



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

EFEITO DA INCLINAÇÃO DO FEIXE DE LUZ EM PARÂMETROS DE RUGOSIDADE 3D DE SUPERFÍCIES CÔNCAVAS MANDRILHADAS E BRUNIDAS UTILIZANDO INTERFEROMETRIA ÓPTICA

Victor de Cerjat Beltrão, victorbeltrao@me.com¹

João Luiz do Vale, joaovale@utfpr.edu.br²

Carlos Henrique da Silva, carloschs@utfpr.edu.br³

¹Universidade Federal do Paraná – UFPR – Campus Curitiba. Graduando

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Londrina.

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba.

Resumo: O desenvolvimento da metrologia de superfícies tornou-se um importante aliado na produção industrial mecânica a partir do instante em que se adquiriu o conhecimento da relação da rugosidade da superfície das peças com sua funcionalidade. Contudo, os parâmetros de rugosidade são sensíveis a erros sistemáticos e estatísticos, podendo estes causar desvios significativos nos seus valores. Estes parâmetros são comumente utilizados para controle de produção ou ainda avaliações tribológicas, sendo assim as variações podem levar a interpretações ou conclusões equivocadas. Este artigo tem por objetivo analisar a influência de pequenos erros de inclinação entre o feixe de luz e a superfície estudada, causadas por eventual mau posicionamento da amostra. Superfícies côncavas produzidas por mandrilhamento e brunimento foram avaliadas por técnica de interferometria óptica. Para isso, foram retiradas duas amostras de ferro fundido vermicular de cilindros de bloco de motor de combustão interna com 83 mm de diâmetro nominal, uma processada através de mandrilhamento, e outra por brunimento, gerando duas superfícies côncavas com características distintas. Realizaram-se dois procedimentos de medição para cada tipo de superfície. No primeiro, impôs-se de modo sistemático inclinações de 0; 1,38 e 2,76°. Para cada inclinação do feixe de luz realizaram-se 7 medições. Em seguida, realizaram-se novas medições seguindo o mesmo princípio, porém corrigindo a inclinação através de um calço e certificando-se da incidência perpendicular do feixe de luz na superfície por meio da avaliação do maior espalhamento das franjas no set-up do procedimento de medição. Os valores apresentados são as médias e desvios padrão dos valores dos parâmetros de rugosidade 3D avaliados, os quais foram: Sa, Sq, Sk, Spk, Svk, Sds, Ssc e Sdq. O equipamento utilizado para as medições foi o Taylor Hobson Talysurf CCI Lite com resolução digital de 1024x1024 pixels com área de amostragem de 0,825 x 0,825 mm e resolução vertical de 0,01 nm, incorporado ao software Talymap Platinum. Verificou-se, com 95% de confiança, que os valores dos parâmetros de rugosidade híbridos Sds, Ssc e Sdq apresentam diferença estatística significativa em medições realizadas com inclinação de apenas 1,38°, e tendem a divergir ainda mais quanto maior o ângulo de inclinação para ambos os tipos de superfícies. Além disso, na família de parâmetros funcionais também se observaram diferenças significativas para uma inclinação de 2,76° para os parâmetros Spk e Sk, porém para o Sk somente foi encontrada esta variação para a superfície brunida, enquanto para Spk foi observada essa diferença para as duas superfícies. Para as medições com correção de inclinação através de um calço nenhuma diferença significativa foi encontrada para todos os parâmetros de rugosidade. A análise dos resultados indicou que as perturbações nas medições em decorrência de pequenas inclinações de uma amostra côncava são significativas e não estão atreladas aos tipos de superfícies avaliadas.

Palavras-chave: Erro de inclinação; Parâmetros de rugosidade; Superfícies côncavas; Mandrilhamento; Brunimento.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte dos componentes de engenharia têm sua funcionalidade afetada pela característica de seu acabamento superficial. Entender os fatores de manufatura que alteram as propriedades microscópicas da superfície do componente permitiram que o controle superficial pudesse ser implementado na pré-fabricação, aperfeiçoando o processo e diminuindo os custos de produção (Whitehouse, 2011). Acrescenta-se que uma superfície de engenharia é complexa e não pode ser descrita por um único parâmetro, pois cada parâmetro representa somente um único aspecto da topografia (Dong, 1994).

A interferometria de luz branca é uma técnica de avaliação eficiente que vem se tornando cada vez mais atrativa e útil como método para uma inspeção 3D de superfícies (Buchta, 2011). Este método é baseado na análise do nível de correlação temporal entre dois feixes de luz coerente, um sendo refletido do objeto a ser medido e outro de um espelho de referência. Um padrão de interferência de alto contraste, denominado de franja de Young, surge através da detecção destes feixes na matriz fotovoltáica e cada ponto detectado determinará um pixel na imagem 3D topográfica da superfície (Kaplonek e Czeslaw, 2012). O crescente uso da técnica de interferometria de luz branca para a análise de superfícies topográficas traz à tona a necessidade de discussão das limitações de uso desta técnica, bem como a discussão de possíveis erros sistemáticos que possam ser encontrados. Estudos foram realizados com o intuito de verificar erros causados por descontinuidades ou gradientes de pequena escala na superfície (Lehmann, 2006) e (Proertner e Schwinder, 2001), mas pouco se fez em relação a erros de dispersão causados por inclinações do feixe para superfícies côncavas e convexas.

Em especial, as superfícies de cilindros de combustão interna são de grande interesse para pesquisa e controle de produção. A especificação e controle de suas topografias é um requisito fundamental de manufatura (Pawlus *et al.*, 2009). O cilindro é normalmente processado em três estágios: primeiro mandrilhamento grosso, seguido de um mandrilhamento refinado e um processo de brunimento final (Santochi, 1982). O mandrilhamento do cilindro é uma operação de corte de metal que alarga o diâmetro interno através de movimento entre a ferramenta, denominada de mandril, e a parede do cilindro. Essa técnica determina características geométricas do cilindro como precisão dimensional e cilindridade (Kakade, 1993). O processo de brunimento de platô é o mais utilizado para acabamento de cilindros de motor à combustão interna (Hurpekli *et al.*, 2014), com características que garantem simultaneamente uma superfície com rugosidade reduzida e grande habilidade de contenção de óleo (Pawlus *et al.*, 2014). A topografia do cilindro tem influência significativa no desempenho tribológico do motor (Corral e Calvet, 2011).

Diante do exposto, este artigo discute o efeito de pequenas inclinações do feixe de luz em superfícies côncavas, de cilindros de combustão interna, em parâmetros de rugosidade 3D, obtidos através de interferometria de luz branca, para duas superfícies com dois acabamentos distintos: mandrilhado e brunido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

A superfície estudada neste artigo foi de um cilindro de bloco de motor de combustão interna, fabricado em ferro fundido vermicular GJV450 (norma ISO 16112), e que é apresentado na Fig. 1. O bloco, modelo Ford V8, com cilindros de diâmetro nominal de 83 mm, foi fornecido pela empresa Tupy S.A.



Figura 1. Bloco de motor modelo Ford V8

Após a fundição, os cilindros são mandrilhados e brunidos. Retiraram-se duas amostras da superfície do cilindro após cada um destes processos de usinagem. As amostras, agora com raio nominal de curvatura de 41,5 mm, podem ser visualizadas na Fig. 2. Em particular, o processo de brunimento foi do tipo platô. Para esta etapa utilizaram-se ferramentas de diamante – D151 e D15 para desbaste e acabamento, respectivamente. A velocidade de avanço e rotação do processo foram 12,4 m/min e 130 rpm, respectivamente.

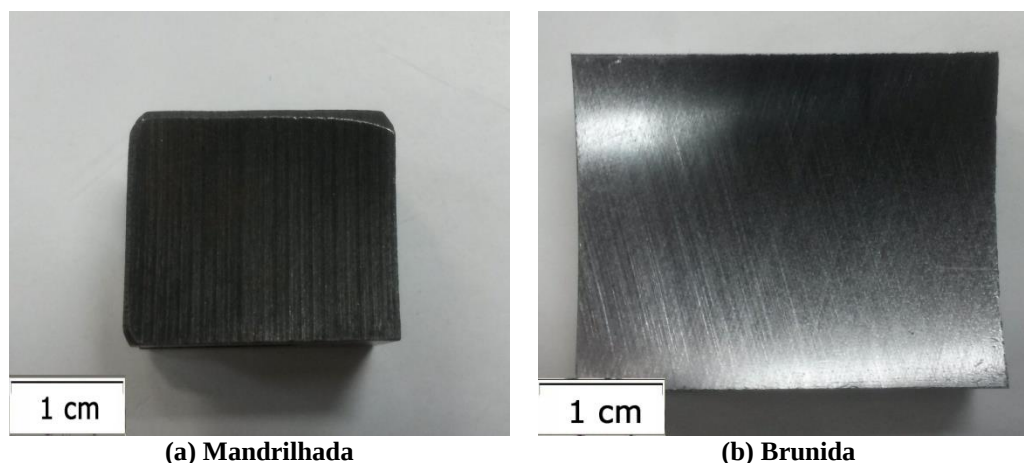


Figura 2. Vista superior das amostras.

2.2. Metodologia das medições por interferometria óptica

As caracterizações das superfícies foram obtidas através de técnica de interferometria de luz branca. O equipamento utilizado para as medições de rugosidade das amostras foi o interferômetro Taylor Hobson Talysurf CCI Lite, disponibilizado pelo laboratório de metrologia da UTFPR. O equipamento possui resolução de 1024×1024 pixels com área de amostragem de $0,825 \times 0,825$ mm, resolução vertical de $0,01$ nm e repetitividade de medição de $0,002$ nm.

Realizaram-se dois procedimentos de medição para cada tipo de superfície. No primeiro, impôs-se de modo sistemático inclinações de 0 , $1,38$ e $2,76^\circ$ do feixe de luz em relação a superfície côncava, conforme esquema da Fig. 3. Estas linhas foram denominadas L1, L2 e L3, respectivamente. O erro foi imposto por deslocamentos horizontais de 1 e 2 mm.

Para a L1, o feixe de luz coerente foi posicionado no centro da curvatura da superfície côncava da amostra. Isto foi possível pela análise do espalhamento das franjas durante o *set-up* de medição. As franjas tendem a uma condição de maior expansão quando o feixe de luz e a superfície estudada estão perpendiculares entre si. Ainda, quanto melhor o espalhamento das franjas observa-se que menor é tempo de medição e maior a confiabilidade do resultado. Para a L2 e L3, a amostra foi deslocada horizontalmente em 1 mm e 2 mm na direção radial, respectivamente. Assim, impôs-se inclinações na reflexão do feixe de luz, devido a curvatura das superfícies, de aproximadamente $1,38$ e $2,76^\circ$, respectivamente. Para cada linha, foram feitas 7 medições de rugosidade na direção axial das amostras, com espaçamento de 2 mm para a amostra mandrilhada e 3 mm para a amostra brunida.

No segundo procedimento de medição repetiram-se as medições nas L2 e L3, contudo, utilizou-se um calço posicionado embaixo da amostra. O calço teve por objetivo corrigir a inclinação associada a estas medições, de modo que a reflexão da luz na superfície permanecesse perpendicular. Verificou-se esta condição pela avaliação do espalhamento das franjas.

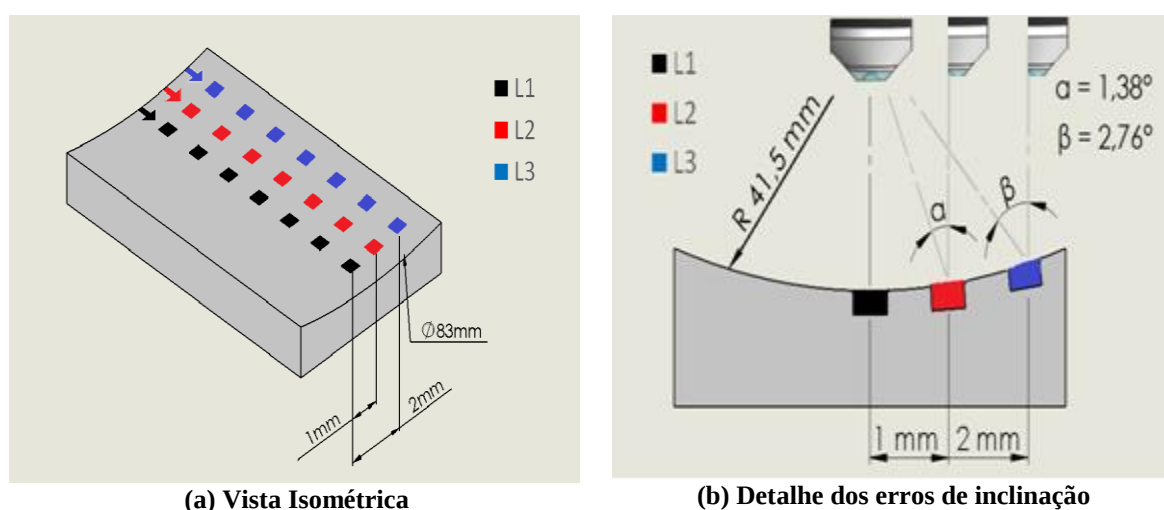


Figura 3. Esquema de medição das superfícies.

Todas as medições passaram previamente pelas mesmas operações matemáticas, sendo elas: preenchimento de pontos não medidos, remoção de forma através de filtro F e aplicação de *threshold* de $0,2$ a $99,8$ %. Os parâmetros de rugosidade 3D analisados foram: S_q , S_k , S_{pk} , S_{vk} , S_{ds} , S_{sc} e S_{dq} . Estes parâmetros foram escolhidos devido a sua importância em análises tribológicas e controle de produção. O parâmetro de altura S_q é a média quadrática (Rms) das

asperezas e pode ser usado para identificar grandes variações nas características da textura da superfície (Michigan Metrology, 2015). Os parâmetros da família k são derivados da curva de Abbot-Firestone para uma superfície 3D. Estes parâmetros são especialmente importantes para caracterização de superfícies com acabamento de brunimento (Pawlus *et al.*, 2009). A família de parâmetros híbridos é derivada de modelos matemáticos que interpretam ao mesmo tempo características espaciais e verticais da superfície. Estes parâmetros são essenciais para a quantificação de desgaste em ensaios tribológicos (Pintaúde, 2013).

Em seguida, realizaram-se os cálculos das médias e desvios padrão para os dados dos parâmetros para as linhas L1, L2 e L3. Para a comparação entre as médias obtidas no presente trabalho, utilizou-se a inferência estatística baseada no teste t de Student com nível de confiança de 95%. As hipóteses nulas utilizadas foram de igualdade entre as médias amostrais, e as hipóteses alternativas de que estas fossem diferentes (Devore, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise do espalhamento da luz

Os padrões de interferência de ondas de alto contraste, responsáveis pelo processo de medição, apresentaram grandes diferenças quando comparados entre as linhas L1, L2 e L3, no procedimento sem correção de inclinação, como se pode ver na Fig. 4. As imagens foram obtidas do *software* Talymap durante o procedimento de medição. Quando a amostra se encontrava posicionada na linha L1, com inclinação de 0° , a condição de espalhamento das franjas observada foi elevada, com o tempo de medição reduzido para aproximadamente 30 segundos. Com o aumento de inclinação, as franjas não espalharam de modo tão efetivo, e o tempo de medição aumentou drasticamente, chegando até a 70 segundos para as medições na linha L3. Maiores inclinações entre o feixe e a superfície, causam pequenos desvios no retorno do feixe de luz durante sua reflexão, causados pelo ângulo de incidência diferente de 0° , o que ocasiona baixa absorção de fótons pela matriz fotovoltaica. Em consequência, a varredura da área de amostragem torna-se mais lenta.

O padrão de espalhamento encontrado na L1 foi utilizado para garantir o alinhamento da amostra com o feixe de luz em posição perpendicular para as medições com uso de calço. Deste modo, foi obtido o mesmo nível de espalhamento para as linhas L2 e L3 no procedimento de medição com correção de inclinação.

O baixo espalhamento das franjas não é uma condição encontrada somente para medições de superfícies côncavas, podendo ocorrer em superfícies de materiais com baixa refletividade. (Park e Kim, 2001). A deficiência de espalhamento encontrada é característica de medições com inclinações no feixe de luz, e pode ser atrelada a não confiabilidade na medição, conforme discussão na seção 3.3.

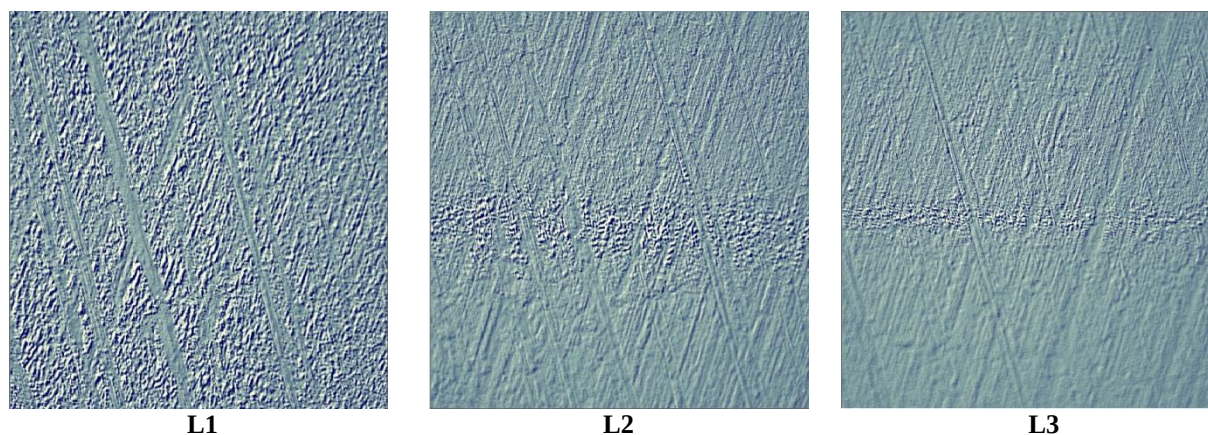


Figura 4. Padrão de espalhamento das franjas na amostra brunida sem correção de inclinação.

3.2. Topografia 3D

As topografias das duas amostras estudadas, para o procedimento sem correção de inclinação, são apresentadas na Fig. 5. Estas topografias demonstram as características intrínsecas de cada superfície avaliada, e a grande distinção entre as mesmas. A topografia da amostra mandrilhada, Fig. 5(a-c-e), possui regiões de picos irregulares com espaçamentos definidos, o que caracteriza uma ondulação de superfície, enquanto a topografia da amostra brunida, Fig. 5(b-d-f), possui regiões de sulcos e platô específicas de superfícies brunidas. O processo de brunimento tem intenção de melhorar o acabamento superficial e reduzir a ondulação criada do processo de mandrilhamento. Este resultado é esperado, pois o processo de brunimento provê: precisão dimensional, redução de erro de circularidade e linearidade e ainda conduz a parâmetros da curva de Abbot-Firestone que resultam em melhora no desempenho tribológico (Mansori *et al.*, 2013). Chama-se a atenção para a significativa diferença entre as superfícies, o que garante a análise do erro de inclinação do feixe de luz considerando duas superfícies distintas.

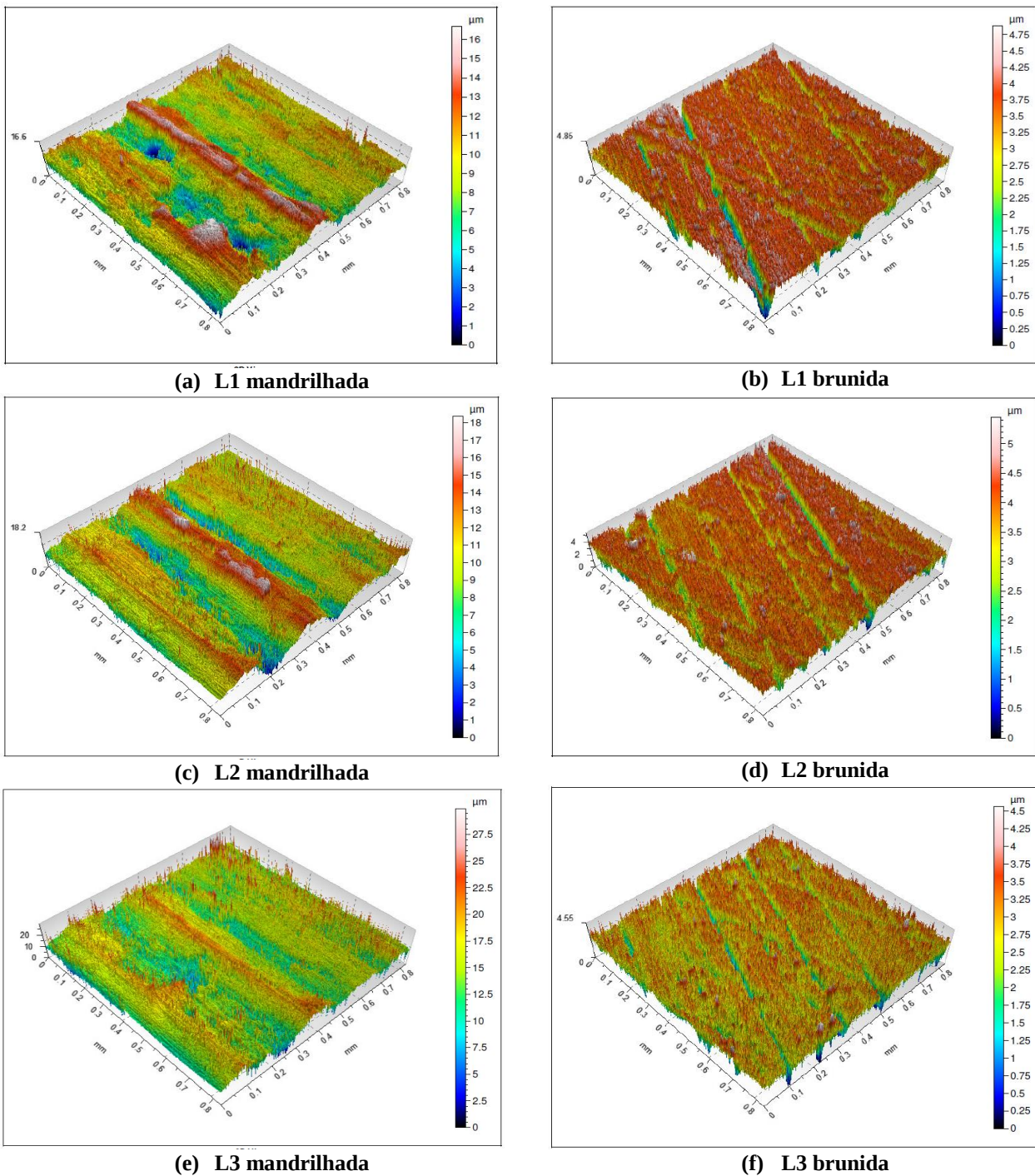


Figura 5. Topografias 3D

A inclinação do feixe de luz também produziu variações visíveis nas topografias 3D das medições realizadas. As imagens das topografias das linhas L2 e L3 apresentaram um aumento da presença de picos isolados, como se pode visualizar na Fig. 5 (c-e). Esses picos se concentram nas áreas de borda da área de amostragem, e tendem a ser mais significativos e mais presentes quanto maior a inclinação. A presença destes picos mais elevados é confirmada através do aumento da escala de graduação para as maiores inclinações. Este efeito foi muito mais significativo para a superfície mandrilhada, com aumento percentual de 68,75% (comparando escalas das Fig. 5(a) e 5(e)). Já para a superfície brunida não houve aumento considerável.

Ademais, como consequência, pode-se notar a variação da faixa de cores para a descrição da topografia. O aumento de altura dos picos passa a deixar as outras características da superfície em segundo plano, deixando-as com aparência menor do que a real na imagem. A hipótese para o aparecimento destes picos é a de que os pontos não interpretados pelo interferômetro, devido aos desvios de reflexão do feixe de luz em uma superfície inclinada, são associados a

grandes elevações de aspereza pontuais. Além disso, podem estar relacionados também à dificuldade de espalhamento das franjas para o caso das superfícies côncavas.

Um comportamento semelhante foi descrito por Gao *et al.* (2008), que encontrou um efeito dispersivo sensível à inclinação da superfície que aumentava em severidade na direção das bordas da área de amostragem. Segundo ele, esta dispersão é causadora de erros chamados de erros 2π , da ordem de aproximadamente metade da média do comprimento de onda do feixe de luz. Estes erros, dependendo da magnitude e da frequência de ocorrência, podem vir a ser prejudiciais para a análise da superfície, distorcendo os resultados dos parâmetros de rugosidade, por exemplo.

3.3. Análise dos Parâmetros de rugosidade

2.3.1 Parâmetro de altura.

Inicialmente, apresenta-se o parâmetro de altura S_q na Fig. 6. Constata-se diferença significativa entre as superfícies, com valores menores para a superfície brunida e menor dispersão de dados. Conforme discutido na seção 2.2, esse resultado é coerente com o objetivo do brunimento após mandrilhamento com consequente redução dos seus parâmetros. Ainda, observa-se que existe uma tendência de aumento de S_q para a superfície mandrilhada, com o incremento do erro de inclinação.

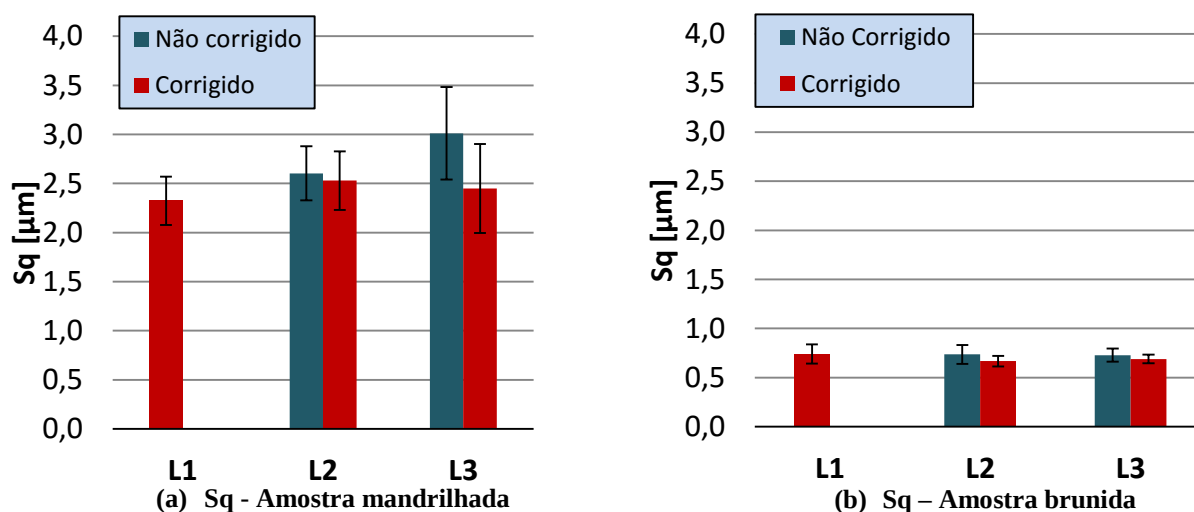


Figura 6. Comparação entre o parâmetro S_q

Realizaram-se testes de significância, com 95 % de confiança, comparando-se os dois procedimentos. Contatou-se que os dados de L1, L2 e L3 que tiveram correção de inclinação foram estatisticamente iguais. Já a comparação entre o L1 e os dados de L2 e L3 não corrigidos são apresentados na Fig. 7, em matrizes de correlação. Observa-se que o parâmetro S_q é mais robusto com relação a influência de erros de inclinação. Ainda assim, observa-se diferença nos resultados entre L1 e L3 para a superfície mandrilhada.

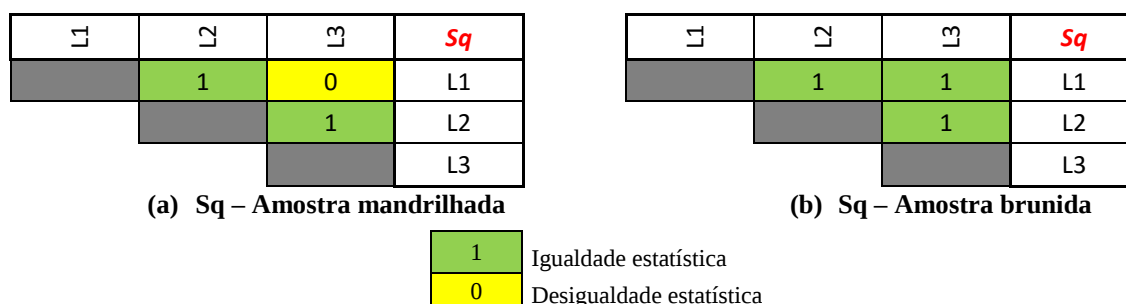


Figura 7. Matrizes de correlação dos parâmetros de altura para procedimento sem correção de inclinação

3.3.1 Parâmetros funcionais

As médias e desvios padrão dos parâmetros S_k , S_{vk} e S_{pk} da família de parâmetros funcionais (EUR 15178N) são apresentados na Fig. 8. Verifica-se o mesmo comportamento dos parâmetros de altura com menores valores e dispersão de dados para a superfície brunida. Observa-se tendência de crescimento dos parâmetros com aumento do erro de inclinação, com exceção do S_{vk} para a superfície brunida que apresentou queda.

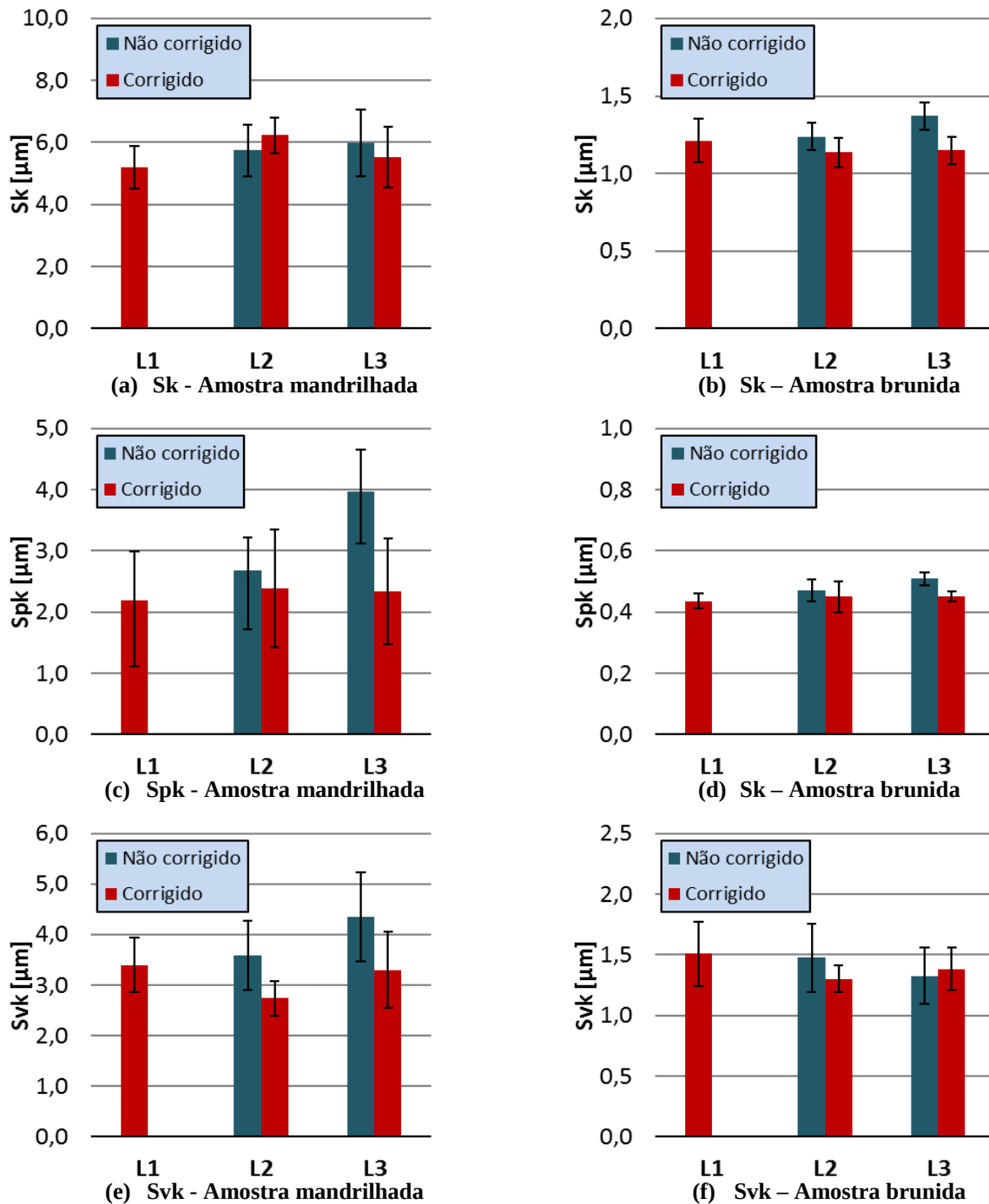


Figura 8. Comparação entre os parâmetros da família k

Através de testes de inferência estatística atestou-se, com 95% de confiança, que o procedimento com correção da inclinação resultou em igualdade estatística para as condições estudadas, a exemplo dos parâmetros de altura. Já o resultado para o procedimento que não contou com a correção é apresentado na Fig. 9. O parâmetro Spk apresentou-se com comportamento mais dependente do erro de inclinação. Erro de inclinação de $2,76^\circ$ foi suficiente para causar diferença significativa para ambas as superfícies. O parâmetro Sk teve maior influência para a superfície brunida e apresentou-se igual estatisticamente para a superfície mandrilhada. O parâmetro Svk, por sua vez, teve comportamento mais robusto com relação aos erros de inclinação. Observou-se diferença somente entre L1 e L3 para a superfície brunida.

L1	L2	L3	<i>Sk</i>
	1	1	L1
		1	L2
			L3

(a) *Sk* – Amostra mandrilhada

L1	L2	L3	<i>Sk</i>
	1	0	L1
		0	L2
			L3

(b) *Sk* – Amostra brunida

L1	L2	L3	<i>Spk</i>
	1	0	L1
		0	L2
			L3

(c) *Spk* – Amostra mandrilhada

L1	L2	L3	<i>Spk</i>
	1	0	L1
		0	L2
			L3

(d) *Spk* – Amostra brunida

L1	L2	L3	<i>Svk</i>
	1	0	L1
		1	L2
			L3

(e) *Svk* – Amostra mandrilhada

L1	L2	L3	<i>Svk</i>
	1	1	L1
		1	L2
			L3

(f) *Svk* – Amostra brunida

1	Igualdade estatística
0	Desigualdade estatística

Figura 9. Matriz de correlação dos parâmetros funcionais para o procedimento sem correção de inclinação

2.3.3 Parâmetros híbridos

As médias e desvios padrão dos parâmetros *Sdq*, *Ssc* e *Sds* da família de parâmetros híbridos (EUR 15178N) são apresentadas na Fig. 10. Observa-se que estes parâmetros são relativamente mais sensíveis a erros de inclinação que os parâmetros de altura e funcionais.

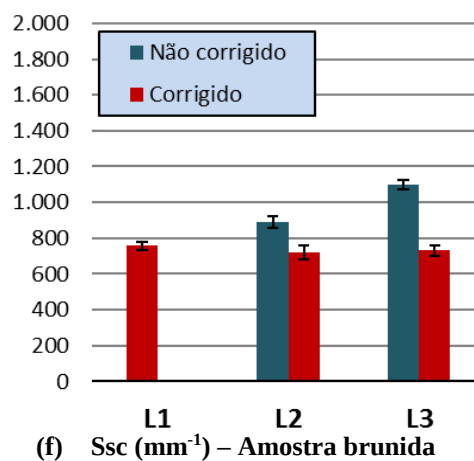
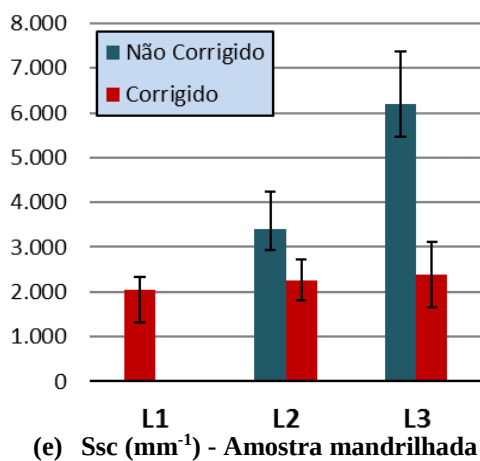
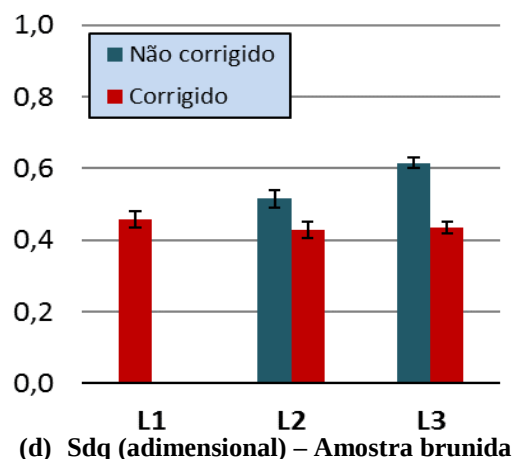
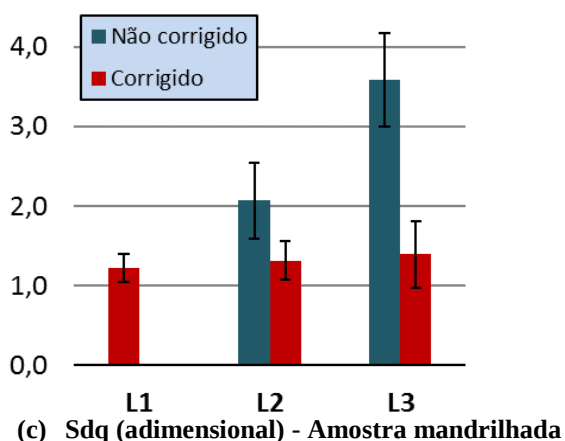
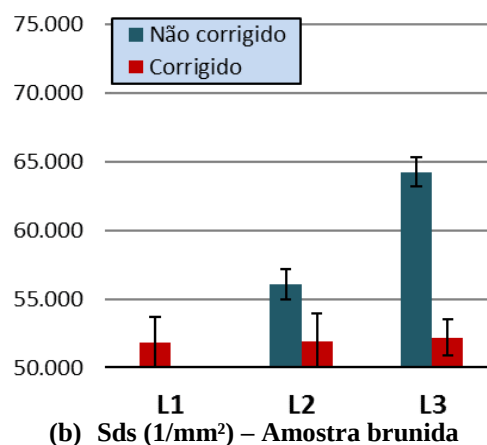
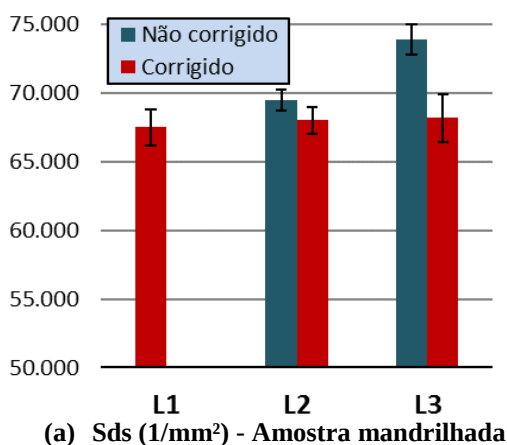


Figura 10. Comparação entre os parâmetros híbridos

Utilizando inferência estatística verificou-se, com 95% de confiança, que os valores das médias de todos os parâmetros híbridos apresentaram diferença significativa para procedimento sem correção de inclinação, o que pode ser visto na Fig. 11. Pode-se atestar então que a imposição de uma pequena inclinação acima de apenas 1,38° já é suficiente para causar diferença significativa em qualquer um dos parâmetros híbridos estudados. Isso pode ser relacionado com o aparecimento dos picos isolados, devido ao fato de que todos os parâmetros são de alguma forma associados a características dos cumes na superfície.

Para as medições realizadas com correção de inclinação, não foi encontrada diferença significativa, com 95 % de confiança, entre os parâmetros analisados. A correção de inclinação prova que a reflexão do feixe de luz em uma superfície posicionada perpendicularmente a ele garante a confiabilidade da medição.

L1	L2	L3	Sds
	0	0	L1
		0	L2
			L3

(a) Sds – Amostra mandrilhada

L1	L2	L3	Sds
	0	0	L1
		0	L2
			L3

(b) Sds – Amostra brunida

L1	L2	L3	Sdq
	0	0	L1
		0	L2
			L3

(c) Sdq – Amostra mandrilhada

L1	L2	L3	Sdq
	0	0	L1
		0	L2
			L3

(d) Sdq – Amostra brunida

L1	L2	L3	Ssc
	0	0	L1
		0	L2
			L3

(e) Ssc – Amostra mandrilhada

L1	L2	L3	Ssc
	0	0	L1
		0	L2
			L3

(f) Ssc – Amostra brunida

1	Igualdade estatística
0	Desigualdade estatística

Figura 11. Matriz de correlação dos parâmetros híbridos para o procedimento sem correção de inclinação

3.4 Considerações tribológicas e índice de plasticidade (Ψ)

De acordo com a definição de tribologia, esta é uma ciência estritamente relacionada aos fenômenos de superfície. Assim, os parâmetros de rugosidade estarão diretamente ligados a princípios como a área real de contato, contato elástico ou plástico e índice de plasticidade.

Greenwood e Williamson (1966) propuseram sua teoria para o contato entre superfícies de múltiplas asperezas considerando o contato puramente elástico. No entanto, foi previsto também um limite para o escoamento plástico das asperezas que está relacionado com o índice de plasticidade. Este parâmetro pode ser aplicado para distribuição de rugosidade próxima à distribuição normal (Gauss). No entanto, diversas superfícies de engenharia apresentam distribuição distinta desta. A Equação (1) apresenta o índice de plasticidade, onde E' é o módulo elástico combinado dos materiais das superfícies analisadas e H é a dureza da superfície (a qual se quer ter a informação de escoamento plástico).

$$\psi = \left(\frac{E'}{H} \right) \sqrt{\left(\frac{Sq}{1/Ssc} \right)} \quad (1)$$

Tanto a teoria de contato rugosa quanto observações experimentais sugerem que, para aplicações mecânicas envolvendo superfícies metálicas, a maior parte das asperezas irá deformar-se plasticamente. Considera-se que somente as superfícies mandrilhadas podem ser consideradas como tendo uma distribuição normal de altura de asperezas. Ao analisarem-se comparativamente as posições L1 e L3, observa-se que os valores obtidos dos parâmetros de rugosidade com elevado desvio de angulação podem provocar uma elevação do índice de plasticidade em até 35%. Ou seja, isto apontaria um maior número de asperezas deformadas plasticamente, conduzindo a explicações nos valores de atrito e/ou taxa de desgaste errôneas.

4. CONCLUSÕES

Do presente trabalho, em que foi estudado o efeito da inclinação do feixe de luz sobre os valores de parâmetros 3D de superfícies côncavas mandrilhadas e brunidas, através de medições por interferometria de luz branca, concluiu-se que:

- Os erros associados a dispersão da reflexão do feixe de luz em uma superfície inclinada são significativos e, portanto, possuem grande influência no resultado final da medição.
- Os desvios dos parâmetros de rugosidade acompanham a ordem de grandeza da rugosidade da superfície estudada, afetando a medição da superfície de acordo com a magnitude de sua textura. Este comportamento indica um erro de interpretação das superfícies pelo interferômetro, que provoca alterações de valores proporcionais diferentes para cada parâmetro.
- Observou-se os que erros sistemáticos impostos na inclinação do feixe causaram variação significativa nos parâmetros de rugosidade para ambas as superfícies avaliadas.
- Os parâmetros funcionais e híbridos foram os mais afetados pela inclinação da superfície côncava, sendo os híbridos os mais susceptíveis, sofrendo alterações significativas para uma inclinação de apenas 1,38°.
- A utilização de calço para correção da inclinação nas medições provou-se eficiente para impedir o erro de inclinação, comprovando a confiabilidade da medição na condição de perpendicularidade entre o feixe de luz e a superfície. A garantia de medição nesta condição em uma superfície côncava através do método de análise do padrão de espalhamento das franjas foi comprovada. Do mesmo modo, deve-se atentar para o afastamento da melhor condição de medição através deste método.
- Mesmo um pequeno desvio de 2,76° pode conduzir a uma elevação de até 35% no índice de plasticidade de superfícies mandrilhadas. Isto conduz a um erro de interpretação quanto à área real de contato e a quantidades de asperezas deformadas plasticamente, prejudicando as análises tribológicas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao suporte dado pelo PPGEM (Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Materiais). Adicionalmente, nosso agradecimento especial à empresa Tupy pelo fornecimento das amostras, pelo suporte financeiro para a concretização deste trabalho e pela disposição na realização de estudos em parceria com a universidade pelo acordo de cooperação técnica ACT 10/2015 TUPY-UTFPR.

6. REFERÊNCIAS

- Buchta, Z., Mikel, B., Lazar, J., Cíp, O., 2011. White-light fringe detection based on a novel light source and colour CCD camera. *Measurement Science and Technology*, Vol 22, pp. 094031 (6pp.).
- Corral I. B., Calvet, J. V., 2011. Roughness variability in the honing process of steel cylinders with CBN metal bonded tools. *Precision Engineering*. v. 35, p. 289-293.
- Dong, W.P., Sullivan, P.J., Stout, K.J., 1994. Comprehensive study of parameters for characterising three- dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties, *Wear*, Vol. 178, pp. 1-2, ISSN 0043-1648.
- Gao, F., Leach R., Petzing J., Coupland J. M., 2008. Surface Measurement Errors using Commercial Scanning White Light Interferometers, *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 015303 (13 pp.).
- Greenwood J. A., Williamson J. B. P., 1966. Contact of Nominally Flat Surfaces, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 295, No. 1442, pp. 300-319.
- Hurpekli, M., Yilmaz, R., Kondakci, E., Solak, N., 2014 Effects of Ceramic and Diamond Honing on Bore/Liner Surface in View of Oil Retention. SAE Technical Paper 2014-01-1660, doi:10.4271/2014-01-1660.
- Kakade, N. N., Chow, J. G., 1993. Finite element analysis of engine bore distortions during boring operation. *Transactions ASME Journal of Engineering for Industry*, 115, pp. 379–384.
- Kaplonek, W., Lukianowicz, W., 2012. Coherence Correlation Interferometry in Surface Topography Measurements, *Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy*, Dr. Ivan Padron (Ed.), ISBN: 978-953-51-0404-9, InTech,
- Lehmann, P., 2006. Systematic effects in coherence peak and phase evaluation of signals obtained with a vertical scanning white-light Mirau interferometer. *Photonic Europe (Strasbourg, France, 3–7 April)* Vol. 6188.
- Michigan Metrology. Glossary of Texture Parameters. Disponível em: <<http://michmet.com/emailrequestglossary.htm>> Acesso em 16 jun.2015.
- Park, M.C., Kim, S.W., 2001. Compensation of phase change on reflection in white-light interferometry for step height measurement. *Opt. Lett.*, 26 420–2.
- Pawlus, P., Reizer, R., Wieczorowski, M., 2014. The Analysis of Directionality of Honed Cylinder Liners Surfaces. *Scanning*. Vol. 36, p. 95–104.
- Pawlus, P., Cieslak, T., Mathiac, T., 2009. The study of cylinder liner plateau honing process. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209, pp. 6078-6086.
- Proertner, A., Schwider, J., 2001. Dispersion error in white-light Linnik interferometers and its implications for evaluation procedures. *Appl. Opt.*
- Pintaúde, G., Amaral, P. L. F., Takehara, G., 2013. Statistical analysis of functional roughness parameters obtained for ground surfaces of steels, 68th ABM international annual congress, Conference paper, ISSN 1516-392X.
- Santochi, M., 1982. A Study on the Functional Properties of a Honed Surface. *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, Elsevier.
- Whitehouse, D. J., 2010. *Handbook of Surface and Nanometrology*. 2nd ed. London: Institute of Physics Publishing

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EFFECT OF LIGHT BEAM INCLINATION IN 3D ROUGHNESS PARAMETERS OF CONCAVE BORED AND HONED SURFACES USING OPTICAL INTERFEROMETRY

Victor de Cerjat Beltrão, victorbeltrao@me.com¹

João Luiz do Vale, joaovale@utfpr.edu.br²

Carlos Henrique da Silva, carloshs@utfpr.edu.br³

¹Universidade Federal do Paraná – UFPR – Campus Curitiba (Engenharia Mecânica - Graduando).

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Londrina.

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba.

Abstract. The development of surface metrology became an important ally in the manufacture industry from the moment that the relationship between the workpiece surface roughness and its functionality was found. However, the roughness parameters of mechanical components are sensitive to systematic and statistical errors, which can cause significant deviations in their values. These parameters are commonly used in manufacture control or even tribological applications, indicating that variations may lead to miscarried interpretations or mistaken conclusions. This article aims the analyzation of the influence of small inclination errors between the light beam and the studied surface, caused by eventual mal-positioning of the sample. Concave surfaces produced by boring and honing were evaluated by optical interferometry method. For this study, two samples made of vermicular cast iron were taken out from a cylinder liner of a block of internal combustion engine with nominal diameter of 83 mm. One sample was processed by boring, and the other by honing, resulting in two concave surfaces with different characteristics. Two procedures of measurement were realized for each type of surface. In the first, inclinations of 0; 1,38 and 2,76° were imposed. For each inclination of the light beam, 7 measurements of surface topography were made. Then, new measurements were made following the same principles, except that this time the inclination was corrected by the use of a shim, ensuring the perpendicular incidence of the light beam in the surface through evaluation of the fringe spreading during the measurement set-up. The values presented are the means and standard deviations of chosen 3D roughness parameters, which were: Sa, Sq, Sk, Spk, Svk, Sds, Ssc and Sdq. The equipment utilized for the measurements was Taylor Hobson's Talysurf CCI Lite, with digital resolution of 1024 x 1024 pixels, sampling area of 0,825 x 0,825 mm and vertical resolution of 0,01nm, integrated with the software Talymap Platinum. It was noted, with 95% confidence, that the values of the hybrid roughness parameters Sds, Ssc and Sdq showed significant statistical divergence in measurements made with inclination of just 1,38°, and also have the tendency to diverge even more as the angle of inclination increases for both types of surface. In addition to that, in the family of functional parameters, significant statistical divergence was also observed for an inclination of 2,76° for the parameters Spk and Sk, but for Sk only the honed surface showed this behavior, while for Spk this difference was observed for both types of surface. In the measurements with correction of inclination no significant divergence was observed for any roughness parameter. The analysis of the results indicated that the disturbances in the measurements as a result of small inclinations in concave samples are significant and are not related to the kind of surface evaluated.

Keywords: Inclination error; Roughness parameters; Concave surface; Boring; Honing