA CONFORMAÇÃO A FRIO**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Felipe Barros Delphino

Orientador: Professor Doutor Roberto Martins de Souza

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

SÃO PAULO  
2010

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Delphino, Felipe Barros**

**Estudo do efeito da carga no comportamento ao desgaste de ferramentas para conformação a frio com e sem revestimento / F.B. Delphino. -- São Paulo, 2010.**

**p. 91**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1. Tribologia 2. Conformação mecânica 3. Revestimento de superfícies I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.**

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de agradecer inicialmente ao Professor Doutor Roberto Martins de Souza que me aceitou ser meu orientador neste trabalho de formatura e sempre foi muito atencioso e dedicado ao longo de todo o trabalho. E me orgulho muito de poder ter sido seu orientado e conseguir um contato um pouco mais intenso com esse grande mestre.

Agradeço também ao Marcos Aurélio Mendes que sempre esteve disposto a me auxiliar e responder as minhas dúvidas, sendo peça fundamental para a realização do trabalho.

À toda a equipe do LFS com agradecimento especial aos técnicos Francisco e Leandro que me foram muito dispostos a me auxiliar.

À Dr. João Alcino de Andrade Martins pessoa com muito um conhecimento ímpar no ramo de instrumentação e sempre muito disposta a auxiliar.

Ao colega de graduação Leandro Leite que se dispôs a operar o torno durante os ensaios.

À minha irmã pessoa muito inteligente e dedicada na qual sempre procuro me espelhar.

Aos meus pais pelo exemplo de luta e determinação que me transmitiram e de quem me orgulho tanto.

## **RESUMO**

Este trabalho dedica-se ao estudo do efeito da carga no comportamento ao desgaste de ferramentas para conformação a frio. Para tanto, inicialmente é feita uma descrição do principal fenômeno (galling) que leva o fim da vida dessas ferramentas. Em seguida, é estudado um ensaio que visa reproduzir o mecanismo de desgaste dessas ferramentas em campo. Uma parte fundamental do trabalho é a instrumentação do porta ferramentas necessário para medição de forças nesse ensaio. Finalmente, o ensaio em si foi feito não com ferramentas em condições habituais de uso, mas com ferramentas sem tratamento térmico e com dureza muito próxima à do contracorpo utilizado. Com isso, observou-se quebra da ferramenta logo no início do teste para todas as cargas utilizadas.

Palavras Chave: Tribologia, Revestimentos e Conformação Mecânica.

## **ABSTRACT**

This work is dedicated to the study of the effect of load on the wear behavior of tools for cold forming. To this end, this work initially describes the major phenomenon (Galling) that is responsible for the end of life of these tools. Then, a laboratory test is studied, aiming to reproduce the use of these tools in the field. A key part of work is the instrumentation of the tool holder, which was used to measure the forces in this experiment. Finally, the test itself was conducted with tools not in common conditions of use, but with tools without heat treatment and hardness very close to the counterbody applied. As expected results have indicated the breakage of the tool early in the test for all loads used.

Key words: Tribology, Coating e Conformation Mechanics.

# SUMÁRIO

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE TABELAS

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE MATERIAL TÉCNICO.....</b>	<b>2</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1 Instrumentação do Porta Ferramentas.....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Calibração do Porta Ferramentas .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2.1 Eixo X .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.2 Eixo Y .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.3 Eixo Z .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3 Parametrização do Ensaio .....</b>	<b>46</b>
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1 Resultados dos Ensaios na Ferramenta .....</b>	<b>51</b>
<b>5.2 Resultados no Contracorpo .....</b>	<b>71</b>
<b>5.3 Resultados das Forças Medidas.....</b>	<b>73</b>
<b>5.4 Análises dos Resultados.....</b>	<b>84</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO – DESENHO DE FABRICAÇÃO DA FERRAMENTA.....</b>	<b>91</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de desgastes por deslizamento propostos por Budinsk (2003).....	3
Figura 2 - Esquema ensaio de deslizamento de Andreasen, Bay e Chiffre (1998). ....	4
Figura 3 - Resultados do ensaio de Andreasen, Bay e Chiffre (1998).....	4
Figura 4 - Destaque para o perfil de rugosidade iniciado em 60 mm dos resultados do ensaio de Andreasen, Bay e Chiffre (1998). ....	5
Figura 5 - Esquema de montagem de Mendes (2009).....	5
Figura 6 - Esquema de contato do ensaio de Mendes (2009).....	6
Figura 7 - Forças de atrito medidas no LFS por Mendes (2009).....	7
Figura 8 - Forças de atrito medidas na FSA por Mendes (2009).....	8
Figura 9 - Média das forças de atrito pela profundidade de penetração de Mendes (2009).....	9
Figura 10 - Esquema do ensaio de Claudin (2008).....	10
Figura 11 - Gráficos com variação da pressão e da velocidade de deslizamento por Claudin (2008). ....	11
Figura 12 - Barra de Aço AISI M2.....	15
Figura 13 - Barra de Aço AISI M2 - aproximação.....	15
Figura 14 - Certificado de Qualidade da Barra de Aço AISI M2.....	16
Figura 15 - Micrografia com ampliação de 100 vezes. ....	17
Figura 16 - Micrografia com ampliação de 200 vezes. ....	17
Figura 17 - Micrografia com ampliação de 500 vezes. ....	18
Figura 18 - Micrografia com ampliação de 1000 vezes. ....	18
Figura 19 - Torno do LFS. ....	19
Figura 20 - Vista Interna do torno do LFS – Lado Direito. ....	19
Figura 21 - Vista Interna do torno do LFS – Lado Esquerdo.....	20
Figura 22 - Detalhe do Painel de Controle do Torno do LFS.....	20
Figura 23 - Porta Ferramentas: Vista 1.....	21
Figura 24 - Porta Ferramentas: Vista 2.....	22
Figura 25 - Porta ferramenta com célula para extensômetro em destaque. ....	23
Figura 26 - O extensômetro e suas camadas de What`s a Strain Gage? (2005). ....	23
Figura 27 - Elongamento ou achatamento conforme o esforço de What`s a Strain Gage? (2005).....	24
Figura 28 - Ponte de Wheatstone de What`s a Strain Gage? (2005).....	25
Figura 29 - Ponte de Wheatstone com quatro extensômetros de What`s a Strain Gage? (2005).....	26
Figura 30 - Eixos de medição de força do porta ferramentas. ....	27
Figura 31 - Extensômetros utilizados na instrumentação. ....	28
Figura 32 - Extensômetro individual.....	29
Figura 33 - Extensômetro coberto com a folha de teflon.....	29
Figura 34 - Extensômetro colado.....	30

Figura 35 - Conjunto de terminais. ....	30
Figura 36 - Porta ferramentas com os extensômetros e os terminais colados e com os fiso de formação da ponte e os fios dos extensômetros soldados. ....	31
Figura 37 - Célula fechado com cera. ....	32
Figura 38 - Forças de atrito medidas no LFS de Mendes (2009). ....	33
Figura 39 - Aquisitor ADS 2000. ....	35
Figura 40 - Módulo de expansão AI-2161. ....	35
Figura 41 - Configuração de ponte completa. ....	36
Figura 42 - Chave JEXC. ....	37
Figura 43 - Conjunto aquisitor e microcomputador. ....	38
Figura 44 - Alteres para calibração. ....	39
Figura 45 - Dinamômetro Instrutherm modelo DD-300. ....	40
Figura 46 - Calibração eixo X. ....	41
Figura 47 - Gráfico do resultado da calibração do eixo X. ....	42
Figura 48 - Calibração eixo Y. ....	43
Figura 49 - Gráfico do resultado da calibração do eixo Y. ....	44
Figura 50 - Calibração eixo Z. ....	45
Figura 51 - Gráfico do resultado da calibração do eixo Z. ....	46
Figura 52 - Contracorpos usados nos ensaios. ....	47
Figura 53 - Ferramentas usadas nos ensaios. ....	48
Figura 54 - Legenda usada nas imagens da ferramenta por Mendes (2009). ....	51
Figura 55 - Parte superior da ferramenta na região do primeiro ensaio. ....	52
Figura 56 - Parte intermediária da ferramenta na região do primeiro ensaio. ....	53
Figura 57 - Parte inferior da ferramenta na região do primeiro ensaio. ....	54
Figura 58 - Parte superior da ferramenta na região do segundo ensaio. ....	55
Figura 59 - Parte intermediária da ferramenta na região do segundo ensaio. ....	56
Figura 60 - Parte inferior da ferramenta na região do segundo ensaio. ....	57
Figura 61 - Imagem da ferramenta na região do terceiro ensaio. ....	58
Figura 62 - Imagem da ferramenta na região do quarto ensaio. ....	59
Figura 63 - Parte superior da ferramenta na região do quinto ensaio. ....	60
Figura 64 - Parte intermediária da ferramenta na região do quinto ensaio. ....	61
Figura 65 - Parte intermediária da ferramenta na região do quinto ensaio. ....	62
Figura 66 - Parte superior da ferramenta na região do sexto ensaio. ....	63
Figura 67 - Parte intermediária da ferramenta na região do sétimo ensaio. ....	64
Figura 68 - Parte inferior da ferramenta na região do sétimo ensaio. ....	65
Figura 69 - Parte superior da ferramenta na região do sétimo ensaio. ....	66
Figura 70 - Parte intermediária da ferramenta na região do sétimo ensaio. ....	67
Figura 71 - Parte inferior da ferramenta na região do sétimo ensaio. ....	68
Figura 72 - Parte superior da ferramenta na região do oitavo ensaio. ....	69
Figura 73 - Parte intermediária da ferramenta na região do oitavo ensaio. ....	70
Figura 74 - Parte inferior da ferramenta na região do oitavo ensaio. ....	71
Figura 75 - Primeira imagem do contracorpo após ensaio. ....	72
Figura 76 - Segunda imagem do contracorpo após ensaio. ....	72

<b>Figura 77 - Terceira imagem do contracorpo após ensaio. ....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 78 - Gráfico da força no eixo X durante o primeiro ensaio.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 79 - Gráfico da força no eixo Y durante o primeiro ensaio.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 80 - Gráfico da força no eixo Z durante o primeiro ensaio.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 81 - Gráfico da força no eixo X durante o segundo ensaio.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 83 - Gráfico da força no eixo Z durante o segundo ensaio.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 84 - Gráfico da força no eixo X durante o terceiro ensaio. ....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 85 - Gráfico da força no eixo Y durante o terceiro ensaio. ....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 86 - Gráfico da força no eixo Z durante o terceiro ensaio. ....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 87 - Gráfico da força no eixo X durante o quarto ensaio.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 88 - Gráfico da força no eixo Y durante o quarto ensaio.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 89 - Gráfico da força no eixo Z durante o quarto ensaio. ....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 90 - Gráfico da força no eixo X durante o quinto ensaio. ....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 91 - Gráfico da força no eixo Y durante o quinto ensaio. ....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 92 - Gráfico da força no eixo Z durante o quinto ensaio. ....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 93 - Gráfico da força no eixo X durante o sexto ensaio. ....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 94 - Gráfico da força no eixo Y durante o sexto ensaio. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 95 - Gráfico da força no eixo Z durante o sexto ensaio.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 96 - Gráfico da força no eixo X durante o sétimo ensaio. ....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 97 - Gráfico da força no eixo Y durante o sétimo ensaio. ....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 98 - Gráfico da força no eixo Z durante o sétimo ensaio. ....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 99 - Gráfico da força no eixo X durante o oitavo ensaio.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 100 - Gráfico da força no eixo Y durante o oitavo ensaio. ....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 101 - Gráfico da força no eixo Z durante o oitavo ensaio. ....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 102 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 3.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 103 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 4.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 104 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 2.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 105 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 7.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 106 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 5.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 107 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 8.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 108 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 1.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 109 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 6.....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Macro dureza do aço AISI M2 utilizando carga de 30 Kgf.....</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 2 - Micro dureza do aço AISI M2 utilizando carga de 100 gf.....</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 3 - Forças de calibração. ....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 4 - Tensão de alimentação (excitação) para a ponte.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 5 - Chaveamento de ganho.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 6 - Resultados calibração do eixo X. ....</b>	<b>41</b>
<b>Tabela 7 - Resultados calibração do eixo Y. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 8 - Resultados calibração do eixo Z. ....</b>	<b>45</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A conformação mecânica é um dos processos de importância fundamental na indústria metal-mecânica. Na gama de processos de conformação destaca-se a estampagem, cujas operações principais são o corte, dobra e o repuxo de chapas. Para exemplificar a importância da estampagem, na indústria automobilística, segundo o relatório setorial do BNDES (1998), um conjunto de ferramentas utilizado na estamparia de uma porta direita dianteira de um veículo apresenta custos de aproximadamente U\$ 1 milhão. Dessa maneira, considerando os diversos componentes de um automóvel que deverão ser estampados é possível se ter ideia da importância das ferramentas de estampagem.

Além disso, a revista Corte e Conformação de Metais (2010) destaca a previsão de crescimento para empresas que fabricam equipamento a partir de chapas e tubos metálicos. Este fato é reforçado pelas indústrias automotiva, de implementos rodoviários, de motos, bicicletas e metro-ferroviária que projetaram aumento de demanda para seus produtos em 2010. Adicionalmente, Corte e Conformação de Metais (2010) destaca que a indústria de estamparia está aumentando a aquisição de máquinas e o principal motivo é que o nível de exigência dos clientes está cada vez maior.

Sendo assim, o prolongamento da vida útil das ferramentas de estampagem representaria uma economia considerável no custo. Para tanto, deve-se verificar qual(is) é(são) a(s) principal(is) causa(s) do fim da vida útil dessas ferramentas e uma maneira de estendê-la.

Nesse trabalho será tratado o fator da carga no desgaste dessas ferramentas, através de um sistema que reproduzirá seus mecanismos de desgaste, sendo que haverá tanto uma previsão teórica como uma parte experimental com o uso de torno de comando numérico (CNC).

## 2. REVISÃO DE MATERIAL TÉCNICO

O fator que determina o fim da vida útil de uma ferramenta de estampagem, segundo Schedin (1994), é, em geral, o acontecimento do galling que, em português, pode ser traduzido como esfolamento. A definição de galling encontrada na literatura não é consensual. Segundo Budinski (2003), é preciso diferenciar o desgaste por deslizamento do esfolamento, sendo que o esfolamento é encontrado apenas em situações mais severas, nas quais se têm as seguintes características: formação de saliência macroscópica em regiões localizadas e na maioria das vezes transferência de material entre os pares deslizante e também de partículas deformadas plasticamente, Figura 1 estão várias condições de desgaste, sendo que o esfolamento está na Figura 1(d).

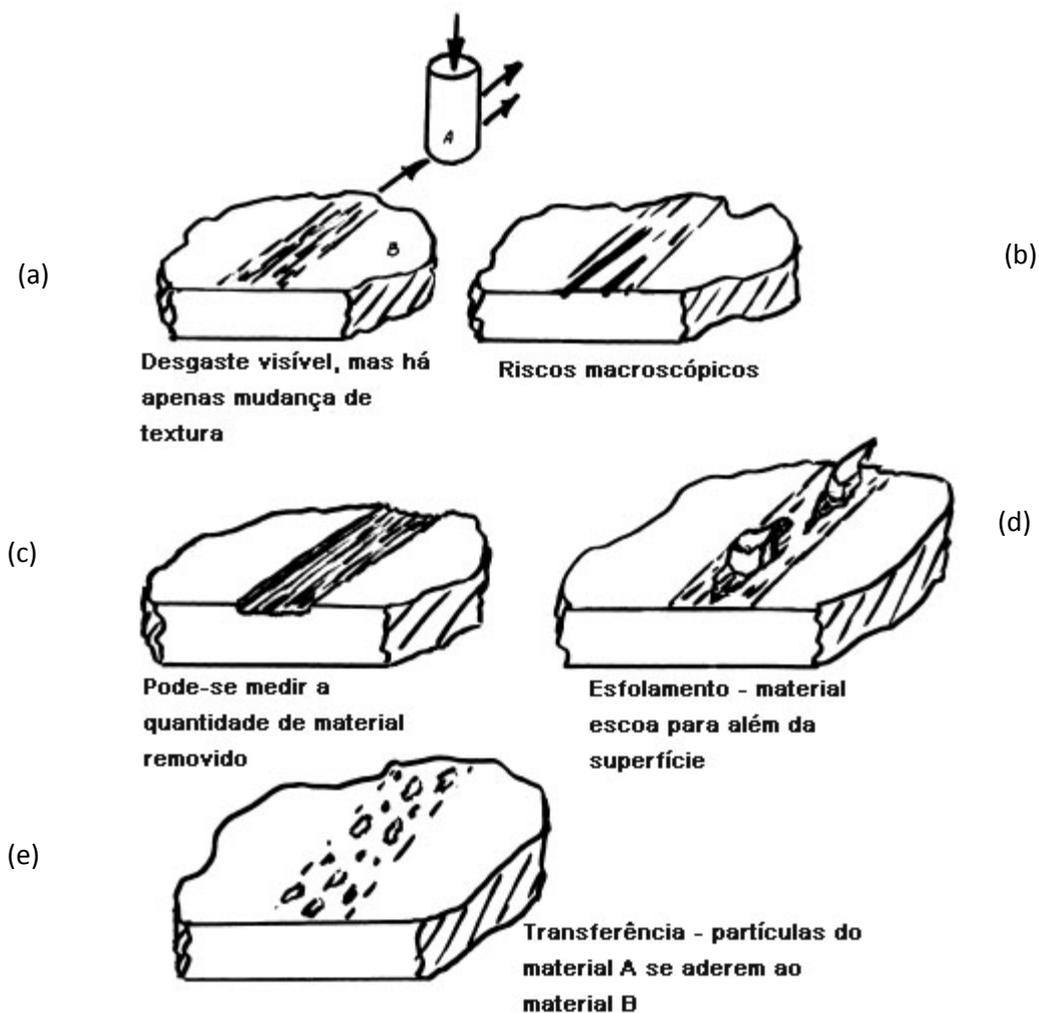


Figura 1 - Esquema de desgastes por deslizamento propostos por Budinsk (2003).

Já para Andreasen, Bay e Chiffre (1998), o esfolamento deve ser caracterizado pelo perfil de rugosidade do corpo. Segundo Andreasen, Bay e Chiffre (1998), o esfolamento é detectado na seguinte situação: “a partir do ponto onde o primeiro vale significativo acontece”. Para tanto Andreasen, Bay e Chiffre (1998) criaram um ensaio de desgaste por deslizamento no qual uma ferramenta de aço AISI M3:2 (DIN W.No.1.3344) de 66 HRC de dureza foi posta contra uma tira de aço inox AISI 304 (DIN W.Nr.1.4301), esse ensaio está ilustrado na Figura 2.

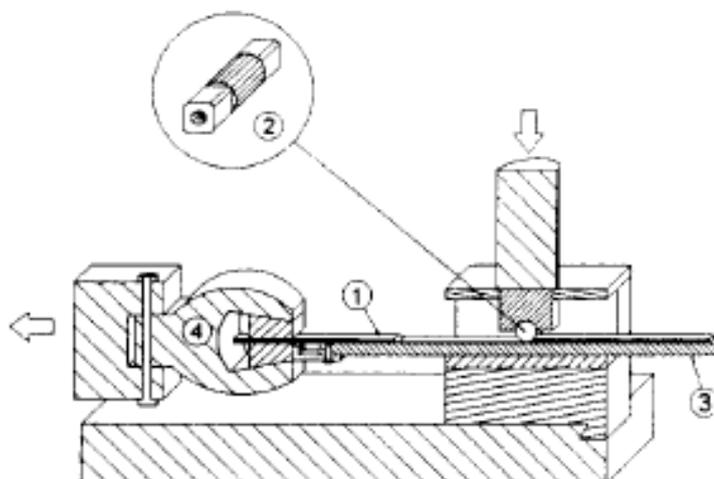


Figura 2 - Esquema ensaio de deslizamento de Andreasen, Bay e Chiffre (1998).  
1: tira, 2: ferramenta, 3:suporte e 4: garra.

Na Figura 3 estão representados os perfis de rugosidades encontrados nesse ensaio – a medida no ângulo superior esquerdo de cada retângulo indica a distância, a partir do início do ensaio, na qual foi feita a medição.

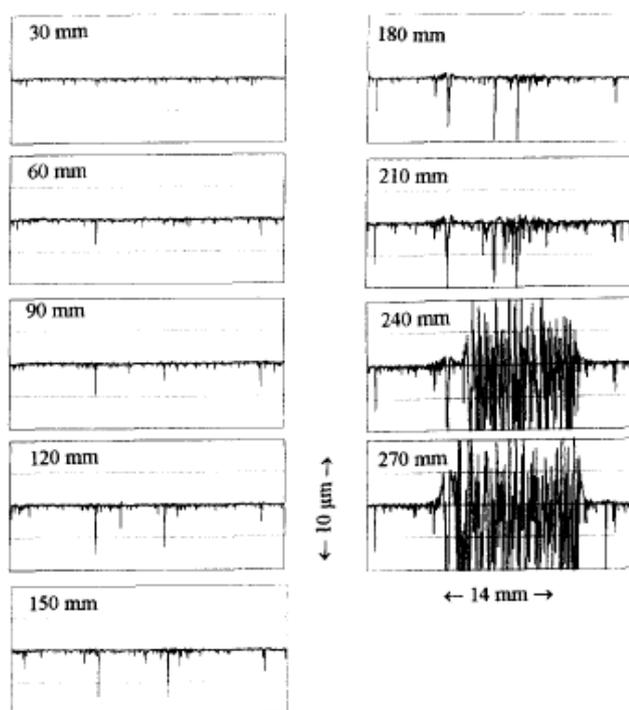
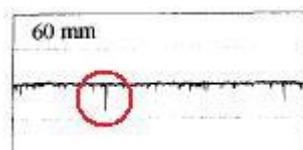


Figura 3 - Resultados do ensaio de Andreasen, Bay e Chiffre (1998).

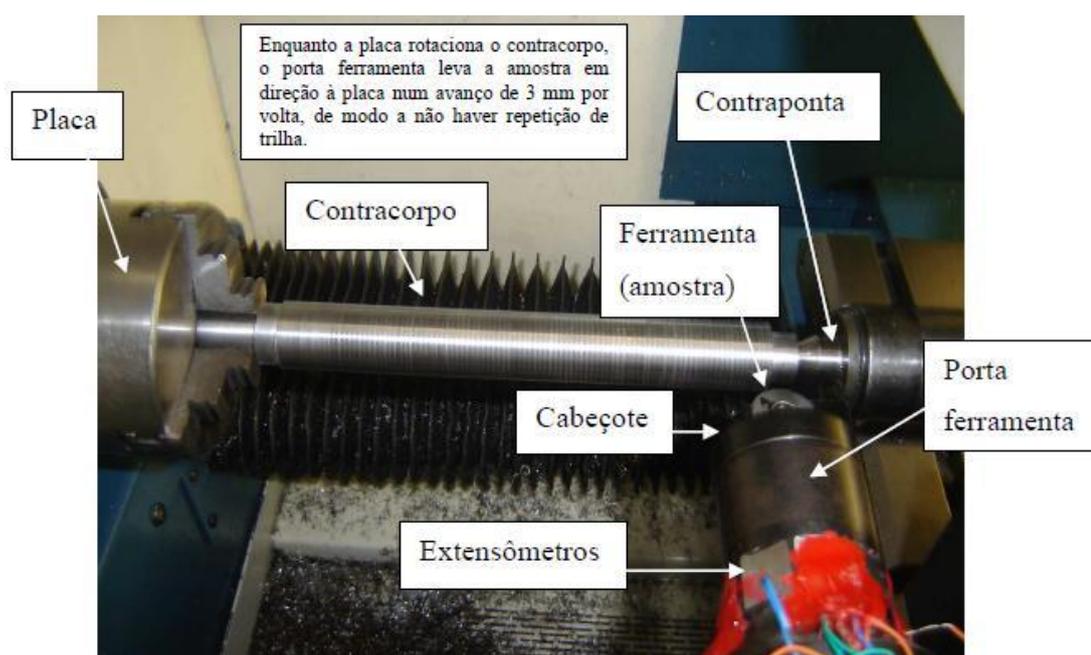


**Figura 4 - Destaque para o perfil de rugosidade iniciado em 60 mm dos resultados do ensaio de Andreasen, Bay e Chiffre (1998).**

Como está destacado na Figura 4, para Andreasen, Bay e Chiffre (1998) o esfolamento teria se iniciado após 60 mm do ensaio, no qual ocorre o primeiro vale significativo. Porém, para as definições de esfolamento de Budinski (2003), o esfolamento só se iniciaria a partir de 210 mm. Para o escopo desse projeto será considerada a definição de Budinski (2003).

Uma maneira de obter um prolongamento considerável da vida útil das ferramentas de estampagem, de acordo com Carlsson e Olsson (2006), é através da aplicação de filmes cerâmicos com espessura da ordem de micrometros.

Para ser possível uma comparação com o trabalho realizado por Mendes (2009), o presente projeto usará algumas definições e resultados desse autor. A dissertação de mestrado de Mendes (2009) usou ensaios de ferramentas com e sem a aplicação recobrimentos contra corpos-de-prova de aço AISI 1045 recozido com dureza de 250 HV, utilizando tornos CNC – conforme montagem da Figura 5 e esquema na Figura 6.



**Figura 5 - Esquema de montagem de Mendes (2009).**

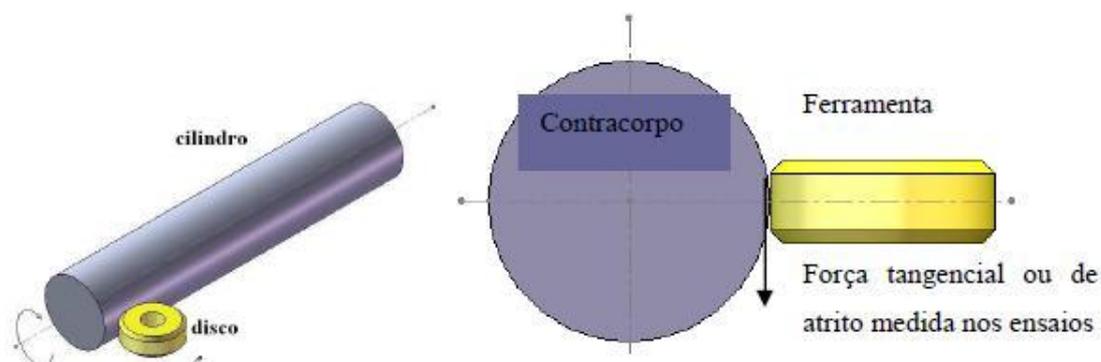


Figura 6 - Esquema de contato do ensaio de Mendes (2009).

Um dos parâmetros que deve ser programado durante os ensaios é a profundidade de penetração. Porém ao contrário do que se possa intuir, essa não é a que será encontrada nos sulcos usinados no cilindro, pois o disco não se comporta como uma ferramenta de usinagem que promove o corte e a remoção de cavacos do cilindro, mas, na verdade, apenas o deforma elásticamente e plasticamente. A profundidade de penetração representa a carga normal que é aplicada no contracorpo.

Logo, ao se configurar a mesma profundidade de penetração no mesmo torno é possível obter os mesmos esforços na interface da ferramenta com o contracorpo e assim será possível comparar os resultados.

Os ensaios realizados por Mendes (2009) foram feitos com profundidades de penetração programada no torno de 0,1 e 0,3 mm em dois tornos diferentes, um no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e outro na Fundação Salvador Arena (FSA), utilizando, respectivamente, os seguintes equipamentos: Mini Torno/Fresadora CNC Cojugados fabricado pela empresa Manufacturing Data Systems (MDSI) e Romi Centur 30S.

Em relação às ferramentas ensaiadas, todas eram de aço AISI M2 temperado e revenido no forno Brasimet do LFS, resultando em uma dureza de 870 HV. Os revestimentos aplicados sobre o aço foram de dois tipos (ambos obtidos através da Brasimet Bodycoat): DUROTINTM (4,6  $\mu\text{m}$  de revestimento monocamada de TiN com dureza de 2300 HV, de acordo com o catálogo do fabricante) e DUROTIN

EXXTRALTM (4,9  $\mu\text{m}$  de revestimento multicamada de AlTiCrN com intercamadas de TiN e dureza global de 3300 HV, de acordo com o catálogo do fabricante).

Um dos parâmetros que foram medidos durante os ensaios, tanto no LFS como na FSA, foram as forças de atrito (forças tangenciais) conforme representado na Figura 6, ou seja, trata-se da força cuja direção é tangente à ferramenta e ao contracorpo no local onde ocorre o contato entre eles e cuja direção é contrária à tendência do movimento. Portanto, a força representada na Figura 6 é aquela que age na ferramenta sendo que pela terceira lei de Newton (ação e reação) a força de atrito que age sobre o contracorpo apresenta mesma direção, mesma intensidade e sentido contrário ao da que age sobre a ferramenta.

Para a medição dessas forças foi utilizado um dinamômetro que, conforme representado na Figura 5, é constituído de uma série de extensômetros colocados ao próprio porta ferramentas.

Os resultados para os ensaios realizados no LFS estão representados na Figura 7 e para os realizados na FSA na Figura 8.

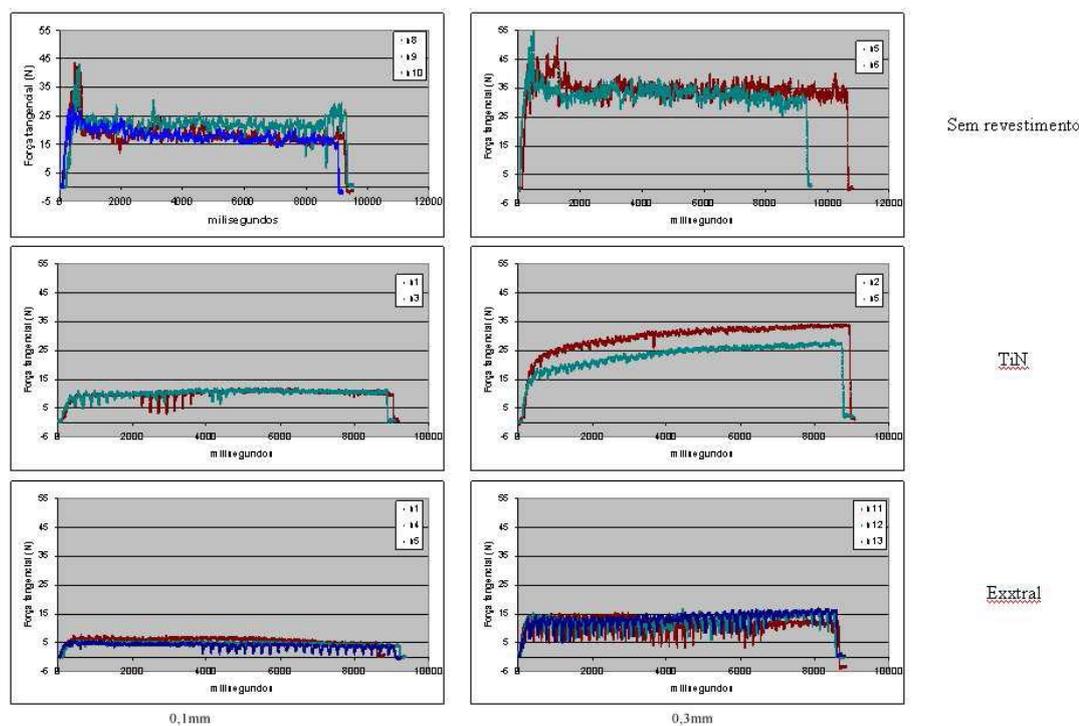
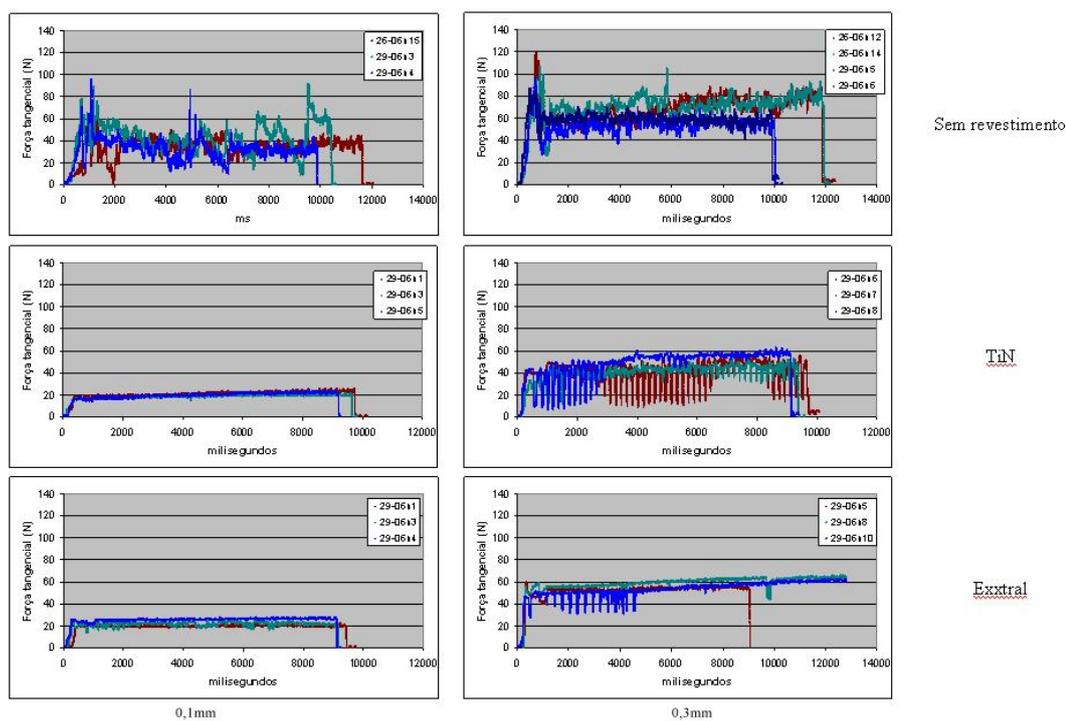


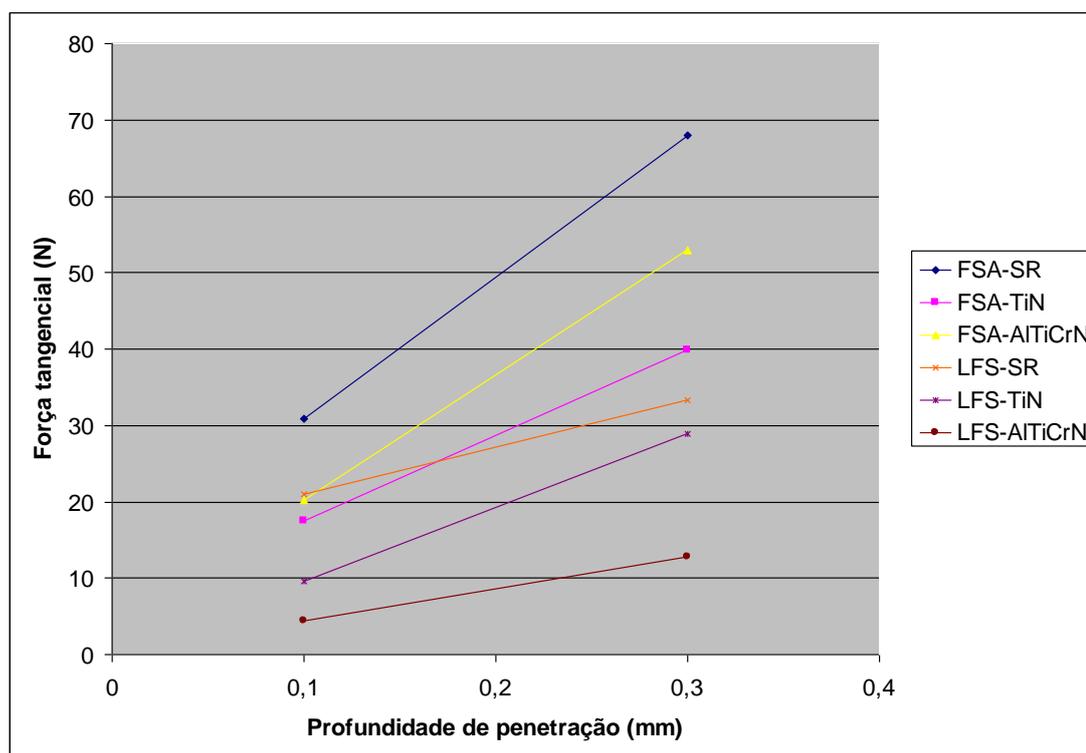
Figura 7 - Forças de atrito medidas no LFS por Mendes (2009).



**Figura 8 - Forças de atrito medidas na FSA por Mendes (2009).**

Nota-se inicialmente que os valores das forças de atrito medidas no FSA foram muito superiores às do LFS – repare que a escala dos gráficos não é a mesma. Isso possivelmente ocorreu pela diferença do acoplamento do porta ferramentas aos equipamentos dos dois locais, sendo que a fixação mais rígida foi encontrada na FSA.

A partir dos gráficos das forças de atrito das Figuras 7 e 8, foram calculadas as médias das forças para cada um deles. Dessa maneira, foram obtidos doze pontos distintos que, em seguida, foram distribuídos e unidos através de retas aos pontos correspondentes com o mesmo recobrimento ensaiados no mesmo equipamento e mesmo tipo de ferramenta - conforme Figura 9.



**Figura 9 - Média das forças de atrito pela profundidade de penetração de Mendes (2009).**

Um fato notável da Figura 9 é que para os ensaios realizados no LFS a ferramenta com recobrimento de ALTiCrN foi a que apresentou a menor média de forças de atrito, enquanto que para os ensaios na FSA isso ocorreu para o recobrimento de TiN – notando que a ferramenta sem recobrimento (SR) foi que apresentou a maior força de atrito em ambos os ensaios. Outro fato é a inversão que ocorre com o aumento da profundidade de penetração entre as forças tangenciais do ensaio do LFS-SR e do FSA-TiN, porém como tratam-se de ensaios realizados em locais distintos sua análise deve ser feita com ressalvas. Logo de início existem fortes indícios que a mesma profundidade de penetração no LFS e no FSA representem forças normais distintas.

Um importante ensaio, que se assemelha muito com o de Mendes (2009), foi realizado por Claudin (2008). Nesse ensaio uma barra cilíndrica de AISI 4140 (300 HB) é fixada ao torno e um pino esférico é pressionado contra a barra, e a barra também se desloca, ou seja, não há repetição de trilha (a ferramenta passa apenas uma vez pelo contracampo o que se assemelha a situações reais de estampagem). A Figura 10 mostra o esquema do ensaio.

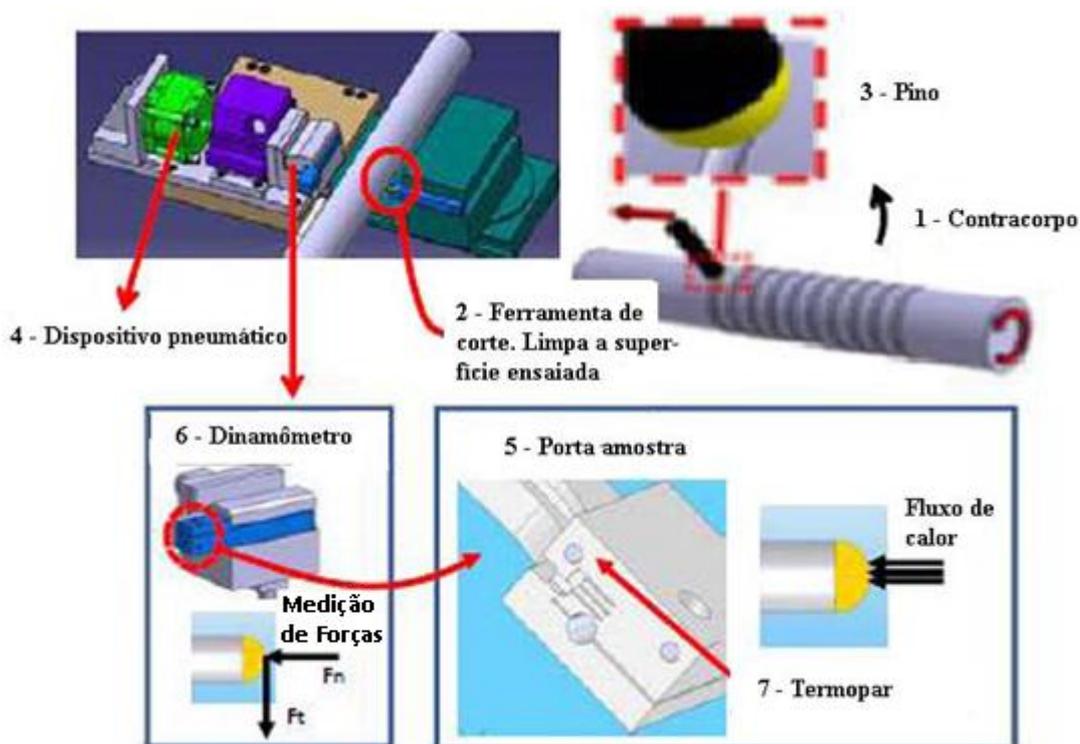


Figura 10 - Esquema do ensaio de Claudin (2008).

Foram ensaiados pinos com quatro tipos de revestimentos, todos os revestimentos feitos por PVD (*Physical Vapour Deposition*) e com 2  $\mu\text{m}$  de espessura. Os tipos de revestimentos foram: TiN, TiAlN e AlCrN. Além disso, cada pino ensaiado apresentava diâmetros distintos: 9, 13 e 17 mm. E uma força normal constante igual a 1000N, logo com três valores para a pressão normal.

A velocidade de deslizamento cobriu uma faixa entre 50 e 200 m/s.

O coeficiente de atrito aparente é dado pela eq. (1).

$$\mu_{ap} = \frac{F_t}{F_n} \quad (1)$$

Onde:  $F_t$  – Força Tangencial.

$F_n$  – Força Normal.

Os resultados de Claudin (2008) estão na Figura 11.

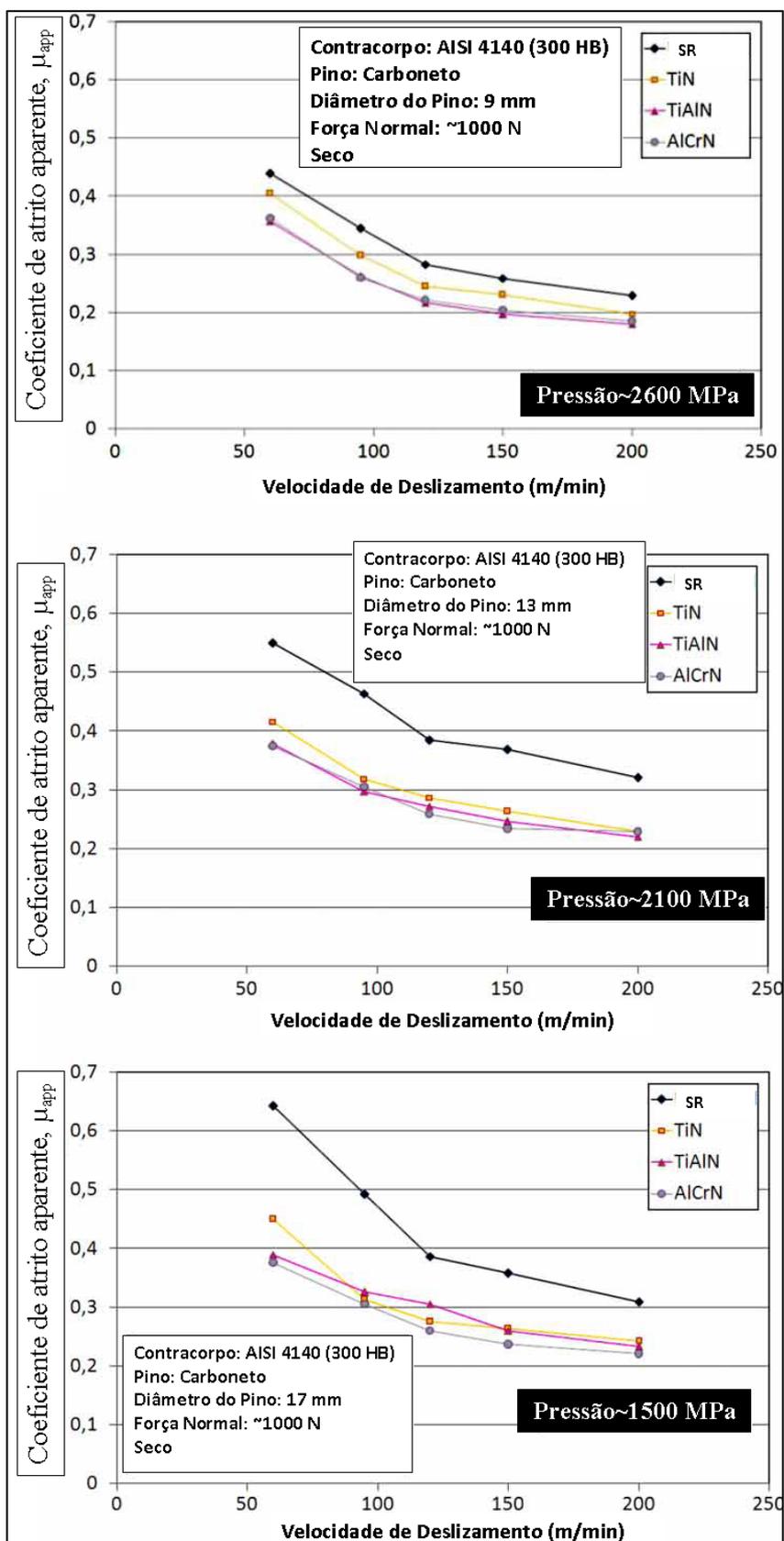


Figura 11 - Gráficos com variação da pressão e da velocidade de deslizamento por Claudin (2008).

Da Figura 11 fica claro que, com exceção do pino sem recobrimento, o efeito da variação da pressão foi muito pequeno, em relação ao coeficiente de atrito aparente, para as três ferramentas sendo que a velocidade e o próprio tipo de recobrimento se demonstraram muitos mais relevantes.

### 3. OBJETIVOS

Este Trabalho de Formatura tem como objetivo realizar o ensaio de ferramentas (pastilhas) sem revestimento em um torno CNC, selecionando-se diferentes profundidades de penetração. Ou seja, usar ferramentas sem revestimento no ensaio desenvolvido por Mendes (2009) para um número maior de cargas de trabalho e, dessa maneira, poder determinar a relação entre a carga normal aplicada e a força tangencial de reposta.

Adicionalmente, com o melhor conhecimento sobre o comportamento da ferramenta para um número maior de cargas de trabalho, será possível no futuro selecionar de maneira mais segura e precisa qual é o recobrimento que atenderá de maneira mais eficaz os requisitos necessários para o trabalho de estampagem, propiciando assim um melhor aproveitamento das ferramentas de estampagem já que estas apresentam um alto custo. Adicionalmente, o entendimento dos fenômenos tribológicos que ocorrem durante a estampagem e danificam a ferramenta poderão ser usados para o desenvolvimento de novas ferramentas que apresentem uma maior eficiência.

#### 4. METODOLOGIA

O foco do projeto será fazer uma previsão, ensaiar e analisar os resultados com a variação de um parâmetro considerado de grande importância no desenvolvimento da dissertação de mestrado de Mendes (2009). O parâmetro que passará por tal processo é a profundidade de penetração a ser programada no torno durante o ensaio, essa profundidade não é a que será encontrada nos sulcos usinados no cilindro, pois, reafirmando o que já foi dito, o disco não se comporta como uma ferramenta de usinagem que promove o corte e a remoção de cavacos do cilindro, mas, na verdade, apenas o deforma elástica e plasticamente. Sendo assim, a profundidade de penetração é um artifício para se conseguir a mesma força normal nos ensaios, desde que sejam feitos no mesmo equipamento.

Conforme destacado anteriormente, o ensaio realizado neste trabalho deverá se aproximar o máximo possível daquele feito por Mendes (2009), o qual encontra-se apresentado nas Figuras 5 e 6.

Os materiais utilizados foram:

- Contracorpos: Aço AISI 1046 recozido
- Ferramentas: Aço AISI M2.

Em Figura 12 e Figura 13 imagens da barra de aço ANSI M2 comprada da empresa Metal-Fás Comércio de Aços e Metais Ltda.



**Figura 12 - Barra de Aço AISI M2.**



**Figura 13 - Barra de Aço AISI M2 - aproximação.**

E na Figura 14 está o certificado de qualidade da barra de aço M2 com sua composição química nominal:

Metal-Fás Comércio de Aços e Metais Ltda																		
CERTIFICADO DE QUALIDADE																		
Corridas	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	Fe	Cr	V	W	Co	Cu	Mg	Sn	Zn	Pb
0,00	0,900	0,260	0,280	0,020	0,000	0,000	4,770	0,000	0,000	3,890	1,790	6,030	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Número Nota Fiscal: 4103 Produto: M-2 RED 19,05MM X 200 MM 1PÇ - Fabricante: .. - Classificação Fiscal: 7228-1010																		

**Figura 14 - Certificado de Qualidade da Barra de Aço AISI M2.**

A medição da dureza (macrodureza e microdureza) do material da ferramenta foi realizada no LFS. Para a macrodureza foi aplicada uma carga de 30 Kgf sendo que os resultados estão na Tabela 1:

**Tabela 1 - Macrodureza do aço AISI M2 utilizando carga de 30 Kgf.**

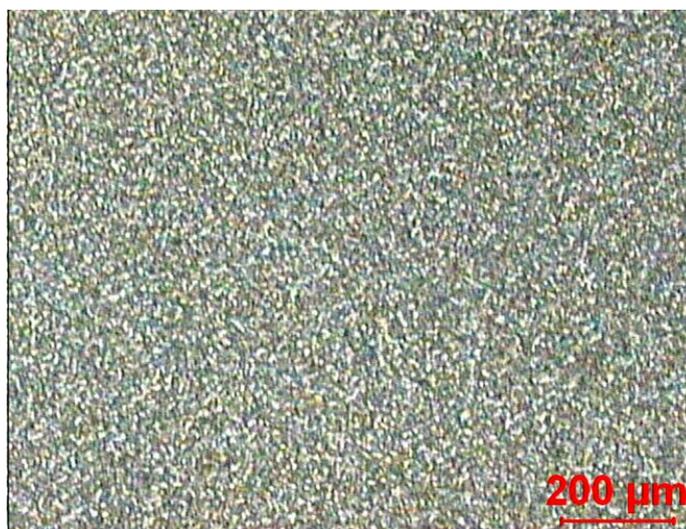
Medição	Dureza (HV 30)
1	227,6
2	234,7
3	230,7
4	233,9
5	229,2
Média	231,22
Desvio Padrão	2,71

A microdureza foi feita com uma carga de 100 gf, os resultados estão na Tabela 2:

**Tabela 2 - Microdureza do aço AISI M2 utilizando carga de 100 gf.**

Medição	Dureza (HV 0,1)
1	280,7
2	261,1
3	254,3
4	245,2
5	266
6	253,4
7	279,60
8	269,1
9	261,1
10	256,2
Média	262,67
Desvio Padrão	11,4

As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram as imagens do M2 obtido ampliadas 100, 200, 500 e 1000 vezes respectivamente e atacados com Villela:



**Figura 15 - Micrografia com ampliação de 100 vezes.**



**Figura 16 - Micrografia com ampliação de 200 vezes.**



**Figura 17 - Micrografia com ampliação de 500 vezes.**



**Figura 18 - Micrografia com ampliação de 1000 vezes.**

A fabricação dos contracorpos não é complexa bastando usinar a barra de ANSI 1046. Já para as ferramentas, cujas dimensões são 18 mm de diâmetro e 6 mm de espessura com um furo que permita a fixação no porta ferramenta usando uma parafuso M4, exige uma maior dificuldade de usinagem. O Anexo apresenta um desenho da ferramenta feita por Mendes (2009).

Em relação aos equipamentos necessários para realização dos experimentos será usado apenas o torno do LFS. As Figuras 19, 20, 21 e 22 representam essa máquina.



**Figura 19 - Torno do LFS.**



**Figura 20 - Vista Interna do torno do LFS – Lado Direito.**

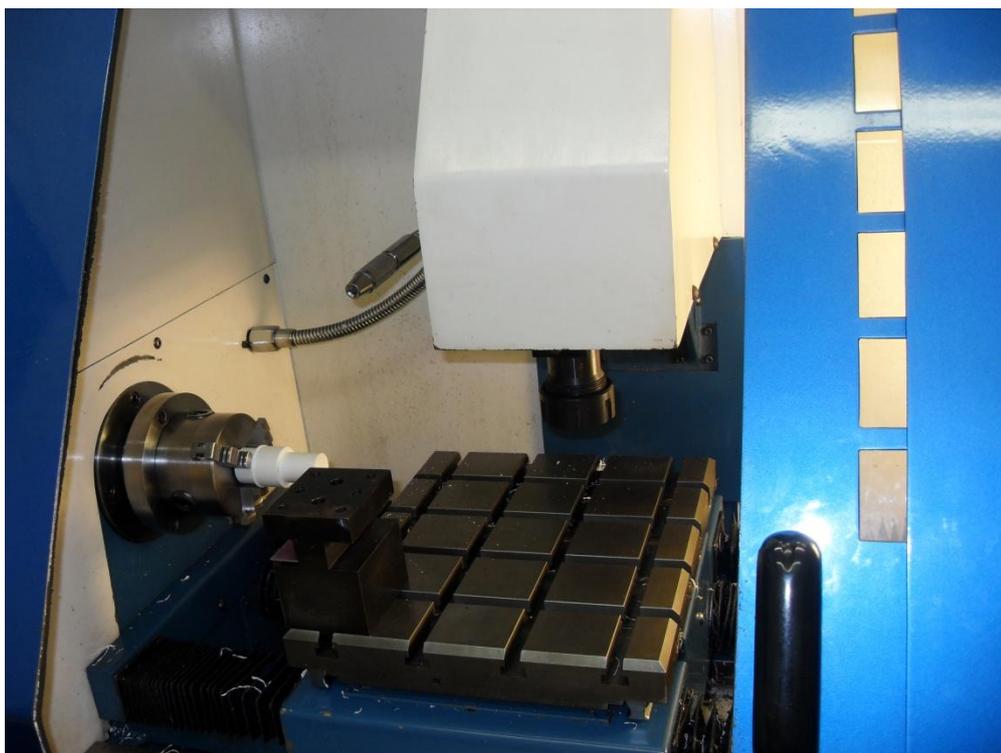


Figura 21 - Vista Interna do torno do LFS – Lado Esquerdo.



Figura 22 - Detalhe do Painel de Controle do Torno do LFS.

Para serem feitas as medidas das forças durante o ensaio será feita uma colagem de extensômetros sobre o porta ferramentas com o auxílio do departamento de Engenharia Naval da EPUSP (PNV). O item 4.1 descreve com detalhes a instrumentação desse porta ferramentas.

#### 4.1 Instrumentação do Porta Ferramentas

As medições das forças dos ensaios que serão realizados no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) serão feitas com o uso de um porta ferramentas o qual foi instrumentado através da colagem de extensômetros. A situação inicial do porta ferramentas sem nenhum extensômetro pode ser vista nas Figuras 23 e 24.



Figura 23 - Porta Ferramentas: Vista 1.



**Figura 24 - Porta Ferramentas: Vista 2.**

Esse porta ferramenta é mesmo utilizado por Mendes (2009), porém durante os ensaios de Mendes (2009) ocorreu um acidente no qual a instrumentação foi toda danificada, portanto fez-se necessário uma nova instrumentação.

Conforme destacado anteriormente a medição de forças será feita com extensômetros colados nas oito “células” usinadas no corpo do porta ferramentas – conforme destacado pelo círculo na Figura 25.



Figura 25 - Porta ferramenta com célula para extensômetro em destaque.

Antes de se descrever os procedimentos feitos para a colagem dos extensômetros será feita uma breve explicação de como é o funcionamento de um extensômetro.

O extensômetro (ou *Strain Gage*, como também é chamado) é um transdutor capaz de medir deformações em corpos. Seu funcionamento se baseia na propriedade da resistividade elétrica dos materiais (como será explicado posteriormente em mais detalhes). O mesmo é basicamente composto por camadas sobrepostas de material laminado, como mostra a Figura 26.

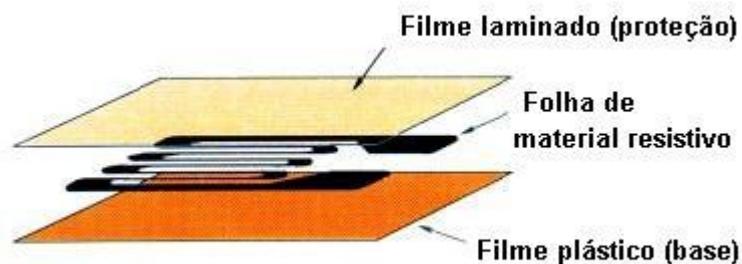


Figura 26 - O extensômetro e suas camadas de What's a Strain Gage? (2005).

A camada resistiva é uma folha fina de metal cuja espessura varia de 3 a 5  $\mu\text{m}$ . Como o extensômetro é colado no corpo cuja deformação estamos interessados, o mesmo se deforma junto com esse corpo. Essa deformação pode ser tanto um alongamento quanto um achatamento, dependendo se o esforço ao qual o corpo é submetido é de tração ou compressão, respectivamente. A Figura 27 mostra como a resistência varia, aumentando para o caso de tração e diminuindo para o caso de compressão.

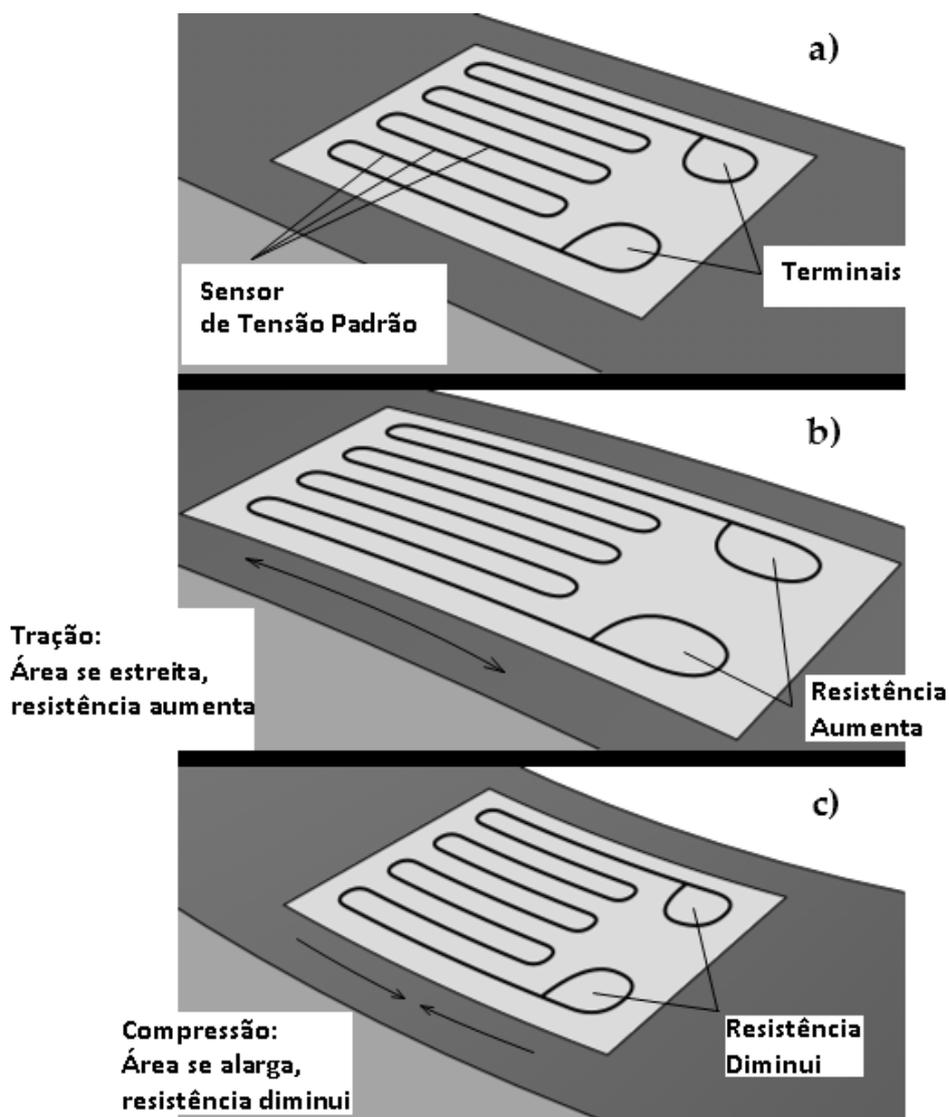


Figura 27 - Alongamento ou achatamento conforme o esforço de What's a Strain Gage? (2005).

O funcionamento dos extensômetros está relacionado com uma propriedade apresentada pela maioria dos metais, em especial ligas de cobre-níquel e níquel-

romo. Tal propriedade é que a variação de resistência elétrica do material é proporcional a variação de comprimento do mesmo como mostrado pela equação (2):

$$\frac{\Delta R}{R} = K_S \frac{\Delta L}{L} = K_S \cdot \varepsilon \quad (2)$$

onde

$R$  é resistência original do material;

$\Delta R$  é variação da resistência;

$K_S$  é o fator de medidor (*gage factor*);

$L$  é comprimento inicial;

$\Delta L$  é variação do comprimento;

$\varepsilon$  é deformação.

Desta maneira, para se determinar a deformação em um determinado ponto de algum corpo, é necessário fazer a medida da variação da resistência que será realizada através do circuito elétrico chamado “Ponte de Wheatstone”, ilustrado na Figura 28.

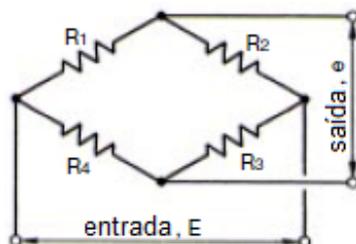


Figura 28 - Ponte de Wheatstone de What's a Strain Gage? (2005).

Esse dispositivo elétrico converte uma mudança de resistência em uma mudança de voltagem, segundo a equação (3):

$$e = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 R_2) + (R_3 R_4)} \cdot E \quad (3)$$

onde

$R_1, R_2, R_3$  e  $R_4$  são resistências

$E$  é tensão de entrada;

$e$  é tensão de saída.

Para  $(R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4)$ , a tensão de saída ( $e$ ) será sempre nula, independentemente da tensão de entrada ( $E$ ). Quando essa situação se altera, é possível medir a variação de resistência através das tensões. Existem diversas maneiras de montagem de extensômetros na ponte de Wheatstone a que foi usada para a instrumentação do porta ferramentas está ilustrada na Figura 29.

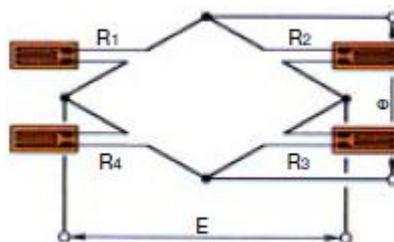


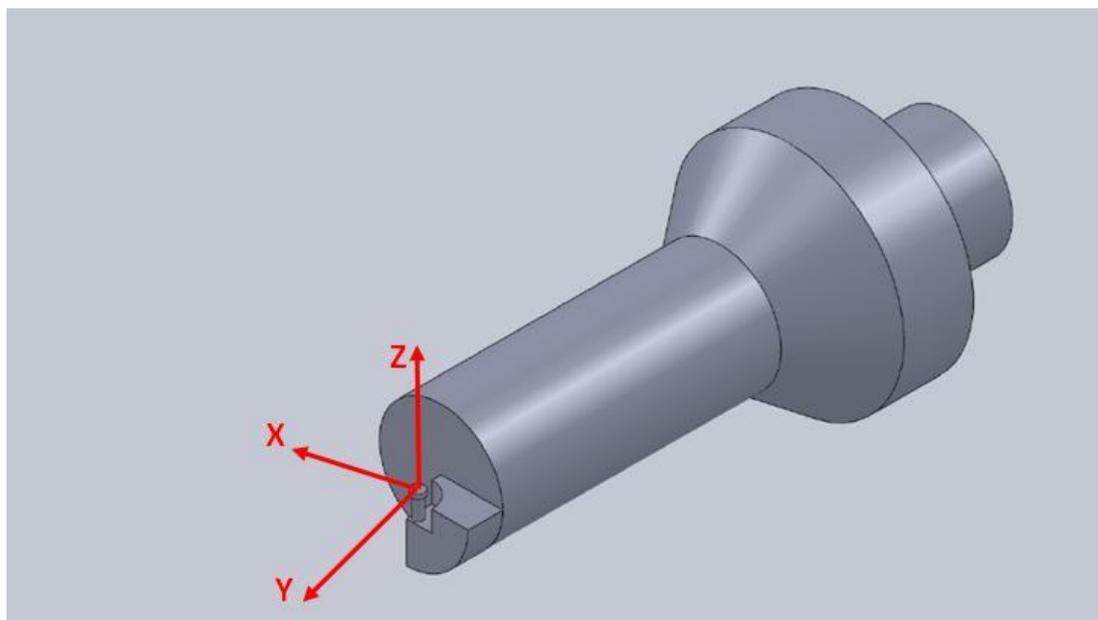
Figura 29 - Ponte de Wheatstone com quatro extensômetros de What's a Strain Gage? (2005).

A equação da configuração da ponte de Wheststone com quatro extensômetros está explicitada em (4):

$$e = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot E = \frac{1}{4} \cdot k_s \cdot (\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4) \cdot E \quad (4)$$

A nova instrumentação do porta ferramentas foi feita pelo no Laboratório da Engenharia Naval da EPUSP localizado na sala A-19 do Prédio das Engenharias Mecânica, Mecatrônica e Naval e o responsável pelo trabalho foi o Dr. João Alcino de Andrade Martins.

A nova configuração permite que sejam medidas as forças em três direções ortogonais, a Figura 30 ilustra essa situação.



**Figura 30 - Eixos de medição de força do porta ferramentas.**

Na Figura 30 cada eixo recebeu um nome:

- X: Avanço
- Y: Penetração
- Z: Rotação

Para a medição tanto do avanço como da rotação os extensômetros foram colados em duas células para cada direção sendo que cada célula continha dois extensômetro, logo cada um desses eixos necessitou de quatro extensômetros que formaram para cada direção uma ponte Wheatstone. Para a medição em X os extensômetros foram posicionados nas células da direção Z e vice-versa. Isso ocorre, pois é possível se verificar os efeitos da tração e compressão em cada eixo e ainda reduzir as interferências de forças de outros eixos na medição da força do eixo que se deseja a medição. Já a penetração usou as quatro células diagonais em relação aos eixos X e Z, sendo que em duas células os extensômetros estavam paralelos ao eixo Y e em outros dois estavam perpendiculares sendo que sempre um eixo numa posição devia estar ao lado de dois em uma posição distinta. Para a Penetração também foi construída um ponte de Wheatstone.

Os passos para a instrumentação estão descritos a seguir:

- Lixar as células do porta ferramentas.
- Limpar com acetona as células.

- Colar o extensômetro usando a cola e pressioná-lo com a folha de teflon por um minuto.
- Parar de pressionar e esperar dois minutos antes de retirar a folha de teflon.
- Esticar os fios do extensômetro com a pinça.
- Cortar os terminais.
- Usar o mesmo procedimentos de colagem do extensômetro (um minuto pressionando com a folha de teflon e depois aguardando para retirá-la) para colar os terminais.
- Soldar os fios do extensômetro nos terminais.
- Medir as resistências dos extensômetros.
- Soldar os cabos para construção da ponte de Wheatstone.
- Cobrir com cera.
- Soldagem nos terminais do cabo blindado de quatro vias, um para cada direção de medição de força.

Para o melhor entendimento do processo, as Figuras 31 a 37 ilustram a seqüência da colagem:

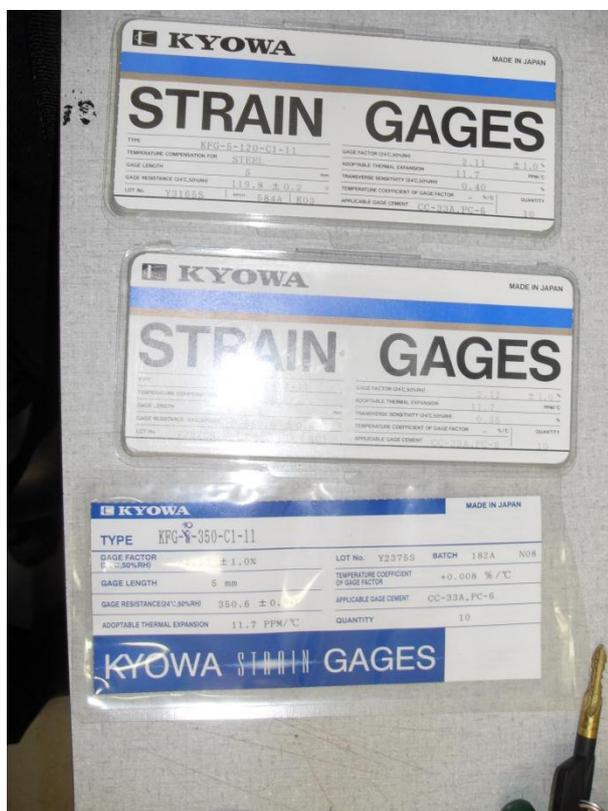
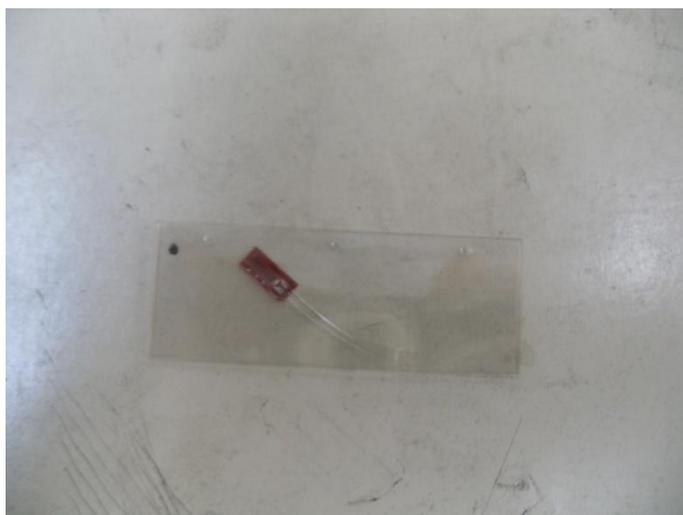


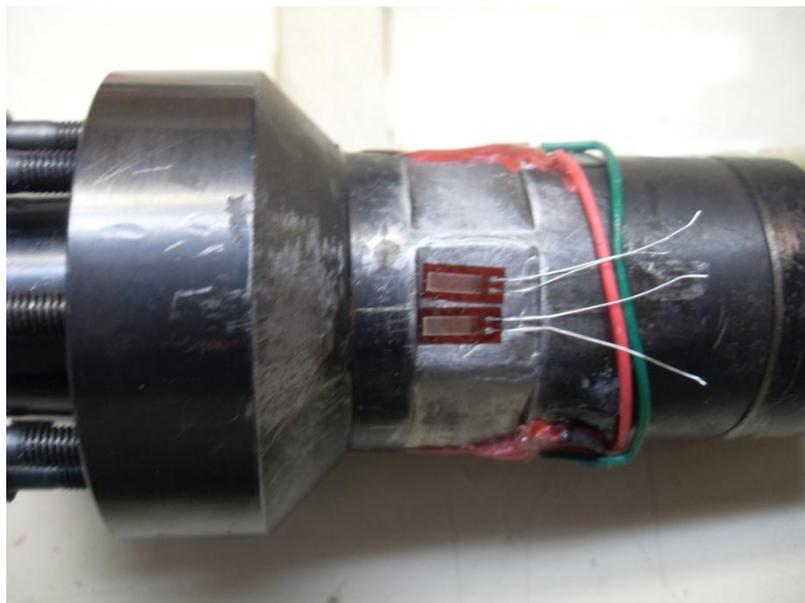
Figura 31 - Extensômetros utilizados na instrumentação.



**Figura 32 - Extensômetro individual.**



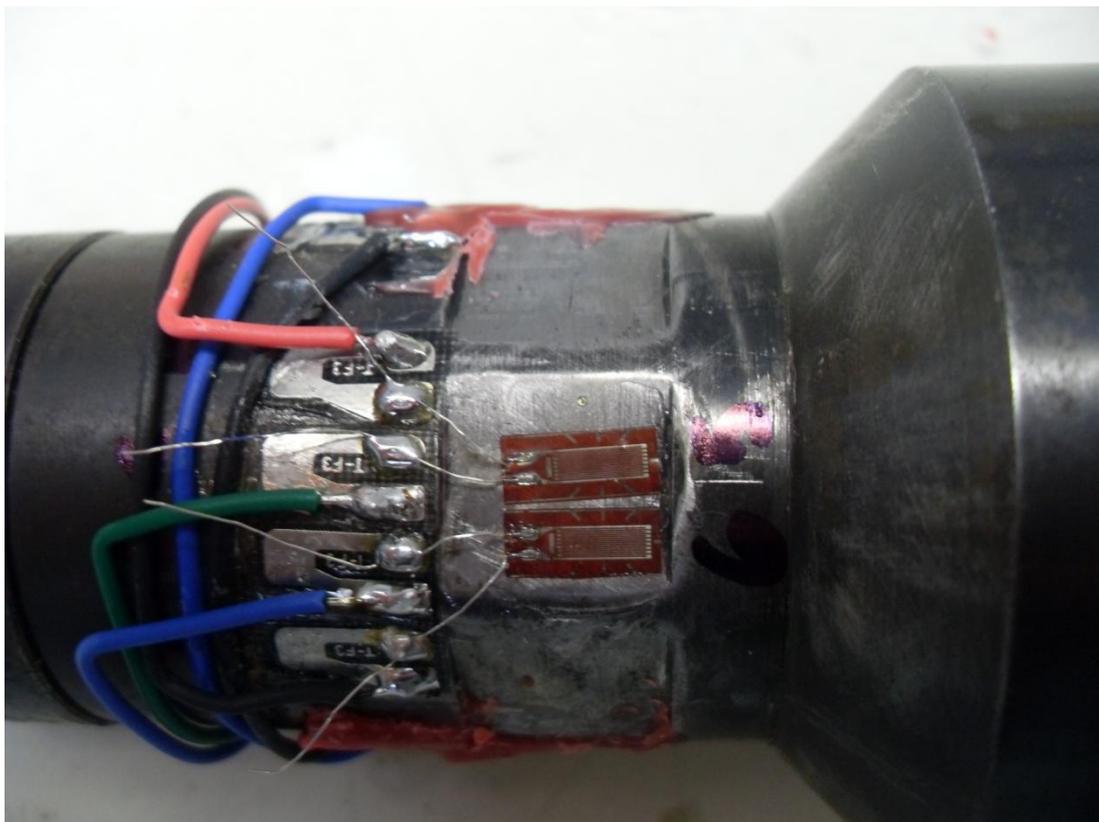
**Figura 33 - Extensômetro coberto com a folha de teflon.**



**Figura 34 - Extensômetro colado.**



**Figura 35 - Conjunto de terminais.**



**Figura 36 - Porta ferramentas com os extensômetros e os terminais colados e com os fiso de formação da ponte e os fios dos extensômetros soldados.**



Figura 37 - Célula fechado com cera.

#### 4.2 Calibração do Porta Ferramentas

O primeiro passo para a calibração é a definição das cargas que serão impostas em cada direção. Como nos ensaios de Mendes (2009) nos quais foram medidas apenas as forças de atrito (direção Z – rotação), os resultados para os ensaios realizados no LFS estão na Figura 38.

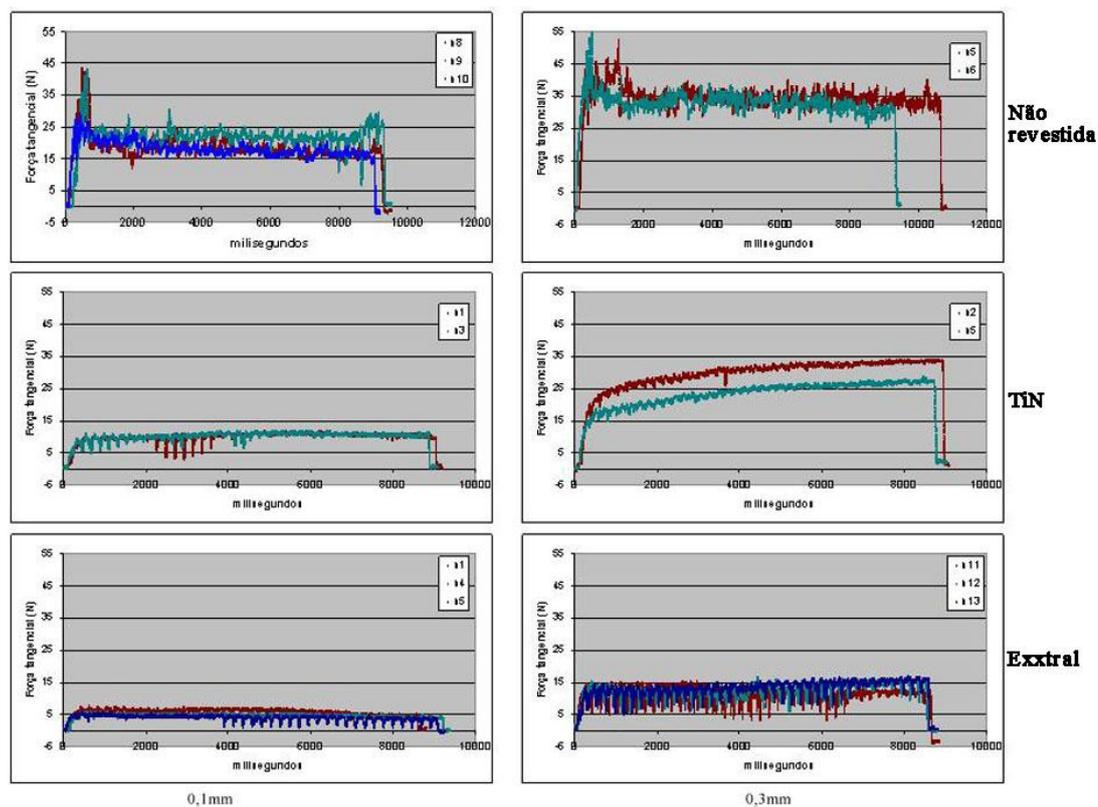


Figura 38 - Forças de atrito medidas no LFS de Mendes (2009).

Pode-se notar que o valor máximo atingido é em torno de 55 N. Na Figura 30 estão mostrados os eixos de medição:

- X: Avanço
- Y: Penetração
- Z: Rotação

E de acordo com os resultados de Claudin (2008), resumidos na Figura 11, pode-se notar que o valor mínimo do coeficiente de atrito é em torno de 0,2. Logo para uma força de atrito de 55 N a força normal (correspondendo ao eixo Y) máxima seria de 275 N.

Finalmente para o eixo X tem a mesma ordem de grandeza do eixo Z e ambos serão calibrados com as mesmas cargas.

Definidas as forças máximas em cada eixo, agora deve-se estabelecer quantas e quais serão os valores a serem utilizados para a calibração. Como o método a ser utilizados é a regressão linear uma quantidade razoável pontos para um resultado consistente seria cinco. Adicionalmente, seria interessante calibrar os eixos para

cargas acima do esperado a fim de trabalhar-se com uma margem de segurança. A Tabela 3 resume essas considerações:

**Tabela 3 - Forças de calibração.**

<b>Eixo</b>	<b>Força Máxima Esperada (N)</b>	<b>Força Máxima de Calibração (N)</b>	<b>Intervalo de Forças (N)</b>
<b>X - Avanço</b>	55	100	0, 20, 60, 80 e 100
<b>Y - Penetração</b>	275	300	0, 60, 120, 180, 240, 300
<b>Z - Rotação</b>	55	100	0, 20, 60, 80 e 100

Após definidas as forças de calibração para cada um dos eixos, deve-se fazer a aquisição das tensões elétricas que serão obtidas para cada força em cada eixo. Portanto, necessita-se de um aquisitor de dados. No caso dessa calibração, o aquisitor utilizado é da marca Lynx modelo ADS 2000 cuja placa de transformação analógica digital é AC2120 e o módulo de expansão é o AI-2161. Este conjunto apresenta 16 bits de resolução. Na Figura 39 uma imagem do aquisitor e na Figura 40 uma imagem do módulo de expansão.

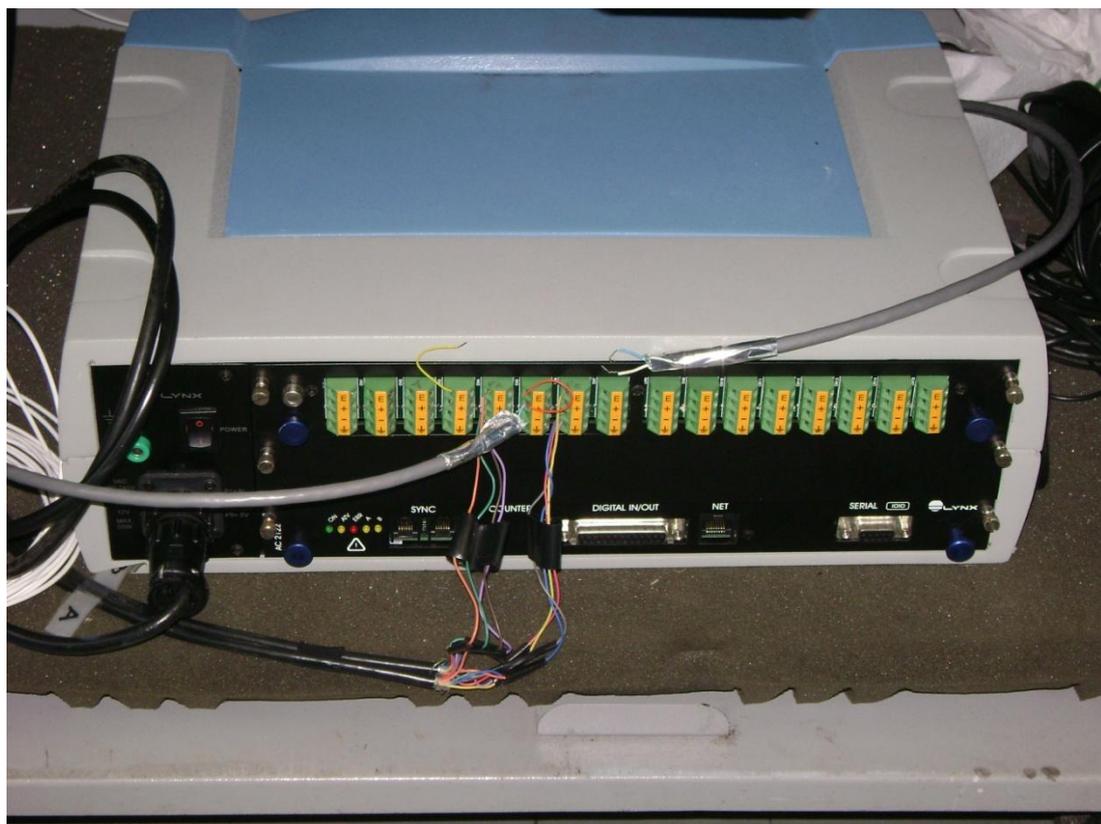


Figura 39 - Aquisitor ADS 2000.

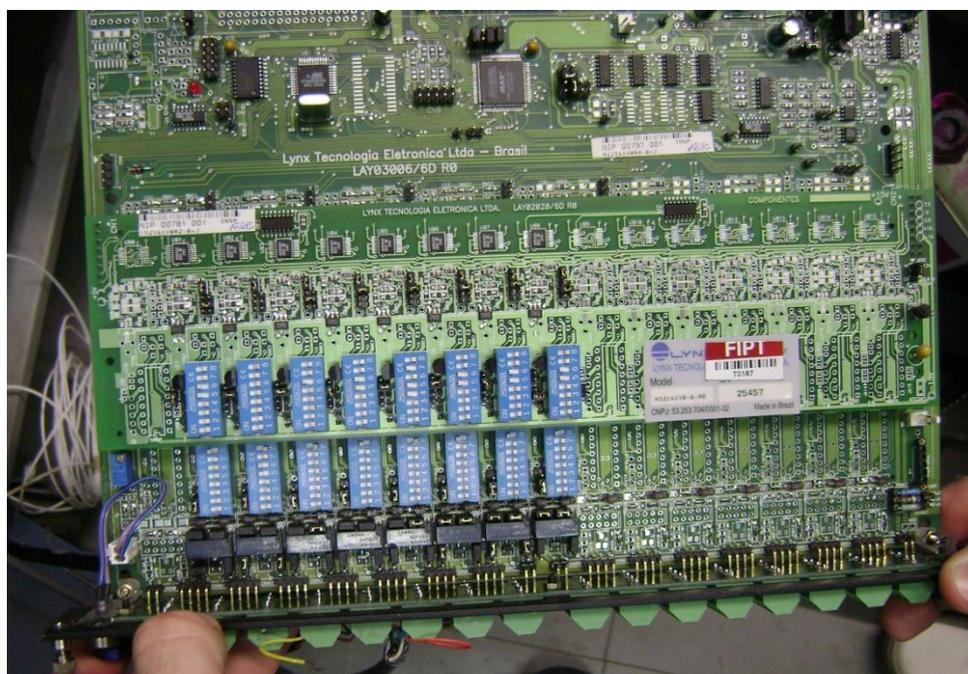


Figura 40 - Módulo de expansão AI-2161.

A configuração do Módulo de Expansão AI-2161 deve ser feita tanto fisicamente, através do ajuste de *jumpers e switches*, como via *software* usando o Aqdados 7.02.

Em relação à configuração física, ela foi feita conforme instruções do manual do Módulo de Expansão AI-2161 contido na seção Ajuda do próprio Aqdados 7.02. Conforme Figura 41:

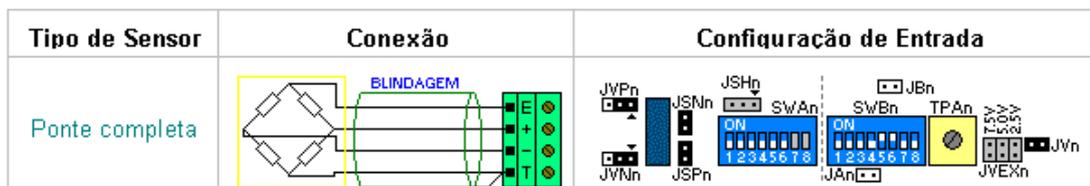


Figura 41 - Configuração de ponte completa.

Adicionalmente, outros dois parâmetros importantes a serem configurados são a voltagem de alimentação para a ponte e o ganho da voltagem de entrada. As configurações desses dois parâmetros estão na Tabela 4 e na Tabela 5 respectivamente:

Tabela 4 - Tensão de alimentação (excitação) para a ponte.

Tensão de Excitação	JVEXn	JVn	JEXC
7,5 V			
5 V			
2,5 V			
750 mV			
500 mV			
250 mV			

Tabela 5 - Chaveamento de ganho.

Chave 7	Chave 8	Ganho
OFF	OFF	x1
ON	OFF	x10
OFF	ON	x100

Para a voltagem de alimentação o chaveamento JVERXn e JVN ocorre individualmente em cada entrada, tanto é que a letra “n” indica o número da entrada e pode ser observado na Figura 41. Porém o *jumper* JEXC é comum para todas as entradas e pode ser observado na Figura 42.

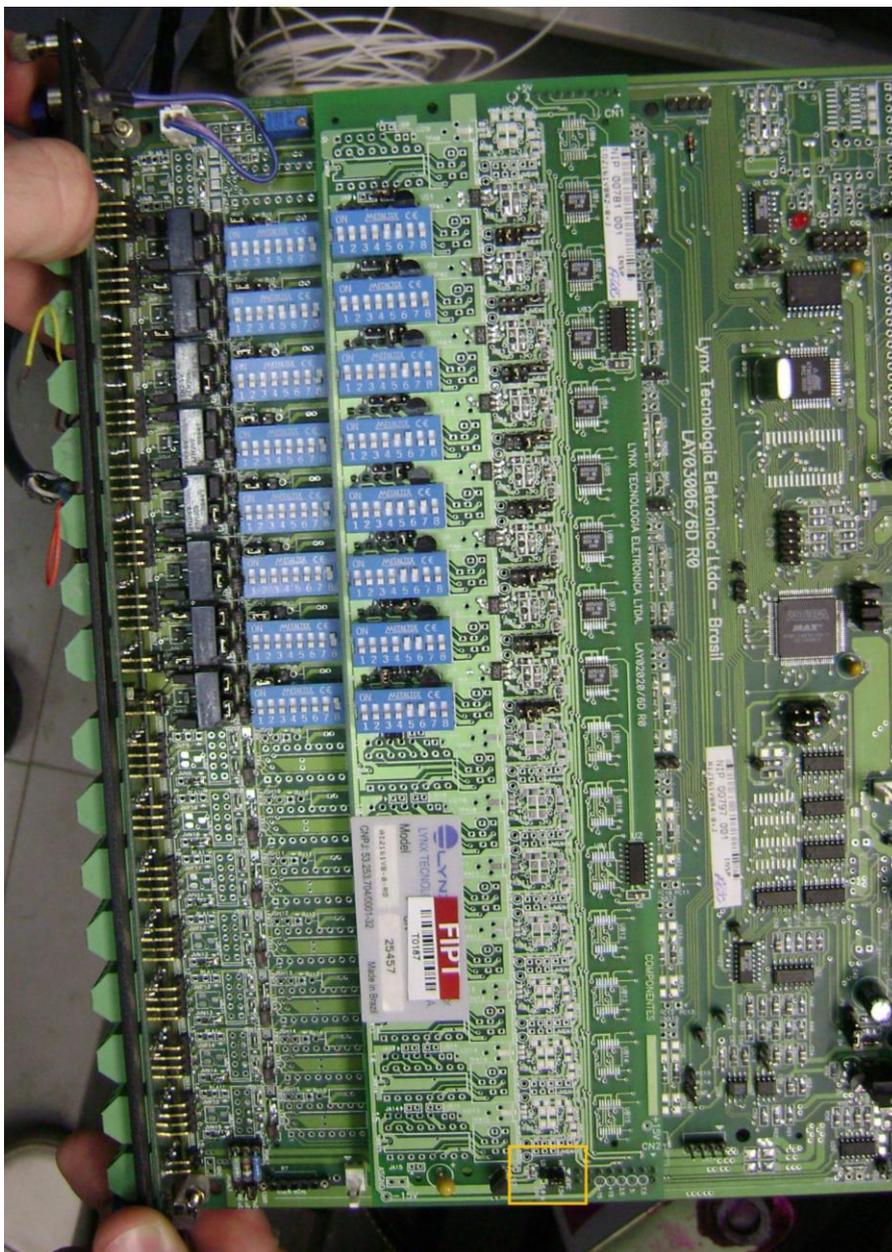


Figura 42 - Chave JEXC.

Já as chaves de ganho são as de número 7 e 8 que estão indicadas na Figura 41, porém o ganho também é ajustado via *software* (Aqdados 7.02). Finalmente, ressalta-se que a tensão de alimentação usada foi de 5 V e o ganho igual a 1000 vezes.

O aqisitor é ligado a um microcomputador no qual está instalado o *software* Aqdados 7.02 responsável pela aquisição das tensões, a configuração completa do aqisitor e do microcomputador está na Figura 43:



**Figura 43 - Conjunto aqisitor e microcomputador.**

A calibração dos eixos foi feita usando alteres e o dinamômetro da marca Instrutherm modelo DD-300. Uma imagem dos alteres está na Figura 44 e dos alteres na Figura 45:



**Figura 44 - Alteres para calibração.**



Figura 45 - Dinamômetro Instrutherm modelo DD-300.

A calibração de cada um dos eixos exigiu uma montagem diferente, a seguir a descrição para os eixos X, Y e Z e seus resultados:

#### 4.2.1 Eixo X

O eixo X, chamado de Avanço, foi calibrado fixando-se o porta ferramentas em uma mesa através de grampos e posicionando o porta ferramentas em série com o dinamômetro – esse procedimento é comum para todos os eixos, sendo que a posição do porta ferramentas que é alterada - conforme a Figura 46:



Figura 46 - Calibração eixo X.

Na Tabela 6 estão representados os resultados da calibração para o eixo X:

Tabela 6 - Resultados calibração do eixo X.

	Primeiro Ensaio	Segundo Ensaio	Terceiro Ensaio			
Força Medida (N)	Voltagem (V)	Voltagem (V)	Voltagem (V)	MÉDIA (V)	MÓDULO DA MÉDIA (V)	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0
13,4	-0,0037	-0,0039	-0,0040	-0,0039	0,0039	0,000152753
24,0	-0,0061	-0,0070	-0,0071	-0,0067	0,0067	0,000550757
34,6	-0,0088	-0,0097	-0,0098	-0,0094	0,0094	0,000550757
44,8	-0,0116	-0,0122	-0,0132	-0,0123	0,0123	0,00080829
59,8	-0,0159	-0,0167	-0,0174	-0,0167	0,0167	0,000750555
81,2	-0,0229	-0,0228	-0,0235	-0,0231	0,0231	0,000378594
102,0	-0,0293	-0,0293	-0,0300	-0,0295	0,0295	0,000404145

Pode-se notar que houve uma boa repetição dos resultados para as forças em todos os ensaios como demonstra os valores de desvio padrão ( $\sigma$ ). Os resultados negativos das voltagens são devido à direção da força aplicada durante a calibração, porém como a calibração independente da direção na qual a força é aplicada com exceção do próprio sinal (positivo ou negativo) da voltagem. Por exemplo: se uma força de 24,0 N for aplicada na direção contrária à da calibração o resultado seria de 0,0067 V, é conveniente usar o módulo da média para se traçar o gráfico da voltagem pela força, conforme Figura 47:

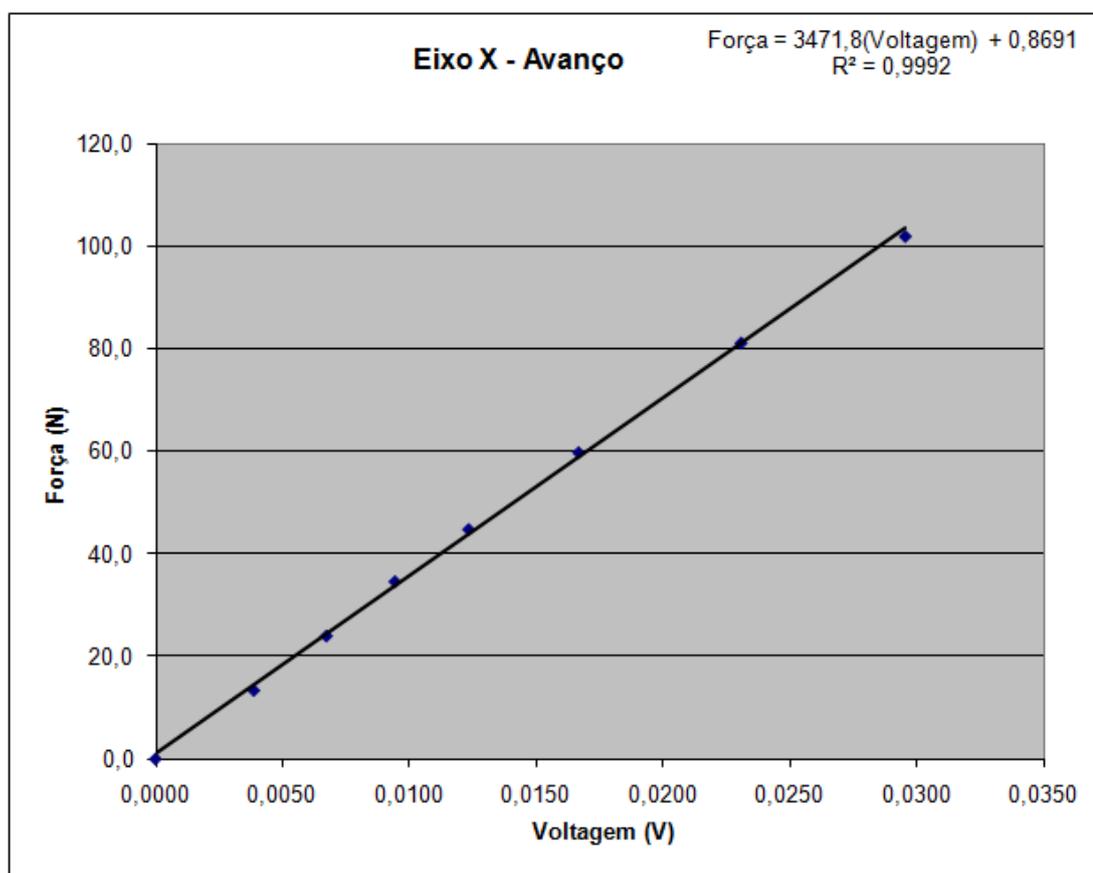


Figura 47 - Gráfico do resultado da calibração do eixo X.

A calibração do eixo X apresenta uma ótima correlação conforme demonstrado pelo valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) muito próximo a unidade.

#### 4.2.2 Eixo Y

O eixo Y, chamado de penetração, foi calibrado fixando-se o porta ferramentas conforme a Figura 48:



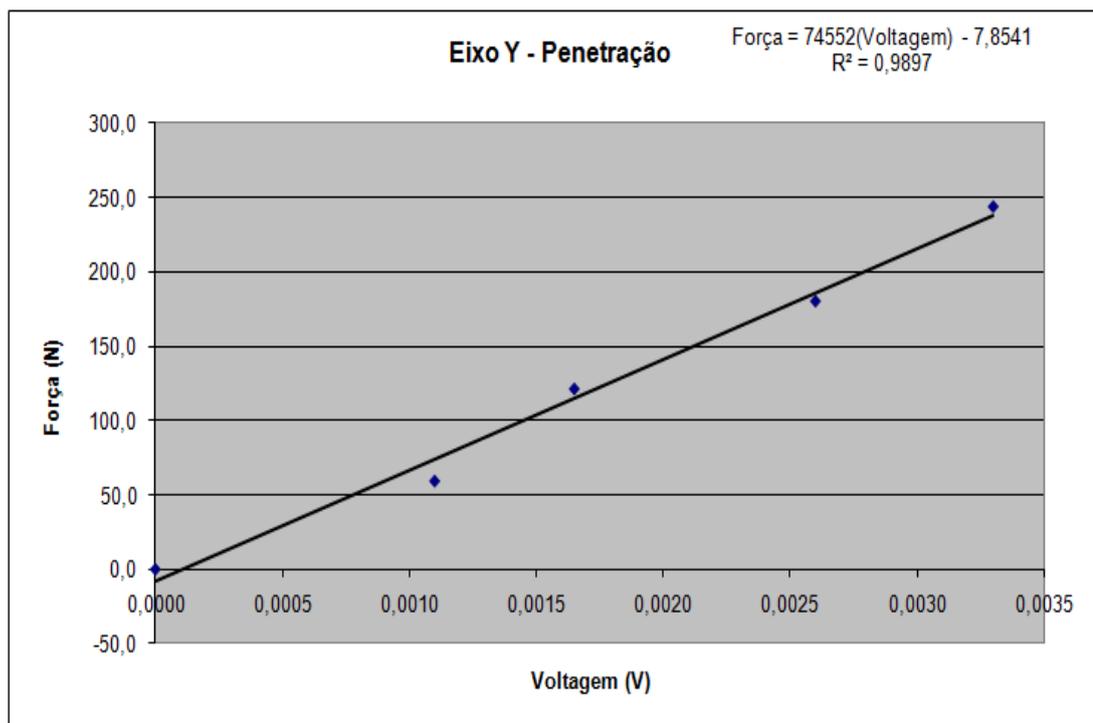
Figura 48 - Calibração eixo Y.

Na Tabela 7 estão representados os resultados da calibração para o eixo Y:

Tabela 7 - Resultados calibração do eixo Y.

	Primeiro Ensaio	Segundo Ensaio			
Força Medida (N)	Voltagem (V)	Voltagem (V)	Média (V)	MÓDULO DA MÉDIA (V)	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0
59,4	0,0012	0,0010	0,0011	0,0011	0,000141421
121,4	0,0018	0,0015	0,0017	0,0017	0,000212132
180,6	0,0027	0,0025	0,0026	0,0026	0,000141421
244,2	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0

Analogamente ao gráfico do resultado do X, têm-se o gráfico para o eixo Y conforme Figura 49:



**Figura 49 - Gráfico do resultado da calibração do eixo Y.**

A calibração do eixo Y apresenta uma boa correlação conforme demonstrado pelo valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), porém o resultado foi inferior ao do eixo X.

### **4.2.3 Eixo Z**

O eixo Z, chamado de penetração, foi calibrado fixando-se o porta ferramentas conforme a Figura 50:



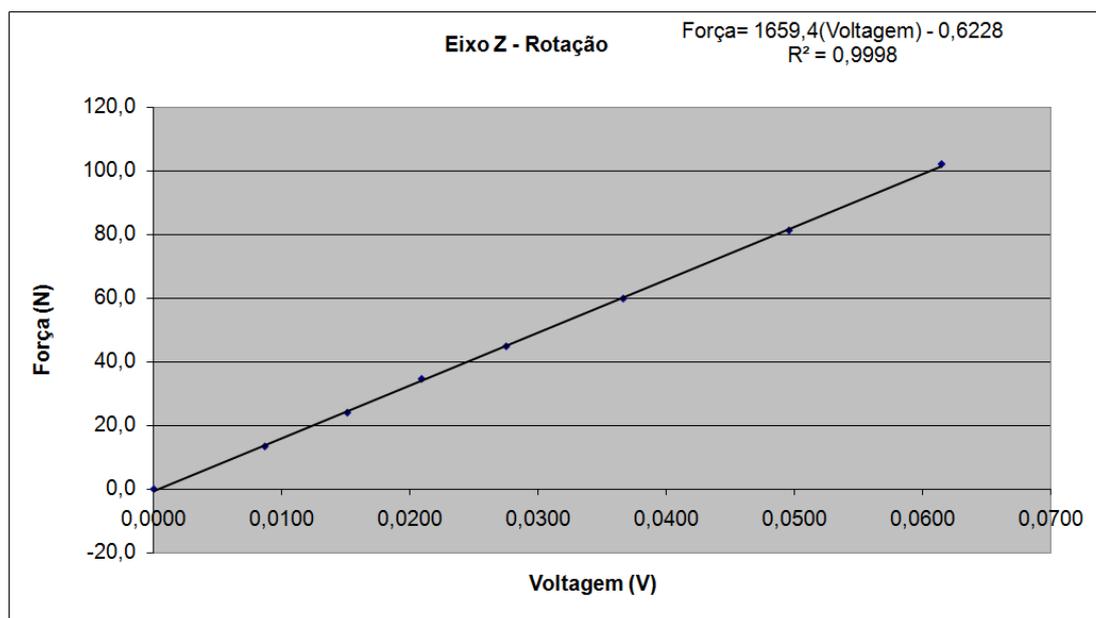
Figura 50 - Calibração eixo Z.

Na Tabela 8 estão representados os resultados da calibração para o eixo Z:

Tabela 8 - Resultados calibração do eixo Z.

	Primeiro Ensaio	Segundo Ensaio	Terceiro Ensaio			
Força Medida (N)	Voltagem (V)	Voltagem (V)	Voltagem (V)	Média (V)	MÓDULO DA MÉDIA (V)	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0
13,4	0,0083	0,0089	0,0088	0,0087	0,0087	0,000321455
24,0	0,0147	0,0150	0,0156	0,0151	0,0151	0,000458258
34,6	0,0205	0,0211	0,0211	0,0209	0,0209	0,00034641
44,8	0,0272	0,0275	0,0278	0,0275	0,0275	0,0003
59,8	0,0354	0,0379	0,0366	0,0366	0,0366	0,001250333
81,2	0,0483	0,0516	0,0488	0,0496	0,0496	0,001778576
102,0	0,0596	0,0635	0,0613	0,0615	0,0615	0,001955335

Analogamente ao gráfico do resultado do X, têm-se o gráfico para o eixo Z conforme Figura 51:



**Figura 51 - Gráfico do resultado da calibração do eixo Z.**

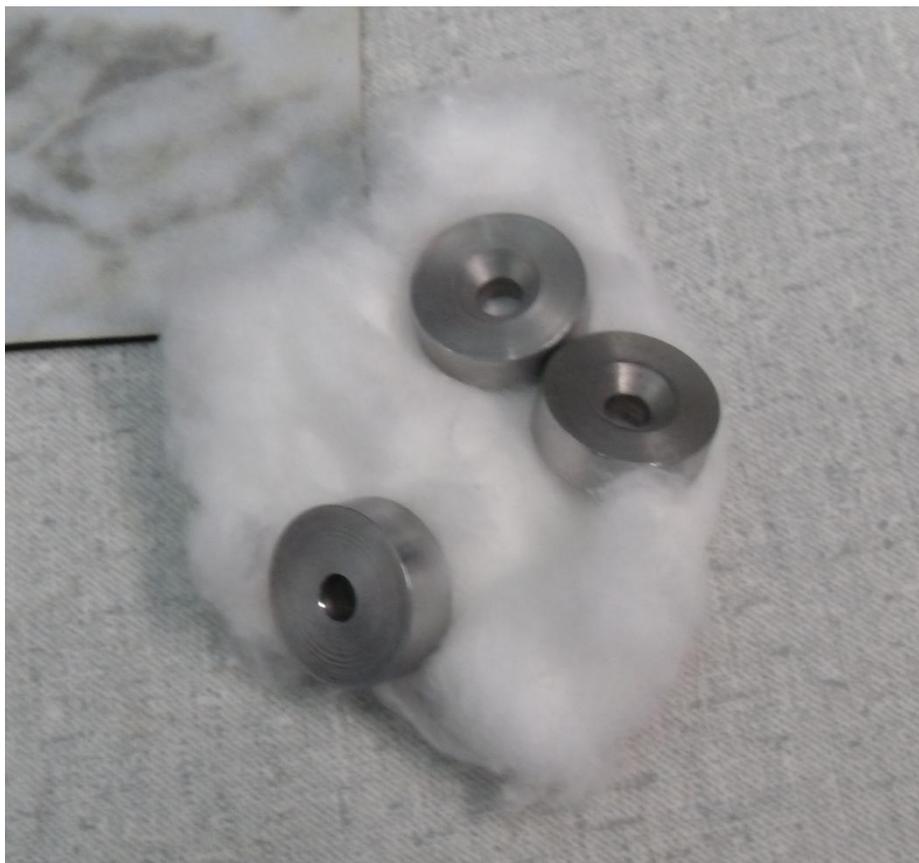
A calibração do eixo Z apresenta uma ótima correlação conforme demonstrado pelo valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é a melhor dentre os três eixos.

### **4.3 Parametrização do Ensaio**

A realização do ensaio necessita que as ferramentas (pastilhas) e os contracorpos estejam usinados na forma adequada. Na Figura 52 a imagem dos contracorpos e na Figura 53 a imagem das ferramentas prontas para o início dos ensaios.



**Figura 52 - Contracorpos usados nos ensaios.**



**Figura 53 - Ferramentas usadas nos ensaios.**

Antes do início dos ensaios as ferramentas foram limpas com álcool no ultrassom durante cinco minutos e após a limpeza não havia mais contato das mãos com as ferramentas.

Outros parâmetros importantes do ensaio são a frequência de amostragem igual a 2500 Hz, a velocidade tangencial entre o contracorpo e a ferramenta de 30 m/min e o avanço programado no torno de 3 mm por volta.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Conforme foi destacado no Resumo do Projeto, a Figura 7 apresenta duas características interessantes: a inversão que ocorre com o aumento da profundidade de penetração entre as forças tangenciais do ensaio do LFS-SR e do FSA-TiN e que para os ensaios na FSA o recobrimento de AlTiCrN apresentou maior força de atrito do que o recobrimento de TiN sendo que nos ensaios no LFS ocorreu o contrário.

As variáveis identificadas que podem influenciar as forças de atritos nos ensaios são: velocidade de deslizamento, material do contracorpo, a carga normal aplicada, o recobrimento sobre a ferramenta, o próprio método de medição da força de atrito. Adicionalmente, segundo Claudin (2008), “o recobrimento é o parâmetro de maior influência, seguido pela velocidade de deslizamento e finalmente a pressão”.

No caso da diferença encontrada entre as maiores forças de atrito para diferentes recobrimentos entre os ensaios do LFS e da FSA, a velocidade de deslizamento é igual em todos os ensaios, o contracorpo é o mesmo, e tanto o recobrimento de TiN como o de AlTiCrN para os dois ensaios são do mesmo lote, logo as variáveis que provavelmente podem ter causado tal diferença são a carga normal aplicada e o método de medição da força de atrito.

Os ensaios LFS e na FSA foram realizados em equipamentos diferentes e a profundidade de penetração foi um parâmetro estabelecido para que ocorressem os mesmos esforços. É altamente provável que mesmo programando uma mesma profundidade de penetração nos dois equipamentos os esforços de fato fossem diferentes –a diferença entre as forças tangenciais é uma evidência nesse sentido– sendo que isso causaria um melhor desempenho do recobrimento de AlTiCrN no LFS enquanto na FSA isso seria verificado para o recobrimento de TiN. Portanto, nesse caso um recobrimento seria mais adequado do que outro dependendo dos esforços a serem aplicados.

Em relação ao método de medição da força de atrito, o equipamento da FSA apresentou uma fixação mais rígida do porta ferramentas o que, em princípio, poderia fornecer resultados mais confiáveis. Finalmente, analisando as Figuras 7 e 8, nota-se que principalmente para a profundidade de 0,3 mm o recobrimento de AlTiCrN para

o LFS e o TiN para a FSA apresentam muitos picos de força de atrito para baixo o que causa um significativo abaixamento da média. Adicionalmente como pode ser observado na Figura 9, para a profundidade de 0,1mm as ferramentas com revestimento de ambos os ensaios apresentam força de atrito muito próximas. Porém ao se atingir 0,3 mm o afastamento já é significativo, com as considerações sobre os picos para baixo é possível que este afastamento seja menor e que com isso o desempenho dos recobrimentos seja próximo.

Para inversão que ocorre com o aumento da profundidade de penetração entre as forças tangenciais do ensaio do LFS-SR e do FSA-TiN e considerando que a velocidade de deslizamento e o material do contracorpo são os idênticos. Inicialmente deve ser feita uma ressalva, da Figura 5 para o ensaio sem revestimento a 0,1 mm de profundidade nota-se que existe um pico de força no início do ensaio, como o gráfico da Figura 7 representa uma média e para a 0,1 mm os pontos do FSA-TiN e do LFS-SR estão muito próximo é possível que essa inversão seja devida apenas ao aumento da média que ocorre devido ao tal pico.

Porém, assumindo que a inversão realmente ocorra, ela estará em algum ponto entre as profundidades de 0,1 a 0,3 mm, mas não necessariamente no ponto representando na Figura 7, isso só ocorreria caso o comportamento das curvas FSA-TiN e LFS-SR fosse linear neste intervalo.

Para o início do ensaio o FSA-TiN apresenta uma menor força de atrito, porém ao final o LFS-SR é que tem essa característica, ou seja, com o aumento da profundidade de penetração (aumento dos esforços) ocorreu a inversão, porém como para o caso da diferença encontrada entre as maiores forças de atrito para diferentes recobrimentos entre os ensaios do LFS e da FSA, os equipamentos do LFS e da FSA são diferentes e a mesma profundidade de penetração pode resultar em esforços distintos. Assumindo que o desempenho da ferramenta com recobrimento de TiN deve ser superior ao da sem recobrimento, pode-se afirmar que a ferramenta do LFS impõe cargas menores do que a da FSA para mesmas profundidades de penetração. Dessa maneira, para a profundidade de penetração de 0,1 mm o LFS-SR apresenta uma menor força de atrito, pois a carga normal é menor, porém depois de certo ponto entre 0,1 e 0,3 mm mesmo com maiores cargas normais o FSA-Ti apresenta melhor desempenho devido a melhor eficiência do recobrimento em cargas elevadas.

## 5.1 Resultados dos Ensaio na Ferramenta

Os ensaios foram realizados no LFS usando as condições descritas na seção 4 deste trabalho. A seguir os resultados para cada um dos ensaios na ordem em que foram feitos:

- **Primeiro Ensaio – Profundidade de Penetração 0,10 mm.**

Na Figura 54 é demonstrada como são nomeadas as imagens da ferramenta. Para o primeiro ensaio, a região da ferramenta usada está nas Figuras 55, 56 e 57.

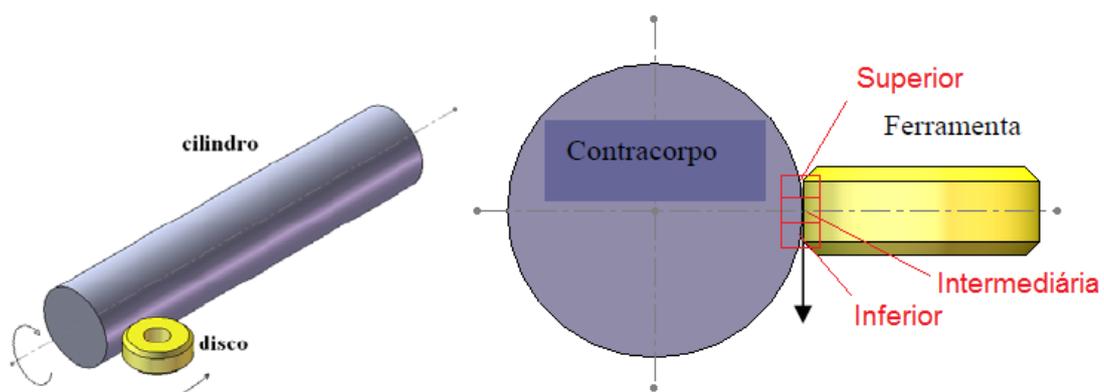


Figura 54 - Legenda usada nas imagens da ferramenta por Mendes (2009).

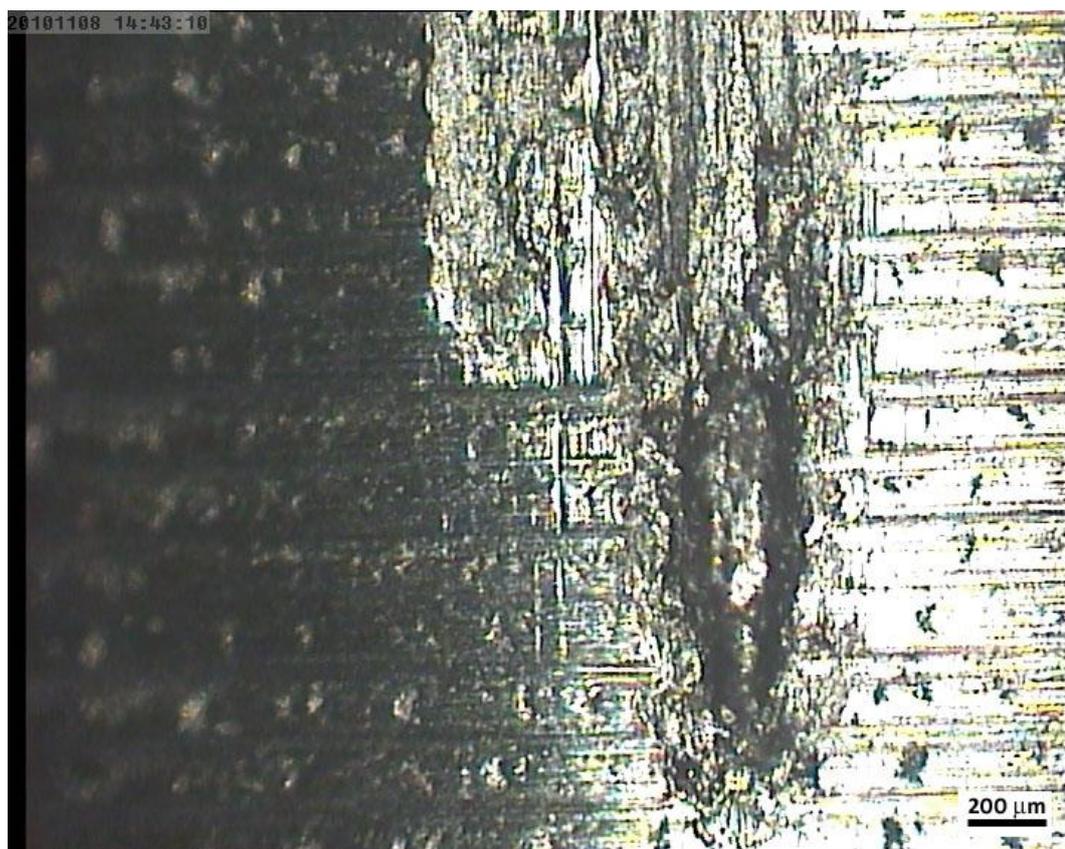


Figura 55 - Parte superior da ferramenta na região do primeiro ensaio.



**Figura 56 - Parte intermediária da ferramenta na região do primeiro ensaio.**

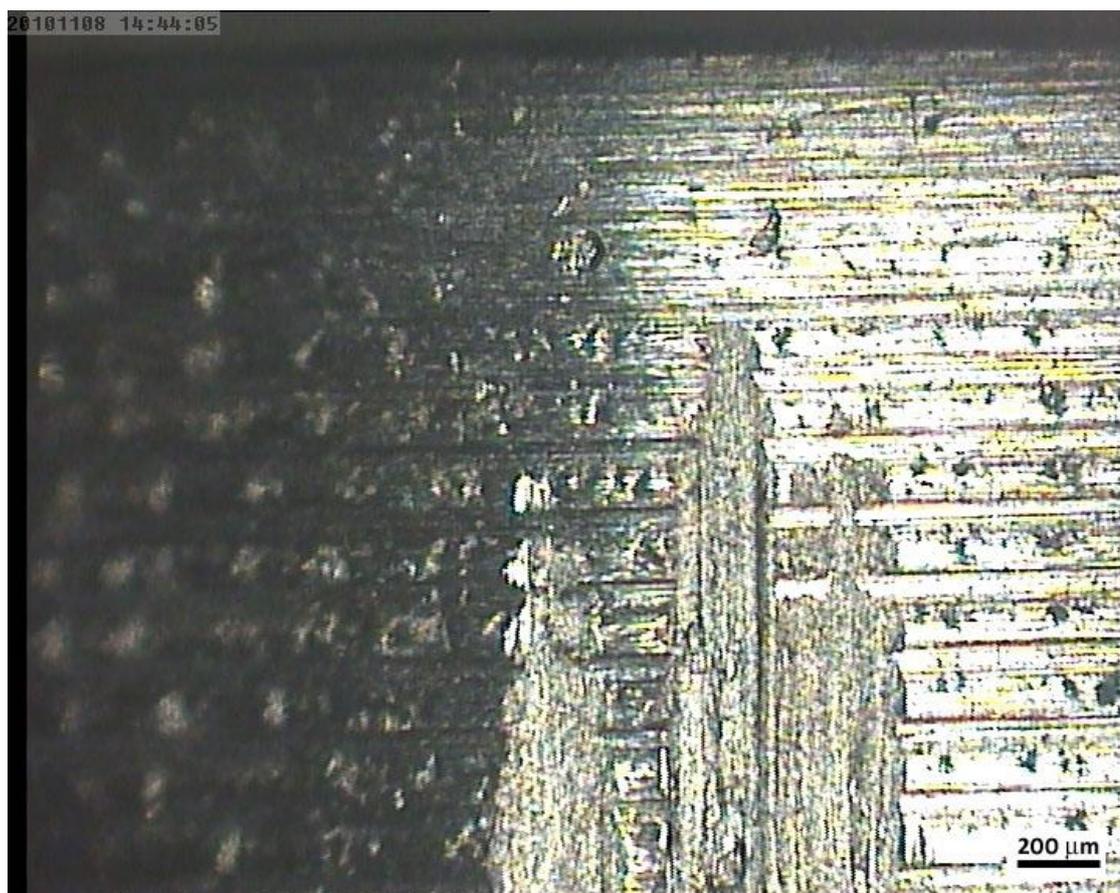
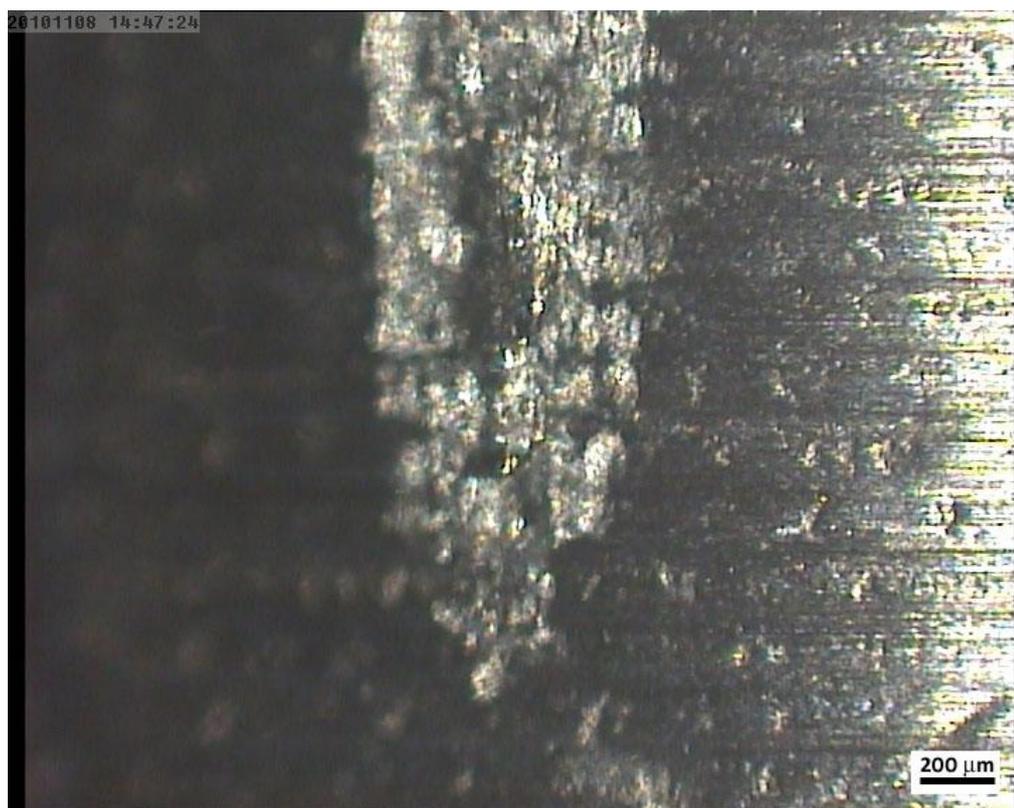


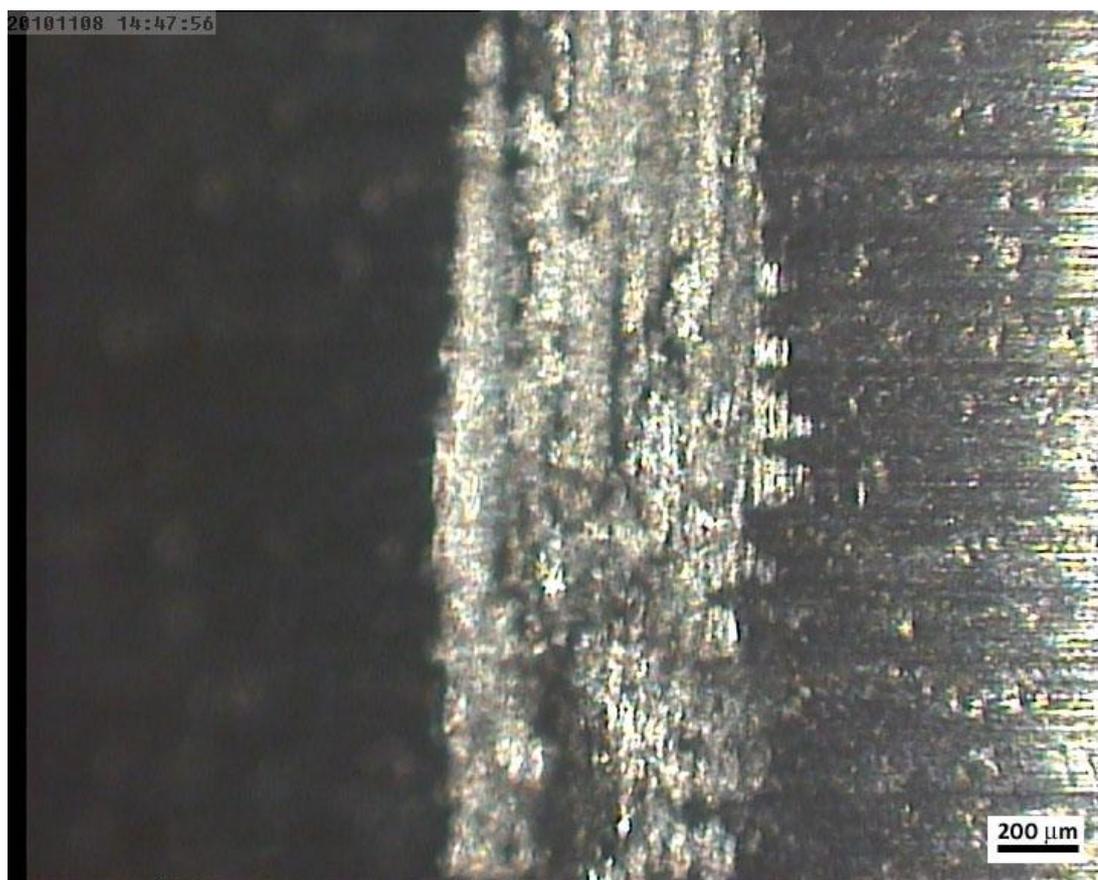
Figura 57 - Parte inferior da ferramenta na região do primeiro ensaio.

- **Segundo Ensaio – Profundidade de Penetração 0,05 mm**

As imagens da ferramenta utilizada no segundo ensaio estão apresentadas nas Figuras 58, 59 e 60.



**Figura 58 - Parte superior da ferramenta na região do segundo ensaio.**



**Figura 59 - Parte intermediária da ferramenta na região do segundo ensaio.**

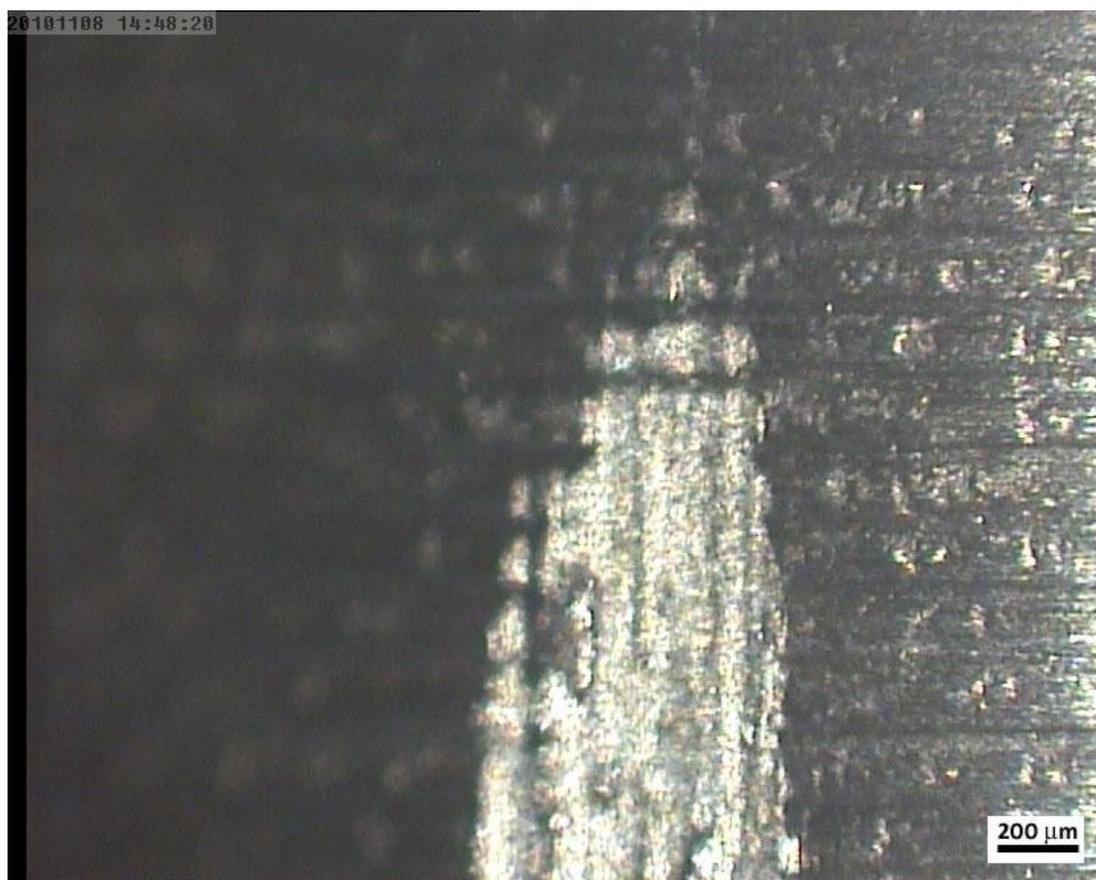


Figura 60 - Parte inferior da ferramenta na região do segundo ensaio.

- **Terceiro Ensaio – Profundidade de Penetração 0,03 mm**

A imagem da ferramenta utilizada no segundo ensaio está apresentada na Figura 61.

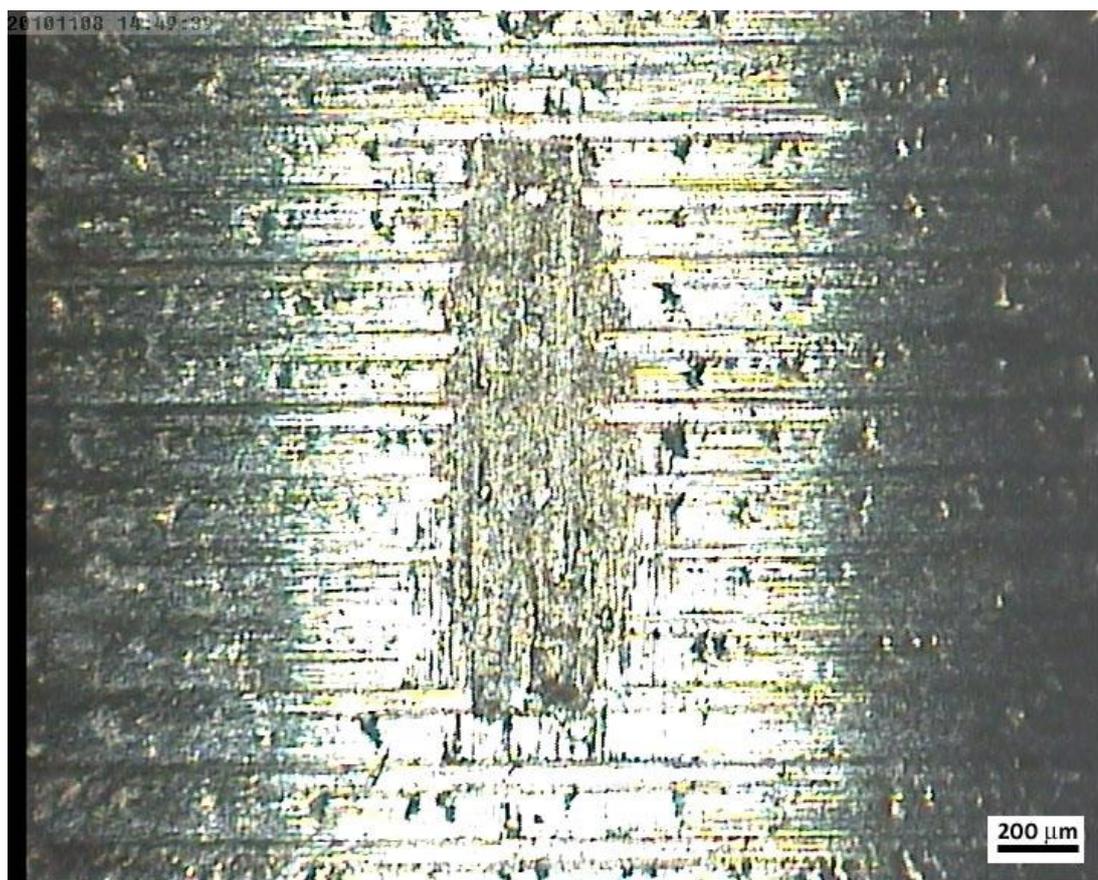


Figura 61 - Imagem da ferramenta na região do terceiro ensaio.

- **Quarto Ensaio – Profundidade de Penetração 0,04 mm**

A imagem da ferramenta utilizada no segundo ensaio está apresentada na Figura 62.

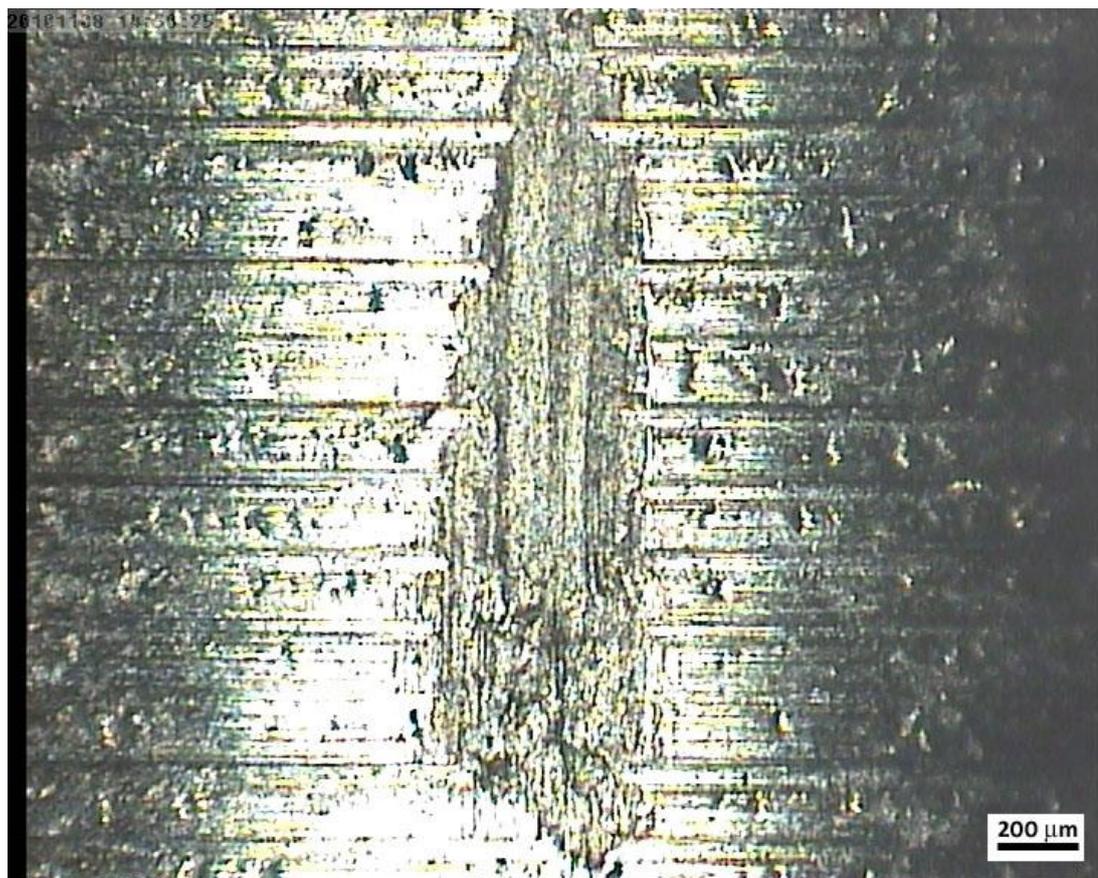


Figura 62 - Imagem da ferramenta na região do quarto ensaio.

- **Quinto Ensaio – Profundidade de Penetração 0,08 mm**

As imagens da ferramenta utilizada no segundo ensaio estão apresentadas nas Figuras 63, 64 e 65.



Figura 63 - Parte superior da ferramenta na região do quinto ensaio.



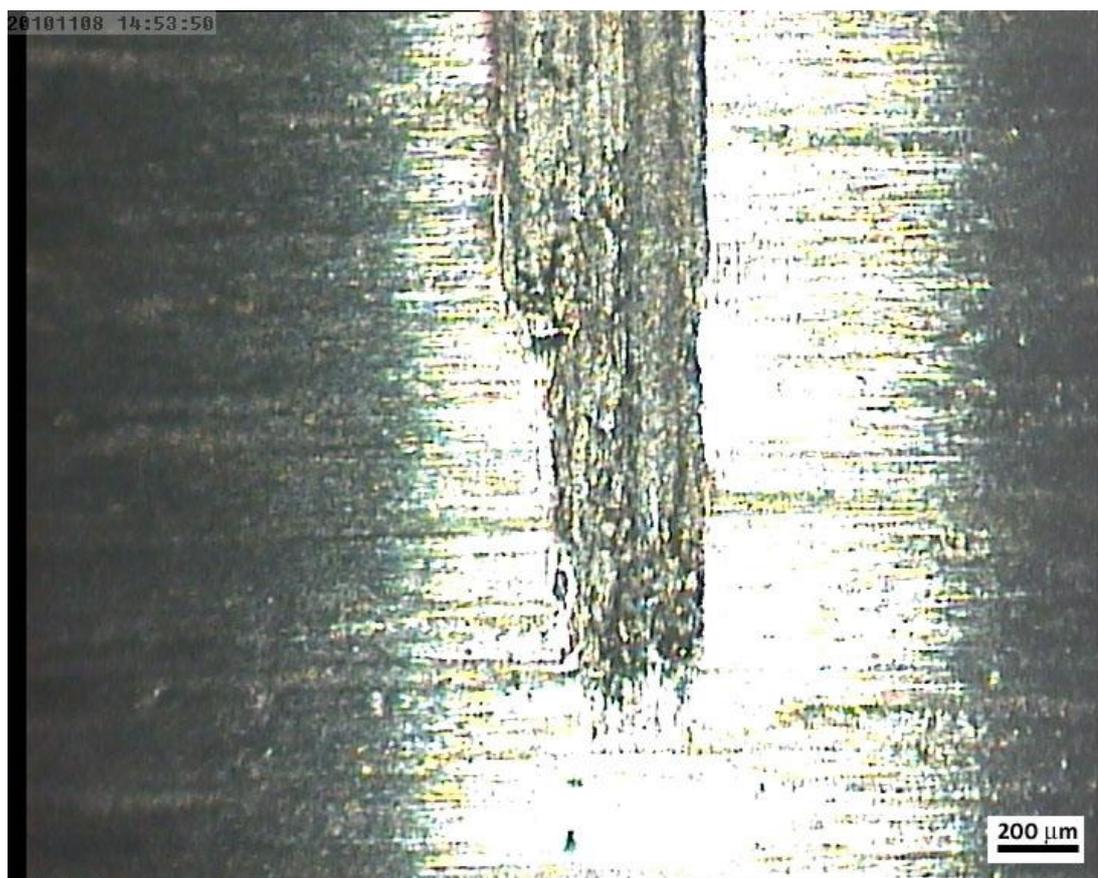
Figura 64 - Parte intermediária da ferramenta na região do quinto ensaio.



Figura 65 - Parte intermediária da ferramenta na região do quinto ensaio.

- **Sexto Ensaio – Profundidade de Penetração 0,12 mm**

As imagens da ferramenta utilizada no segundo ensaio estão apresentadas nas Figuras 66, 67 e 68.



**Figura 66 - Parte superior da ferramenta na região do sexto ensaio.**

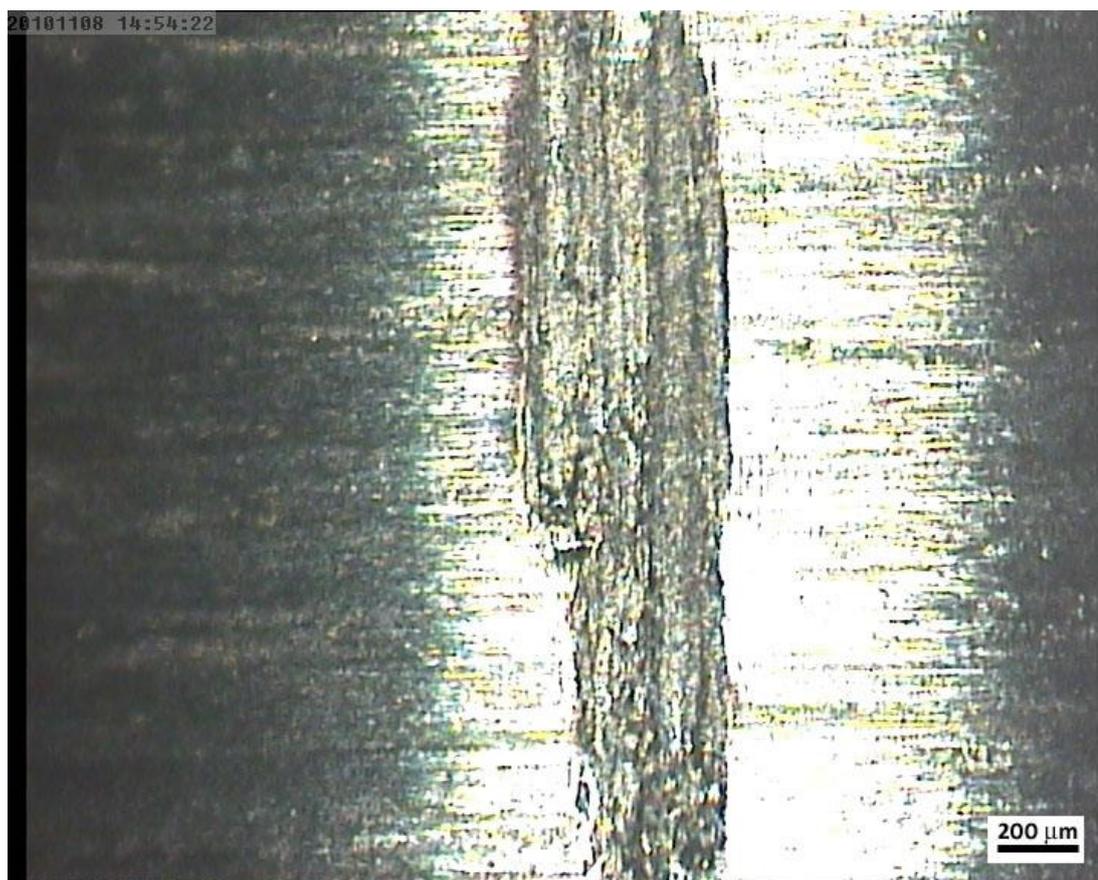


Figura 67 - Parte intermediária da ferramenta na região do sétimo ensaio.

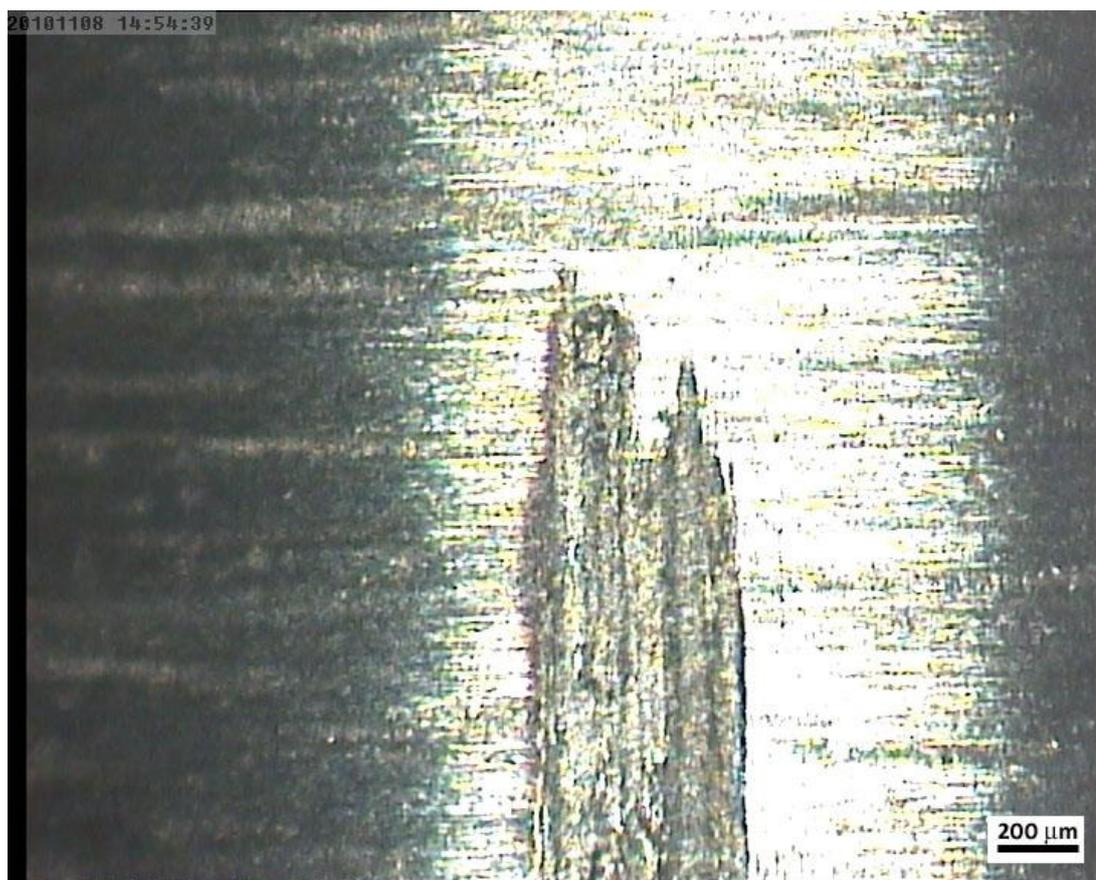


Figura 68 - Parte inferior da ferramenta na região do sétimo ensaio.

- **Sétimo Ensaio – Profundidade de Penetração 0,05 mm**

As imagens da ferramenta utilizada no segundo ensaio estão apresentadas nas Figuras 69, 70 e 71.

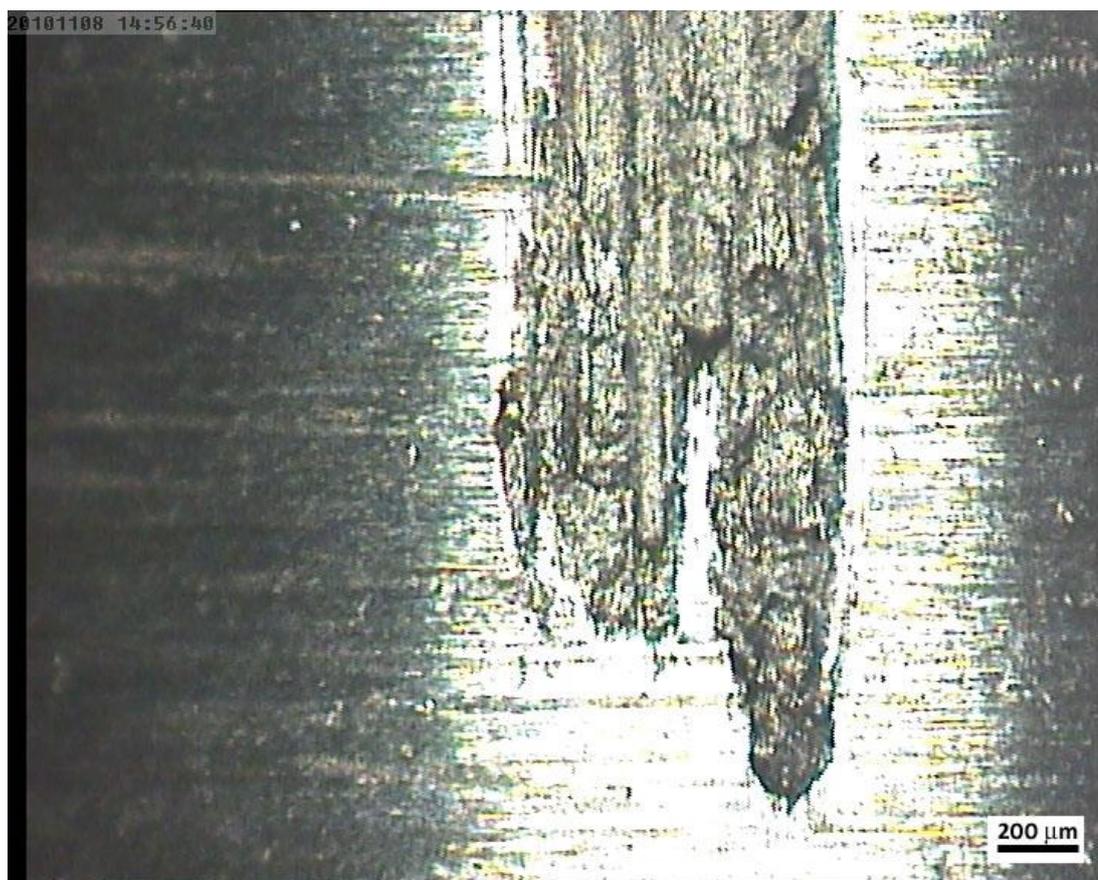


Figura 69 - Parte superior da ferramenta na região do sétimo ensaio.

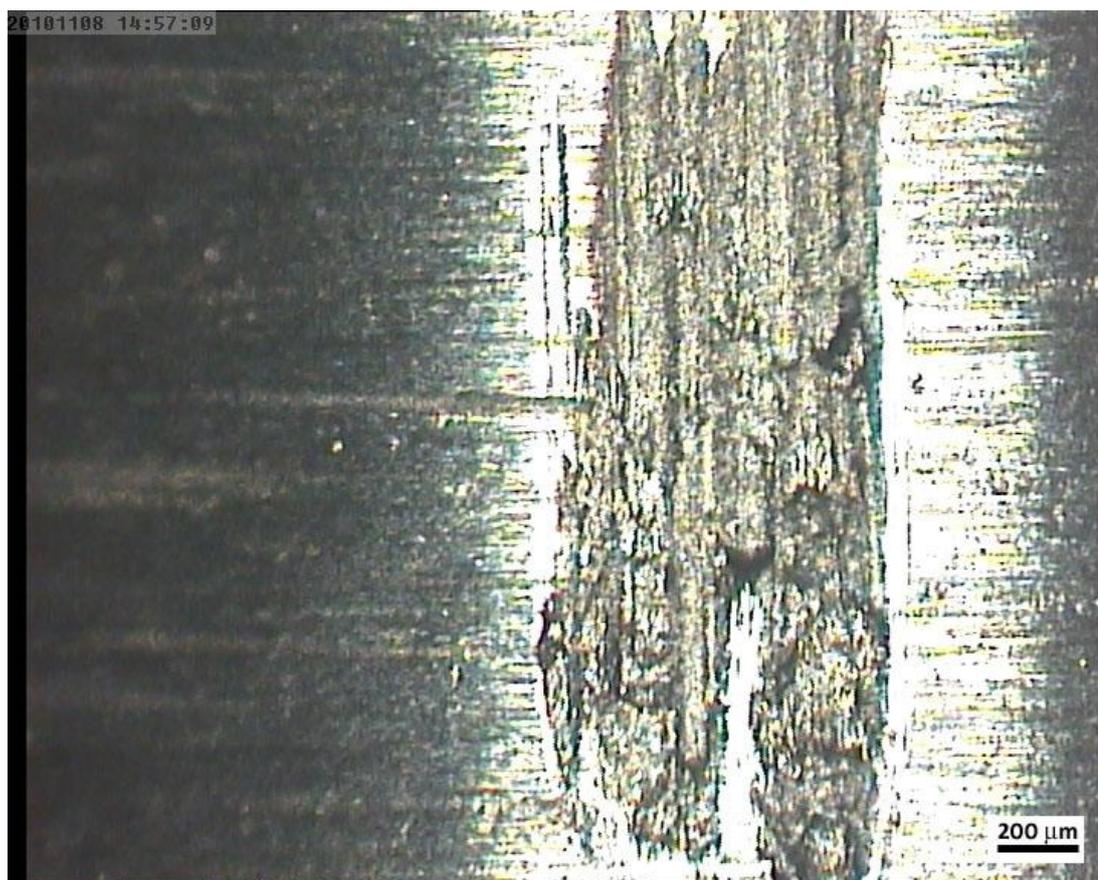
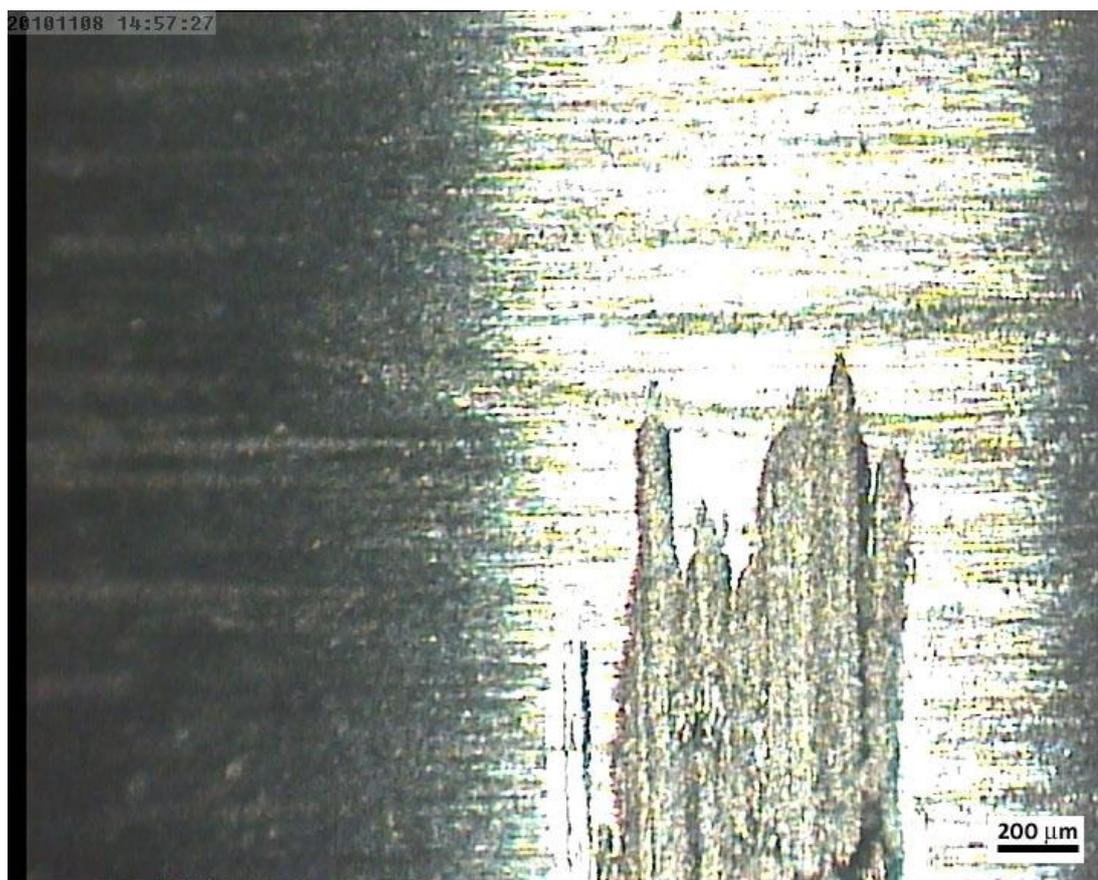


Figura 70 - Parte intermediária da ferramenta na região do sétimo ensaio.



**Figura 71 - Parte inferior da ferramenta na região do sétimo ensaio.**

- **Oitavo Ensaio – Profundidade de Penetração 0,09 mm**

As imagens da ferramenta utilizada no segundo ensaio estão apresentadas nas Figuras 72, 73 e 74.

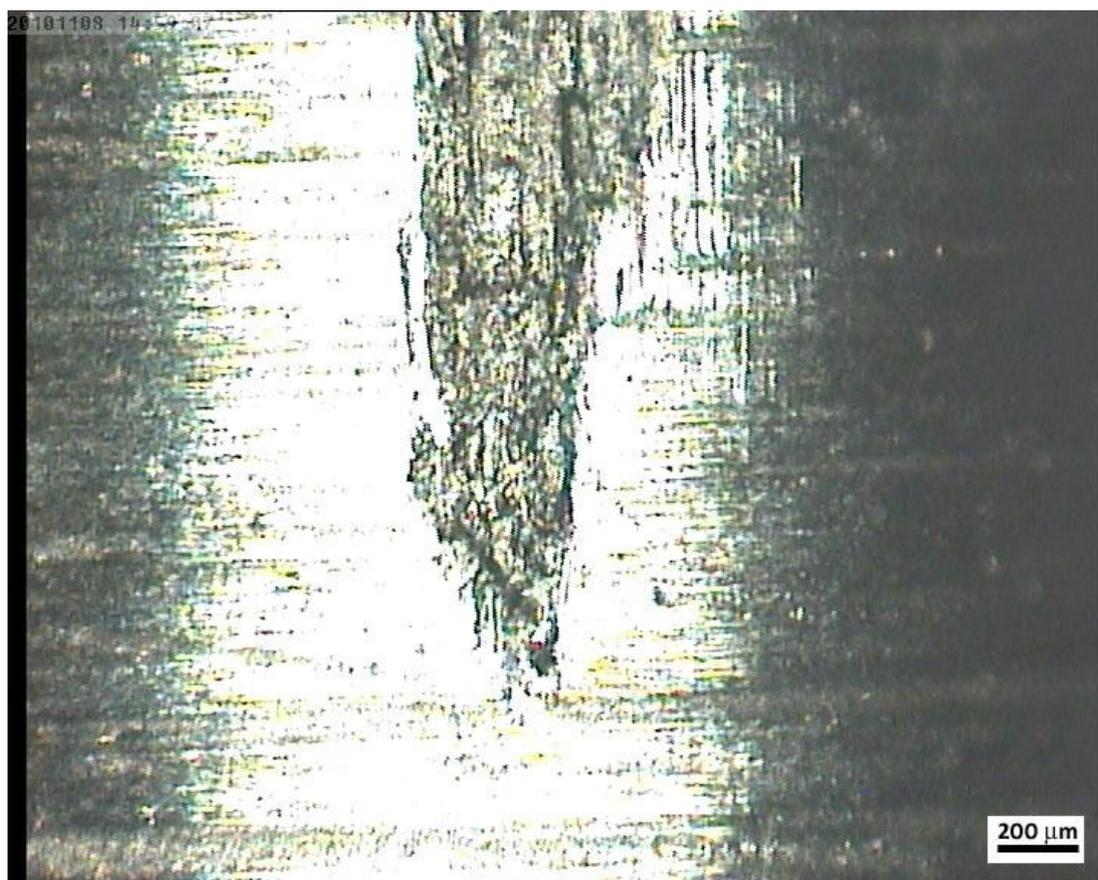


Figura 72 - Parte superior da ferramenta na região do oitavo ensaio.

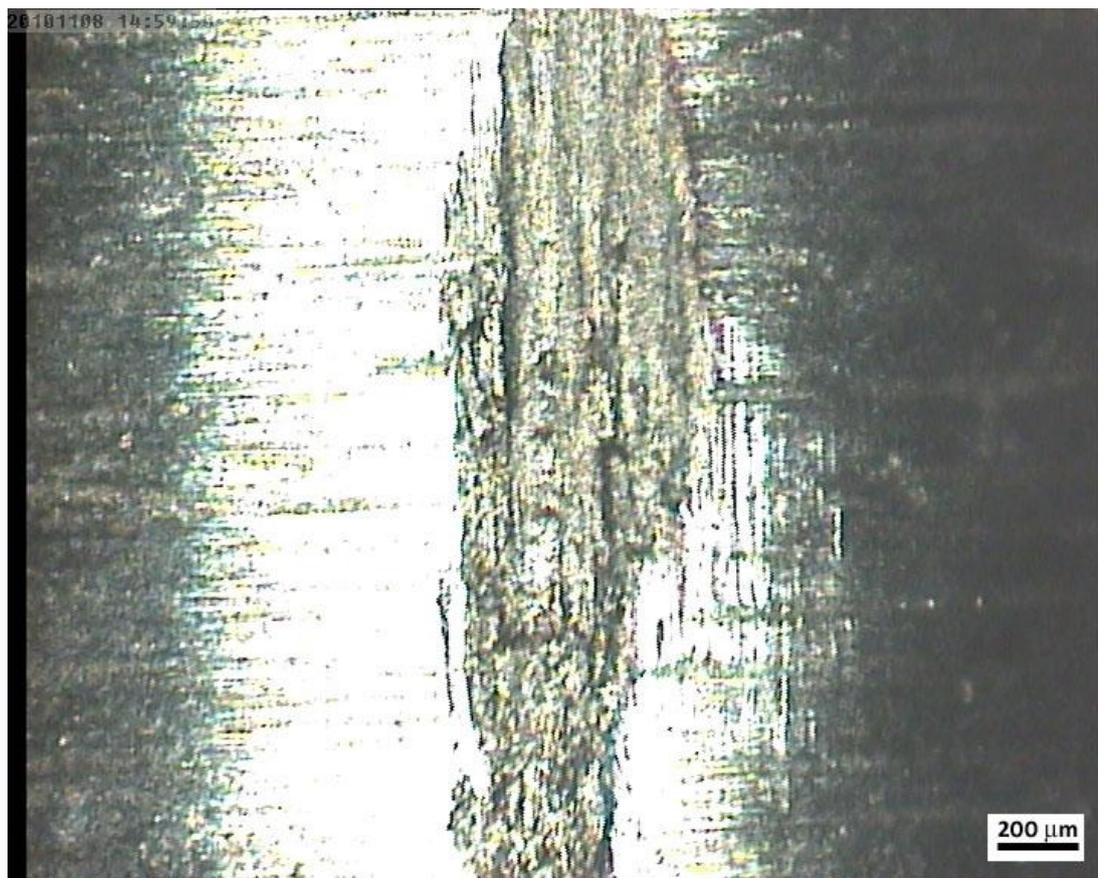


Figura 73 - Parte intermediária da ferramenta na região do oitavo ensaio.

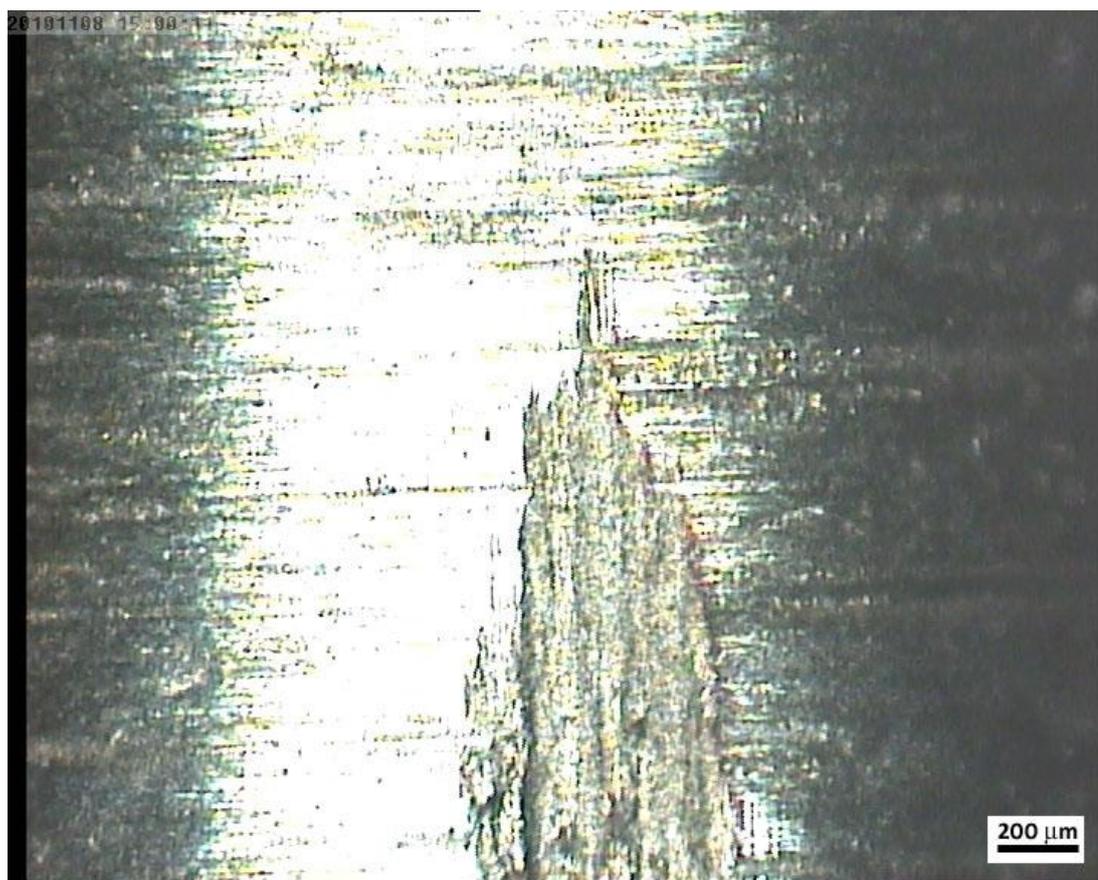
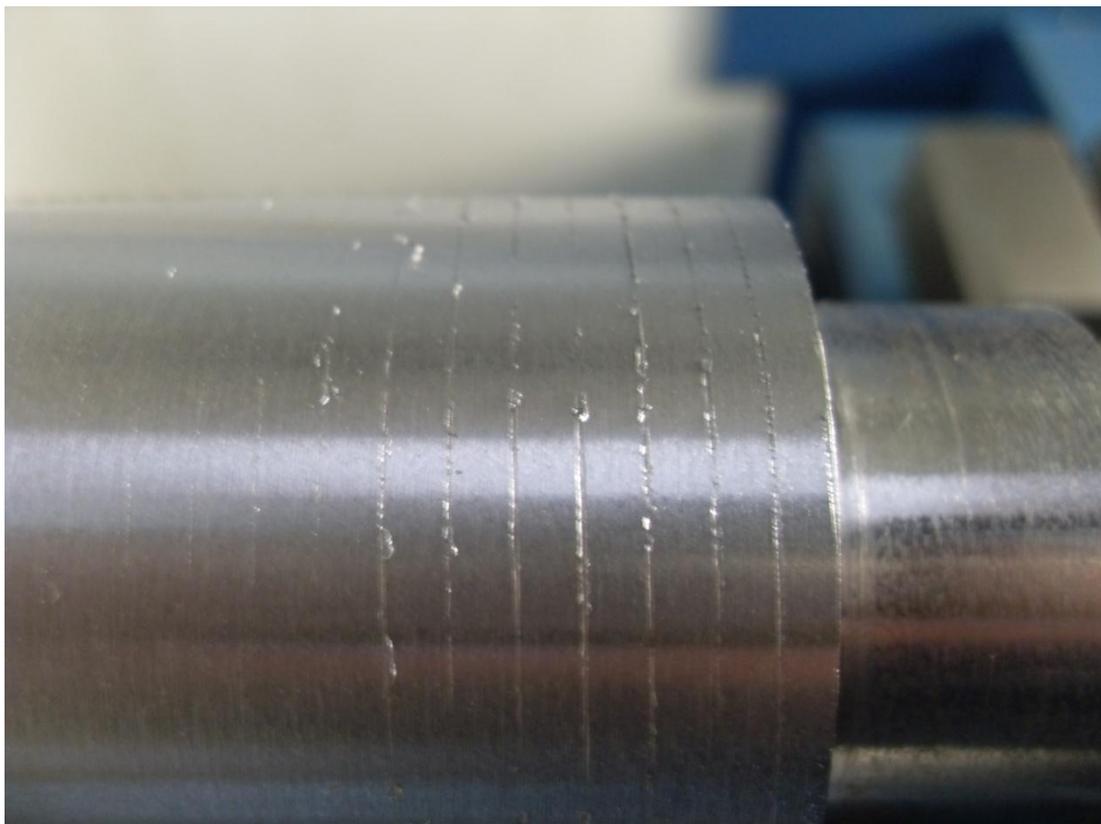


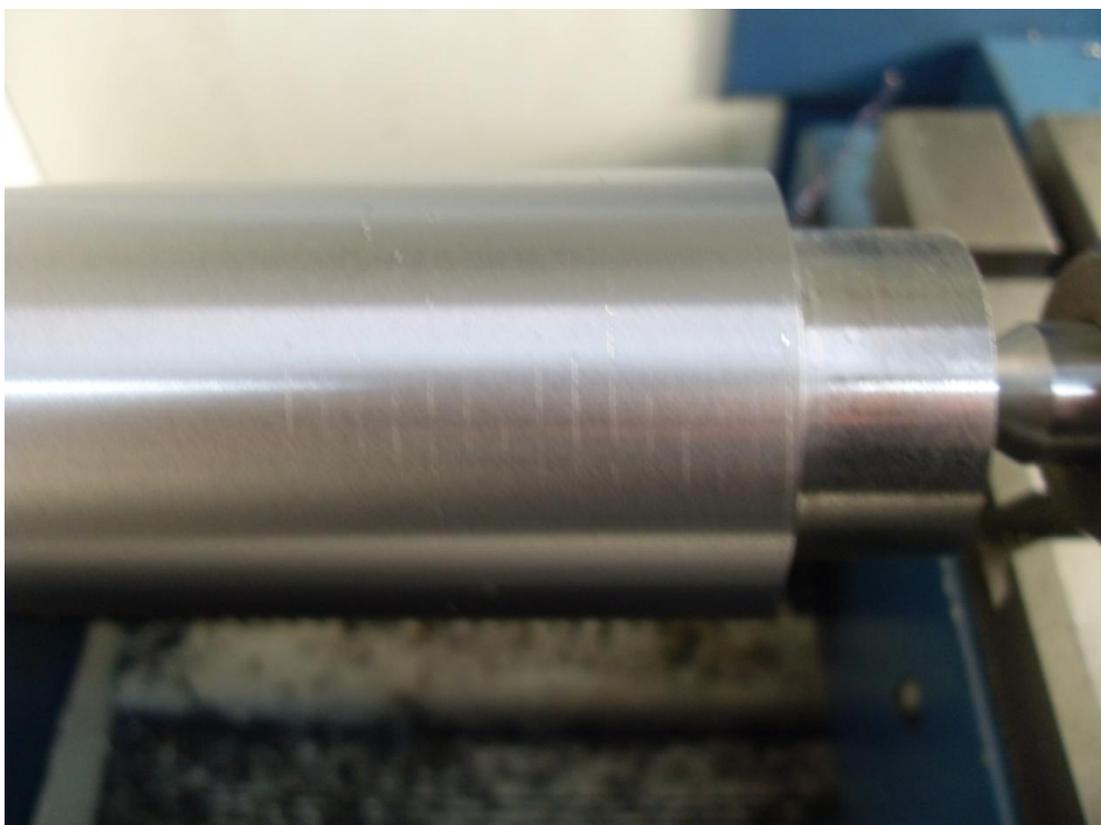
Figura 74 - Parte inferior da ferramenta na região do oitavo ensaio.

## 5.2 Resultados no Contracorpo

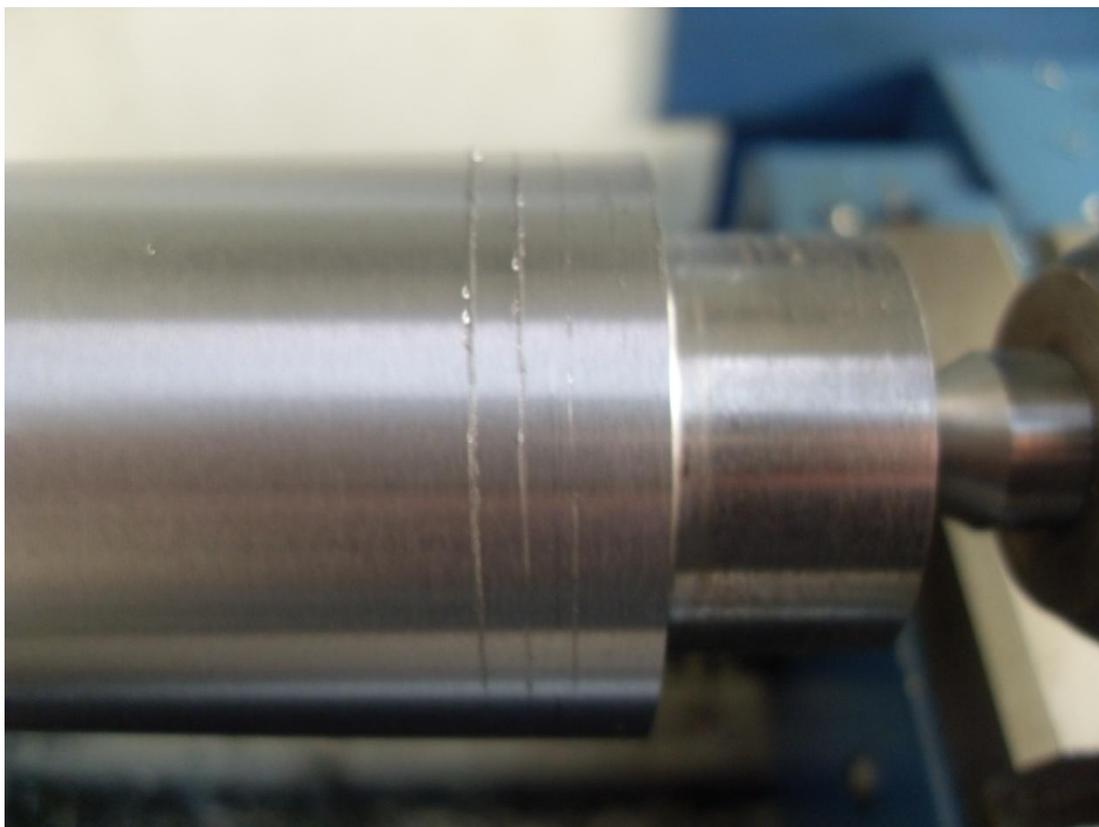
As Figuras 75, 76 e 77 demonstram como ficava o contracorpo após a realização do ensaio. Independente a profundidade de penetração escolhida os resultados, pelo menos macroscopicamente, eram muito semelhantes.



**Figura 75 - Primeira imagem do contracorpo após ensaio.**



**Figura 76 - Segunda imagem do contracorpo após ensaio.**



**Figura 77 - Terceira imagem do contracorpo após ensaio.**

### **5.3 Resultados das Forças Medidas**

As forças registradas durante o ensaio pelo conjunto porta ferramentas para os ensaios estão nos gráficos a seguir:

- **Primeiro Ensaio – Profundidade de Penetração 0,10 mm.**

As forças registradas no primeiro ensaio no eixo X estão na Figura 78, no eixo Y na Figura 79 e no eixo Z na Figura 80.

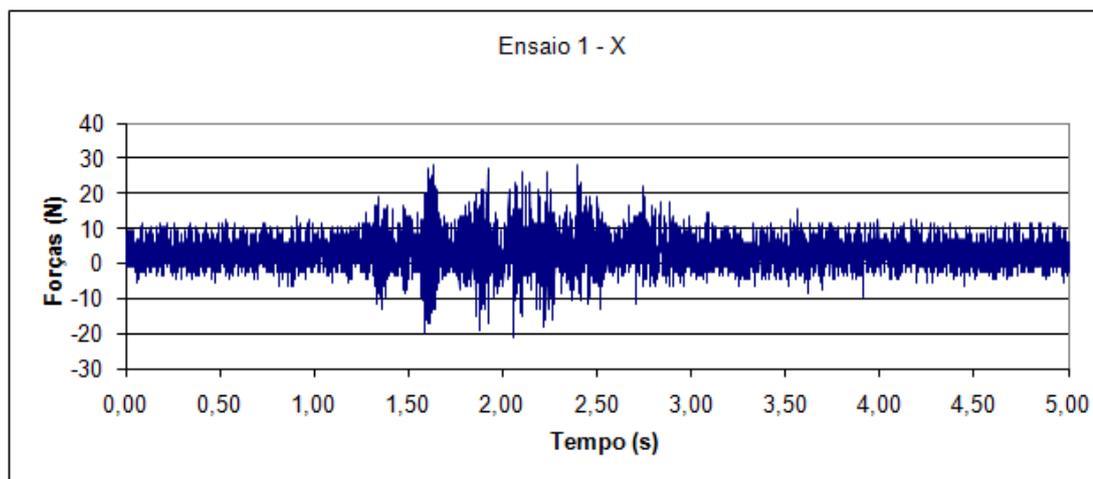


Figura 78 - Gráfico da força no eixo X durante o primeiro ensaio.

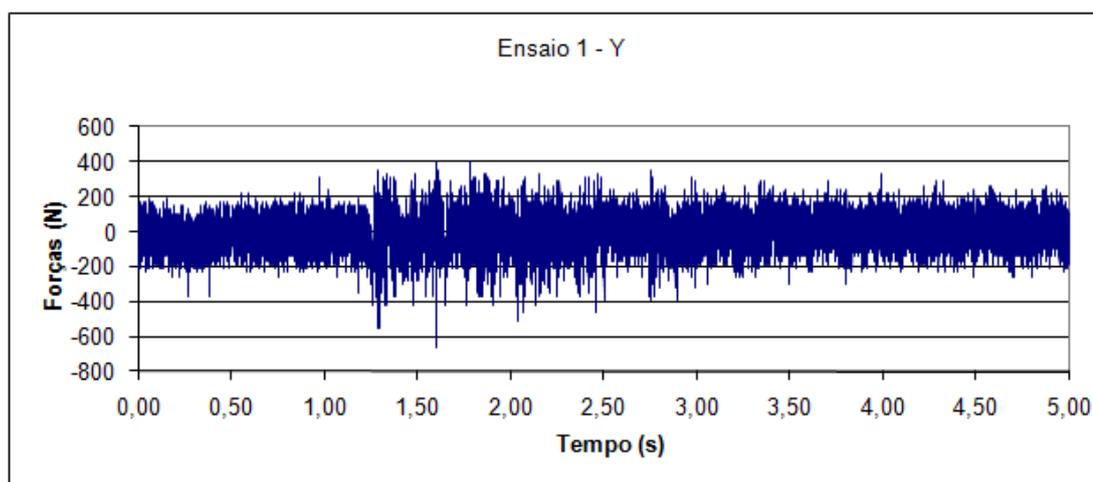


Figura 79 - Gráfico da força no eixo Y durante o primeiro ensaio.

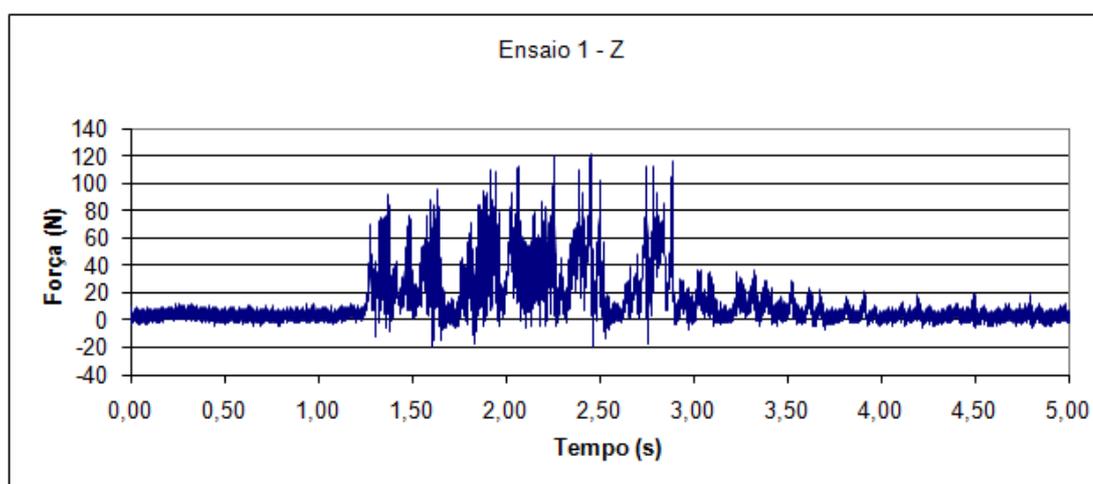


Figura 80 - Gráfico da força no eixo Z durante o primeiro ensaio.

- Segundo Ensaio – Profundidade de Penetração 0,05 mm.

As forças registradas no segundo ensaio no eixo X estão na Figura 81, no eixo Y na Figura 82 e no eixo Z na Figura 83.

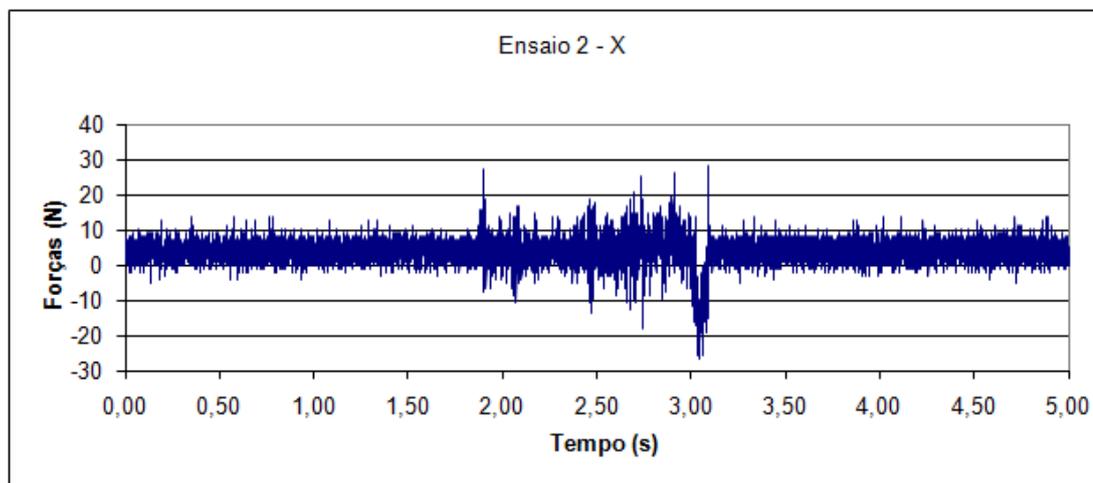
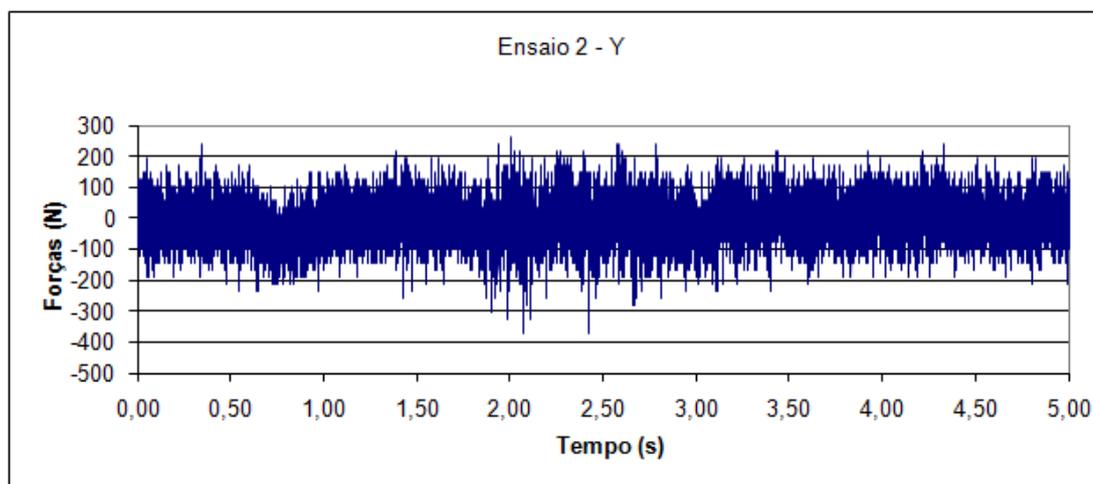


Figura 81 - Gráfico da força no eixo X durante o segundo ensaio.



82 - Gráfico da força no eixo Y durante o segundo ensaio.

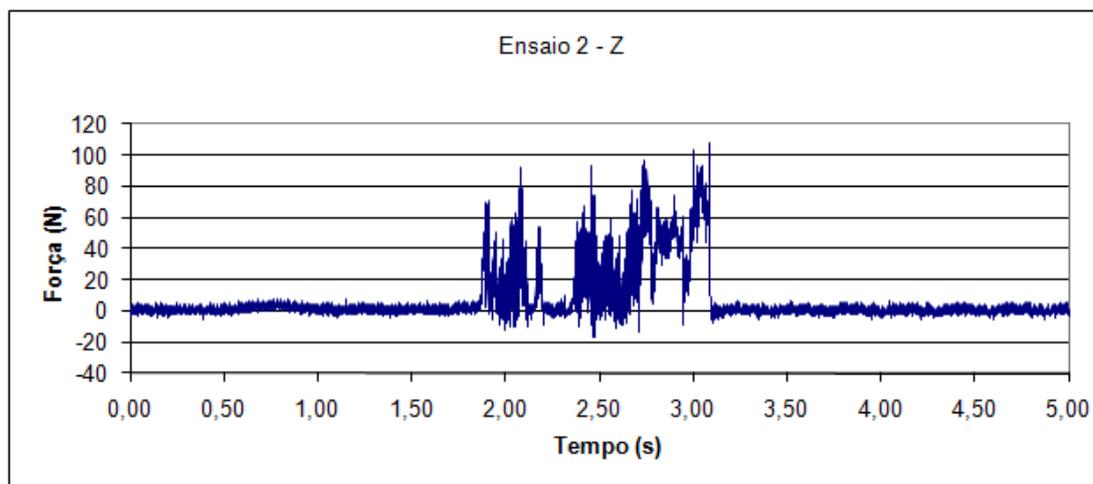


Figura 83 - Gráfico da força no eixo Z durante o segundo ensaio.

- **Terceiro Ensaio – Profundidade de Penetração 0,03 mm.**

As forças registradas no terceiro ensaio no eixo X estão na Figura 84, no eixo Y na Figura 85 e no eixo Z na Figura 86.

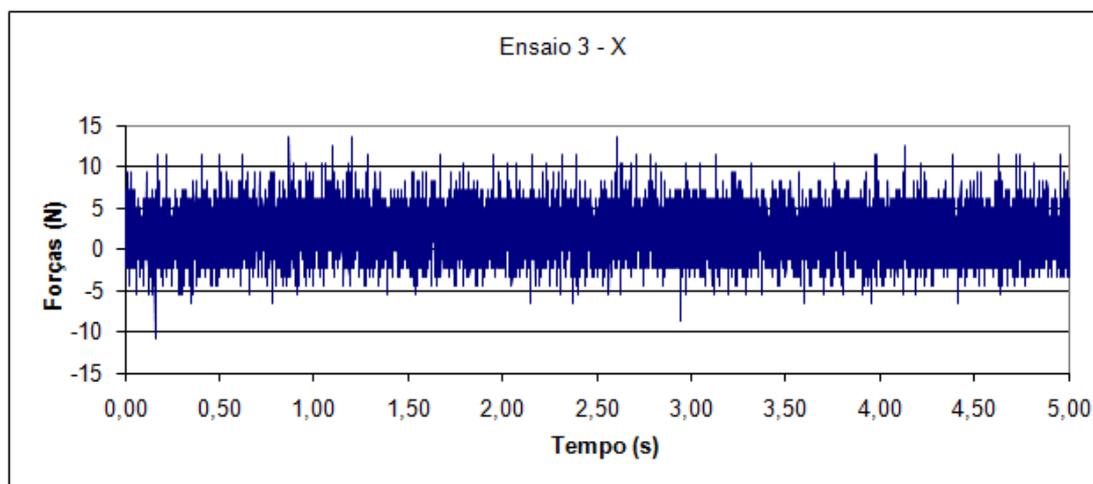


Figura 84 - Gráfico da força no eixo X durante o terceiro ensaio.

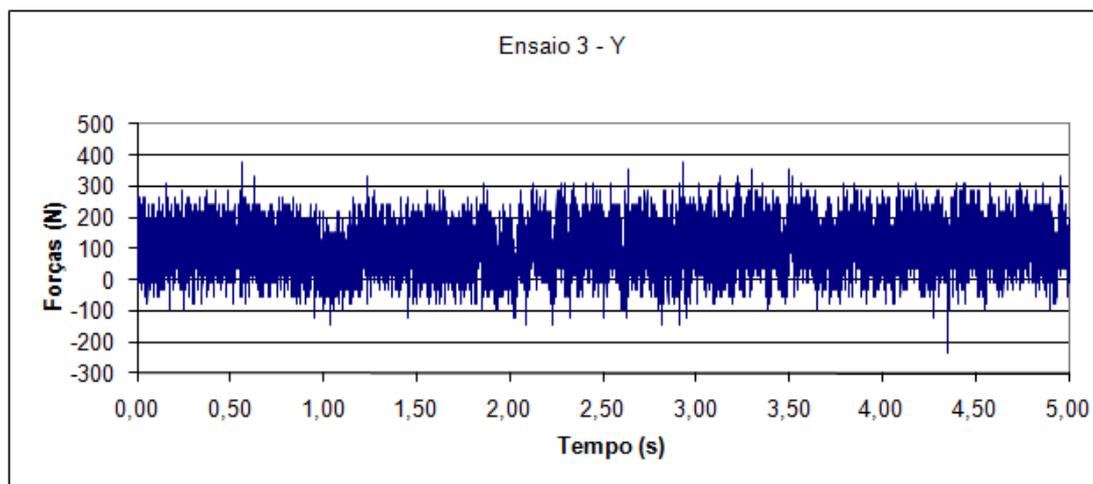


Figura 85 - Gráfico da força no eixo Y durante o terceiro ensaio.

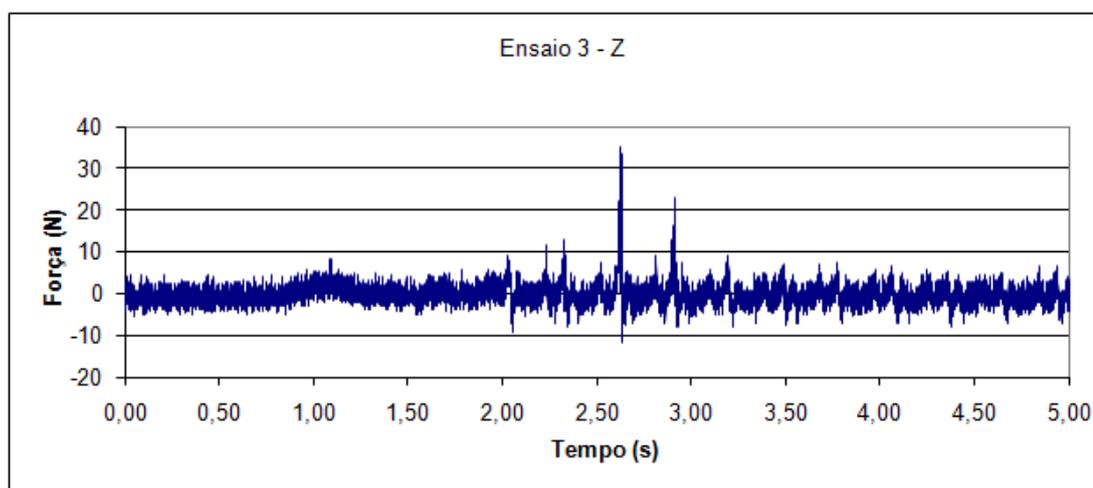


Figura 86 - Gráfico da força no eixo Z durante o terceiro ensaio.

- **Quarto Ensaio – Profundidade de Penetração 0,04 mm.**

As forças registradas no quarto ensaio no eixo X estão na Figura 87, no eixo Y na Figura 88 e no eixo Z na Figura 89.

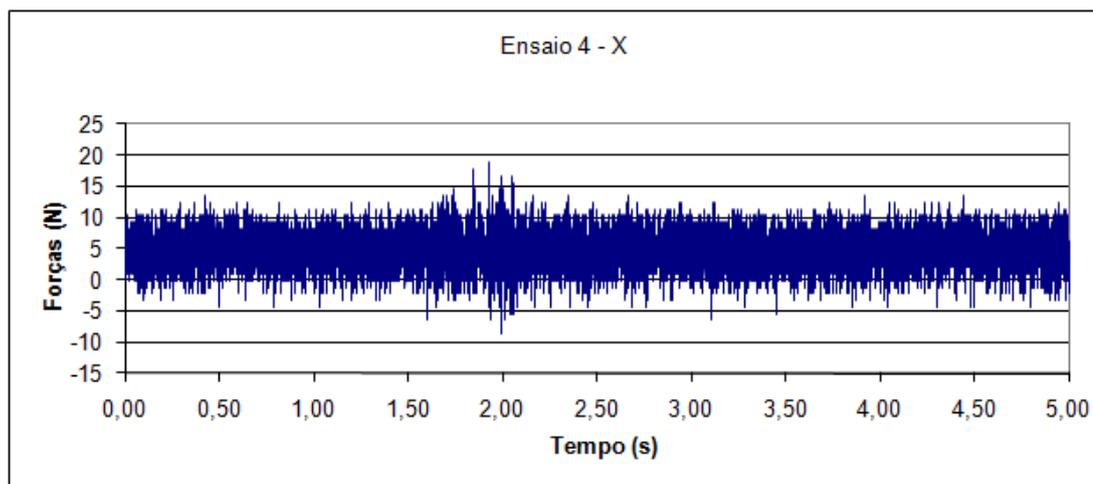


Figura 87 - Gráfico da força no eixo X durante o quarto ensaio.

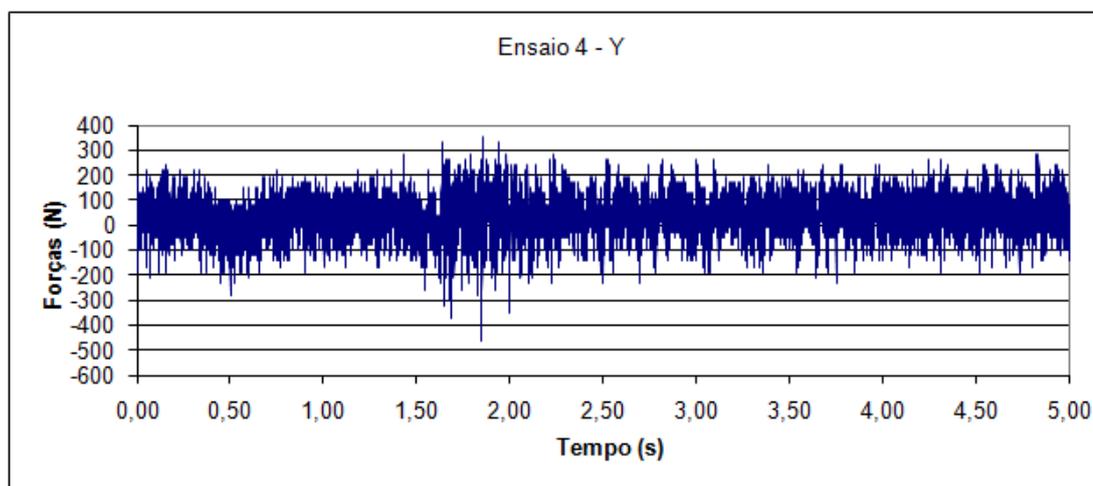


Figura 88 - Gráfico da força no eixo Y durante o quarto ensaio.

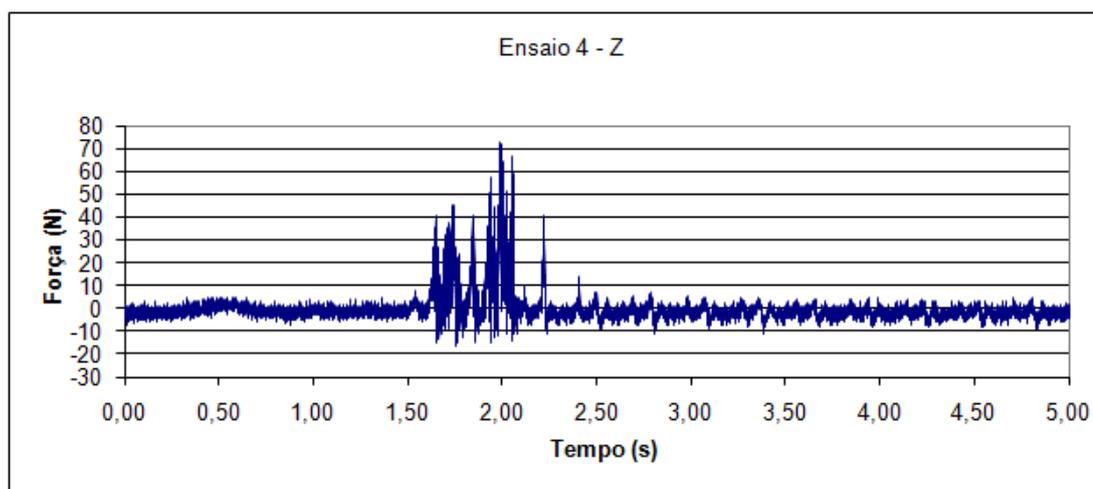


Figura 89 - Gráfico da força no eixo Z durante o quarto ensaio.

- **Quinto Ensaio – Profundidade de Penetração 0,08 mm.**

As forças registradas no quinto ensaio no eixo X estão na Figura 90, no eixo Y na Figura 91 e no eixo Z na Figura 92.

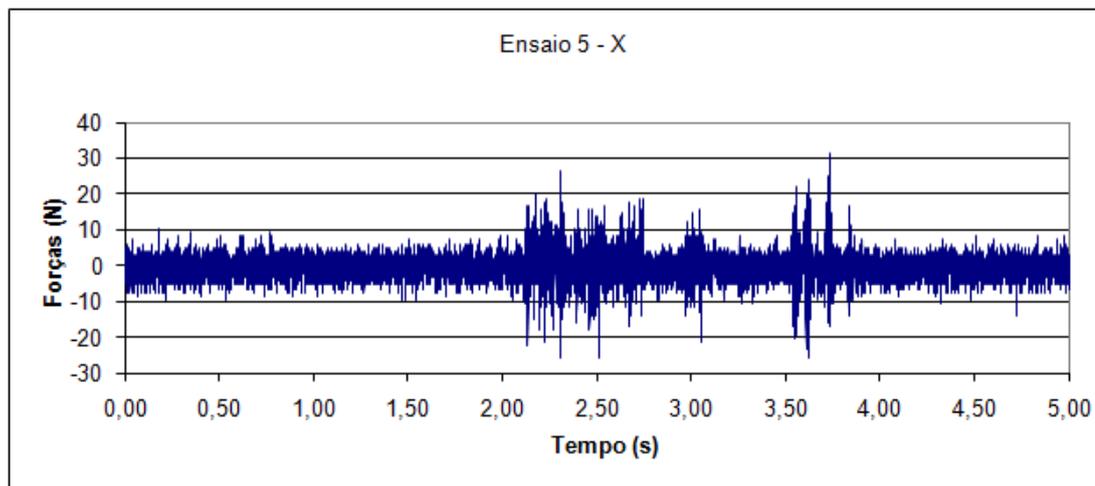


Figura 90 - Gráfico da força no eixo X durante o quinto ensaio.

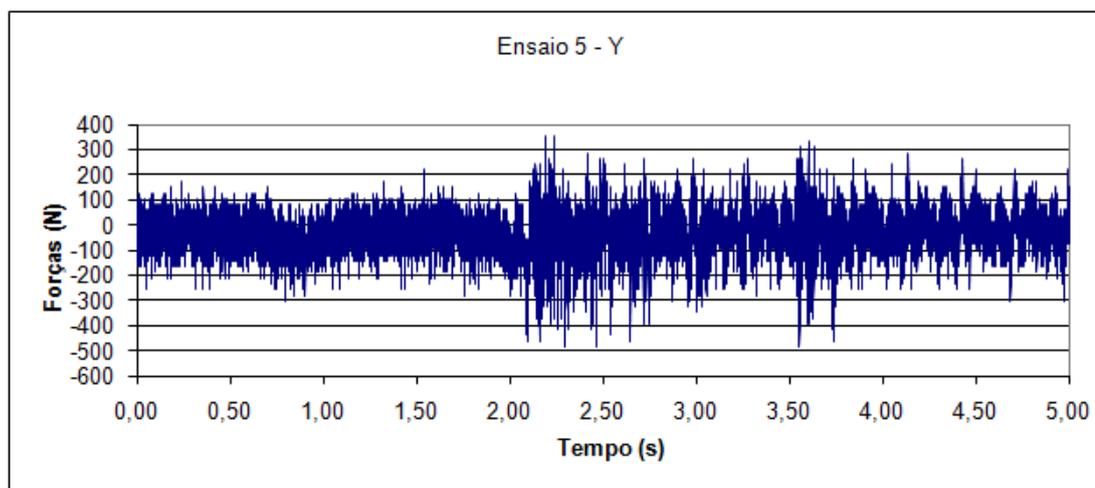


Figura 91 - Gráfico da força no eixo Y durante o quinto ensaio.

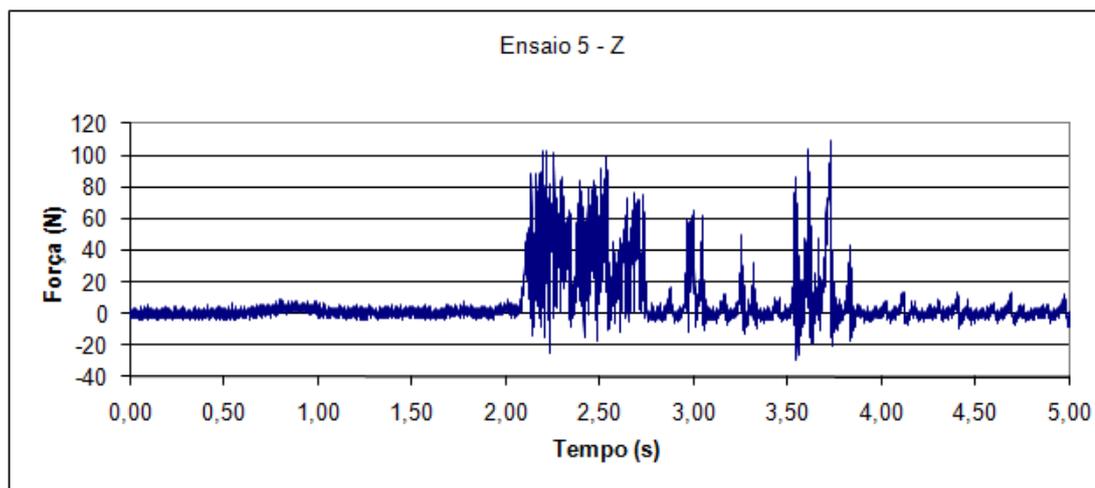


Figura 92 - Gráfico da força no eixo Z durante o quinto ensaio.

- **Sexto Ensaio – Profundidade de Penetração 0,12 mm.**

As forças registradas no sexto ensaio no eixo X estão na Figura 93, no eixo Y na Figura 94 e no eixo Z na Figura 95.

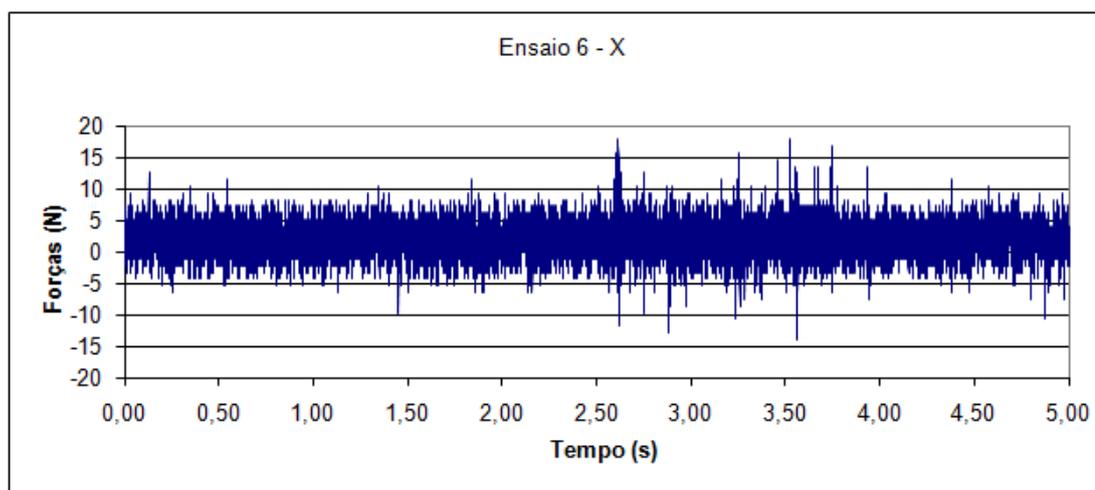


Figura 93 - Gráfico da força no eixo X durante o sexto ensaio.

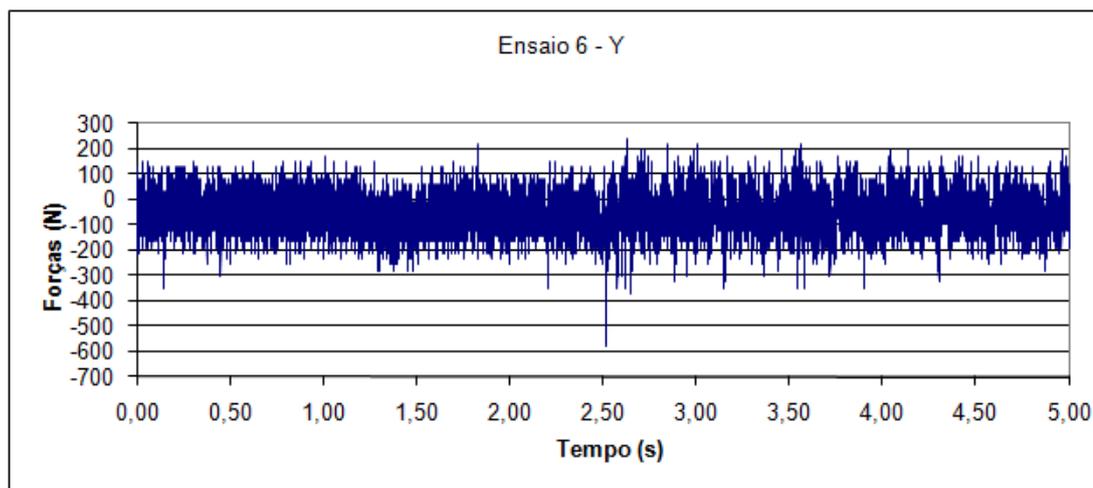


Figura 94 - Gráfico da força no eixo Y durante o sexto ensaio.

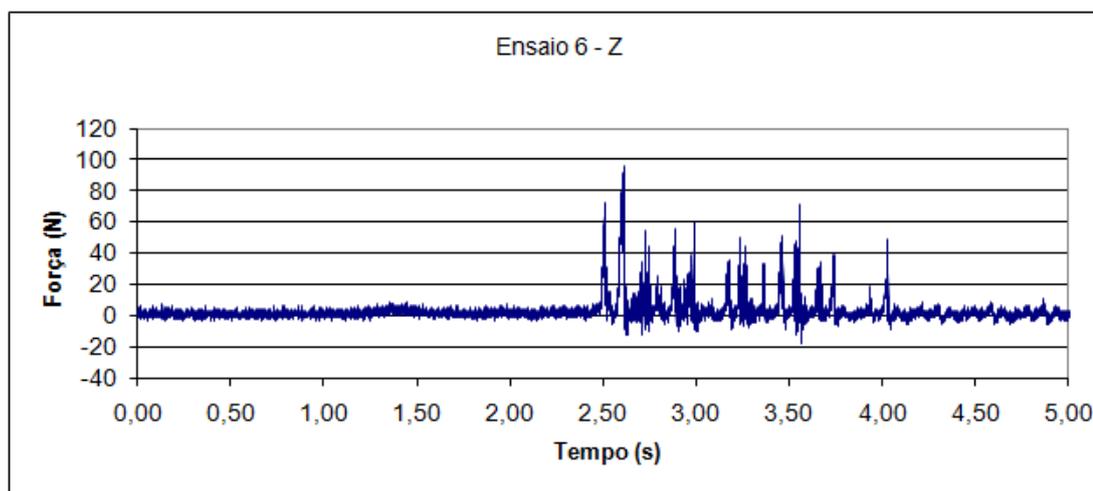


Figura 95 - Gráfico da força no eixo Z durante o sexto ensaio.

- **Sétimo Ensaio – Profundidade de Penetração 0,09 mm.**

As forças registradas no sétimo ensaio no eixo X estão na Figura 96, no eixo Y na Figura 97 e no eixo Z na Figura 98.

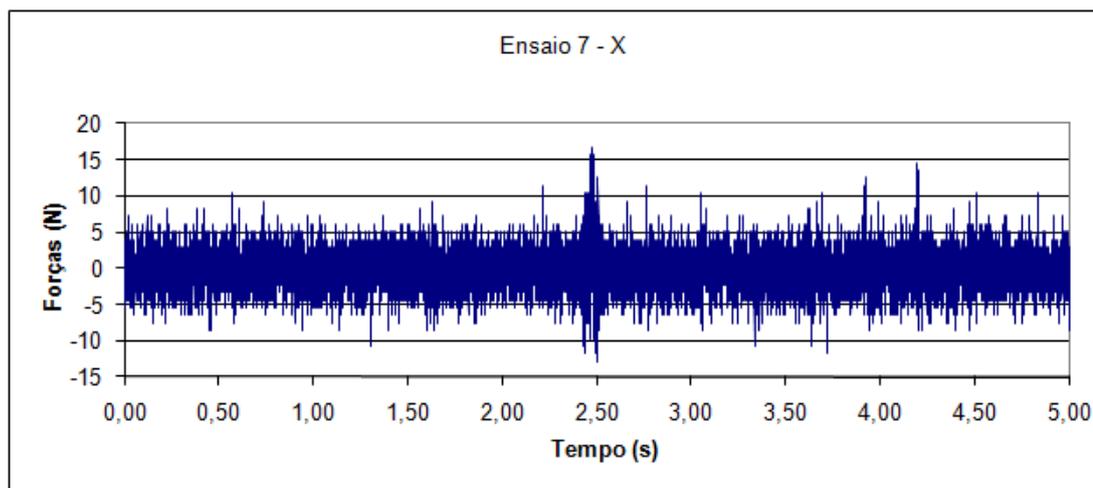


Figura 96 - Gráfico da força no eixo X durante o sétimo ensaio.

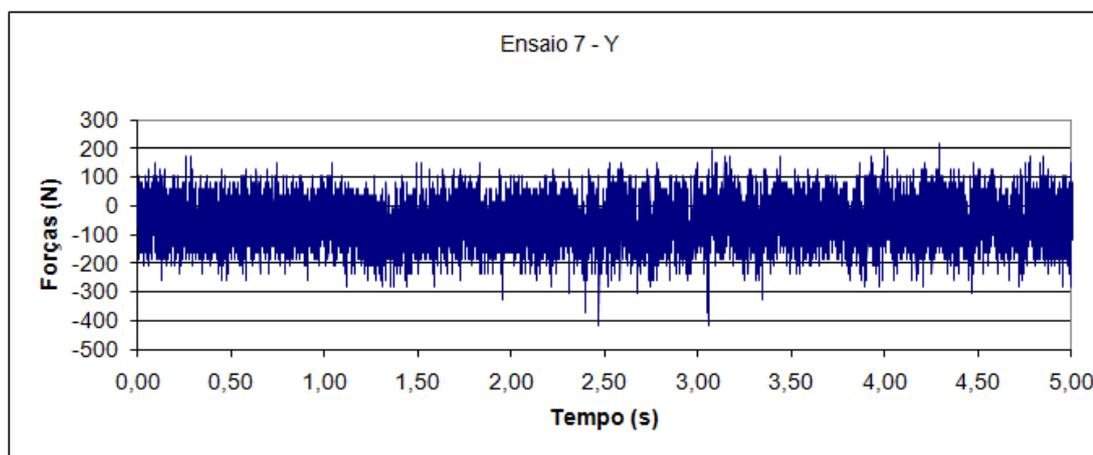


Figura 97 - Gráfico da força no eixo Y durante o sétimo ensaio.

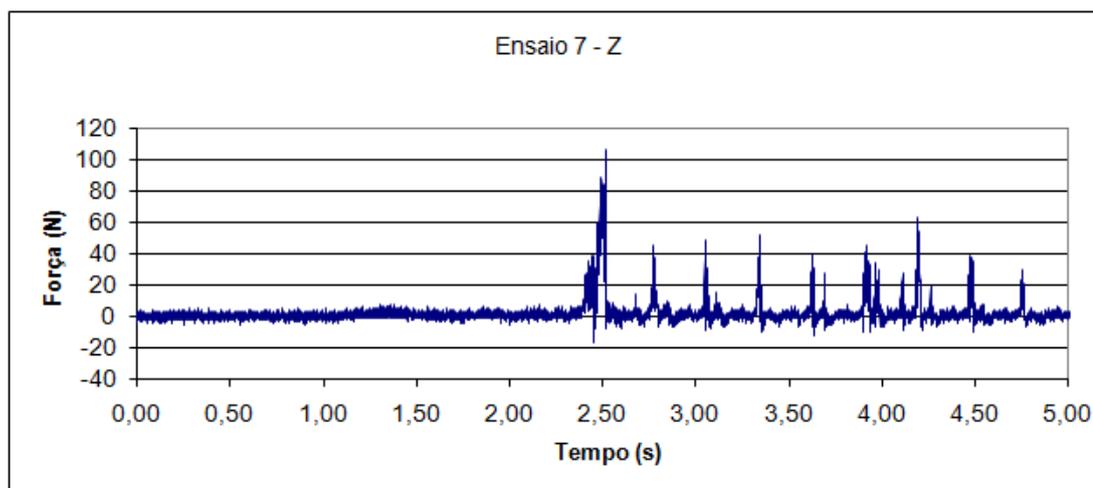


Figura 98 - Gráfico da força no eixo Z durante o sétimo ensaio.

- **Oitavo Ensaio – Profundidade de Penetração 0,10 mm.**

As forças registradas no oitavo ensaio no eixo X estão na Figura 99, no eixo Y na Figura 100 e no eixo Z na Figura 101.

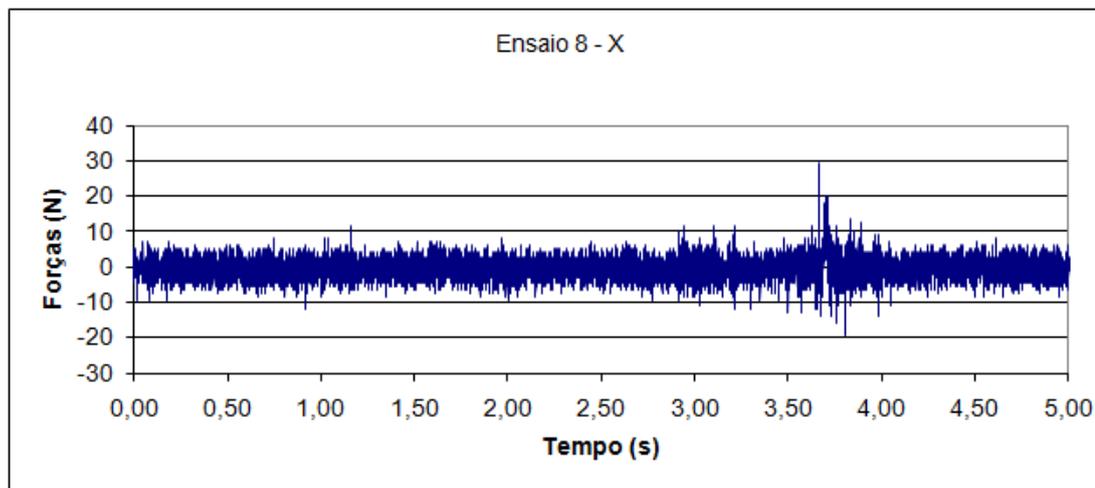


Figura 99 - Gráfico da força no eixo X durante o oitavo ensaio.

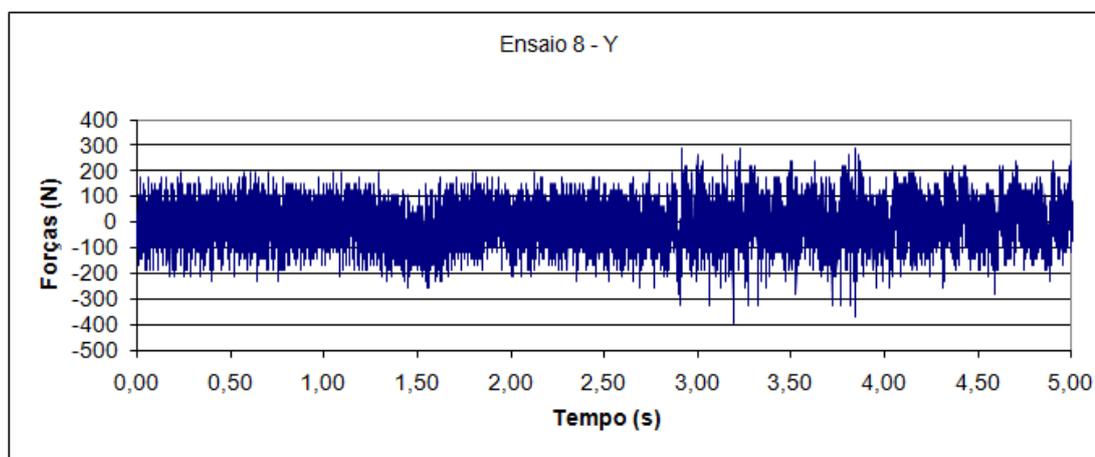


Figura 100 - Gráfico da força no eixo Y durante o oitavo ensaio.

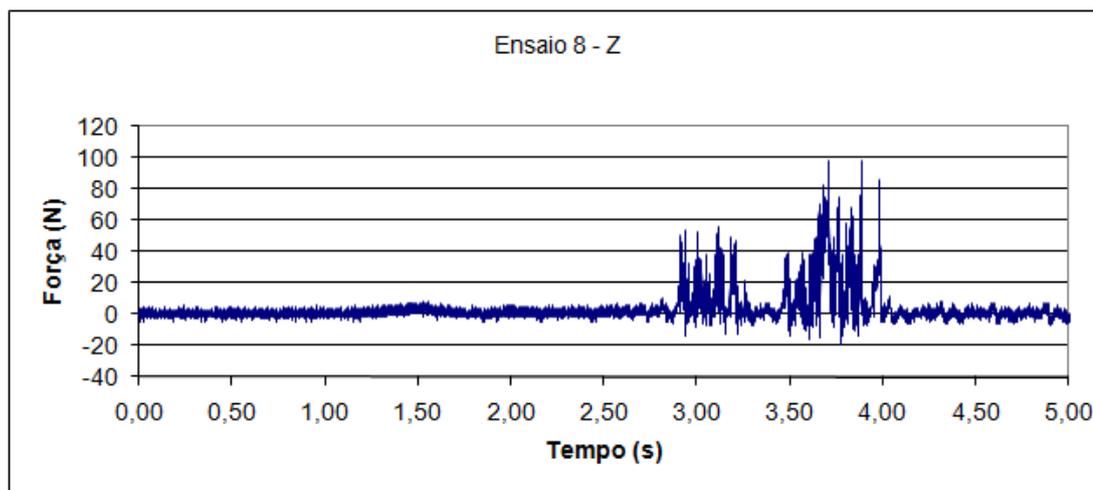


Figura 101 - Gráfico da força no eixo Z durante o oitavo ensaio.

#### 5.4 Análises dos Resultados

Iniciando-se a análise pela ferramenta após os ensaios, das figuras da seção 5.1 pode-se observar que em todos os ensaios a parte da ferramenta que estava em contato com o contracorpo foi arrancada. Em geral, para profundidades de penetração maiores, ou seja, cargas normais mais elevadas, a quantidade de material arrancado também foi superior, com exceção para o ensaio número 7, no qual houve comparativamente grande quantidade de material removido.

Paralelamente, na Figura 13, que é uma boa representação para todos os ensaios, fica claro que a ferramenta só conseguiu deslizar livremente no começo do contracorpo. A rápida quebra da ferramenta ocorreu provavelmente devido à sua baixa dureza, que era muito próxima à do contracorpo. Logo, pode-se supor que ocorreu o fenômeno do galling no início do ensaio. Portanto, houve um processo adesivo do contracorpo na ferramenta no início do ensaio no qual material aderido no contracorpo se despreendeu levando consigo parte da ferramenta.

Para a medição de forças, o eixo Y apresentou resultados que devem ser analisados de maneira qualitativa, pois este eixo é o que apresenta menor sensibilidade aos esforços e pode-se notar que os ruídos durante o ensaio comprometeram fortemente os resultados. Entretanto, comparando as medições desse eixo com os demais é possível ver uma diferenciação do sinal enquanto a ferramenta de fato deslizava sobre o contracorpo.

Já para o eixo X, nota-se que as forças ficaram aparentemente muito próximas em todos os ensaios, sendo que o menor pico (15 N) ocorreu no terceiro ensaio (0,03 mm de profundidade – a menor profundidade) e o maior pico (próximo a 30 N) ocorreu no terceiro ensaio (0,10 mm de profundidade – o segundo de maior profundidade). Adicionalmente deve-se levar-se em conta que o sinal apresentou uma oscilação entre -10 N e 10 N mesmo antes e após a usinagem devido a ruídos. Outro fato de destaque da força em X ocorrer em ambas às direções – tanto no sentido positivo como no sentido negativo.

Finalmente, o eixo Z, apresentou os melhores resultados, sendo que em todos os casos as forças foram caracterizadas por picos que partiram de valores próximos à força nula e retornavam rapidamente, o que também se verificou nos ensaios de Mendes (2009). Os valores atingidos pelas forças foram muito superiores aos medidos por Mendes (2009) no LFS com a ferramenta tratada termicamente (mais dura). Logo, pode-se concluir que o fato da ferramenta apresentar durezas menores propiciou sua rápida quebra e, portanto, forças elevadas devido ao processo adesivo.

Neste momento é interessante verificar se existe alguma relação entre a profundidade de penetração programada e as forças medidas. Como já destacado anteriormente, o eixo Z é o que apresenta os melhores resultados, logo essa análise será feita para as forças desses eixos.

Dos resultados já apresentados, particularmente os gráficos da seção 5.3, ficam claras as grandes oscilações presentes nas forças. Um filtro eficiente para permitir uma melhor visualização desses resultados é a aplicação da média móvel, que é calculada por meio de intervalos. Neste trabalho, foram considerados 500 pontos em cada intervalo, logo o primeiro resultado da média móvel é calculado pela média aritmética dos pontos 1 a 500, o segundo para 2 a 501, o terceiro 3 a 502 e assim por diante.

Os resultados das médias móveis estão podem ser vistos nas Figuras 102 a 109, observar que as escalas nestas figuras estão diferentes.

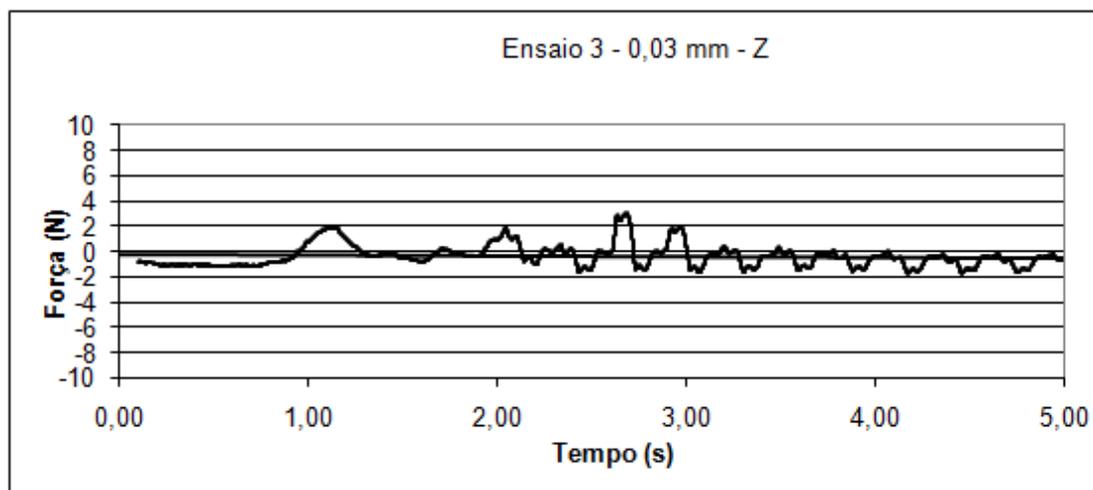


Figura 102 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 3.

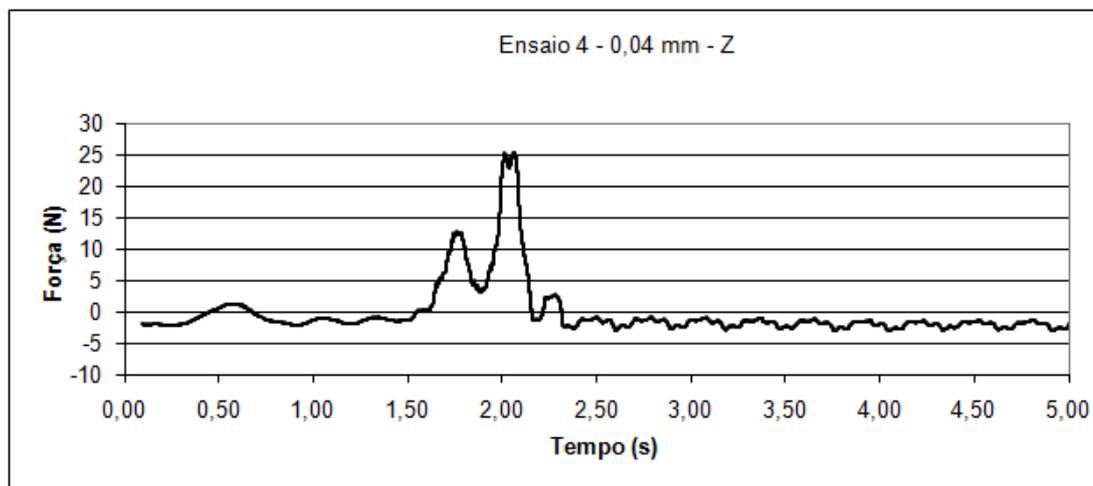


Figura 103 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 4.

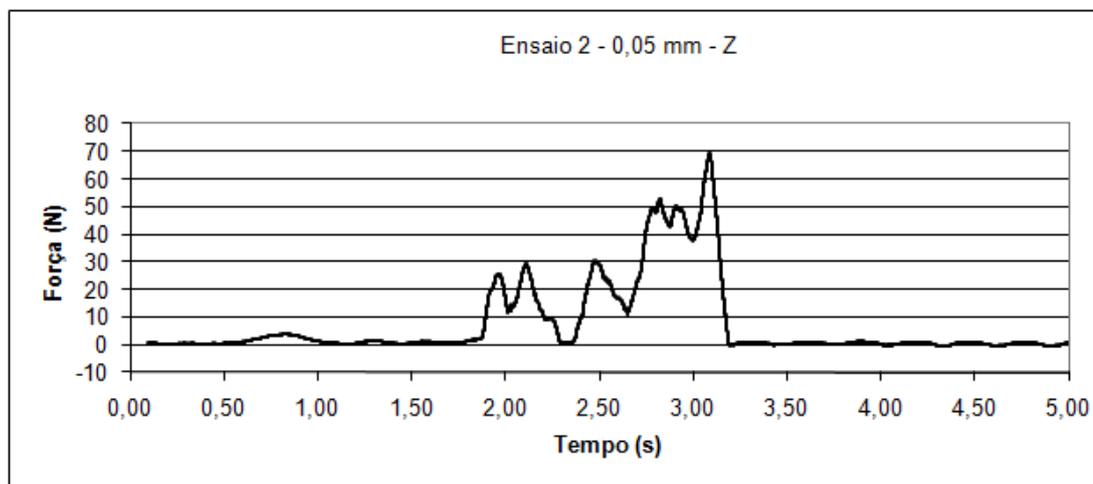


Figura 104 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 2.

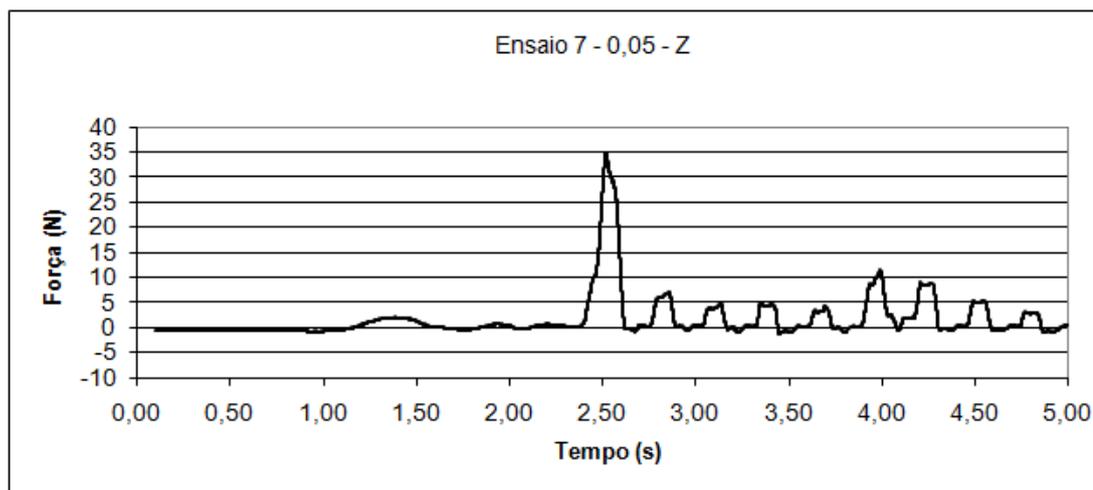


Figura 105 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 7.

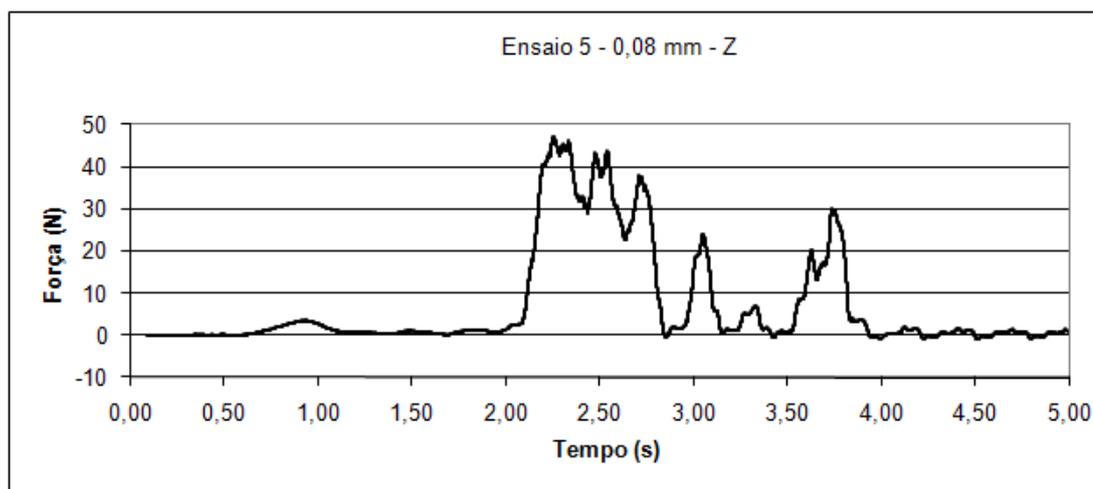


Figura 106 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 5.

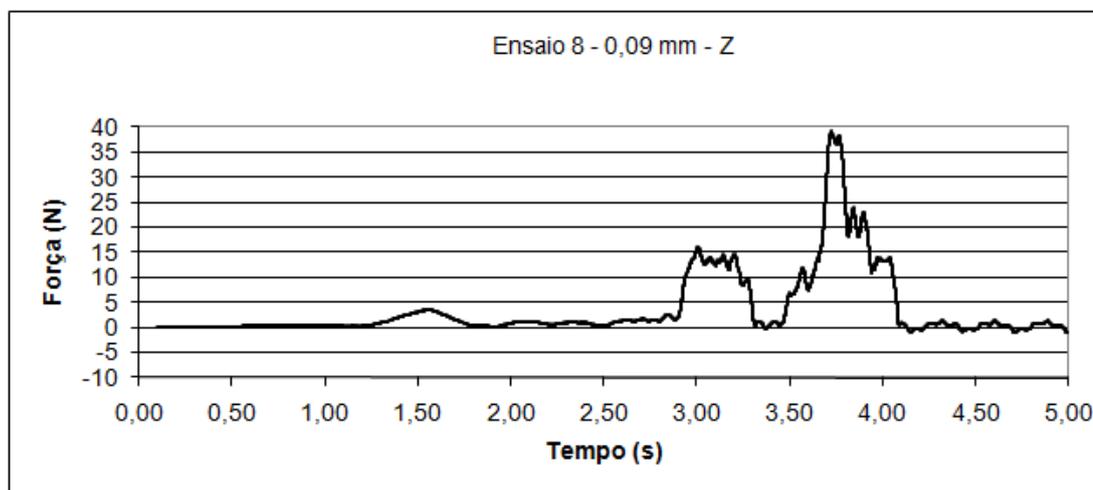


Figura 107 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 8.

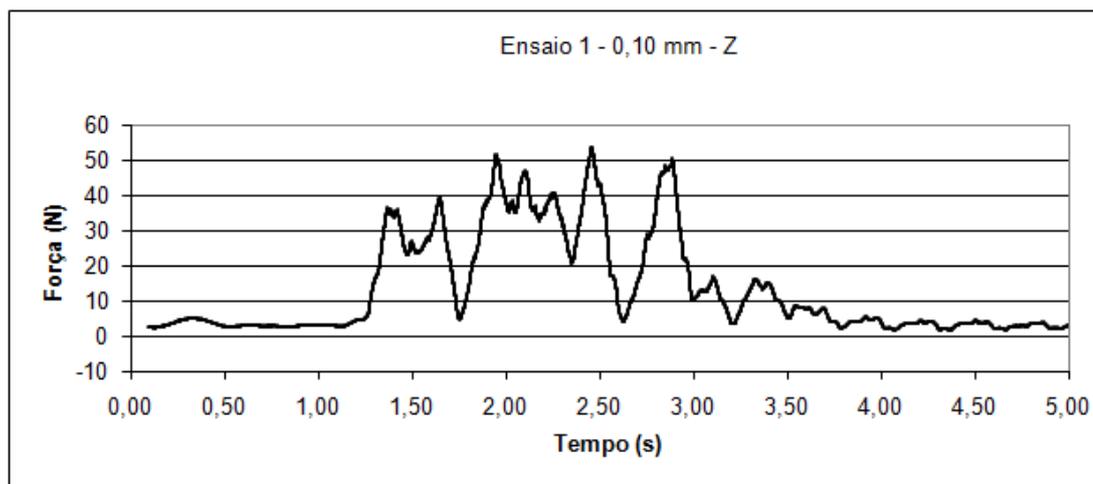


Figura 108 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 1.

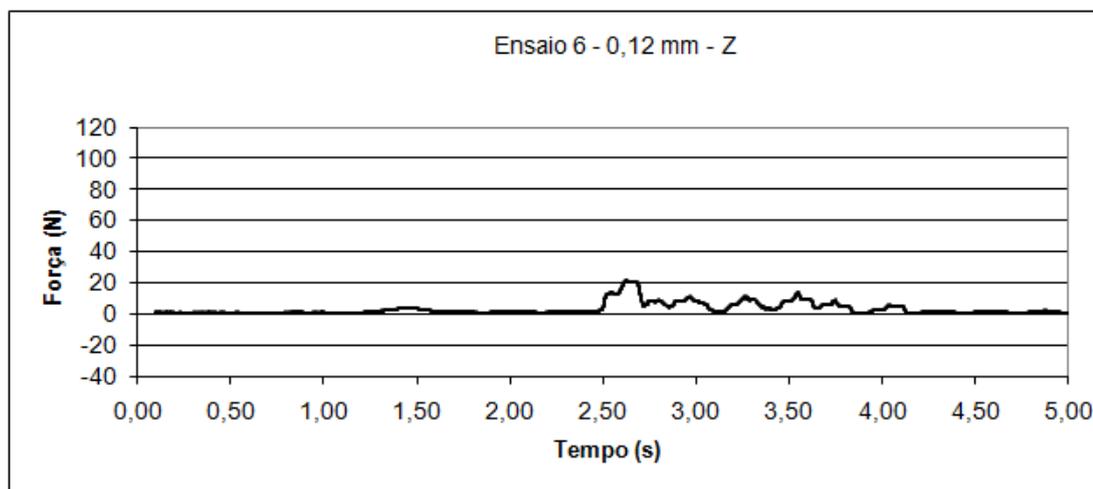


Figura 109 - Média móvel do eixo Z para o ensaio 6.

Esses resultados de média móvel deixam claro que não é possível estabelecer uma relação entre a profundidade de penetração programada, pois ordenando os resultados por profundidade de penetração nos três primeiros ensaios parece existir um aumento da força no eixo Z com o aumento da profundidade de penetração. Porém, na sequência, fica claro que essa relação não existe e os resultados tornam-se aleatórios.

## 6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho permitem observar que ocorreu uma situação diferente das ocorridas nos ensaios de Mendes (2009). Devido à utilização de ferramentas sem tratamento térmico e, portanto, com baixo nível de dureza, essas ferramentas sofreram danos severos, tendo partes arrancadas durante o ensaio.

Adicionalmente, pode-se verificar dois fatos interessantes: a oscilação da direção da força no eixo X (avanço) e o aumento da força no eixo Z (rotação, mesmo para profundidades de penetração inferiores, quando comparada aos ensaios de Mendes (2009) no LFS para ferramentas com tratamento térmico e também sem recobrimento.

Finalmente, como fruto do trabalho tem-se o porta ferramentas instrumentado de maneira completa – com as três direções ortogonais – e calibrado. Esse equipamento é muito útil e poderá ser usado em outras atividades.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andreasen, J. L; Bay, N; Chiffre, L de. *Quantification of galling in sheet metal forming by surface topography characterization*, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol 38, n 5-6 pp. 503 – 510, 1998

Budinski, K; Budinski, M; Kohler, M. *A galling-resistant substitute for silicon nickel*, **Wear** v. 255, pp 489 – 497, 2003.

Carlsson, P; Olsson, M. **Surface & Coatings Technology**, v 200, Issues 14-15, pp 4654-4663, 2006.

Claudin, C; Rech, J; Grzesik, W; Zalisz, S. *Characterization of the frictional properties of various coatings at the tool/chip/workpiece interfaces in dry machining of AISI 4140 steel*, **Int J Mater Form**, Suppl 1: 511-514, 2008.

Guimarães, André Ricardo. Sistema para medição das componentes da força de usinagem em operações de torneamento. **Trabalho de Formatura EPUSP – PME**. São Paulo, 2000.

Mais máquinas movendo o crescimento. **Corte e Conformação de Metais**, ano V, número 57, Janeiro 2010.

Mendes, M. A. R. S.; Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimento de filmes finos utilizados em operações de conformação a frio, **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)**, 2009.

<sup>1</sup>Santos, A. M. M. M; Pinhão, C. M. de A. *Carrocerias e cabines estamperia pesada*, **Relatório Setorial BNDES** de 09/1998. Disponível em [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/relato/stampa.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/relato/stampa.pdf). Acessado em 28/10/2009.

Schedin, E. *Galling mechanisms in sheet forming operations*, **Wear**, v179, pp 123 - 128, 1994.

**What`s a Strain Gage?** de 2005. Disponível em: <http://www.kyowa-co.jp/english/pdf/whats.pdf>. Acessado em 15/05/2009.

**ANEXO – DESENHO DE FABRICAÇÃO DA FERRAMENTA**

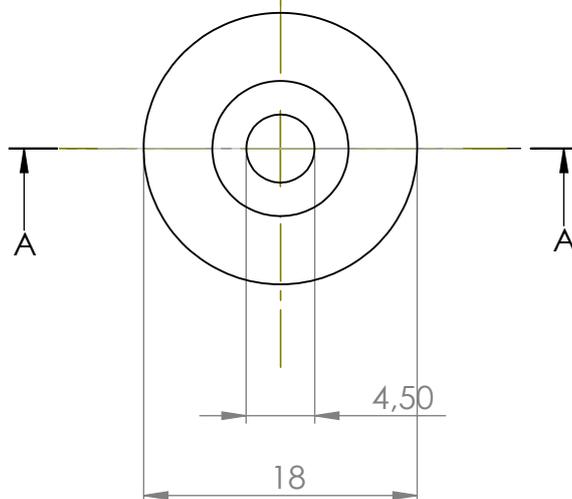
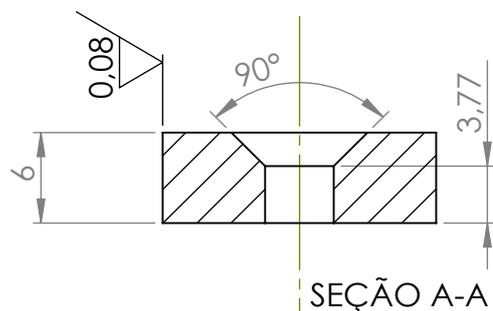
A

B

C

D

E



1	Pastilha		AISI M2	
Pça nº	Denominação	Quantidade	Material	Observação
<b>PASTILHA</b> LAB FENÔMENOS DE SUPERFÍCIE ESCOLA POLITÉCNICA - USP				
			Des. nº	1/2
			Data	15-4-2008
			Nome	Marco Aurélio R S Mendes
			Escala	2:1

F