



ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO DA TEXTURA DE SUPERFÍCIES USINADAS, MEDIDAS COM APALPADORES ÓPTICO E MECÂNICO

Lourival Boehs

Universidade Federal de Santa Catarina
EMC-GRUCON – Caixa Postal 476 – Trindade
88040-900 – Florianópolis – SC – Brasil

Luciano Bet

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
CT-DEM – Caixa Postal 1657 – Lagoa Nova
59072-970 – Natal – RN - Brasil

Gustavo R. Mostiak

Universidade Federal de Santa Catarina
EMC-GRUCON

Cláudio R. R. de Almeida

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
CT-DEM

Resumo. *Muitas superfícies metálicas exigem um fino acabamento para que possam cumprir adequadamente sua função tecnológica. Superfícies de componentes ópticos e de dispositivos de medição com R_a (rugosidade média) variando de centésimos de micrometros a poucos nanometros são exemplos típicos. Nestes casos os problemas de medição se agravam e nem sempre pode ser utilizada a apalpação mecânica, pois as influências da geometria do apalpador e da força de medição podem causar uma grande distorção entre a textura (rugosidade e ondulação) da superfície real e os resultados de medição. Em alguns casos a maior fonte de problemas é o contato superfície/apalpador. Embora as sondas ópticas façam o perfilamento da superfície sem contato, surgem outros problemas: a influência das condições ambientais se acentua e a microgeometria da superfície associada ao seu índice de reflexão, podem levar a desvios consideráveis. Adicionalmente, a maior capacidade de penetração do apalpador óptico em reentrâncias não permite a comparação direta de resultados para todos os casos. Neste trabalho será apresentada uma comparação entre os resultados de medição da textura de algumas superfícies medidas mecanicamente e com apalpação óptica, bem como as razões para as diferenças apresentadas e um indicativo de aplicação de um e de outro instrumento.*

Palavras-chave: *Superfície, Medição de textura, Apalpador mecânico, Apalpador óptico*

1. INTRODUÇÃO

Rugosímetros com apalpadores mecânicos (estiletos) vêm sendo utilizados há mais de cinquenta anos (Whitehouse, 1994) e é inegável a sua grande flexibilidade e robustez para o uso industrial e científico. Por outro lado, o desenvolvimento de processos de fabricação que permitem a obtenção de superfícies com acabamentos muito finos evoluíram sensivelmente nos últimos anos, atingindo-se rugosidades médias (R_a) em torno de 1 nm (Schroeter & Weingaertner, 1999). Começam então a surgir problemas na medição da textura superficial destas superfícies com a apalpação mecânica.

A maioria das superfícies obtidas por processos de usinagem de ultraprecisão dependem essencialmente do controle da textura para desempenhar adequadamente sua função. Muitas destas superfícies são pouco resistentes ao riscamento e conseqüentemente não podem ser medidas por apalpação mecânica, uma vez que a pressão de contato entre apalpador e superfície fatalmente danificaria a mesma.

Existem hoje vários processos ópticos para medição da textura superficial, destacando-se (Whitehouse, 1994): interferometria, holografia, speckle, difratometria e perfilamento óptico. Destes o que mais se assemelha ao processo mecânico de apalpação é o perfilamento óptico, onde um feixe laser com o ponto focal mantido sobre a superfície (da mesma maneira que a ponta do apalpador mecânico) faz o papel de estilete. Nem todos os processos ópticos de medição da textura se prestam a avaliação de qualquer tipo de superfície é importante reconhecer os limites e as potencialidades deles antes de se decidir substituir a apalpação mecânica por um deles.

2. SISTEMAS DE MEDIÇÃO E PARÂMETROS DE TEXTURA

Cada processo de fabricação deixa a superfície resultante com características geométricas (textura) e mecânicas (integridade) inerentes e vários pesquisadores afirmam que a textura é a impressão digital do processo gerador da superfície (Mummery, 1992; Sander, 1989; Weingraber&Abou-Aly, 1989; Whitehouse, 1994). Além da relação entre o processo de fabricação e a textura, existe uma forte correlação entre o desempenho funcional e a textura de uma superfície técnica. A maneira usual de avaliar se uma superfície se adequa a uma função específica, considerando-se aqui o aspecto puramente microgeométrico, é quantificando sua textura através de parâmetros. A medição da textura superficial se baseia na avaliação de desvios em relação a uma geometria padrão, diferentemente da metrologia dimensional na qual se compara um comprimento, ou ângulo, com uma escala. Estes desvios são divididos em: verticais, horizontais, de inclinação e de forma, a partir dos quais se originaram os parâmetros de textura: verticais, horizontais, de inclinação, de forma e híbridos.

Os equipamentos de medição (rugosímetros) com estilete permitem a obtenção de todos os parâmetros, pois o processo de medição se baseia no perfilamento da superfície. No caso dos processos ópticos nem sempre é possível se obter todos os tipos de parâmetros, sendo muito comum somente a possibilidade de obtenção de alguns parâmetros verticais. Destaca-se então o uso do perfilamento óptico, o qual difere do mecânico somente pelo meio físico utilizado para a apalpação. Existem também sistemas ópticos/digitais que fazem um mapeamento tridimensional da superfície e conseqüentemente permitem qualquer tipo de análise, porém são muito caros e de uso limitado a laboratórios. Neste trabalho, o baixo custo relativo e a versatilidade no uso foram os fatores motivadores para adoção da sonda óptica no teste comparativo entre os resultados obtidos na medição da textura superficial com e sem contato.

3. RUGOSÍMETRO, SONDAS MECÂNICAS E SONDAS ÓPTICAS

3.1 Rugosímetro

O princípio básico de funcionamento de um rugosímetro de bancada convencional é o mesmo, independentemente do tipo de apalpador utilizado. A sonda percorre a superfície na sua direção geral (geralmente horizontal) e o apalpador, devido às irregularidades, sofre simultaneamente um deslocamento vertical. Através de um sistema de transdução estes deslocamentos relativos são transformados em sinais elétricos que, depois de amplificados e filtrados, são digitalizados e armazenados como pontos na forma de coordenadas xy. Este conjunto de pontos pode ser tratado matematicamente, determinando-se os vários parâmetros de textura e graficamente, com a emissão dos perfis de rugosidade e de ondulação. Embora os perfis sejam muito importantes na análise da textura, não se pode esquecer que eles são uma representação bidimensional da superfície, que é tridimensional e que são exibidos com escalas de ampliação verticais e horizontais muito diferentes, portanto as conclusões obtidas de sua observação devem ser analisadas com cautela (Whitehouse, 1994).

3.2 Sonda com apalpador mecânico

Na Fig. 1 (Sander, 1989) é apresentado um esquema de uma sonda com apalpador mecânico. O estilete possui uma ponta cônica de diamante com 90° e raio de ponta da ordem de $5 \mu\text{m}$, a força de medição fica em torno de 80mN (Sander, 1989; Perthen, 1990). O transdutor é do tipo indutivo, comumente encontrado em sondas mecânicas. Na Fig. 2 (Bodschwinna & Hillmann, 1992) é apresentada a ponta de um estilete sobre uma superfície.

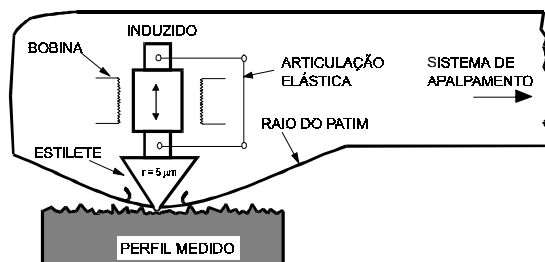


Figura 1. Esquema de uma sonda com apalpador mecânico e transdutor indutivo.

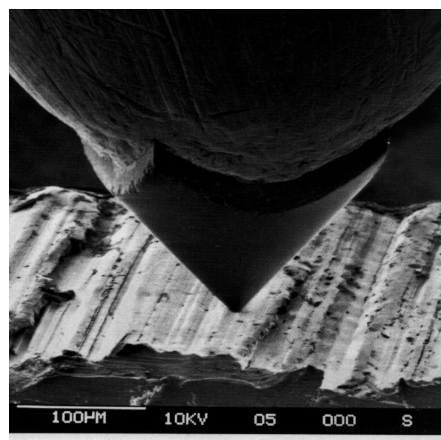


Figura 2. Ponta de um estilete sobre uma superfície.

3.3 Sonda óptica

Na Fig. 3 é apresentado um esquema de uma sonda óptica (Mahr-Perthen, 1990). O feixe de luz produzido no diodo laser passa por um circuito óptico que o divide em duas partes, uma vai até o detector e outra atinge a superfície medida, sendo então refletido e retornando para o circuito óptico, indo também atingindo o detector. Os dois feixes são então comparados, surgindo um sinal de erro caso o foco não esteja exatamente na superfície. Este erro gera um sinal de compensação que movimenta o braço de medição. Este movimento é transformado num sinal elétrico e a partir daí tudo se passa como na sonda mecânica. As principais diferenças entre os métodos mecânico e óptico são: ausência de contato e maior capacidade de penetração do apalpador óptico nas reentrâncias dos perfis. O feixe óptico tem um diâmetro médio de $1\mu\text{m}$ (Perthen, 1990) contra um raio da ponta do cone do estilete de $5\mu\text{m}$.

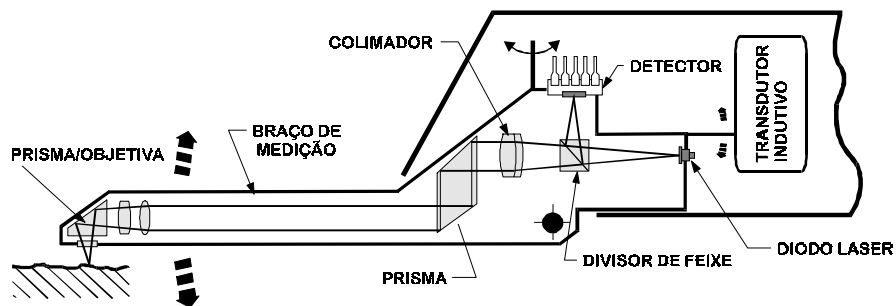


Figura 3. Esquema de sonda óptica modelo FOCODYN da Mahr-Perthen.

3.4 Comparações

A sonda mecânica (SM) é mais robusta e aplicável em praticamente qualquer ambiente industrial. A sonda óptica (SO) possui alguns limites, principalmente quanto à limpeza da superfície medida e quanto ao nível de vibração local. A SO penetra mais nas reentrâncias superficiais, reproduzindo a superfície com mais fidelidade. Entretanto, existem dados coletados durante mais de meio século com SM, os quais exigem análise apurada antes de se partir para comparações diretas, ou seja, não é recomendado se descartar peças medidas com SO que estejam com rugosidades superiores às de projeto se as especificações foram feitas para medição com SM. Superfícies macias e com acabamentos de alta qualidade, como as obtidas em espelhos de cobre e de alumínio, são vulneráveis ao riscamento quando medidas com SM. Com a SO este problema não existe. Praticamente qualquer tipo de peça pode ser medida com os inúmeros modelos de SM existentes no mercado. Devido aos limites impostos pelas dimensões do circuito óptico algumas localizações em peças mais complexas não podem ser medidas com uma SO. Atualmente a recomendação de substituição da SM pela SO é feita somente em duas situações: superfícies vulneráveis ao riscamento pela SM ou superfícies extremamente agressivas à ponta do apalpador mecânico, a exemplo de cerâmicas porosas e rebolos abrasivos.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Corpos de prova

Foram selecionados como materiais para os corpos de prova (CP): aço inoxidável SAE 316, aço ABNT 1045, cobre eletrolítico e alumínio. A escolha dos aços baseou-se no seu

ampla espectro de utilização industrial. O cobre e o alumínio foram escolhidos para comparação entre os efeitos do estilete sobre essas superfícies e as superfícies dos aços. Todos os CP possuíam a forma cilíndrica ($\phi = 25 \text{ mm} \times H = 10 \text{ mm}$), sendo medida a parte plana de cada um deles. Na Tabela 1 são listados as quantidades de cada CP, o respectivo processo de usinagem da superfície avaliada e o número de medições por CP.

Tabela 1. Dados construtivos e de medição dos corpos de prova.

Material	Processo de usinagem	Quantidade de CP	Medições por CP
ABNT 1045	Retificação plana	20	10
ABNT 1045	Polimento	10	10
SAE 316	Faceamento	29	8
SAE 316	Polimento	10	10
Cobre eletrolítico	Polimento	10	20
Alumínio	Polimento	10	20

4.2 Parâmetros de textura medidos e procedimento de medição

Foram medidos dezesseis parâmetros diferentes. Destes foram selecionados para apresentação neste trabalho os três parâmetros verticais mais utilizados mundialmente: rugosidade média aritmética R_a (ISO 4287, 1997), profundidade média do perfil R_z (DIN 4768, 1990) e altura total do perfil R_t (ISO 4287, 1997).

A medições foram feitas em duas etapas, primeiro com a sonda mecânica e depois com a sonda óptica. Os CP polidos são isotrópicos e foram medidos sem preocupação com direções preferenciais. Os CP faceados são anisotrópicos e foram medidos segundo a direção radial, ou seja, com os maiores valores de rugosidade R_a , R_z e R_t . Os valores de cut-off (λ_c) utilizados foram selecionados segundo recomendação da norma ISO 4288 (1996). O sistema era calibrado a cada mudança de tipo de CP ou de tipo de apalpador.

4.3 Equipamentos

Todas as medições foram executadas em um rugosímetro de bancada S8P da Mahr-Perthen, com uma unidade de avanço do tipo PRK do mesmo fabricante. As sondas utilizadas foram: RHT 6-50 Mahr-Perthen (mecânica) e FOCODYN Feinprüf-Perthen (óptica). As calibrações foram feitas com um padrão de rugosidade PGN1 da Mahr-Perthen, devidamente rastreado. Para as fotos das superfícies (Fig. 4) foi utilizado um microscópio de varredura eletrônica. Os dados coletados foram tratados estatisticamente em um microcomputador padrão PC 486DX2 66MHz, com auxílio da planilha EXCEL da Microsoft.

4.4 Tratamento dos dados

Para cada conjunto de medições feita por CP o equipamento emitia um protocolo com o valor médio dos parâmetros e pelo menos um protocolo gráfico com um dos perfis de rugosidade captados. Em cada conjunto de medições foram observados os valores individuais dos parâmetros, garantindo que não fossem computados nas médias valores atípicos. Os dados assim coletados foram armazenados em planilhas, nas quais foram calculados os valores médios, os desvios padrão e as incertezas (Link, 1997) de R_a , R_z e R_t por tipo de CP e por tipo de sonda. Os resultados destes cálculos estão elencados na Tabela 2 da próxima seção.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tabela 2. Valores médios, desvio padrão (*s*) e incerteza devido a dispersão da média (*I*) de R_a , R_z e R_t para cada tipo de corpo de prova e para cada tipo de sonda, RHT 6-50 (mecânica) e Focodyn (óptica).

Corpo de Prova	RHT 6-50			Focodyn		
	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)
	<i>s</i> (μm)	<i>s</i> (μm)	<i>s</i> (μm)	<i>s</i> (μm)	<i>s</i> (μm)	<i>s</i> (μm)
	$\pm I$ (μm)	$\pm I$ (μm)	$\pm I$ (μm)	$\pm I$ (μm)	$\pm I$ (μm)	$\pm I$ (μm)
ABNT 1045 retificado 20 CP	0,169	1,385	1,855	0,442	4,061	4,888
	0,016	0,083	0,269	0,012	0,258	0,498
	0,008	0,039	0,126	0,006	0,121	0,234
ABNT 1045 polido 10 CP	0,008	0,052	0,094	0,038	0,375	0,732
	0,001	0,008	0,013	0,006	0,063	0,147
	0,001	0,006	0,009	0,004	0,045	0,104
SAE 316 faceado 29 CP	1,11	6,33	7,45	1,31	9,409	10,99
	0,38	1,98	2,33	0,33	2,18	2,26
	0,14	0,75	0,89	0,13	0,83	0,85
SAE 316 polido 10 CP	0,002	0,014	0,021	0,013	0,100	0,142
	0,000	0,003	0,005	0,001	0,008	0,010
	0,000	0,002	0,004	0,001	0,006	0,008
Cobre eletrolítico polido 10 CP	0,005	0,026	0,038	0,024	0,188	0,269
	0,001	0,002	0,004	0,002	0,019	0,042
	0,001	0,002	0,004	0,002	0,022	0,163
Alumínio polido 10 CP	0,004	0,035	0,056	0,023	0,183	0,262
	0,000	0,004	0,008	0,002	0,013	0,017
	0,000	0,005	0,009	0,002	0,015	0,020

Para todos os CP observa-se que os valores médios de rugosidade R_a , R_z e R_t são maiores para as medições com a SO, confirmando a maior capacidade de penetração do feixe óptico nas reentrâncias dos perfis. Outro efeito resultante é o maior desvio padrão também apresentado pelos dados obtidos com a SO, excetuando-se apenas os CP dos aços ABNT 1045 retificado e SAE 316 faceado, que também possuem os maiores valores médios de rugosidade. Nestes dois casos preponderam os desvios de 3ª ordem (geometria da aresta da ferramenta, avanço e profundidade de corte) sobre os de 4ª ordem (processo de remoção do cavaco). Isto minimizou o efeito da penetração mais profunda do feixe óptico e conseqüentemente diminuiu a dispersão.

A incerteza da média, Eq. (1), foi bastante aceitável não só para R_a , que é pouco dispersivo, como também para R_z e R_t . Este último bastante dispersivo.

$$I = \pm \frac{t_{95\%} \times s}{\sqrt{n}} \quad (\mu\text{m}) \quad (1)$$

Optou-se por comparar os dados fazendo-se a razão percentual entre os valores médios de rugosidade R_a , R_z e R_t obtidos com a sonda óptica e com a sonda mecânica. Os resultados assim obtidos estão elencados na Tabela 3.

Tabela 3. Razão percentual entre os valores médios de R_a , R_z e R_t medidos com sonda óptica e com apalpador mecânico.

Corpo de prova	$\frac{R_a^{opt.}}{R_a^{mec.}} \times 100$ (%)	$\frac{R_z^{opt.}}{R_z^{mec.}} \times 100$ (%)	$\frac{R_t^{opt.}}{R_t^{mec.}} \times 100$ (%)
ABNT 1045 retificado	261	293	264
ABNT 1045 polido	475	721	779
SAE 316 faceado	118	149	148
SAE 316 polido	650	714	676
Cobre eletrolítico polido	480	723	708
Alumínio polido	575	523	468

Não houve variação significativa entre as razões de R_a , R_z e R_t para um mesmo tipo de CP, exceto no caso do cobre eletrolítico polido. Neste caso a superfície é mais facilmente riscável pelo estilete, causando um efeito de alisamento no perfil de rugosidade e diminuindo os valores de R_z e R_t obtidos com a sonda mecânica, o que acentuou a razão entre eles e os valores obtidos com a sonda óptica. Tal efeito é menos significativo para R_a . Na Fig. 4 é apresentada uma comparação entre o efeito do estilete sobre o CP de cobre polido e sobre o CP de aço SAE 316 também polido.

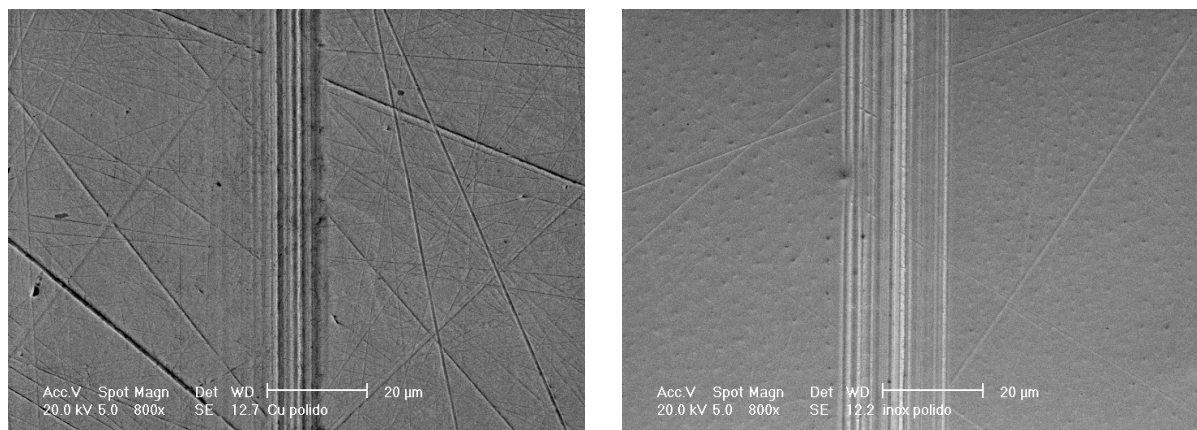
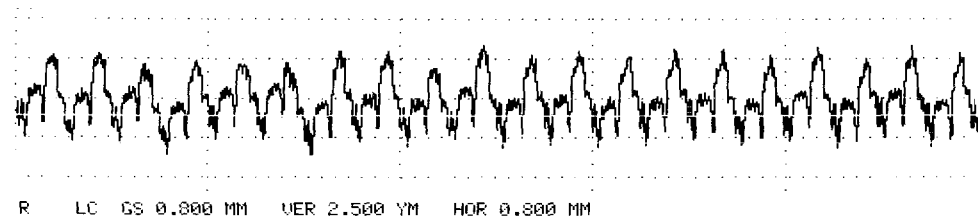
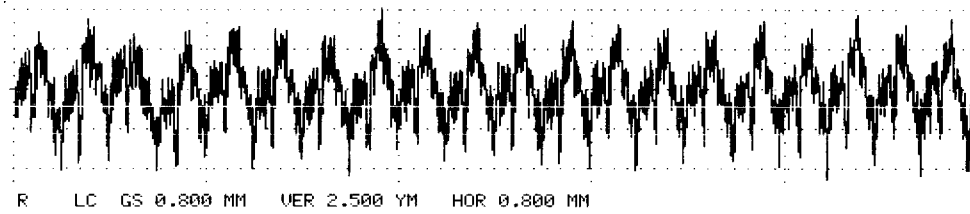


Figura 4. Detalhe de superfícies medidas com apalpação mecânica. A esquerda CP de cobre eletrolítico polido com marcas bastante profundas do estilete e a direita CP de aço SAE 316 polido levemente riscado.

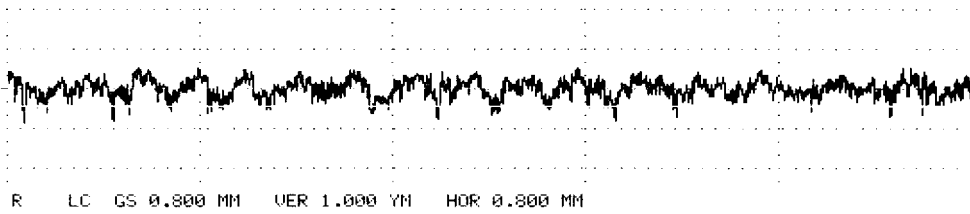
Os CP de aço SAE 316 faceados foram os que apresentaram as menores discrepâncias entre os resultados obtidos com a SO e com a SM. Também aqui se nota a preponderância dos efeitos dos desvios de 3ª ordem sobre os de 4ª ordem, com a minimização dos efeitos causados pela diferença entre a varredura óptica e mecânica. Em oposição, as superfícies polidas apresentaram as maiores razões percentuais entre todas, exatamente pelo fato das pequenas reentrâncias deste tipo de superfície não serem acessíveis à ponta do estilete, mas somente ao feixe óptico. Os corpos de prova de aço ABNT 1045 retificados possuem um perfil intermediário entre os faceados e os polidos e como já esperado, apresentaram resultados intermediários para as razões entre os dados coletados opticamente e mecanicamente. Na Fig. 5 são apresentados perfis de rugosidade de um CP faceado, um retificado e um polido, medidos com SO e com SM.



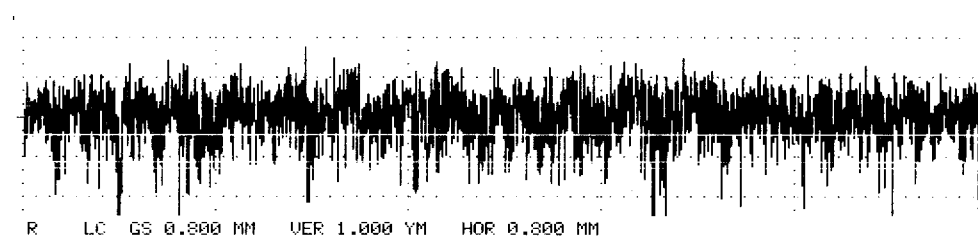
SAE 316
Faceado
RHT 6-50



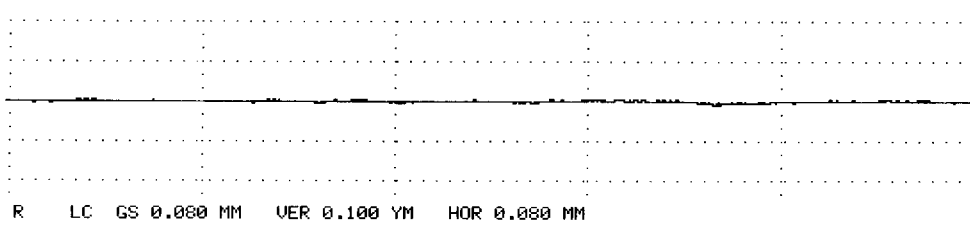
SAE 316
Faceado
Focodyn



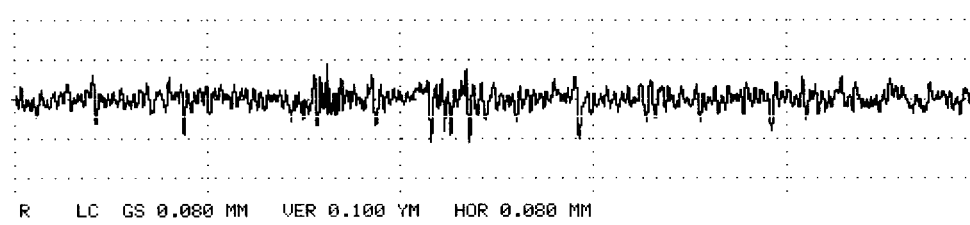
ABNT 1045
Retificado
RHT 6-50



ABNT 1045
Retificado
Focodyn



ABNT 1045
Polido
RHT 6-50



ABNT 1045
Polido
Focodyn

Figura 5. Perfis de rugosidade de CP faceados, retificados e polidos medidos com a sonda mecânica RHT 6-50 e com sonda óptica Focodyn.

6. CONCLUSÕES

Os fatores limitantes para a aplicação da sonda óptica são de fato: limpeza, índice de reflexão da superfície, vibração, e acessibilidade à superfície a ser medida na peça. No caso da sonda mecânica o principal fator limitante é a capacidade da superfície resistir a força de medição aplicada pelo estilete. Entretanto o nível de rugosidade esperado também pode impossibilitar o uso de uma sonda mecânica.

Quanto menores forem os valores dos parâmetros verticais de rugosidade, maior será a discrepância entre os dados obtidos com sondas ópticas e com sondas mecânicas. Nestes casos prepondera a capacidade do feixe óptico penetrar em vales mais estreitos que aqueles penetráveis pela ponta de um estilete. Por outro lado, quanto maiores forem os desvios de 3ª ordem em relação aos de 4ª ordem, mais se aproximam os resultados obtidos com apalpação mecânica e com apalpação óptica. Pode-se afirmar que os resultados obtidos com um e com o outro tipo de sonda se aproximam quando se medem superfícies usinadas com ferramentas de geometria definida (torneamento e fresamento por exemplo) e se tornam bastante discrepantes quando se medem superfícies usinadas com ferramentas de geometria não definida (abrasivas). Pelos mesmos motivos pode-se concluir que superfícies de peças sinterizadas devem apresentar uma grande discrepância entre os resultados obtidos com sonda óptica e com sonda mecânica.

Com o número e tipos de corpos de prova estudados neste trabalho não é possível se estabelecer correlações matemáticas gerais envolvendo todos os tipos de materiais utilizados em componentes mecânicos e todos os processos de fabricação, notadamente os de usinagem. Um estudo mais aprofundado deve envolver materiais diversos (metais, plásticos e cerâmicas) e todas as variáveis do processo de fabricação que sejam influentes na textura superficial. Enquanto não se obtiverem dados de estudos deste tipo o uso indiscriminado de um ou outro tipo de sonda fica limitado, pois não se podem comparar os resultados diretamente.

REFERÊNCIAS

- Bodschiwinna, H. & Hillmann, W., 1992, Oberflächenmeßtechnik mit tastschnittgeräten in der industriellen Praxis, Beuth, Berlin.
- DIN 4768, 1990, Determination of values of surface roughness parameters Ra, Rz, Rmax using electrical contact (stylus) instruments - Concepts and measuring conditions, Beut Berlin.
- ISO 4287, 1997, Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters, Genève.
- ISO 4288, 1996, Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for assesment of surface texture, Genève.
- Link, W., 1997, Metrologia mecânica, expressão da incerteza de medição, Inmetro/IPT/Mitutoyo/SBM, São Paulo.
- Mummery, L., 1992, Surface texture analysis the handbook, Hommellwerke, Schwenningen.
- PERTHEN, 1990, Catálogo técnico 375 1963-1.3.90, Feinprüf Perthen GmbH, Göttingen.
- Sander, M., 1989, Oberflächenmeßtechnik für den Praktiker, Feinprüf Perthen GmbH, Göttingen.
- Schroeter, R. B. & Weingaertner, W. L., 1999, A usinagem de ultraprecisão, Máquinas e Metais, n. 396, pp. 20-35.
- Weingraber, H. & Abou-Aly, M., 1989, Handbuch Technische Oberflächen, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- Whitehouse, D. J., 1994, Handbook of Surface Metrology, IOP Publishing, London.

A COMPARATIVE ANALYSIS ON MACHINED SURFACE TEXTURE MEASUREMENTS OBTAINED FROM OPTICAL FOLLOWERS AND STYLUS INSTRUMENTS

***Abstract:** Many metallic surfaces require fine finishing to properly perform their technological role. Surfaces for optical parts and measurement devices, characterized by R_a values from a few nanometers to a hundredth micrometer to are typical examples. For such small roughness values, measurement is substantially difficult and may not be performed using stylus instruments. In highly finished surfaces, the geometry of the tip stylus and the measurement force may cause significant distortion between the real surface texture and measurement results. In some cases, the most important source of error is the surface/stylus contact. Although optical followers capture surface profiles without contact, other problems may occur such as the effect of environmental conditions which becomes increasingly important. In addition, surface microgeometry and its reflection capability may cause considerable deviations. It is also not possible to compare results obtained from stylus and optical follower as a consequence of the deeper penetration of the optical beam into surface valleys. This study presents a comparative analysis between texture measurements of a number of machined surfaces carried out using both a stylus instrument and an optical follower. Causes for the discrepancies and a reference guide for later use of both types of instruments will also be discussed.*

***Key words:** Surface, Texture measurement, Stylus instrument, Optical follower*