

Triangulação Laser no Controlo Dimensional de Canais para Escoamento em Placas de Grafite

Catarina Silva, João M.P. Coelho
Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
Departamento de Optoelectrónica
Estrada do Paço do Lumiar, 22
1649-038 Lisboa
Portugal
Telef.: 351.21.7164211
Fax: 351.21.7163048
e-mail: csilva@dop.ineti.pt

Palavras chave: Triangulação laser, Grafite, Controlo dimensional

Resumo

Actualmente, num mercado globalizado, a competição obriga à procura de novas tecnologias, de forma a obter maior eficiência, melhor qualidade e menores custos de produção. As aplicações industriais dos lasers têm sido uma resposta frequente para estas demandas.

Na aplicação específica do processamento de placas de grafite por laser com o objectivo de abertura de canais para o escoamento de fluidos, utilizou-se um sistema laser acoplado a uma mesa de translação (dois eixos) em substituição do método convencional de remoção de aparas por processo mecânico directo.

Para o controlo de qualidade e medição da profundidade dos canais, foi necessário utilizar um dispositivo que permitisse analisar os sulcos no substrato evitando o contacto directo com o material, uma vez que se trata de superfícies frágeis de fácil degradação. Nesse âmbito, o sistema de triangulação laser mostrou utilidade na medição da profundidade dos canais efectuados em placas de grafite.

O sistema funciona projectando uma linha laser sobre a amostra, captando o seu reflexo com uma câmara, segundo uma direcção particular. O desvio da imagem obtida em relação a uma linha de referência permite, por considerações geométricas, obter o perfil tridimensional do objecto com

uma precisão que depende unicamente da configuração física do emissor da linha laser e da câmara. Através do varrimento da linha sobre a superfície é então possível fazer a análise completa do objecto em estudo.

A metodologia proposta no presente trabalho visa oferecer recursos para a optimização de componentes de grafite executados por laser, através do controlo de qualidade e medição da profundidade dos canais processados por laser. Nesse âmbito, o sistema de triangulação laser mostrou ser útil na medição da profundidade dos canais efectuados em placas de grafite.

1. Introdução

Os métodos de controlo dimensional em superfícies sólidas são, normalmente, métodos de contacto. No entanto, em superfícies frágeis e de reduzida dureza, estes métodos apresentam desvantagens. A aplicação descrita nos próximos parágrafos, envolve o diagnóstico do processo de abertura de pistas em grafite e segundo geometrias de elevada precisão. Sendo a grafite um material de reduzida dureza, torna-se necessária a utilização de métodos em que não exista contacto mecânico com a superfície a analisar.

As pilhas de combustível têm sido objecto de uma forte investigação com vista ao desenvolvimento de uma fonte de energia capaz de complementar as fontes tradicionais, ou até mesmo, à sua substituição. Este tipo de tecnologia apresenta vantagens do ponto de vista ecológico, comercial e eléctrico, já substituindo mesmo pilhas e baterias convencionais em algumas aplicações [1].

Uma tecnologia igualmente vantajosa, embora melhor estabelecida no nosso dia a dia, é a tecnologia laser. Desde a indústria metalomecânica até áreas de entretenimento, o laser apresenta-se como uma ferramenta versátil e eficiente. O seu largo espectro de aplicação permite um elevado grau de fiabilidade e custos reduzidos. Sendo assim, é de esperar que, à medida que as pilhas de combustível se massifiquem, o laser seja uma ferramenta eleita para ser aplicada durante a sua produção, nomeadamente, no processamento de algumas das suas componentes.

A placa difusora é um dos componentes mais dispendiosos nas células de combustível, apresentando elevados custos de fabrico. A geometria dos canais de escoamento requer uma precisão tal que, em certos casos, se torna um processo dispendioso e demorado. As células consideradas neste trabalho são constituídas por grafite de elevada densidade, normalmente maquinadas por métodos de remoção de aparas por processo mecânico directo. Estes métodos, de precisão, sujeitando a placa de grafite a pressões mecânicas, podem ser substituídos pela aplicação de radiação laser.

Para o controlo de qualidade dos canais assim criados, surgiu a necessidade de utilizar um dispositivo que permitisse analisar e avaliar as suas dimensões evitando o contacto directo com o material, uma vez que se trata de superfícies frágeis de fácil degradação. Esse dispositivo é baseado na triangulação laser.

2. Método de Triangulação Laser

O método baseia-se na projecção de uma linha laser sobre a amostra, captando o seu reflexo com uma câmara, segundo uma direcção particular (Fig. 1). Esta direcção corresponde à reflexão especular, cujo ângulo de reflexão (relativamente à normal à superfície) é igual ao de incidência. A reflexão em outras direcções é difusa e corresponde a uma diminuição da luz que atinge a câmara.

O desvio da imagem obtida em relação a uma linha de referência permite, por considerações geométricas, obter o perfil tridimensional do objecto com uma precisão que depende unicamente da configuração física do emissor da linha laser e da câmara. Através do varrimento (*scanning*) da linha sobre a superfície é então possível fazer o registo do relevo da superfície em estudo (Fig. 2).

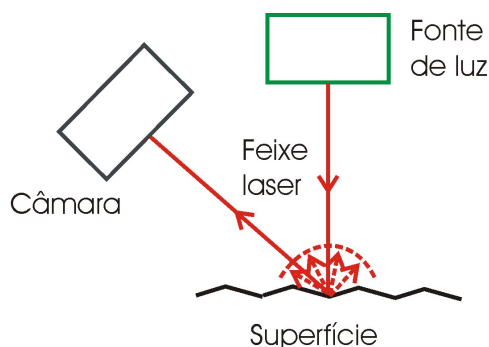


Fig. 1 – Esquema ilustrativo do método de diagnóstico de superfícies por laser.

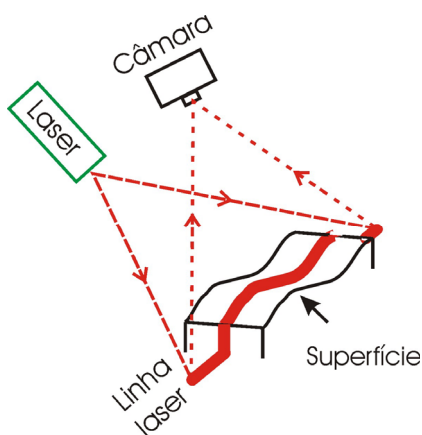


Fig. 2 – Ilustração do princípio de funcionamento da triangulação laser na caracterização de superfícies.

São várias as aplicações que exigem a obtenção e visualização de imagens na forma tridimensional - desde uma linha de montagem, onde se tenta melhorar a qualidade das peças fabricadas, até ao projecto de moldes (Fig.3)[2-5].

A determinação da profundidade de cada ponto em relação a um plano é feita através de um programa apropriado. Este permite visualizar os canais e traçar perfis tridimensionais, através dos quais é obtida a profundidade. A vantagem deste método relativamente a outros existentes é o facto de este ser não intrusivo, não afectando a superfície da grafite permitindo uma precisão de medida na ordem dos 25 μm .

O dispositivo de digitalização de imagens apresenta algumas limitações quanto à digitalização de uma face, ou seja, o problema da oclusão. Este fenómeno ocorre quando, um objecto pode ser ocultado por outro, ou tem extremidades côncavas, ou convexas, e que ocultam outras partes do mesmo objecto. Quando este problema ocorre torna-se difícil determinar com exactidão a forma na região de sombra. No entanto, através de sucessivos varrimentos do objecto em posições ligeiramente diferentes, é possível fazer a correlação entre elas e descobrir regiões duplamente digitalizadas, minimizando assim o problema de oclusão.

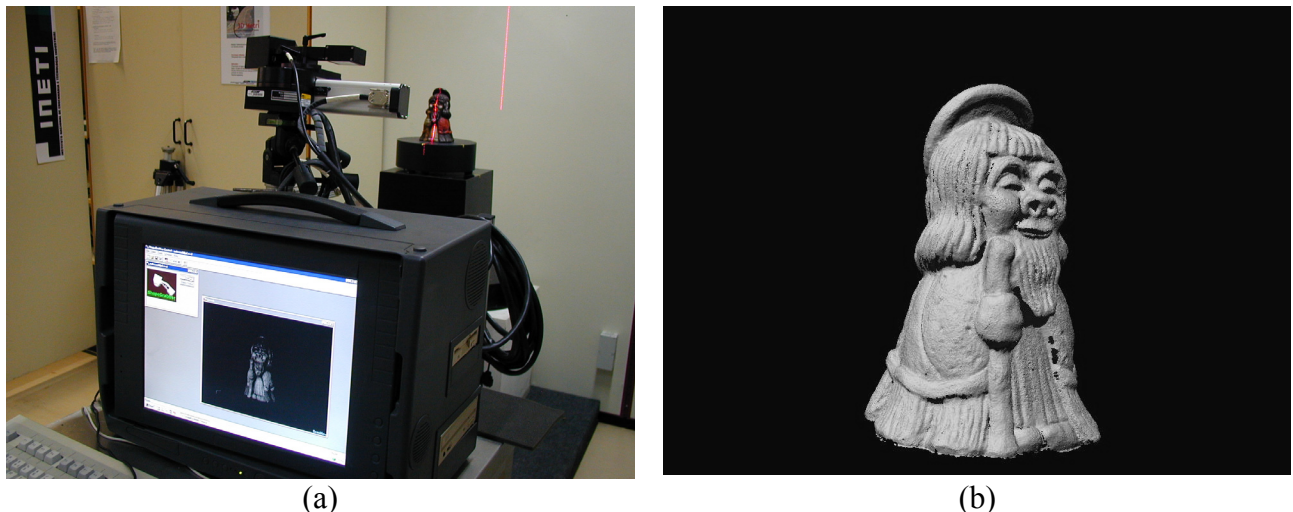


Fig.3 – (a) Sistema de aquisição de imagens por triangulação laser em funcionamento e (b) imagem tridimensional obtida.

3. Placa de calibração

Por forma a calibrar o método utilizou-se uma placa difusora, criada através de uma estação de micromaquinação (precisão de $\sim 1 \mu\text{m}$). Esta placa tem 34,5 mm x 34,5 mm e uma espessura de

3,5 mm. Sobre a sua superfície encontra-se um padrão de canais: 18 canais com uma largura de 1,0 mm e dois com 2,5 mm. A profundidade dos canais é de 1,0 mm.

A placa é composta por grafite com densidade de $2,25 \text{ g cm}^{-3}$, cujas características mais relevantes para este trabalho podem ser observadas na tabela 1. Observa-se que, embora tal como o diamante, seja composta basicamente por carbono, a sua dureza é bastante inferior (0,5 a 1,0, na escala de Mohs, enquanto que para o diamante é de 10). É, também, um material, mecanicamente, pouco resistente (Módulo de Young de 4,8 GPa) o que limita os métodos de processamento e análise.

Um factor a ter em conta é o grau de reflexão que este material apresenta face à radiação utilizada. De facto, para a região do vermelho (e do visível, em geral) a reflectividade toma valores relativamente reduzidos (na ordem dos 30%) o que, como será referido de seguida, dificulta a aplicação do método.

A utilização desta placa, cuja imagem pode ser observada na fig. 4(a) permitiu definir os procedimentos apropriados para a aplicação do método, não só no processo de digitalização dos canais como na análise através do programa apropriado. A fig. 4(b) mostra o resultado da aplicação do método à zona de canais da placa padrão. De seguida será descrita a metodologia seguida.

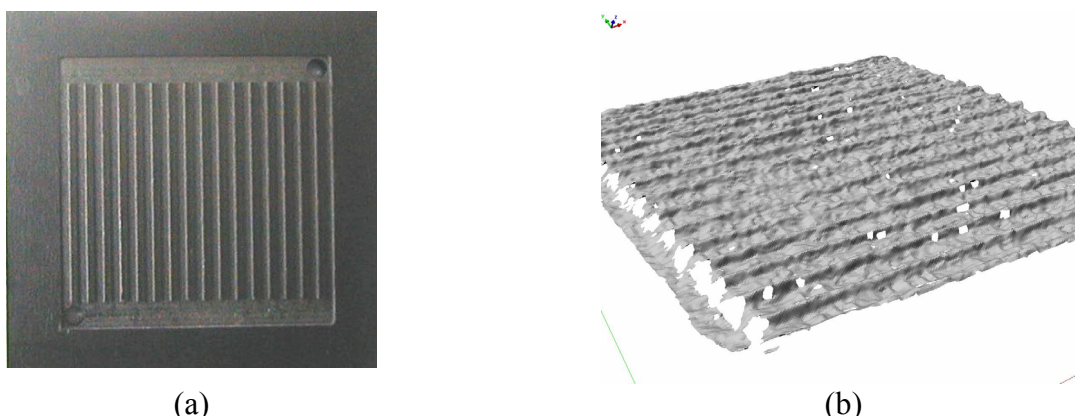


Fig. 4 – (a) Placa padrão utilizada na calibração do método e (b) imagem tridimensional da sua superfície, obtida através da triangulação laser.

Tabela 1 – Características da grafite [6,7]

Módulo de Young [GPa]	Dureza (escala de Mohs)	Reflexão (para o vermelho)	Densidade [kg m^{-3}]
4,8	0,5 – 1,0	$\approx 0,3$	2250

4. Metodologia Experimental

4.1 Aquisição de imagens

A montagem experimental utilizada pode ser observada na figura 1(a). Foi utilizado como dispositivo de aquisição de imagens um sistema constituído por um laser, emitindo no comprimento de onda de 670 nm e potência de 0,9 mW, com uma lente cilíndrica para a formação de uma linha laser e um detector CCD (*Charge-Coupled Device*) como sensor da radiação reflectida, apoiados numa mesa giratória motorizada que controla o ângulo de varrimento [8].

A amostra a ser analisada foi colocada perpendicularmente à direcção do feixe, a uma distância apropriada para que se obtenha a melhor profundidade de campo do sistema. É então efectuado o varrimento da área a inspecionar pela linha laser de modo a captar a imagem.

Com a escolha de um ângulo de varrimento de 25° e de uma definição de 1000 “perfis”, dividiu-se a divisão da área varrida em 1000 secções, obtiveram-se as coordenadas em x , y e z de mais de 300.000 pontos da superfície, conseguindo-se assim uma imagem de alta resolução. As imagens assim adquiridas foram posteriormente tratadas no programa *Polyworks*.

4.2 Tratamento de imagens (*Polyworks*)

Este programa contém diferentes módulos[9], entre os quais foram utilizados três: o *IMAlign*, o *IMMerge*, e o *IMEdit*.

O módulo *IMAlign*, permite não só agrupar imagens do mesmo objecto, mas também, escolher a área de interesse, eliminando as restantes.

Através do módulo *IMMerge* são fundidas as diversas imagens numa estrutura poligonal de triângulos, que poderá ser posteriormente editada.

O módulo *IMEdit* permite fazer o tratamento e edição final da imagem, consoante os objectivos pretendidos, através da criação de planos, secções transversais, medição de distâncias na imagem, etc. É igualmente possível criar superfícies que preencham falhas na imagem.

Para efectuar a medição da profundidade dos canais são traçadas secções transversais ao longo da superfície a ser analisada, ou seja, essa área é dividida em secções. A imagem é colocada de forma que os canais se encontrem de perfil e sejam visíveis os cortes da secção ao longo do seu comprimento, como é observado na Fig. 5.

Na superfície da placa é criado um plano em relação ao qual serão efectuadas as medidas de profundidade. No interior do canal, através da utilização do cursor, são escolhidos os vértices e de seguida obtém-se a distância entre eles e o plano. É então calculada a média dos valores de profundidade adquiridos ao longo de cada canal.

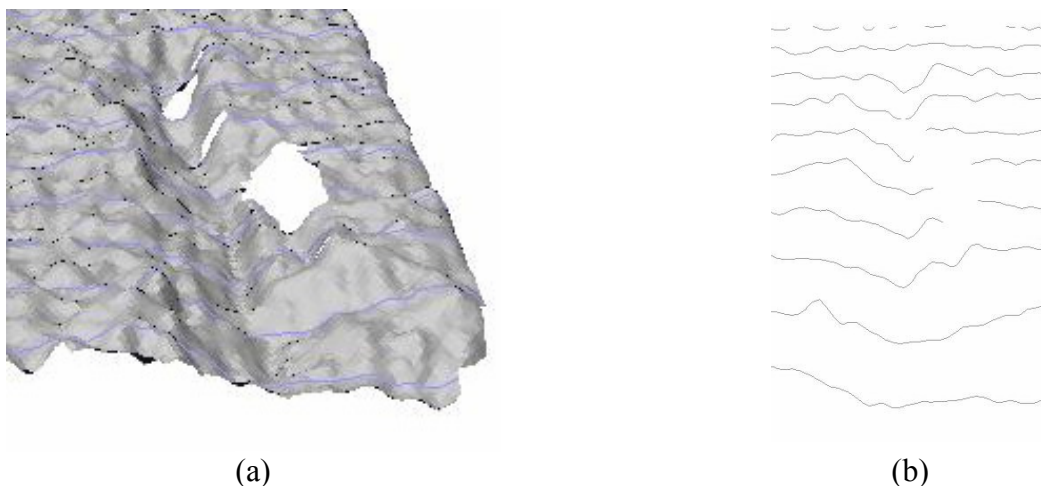


Fig. 5 –Visualização (a) de um canal e (b) respectiva secção transversal.

4.3 Procedimentos

Inicialmente a metodologia foi aplicada à amostra padrão de forma a estabelecer os critérios de análise. O facto de serem conhecidas as dimensões exactas dos canais permitiu definir os melhores procedimentos, não só no que se refere ao posicionamento da peça a analisar, seu pré-tratamento e parametrização do dispositivo de digitalização, mas também relativamente aos critérios de análise da imagem tridimensional obtida.

Uma consequência da análise da imagem da placa padrão resultou na decisão de, devido à fraca reflectividade da grafite, aplicar um pó branco de granulometria reduzida ($\ll 1\mu\text{m}$) sobre a sua superfície. Desta forma, foi possível obter uma imagem com a qualidade necessária para a sua correcta visualização.

Definida a metodologia a ser seguida, esta foi aplicada ao controlo dimensional dos canais processados por laser. O processamento foi realizado através da aplicação de radiação laser infravermelha, emitida por lasers de CO_2 e Nd:YAG, de comprimentos de onda $10,6\mu\text{m}$ e $1,06\mu\text{m}$, respectivamente.

5. Resultados

Tomando por base a teoria e as metodologias apresentadas na secção precedente, os resultados obtidos são expostos de seguida.

A implementação da técnica à amostra padrão permitiu obter a imagem tridimensional da sua superfície, apresentada na fig. 4(b), a partir da qual se pôde, por análise de cada canal, confirmar através do método as dimensões esperadas.

A fig. 6 mostra um exemplo de imagem obtida numa placa processada por laser. São visíveis zonas sem informação (a branco na imagem), devidas quer a absorção do feixe de varrimento (ou reflexão insuficiente), quer a reflexões não captadas pela câmara, ou ainda zonas de sombra na própria amostra. Observou-se que estas zonas também dão informação do grau de qualidade do processamento por laser – sujeito a um excesso de energia, o material sofre alterações estruturais e de reflexão, desviando o feixe da direcção da câmara. A fig. 7 exemplifica o resultado, na imagem obtida, de algumas dessas situações.

Os valores medidos apresentam imprecisões na ordem de 10% na medida da profundidade dos canais. Com base na análise dos perfis, observou-se que quanto mais térmica é a radiação de processamento utilizada mais afectada fica a fronteira dos canais e que, na sua abertura, o número de passagens não influencia a profundidade obtida.

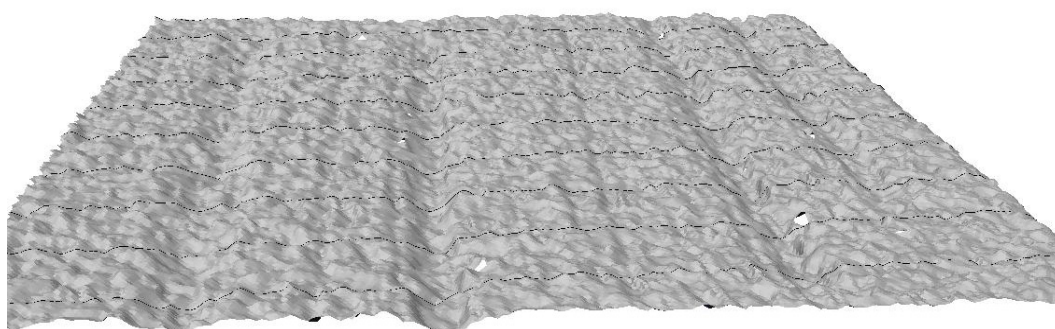


Fig. 6 – Imagem obtida para a medição da profundidade de pistas processadas por laser. Cada pista corresponde a parâmetros próprios de processamento.

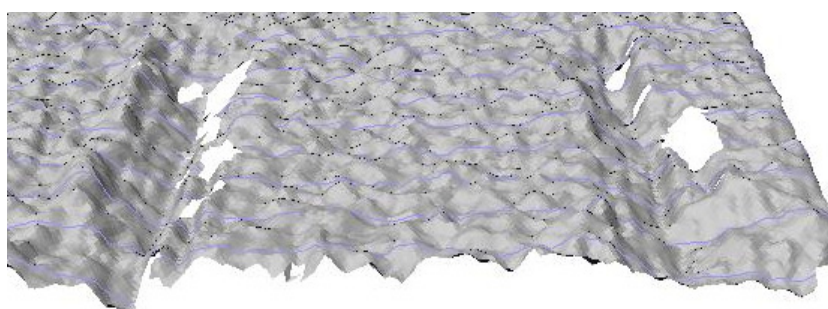


Fig. 7 – Zonas sem informação na imagem obtida de duas pistas.

6. Conclusões

No controlo de qualidade e medição da profundidade de canais processados em placas de grafite, o sistema de triangulação laser demonstrou a sua eficácia.

A comparação entre os resultados obtidos por triangulação laser com os conhecidos da placa padrão de referência evidência uma boa concordância na medição de profundidades e permitiu estabelecer os procedimentos de análise e critérios de medição.

O trabalho realizado permitiu validar a aptidão da técnica proposta, evidenciando as suas potencialidades para aplicações de engenharia e o estender das potencialidades do método ao diagnóstico qualitativo e quantitativo de superfícies processadas por laser.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Doutor Manuel Abreu e ao Eng. Cabrita Freitas pelo criar de condições fundamentais a este estudo, bem como à SRE – Soluções Racionais de Energia pela cooperação fornecida.

Um agradecimento especial ao Eng. Pedro Santos e ao Sr. Fernando Monteiro por todo o apoio fornecido no âmbito deste trabalho.

Referências

- [1] Paulo Soeiro de Carvalho, “Energia 2050 - Dois Futuros Possíveis”, Informação Internacional, 2001 Vol. II, Ministério das Finanças, Departamento de Prospectiva e Planeamento, pg. 177 – 200, 2002.
- [2] Kambiz Nayebi, *et Al*, “A Machine Vision Profile Measurement System for Effective Wheel Maintenance”, Proceedings of the Conference Interaction User-Producer, Indian Railways, India, pg. 79-85, 2002.
- [3] Liviu Bursanescu, François Blais, “Automated Pavement Distress Data Collection and Analysis: a 3-D Approach”, IEEE Proceedings of International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, 12-15 de Maio de 1997, Ottawa, Canadá, pg. 311-317, 1997
- [4] Hoa G. Nguyen, Michael R. Blackburn, “A Simple Method for Range Finding via Laser Triangulation”, Technical Document 2734, United States Navy, Janeiro 1995.
- [5] Fernando D. Carvalho *et Al*, “A laser triangulation technique for textured surface shape analysis in industrial applications”, SPIE Proceedings, Vol. 2354, pg. 170-180 (1994).
- [6] Metals and Materials for Research and Industry, Goodfellow, Catalogue 1990/91, pg. 142.
- [7] J. Steinbeck *et Al*, “A model for pulse laser melting of graphite”, Journal of Applied Physics, 58 (11), pg. 4378, 1985.
- [8] Shape Grabber – 3D Scanning Systems User’s Manual, ShapeGrabber Inc., 2001.
- [9] PolyWorks – software Tools for 3D Imaging Systems, InnovMetric Software Inc., 1999.