

# **Padrões de Rugosidade produzidos em vidros, metais e materiais carbonosos com laser de CO<sub>2</sub> e Cu-Hbr para aplicações em Metrologia**

## **Fábio Dondeo Origo**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, Rod. Tamoios, Km 5.5, Torrão de Ouro, 12220-001, São José dos Campos, SP .

dondeo@ieav.cta.br

## **Rozeli Filomena de Oliveira**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, São José dos Campos, SP

## **Milton Sérgio Fernandes de Lima**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, São José dos Campos, SP

## **Walter Miyakawa**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, São José dos Campos, SP

## **Alvaro José Damião**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, São José dos Campos, SP

***Resumo.** Neste trabalho estudamos a geração de padrões periódicos de rugosidade, para aplicações em Metrologia, através de irradiação por laser de Cu-Hbr ou de CO<sub>2</sub> em vidros (BK7, zerodur, vidro comum), metais (liga de titânio, aço rápido, cobre, inconel) e materiais carbonosos como o carbono vítreo.*

***Palavras-chave:** laser, metrologia, padrão, rugosidade.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Na caracterização mecânica de superfícies, um aspecto bastante relevante é o de rugosidade, a qual se relaciona, por exemplo, com deslizamento, atrito, vedação, adesão de materiais de acabamento superficial e lubrificação.

Para a medição de rugosidade é necessário que o rugosímetro utilizado seja calibrado através de padrões com valores conhecidos de rugosidade. Os padrões de rugosidade comerciais usados no Brasil são importados e relativamente caros. Padrões de rugosidade geralmente possuem ranhuras com espaçamento e amplitude uniformes, ou seja, são padrões periódicos. As ranhuras podem ser senoidais, triangulares ou triangulares com vales truncados. O espaçamento e a amplitude são geralmente projetados para que o valor da rugosidade média (Ra) seja de aproximadamente de 3  $\mu\text{m}^1$ .

A produção de padrões por texturização a laser teria como vantagem a rapidez e simplicidade do processo. Neste trabalho mostramos um estudo sistemático para a obtenção de padrões de rugosidade em materiais diversos como vidros (BK7, zerodur, vidro comum), metais (liga de titânio, aço rápido, cobre, inconel) e materiais carbonosos como o carbono vítreo. As fontes de irradiação utilizadas foram laser e de Cu-Hbr (visível,  $\lambda=510$  nm) e de CO<sub>2</sub> (infravermelho,  $\lambda=10,6$   $\mu\text{m}$ ).

## **2. EXPERIMENTAL**

Os materiais irradiados por laser neste trabalho foram vidro óptico BK7, vidro comum (lâmina de microscópio) e Zerodur, os metais liga de titânio Ti-6Al-4V, aço rápido, cobre e liga inconel 600. O material carbonoso usado foi carbono vítreo.

A irradiação dos metais utilizados e do carbono vítreo foram feitas por um laser pulsado de Cu-HBr (pot.média até 8W, frequência de 14KHz,  $\lambda=510$  nm) desenvolvido no Instituto de Estudos Avançados do CTA. Como os vidros usados neste trabalho são transparentes no visível, para estes materiais foi utilizado laser de CO<sub>2</sub> Synrad de potência modulada (pot. média até 60W, frequência de 5 KHz  $\lambda=10,6\mu\text{m}$ ). Na saída de cada um desses lasers existe uma cabeça de gravação acoplada, que apresenta um sistema de espelhos móveis os quais permitem que o feixe de laser, focalizado sobre a superfície da amostra, se movimente sobre a mesma e ‘desenhe’ figuras previamente escolhidas e inseridas no *software* de controle dessa cabeça de gravação como ilustra a Figura 1. A irradiação das amostras deste trabalho teve a forma ilustrada nessa mesma figura, com linhas paralelas conectadas entre si. A separação entre as linhas paralelas, potência e velocidade da escrita são parâmetros que podem ser variados independentemente. No caso de metais, apenas a potência irradiada foi alterada e os demais parâmetros permaneceram constantes. Para os materiais vítreos e carbono vítreo, a velocidade, potência e o espaçamento entre ranhuras foram variados.

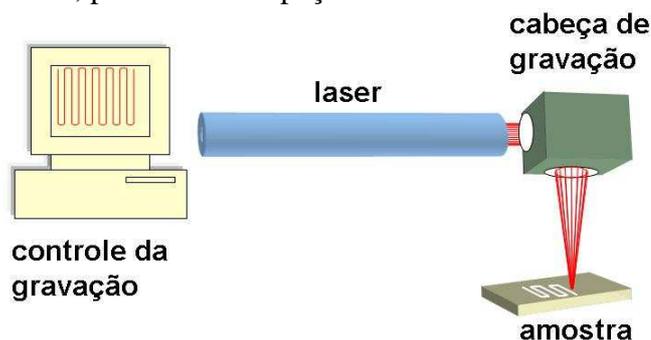


Figura 1 – Ilustração do método de formação de estruturas periódicas na superfície das amostras. Um padrão inserido via software é reproduzido na amostra através da cabeça de marcação.

O perfil e a rugosidade das amostras irradiadas foram analisados num rugosímetro Mahr-Perthen S8P com ponteira mecânica de diamante RHT6-50. Micrografias das amostras foram obtidas num microscópio óptico Reichert Polyvar 2 Met; com magnificação máxima de 2000 vezes, acoplado a uma câmera CCD para captura de imagens. A comparação da variação de massa de amostras de vidro antes e após tratamento com laser foi feita numa microbalança Mettler AT21 Comparator.

Análise termo-gravimétrica (TGA) das amostras de carbono vítreo foram feitas num Termoanalisador Perkin Elmer modelo TGA 7 utilizando ar sintético.

O cálculo da distribuição de temperatura atingida nos materiais durante a irradiação laser foi realizado através de programa de computador<sup>2</sup> baseado no método de Rosenthal<sup>3,4</sup> que leva em conta o movimento da fonte de calor (laser no presente caso) sobre a superfície estudada, assumindo que as constantes ópticas do material não dependem da temperatura e desconsiderando mudanças de fases.

## 2.1. Materiais vítreos

Foram irradiadas com laser de CO<sub>2</sub> linhas paralelas sobre a superfície de vidro comum (sodalime), vidro óptico BK7 (borossilicato) e vidro Zerodur. Este último é um material com coeficiente de dilatação baixo de cerca de  $1.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  para temperaturas entre 20°C e 700°C. Variamos a velocidade do laser entre 0,1 e 3 m/s e a potência entre 1W e 50W. Para a combinação de potência e velocidade de escrita do laser de CO<sub>2</sub> – 20W e 2m/s, foi possível formar padrões periódicos na superfície de vidros (Figura 2a). O perfil desse padrão mostra que as ranhuras têm profundidade de cerca de 1 $\mu\text{m}$  e largura de 150  $\mu\text{m}$ . Esses padrões consistem em ranhuras paralelas com perfil em forma de ‘U’, ou seja, com fundo arredondado.

As ranhuras se formam no sentido perpendicular às linhas paralelas percorridas pelo feixe de laser, conforme ilustrado na Figura 2b. Essa formação periódica se dá pela modulação da potência do feixe de laser ao percorrer uma linha sobre a superfície da amostra. A figura 2c mostra uma

imagem de microscopia óptica da superfície irradiada de uma amostra de vidro soda-lime. As amostras irradiadas de vidro BK7 apresentaram perfil periódico idêntico.

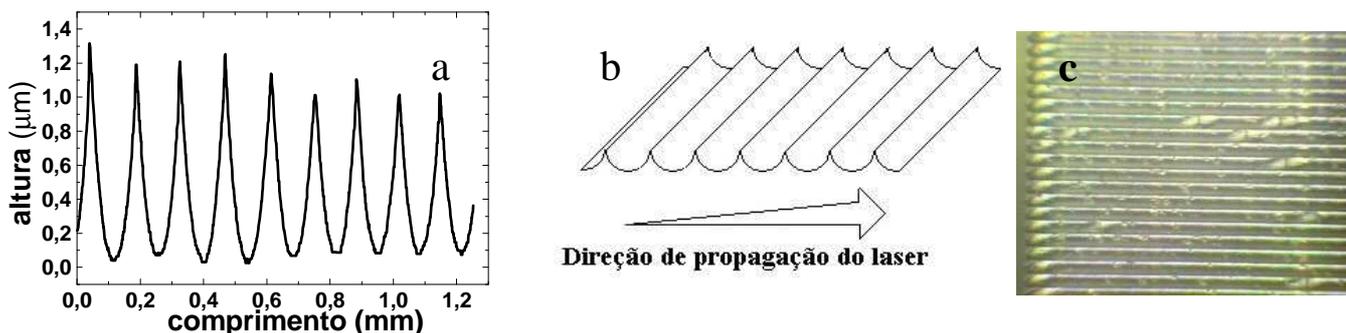


Figura 2 – a) Perfil de amostra de vidro soda-lime após irradiação com laser de CO<sub>2</sub>. b) Conforme a ilustração, as ranhuras são formadas no sentido perpendicular à propagação do laser devido à modulação de potência do mesmo. c) micrografia de amostra de vidro soda-lime com perfil periódico gerado por laser. A separação entre cada ranhura é de 150 μm.

Essas amostras têm regiões onde a amplitude chega a variar 30%, ou seja, a periodicidade é baixa. Além disso, os padrões formados em vidro apresentam problema de destacamento. Num intervalo que varia de alguns segundos à minutos após a irradiação, ocorre o destacamento de grande parte da superfície irradiada. Uma camada da superfície do vidro com espessura da ordem de 30 μm se destaca do restante do bloco. O local de irradiação do laser chega a fundir o material e resfriar em intervalos muito curtos, da ordem de milissegundos. O rápido resfriamento de vidros tratados com laser pode dar origem a microtrincas<sup>5</sup> causando os destacamentos das amostras. A figura 3a mostra uma micrografia de uma amostra em que parte da superfície foi destacada após irradiação. As flechas brancas mostram trincas que deram origem ao destacamento do material. Conforme mostrado na figura 3b, a massa de material que se destaca é diretamente proporcional à potência do laser. Para potência inferior a 5W não há destacamento. Porém, para esse valor, não há a formação de padrões periódicos sobre a superfície da amostra.

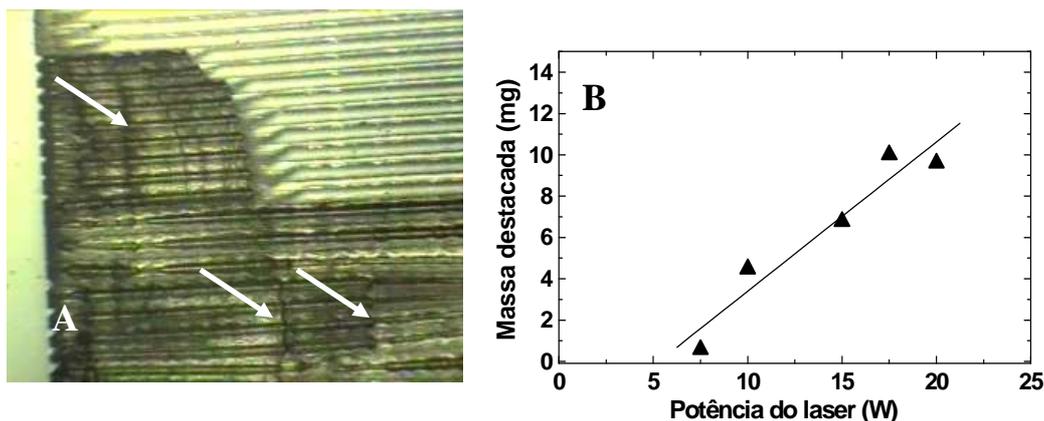


Figura 3 – a) Micrografia de amostra de vidro soda-lime com magnificação de 50X. A região escura corresponde à parte da amostra em que houve destacamento da superfície. As trincas são indicadas por flechas. b) Variação da massa que se destaca em função da potência do laser para vidro soda-lime e área irradiada de 6 cm<sup>2</sup> e velocidade de irradiação de 2m/s.

## 2.2. Metais

Na figura 3 observamos os perfis das amostras metálicas irradiadas com laser de Cu-HBr com potências médias de 2W e 4W. Esses perfis foram medidos no rugosímetro com a ponteira mecânica se deslocando perpendicularmente ao sentido das ranhuras formadas pelo laser. Notamos que todos os metais irradiados apresentam uma elevação da superfície nas laterais da região irradiada. Essa formação se deve à combinação dos efeitos de oxidação pela atmosfera, induzido

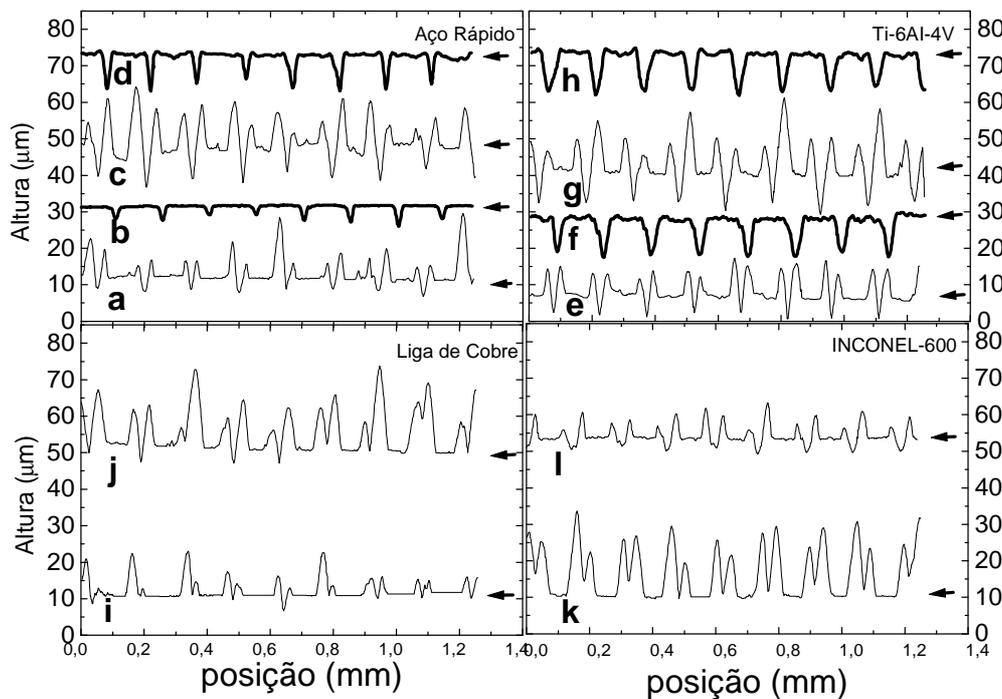


Figura 4 - Perfil das ranhuras formadas por irradiação com laser de Cu-Hbr com diferentes potências. A seta do lado direito de cada curva indica a posição da superfície antes da irradiação. Aço-rápido: a) 2W, b) 2W seguido de lixamento, c) 4W, d) 4W seguido de lixamento. Liga de Ti: e) 2W, f) 2W seguido de ataque químico, g) 4W, h) 4W seguido de ataque químico. Liga de Cobre: i) 2W, j) 4W. Inconel 600: k) 2W e l) 4W.

pela alta temperatura atingida durante a irradiação, e pelo resfriamento de gotículas do metal liquefeito que foram expelidas para a borda da ranhura durante a sua formação. Observamos que com o aumento da potência do laser a profundidade das ranhuras aumenta. Um caso interessante é da liga de Inconel, que ao contrário das demais, o aumento da potência reduz a quantidade de óxido formado na borda da ranhura.

De uma forma geral, a irradiação dos metais não gera estruturas com alta periodicidade. Mostramos que essa periodicidade pode ser melhorada através de lixamento (ex: Inconel) ou do ataque químico para remoção de óxido (ex: liga de Ti). No último caso a remoção foi feita com uma solução de ácido fluorídrico e ácido nítrico. A variação da profundidade das ranhuras do material irradiado foi de aproximadamente 40% para a liga de cobre, 90% para o aço-rápido, 20% para a liga de titânio e 30% para a liga de inconel. Portanto, entre os materiais aqui estudados, a liga de Ti foi aquela que gerou padrões mais periódicos. Mesmo após o tratamento químico dessa liga para a remoção de óxido, ocorre variação de profundidade de ranhura da ordem de 15%. Esse valor é muito alto para aplicação em metrologia.

A figura 4 mostra as ranhuras obtidas por irradiação com potência de 4W. Nos quatro casos podemos notar a irregularidade da forma das ranhuras, em acordo com o perfil já discutido. Devido à grande variação de alturas em torno das ranhuras e à baixa profundidade de campo do microscópio para altas magnificações, as imagens não são perfeitamente nítidas. Entretanto, elas permitem que se observe a irregularidade da forma das ranhuras, a formação de elevação nas suas bordas e a presença de gotículas de metal ressolidificadas como se nota no caso da liga de Cu.

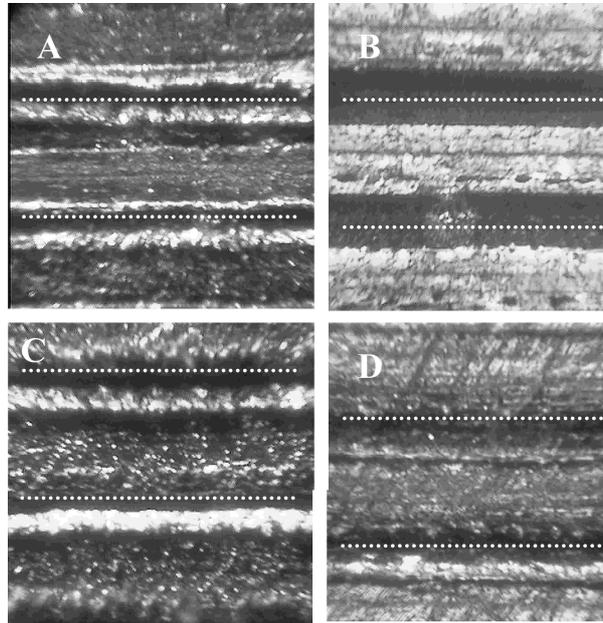


Figura 5 – Microscopia óptica (mag. 50X) das ranhuras formadas por irradiação com laser de Cu-Hbr com potência de 4W. A linha branca pontilhada indica o fundo de cada ranhura fotografada. A separação entre cada ranhura é de 150  $\mu\text{m}$ .

### 2.3. Carbono vítreo

O carbono vítreo monolítico é um material obtido pela carbonização em fase sólida utilizando-se resinas fenólicas ou furfurílicas<sup>6</sup>. Apesar do nome, esse material não é um vidro, sendo assim chamado pela aparência da sua superfície polida como a dos materiais vítreos. Ele apresenta diversas propriedades interessantes como alta dureza, resistência à alta temperatura (em atmosfera inerte), baixa densidade, biocompatibilidade, alta condutividade elétrica, quimicamente inerte, entre outras. Por essas propriedades esse é um material com aplicações na área médica, desportiva, nuclear, eletrônica, elétrica, siderúrgica e aeroespacial, como na produção de giroscópios a fibra óptica<sup>7</sup>.

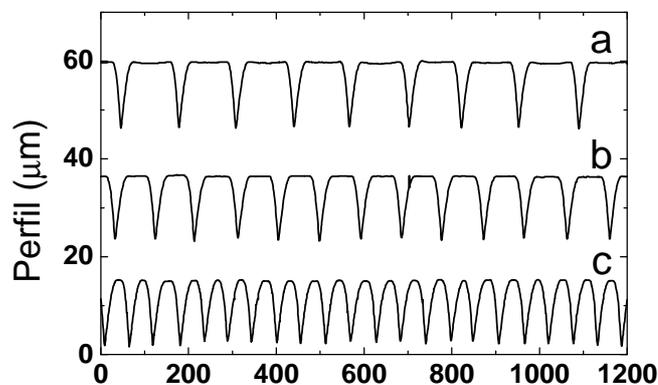


Figura 6 – Perfil das ranhuras de três amostras de carbono vítreo irradiadas nas mesmas condições, variando-se apenas a separação entre as ranhuras.

As amostras foram irradiadas nas mesmas condições que as amostras de metal comentadas anteriormente. Diferentemente dessas, as ranhuras produzidas no carbono vítreo são bastante regulares, tanto na profundidade como na largura. Conforme mostrado na figura 6, elas apresentam formato em “V”, sem material acumulado nas bordas como se observou naquelas produzidas em metais. Os perfis nesse caso correspondem aos casos em que se variou o espaçamento entre as ranhuras, mantendo os demais parâmetros constantes.

As imagens de microscopia óptica da figura 7 mostram que as bordas das ranhuras são bem definidas. Além disso, pode-se notar as marcas dos pulsos de laser no fundo das ranhuras. A sobreposição de áreas de dois pulsos subseqüentes é bastante elevada, sendo de aproximadamente 90%. Isso resulta no fato de que não há variações significativas da largura e profundidade ao longo da ranhura. O formato em “V” do perfil das ranhuras é consequência da sobreposição dos pulsos<sup>8</sup>. Cada região do interior da ranhura foi irradiada por 6 pulsos subseqüentes de laser.

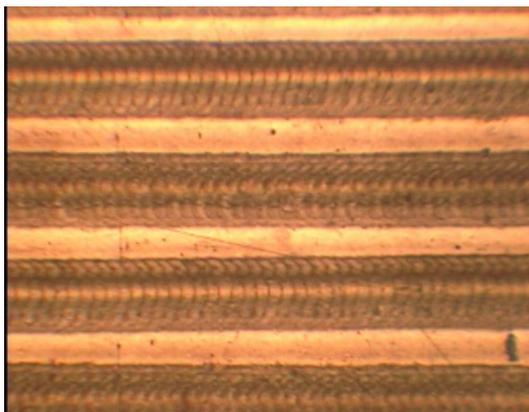


Figura 7 – Microscopia óptica (mag. 200X) mostrando a sobreposição dos pulsos de laser dentro das ranhuras.

A distribuição aproximada da temperatura da superfície do carbono vítreo durante a irradiação foi estimada por simulação computacional. Esses cálculos indicam que a temperatura máxima atingida pelo carbono vítreo durante irradiação seria de 2600C sem considerarmos mudança de fase e reação química com a atmosfera. Experimentos com TGA mostram que a partir de 500 °C o carbono vítreo usado neste experimento começa a reagir com a atmosfera, perdendo massa. Esse experimento mostra que à temperatura de 1200 °C apenas 20% da massa do carbono vítreo prevalece. Portanto, para as condições em que estamos trabalhando vemos que a intensidade do laser é suficiente para remover grande quantidade de material, formando as ranhuras com a passagem do laser.

### 3. CONCLUSÕES

Neste trabalho, diversos materiais foram estudados com o objetivo de se produzir padrões de rugosidade irradiando as amostras com laser de Cu-HBr ou de CO<sub>2</sub>. Foi possível obter canaletas periódicas em vidros borossilicatos (ex. BK7) e soda-lime (vidro comum). Entretanto, as características termo-mecânicas desses materiais, o rápido esfriamento induz a formação de trincas que ocasionam o destacamento de parte da camada periódica formada. Testes em vidros especiais (zerodur) com baixíssimo coeficiente de dilatação mostraram que não há o aparecimento de ranhuras periódicas nestes vidros, embora não ocorra também o efeito de destacamento.

Entre os metais estudados, os experimentos mostraram que o material mais promissor é a liga de titânio Ti-6Al-4V, pois apresentou a superfície mais periódica. Para aumentar a sua periodicidade, convém atacar a superfície com ácido a fim de remover o óxido formado após a irradiação.

O carbono vítreo foi o material onde se obteve as superfícies mais periódicas. Diferentemente dos metais, ao invés de se fundir, o material reage com a atmosfera a partir de 500C, de forma que não aparecem gotículas de material ressolidificado nas bordas das ranhuras.

#### 4. AGRADECIMENTOS

À Dra. Mirabel Cerqueira Rezende do IAE-CTA por fornecer referências e amostras de carbono vítreo; ao ITA-CTA pela disponibilização do Microscópio de Força Atômica; a Luis Carlos Lavras, Guilherme Simões, Wander Ribeiro e Ana Maria L. M. Garcia por ajuda na preparação das amostras.

#### 5. REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> T. Brem, Quality Magazine (online), março de 2001, disponível em <<http://www.qualitymag.com>>.
- <sup>2</sup> O. Hunziker, "TCALC software", Fortran77, Centre de Traitment des Matériaux para laser, 1996.
- <sup>3</sup> D. Rosenthal, Welding Journal 20 (5), 220 (1941).
- <sup>4</sup> D. Rosenthal, Transactions of American Society of Metallurgical Engineering, novembro, 849 (1946).
- <sup>5</sup> G. Allcock, P. E. Dyer, G. Elliner e H. V. Snelling, J. Appl. Phys. 78 (12) 7295 (1995).
- <sup>6</sup> S. Otani, A. Oya, Glasses and amorphous materials in materials science and technology – a comprehensive treatment. Berlim. By Cahn Editor, 1993.
- <sup>7</sup> C. C. Paula, A. C. Silva, E. C. Botelho, M. C. Rezende, Carbon 40, 607 (2002).
- <sup>8</sup> A. C. Oliveira, MICROSSOLDAGEM EM CHAPAS FINAS UTILIZANDO UM LASER DE Cu-HBr, 2006. 112 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.

---

### **Glassy, metallic and vitreous carbon roughness standards produced by Cu-Hbr and CO<sub>2</sub> lasers for metrological applications.**

#### **Fábio Dondeo Origo**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, Rod. Tamoios, Km 5.5, Torrão de Ouro, 12220-001, São José dos Campos, SP .

dondeo@ieav.cta.br

#### **Rozeli Filomena de Oliveira**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, São José dos Campos, SP

#### **Milton Sérgio Fernandes de Lima**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, São José dos Campos, SP

#### **Walter Miyakawa**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, São José dos Campos, SP

#### **Alvaro José Damião**

Instituto de Estudos Avançados , CTA, São José dos Campos, SP

***Abstract:** The aim of this work is to obtain roughness standards through laser irradiation of glasses, metals or vitreous carbons. Cu-HBr and CO<sub>2</sub> laser were applied. We showed that irradiated vitreous carbon surface presents high periodicity, whereas glasses and metals presents problems of microcracking and poor periodicity respectively.*

***Keywords:** laser, metrology, standard, roughness.*