FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

CELSO LUIZ DE AZEVEDO MARTINS

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA FORÇA DE ADERÊNCIA DE UM AJUSTE PRENSADO EM RODAS DE AÇO ABNT 4340

VOLTA REDONDA
2013

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS
DISSERTAÇÃO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA FORÇA DE ADERÊNCIA DE UM AJUSTE PRENSADO EM RODAS DE AÇO ABNT 4340

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Materiais, como requisito para obtenção do título de mestre.

Aluno:
Celso Luiz de Azevedo Martins

Orientador:
Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro

Coorientador
Prof. Dr. Emerson Augusto Raymundo

VOLTA REDONDA
2013

FICHA CATALOGRÁFICA
Bibliotecária: Gabriela Leite Ferreira -- CRB 7/RJ - 5521

M386a Martins, Celso Luiz de Azevedo.
Análise do comportamento da força de aderência de um ajuste prensado em rodas de aço ABNT 4340 / Celso Luiz de Azevedo Martins. – Volta Redonda: UniFOA, 2013.
79 p. : il. ; grafs. e tabs.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA. Pós-graduação em Materiais, 2013.

Orientador: Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro. Coorientador: Prof. Dr. Emerson Augusto Raymundo

1. Força de aderência. 2. Ajuste prensado. 3. Ajuste com interferência. I. Ribeiro, Rosinei Batista. II. Raymundo, Emerson Augusto. II. Título.
CDD: 620.17

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Celso Luiz de Azevedo Martins

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA FORÇA DE ADERÊNCIA DE UM AJUSTE PRENSADO EM RODAS DE AÇO ABNT 4340

Orientador:

Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro

Banca Examinadora

Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro

Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

Prof. Dr. Glauco José Rodrigues de Azevedo

Dedico este trabalho às pessoas que amo e em especial à minha esposa Margaret, pelo incentivo constante e por fazerem parte da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos às pessoas que muito me ajudaram no desenvolvimento e elaboração deste trabalho:

- ao meu orientador Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro, pela dedicação e apoio técnico na realização deste trabalho;
- ao Professor Alexandre Fernandes Habibe do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, pelo incentivo e apoio;
- ao Professor Ricardo de Mello Brito (D.Sc.) da UFF – Volta Redonda, pela execução dos ensaios mecânicos e pelo apoio técnico nas análises dos resultados;
- aos colaboradores José Vicente Teixeira e Ivison Luiz Machado, da JDJ Projetos Ltda., que elaboraram os desenhos das peças;
- ao Engenheiro Wesley de Souza Faria do SENAI-VR, pela execução das medições das peças;
- ao Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, pelo apoio financeiro para a fabricação das peças.

MARTINS, C. L. A. **Análise do comportamento da força de aderência de um ajuste prensado em rodas de aço ABNT 4340.** Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda, 2012.

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo principal a confirmação, por meio de resultados experimentais, de que nos ajustes prensados entre peças de aço, a força de aderência aumenta muito nos primeiros dias após a montagem e segue aumentando lentamente ao longo do tempo. Ajustes com interferência, classificados como ajustes prensados, são muito utilizados em árvores mecânicas com engrenagens. Portanto, a importância deste estudo está no alerta aos engenheiros e aos fabricantes que este fenômeno deve ser considerado nos cálculos de ajustes prensados e nos estudos das causas prováveis de fraturas em engrenagens montadas em seus respectivos eixos, mas que ainda não foram postas em operação. Para comprovar o aumento da força de aderência entre peças de aço, em um ajuste prensado, foram fabricadas rodas em aço ABNT 4340 e eixos em aço ABNT 1045, de modo que a interferência de cada um dos conjuntos roda-eixo produzisse efeitos de intensidades suficientes para facilitar as leituras e as análises; e que as respectivas tensões tangenciais não fossem superiores às tensões de escoamento dos materiais das peças. Os conjuntos roda-eixo foram montados e desmontados com a utilização de uma máquina universal hidráulica de ensaios mecânicos. As desmontagens foram realizadas em sequência, após períodos que variaram entre a primeira hora até quarenta e um (41) dias após montagem. Deste modo, foi possível verificar o aumento da força necessária para desmontagem decorrente do tempo entre a montagem e a desmontagem.

Palavras-chave: Força de aderência. Ajuste prensado. ABNT 4340. Ajuste com interferência.

MARTINS, C. L. A. **Analysis of the interference fit force of a pressed fit in steel wheels AISI 4340.** Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda, 2013.

ABSTRACT

The study has as main objective the confirmation , through experimental results, that in the pressed fits between steel parts, the fit force increases after the execution of the parts union and this one increases very much in the first days and it continues to increase, although more slowly, in the course of time. Fits with interference, classified as pressed fits, are widely used in mechanical equipments with gears. Therefore, the importance of this study is to alert the engineers and manufacturers that this phenomenon should be considered in the calculations of the pressed fits and in the studies of the likely fractures causes in gears assembled on their respective axes, but that have not been put into operation yet. To demonstrate the increase of the interference fit force between steel parts, in a pressed fit, were manufactured wheels in steel AISI 4340 and axles in steel AISI 1045, so that the interference of each wheel-axle set produced effects of sufficient intensities to facilitate the readings and the analyzes, and that the respective tangential stresses were not higher than the yield strength of the pieces materials. The wheel-axle sets were assemblies and disassemblies with the using of a hydraulic universal materials testing machine. The disassemblies were performed in sequence, after periods that varied between the first hour until forty one (41) days after assembly. Thus, it was possible to check the increase of the necessary force for disassembling due to the time between the assembly and the disassembly.

Keywords: Interference fit force. Pressed fit. AISI 4340. Interference fit.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Conjunto nº 18 - Força x Deslocamento 50
Gráfico 3.2 - Conjunto nº 13 - Força x Deslocamento 51
Gráfico 3.3 - Conjunto nº 7 - Força x Deslocamento 51
Gráfico 3.4 - Conjunto nº 27 - Força x Deslocamento 52
Gráfico 3.5 - Conjunto nº 28 - Força x Deslocamento 52
Gráfico 3.6 - Conjunto nº 19 - Força x Deslocamento 53
Gráfico 3.7 - Conjunto nº 21 - Força x Deslocamento 53
Gráfico 3.8 - Conjunto nº 22 - Força x Deslocamento 54
Gráfico 3.9 - Conjunto nº 12 - Força x Deslocamento 54
Gráfico 3.10 - Conjunto nº 3 - Força x Deslocamento 55
Gráfico 3.11 - Conjunto nº 8 - Força x Deslocamento 55
Gráfico 3.12 - Conjunto nº 25 - Força x Deslocamento 56
Gráfico 3.13 - Conjunto nº 26 - Força x Deslocamento 56
Gráfico 3.14 - Conjunto nº 5 - Força x Deslocamento 57
Gráfico 3.15 - Conjunto nº 24 - Força x Deslocamento 57
Gráfico 3.16 - Conjunto nº 4 - Força x Deslocamento 58
Gráfico 3.17 - Conjunto nº 16 - Força x Deslocamento 58
Gráfico 3.18 - Conjunto nº 15 - Força x Deslocamento 59
Gráfico 3.19 - Conjunto nº 9 - Força x Deslocamento 59
Gráfico 3.20 - Conjunto nº 17 - Força x Deslocamento 60
Gráfico 3.21 - Conjunto nº 23 - Força x Deslocamento 60
Gráfico 3.22 - Comportamento da força de aderência em função do tempo 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Diâmetros das peças.....43
Tabela 2.2 - Formação dos conjuntos.....44
Tabela 3.1 - Cronograma de desmontagem dos conjuntos.....49
Tabela 3.2 - Aumento percentual da força de aderência em função do tempo 61
Tabela 3.3 - Dureza da roda nº 8 - Carga = 30 kgf.....67
Tabela 3.4 - Dureza do eixo nº 10 - Carga = 5 kgf (1).....68
Tabela 3.5 - Dureza do eixo nº 10 - Carga = 5 kgf (2).....68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ajuste prensado ou forçado no sentido longitudinal 23
Figura 1.2 - Ajuste fretado por contração 24
Figura 1.3 - Ajuste fretado por dilatação 24
Figura 1.4 - (a) Perfil de uma superfície (b) Duas superfícies em contato somente pelas extremidades das rugosidades 25
Figura 1.5 - Mecanismo da perda de interferência 25
Figura 1.6 - (a) Contato inicial (b) Contato real 27
Figura 1.7 - Pressão de ajuste num ajuste forçado no sentido longitudinal 28
Figura 2.1 - Distribuição da força tangencial 37

LISTA DE MICROGRAFIAS

Micrografia 3.1 - Roda nº 15 (antes da montagem) 400X – Nital 2% 64
Micrografia 3.2 - Roda nº 17 (após desmontagem) 100X – Nital 2% 65

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1.1 - Engrenagem fraturada 18
Fotografia 1.2 – Detalhe da fratura.....19
Fotografia 2.1 – Roda, eixo e suporte 40
Fotografia 2.2 – Máquina WOLPERT LESTOR.....41
Fotografia 2.3 – Roda inserida no suporte 45
Fotografia 2.4 – Eixo posicionado para montagem 45
Fotografia 2.5 – Conjunto montado.....46
Fotografia 2.6 – Conjunto posicionado para desmontagem 47
Fotografia 2.7 – Durômetro VEB Werkstoffprüfmachinen 48

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - Certificado de qualidade do aço ABNT 4340 73
ANEXO B - Certificado de qualidade do aço ABNT 1045 74

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A - Posição final da montagem 75
APÊNDICE B - Esquema para desmontagem..... 76
APÊNDICE C - Desenho da roda..... 77
APÊNDICE D - Desenho do eixo 78
APÊNDICE E - Desenho do suporte 79

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO **17**

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **21**

1.1 AJUSTE COM INTERFERÊNCIA 21
1.2 MONTAGEM FORÇADA 22
1.2.1 Ajuste prensado ou forçado no sentido longitudinal 22
1.2.2 Ajuste fretado ou forçado no sentido transversal 23
1.3 PERDA DE INTERFERÊNCIA 24
1.4 DEFORMAÇÃO A FRIO 26
1.5 FORÇA DE ADERÊNCIA 27

2 METODOLOGIA **29**

2.1 ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS 29
2.2 DIMENSIONAMENTO DAS PEÇAS 30
2.2.1 Diâmetro do conjunto furo-eixo 30
2.2.2 Largura da roda 31
2.2.3 Diâmetro externo da roda 31
2.2.4 Raio de concordância da roda 32
2.2.5 Comprimento útil do eixo 32
2.2.6 Ângulo de bisel 32
2.2.7 Comprimento do cone da ponta do eixo 32
2.2.8 Acabamento superficial da roda e do eixo 32
2.3 CÁLCULO E SELEÇÃO DO AJUSTE 33
2.3.1 Seleção do ajuste 34
2.3.2 Verificação da interferência 34
2.3.3 Características técnicas da roda 35
2.3.4 Características técnicas do eixo 35
2.3.5 Cálculo da força de aderência 36
2.4 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS 40
2.5 PROCEDIMENTOS PARA A MONTAGEM E DESMONTAGEM 40
2.5.1 Velocidade da montagem e da desmontagem 40
2.5.2 Lubrificação 41
2.6 ENSAIOS MECÂNICOS 41
2.6.1 Seleção dos conjuntos 42
2.7 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS 45
2.8 COLETA DE DADOS 47
2.9 METALOGRAFIA 47
2.10 ENSAIOS DE DUREZA 48

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES **49**

3.1 CRONOGRAMA DE DESMONTAGEM DOS CONJUNTOS 49
3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS 50
3.3 AUMENTO DA FORÇA DE ADERÊNCIA 61
3.4 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA 63
3.5 DUREZA 66

4 CONCLUSÃO **69**
5 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE **71**
6 REFERÊNCIAS **72**
ANEXO A – Certificado de qualidade do aço ABNT 4340 73
ANEXO B – Certificado de qualidade do aço ABNT 1045 74
APÊNDICE A – Posição final da montagem 75
APÊNDICE B – Esquema para desmontagem 76
APÊNDICE C – Desenho da roda 77
APÊNDICE D – Desenho do eixo 78
APÊNDICE E – Desenho do suporte 79

INTRODUÇÃO

Esta dissertação é o resultado da análise do comportamento da força de aderência, em função do tempo decorrido entre a montagem prensada e a posta em marcha, de conjuntos de peças de aço constituídos de uma roda ajustada a um eixo maciço.

Para o estudo foram fabricadas rodas e eixos e executados ensaios constituídos de uma montagem e de uma desmontagem, de cada um dos conjuntos roda – eixo, utilizando-se uma máquina universal hidráulica de ensaios mecânicos. As desmontagens ocorreram em períodos distintos de modo que cada ensaio representasse um intervalo de tempo de armazenamento entre uma (01) hora e quarenta e um (41) dias.

Para cada um dos ajustes prensados foram gerados dois gráficos *força x deslocamento*: um na montagem e o outro na desmontagem. Esses gráficos permitiram a análise do comportamento da força de aderência em função do tempo decorrido entre a montagem e a posta em marcha.

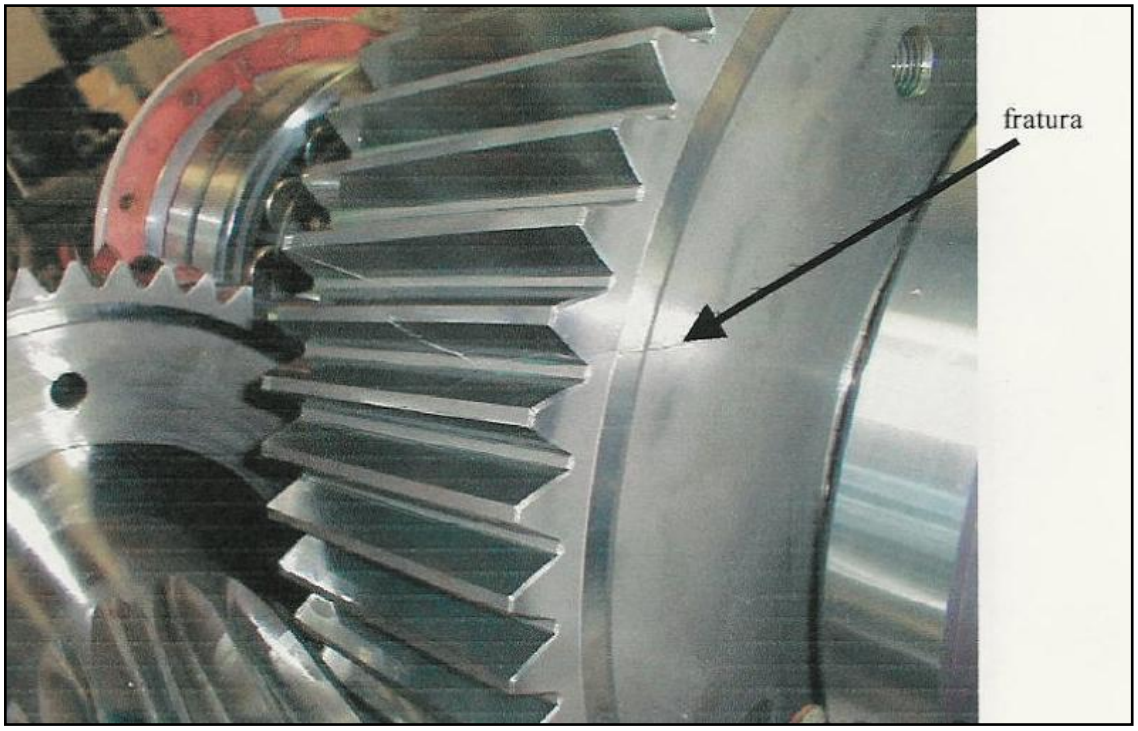
O conhecimento do comportamento da força de aderência é de grande importância para o cálculo da interferência entre as peças, pois a ocorrência do aumento da força de aderência pode produzir níveis de tensões tangenciais suficientes para provocar fraturas nos componentes do conjunto. Outro ponto de grande importância está no alerta aos engenheiros de que este fenômeno deve ser considerado nos estudos das causas prováveis de fraturas em engrenagens montadas em seus respectivos eixos, mas que ainda não foram postas em operação.

As Fotografias 1.1 e 1.2 são exemplos de um caso real e mostram uma das seis engrenagens de redutores de velocidades cujas fraturas ocorreram seis semanas após a montagem e durante o armazenamento. As fraturas ocorreram

antes da posta em marcha[1] e, portanto, sem estarem sujeitas aos esforços externos resultantes da operação do redutor de velocidades.

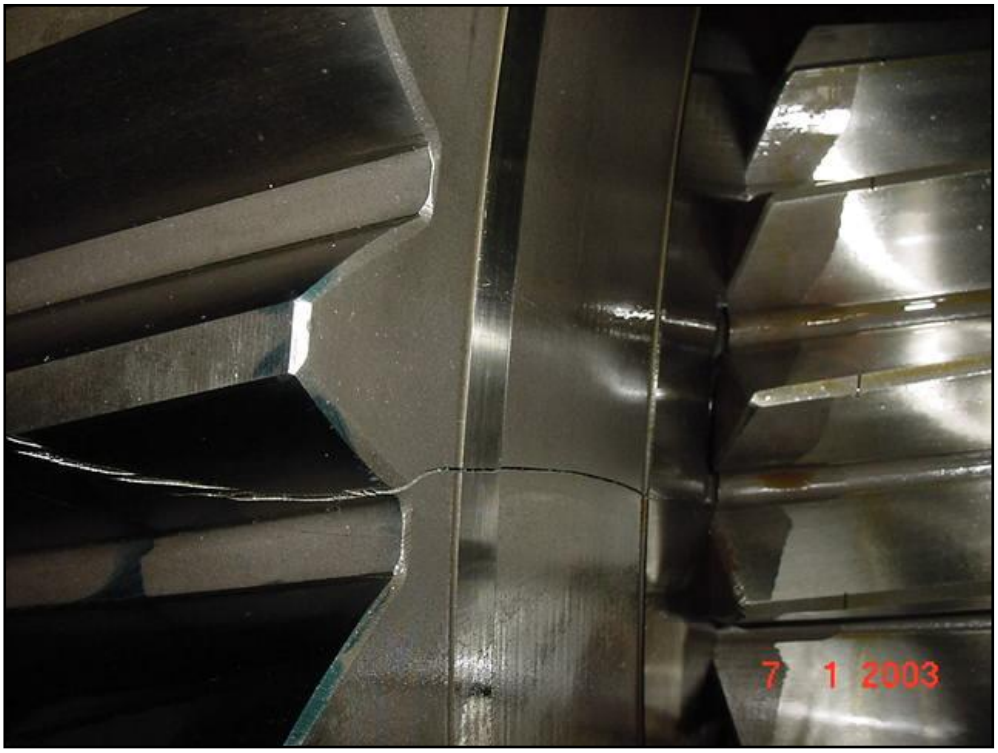
A fratura dessas engrenagens resultou em sérios problemas relativos ao cumprimento do prazo para a posta em marcha da unidade de produção e, também, problemas relativos aos custos adicionais da fabricação e montagem das novas engrenagens e aos custos de transporte dos redutores de velocidade entre a fábrica e o cliente.

Fotografia 1.1 - Engrenagem fraturada



[1] Fase de partida das máquinas.

Fotografia 1.2 - Detalhe da fratura



Objetivo geral: Esta pesquisa tem como objetivo principal a confirmação, por meio de resultados experimentais, da afirmação de Mateos (1974, p. 301) de que nos ajustes prensados entre peças de aço, a força de aderência aumenta muito nos primeiros dias após a montagem e segue aumentando lentamente ao longo do tempo. O objetivo geral também contempla esta mesma afirmação, dita com outras palavras por Agostinho (1977, p. 54): o poder aderente de uma união por interferência, realizada por montagem prensada, depende do tempo decorrido entre a execução da união e a sua posta em marcha. Geralmente, uma união torna-se mais firme com o tempo.

Para coleta de dados foram executados ensaios, sendo que cada um deles foi constituído de uma montagem prensada de um conjunto roda-eixo e, em períodos predefinidos, sua respectiva desmontagem.

As dimensões das peças a serem ajustadas, foram definidas de modo a representar, com similaridade e proporcionalidade, uma engrenagem ajustada com interferência a um eixo; elementos de máquinas que neste estudo estão

representados pela roda e pelo eixo. Neste caso, foi calculado um ajuste fixo com grande interferência, porém sem que a tensão resultante da pressão entre as peças acopladas pudesse produzir tensões maiores que o limite elástico dos materiais da roda e do eixo.

Objetivos específicos: Para atingir o objetivo geral deste estudo, foi necessário dividi-lo em etapas, constituído dos seguintes objetivos específicos:

- Verificar o aumento da força de aderência, em relação à força de montagem;
- Após desmontagem, verificar a ocorrência de possíveis alterações na microestrutura do material da roda;
- Após desmontagem, verificar a ocorrência de possíveis alterações na dureza do material da roda;

Para atingir os objetivos específicos, antes da montagem e após desmontagem foram realizados testes de dureza e caracterizações microestruturais em algumas das rodas. Sendo a força de aderência diretamente proporcional à resistência mecânica do material, foi verificado se o aumento do valor da força de aderência foi capaz de produzir aumento na dureza e alterações microestruturais no material da roda.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a fundamentação teórica do fenômeno do aumento da força de aderência, foram estudadas as bases teóricas relativas aos seguintes itens:

- Ajuste com interferência;
- Montagem forçada;
- Perda de interferência;
- Deformação a frio;
- Força de aderência.

1.1 AJUSTE COM INTERFERÊNCIA

Conforme ABNT NBR 6158/1995, ajuste com interferência é aquele no qual ocorre uma interferência entre o furo e o eixo quando montados, isto é, a dimensão máxima do furo é sempre menor ou, em caso extremo, igual à dimensão mínima do eixo. Em função das classes de tolerâncias de fabricação da roda e do furo, o ajuste irá produzir interferências entre o valor da interferência mínima ($I_{mín}$) e o valor da interferência máxima ($I_{máx}$).

O custo é um fator importante no cálculo do ajuste; portanto, as tolerâncias de fabricação da roda e do eixo devem ser as maiores possíveis com o objetivo de facilitar, ao máximo, a fabricação das peças que compõem o conjunto. O efeito deste procedimento é a maximização da diferença entre a interferência máxima e a interferência mínima, pois:

$$T_f + T_e = I_{máx} - I_{mín} \tag{1.1}$$

T_f = Tolerância de fabricação do furo;
T_e = Tolerância de fabricação do eixo;
$I_{máx}$ = Interferência máxima;
$I_{mín}$ = Interferência mínima.

Conforme Agostinho (1977, p. 41) et al., a interferência mínima deve ser calculada para produzir uma pressão, entre as superfícies de contato do furo e do eixo, que suporte os esforços externos, ou seja, que impeça o deslizamento entre a roda e o eixo, e que a interferência máxima deve ser calculada para não ultrapassar o limite elástico dos materiais das peças. Também segundo Agostinho (1977, p. 50), para peças de aço, os eixos maciços serão sempre mais resistentes às pressões de ajuste do que as rodas; portanto, neste caso, a roda será sempre a referência no cálculo da interferência máxima.

1.2 MONTAGEM FORÇADA

As montagens de ajustes com interferência pertencem à classe de uniões por atrito e são chamadas de ajustes forçados. De acordo com Lopes (1983, p. 73) os ajustes, quanto ao processo de montagem, podem ser obtidos por dois métodos distintos:

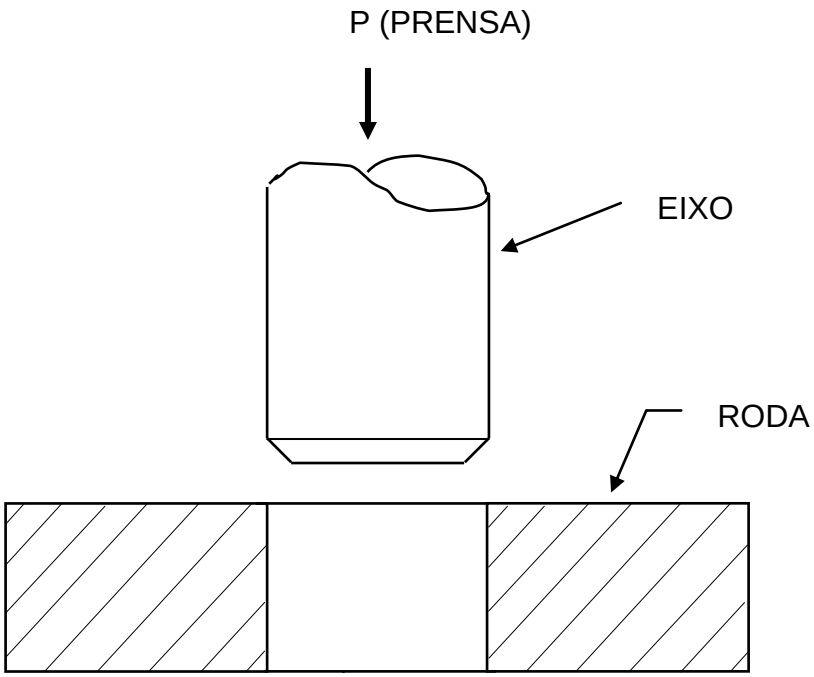
- Ajuste prensado ou forçado no sentido longitudinal e
- Ajuste fretado ou forçado no sentido transversal por dilatação.

1.2.1 Ajuste prensado ou forçado no sentido longitudinal

Ajuste prensado ou forçado no sentido longitudinal é todo aquele que possui interferência e cuja montagem é realizada à temperatura ambiente com o emprego de um esforço externo no sentido longitudinal, obtido por prensa ou por outro meio disponível.

Quanto maior for a diferença entre diâmetro do eixo e o diâmetro do furo, mais forte será o esforço para montagem. Em casos de grande interferência, ou ainda onde seja necessária grande precisão de prensagem, deve-se utilizar uma prensa hidráulica ou outra máquina que execute a mesma função.

Figura 1.1 - Ajuste prensado ou forçado no sentido longitudinal



Fonte: Mateos (1974, p. 262)

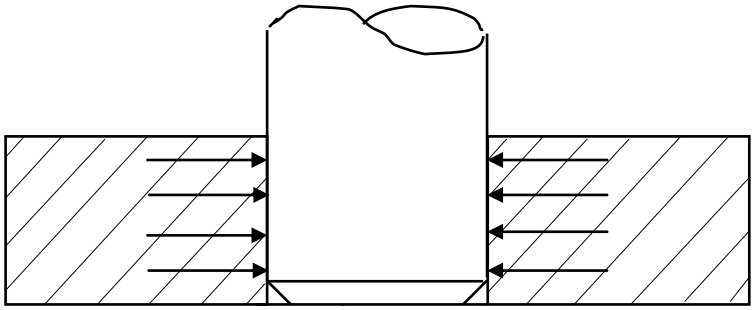
1.2.2 Ajuste fretado ou forçado no sentido transversal

Ajuste fretado ou forçado no sentido transversal é todo aquele que possui uma folga inicial positiva e que a montagem pode ser realizada por:

- Aquecimento e posterior contração da peça externa (Fig. 1.2) ou
- Resfriamento e posterior expansão da peça interna (Fig. 1.3).

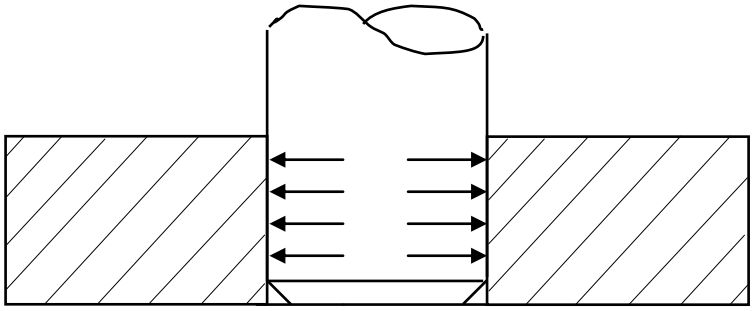
Segundo Agostinho (1977, p. 54) o ajuste fretado pode ser utilizado imediatamente após sua montagem e retorno à temperatura ambiente. Diferente do ajuste prensado, onde a força de aderência depende do tempo decorrido entre a execução da união e a sua posta em marcha.

Figura 1.2 - Ajuste fretado por contração



Fonte: Mateos (1974, p. 262)

Figura 1.3 - Ajuste fretado por dilatação



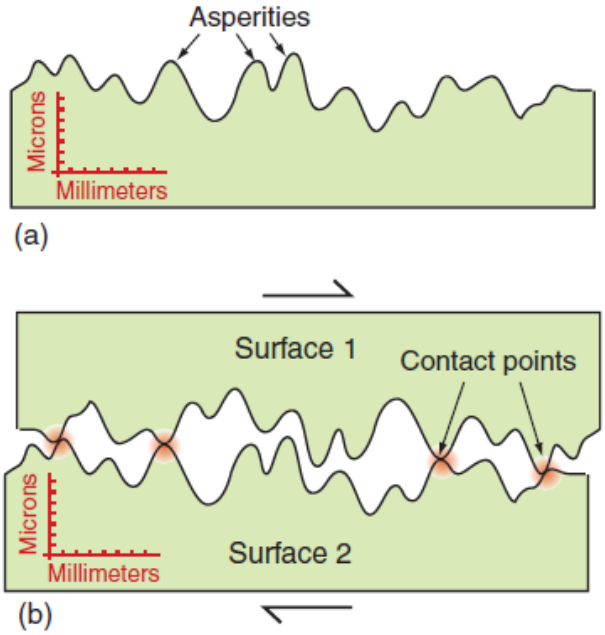
Fonte: Mateos (1974, p. 262)

1.3 PERDA DE INTERFERÊNCIA

De acordo com Lopes (1983, p.75) todo ajuste prensado provoca uma perda de interferência resultante do alisamento das superfícies em contato.

Este fenômeno é explicado por Ashby (2007, p. 232): quando duas superfícies entram em contato e são submetidas a uma força de adesão (Fn), elas entram em contato somente pelo encontro das extremidades das rugosidades. Neste caso a carga (Fn) é suportada somente pelo contato entre as rugosidades e a área real de contato (Ar) é somente uma pequena fração da área nominal (Fig. 1.4).

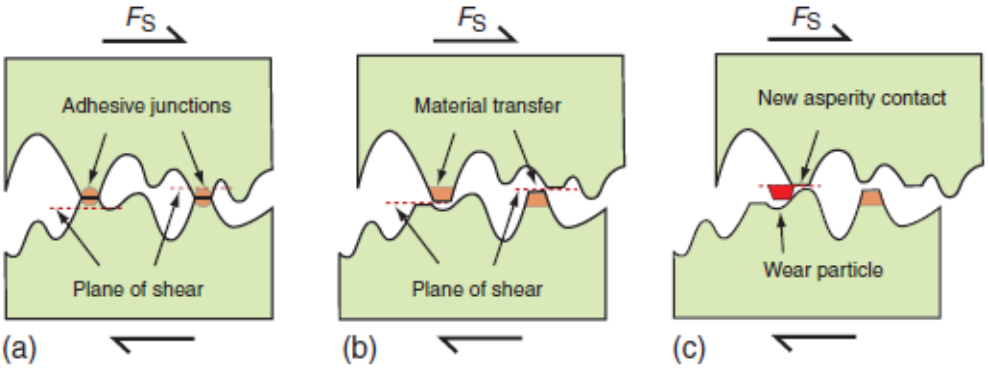
Figura 1.4 - (a) Perfil de uma superfície (b) Duas superfícies em contato somente pelas extremidades das rugosidades [2]



Fonte: Ashby (2007, p. 234)

A Figura 1.5 mostra a perda de interferência pelo arrancamento das extremidades das rugosidades dos materiais ferrosos, produzida pelo deslizamento das peças durante a montagem prensada.

Figura 1.5 - Mecanismo da perda de interferência [3]



Fonte: Ashby (2007, p. 234)

[2] Tradução: Asperities = Rugosidade; Surface 1 = Superfície 1; Surface 2 = Superfície 2; Contact points = Pontos de contato;

[3] Tradução: Adhesive junctios = Junção adesiva; Plane of shear = Plano de cisalhamento; Material transfer = Transferência de material; New asperity contact = Novo contato das rugosidades; Wear particle = Partícula cisalhada.

1.4 DEFORMAÇÃO A FRIO

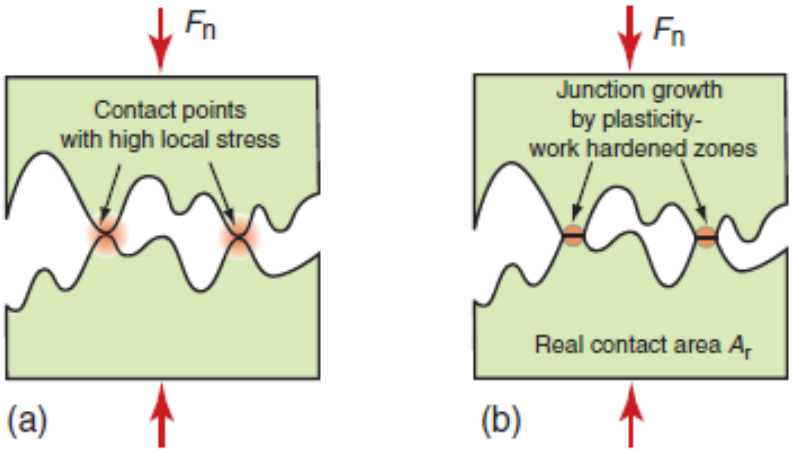
De acordo com Callister (2007, p. 107 e 141) et al. a deformação a frio de um metal é definida como sendo qualquer operação de conformação que seja executada à temperatura ambiente; e a densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação a frio, devido à multiplicação das discordâncias ou a formação de novas discordâncias. À medida que a densidade de discordâncias aumenta, a resistência mecânica do material deformado também aumenta. Assim, a tensão necessária para deformar um metal aumenta com o trabalho a frio.

De acordo com Dieter (1981, p. 8) o escoamento de um metal dúctil quando submetido a um carregamento estático, à temperatura ambiente, raramente provoca fratura. Isto porque à medida que o metal se deforma ele é encruado e uma tensão cada vez maior é necessária para produzir uma nova deformação. Entretanto, uma fratura poderá ocorrer pelo aumento da taxa de carregamento e pela presença de um estado complexo de tensões causado por um entalhe, como por exemplo: rasgo de chaveta.

A Figura 1.6 (a) mostra que quando as superfícies se tocam pela primeira vez, aparece uma alta tensão de contato entre as extremidades das rugosidades do furo e do eixo. Ocorre, então, a plasticidade e a área de contato cresce até a área real de contato (A_r) que irá suportar a carga F_n, conforme mostra a Figura 1.6 (b). Portanto, os pontos de junção são encruados e a dureza superficial aumenta.

Um ajuste forçado no sentido longitudinal é composto de duas fases consecutivas: a primeira fase, ou seja, a fase da montagem, representada pela Figura 1.5, mostra o arrancamento das extremidades das rugosidades das superfícies durante a prensagem, e a segunda fase, representada pela Figura 1.6, mostra a área de contato após montagem, submetida à deformação plástica. Esta deformação plástica, em conjunto com tensão aplicada, irá multiplicar as discordâncias e, com isso, aumentar a resistência mecânica dos materiais nas superfícies em contato.

Figura 1.6 - (a) Contato inicial (b) Contato real [4]



Fonte: Ashby (2007, p. 234)

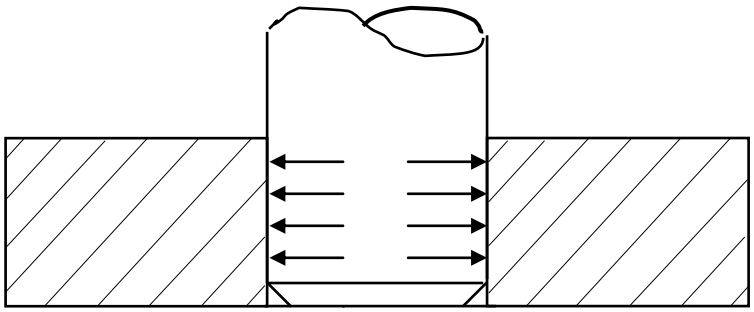
1.5 FORÇA DE ADERÊNCIA

De acordo com Agostinho (1977, p. 45), força de aderência é a resistência aos esforços externos apresentada por um ajuste com interferência e é diretamente proporcional ao valor da interferência. As dimensões das peças acopladas e a resistência mecânica dos materiais das peças também têm influência na intensidade da força de aderência.

Os ajustes prensados podem estar submetidos por duas solicitações principais: deslizamento longitudinal entre as peças ou giro delas entre si. Nos conjuntos mecânicos estes esforços externos devem ser resistidos pela força de aderência produzida pelas tensões elásticas geradas nas superfícies de ajuste.

[4] Tradução: Contact points with high local stress = Pontos de contato com altas tensões; Junction growth by plasticity work hardened zones = Crescimento da área de contato com aumento da dureza; Real contact area = verdadeira área de contato

Figura 1.7 - Pressão de ajuste num ajuste forçado no sentido longitudinal



Fonte: Mateos (1974, p. 262)

A Figura 1.7 mostra a pressão entre as superfícies em contato num ajuste com interferência entre um eixo maciço e uma roda. Neste caso e para peças de aço, nos cálculos da resistência mecânica das peças (eixo e roda) considera-se que o eixo maciço é incompressível e que, quando montada, o furo da roda ficará com o mesmo diâmetro do eixo. Essa pressão é a geradora da força de aderência.

2 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo consistiu em submeter uma determinada quantidade de corpos de prova a ensaios mecânicos, com o objetivo de analisar o comportamento da força de aderência em função do tempo decorrido após a montagem do conjunto. Cada um dos ensaios correspondeu a uma montagem prensada de um eixo no furo de uma roda e da respectiva desmontagem pela mesma prensa.

Para possibilitar a execução dos ensaios mecânicos foram executadas as seguintes atividades principais:

- Especificação dos materiais;
- Dimensionamento das peças;
- Cálculo e seleção do ajuste;
- Definição da velocidade de montagem / desmontagem;
- Escolha da prensa;
- Fabricação das rodas e eixos;
- Medição dos diâmetros dos furos das rodas;
- Medição dos diâmetros dos eixos;
- Seleção dos conjuntos roda-eixo.

2.1 ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a roda foi especificado o aço ABNT 4340, pois de acordo com Norton (2004, p. 635) é um tipo de aço muito utilizado na fabricação de engrenagens devido a sua alta temperabilidade e alta resistência mecânica, além de possuir boa usinabilidade, boa tenacidade e boa ductibilidade.

Para o eixo foi especificado o aço ABNT 1045, pois de acordo com Norton (2004, p. 480) et al. a maior parte dos eixos de máquinas é feita de aço de baixo ou médio carbono; sendo o aço ABNT 1045 um dos mais utilizados na fabricação de eixos.

2.2 DIMENSIONAMENTO DAS PEÇAS

Nesta etapa foram definidas as dimensões das peças que compõem os conjuntos e do dispositivo utilizado nas montagens e nas desmontagens. As dimensões principais - diâmetros, larguras e comprimentos - foram limitadas e calculadas para valores que não produzissem forças de montagem superiores à 100 kN. Valor que foi definido considerando-se um aumento máximo de 80% na força de aderência durante a armazenagem do conjunto montado; limitando, então, em 180 kN a intensidade da força de desmontagem, de modo a possibilitar a utilização da Máquina para Ensaios de Materiais WOLPERT LESTOR / AMSLER – Capacidade de 200 kN – UFF/Volta Redonda/RJ.

Os desenhos da roda, do eixo e do dispositivo utilizado nas montagens e nas desmontagens de cada um dos conjuntos estão mostrados nos APÊNDICES A, B, C, D e E.

2.2.1 Diâmetro do conjunto furo-eixo

Na escolha do diâmetro ∅25 mm para o ajuste do conjunto furo-eixo, além da limitação da capacidade da Máquina para Ensaios de Materiais, foram considerados os seguintes fatores:

- Facilidade de manuseio das peças e do conjunto montado;
- Valor incluso na série de Renard R5 (AGOSTINHO, 1977, p. 14).

2.2.2 Largura da roda

Na escolha da largura de 20 mm para o ajuste do conjunto furo-eixo, além da limitação da capacidade da Máquina para Ensaios de Materiais, foram considerados os seguintes fatores:

- Geometria similar a uma engrenagem;
- Facilidade de manuseio das peças e do conjunto montado;
- Valor incluso na série de Renard R10 (AGOSTINHO, 1977, p. 14).

2.2.3 Diâmetro externo da roda

Na escolha do diâmetro externo de 75 mm para a roda, além da limitação da capacidade da Máquina para Ensaios de Materiais, foram considerados os seguintes fatores:

- Roda com geometria similar a de uma engrenagem;
- Roda considerada como sendo de parede grossa:

De acordo com Hibbeller (2004, p. 320), vaso de paredes finas é aquele com uma relação raio interno (r) sobre espessura da parede (t) maior ou igual a 10:

$$\frac{\mathrm{r}}{\mathrm{t}} \geq 10 \qquad (2.1)$$

Portanto, a peça externa (roda) deve ser considerada como um cilindro de parede grossa, pois:

$$\frac{\text{diâmetro do furo da roda}/2}{(\text{diâmetro externo da roda} - \text{diâmetro do furo da roda})/2} < 10 \qquad (2.2)$$

$$\frac{12{,}5}{25} = 0{,}5 < 10$$

2.2.4 Raio de concordância da roda

O raio de concordância do furo da roda foi definido em 1,0 mm, pois conforme Agostinho (1977, p. 51) as extremidades dos furos da roda devem ser arredondadas para reduzir o arrancamento de material durante a prensagem.

2.2.5 Comprimento útil do eixo

O comprimento útil do eixo foi definido em 30 mm, sendo 10 mm maior do que a largura da roda, de modo a proporcionar uma folga de segurança para a montagem do conjunto.

2.2.6 Ângulo de bisel

Para o eixo, foi definido um ângulo de bisel igual a 10°, pois conforme Agostinho (1977, p. 51), reduz a perda de interferência pela usinagem de uma peça sobre a outra durante a montagem.

2.2.7 Comprimento do cone da ponta do eixo

O comprimento do cone da ponta do eixo foi definido como sendo 25 mm, de modo a utilizar um único dispositivo, que sirva tanto para a montagem quanto para a desmontagem. Este comprimento possibilita que o dispositivo de montagem seja utilizado na desmontagem do conjunto, eliminando a necessidade de um dispositivo específico para a desmontagem.

2.2.8 Acabamento superficial da roda e do eixo

Para as superfícies de ajuste o acabamento foi definido como sendo N6 para o furo e N4 para o eixo, com o objetivo de reduzir a perda de interferência durante a montagem.

Sendo:
N4 e N6 = classes de rugosidade definidas pela NBR 8404/1984.

Para verificar as rugosidades dos furos das rodas e das superfícies de ajuste dos eixos foi utilizado um rugosímetro, com a seguinte especificação:

- Marca: TIME Group Inc.
- Modelo: TR200

2.3 CÁLCULO E SELEÇÃO DO AJUSTE

Para o cálculo e a seleção do ajuste foram definidas as classes de tolerâncias das peças do conjunto (roda e eixo), de modo a atender as seguintes condições:

1ª Condição

O ajuste deve seguir a NBR 6158/1995 - Sistema de tolerâncias e ajustes;

2ª Condição

O ajuste deve ser com interferência e deve gerar uma tensão tangencial cuja intensidade esteja próxima da tensão de escoamento do material da roda, de modo a produzir efeitos de intensidades suficientes para facilitar os registros, as leituras e as análises.

3ª Condição

A tensão tangencial máxima, resultante da interferência máxima, não deve ultrapassar os valores das tensões de escoamento dos materiais da roda e do eixo;

4ª Condição

A montagem e a desmontagem do conjunto (roda e eixo) devem ser realizadas pela Máquina para Ensaios de Materiais – Fabricante: WOLPERT LESTOR / AMSLER – Capacidade de 200 kN.

2.3.1 Seleção do ajuste

Foi escolhido o sistema de ajuste furo-base, representado pela sigla SFB, sem nenhuma preferência em relação ao sistema de ajuste eixo-base (SEB), pois tanto um como o outro são muito utilizados em conjuntos mecânicos.

Para o diâmetro do furo e para o diâmetro do eixo foi definido o mesmo grau de tolerância IT7, pois conforme Lopes (1983, p. 62) é um grau de tolerância normalmente utilizado nos projetos de equipamentos mecânicos.

Logo, o furo foi definido como: ∅25H7

Para atender a 2ª condição, foi selecionado o ajuste H7/z7, cuja interferência é de alta intensidade. Portanto, conforme a NBR 6158/1995, a representação simbólica do ajuste é a seguinte:

∅25H7/z7

2.3.2 Verificação da interferência

Para atender a 3ª condição, foi verificado se a tensão tangencial máxima, resultante da interferência máxima, é inferior aos valores das tensões de escoamento dos materiais da roda e do eixo.

- Cálculo da interferência máxima

Conjunto furo – eixo: 25H7/z7

Pela NBR 6158/1995, temos:

$$\text{Furo: } 25\ ^{+0,021}_{0,000}\ \text{mm} \qquad \text{Eixo: } 25\ ^{+0,109}_{+0,88}\ \text{mm}$$

Interferência máxima = - (furo mínimo – eixo máximo)

$I_{máx}$ = - (25,000 – 25,109) = 0,109 mm

$I_{máx}$ = 0,109 mm

2.3.3 Características técnicas da roda

- Material: ABNT 4340 normalizado

- Tensão de escoamento - σ_e = 862 MPa = 87,92 kgf/mm²
(CALLISTER, 2007, p. 647)

- Módulo de elasticidade – E_e = 206,8 x 10^3 MPa = 21.088 kgf/mm²
(NORTON, 2004, p. 846)

- Coeficiente de Poisson - μ_e = 0,28 (NORTON, 2004, p. 846)

- Diâmetro externo: 75 mm

- Diâmetro interno: 25 mm

- Largura: 20 mm

- Rugosidade da superfície interna (NBR 8404/1984): N6
(superfície com rugosidade de valor máximo Ra = 0,8 μm)
Sendo: Ra = símbolo da característica principal da rugosidade. Representa o desvio médio aritmético da rugosidade em μm (NBR 8404/1984).

2.3.4 Características técnicas do eixo

Dados retirados das Tabelas C-1 e C-9 do Norton (2002, p. 846 e 850).

- Material: ABNT 1045 normalizado

- Tensão de escoamento - σ_e = 310 MPa = 31,6 kgf/mm²

- Módulo de elasticidade - E_i = 206,8 x 10^3 MPa = 21.088 kgf/mm²

- Coeficiente de Poisson - μ_i = 0,28

- Diâmetro: 25 mm

- Rugosidade (NBR 8404/1984): N4
(superfície com rugosidade de valor máximo Ra = 0,2 μm)

2.3.5 Cálculo da força de aderência

O cálculo do valor teórico da força de aderência tem como objetivo verificar se a força necessária para a desmontagem dos conjuntos é menor do que 200 kN, que é a capacidade da máquina a ser utilizada. Para o cálculo da força de aderência, utilizamos a fórmula recomendada por Lopes (1983, p. 76):

$$F_{máx} = \pi.f.P_{máx}.L.D \qquad (2.3)$$

Sendo:

$F_{máx}$ = força de aderência (força de desmontagem);

f = coeficiente de atrito estático;

$P_{máx}$ = pressão máxima de ajuste;

L = comprimento da superfície de ajuste;

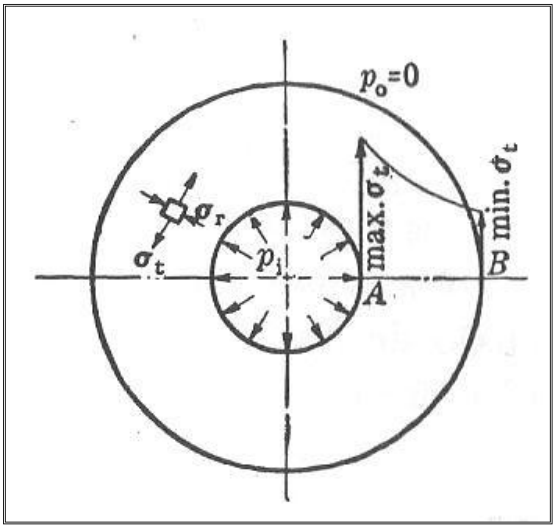
D = diâmetro da superfície de ajuste.

- Cálculo da pressão do ajuste

Como a parede do cilindro é espessa, a variação de tensão entre a superfície interna e a superfície externa é tão grande que a tensão não pode ser considerada como uniformemente distribuída.

Conforme Faires (1976, p. 611) uma avaliação mais precisa da tensão tangencial foi obtida por Lamé: sendo a roda um cilindro de parede espessa, podemos admitir que ela seja composta de uma série de cilindros de paredes delgadas, de espessuras infinitesimais, para cada um dos quais a tensão é uniforme, e admitindo que as tensões transversais permaneçam planas (isto é, a deformação de todas as fibras longitudinais é a mesma), podemos afirmar que a tensão tangencial é máxima para o diâmetro interno e mínima para o diâmetro externo, conforme mostra a Figura 2.1:

Figura 2.1 - Distribuição da força tangencial



Fonte: Faires (1976, p. 611)

Para o cálculo da pressão máxima resultante do ajuste, utilizamos a equação de Lamé:

$$P_{máx} = \frac{I_{máx} - 1{,}2(H_e - H_i)}{D(C_e + C_i)}\ kgf/mm^2 \qquad (2.4)$$

Sendo:

$P_{máx}$ = pressão máxima resultante do ajuste (kgf/mm²);

$P_{mín}$ = pressão mínima resultante do ajuste (kgf/mm²);

D = diâmetro da superfície de contato (mm);

D_e = diâmetro externo da roda (mm);

D_i = diâmetro interno do eixo (mm);

H_e = altura máxima da rugosidade resultante da usinagem do furo;

H_i = altura máxima da rugosidade resultante da usinagem do eixo.

$I_{máx}$ = interferência máxima (mm).

$$C_e = \frac{D_e^2(1+\mu_e) + D^2(1-\mu_e)}{E_e(D_e^2 - D^2)} \qquad (2.5)$$

$$C_e = \frac{75^2(1+0{,}28) + 25^2(1-0{,}28)}{21.088(75^2 - 25^2)} \quad \Rightarrow \quad C_e = 0{,}0726.10^{-3}\,mm^2/kgf$$

$$C_i = \frac{D_i^2(1+\mu_i) + D^2(1-\mu_i)}{E_i(D^2 - D_i^2)} \qquad (2.6)$$

Para $D_i = 0$ (eixo maciço), temos:

$$C_i = \frac{(1-\mu_i)}{E_i} = \frac{(1-0{,}28)}{21.088} \quad \Rightarrow \quad C_i = 0{,}0341.10^{-3}\,mm^2/kgf$$

Conforme Lopes (1983, p. 76) e Agostinho (1977, p. 50):

Perda de interferência = 1,2 (He + Hi)

Sendo:

H_e = 2,5 μm

H_i = 2,5 μm

Logo, a perda de interferência é igual a 6,0 μm.

Substituindo os valores na equação (3), temos:

$$P_{máx} = \frac{(109 - 6{,}0)10^{-3}}{25(0{,}0726 + 0{,}0341)10^{-3}}\ kgf/mm^2$$

$$P_{máx} = 38{,}61\ kp/mm^2 = 378{,}66\ MPa$$

Para que as tensões na roda e no eixo estejam dentro do limite recomendado, é necessário que:

$$P_{máx} \leq \frac{D_e^2 - D^2}{2D_e^2} \text{ x } \sigma_e \qquad (2.7)$$

$$378{,}66 \text{ MPa} \leq \frac{75^2 - 25^2}{2\text{x}75^2} \text{ x } 862$$

Pressão máxima recomendada = 383 MPa

Pressão máxima resultante do ajuste = 378,66 MPa

$$378{,}66 \text{ MPa} \cong 383 \text{ MPa}$$

Portanto, o ajuste 25H7/z7 atende a 2ª e a 3ª condição do item 2.3, pois produz uma pressão máxima ligeiramente menor do que o limite máximo recomendado.

- Cálculo da força de aderência

$$F_{máx} = \pi.f.P_{máx}.L.D \qquad (2.8)$$

f = coeficiente de atrito estático

f = 0,12 (LOPES, 1983, p. 74)

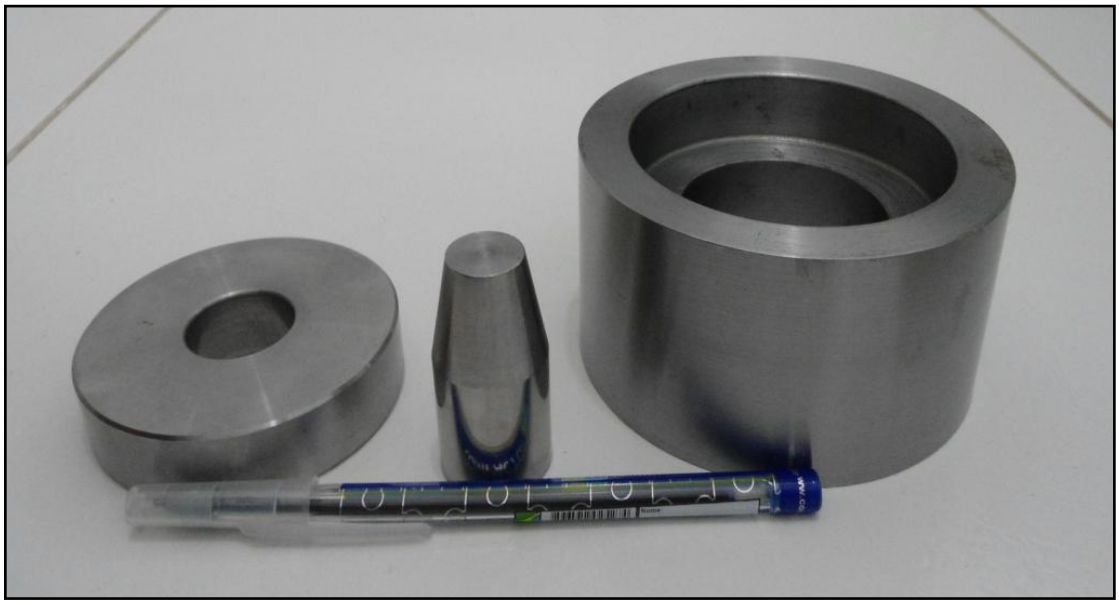
$F_{máx}$ = π x 0,12 x 378,66 x 10^6 N/m² x 0,020 x 0,025

Fmax = 71.376 [N] (força de aderência)

2.4 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS

Os materiais das peças foram fornecidos pela empresa TENAX AÇOS ESPECIAIS cujos certificados de qualidade estão copiados nos ANEXOS A e B. As peças foram fabricadas e fornecidas, conforme APÊNDICES C, D e E, pela empresa SERMOLD MECÂNICA INDÚSTRIAL LTDA e estão mostradas na Fotografia 2.1.

Fotografia 2.1 Roda, eixo e suporte



2.5 PROCEDIMENTOS PARA A MONTAGEM E DESMONTAGEM

Nesta etapa foram definidos os dois procedimentos mais importantes para a execução da montagem e da desmontagem do conjunto eixo-roda.

2.5.1 Velocidade da montagem e da desmontagem

De acordo com Agostinho (1977, p. 52), a velocidade de prensagem, para peças de aço, não deve ultrapassar 2,0 mm/s, pois as forças de aderência diminuem com o aumento da velocidade; podendo chegar a uma perda de 75% para velocidades dez vezes maiores do que a recomendada. Portanto, para reduzir a influência da perda de interferência nos resultados dos ensaios, a intensidade da

velocidade para as montagens e para as desmontagens dos conjuntos foi realizada entre 0,10 e 0,20 mm/s.

2.5.2 Lubrificação

As superfícies de ajuste foram lubrificadas com óleo lubrificante automotivo semissintético 15W40, antes do início da montagem, com o objetivo de reduzir a perda de interferência durante a montagem.

2.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos (montagem e desmontagem) dos conjuntos foram realizados na Máquina para Ensaios de Materiais – Fabricante: WOLPERT LESTOR / AMSLER – Capacidade de 200 kN, mostrada na Fotografia 2.2.

Fotografia 2.2 - Máquina WOLPERT LESTOR

Local: Universidade Federal Fluminense de Volta Redonda

2.6.1 Seleção dos conjuntos

Para que as forças de montagem dos conjuntos apresentassem intensidades com a menor variação possível, todos os furos das rodas e todos os diâmetros dos eixos foram medidos e os conjuntos foram selecionados de modo que suas interferências apresentassem a menor variação possível. Os resultados das medições e da seleção dos conjuntos foi a formação de conjuntos com interferências entre 90 μm e 95 μm, os quais estão mostrados nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Os furos das rodas e os diâmetros dos eixos foram medidos com os seguintes micrômetros:

- Micrômetro interno com contato de três pontas DIGIMESS nº 110.690-12 com capacidade 20 – 25 mm e graduação de 0,005 mm;
- Micrômetro externo DIGIMESS nº 110.202 com capacidade 25 – 50 mm e graduação de 0,01 mm.

Tabela 2.1 – Diâmetros das peças

PEÇA Nº	FURO (mm)	EIXO (mm)
1	24,990	25,085
2	24,995	25,090
3	24,990	25,090
4	24,995	25,090
5	24,995	25,090
6	25,000	25,085
7	24,995	25,085
8	24,990	25,090
9	24,990	25,095
10	24,985	25,095
11	24,985	25,090
12	24,995	25,085
13	25,000	25,085
14	24,995	25,085
15	25,000	25,080
16	24,995	25,095
17	24,990	25,085
18	24,995	25,085
19	24,995	25,090
20	25,000	25,085
21	24,995	25,085
22	24,990	25,085
23	24,995	25,085
24	25,000	25,095
25	24,995	25,090
26	24,995	25,090
27	24,995	25,085
28	25,000	25,080

Tabela 2.2 – Formação dos conjuntos

CONJUNTO	RODA	EIXO	INTERFERÊNCIA
Nº	Nº	Nº	µm
1	1	1	TESTE
2	2	2	TESTE
3	19	3	95
4	4	4	95
5	5	5	95
6	3	6	95
7	7	13	90
8	8	12	95
9	9	7	95
10	13	10	95
11	11	28	TESTE
12	12	8	95
13	6	9	95
14	14	14	90
15	15	16	95
16	10	15	95
17	17	17	95
18	18	18	90
19	16	20	90
20	20	11	TESTE
21	26	23	90
22	27	19	95
23	24	24	95
24	22	27	95
25	23	21	90
26	21	25	95
27	25	22	90
28	28	26	90

Observação: As peças e os conjuntos indicados como “TESTE”, na tabela acima, foram destinados para definição do método, dos meios utilizados e para a correção dos pontos falhos, de modo a garantir da confiabilidade dos resultados dos ensaios.

2.7 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS

Após a lubrificação das peças a serem ajustadas, cada um dos conjuntos foi preparado para montagem inserindo-se a roda no suporte e posicionando-se o eixo no furo da roda, com a ponta biselada para baixo, conforme mostram as Fotografias 2.3 e 2.4.

Fotografia 2.3 - Roda inserida no suporte

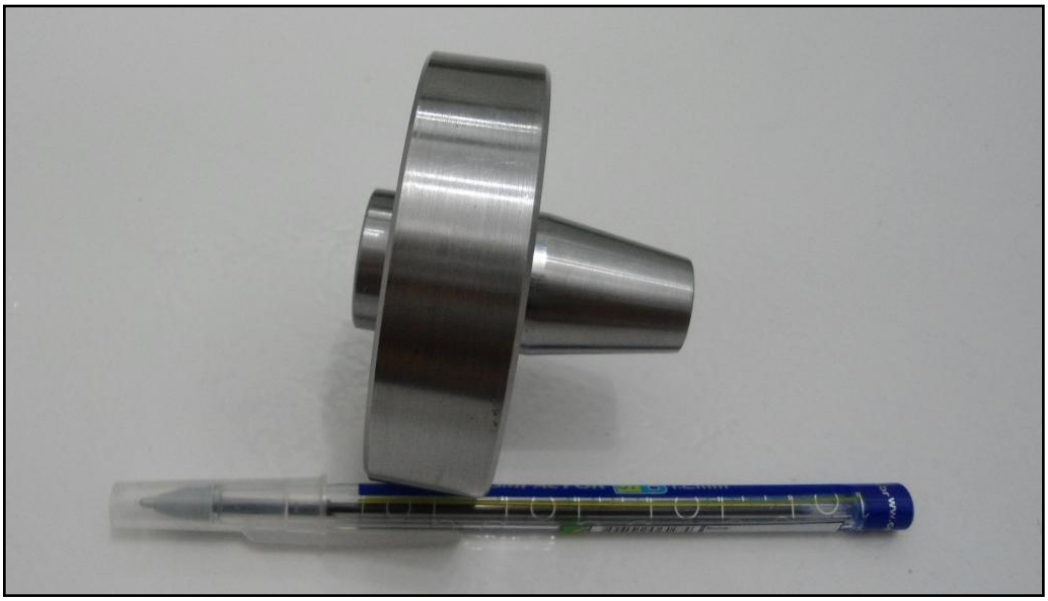
Local: Laboratório do UniFOA

Fotografia 2.4 - Eixo posicionado para montagem

Local: Laboratório do UniFOA

As montagens foram realizadas pela Máquina para Ensaios de Materiais WOLPERT LESTOR / AMSLER, pressionando-se o eixo até o contato pleno das superfícies de ajuste, cujo resultado está mostrado na Fotografia 2.5.

Fotografia 2.5 - Conjunto montado



Local: Laboratório do UniFOA

As desmontagens foram realizadas com os conjuntos posicionados conforme está mostrado no APÊNDICE B e na Fotografia 2.6; e foram feitas pressionando-se a ponta do eixo, com a mesma Máquina WOLPER LESTOR, até que o contato entre as peças deixe de existir. O cronograma de desmontagem foi elaborado de modo que a maior quantidade de amostras fosse concentrada nos primeiros dez (10) dias após a montagem e que o período total de espera para a desmontagem não ultrapassasse quarenta e dois (42) dias.

O prazo máximo de armazenagem dos conjuntos (42 dias) foi definido com base no exemplo de fratura relatado no Capítulo INTRODUÇÃO desta dissertação, e a concentração dos ensaios nos primeiros dez (10) dias após montagem foi definida com base na afirmação de Mateos (1974, p. 301): “a intensidade do aumento da força de aderência é mais alta nos primeiros dias após montagem e torna-se cada vez menor com o decorrer do tempo”.

Fotografia 2.6 - Conjunto posicionado para desmontagem

Local: Laboratório do UniFOA

2.8 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada nos gráficos força x deslocamento, gerados pela máquina de ensaios mecânicos WOLPER LESTOR, do laboratório de ensaios mecânicos da UFF de Volta Redonda, durante as montagens e as desmontagens dos conjuntos.

2.9 METALOGRAFIA

Foram realizadas caracterizações metalográficas no material roda, com o objetivo de comparar a forma e a orientação preferencial dos grãos da superfície próxima ao furo com a superfície próxima ao diâmetro externo: antes da montagem e após a desmontagem. A preparação das amostras consistiu da técnica convencional de lixamento e de polimento, seguido de ataque químico com reagente nital 2% e as fotomicrografias foram realizadas no Microscópio Metalográfico Invertido Opton TNM-07T-PL.

2.10 ENSAIOS DE DUREZA

Os ensaios de dureza Vickers foram realizados no laboratório da Universidade Federal Fluminense de Volta Redonda em um durômetro da marca VEB Werkstoffprüfmachinen nº 308/43 (Fotografia 2.7) e seguiram a norma NBR NBM ISO 6507-1 de 2008.

A carga utilizada nos ensaios de dureza da roda foi de 30 kgf, com tempo de carregamento de 20 segundos (HV 30/20). A carga utilizada nos ensaios de dureza do eixo foi de 5 kgf, com tempo de carregamento de 20 segundos (HV 5/20).

Fotografia 2.7 – Durômetro VEB Werkstoffprüfmachinen

Local: Universidade Federal Fluminense – Volta Redonda

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CRONOGRAMA DE DESMONTAGEM DOS CONJUNTOS

As desmontagens dos conjuntos foram executadas conforme cronograma mostrado na Tabela 3.1.

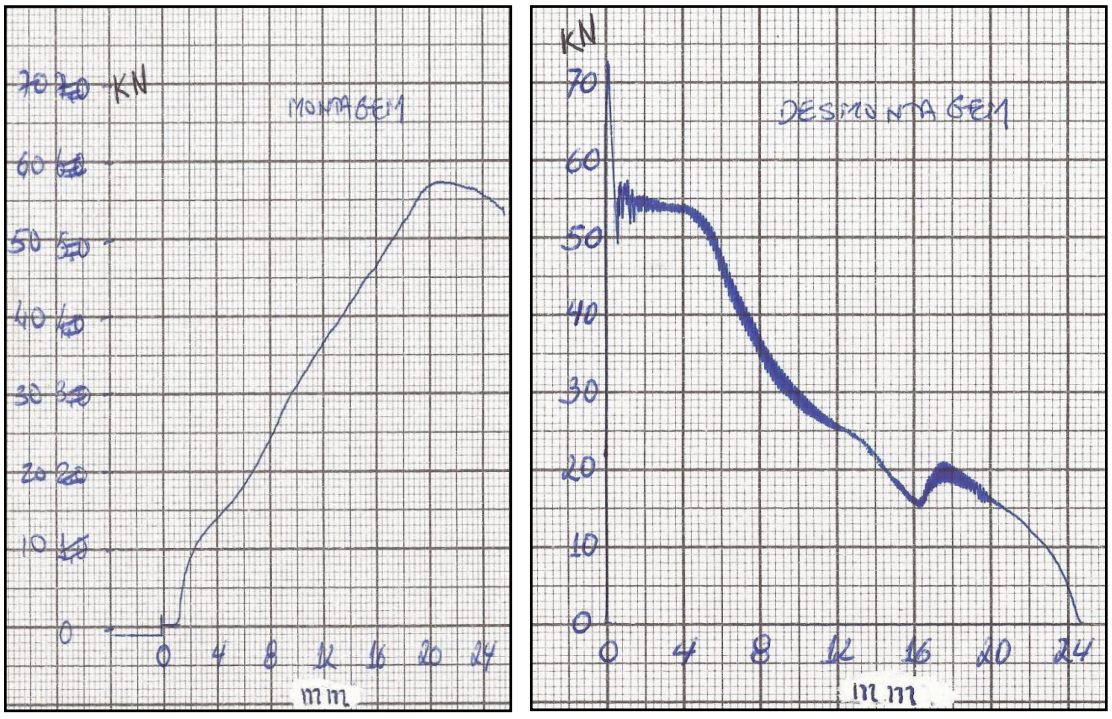
Tabela 3.1 – Cronograma de desmontagem dos conjuntos

CRONOGRAMA DE DESMONTAGEM					
SEQ	**2012 MÊS**	**DIA**		**TEMPO (DIAS)**	**CONJUNTO Nº**
1º	SETEMBRO	4	Terça-feira	0	18
2º		5	Quarta-feira	1	13
		6	Quinta-feira	2	7
7º		10	Segunda-feira	6	12
4º		13	Quinta-feira	3	19
8º		13	Quinta-feira	9	3
9º		17	Segunda-feira	13	8
5º		17	Segunda-feira	4	21
12º		21	Sexta-feira	17	5
6º		21	Sexta-feira	4	22
14º		26	Quarta-feira	22	4
15º	OUTUBRO	1	Segunda-feira	27	16
16º		**1**	**Segunda-feira**	**27**	15
17º		8	Segunda-feira	34	9
10º		15	Segunda-feira	14	25
13º		15	Segunda-feira	19	24
18º		15	Segunda-feira	41	17
		17	Quarta-feira	2	27
3º		17	Quarta-feira	2	28
19º		**22**	**Terça-feira**	**32**	23
11º		**22**	**Terça-feira**	**15**	26

3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

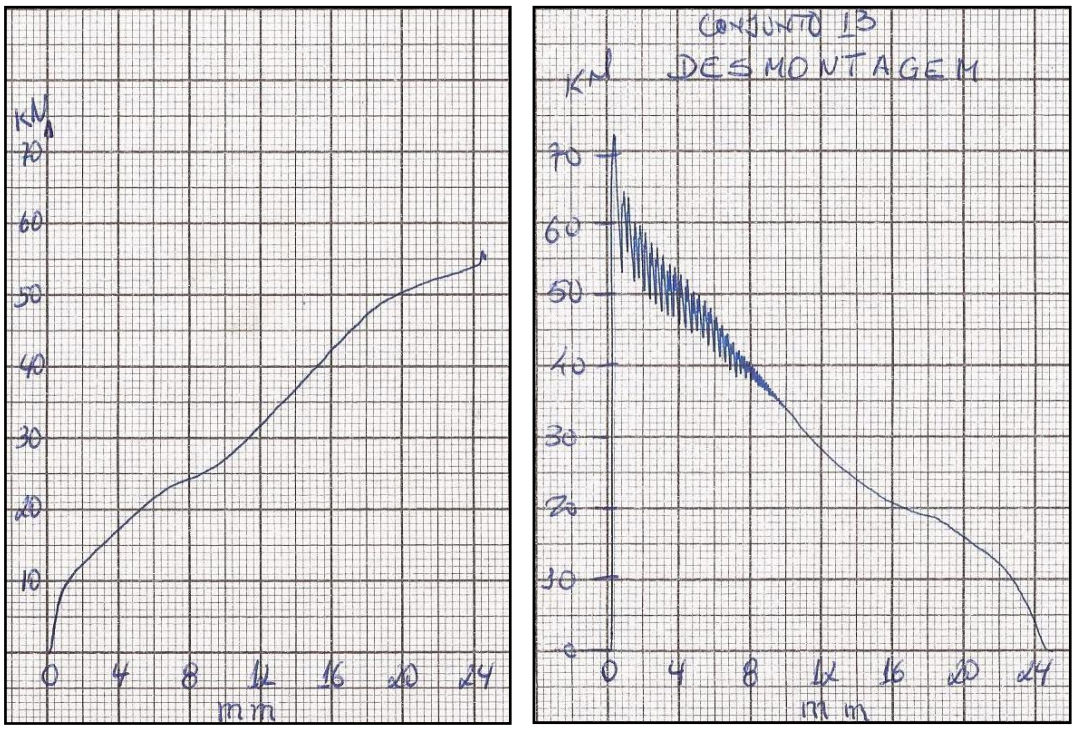
Os gráficos 3.1 a 3.21, gerados pela Máquina para Ensaios de Materiais WOLPERT LESTOR / AMSLER, permitiram avaliar o comportamento da força de aderência em função do tempo decorrido entre a montagem e a desmontagem dos conjuntos roda – eixo. As setas nos gráficos de desmontagem indicam o ponto onde manualmente a velocidade de desmontagem foi aumentada com o objetivo de reduzir o tempo do ensaio, sem prejuízo na confiabilidade dos dados.

Gráfico 3.1 - Conjunto nº 18 - Força x Deslocamento



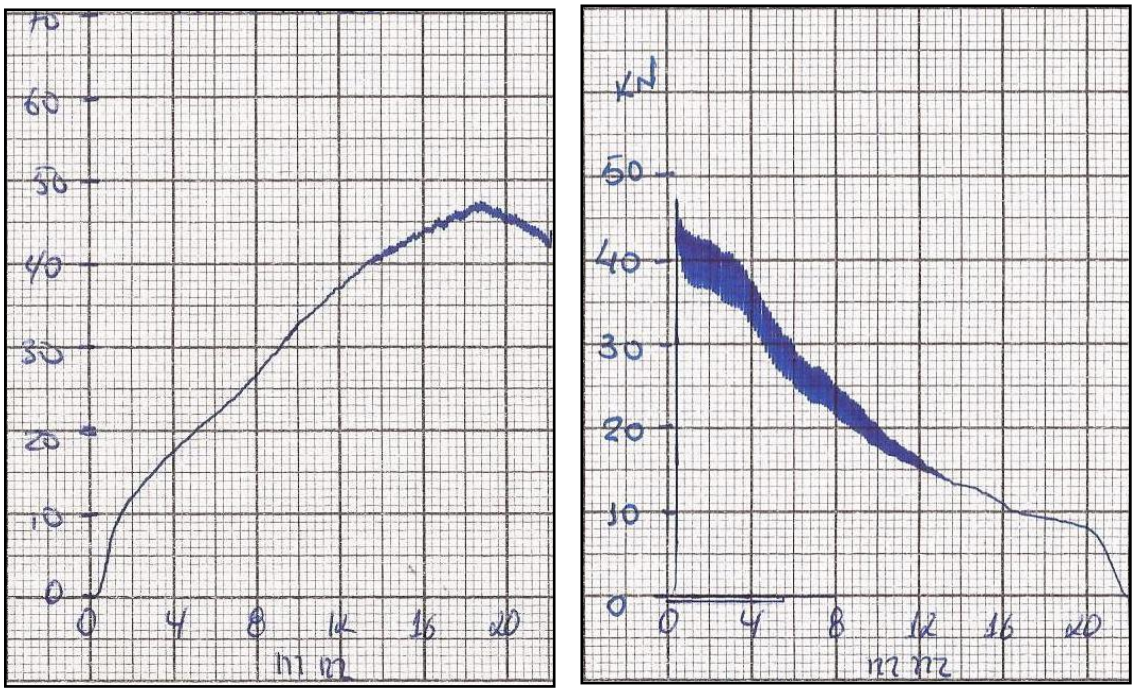
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.2 - Conjunto nº 13 - Força x Deslocamento



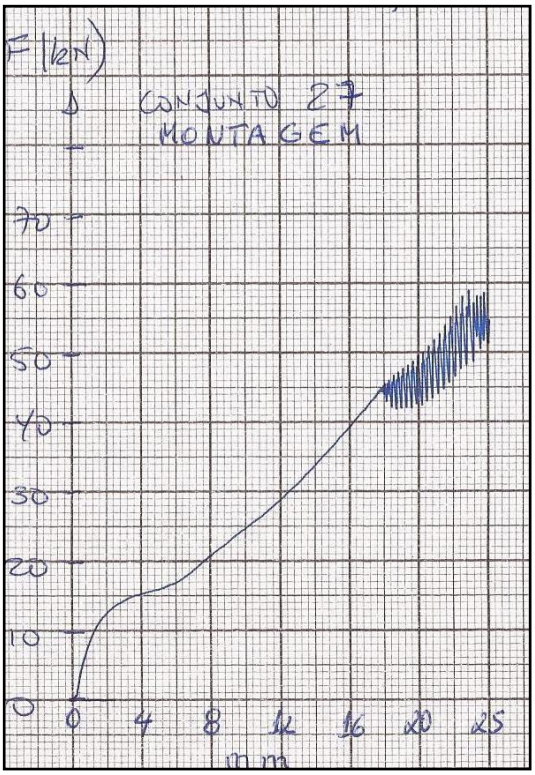
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.3 - Conjunto nº 7 - Força x Deslocamento

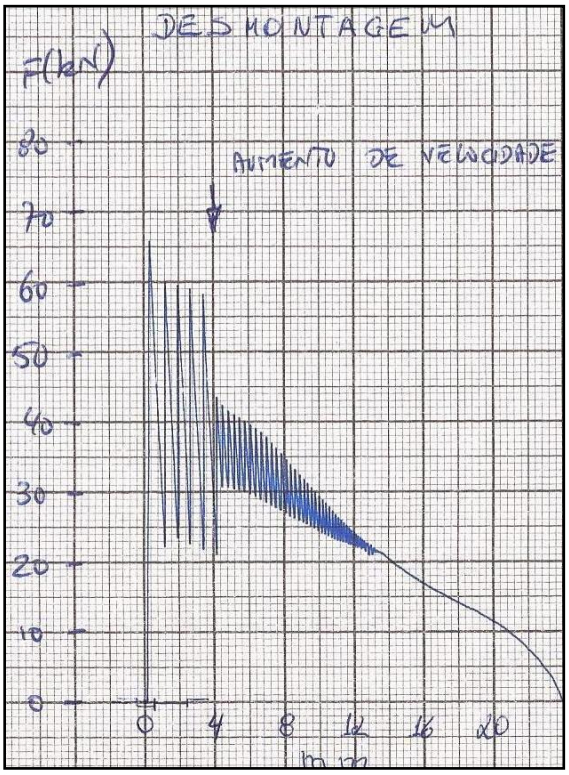


(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.4 - Conjunto nº 27 - Força x Deslocamento

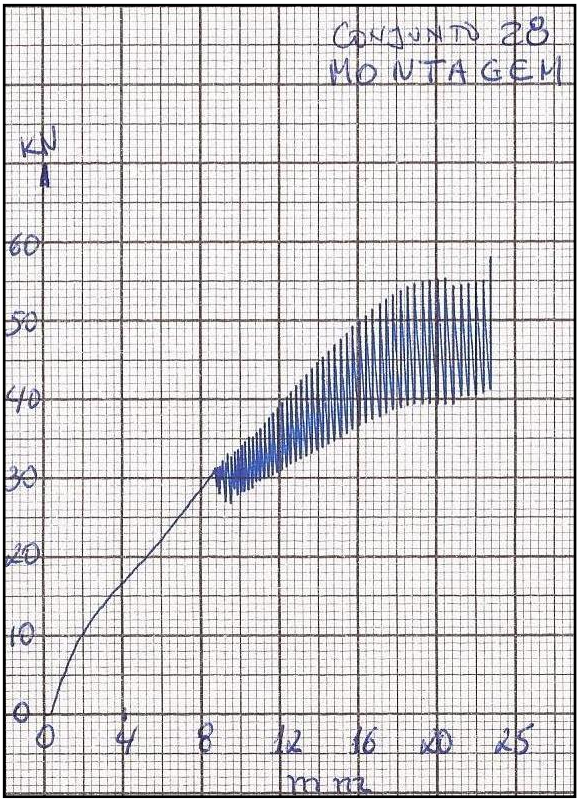


(a) Montagem

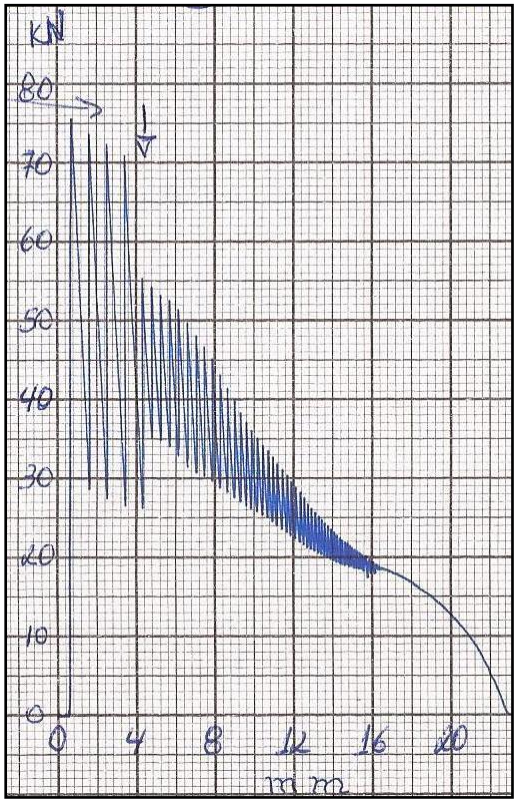


(b) Desmontagem

Gráfico 3.5 - Conjunto nº 28 - Força x Deslocamento

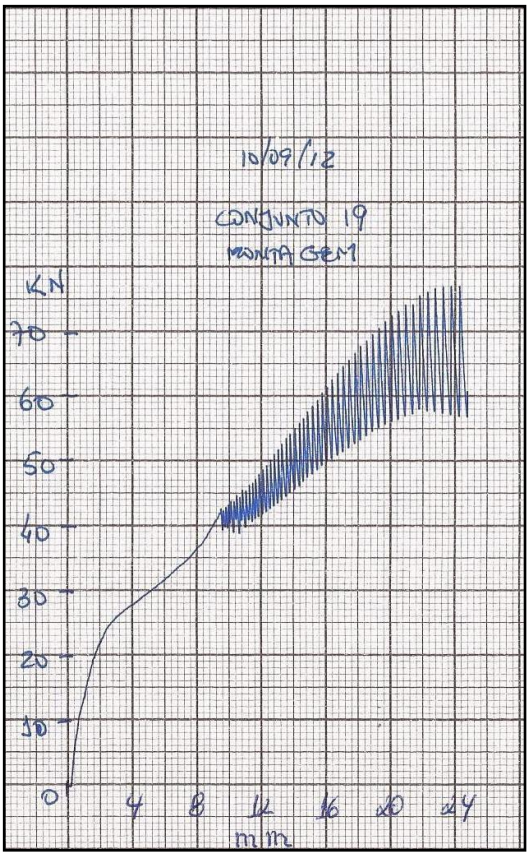


(a) Montagem

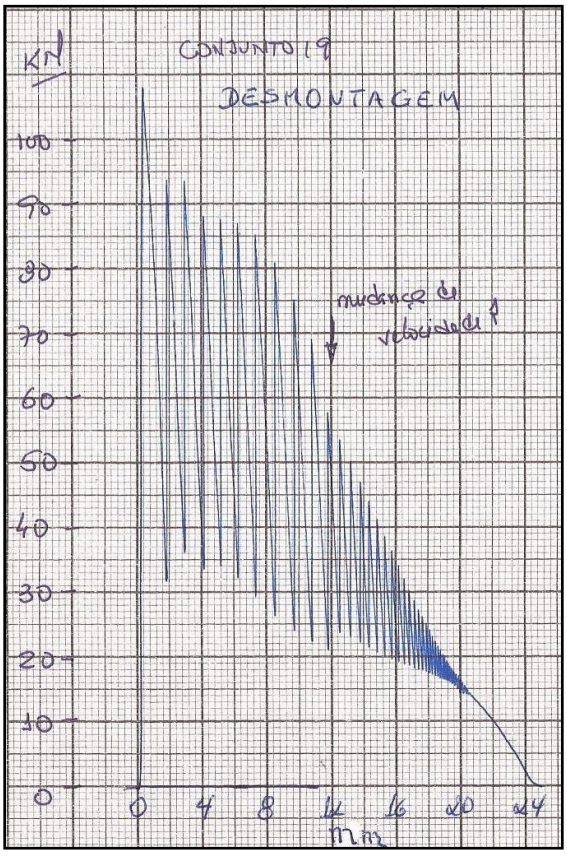


(b) Desmontagem

Gráfico 3.6 - Conjunto nº 19 - Força x Deslocamento

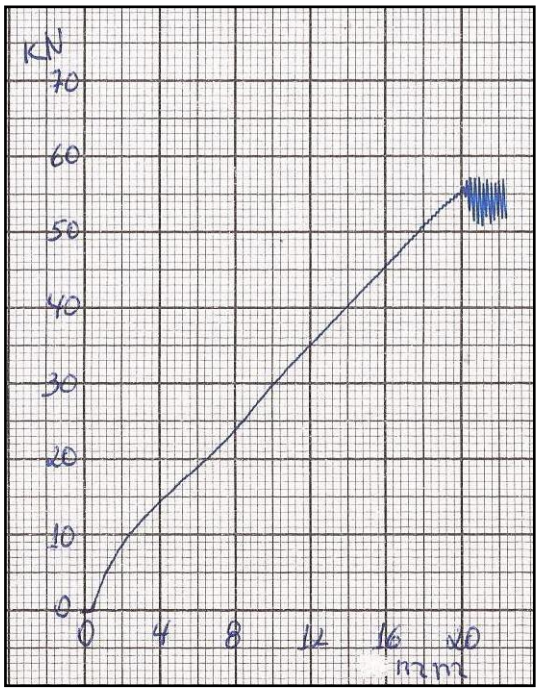


(a) Montagem

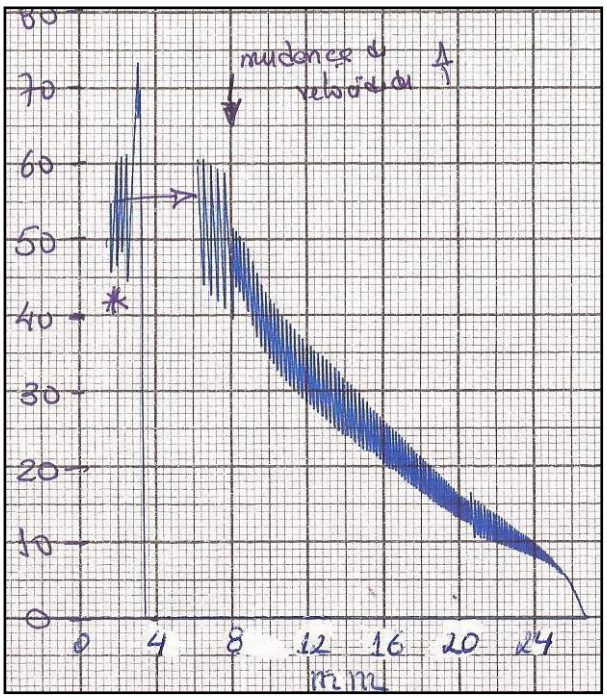


(b) Desmontagem

Gráfico 3.7 - Conjunto nº 21 - Força x Deslocamento

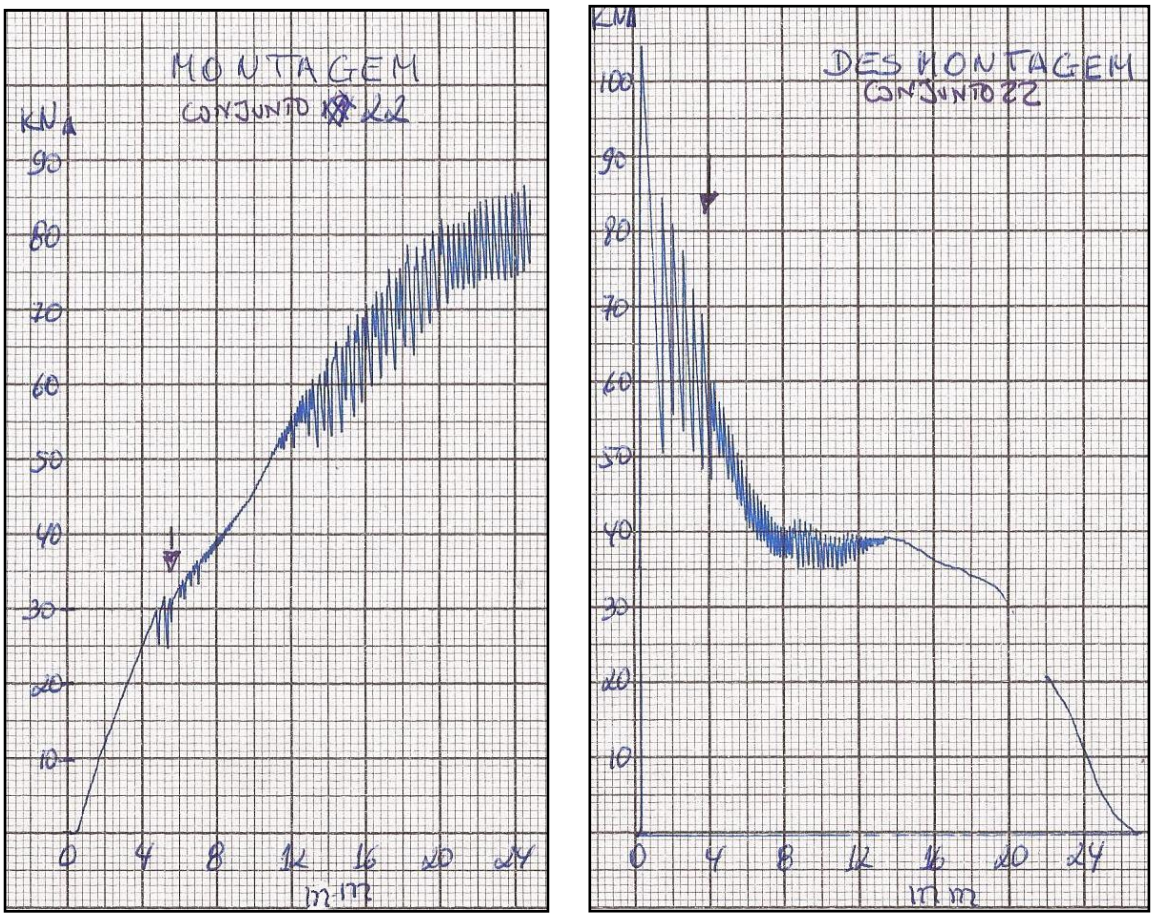


(a) Montagem



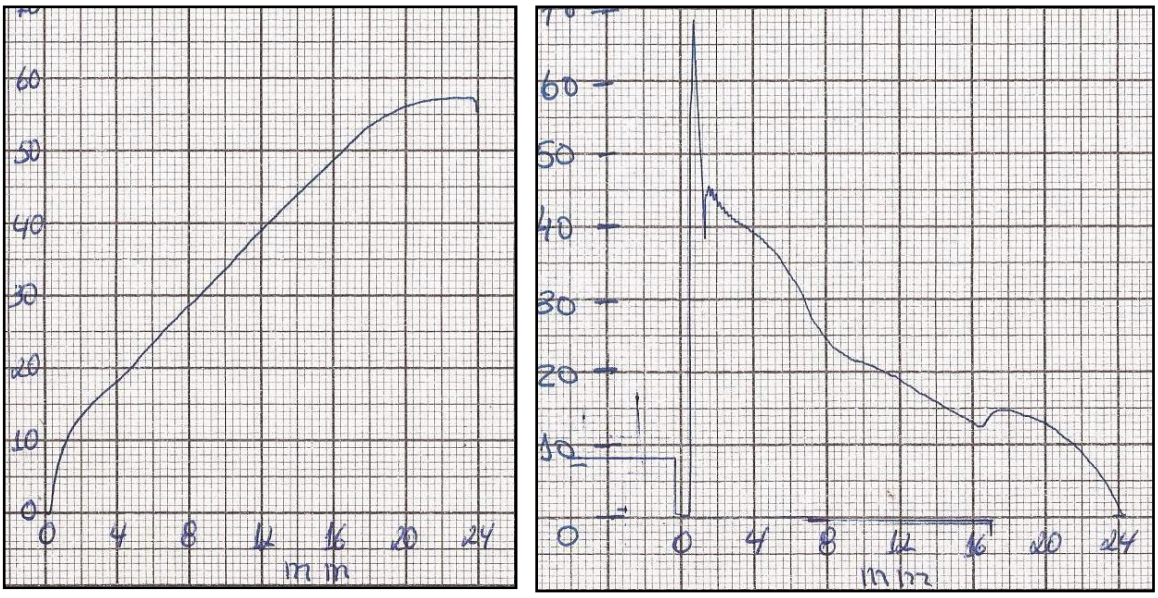
(b) Desmontagem

Gráfico 3.8 - Conjunto nº 22 - Força x Deslocamento



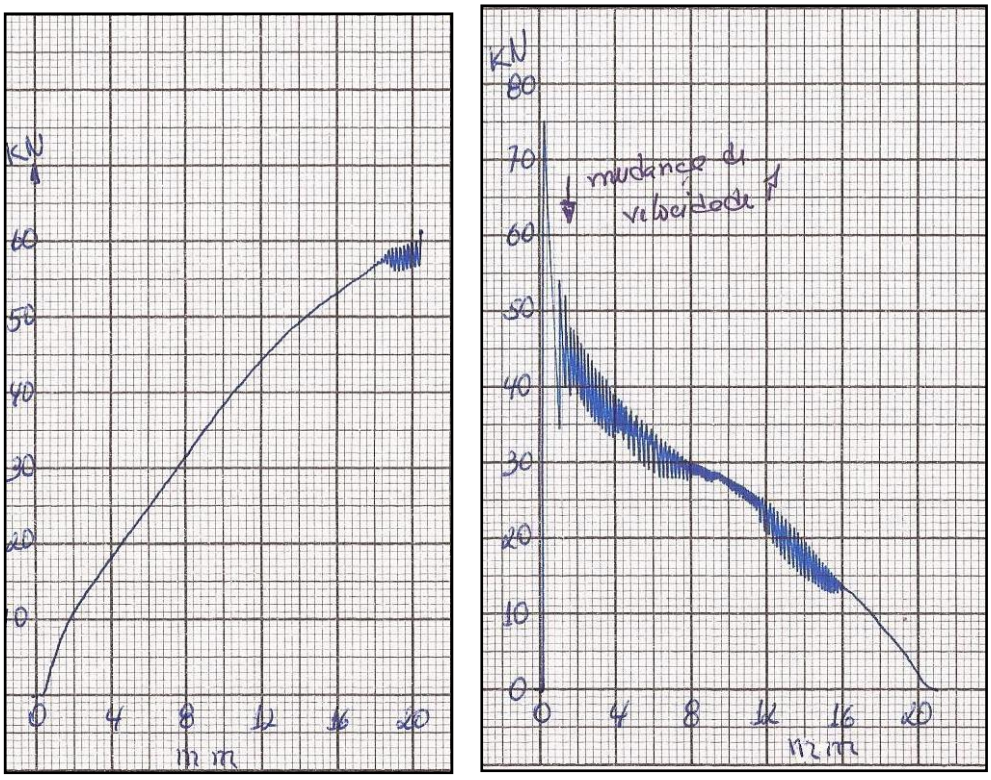
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.9 - Conjunto nº 12 - Força x Deslocamento



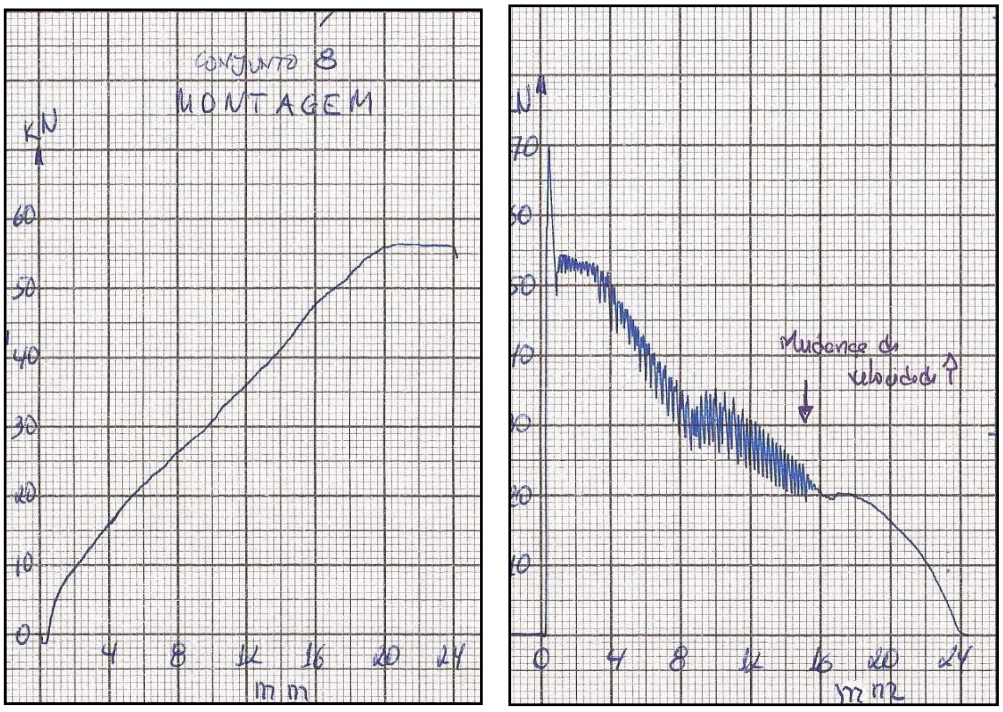
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.10 - Conjunto nº 3 - Força x Deslocamento



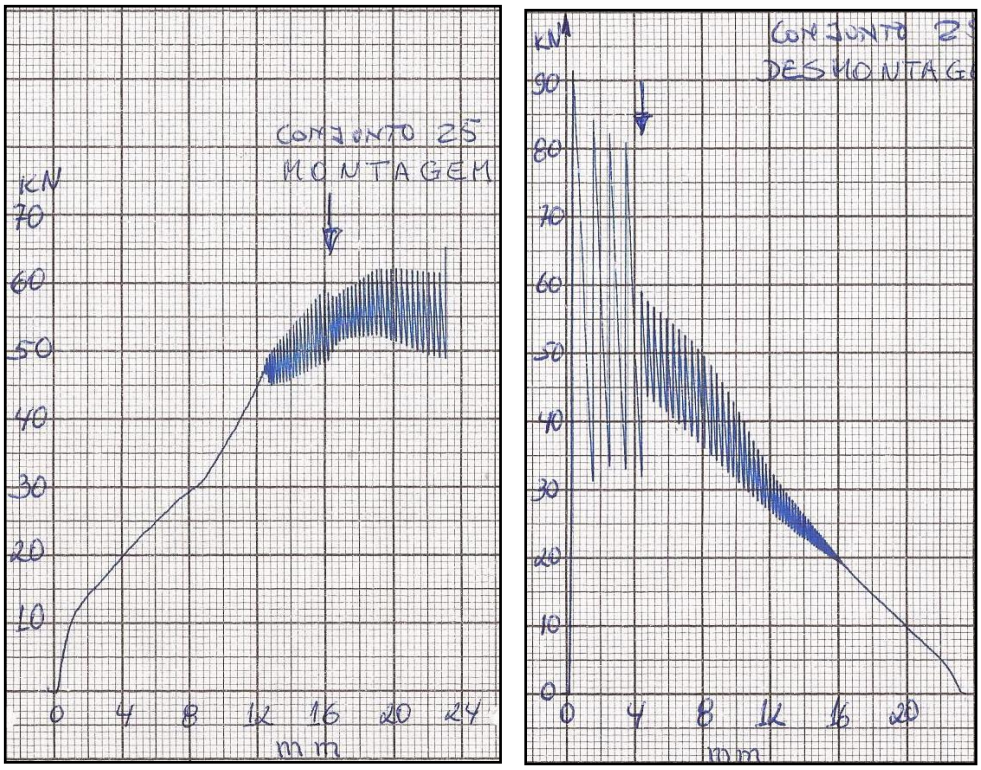
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.11 - Conjunto nº 8 - Força x Deslocamento



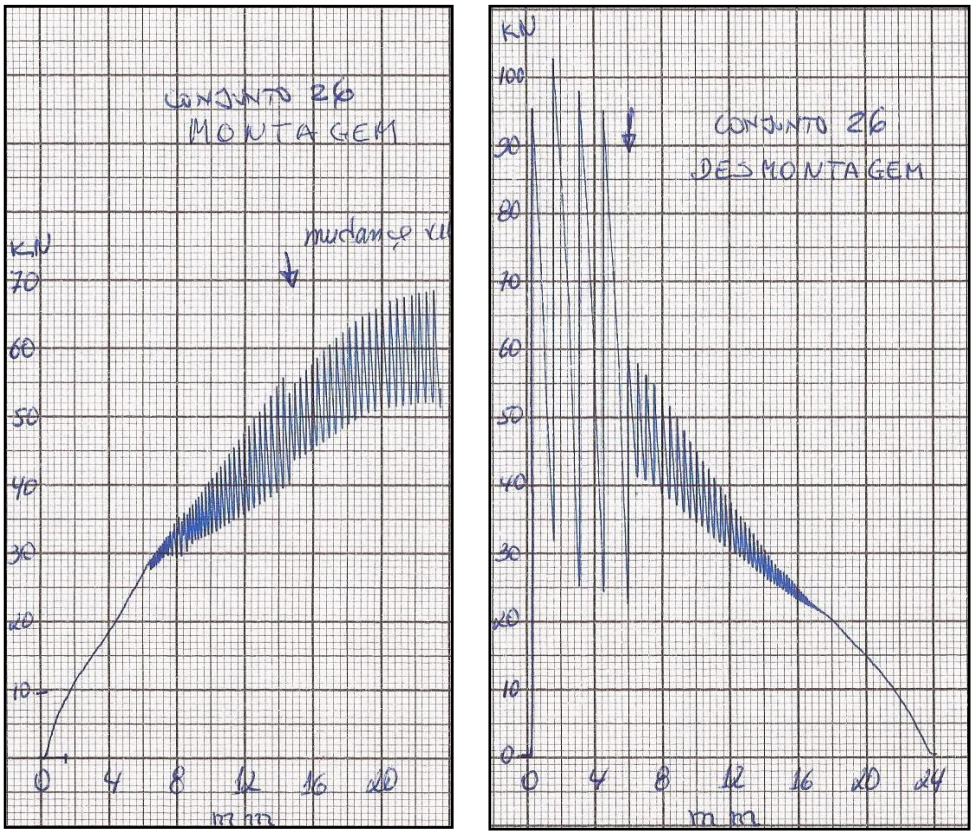
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.12 - Conjunto nº 25 - Força x Deslocamento



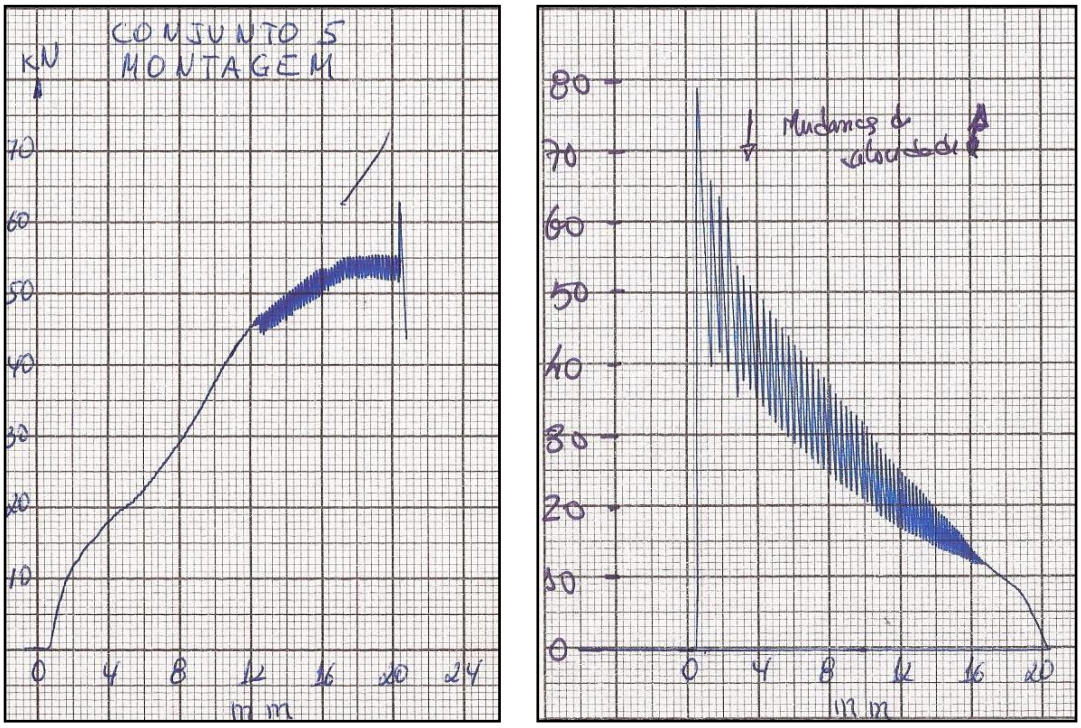
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.13 - Conjunto nº 26 - Força x Deslocamento



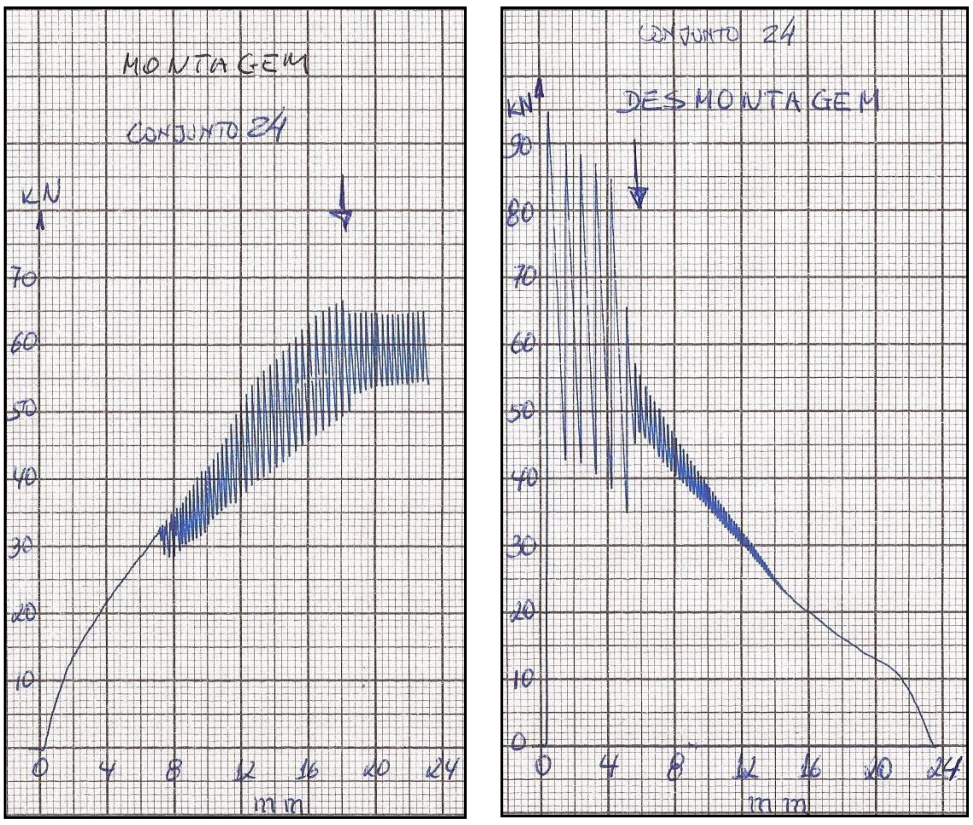
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.14 - Conjunto nº 5 - Força x Deslocamento



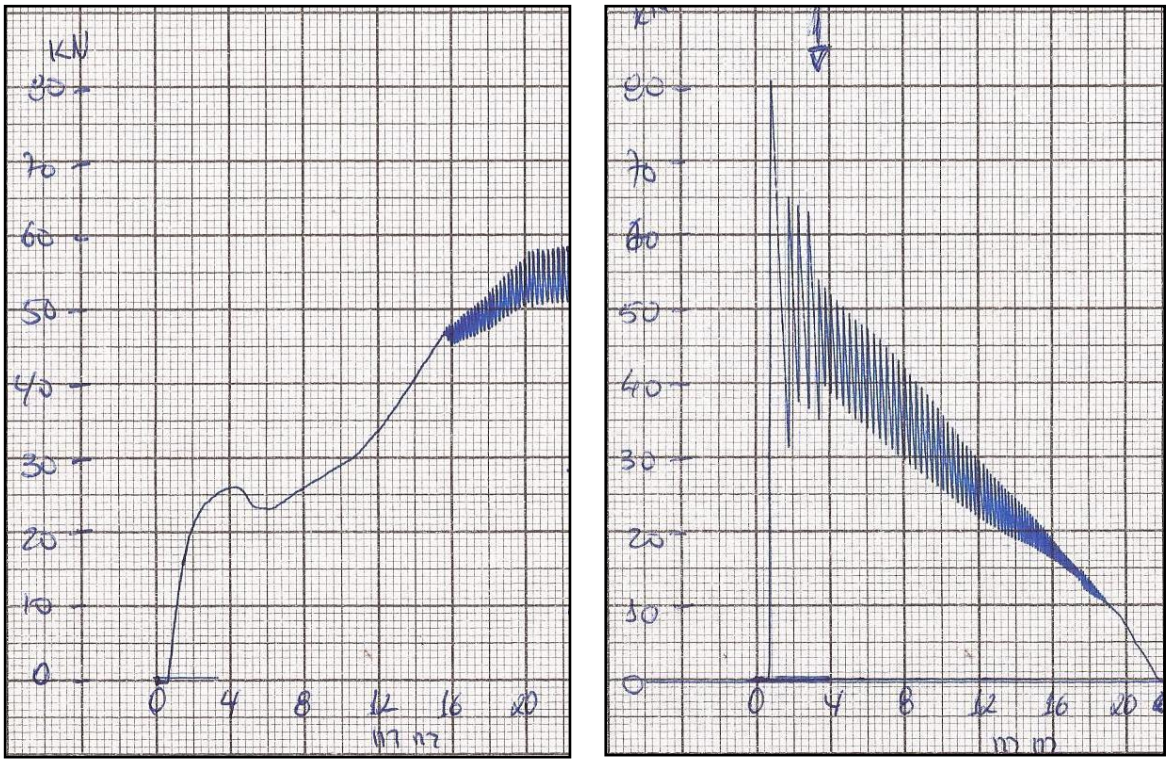
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.15 - Conjunto nº 24 - Força x Deslocamento



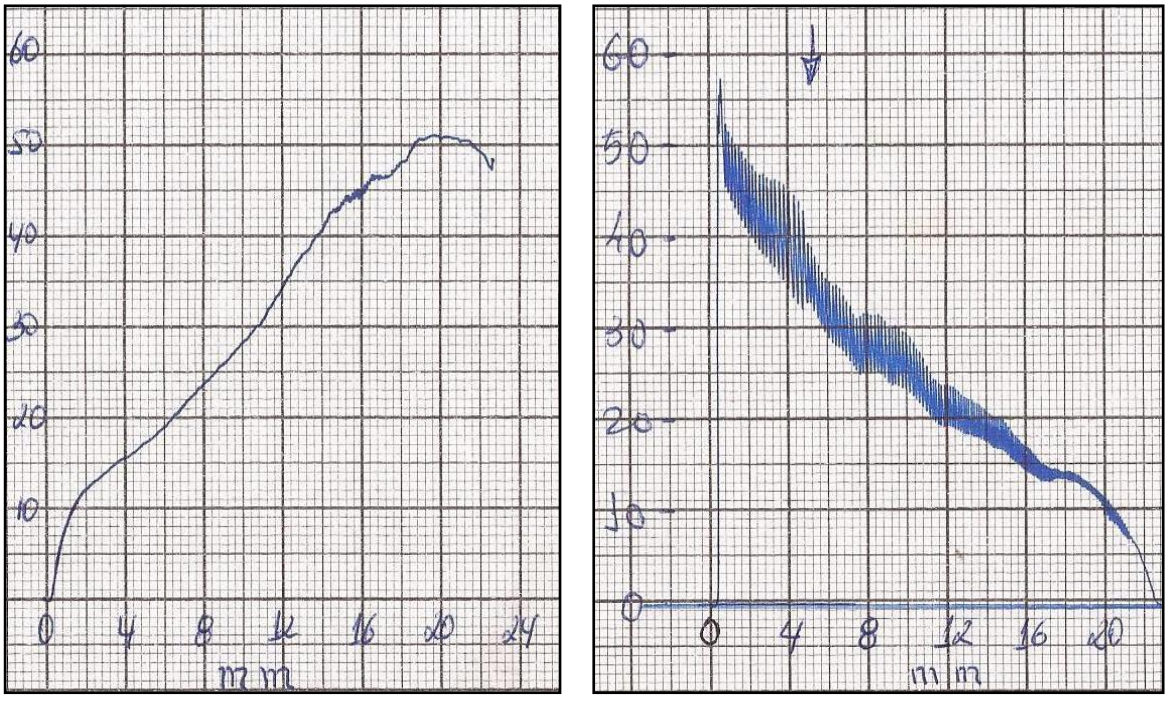
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.16 - Conjunto nº 4 - Força x Deslocamento



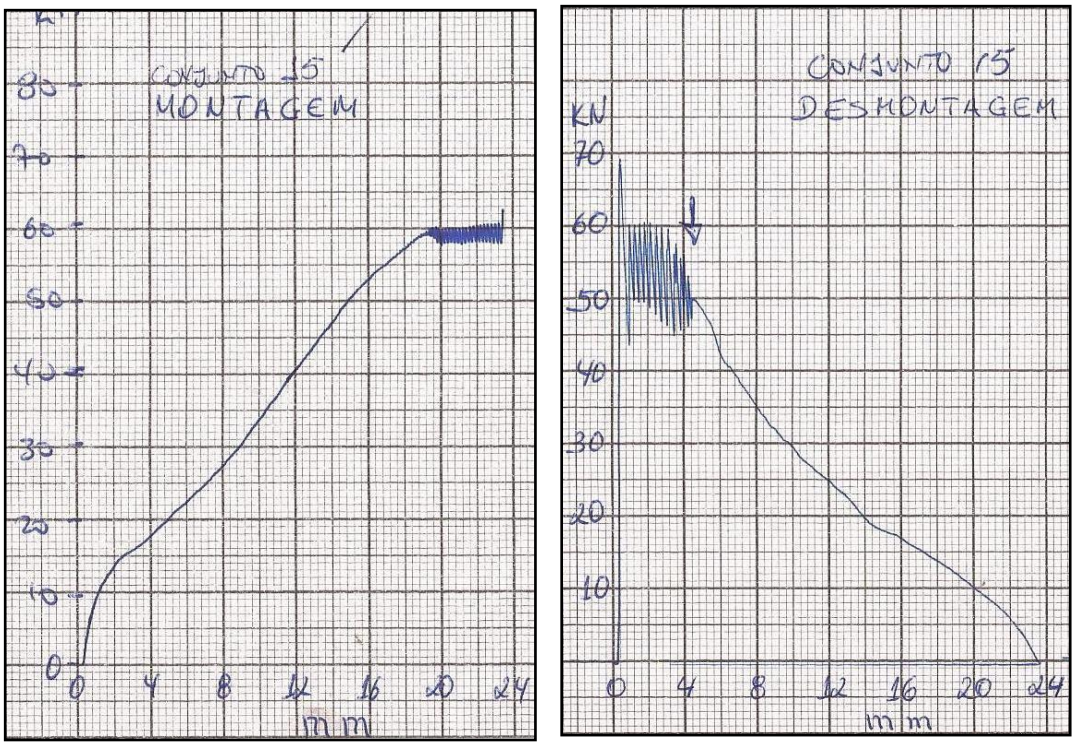
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.17 - Conjunto nº 16 - Força x Deslocamento



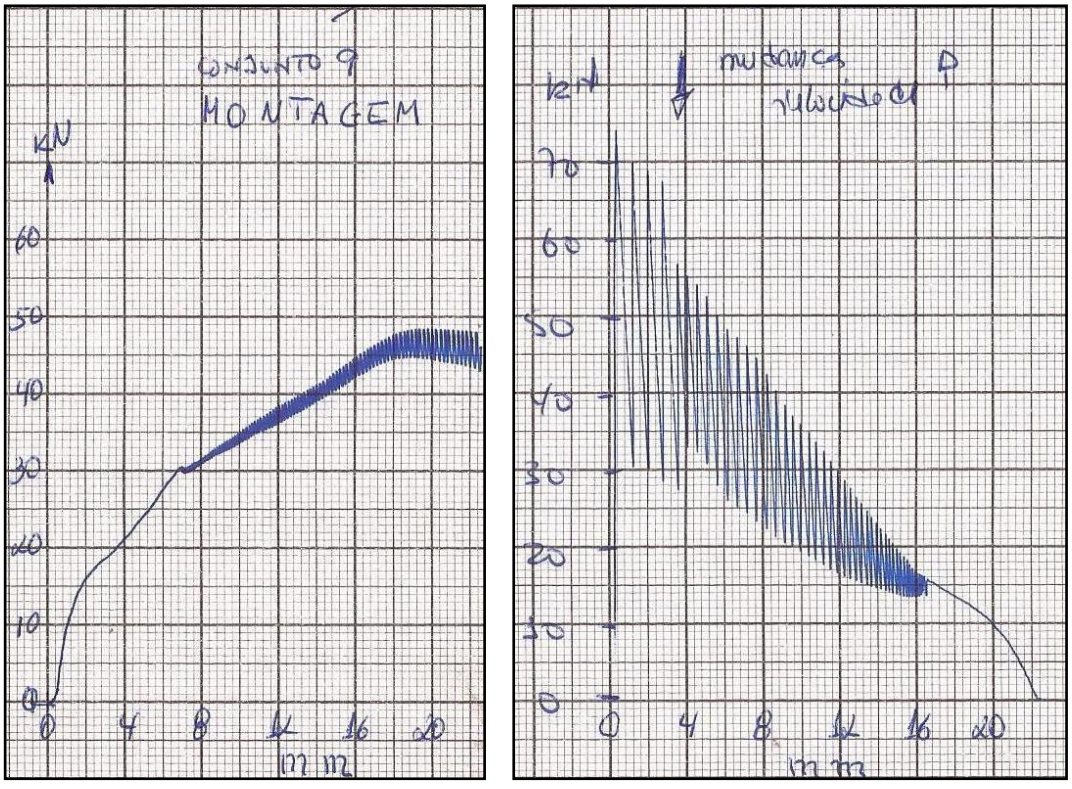
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.18 - Conjunto nº 15 - Força x Deslocamento



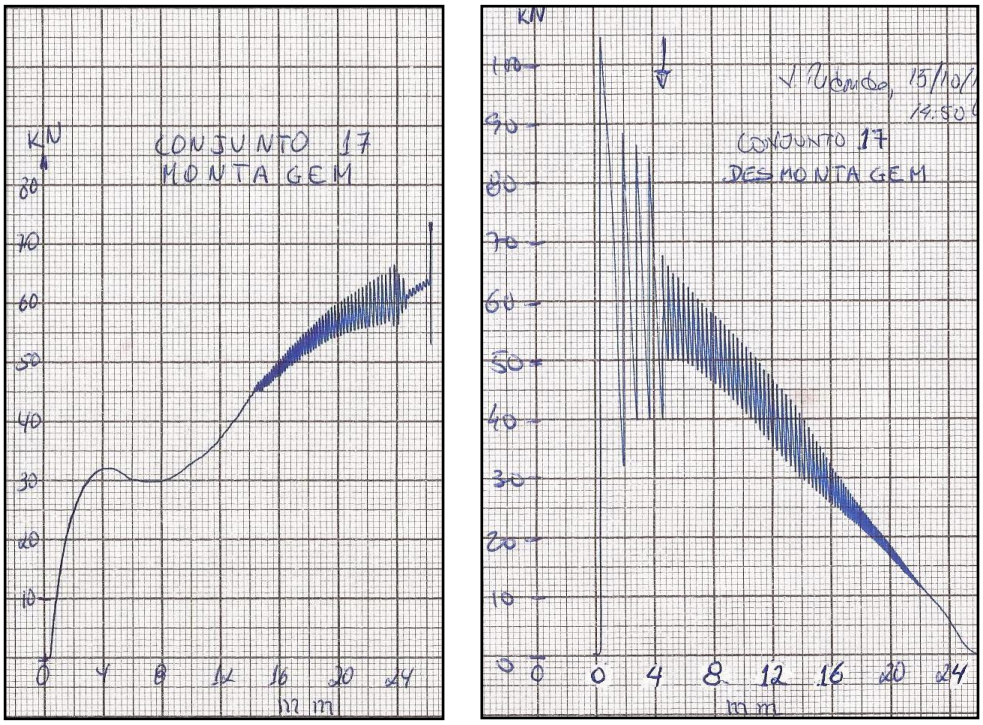
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.19 - Conjunto nº 9 - Força x Deslocamento



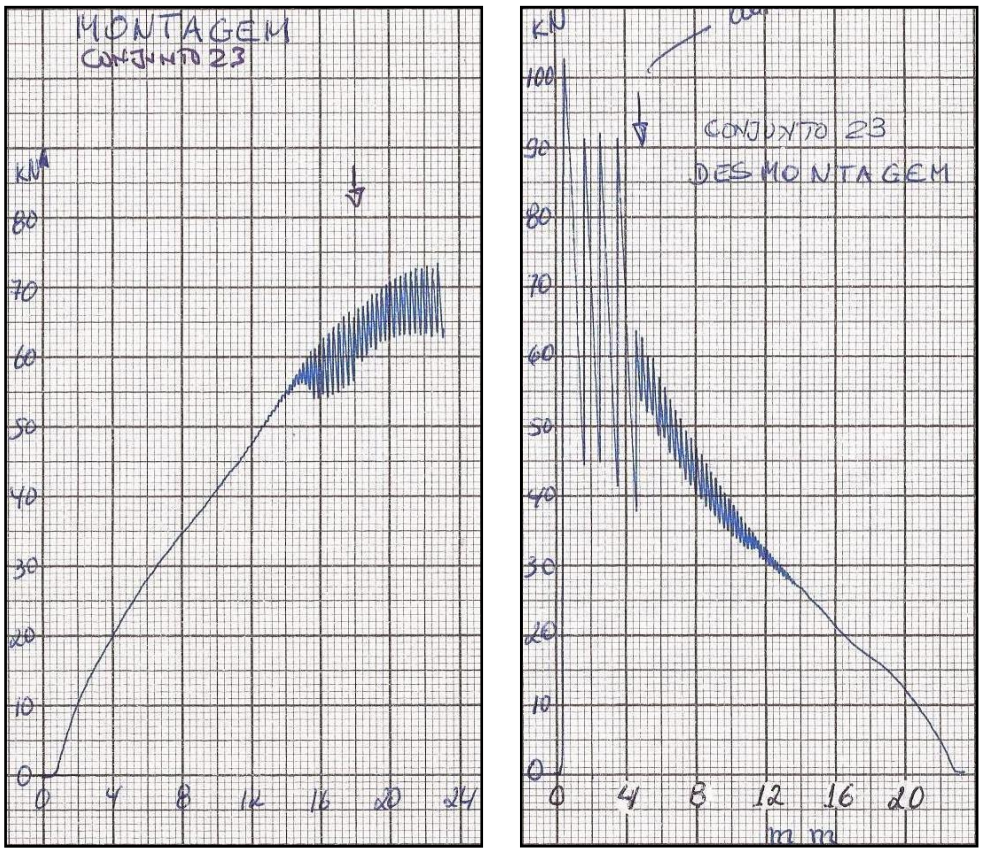
(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.20 - Conjunto nº 17 - Força x Deslocamento



(a) Montagem (b) Desmontagem

Gráfico 3.21 - Conjunto nº 23 - Força x Deslocamento



(a) Montagem (b) Desmontagem

3.3 AUMENTO DA FORÇA DE ADERÊNCIA

A Tabela 3.2 reúne os resultados dos ensaios de cada um dos conjuntos: as forças máximas de montagem, as forças máximas de desmontagem e os respectivos percentuais de aumento em função do tempo.

Tabela 3.2 - Aumento percentual da força de aderência em função do tempo

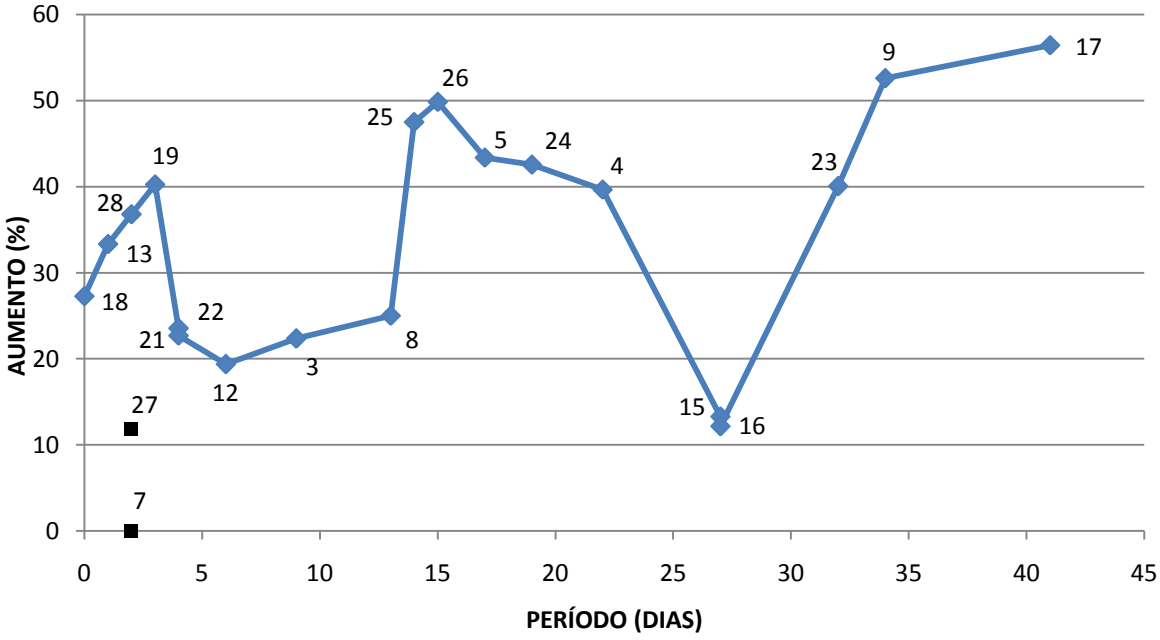
CONJUNTO Nº	MONTAGEM		DESMONTAGEM		AUMENTO %	SEQ
	DATA	FORÇA N	DATA	FORÇA N		
3	04/09/2012	61.300	13/09/2012	75.000	22,35	8º
4	04/09/2012	58.000	26/09/2012	81.000	39,66	14º
5	04/09/2012	55.100	21/09/2012	79.000	43,38	12º
6	04/09/2012	104.000	DESPREZAR			
7	04/09/2012	47.300	06/09/2012	47.300	DESPREZADO	
8	04/09/2012	56.000	17/09/2012	70.000	25,00	9º
9	04/09/2012	48.500	08/10/2012	74.000	52,58	17º
10	04/09/2012	84.000	23/10/2012	94.600	12,62	DESPREZADO
12	04/09/2012	57.050	10/09/2012	68.100	19,37	7º
13	04/09/2012	54.000	05/09/2012	72.000	33,33	2º
15	04/09/2012	61.000	01/10/2012	69.100	13,28	16º
16	04/09/2012	51.000	01/10/2012	57.200	12,16	15º
17	04/09/2012	67.000	15/10/2012	104.800	56,42	18º
18	04/09/2012	57.200	04/09/2012	72.800	27,27	1º
19	10/09/2012	77.000	13/09/2012	108.000	40,26	4º
21	13/09/2012	57.050	17/09/2012	70.000	22,70	5º
22	17/09/2012	85.000	21/09/2012	105.000	23,53	6º
23	21/09/2012	73.400	23/10/2012	102.800	40,05	19º
24	26/09/2012	66.500	15/10/2012	94.800	42,56	13º
25	01/10/2012	62.100	15/10/2012	91.600	47,50	10º
26	08/10/2012	68.600	23/10/2012	102.800	49,85	11º
27	15/10/2012	59.000	17/10/2012	66.000	11,86	DESPREZADO
28	15/10/2012	55.200	17/10/2012	75.500	36,78	3º

O Gráfico 3.22 é o resumo dos quarenta e dois (42) gráficos gerados pela Máquina para Ensaios de Materiais WOLPERT LESTOR / AMSLER e mostra o comportamento da força de aderência em função do tempo. O eixo vertical do gráfico representa o percentual de aumento da força de desmontagem (força de aderência) em comparação com a força de montagem e o eixo horizontal representa tempo decorrido entre a montagem e a desmontagem de cada um dos conjuntos roda-eixo.

Este gráfico mostra que, para todos os conjuntos, a força de desmontagem (força de aderência) é maior do que a força de montagem e que a força de desmontagem aumenta em função do tempo. Portanto, confirma a afirmativa de Mateos (1974, p. 301) de que a força de aderência de um ajuste prensado, entre peças de aço, aumenta com o tempo decorrido após montagem.

Além disso, foi possível confirmar que a taxa de aumento da força de aderência foi mais alta nos primeiros dias e diminuiu com o decorrer do tempo: no terceiro dia após montagem foi registrado um aumento de 40% e, embora com oscilações, o aumento total chegou a 56% no quadragésimo primeiro (41º) dia.

Gráfico 3.22 - Comportamento da força de aderência em função do tempo (1)



(1) Os números dos conjuntos estão ao lado dos pontos (2) Os pontos 7 e 27 foram desprezados.

Também, no gráfico em questão, pôde-se visualizar outro fenômeno: “as oscilações da força de aderência com os conjuntos montados e em repouso, mas submetidos permanentemente às tensões resultantes das respectivas interferências”. Com o objetivo de confirmar as oscilações, foram executados dois ensaios extras: um no quarto (4º) dia e outro no vigésimo sétimo (27º) dia. O ensaio extra, referente ao 4º dia, foi realizado com o conjunto nº 22 e confirmou o resultado da primeira oscilação. O ensaio extra, referente ao 27º dia, foi realizado com o conjunto nº 16 e confirmou o resultado da segunda oscilação.

3.4 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA

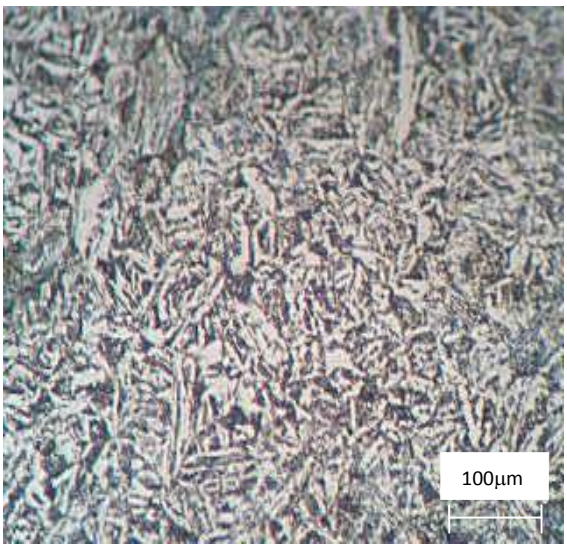
A Micrografia 3.1 mostra as imagens da superfície lateral da roda nº 15 antes de ser montada[5]: (a) micrografia de um ponto distante ≅ 1,2 mm do furo; (b) micrografia de um ponto distante ≅ 2,5 mm do furo; (c) micrografia de um ponto distante ≅ 3,0 mm do diâmetro externo da roda; (d) micrografia de um ponto distante ≅ 2,0 mm do diâmetro externo da roda.[6]

As imagens da amostra permitiram executar a comparação da morfologia do material entre as regiões laterais próximas ao furo e as regiões laterais próximas ao diâmetro externo da roda. Verificou-se que os grãos do material da roda estão um pouco mais reduzidos e alongados nas regiões próximas ao diâmetro externo da roda, que também pode ser explicado pelo processo de resfriamento do tarugo.

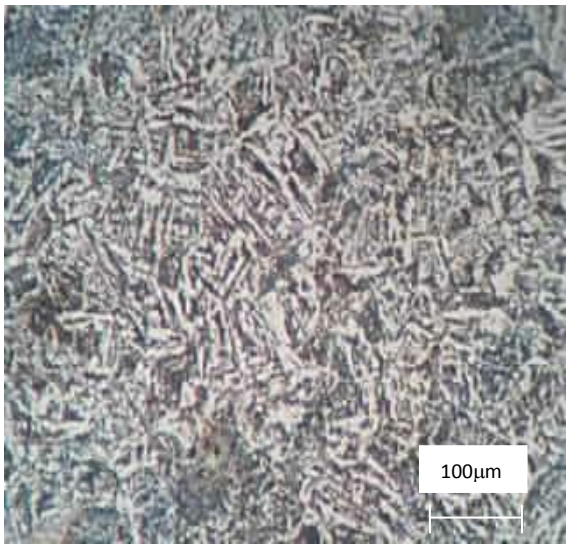
[5] Escolhida aleatoriamente entre as amostras com tempo de armazenamento entre 20 e 30 dias.

[6] (a) e (b) Distâncias medidas a partir da interseção do raio de concordância do furo com a superfície lateral da roda; (c) e (d) Distâncias medidas a partir do raio externo da roda.

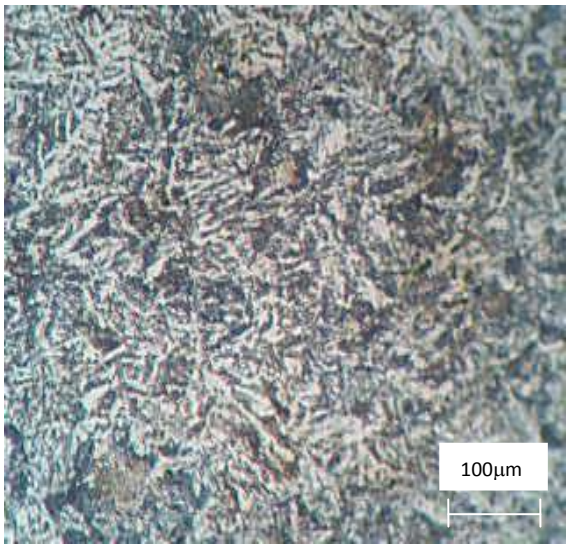
Micrografia 3.1 – Roda nº 15 (antes da montagem) 400X – Nital 2%



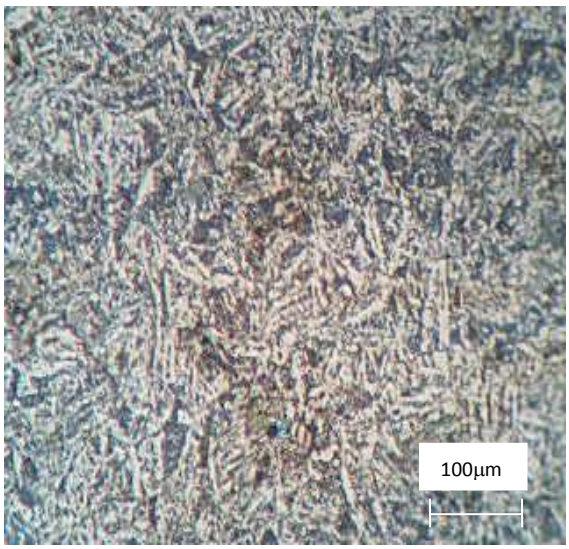
(a) próximo ao furo (≅ 1,2 mm)



(b) próximo ao furo (≅ 2,5 mm)



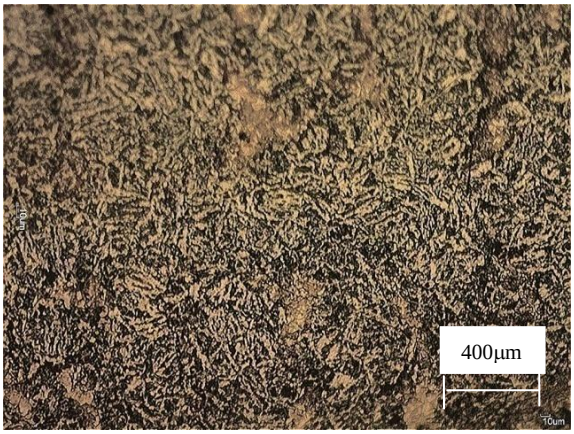
(c) próximo da superfície externa (≅ 3,0 mm)



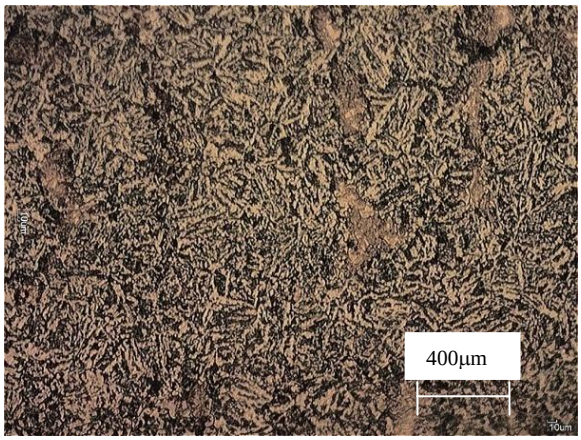
(d) próximo da superfície externa (≅ 2,0 mm)

A Micrografia 3.2 mostra as imagens da superfície lateral da roda nº 17, que foi desmontada no 41º dia após montagem[7]: (a) micrografia de um ponto distante ≅ 1,2 mm do furo; (b) micrografia de um ponto distante ≅ 2,5 mm do furo; (c) micrografia de um ponto distante ≅ 3,0 mm do diâmetro externo da roda; (d) micrografia de um ponto distante ≅ 2,0 mm do diâmetro externo da roda.[8]

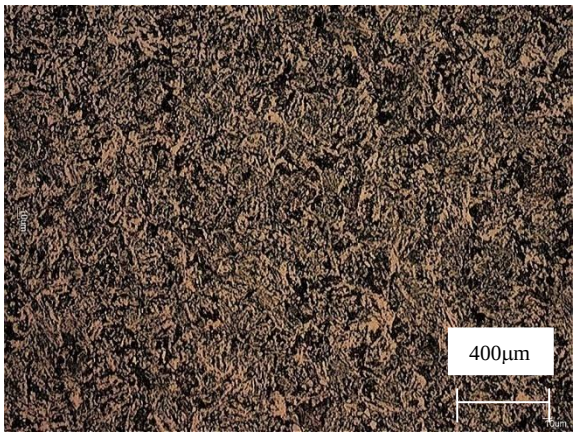
Micrografia 3.2 – Roda nº 17 (após desmontagem) 100X – Nital 2%



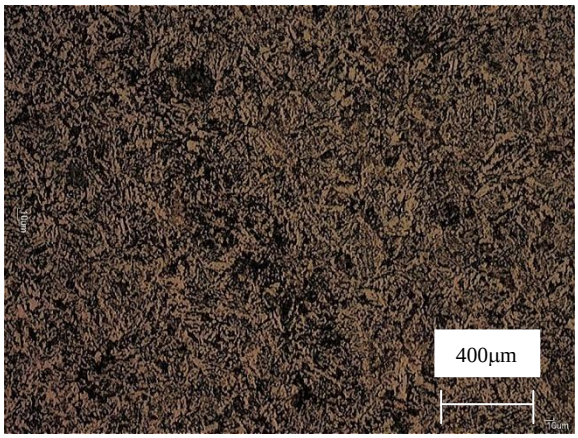
(a) próximo ao furo (≅ 1,2 mm)



(b) próximo ao furo (≅ 2,5 mm)



(c) próximo da superfície externa (≅ 3,0 mm)



(d) próximo da superfície externa (≅ 2,0 mm)

[7] Escolhida por ser a amostra com maior tempo de armazenamento.

[8] (a) e (b) Distâncias medidas a partir da interseção do raio de concordância do furo com a superfície lateral da roda; (c) e (d) Distâncias medidas a partir do raio externo da roda.

As imagens da amostra permitiram executar a comparação da morfologia do material entre as áreas próximas ao furo e as áreas próximas ao diâmetro externo da roda nº 17, cuja desmontagem foi realizada no 41º dia. De maneira idêntica à análise das imagens da Micrografia 3.1, cuja roda ainda não tinha sido montada, verificou-se que os grãos do material das rodas estão um pouco mais reduzidos e alongados nas regiões próximas à superfície externa da roda. Logo, a explicação também é a mesma, ou seja, pelo processo de fabricação do tarugo, onde o resfriamento do tarugo é mais rápido na superfície externa e mais lento na superfície interna.

Portanto, o exame das imagens microscópicas permitiu concluir que a tensão resultante da interferência na roda nº 17, que foi montada e submetida aos esforços da força de aderência, não provocou deformações permanentes nas regiões com distância maior do que 2,2 mm (raio de concordância do furo + 1,2 mm).[9]

3.5 DUREZA

O objetivo dos ensaios de dureza na roda nº 8 - amostra escolhida de modo aleatório - foi o de traçar o perfil de dureza da superfície lateral e apresentar sua variação no sentido radial, desde as regiões próximas à superfície de ajuste até as regiões próximas à superfície externa. Os ensaios foram executados nas regiões com distância superior ao valor do raio de concordância do furo. Os dados obtidos nos ensaios estão listados na Tabela 3.3.

[9] Distância medida a partir do raio do furo da roda.

Tabela 3.3 – Dureza da roda nº 8 – Carga = 30kgf

PONTO Nº	D mm	DIAGONAL 1 mm	DIAGONAL 2 mm	MÉDIA mm	DUREZA VICKERS
1	0,6	0,432	0,432	0,432	298
2	2,2	0,429	0,429	0,429	302
3	13,8	0,420	0,418	0,419	317
4	12,5	0,408	0,413	0,410	331

D = distância do ponto ao raio de concordância do furo;
DIAGONAL 1 $\Rightarrow$ sentido radial;
DIAGONAL 2 $\Rightarrow$ sentido tangencial.

Os resultados dos ensaios, apresentados na tabela acima, mostram que a dureza é maior nas regiões próximas à superfície externa da roda. Fato que pode ser explicado pelo processo de fabricação da matéria prima, ou seja, do processo de resfriamento do tarugo: mais rápido na superfície externa e mais lento na superfície interna.

Portanto, a análise dos resultados dos ensaios de dureza, em conjunto com a análise das micrografias das Micrografias 3.1 e 3.2, permitiu confirmar que a tensão resultante da interferência não provocou deformações permanentes nas regiões da roda com distância maior do que 1,6 mm (raio de concordância do furo + 0,6 mm).

O objetivo dos ensaios de dureza no eixo nº 10 - amostra escolhida de modo aleatório - realizados após a desmontagem, foi o de comparar a dureza da superfície de ajuste com a dureza da superfície que não entrou em contato com a superfície do furo da roda. Os dados obtidos nos ensaios estão listados nas Tabelas 3.4 e 3.5. Sendo:

DIAGONAL 1 $\Rightarrow$ sentido axial e DIAGONAL 2 $\Rightarrow$ sentido radial.

Tabela 3.4 – Dureza do eixo nº 10 – Carga = 5kgf (1)
(superfície de ajuste)

PONTO Nº	DIAGONAL 1 mm	DIAGONAL 2 mm	MÉDIA mm	DUREZA VICKERS
1	0,204	0,198	0,201	229
2	0,203	0,202	0,203	225

Tabela 3.5 – Dureza do eixo nº 10 – Carga = 5kgf (2)
(superfície externa ao ajuste)

PONTO Nº	DIAGONAL 1 mm	DIAGONAL 2 mm	MÉDIA mm	DUREZA VICKERS
1	0,211	0,209	0,210	210
2	0,214	0,212	0,213	204

Os resultados dos ensaios, apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5, mostram que a superfície do eixo, que foi submetida ao ajuste com interferência, apresenta uma dureza aproximadamente 10% maior do que a dureza da superfície que não entrou em contato com a superfície do furo da roda. Este fenômeno tem origem na deformação a frio executada pela tensão de compressão entre a roda e o eixo, cuja fundamentação teórica está detalhada no Item 1.4 – Figura 1.6.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados dos ensaios de montagem e de desmontagem dos conjuntos roda – eixo foi possível confirmar experimentalmente a afirmação de Mateos (1974, p. 301) de que nos ajustes prensados, entre peças de aço, a força de aderência aumenta após a execução da união das peças e que esta aumenta muito nos primeiros dias e segue aumentando, embora mais lentamente, com o decorrer do tempo.

Este fenômeno é de grande importância para o cálculo da interferência entre peças de aço, pois o aumento da força de aderência, que nesta pesquisa, em quarenta e um (41) dias de armazenamento, foi de cinqüenta e seis por cento (56%) da força de montagem, pode produzir níveis de tensões tangenciais que, em conjunto com pontos de concentração de tensões, como rasgos de chavetas, possam iniciar trincas que poderão resultar em fraturas. Outro ponto de grande importância está no alerta aos engenheiros que este fenômeno deve ser considerado nos estudos das causas prováveis de fraturas em engrenagens montadas em seus respectivos eixos, mas que ainda não foram postas em operação.

Além do aumento da força de aderência em função do tempo, os resultados dos ensaios também evidenciaram oscilações negativas nos percentuais do aumento. Portanto, para que a posta em marcha de um conjunto aconteça numa situação favorável, ou seja, fora das oscilações negativas evidenciadas no Gráfico 3.22, recomenda-se que para cada caso específico, com as suas particularidades – como dimensões e materiais – seja feito um estudo com objetivo de determinar o tempo de espera para a posta em marcha.

Dentro dos objetivos específicos foi possível concluir que o material da roda não sofreu deformação permanente que pudesse influir no aumento da resistência mecânica e, consequentemente, no aumento da força de aderência, pois não foram encontradas diferenças na microestrutura do material das regiões com raio maior do que 12,2 mm (raio de concordância do furo + 1,2 mm).

Também, dentro dos objetivos específicos, foi possível concluir que o pequeno aumento de aproximadamente 10% na dureza na superfície de ajuste do eixo, causado pela pressão de ajuste, não é capaz de influir significativamente no aumento da força de aderência.

5 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Este estudo mostra que o processo de montagem de peças de aço, com ajustes com interferência, ainda possui pontos importantes a serem estudados. Portanto, seguem algumas sugestões que podem ser temas para futuros trabalhos:

- Determinar as causas do aumento da força de aderência em função do tempo, em ajustes prensados;
- Estudar as oscilações da força de aderência, com o objetivo de determinar as suas causas;
- Realizar estudos com o objetivo de determinar o tempo de espera mínimo para a posta em marcha, de maneira a não coincidir com alguma das oscilações negativas da força de aderência;
- Pesquisar o comportamento da força necessária para iniciar o movimento de rotação, por meio de ensaios de desmontagem com forças tangenciais ao diâmetro externo;
- Estudar o comportamento da força de aderência em função do tempo, em ajustes forçados montados por meio do aquecimento e dilatação da peça externa.

6 REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, Oswaldo Luiz et al. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. 3ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1977.

ASHBY, Michael et al. **Materials engineering, science, processing and design**. 1st ed. Oxford, UK. Elsevier Ltd, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158**: sistemas de tolerâncias e ajustes. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NBM ISO 6507-1**: materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers – Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8404**: indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos. Rio de Janeiro, 1984.

CALLISTER JR, Willian D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2007. Comportamento da força de aderência em função do tempo (1)

DIETER, George E. **Metalurgia mecânica**. Tradução de Antônio Sergio de Sousa e Silva et al. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 1981.

FAIRES, Virgil Moring Faires. **Elementos orgânicos de máquinas**. Tradução de Humberto César Tavares Gonçalves e José Rodrigues de Carvalho. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1976, 2v.

HIBBELLER, R. C., **Resistência dos materiais**. Tradução de Joaquim Pinheiro Nunes da Silva. 5ª Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

LOPES, Osvaldo. **Tecnologia mecânica**: elementos para fabricação mecânica em série. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1983.

MATEOS, Abelardo Garcia. **Tolerâncias e ajustes**. Tradução de Augusto Câmara Neiva. 2ª ed. São Paulo: Editora Polígono S.A., 1974.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas:** uma abordagem integrada. Tradução de Maik Briscese Müller et al. 2ª ed. Porto Alegre: Artmed Editora S.A., 2004.

ANEXO A – Certificado de qualidade do aço ABNT 4340

TENAX
AÇOS ESPECIAIS

ISO 9001 BUREAU VERITAS Certification

UKAS

- Aços p/ Construção Mecânica
- Aços p/ Ferramentas
- Tubos Mecânicos
- Chapas de Aços

Tenax Aço e Ferro Ltda.
Trav. Leonor Mascarenhas, 101 - Ramos
CEP 21040-135 - Rio de Janeiro - RJ
Tel.: (21) 3865-4400 - Fax: (21) 3865-4422
qualidade@tenax.com.br
www.tenax.com.br
* Fundada em 1963 *

CERTIFICADO DE QUALIDADE / QUALITY CERTIFICATE N.º : 0022896232589

Cliente/Customer: SERMOLD - MECANICA INDUSTRIAL LTDA S0842

Pedido Cliente/Customer Order n.º: 757 | N/Pedido Interno/Our Reference Nº: 00200027

Nota Fiscal/Invoice n.º: 30002920 10/03/2011

Material/Specification: ACO SAE 4340 RED.

Dimensões/Dimensions: 3" x 2000mm | Quantidade/Quantity: 1 peca

Estado, Acabamento/Finish, Coat: LAMINADO / BRUTO

Tratamento Térmico/Heat Treatment:

Rastreabilidade Tenax/Trace Record n.º 0022896

COMPOSIÇÃO QUÍMICA/CHEMICAL COMPOSITION (%)

Corrida n.º/Heat n.º	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V
48353869	0.390	0.710	0.270	0.018	0.014	0.760	1.670	0.210		

Nb	Co	Al	Cu	Ti	Sn	B
		0.014	0.060	0.003	0.005	

PROPRIEDADES MECÂNICAS/MECHANICAL PROPERTIES

Ensaio de Tração/Tensile Test

Limite de Resistência/Tensile Strength (T.S.)	Limite de Escoamento/Yield Strength (Y.S)	Alongamento/Elongation Lo= %	Redução de Área/Reduction of Area %

Dureza/Hardness	Ensaio de Impacto/Impact Test						Dobramento/Bending Test	Temperabilidade/Hardenability
	Temp.	1.º	2.º	3.º	Média/Average	Tipo/Type		
321 HB	°C						º	

ENSAIOS METALOGRÁFICOS/METALLOGRAPHIC TESTS

Macrografia/Macrografy	Fratura Azul/Blue Fracture Test	Tamanho do Grão/Grain Size	Descarbonetação/Descarburization mm

Microinclusões/Microinclusions - ASTM-E-45								Óxidos/Oxides	Silicatos/Silicates	Estrutura/Structure
A		B		C		D				
Fino/Thin	Grosso/Thick	Fino/Thin	Grosso/Thick	Fino/Thin	Grosso/Thick	Fino/Thin	Grosso/Thick			

ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY/HARDENABILITY JOMINY TEST

Distância/Distance														
Dureza/Hardness (HRc)														

ULTRA-SOM/ULTRASONIC TEST:

ENSAIO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS/ MAGNETIC PARTICLE TEST:

Observações/Remarks:

Certificado emitido com autorização e garantia da Usina Siderúrgica/ This Certificate is issued and authorized with guarantee by the Steel Mill.

ANEXO B – Certificado de qualidade do aço ABNT 1045

TENAX
AÇOS ESPECIAIS

ISO 9001
BUREAU VERITAS Certification
N.º BR 227746

UKAS QUALITY MANAGEMENT

- Aços p/ Construção Mecânica
- Aços p/ Ferramentas
- Tubos Mecânicos
- Chapas de Aços

Trav. Leonor Mascarenhas, 101 - Ramos
CEP 21040-135 - Rio de Janeiro - RJ
Tel.: (21) 3865-4400 - Fax: (21) 3865-4422
qualidade@tenax.com.br
www.tenax.com.br

* Fundada em 1963 *

CERTIFICADO DE QUALIDADE / QUALITY CERTIFICATE N.º : 0024150257559

Cliente/Customer: SERMOLD - MECANICA INDUSTRIAL LTDA S0842

Pedido Cliente/Customer Order n.º: 1.661 | N/Pedido Interno/Our Reference n.º: 00215828

Nota Fiscal/Invoice n.º: 30013283 23/01/2012

Material/Specification: ACO SAE 1045 RED.

Dimensões/Dimensions: 1.1/4" x 2220mm | Quantidade/Quantity 1 peca

Estado, Acabamento/Finish, Coat: LAMINADO / BRUTO

Tratamento Térmico/Heat Treatment:

Rastreabilidade Tenax/Trace Record n.º: 0024150

COMPOSIÇÃO QUÍMICA/CHEMICAL COMPOSITION (%)

Corrida n.º/Heat n.º	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V
8095402	0.450	0.770	0.200	0.030	0.019	0.200	0.040	0.010		

Nb	Co	Al	Cu	Ti	Sn	B
			0.130		0.012	

PROPRIEDADES MECÂNICAS/MECHANICAL PROPERTIES

Ensaio de Tração/Tensile Test

Limite de Resistência/Tensile Strength (T.S.)	Limite de Escoamento/Yield Strength (Y.S)	Alongamento/Elongation Lo= %	Redução de Area/Reduction of Area %

Dureza/Hardness	Ensaio de Impacto/ Impact Test						Dobramento/Bending Test	Temperabilidade/Hardenability
	Temp.	1.º	2.º	3.º	Média/Average	Tipo/Type		
	°C						º	

ENSAIOS METALOGRÁFICOS/METALLOGRAPHIC TESTS

Macrografia/Macrografy	Fratura Azul/Blue Fracture Test	Tamanho do Grão/Grain Size	Descarbonetação/Descarburization mm

Microinclusões/Microinclusions - ASTM-E - 45								Oxidos/Oxides	Silicatos/Silicates	Estrutura/Structure
A		B		C		D				
Fino/Thin	Grosso/Thick	Fino/Thin	Grosso/Thick	Fino/Thin	Grosso/Thick	Fino/Thin	Grosso/Thick			

ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY/HARDENABILITY JOMINY TEST

Distância/Distance														
Dureza/Hardness (HRc)														

ULTRA-SOM/ULTRASONIC TEST:

ENSAIO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS/ MAGNETIC PARTICLE TEST:

Observações/Remarks:

Certificado emitido com autorização e garantia da Usina Siderúrgica/ This Certificate is issued and authorized with guarantee by the Steel Mill.

Data: 23 / 01 / 2012

APÊNDICE A – Posição final da montagem

APÊNDICE B – Esquema para desmontagem

APÊNDICE C – Desenho da roda

APÊNDICE D – Desenho do eixo

APÊNDICE E – Desenho do suporte