

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE DESGASTE DE PASTILHAS DE FREIO COM
UTILIZAÇÃO DE *SCANNER* TRIDIMENSIONAL A *LASER*

por

Fernando Medina

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 18 de Novembro de 2011.

METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE DESGASTE DE PASTILHAS DE FREIO COM
UTILIZAÇÃO DE *SCANNER* TRIDIMENSIONAL A *LASER*

por

Fernando Medina

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Co-orientadores: Prof. Fábio Pinto da Silva,
Prof. Patric Daniel Neis.

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza;

Prof. Dr. Rodrigo Rossi;

Prof. Dr. Flávio José Lorini.

Porto Alegre, 18 de Novembro de 2011.

de modo especial, a minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Departamento de Engenharia Mecânica e a todos os seus professores e colaboradores pela oportunidade de conquistar uma formação acadêmica de qualidade.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira*, pela criteriosa orientação ao longo deste trabalho.

Aos Professores *Fábio Pinto da Silva, Flávio José Lorini, Heraldo Amorim, Patric Daniel Neis, Arnaldo Ruben Gonzalez e Wilson Kindlein Júnior*, pelo auxílio e apoio no desenvolvimento deste trabalho, bem como de minha formação.

Aos colegas *George Zanetti, Guilherme Cortelini e Roberto Valentino Boeing*, pela ajuda nesta etapa acadêmica.

Às Funcionárias *Lara Elena Sobreira Gomes e Melina Dick*, pelo generoso auxílio em diversos momentos de minha formação.

Aos Laboratórios de Usinagem (GPFAI-UFRGS) e de Design e Seleção de Materiais (LdSM-UFRGS), pelo aprendizado proporcionado durante a realização de bolsas de Iniciação Científica em suas dependências, bem como pela disponibilização de seus equipamentos e operadores, necessários para a concretização desta etapa.

À empresa *Forjas Taurus S. A.*, por oportunizar a experiência adquirida através de estágio realizado em suas dependências.

À empresa *Fras-Ie*, pelo fornecimento de materiais para a efetivação deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos pelo constante incentivo, pelo apoio permanente e pela infinita compreensão durante toda a minha graduação.

MEDINA, F. A. O. **Metodologia para medição de desgaste de pastilhas de freio com utilização de *scanner* tridimensional a *laser***. 2011. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

O presente trabalho trata do estudo e aprimoramento de técnicas que auxiliem na medição e entendimento do desgaste proveniente da fricção em pastilhas de freio automotivas. O desgaste pode ser medido através da avaliação da perda de massa ou de espessura das mesmas. O objetivo é analisar a viabilidade de empregar uma metodologia de medição de desgaste de pastilhas utilizando como ferramenta a digitalização tridimensional a laser. Para tal, foram empregados corpos de prova que passaram por ensaios de frenagem realizados em um tribômetro e cujo desgaste foi avaliado pela técnica. Os resultados obtidos foram comparados aos obtidos através dos métodos da redução de massa e da medição 3D por apalpamento, o que validou a técnica como ferramenta viável para o propósito, já que apresentou resultados coerentes com os demais métodos além de proporcionar a vantagem de visualizar o perfil de desgaste e quaisquer outras imperfeições decorrentes do ensaio.

PALAVRAS-CHAVE: Pastilhas de freio, fricção, desgaste, digitalização tridimensional a laser.

MEDINA, F. A. O. **Methodology for measuring the wear of brake pads by using a three-dimensional laser scanner**. 2011. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

The present work is about the study and improvement of techniques to assist in the measurement and increased knowledge about the wear originated in the friction of automotive brake pads. The wear can be measured by evaluating the mass loss or thickness measurement. The objective here is to analyze the feasibility of employing a brake pad wear measurement method by using three-dimensional laser scanning as a tool. For that, probes were employed which were submitted to braking tests performed in a tribometer, the wear of which was evaluated with the aforementioned technique. The results obtained were put in contrast with those of mass loss and 3D probing measurement methods, which validated the technique as a viable tool for this purpose, since the results presented are consistent with those of the other methods besides having added the advantage of viewing the profile of wear and any other imperfections resulting from the test.

KEYWORDS: Brake pads, friction, wear, three-dimensional laser scanning.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Métodos utilizados na medição de desgaste em pastilhas de freio.....	2
3.1.1 Método da perda de massa	2
3.1.2 Método da medição 3D por apalpamento	2
3.1.3 Método da digitalização 3D a <i>laser</i>	3
4. METODOLOGIA	3
4.1 Corpos de prova.....	3
4.2 Ensaio de frenagem	4
4.3 Métodos para medição do desgaste.....	5
4.3.1 Método da variação de massa com umidade.....	5
4.3.2 Método da variação de massa sem umidade.....	5
4.3.3 Método da variação de volume através da medição 3D por apalpamento	6
4.3.4 Método da variação de volume através da digitalização 3D a <i>laser</i>	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
5.1 Da avaliação do desgaste pelo método da perda de massa com e sem umidade.....	9
5.2 Da avaliação do desgaste pelo método da medição 3D por apalpamento.....	10
5.3 Da avaliação do desgaste pelo método da digitalização 3D a <i>laser</i>	11
6. CONCLUSÕES	13
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXO I – Dados técnicos do apalpador 3D empregado no trabalho	15
ANEXO II – Dados técnicos das lentes do <i>scanner</i> 3D <i>laser</i> empregado no trabalho	16
APÊNDICE I – Altura dos CPs ponto-a-ponto, medido no apalpador 3D.....	17
APÊNDICE II – Tempo detalhado para cada Método de Avaliação	18

1. INTRODUÇÃO

O mercado de veículos automotores está entre os que mais crescem tecnologicamente. Neste segmento também estão inseridos os sistemas de freio, que desenvolvem um papel importante no que diz respeito à segurança dos usuários.

Devido a isso, os componentes que compõem este sistema, como por exemplo, os discos e pastilhas de freio, sofreram um gradativo aumento em seu nível de exigência para continuar cumprindo suas funções com eficácia. Quando o sistema de freio é acionado, transforma-se energia cinética em calor, o que provoca o aumento da temperatura dos componentes envolvidos, conforme mostrado na Figura 1.1, e conseqüentemente o desgaste.



Figura 1.1 – Aumento da temperatura do sistema de freios (a) em uso real; (b) em ensaio

Segundo Tristancho e Cañas, 2008, este nível de exigência do sistema de freios desencadeou um aumento das cargas impostas e uma diminuição das tolerâncias dimensionais admitidas nos processos de fabricação das pastilhas. É por este e outros motivos, que é de suma importância o estudo e aprimoramento de técnicas que auxiliem na medição do desgaste em pastilhas de freio.

Hoje em dia, a grande maioria dos ensaios de frenagem é realizada em dinamômetros inerciais. As medições de desgaste em pastilhas de freio, segundo a Norma ISO 26867, 2009, são realizadas através da avaliação da perda de massa ou de espessura das mesmas.

2. OBJETIVOS

Analisar a viabilidade de empregar uma metodologia de medição de desgaste de pastilhas de freio utilizando a digitalização tridimensional (3D) a *laser* como ferramenta.

Objetivos específicos:

- Realizar ensaio de frenagem em corpos de prova (CPs) em um tribômetro.
- Avaliar o desgaste destes CPs através da técnica de digitalização 3D a *laser*.
- Comparar esta técnica com outras com o intuito de validá-la como eficaz na medição de desgaste de pastilhas de freio automotivas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o alcance dos objetivos propostos foram necessárias pesquisas bibliográficas sobre os assuntos relacionados ao trabalho.

Conforme descrito por Kumar e Bijwe, 2010, um material de fricção utilizado na fabricação de pastilhas de freio é um compósito formado de liga de materiais cerâmicos e pequenos teores de metálicos. Quando variados tipo de metal e quantidade adicionada, acarreta mudança no desempenho destes materiais em se tratando de atrito e desgaste.

Segundo Kukutschova et al., 2010, nos processos de frenagem, acontece significativo atrito, que acarreta transformação de energia cinética em elevada geração de calor e consequente alteração da composição química da superfície de fricção, causando desgaste.

Blau e Jolly, 2005, afirmam que realizar testes de desgaste que simulem a realidade no uso de materiais de fricção em freios automotivos não é uma tarefa fácil, pois existe uma dificuldade de elaborar um único ensaio que simule as diversas condições de uso real de um automóvel.

Para Neis, 2008, ao realizar ensaios de frenagem, é desejável auxiliar na compreensão do comportamento do atrito e do desgaste dos materiais de fricção utilizados nos sistemas de freio. Assim, o equipamento utilizado deve operar com pressões de contato e velocidades de escorregamento semelhantes às presentes em condições reais.

3.1 Métodos utilizados na medição de desgaste em pastilhas de freio

Segundo Lee et al., 2007, a avaliação do desgaste pode ser realizada pela variação da massa ou da espessura do material de fricção.

3.1.1 Método da perda de massa

Para Lee et al., 2007, quando aplicado o método da avaliação do desgaste por perda de massa, existe uma precaução a ser considerada em relação à umidade. Como geralmente os materiais de fricção são higroscópicos, estes podem reter umidade e assim comprometer a análise, uma vez que esta massa de umidade pode ser da ordem de grandeza da variação de massa devido ao desgaste. Como metodologia para a avaliação do desgaste por perda de massa, o autor descreve simplesmente que deve ser realizada a pesagem do material antes e após o ensaio, com a ressalva de que, nos casos onde se almeja maior precisão, antes de cada pesagem, deve ser feita a remoção da umidade colocando o material em um forno.

Além do método por redução de massa, existem outros que podem ser utilizados, como por exemplo, os de digitalização tridimensional (3D), que permitem avaliar o desgaste pela variação do volume.

Silva, 2006, descreve que diversos sistemas de digitalização 3D estão disponíveis, sendo estes geralmente divididos em dois grupos: sistemas com contato, do qual fazem parte os medidores 3D de coordenadas por apalpamento; e os sistemas sem contato, no qual se inserem os sistemas de digitalização 3D a *laser*.

3.1.2 Método da medição 3D por apalpamento

Segundo Faro, 2007, este método consiste em um sistema de medição através de braços mecânicos ou eixos cartesianos. Estes equipamentos contam com um apalpador em sua extremidade, o qual deve ser deslocado pelo operador até que toque o ponto a ser registrado. O aparelho registra as coordenadas do ponto quando acionado pelo apalpador, situando-o em seu volume de controle. Este sistema é mais aplicável e útil para digitalização de peças com formas simples, onde poucos pontos são necessários.

As principais vantagens são a não dependência do material e da cor da peça a ser medida, a capacidade de mapear locais de difícil acesso e o baixo custo. Dentre as desvantagens estão a baixa precisão (entre 0,2 e 0,7 mm), a geração de conjuntos de pontos

em forma desordenada e a dificuldade de mapear a forma de superfícies quando registrado um baixo número de pontos [Freitas, 2006].

3.1.3 Método da digitalização 3D a *laser*

Segundo Silva, 2006, a digitalização 3D a *laser* é utilizada basicamente para captar imagens e dados em 3D, com o auxílio de ferramentas computacionais, permite obter com grande precisão, detalhes de superfícies, texturas e mesmo de objetos inteiros.

É um sistema de medição sem contato com a superfície. Possui um emissor de raio *laser* e um sensor inclinado 30° em relação ao feixe. O *laser* é emitido perpendicularmente à peça, sendo que os sensores se deslocam ortogonalmente à direção da emissão. Quando um sensor é acionado, estão definidos os parâmetros necessários para determinar a distância do emissor até a peça. A resolução está relacionada à possibilidade de captação de dois pontos distintos, logo, o diâmetro do feixe deve ser menor para uma maior precisão [Nikon, 2011].

As vantagens deste método são a pequena incerteza de medição (0,02 a 0,55 mm) e a obtenção, com boa organização e velocidade, de uma grande quantidade de pontos. Entretanto, a dependência de cor e acabamento superficial das peças, iluminação do ambiente, profundidade de aberturas e concavidades, além do custo mais elevado que o dos métodos com contato são as desvantagens [Freitas, 2006] e [Scan Technology, 2011].

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi avaliado o desgaste em corpos de prova (CPs) ensaiados em um tribômetro. O desgaste foi medido através da variação de massa ou volume, dependendo da aptidão do método de medição utilizado, sendo que foram empregados os quatro métodos listados abaixo:

- método da variação de massa com umidade;
- método da variação de massa sem umidade;
- método da variação de volume através da medição 3D por apalramento;
- método da variação de volume através da digitalização 3D a *laser*.

4.1 Corpos de prova (CPs)

Foram confeccionados quatro CPs, utilizando pastilhas de freio automotivas de dois materiais diferentes. A área de atrito com o disco foi usinada em formato cilíndrico e em duas medidas de diâmetro. Estes CPs são descritos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Descrição dos CPs

DENOMINAÇÃO	DESCRIÇÃO
A1	Material A, diâmetro 17 mm
B1	Material B, diâmetro 17 mm
A2	Material A, diâmetro 24 mm
B2	Material B, diâmetro 24 mm

Dois destes quatro CPs são mostrados na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Corpos de prova A1 e B2

A usinagem mencionada foi realizada para reduzir a área de contato com o rotor (disco) e assim obter um maior desgaste. Também para construir CPs que se adaptem ao tribômetro, já que segundo Neis, 2008, a área de contato dos CPs deve ser dimensionada de maneira a permitir que, em conjunto com o sistema aplicador da carga, estes tenham a capacidade de atingir pressões de contato similares às condições reais de frenagem.

4.2 Ensaios de frenagem

O tribômetro utilizado para testar os CPs, trata-se de uma bancada de teste experimental, localizada no Laboratório de Usinagem do Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (GPAI - UFRGS). Tal bancada, que foi desenvolvida por Neis, 2008, é mostrada na Figura 4.2.



Figura 4.2. - Tribômetro empregado no trabalho

Para Neis, 2008, uma das características desejáveis do tribômetro é o auxílio na compreensão do comportamento do atrito e do desgaste dos materiais de fricção utilizados nos sistemas de freio. Assim, o equipamento foi projetado para operar com pressões de contato e velocidades de escorregamento semelhantes às presentes em condições reais.

Para cada CP, realizou-se um ensaio que transcorreu da seguinte maneira: com a máquina em rotação inicial de 2300 RPM, iniciou-se a primeira frenagem. Para tal, aplicou-se uma pressão de maneira a manter a força de contato constante e igual a 1 kN, o que provoca

uma desaceleração de 250 RPM/s² e dura em média 9,2 s até a parada total. Devido às forças de atrito geradas pela fricção da pastilha contra o disco, a temperatura aumenta. Por este motivo, o sistema, através de um termopar instalado no disco, lê esta temperatura e automaticamente aciona a seguinte frenagem somente quando o disco atinge novamente o valor de temperatura inicial de 100 °C. E assim foram realizadas as sucessivas frenagens até atingir o número total de 400 para cada CP. Este número de frenagens foi definido com base em trabalhos anteriores onde foram realizadas 200 frenagens e o desgaste obtido foi menor que o definido como ideal para este trabalho. A Tabela 4.2, mostra os parâmetros utilizados no referido ensaio.

Tabela 4.2 – Parâmetros do ensaio de frenagem

Parâmetro	Valor	
Rotação Inicial	2300 RPM	
Rotação Final	0 RPM	
Desaceleração	250 RPM/s ²	
Temperatura Inicial	100 °C	
Área da Pastilha	227 mm ²	452 mm ²
Raio de Deslizamento	40 mm	
Força de Contato	1 kN	
Tempo Médio de Frenagem	9,2 s	
Quantidade de Frenagens	400	

4.3 Métodos para medição do desgaste

Os quatro métodos empregados são detalhados a seguir:

4.3.1 Método da variação de massa com umidade

Para realizar a avaliação através deste método foi realizada a pesagem dos CPs antes e após os ensaios, tanto para obter os valores de massa inicial como de final, cada CP foi colocado na balança o número de vezes necessário para obter a convergência do valor, em média 10 vezes.

4.3.2 Método da variação de massa sem umidade

A avaliação do desgaste através deste método passou pelas etapas já mostradas na seção 4.3.1. Porém com a ressalva de que imediatamente antes de cada pesagem foi necessário isentar os CPs de umidade, para tal, foi adotado o seguinte procedimento: primeiramente as peças foram levadas a um forno mantido na temperatura de 100 °C durante 24 horas. A seguir, as mesmas foram inseridas em uma câmara de vácuo, por mais 3 horas, equipamento através do qual, pelo seu funcionamento assim como pela presença de Sílica (material que retém umidade) conseguiu-se resfriar a peça até a temperatura ambiente evitando uma nova umidificação.

Para as pesagens realizadas foi utilizada uma balança Mettler Toledo PB3002, cuja incerteza é de 10 miligramas.

4.3.3 Método da variação de volume através da medição 3D por apalpamento

Este método de avaliação foi realizado utilizando um medidor 3D de coordenadas por apalpamento, modelo Mitutoyo QM-Measure 353, mostrado na Figura 4.3 e situado nas mesmas dependências em que se encontra o tribômetro.



Figura 4.3 - Apalpador 3D empregado no trabalho

No caso específico deste trabalho, apenas a altura da face de contato com o disco em relação à superfície superior da plaqueta de sustentação é de interesse para a avaliação do desgaste. Os pontos coletados na face de contato (numerados de 1 a 5) são mostrados na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Posições do CP onde foram efetuadas as medições

De posse destes cinco valores, o volume dos CPs, antes e após os ensaios de frenagem foi calculado matematicamente utilizando como valor de altura a média desses valores. Como valor do diâmetro, foi considerado o valor nominal de cada CP durante a usinagem destes. O valor do desgaste através da variação do volume foi obtido pela simples subtração do valor de volume final ao valor de volume inicial. A incerteza da medição de altura para este equipamento, em milímetros, conforme descrito por Taylor, 1997, pode ser calculada através da Equação 4.1.

$$I_h = \sqrt{(\Delta E)^2 + (\Delta R)^2} \quad (4.1)$$

onde I_h é a incerteza da medição de altura (mm), ΔE a exatidão e ΔR a repetibilidade.

A exatidão, fornecida pelo fabricante do equipamento, é dada pela Equação 4.2.

$$\Delta E = \frac{3 + 0,4 \cdot \left(\frac{h}{100}\right)}{1000} \quad (4.2)$$

na qual h é a altura do ponto medido (mm).

A repetibilidade, também descrita por Taylor, 1997, é calculada pela Equação 4.3.

$$\Delta R = \frac{S}{\sqrt{2}} \quad (4.3)$$

onde S é o desvio padrão das medidas efetuadas.

Também segundo Taylor, 1997, a incerteza do cálculo do volume pode ser calculada pela Equação 4.4.

$$I_V = \sqrt{\left(\frac{dV}{dD} \cdot I_D\right)^2 + \left(\frac{dV}{dh} \cdot I_h\right)^2} \quad (4.4)$$

na qual I_V é a incerteza da medição do volume (mm^3), V o volume (mm^3), D o diâmetro (mm) e I_D a incerteza da medição do diâmetro (mm).

Como o valor do diâmetro de cada CP foi considerado o nominal de fabricação, a incerteza do diâmetro é consequentemente considerada zero, já que este valor não foi medido pela máquina, o que permite reduzir a equação anterior conforme mostrado na Equação 4.5.

$$I_V = \sqrt{\left(\frac{dV}{dh} \cdot I_h\right)^2} = \frac{dV}{dh} \cdot I_h \quad (4.5)$$

4.3.4 Método da variação de volume através da digitalização 3D a laser

A avaliação do desgaste através deste método foi desenvolvida utilizando como ferramenta um scanner 3D a laser (Tecnodrill Digimill 3D / Optimet). Equipamento que pode ser encontrado nas dependências do Laboratório de Design e Seleção de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LdSM – UFRGS), mostrado na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Scanner 3D a laser empregado no trabalho

O equipamento, gera um feixe de *laser* que reflete na peça e retorna à fonte, através do tempo transcorrido, situa o ponto em seu espaço de trabalho. Para a digitalização dos CPs, foi gerado um ponto a cada 0,05mm (distância definida pelo usuário no equipamento) gerando uma nuvem de pontos.

Com o auxílio do *software* Geomagic Qualify 10, realizou-se a armazenagem, o processamento e a manipulação das nuvens de pontos. Assim, foi possível gerar superfícies virtuais e imagens dos CPs antes e após os ensaios. Realizando um comparativo destas superfícies virtuais foi possível ter uma primeira aproximação do desgaste, conforme mostrado na Figura 4.6, onde em cor azul aparece a superfície de contato do CP antes do ensaio, em cor vermelha a mesma superfície, porém após o ensaio e, o plano em cor laranja, que é um plano médio aos pontos da plaqueta da pastilha.

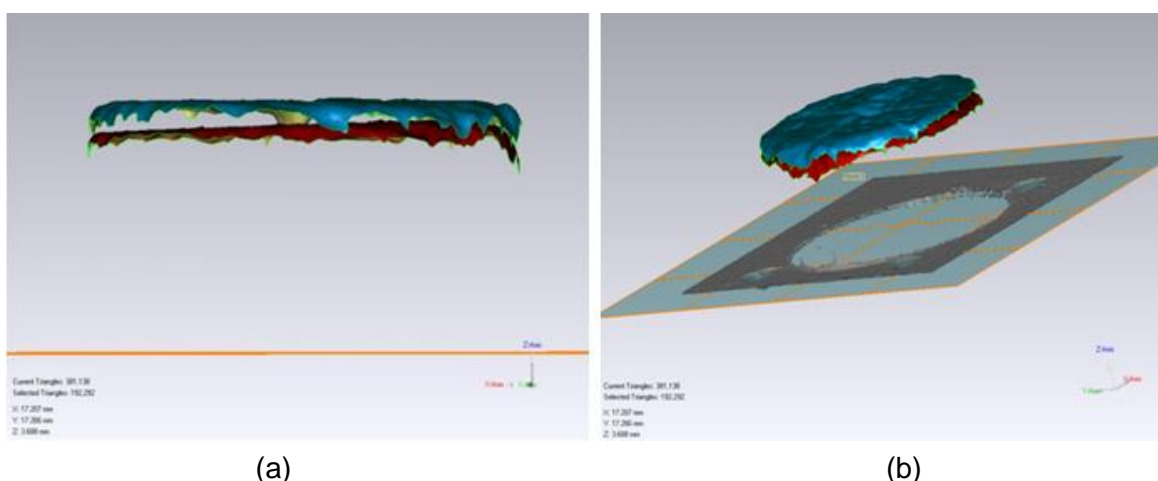


Figura 4.6 – Vista (a) lateral; (b) em perspectiva da superfície de contato antes e após o ensaio

O volume foi calculado através do próprio *software* Geomagic Qualify 10, projetando as bordas das superfícies azul e vermelha, mostradas na Figura 4.6, sobre o plano de referência e calculando o volume interno de cada uma, conforme mostra a Figura 4.7.

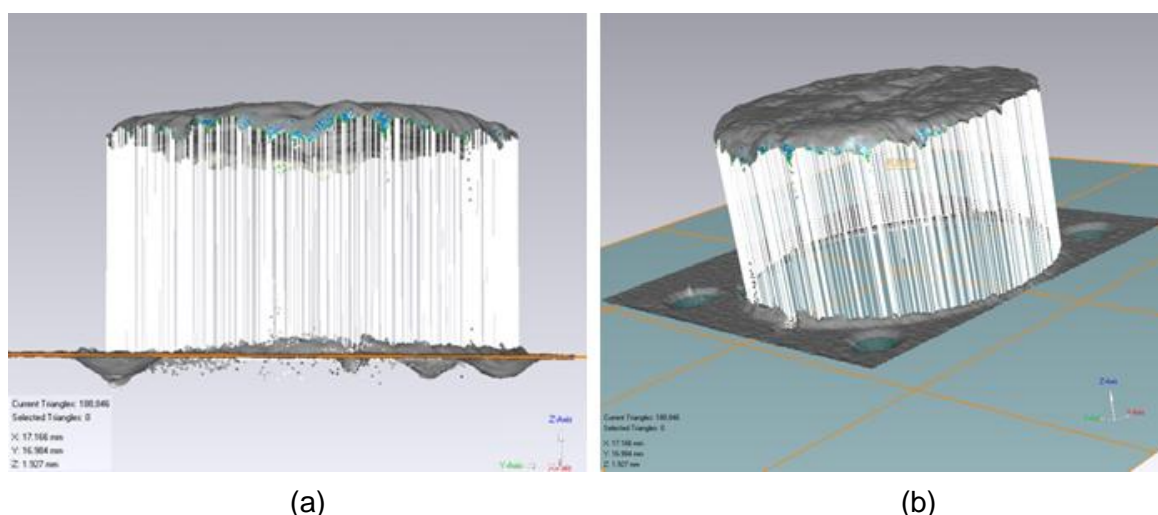


Figura 4.7 - Vista (a) lateral; (b) em perspectiva da projeção da superfície sobre o plano

Assim como no método anterior, o valor do desgaste através da variação do volume foi obtido subtraindo o valor de volume final do valor de volume inicial. Segundo o fabricante, a incerteza de medição do *scanner* utilizado é de 0,014 mm associado aos eixos horizontais X e Y (medição do diâmetro) e de 0,006 mm associado ao eixo vertical Z (medição da altura), quando utilizada, como no caso deste trabalho, uma lente de 50 mm. Com estes dados, foi

possível calcular a incerteza do cálculo do volume para este método, utilizando a Equação 4.5, já apresentada na seção 4.3.3.

Além das possibilidades já apresentadas, aliando as duas ferramentas, é possível realizar outras análises. A título de exemplo, foi isolada uma linha de pontos do plano da superfície de contato, mostrados em vermelho na Figura 4.8.a. Projetando-os em vista lateral, pode-se visualizar o perfil do desgaste para a direção da linha de pontos, conforme mostra a Figura 4.8.b.

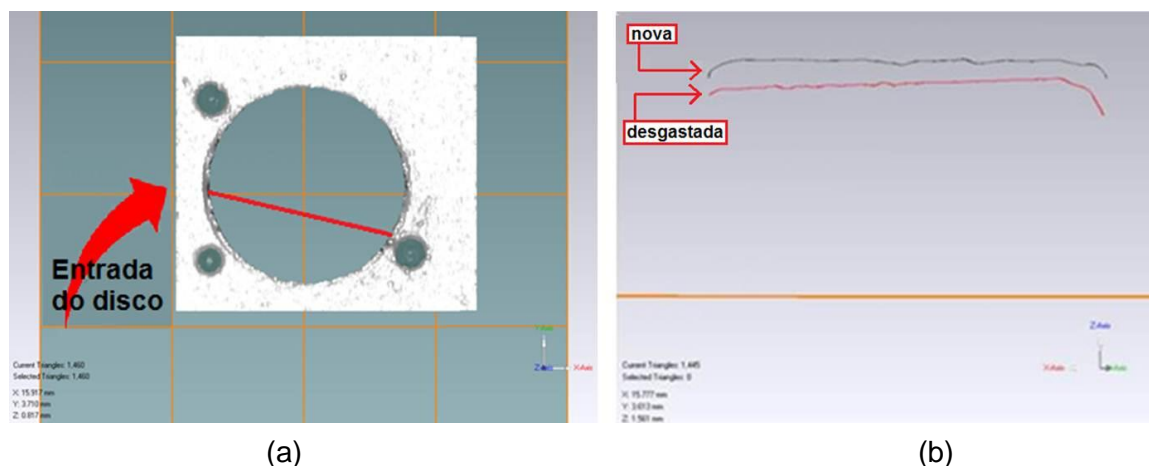


Figura 4.8 - Vista (a) superior; (b) lateral dos pontos isolados na superfície de contato

Observando a figura anterior, percebe-se que o plano da superfície de contato após o ensaio sofre inclinação. Isto se deve ao chamado “efeito de cunha”, que ocorre devido a um momento. Através da digitalização 3D a *laser* é possível observar essa “inclinação” do desgaste. Vale lembrar que esta análise pode ser realizada para quaisquer direções de pontos, caso ocorra qualquer imperfeição do tipo trincas, descontinuidades, ou delaminações geradas pelo ensaio, já que conforme regido pela Norma ISO 26867, 2009, qualquer fenômeno deste tipo deve ser relatado. Isto torna este método mais completo.

Todos os métodos tiveram seus tempos de execução cronometrados. Esta informação será utilizada em futuras comparações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Da avaliação do desgaste pelo método da perda de massa com e sem umidade

Os resultados obtidos nas etapas descritas nas seções 4.3.1 e 4.3.2, são ilustrados na Tabela 5.1, que mostra os valores de massa dos CPs antes e após os ensaios e a respectiva porcentagem (%) de redução, com e sem a influência da umidade.

Tabela 5.1 - Massa dos CPs antes e após os ensaios

CP	Umidade	Antes do Ensaio [g]	Após o Ensaio [g]	Incerteza [g]	Redução [%]
A1	Com	3,662	3,141	0,01	14,2
	Sem	3,603	3,085	0,01	14,4
B1	Com	3,782	3,689	0,01	2,5
	Sem	3,747	3,646	0,01	2,7
A2	Com	9,296	9,211	0,01	0,9
	Sem	9,213	9,132	0,01	0,9
B2	Com	10,269	10,207	0,01	0,6
	Sem	10,201	10,146	0,01	0,5

Observando os resultados da Tabela 5.1, verificou-se que os valores de massa obtidos com e sem a influência da umidade apresentaram resultados que diferem em no máximo 0,2%. Portanto, para estas dimensões de CPs, esta variável não apresentou influência significativa.

Foi possível observar também que o material dos CPs A1 e A2 oferece menor resistência ao desgaste quando comparado ao material dos CPs B1 e B2 respectivamente. Também notou-se que os CPs A1 e B1 sofreram um maior desgaste quando comparados aos CPs A2 e B2 respectivamente. Isto deve-se ao fato de que como a área destes primeiros foi reduzida, a pressão de contato entre pastilha e disco aumentou, já que a força aplicada durante o ensaio é constante e igual a 1kN. Este fenômeno é explicado por Shigley e Mishke, 2005, conforme mostrado na Equação 5.1.

$$w \propto p \cdot v \quad (5.1)$$

onde w é o desgaste (g), α significa proporcionalidade, p é a pressão de contato (N/mm²) e v a velocidade de rotação (RPM).

A causa disto, visando simplificar os cálculos e a comparação de resultados entre os métodos a serem utilizados nas próximas etapas, serão considerados apenas os CPs A1 e B1.

5.2 Da avaliação do desgaste pelo método da medição 3D por apalamento

Os resultados obtidos nas etapas descritas na seção 4.3.3, são ilustrados na Tabela 5.2, que mostra os valores de altura para os pontos 1 a 5, a respectiva média destas medições, os volumes inicial e final de cada CP com suas incertezas associadas, bem como o desgaste por redução de volume em porcentagem.

Tabela 5.2 – Volume dos CPs pelo método da medição 3D por apalramento

CP	Ponto	Altura antes do Ensaio [mm]	Incerteza [mm]	Altura após o Ensaio [mm]	Incerteza [mm]	Redução [%]
A1	1	9,815	0,003	8,795	0,003	10
	2	9,786	0,003	8,715	0,003	11
	3	9,643	0,003	8,686	0,003	10
	4	9,777	0,003	8,867	0,003	9
	5	9,783	0,003	8,531	0,003	13
	Média	9,761	0,003	8,719	0,003	11
	Volume [mm ³]	2215,5	0,689	1979,0	0,689	11
B1	1	9,211	0,003	8,897	0,003	3
	2	9,174	0,003	8,827	0,003	4
	3	9,153	0,003	8,799	0,003	4
	4	9,169	0,003	9,000	0,003	2
	5	9,211	0,003	8,718	0,003	5
	Média	9,184	0,003	8,848	0,003	4
	Volume [mm ³]	2084,5	0,689	2008,4	0,689	4

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.2 e as Figuras no Apêndice I, percebe-se que o desgaste apresentado pelo CP A1, de 11%, foi 7% maior que o apresentado pelo CP B1, de 4%. Resultado coerente com os encontrados pelo método da redução de massa.

5.3 Da avaliação do desgaste pelo método da digitalização 3D a *laser*

Os resultados obtidos nas etapas descritas na seção 4.3.4, são ilustrados na Tabela 5.3, que mostra os valores dos volumes inicial e final de cada CP - calculado pelo *software* Geomagic Qualify 10 - com sua incerteza associada, bem como a porcentagem de redução de volume.

Tabela 5.3 - Volume dos CPs pelo método da digitalização 3D a *laser*

CP	Volume antes do Ensaio [mm ³]	Incerteza [mm]	Volume após o Ensaio [mm ³]	Incerteza [mm]	Redução [%]
A1	2215,6	1,362	1944,3	1,362	12
B1	2084,4	1,362	2024,7	1,362	3

Observando os resultados da variação de volume dos CPs A1 e B1 apresentados na Tabela 5.3, verificou-se que o método da digitalização 3D a *laser* também apresentou resultados coesos quando comparado aos métodos anteriores. Reunindo os dados de porcentagem de desgaste e o tempo de execução cronometrado para cada método, melhor detalhado no Apêndice II, são ilustrados os comparativos mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Porcentagens de redução e tempo entre os métodos

MÉTODO	Redução [%]		Tempo [min]
	CP A1	CP B1	
Redução de Massa com Umidade	14	2	14
Redução de Massa sem Umidade	14	3	1626
Redução de Volume via Apalpador	11	4	66
Redução de Volume via <i>Laser</i>	12	3	76

Avaliando os resultados da Tabela 5.4, percebe-se que dentre os métodos de avaliação por massa, encontram-se os que possuem o menor e maior tempo de execução, sendo que este último depende de no mínimo 25 horas a mais quando comparado a todos os demais. Os métodos de avaliação por volume apresentaram tempos de execução muito próximos, sendo a diferença entre eles de apenas 10 minutos. Os resultados de porcentagem de redução podem ser mais bem visualizados graficamente na Figura 5.1:

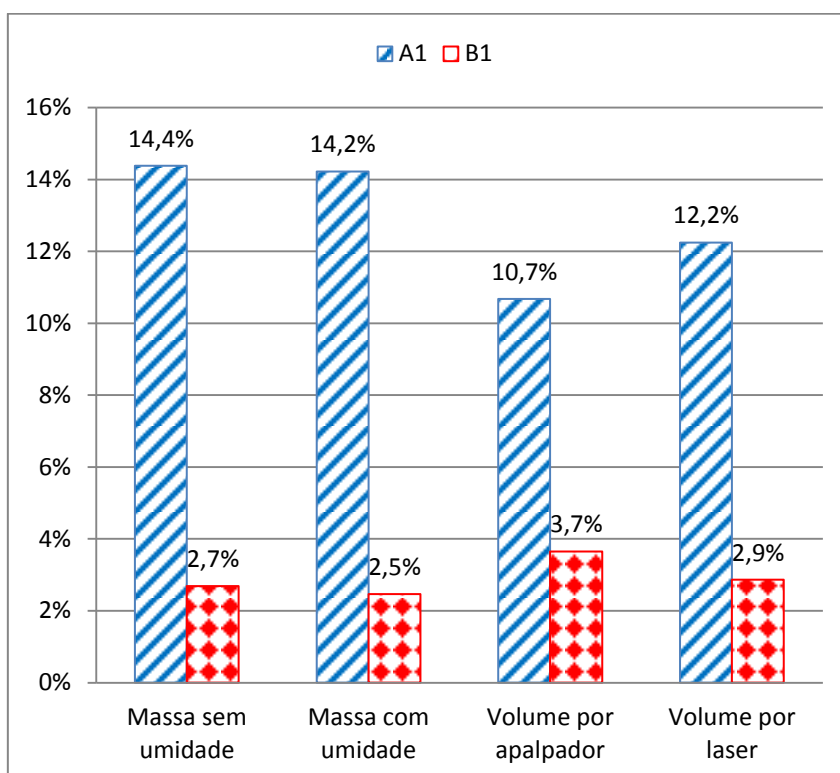


Figura 5.1 – Porcentagem de redução em função do CP e do método utilizado

Em relação ao gráfico anterior, percebe-se que dos valores de porcentagem de redução encontrados pelos quatro métodos, nenhum destoou muito dos demais, o que comprova uma coerência entre eles. Porém, o método da digitalização 3D *laser*, apresentou resultados mais próximos dos encontrados através dos por massa, quando comparados aos obtidos pela técnica através do apalpador.

6. CONCLUSÕES

Avaliando os resultados obtidos utilizando como ferramenta a digitalização 3D a *laser*, conclui-se que é viável medir o desgaste de pastilhas de freio empregando-a, pois os resultados seguiram a tendência dos obtidos pelos demais métodos.

Estes resultados também foram melhores que os obtidos pela medição 3D por apalpamento, quando comparados aos da redução por perda de massa.

Além disso, o emprego desta técnica possibilita a realização de análises distintas, como por exemplo, a visualização do perfil do desgaste ou quaisquer imperfeições do tipo trincas ou descontinuidades, fenômenos que devem ser relatados segundo a Norma ISO 26867, 2009. No método por contato isto é visto somente ponto a ponto e no método por massa é impossível de ser visto.

A referida técnica, também conta com maior grau de automação, sendo desnecessária a intervenção de operadores durante a obtenção dos pontos.

O método da medição 3D por apalpamento pode ser aprimorado obtendo um maior número de pontos, já que para o cálculo do volume utiliza-se a média destes.

Além disso, a área de contato da pastilha mostrou influência considerável no desgaste, já que este parâmetro é inversamente proporcional à pressão de contato.

Para os tamanhos de CP utilizados, a umidade não mostrou influência considerável, já que os métodos de avaliação por perda de massa com e sem umidade apresentaram resultados muito similares.

Em relação aos materiais dos CPs, o material do CP B1 oferece maior resistência ao desgaste quando comparado ao material do CP A1.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para futuros trabalhos realizados na área, sugere-se ensaiar os CPs variando mais os parâmetros, tais como materiais e área de contato das pastilhas.

Ao empregar a técnica de digitalização 3D a *laser*, digitalizar a totalidade da pastilha de freio, incluindo a área lateral (que não faz contato com o disco). Desta maneira, será possível verificar se essa região sofre deformações do tipo “abarrilamento”, além de dar ênfase à constatação das imperfeições que podem surgir devido ao ensaio (trincas, descontinuidades, etc.).

Ao empregar o método da variação de volume através da medição 3D por apalpamento, sugere-se a aquisição de um maior número de pontos para obter um valor de altura mais preciso, otimizando assim os resultados. Além disso, podem ser considerados os pontos obtidos na área lateral, também visando a verificação do possível “abarrilamento”.

Ao utilizar a técnica por massa sem umidade, pode-se estudar a redução do tempo de forno, já que a umidade não mostrou significativa relevância e que esta é a etapa que mais contribuiu para o maior tempo de execução desta técnica, conforme mostrado no Apêndice II.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blau P. J.; Jolly B. C.; **“Wear of truck brake lining materials using three diferente test methods”**, Wear 259, Páginas 1022-1030, 2005.

Faro Technologies Inc.; <http://www.faro.com>, acessado em 13/10/2011.

Freitas, G.; **“Metodologia e aplicabilidade de digitalização 3D a laser no desenvolvimento de moldes para calçados e componentes”**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ISO; **“Road vehicles - Brake lining friction materials - Friction behaviour assessment for automotive brake systems”**, ISO 26867, First edition, 2009.

Kukutschova J.; Roubiček V.; Mašlá ěnb M.; Jančik b D.; Slovák V., Malachovác K.; Pavličkovác Z.; Filip P.; **“Wear performance and wear debris of semimetallic automotive brake materials”**, Revista Wear 268, Páginas 86-93, 2010.

Kumar M.; Bijwe J.; **“Studies on reduced scale tribometer to investigate the effects of metal additives on friction coeficiente - Temperature sensitivity in brake materials”**, Revista Wear 262, Páginas 838-846, 2010.

Lee, K.; Blau P. J.; Truhan Jr. J. J.; **“Effects of moisture adsorption on laboratory wear measurements of brake friction materials”**, Revista Wear 262, Páginas 925–930, 2007.

Metris; <http://www.metris.com>, acessado em 13/10/2011.

Neis, P. D.; **“Projeto e construção de um tribômetro para estudos relacionados a materiais de fricção veiculares”**, 95 folhas, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Nikon Metrology NV; <http://www.nikonmetrology.com/>, acessado em 13/10/2011.

Scan Technology A/S, Denmark; <http://www.scantech.dk/>, acessado em 13/10/2011

Shigley, J. E.; Mishke, C. R.; **“Projeto de Engenharia Mecânica”**, Bookman, 7ª edição, 2005.

Silva, F. P.; **“O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos”**, 179 folhas, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

Taylor, J. R.; **“An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements”**, University Science Books, First edition, 1997.

Tristancho J. L.; Cañas L. A.; **“Diseño y construcción de un tribometro de cilindros cruzados, bajo norma técnica ASTM G83 - 96”**, Scientia et Technica Año XIV, Numero 38, Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.

ANEXO I - DADOS TÉCNICOS DO APALPADOR 3D EMPREGADO

Máquinas de Medir Coordenadas QM-Measure 353

Equipamento flexível e de fácil operação

- Equipamento compacto de design moderno e revolucionário, permite carregar e descarregar peças com facilidade.
- Possui sistema de compensação térmica (opcional) para uma faixa de temperatura de 15°C a 30°C que o torna ideal para trabalhar em chão de fábrica, recebimento de peças, entre outros.



QM 353

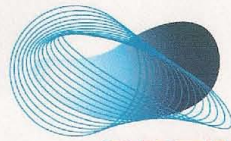


QM-Data 300

Modelo	Capacidade X : Y : Z mm	Exatidão Volumétrica*
QM 353	300: 500: 300	E = (3,0+4L/1000) μm

* Condições de temperatura 20 °C ± 1 °C com TP2

ANEXO II - DADOS TÉCNICOS DO SCANNER 3D LASER EMPREGADO



OPTIMET
optical metrology
Calibration Test Report

Customer: **TECNODRILL** Date: **05.08.2008** PREPARED BY:
Order Number: **4 2 1 3 0** S/N: **1 2 6 4 1** **E.KOMSKY**
Instrument type: **CONOPROBE 1000** P/N: **3Z21006**



Measured Laser Max. Power Output: Specification: <1mW	0.947
--	--------------

Lens Assembly	Minimum Working range	Precision	Reproducibility
50 mm	18 mm	PASS	PASS
150 mm	70 mm	PASS	PASS
250 mm	180 mm	PASS	PASS

Specifications

ConoProbe Technical Specifications	Lens Assembly Type (By Focal Length in mm)*															
	Standard										High Definition			Navitar		
	16	25	40	50	50 ext.	75	100	150	200	250	16	25	40	50	15N(1.5x)	20N(2.0x)
Z (Vertical) axis																
Static Resolution (µm)	<0.1															
Precision (µm)	<0.1															
Precision (µm) at 80%	**															
Reproducibility 1σ (µm)	<0.1	<0.4	<0.7	<1	<1	<2	<4	<15	<15	<15	<0.1	<0.2	<0.4	<0.5	<1.5	<1
Working Range (mm)	0.6	1.8	4	8	8	18	35	70	125	180	0.2	0.6	1.4	2	12	8
Standoff (mm)	12	15	40	42	85	65	90	140	185	240	11	14	37	40		
Measurement Aspect Ratio	**															
Lateral Axes (X and Y)																
Laser Spot Size (X) (appr.) (µm)	11	22	30	45	60	65	75	120	170	220	3.5	6	TBD	15	50	38
Lateral Resolution (X) (µm)	5	12	14	15	20	25	35	50			2	4	TBD	10		
Laser Spot Size (Y) (appr.) (µm)	**															
Weight																
Lens (g)	460	40	122	25	400	25	25	25	25	25	460	40	122	25	360	360
Probe (g)	700															
Control Box (g)	1200															
Data Handling																
Data Rate (pps)	850pps															
Macros	Macro commands are provided to automate similar measurements															
Export Data to:	Excel, ASCII text file, BMP, JPEG, UBM, VRML**															
Applications																
Precision for radius measurements (µm)	Relative to lens accuracy															
Angle measurement (°)	170°															
Working temperature (°C)	18 to 35°C															
Continuous shock resistance 245 ms/2-25g/6ms	>6000 shocks 6 directions															
Supply Voltage	82-265 VAC 50-60Hz															

(*) For any specific request about lens assembly please consult factory

- As measured on a flat diffusive metallic surface. Minimum sampling step 10 µm, average over 500 points in each scan. Measured over a step at least 50% of the working range. Entire working range has 2 times less accuracy. Reflective, fine-machined (N6) surfaces give approximately 2 times less precision. For static measurements or low speed, accuracy is 1.5-2 times less. For 16mm lens the step is 0.2mm.
- As measured on a flat diffusive metallic surface, average of 3 scans offset in "y" direction and use of macros. Minimum sampling step 10 µm, average over 500 points in each scan. Measured over a step higher than 50% of the working range. Entire working range has 2 times less reproducibility. Reflective, fine-machined (N6) surfaces give approximately 2 times less reproducibility. For static measurements or low speed, the error is 1.5-2 times more.
- The distance from the tip of the objective lens housing to the center of the working range. The tolerance of the standoff distance may deviate up to 10% of the stated value. In case of a system with a camera, the position of the center of the working range will shift accordingly, yet the definition and magnitude of the standoff is unchanged.
- Precision deviation as a function of WR (percentage) is included in the precision value. A step is measured along the working range in 5-6 places. Twice the max absolute value of the error of the step measurement in respect to the averaged measurement is allowed. The calculation is:

$$\frac{[Max (measurements errors over WR) - Min (measurements errors over WR)]}{WR} \leq L$$
, where L = 0.2% for all lenses, except for 16mm L = 0.5%.
- Spot size is the effective width for measurement that contains 50% of the energy delivered, as measured at the center of the working range.
- Estimation. From the measurement of the fine "record notch" pattern, at the center of the working range (lens focal distance) ±20% of the working range.
- In order to achieve accurate measurements over 120° of the arc must be covered (1/2R), and the sample must be larger than 1/4 of the working range on a diffuse surface (see note 1). Achievable only if a sufficient number of points in a circle profile will be taken, at least 50. Results are dependent on algorithm optimization.
- Up to 60° the precision is dependent on the typical precision of the lens used (at least 200 points scan, covering max. 80% of working range, on surface per note number 1), at 85° the tolerance is better than 0.5°.
- The unit is calibrated at 22-24°C. The probe has a calibration temperature dependence of 0.02%/°C and a dependence of 0.15% from the lowest to the highest laser power. Not including 16mm lens and 25mm lens. The temperature error within ± 2 degrees °C is included in the precision value. The calibration temperature dependence for lens 250mm is 0.07%/°C.
- The Z-resolution of the probe may be defined as follows. The smallest, reliable differential measurement that can be made by the ConoProbe system in its Z-axis.

$$Z\text{-Resolution} = \frac{2Rq}{\sqrt{N}}$$

$$Rq = \text{Standard deviation of raw data points accumulated during a static scan.}$$

$$N = \text{Number of data points gathered.}$$

The Rq "static noise" was assessed on a flat diffusive metallic surface in the center of the working range

(11) These values are correct in "no load" conditions.

Averaged data collection of N=100 points for each scan is calculated

8 Hartom st. P.O.B 45021, Jerusalem 91450, Israel
Tel: 972 2 5482900, Fax: 5865387
Website: www.optimet.com

T:\qa\qcl\סופית\ביקורת QC\probe\לקוחות\Customer Report\12641-TECNODRILL-42130.doc



APÊNDICE I - ALTURA DOS CPS PONTO-A-PONTO, MEDIDO NO APALPADOR 3D

Em linhas com marcadores, conforme mostrado na Figura 1.

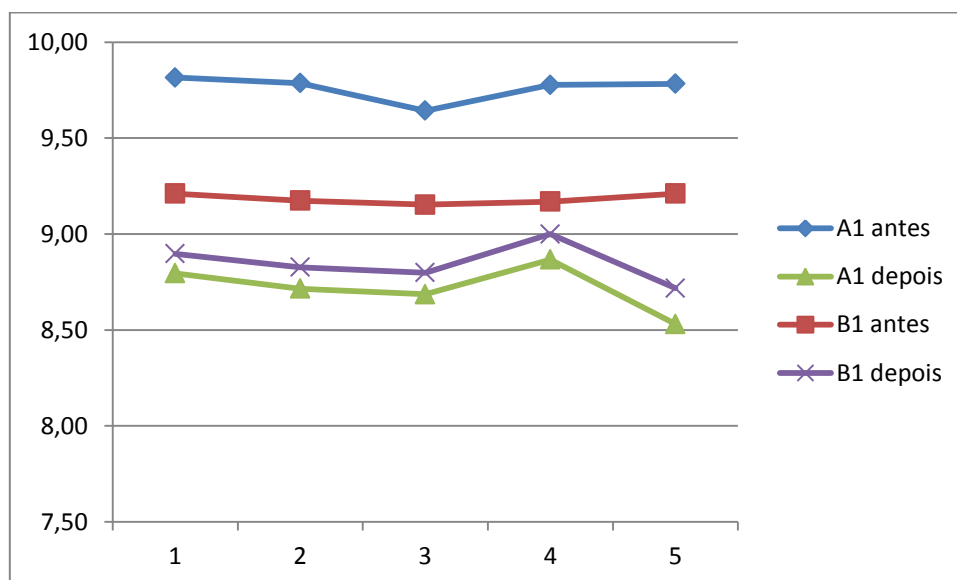


Figura 1 - Altura dos CPs ponto-a-ponto em linhas com marcadores

Em linhas Tridimensionais (3D), conforme mostrado na Figura 2.

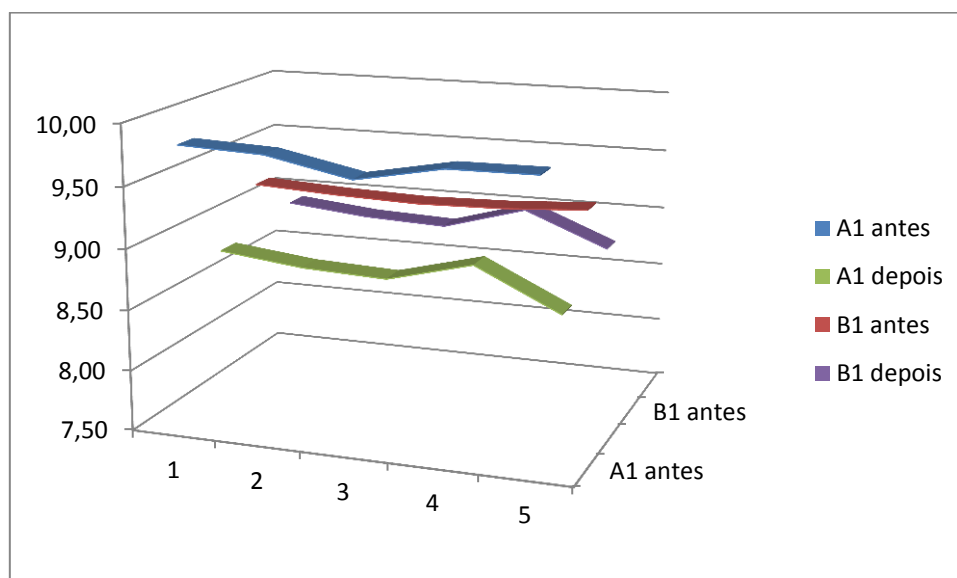


Figura 2 - Altura dos CPs ponto-a-ponto em linhas 3D

APÊNDICE II - TEMPO DETALHADO PARA CADA MÉTODO DE AVALIAÇÃO

Método	Etapa	Tempo por CP	Tempo p/ 2 CPs	Tempo Total [min]
Redução de Massa com Umidade	Preparação	2 minutos	2 minutos	14
	Pesagem	6 minutos	12 minutos	
Redução de Massa sem Umidade	Preparação	2 minutos	2 minutos	1626
	Forno	24 horas	24 horas	
	Câmara de Vácuo	3 horas	3 horas	
	Pesagem	2 minutos	4 minutos	
Redução de Volume via Apalpador	Preparação	6 minutos	6 minutos	66
	Medição de Pontos	30 minutos	1 hora	
Redução de Volume via Laser	Preparação	10 minutos	10 minutos	76
	Escaneamento	13 minutos	26 minutos	
	Process. Dados	20 minutos	40 minutos	