



Metrologia Óptica. Caracterização Microtopografica de Superfícies

Manuel Filipe Pereira da Cunha Martins Costa

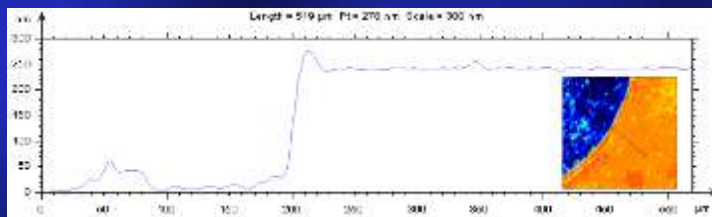
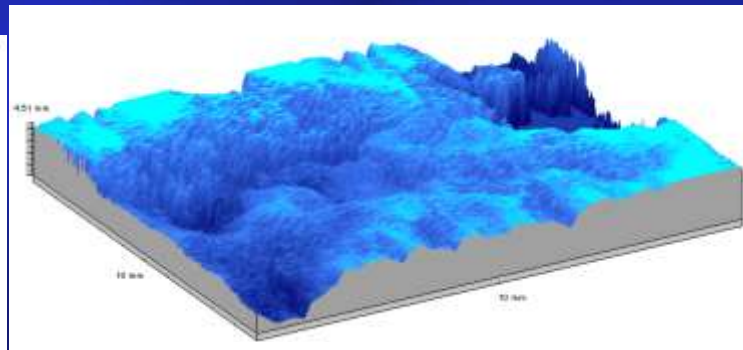
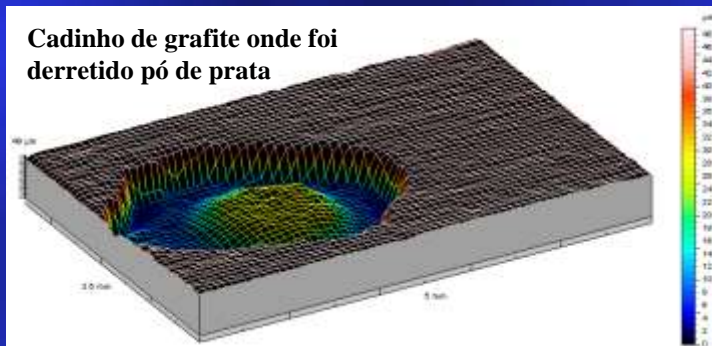
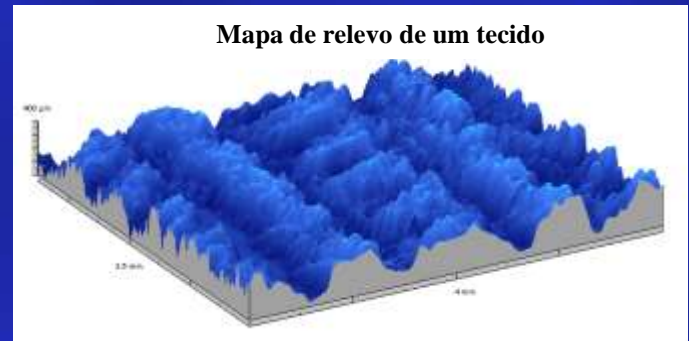
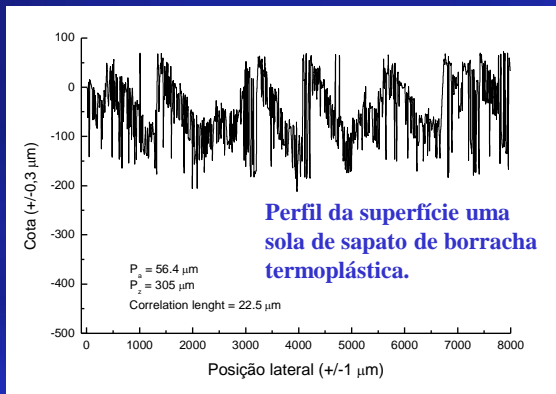
Departamento de Física
Universidade do Minho

mfcosta@fisica.uminho.pt

“Programa Doutoral em Engenharia Física”
Disciplina de Tecnologias Ópticas
Universidade de Aveiro, 13 de Fevereiro de 2015



A caracterização dimensional de superfícies seja rugométrica, perfilométrica ou topográfica é de enorme importância em muitas indústrias. Nesta aula breve faremos uma discussão genérica sobre o tema concretizando com a inspeção óptica não destrutiva da microtopografia de superfícies rugosas apresentando parte do trabalho desenvolvido no Laboratório de Microtopografia do Departamento de Física da Universidade do Minho.

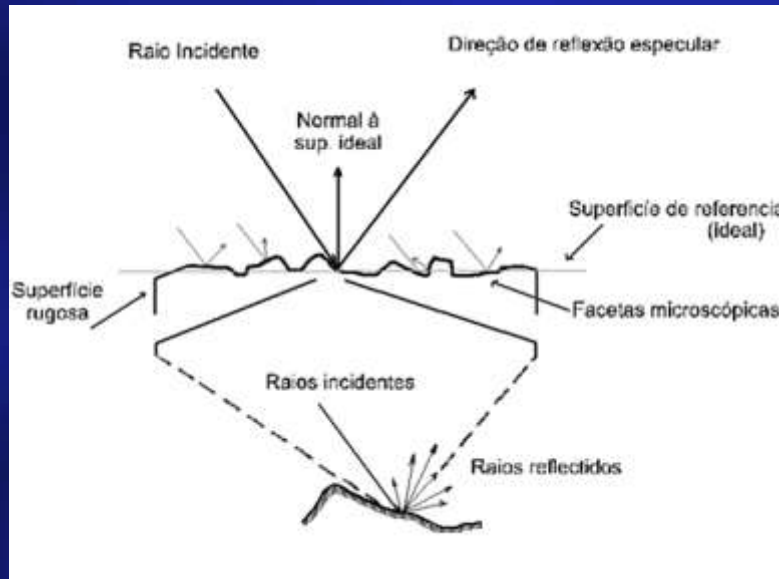


Superfície polida ou rugosa...

Uma superfície será considerada opticamente rugosa se o valor aproximado acima do qual uma superfície pode ser considerada rugosa é o do comprimento de onda da luz que incidindo no objecto nos permite vê-lo, definindo assim como rugosa uma superfície que apresente uma distribuição de desníveis, em relação a um valor médio de cota, tal que a média desses desníveis ou desvios absolutos (a que chamamos rugosidade média) seja superior a algumas décimas de micron, ou a um outro valor definido em função de cada situação de utilização da superfície ou procedimento da sua caracterização metrológica.



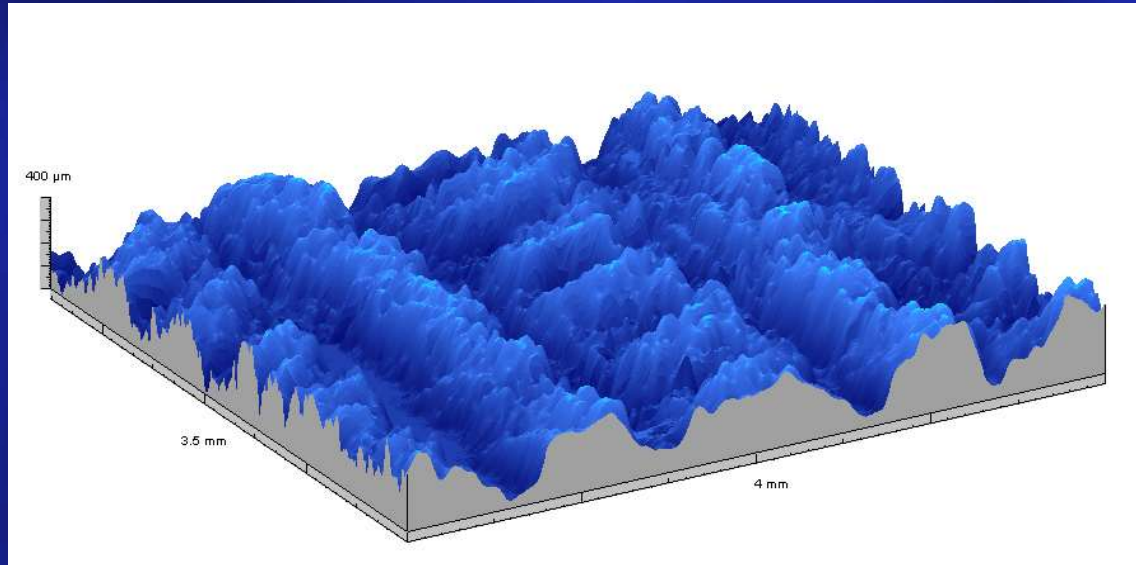
A complexidade da estrutura de relevo de superfícies



A forma como a luz é reflectida por uma superfície depende da sua composição e do seu relevo (em particular da sua micro-estrutura). Observando a luz reflectida pela superfície quando sobre ela se faz incidir um feixe luminoso, poderemos obter informações que nos permitam obter a nossa função relevo.



Rugosidade (microrugosidade), Ondulação (macrorugosidade), Forma ...



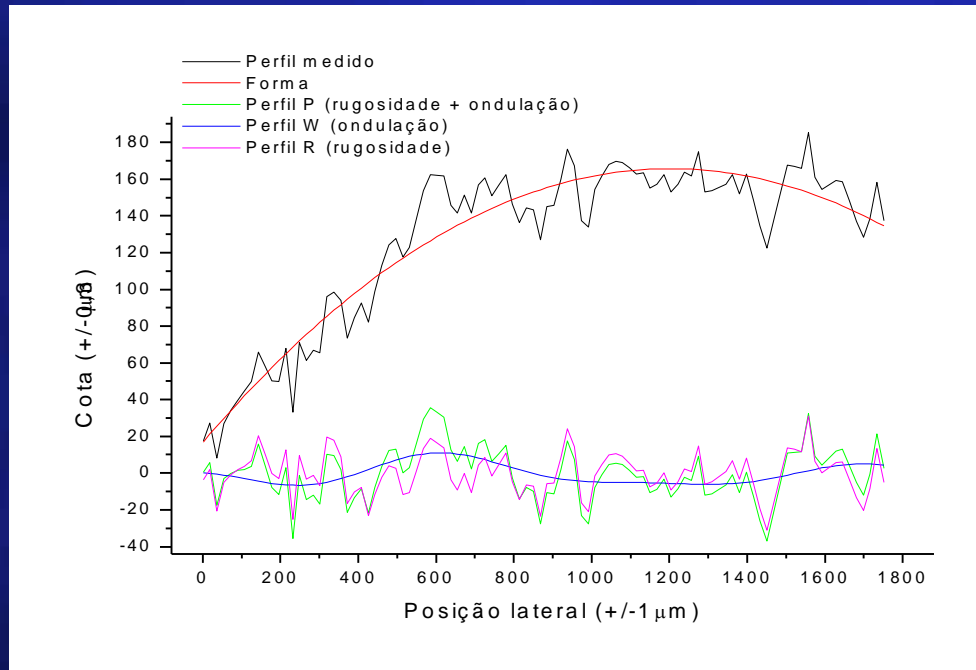
Representação do relevo de duas superfícies rugosas: atrás parte de uma placa de alumínio perfurada; acima uma amostra de tecido.



Quando o espaçamento lateral das irregularidades na superfície é da ordem de algumas décimas até várias centenas de micron referimo-nos à estrutura de rugosidade (propriamente dita) da superfície enquanto que para valores de espaçamento superiores e até vários milímetros estaremos no regime de ondulação (passaremos a utilizar com mais frequência a denominação inglesa waviness directamente relacionável com a nomenclatura dos parâmetros estatísticos de caracterização rugométrica) sendo que em irregularidades desta ordem de grandeza a luz incidente se reflectiria em cada ponto na direcção especular (ISO 1386).

Outra nomenclatura pode ser utilizada, e que consideramos de interesse, em que para além de se caracterizar a forma da superfície, se distingue a sua rugosidade total (P) em duas escalas: de macrorugosidade (W), correspondendo à waviness, e de microrugosidade (R), correspondendo à rugosidade.





Remoção da forma e separação dos regimes de macro e microrrugosidade num perfil obtido de uma amostra de borracha termoplástica.



Necessidade de avaliação não invasiva

Inspeção bi- ou tridimensional

Funções e parâmetros de caracterização topográfica



A complexidade das normas ISO e em particular num tema tão complexo como a rugometria e inspeção topográfica de superfícies em geral, dificulta a sua estrita e completa “obediência”. Como exemplo dessa dificuldade bastaria referir o número de parâmetros estatísticos especificados na norma ISO 1302 ou mais recentemente a norma ISO 4287 de 1997, ISO 12085 (método dos “motif”) e ISO 13565-2 (parâmetros obtidos da curva de Abbott-Firestone) de 1996, dos quais só alguns, em rigor, se podem aplicar à avaliação topográfica (tridimensional) integral de superfícies.

As normas ISO definem 27 parâmetros de amplitude, 3 parâmetros de espaçamento e 17 parâmetros híbridos dos quais 14 relacionados com a curva de Abbott. Para além destes parâmetros bidimensionais uma série de parâmetros 3D foi proposta e estão em discussão. Acresce que ao proceder-se à separação de regimes de rugosidade, para além dos parâmetros (e funções) para o perfil total, P, (ou mapa de superfície, S, se a três dimensões) teremos que obter aqueles parâmetros (e funções) para os regime de ondulação, W, e de rugosidade, R.



Inspection System: MICROTOP.06.MFC / File Name: paupreto20x20_400x400points_par.txt / Statistical Parameters
 Acquisition Date: 17-12-2007 / Effective Surface Area: 398449357 μm^2 / Inspected Points: 400 x 400

2D parameters:

Ra = 51.96 μm	(Ra -> Arithmetic Mean Deviation of the Profile)	Sa = 51.96 μm
Rq = 69.74 μm	(Rq -> Root-mean-square Deviation of the Profile)	Sq = 69.74 μm
Rt = 307.80 μm	(Rt -> Total Height of the Profile)	St = 307.80 μm
Rp = 99.14 μm	(Rp -> Maximum Peak Height of the Profile)	Sp = 99.14 μm
Rv = 208.66 μm	(Rv -> Maximum Valley Depth of the Profile)	Sv = 208.66 μm
Rz = 303.89 μm	(Rz -> Ten-point Height of the Profile)	Sz = 303.89 μm
$\Delta a = 9.01$	(Δa -> Arithmetic Mean Slope of the Profile)	S $\Delta a = 9.16$
$\Delta q = 97.34$	(Δq -> Root-mean-square Slope of the Profile)	S $\Delta q = 98.62$
$\lambda a = 36.25 \mu\text{m}$	(λa -> Arithmetic Mean Wavelength of the Profile)	Ssk = -1.59
$\lambda q = 4.50 \mu\text{m}$	(λq -> Root-mean-square Wavelength of the Profile)	Sku = 4.99
Sm = 403.13 μm	(Sm -> Mean Spacing Between the Profile Peaks)	Sk = 87.22 μm
Rsk = -1.59	(Rsk -> Skewness of the Profile Height Distribution)	Spk = 39.28 μm
Rku = 4.99	(Rku -> Kurtosis of the Profile Height Distribution)	Svk = 181.30 μm
H = 143.67 μm	(H -> Swedish Height of the Profile)	Sr1 = 0.80 μm
Rk = 89.53 μm	(Rk -> Core Roughness Depth of the Profile)	Sr2 = 19.60 μm
Rpk = 33.72 μm	(Rpk -> Reduced Peak Height of the Profile)	
Rvk = 184.55 μm	(Rvk -> Reduced Valley Depth of the Profile)	
Mr1 = 5.95 %	(Mr1 -> Material Ratio at the End of the Peak Portion of the Abbott-Firestone Curve of the Profile)	
Mr2 = 72.96 %	(Mr2 -> Material Ratio at the Beginning of the Valley Portion of the Abbott-Firestone Curve of the Profile)	
A1 = 1.00 μm	(A1 -> "Area" of the Peak Portion of the Abbott-Firestone Curve of the Profile)	
A2 = 24.95 μm	(A2 -> "Area" of the Valley Portion of the Abbott-Firestone Curve of the Profile)	

3D parameters:

Sa = 51.96 μm
 Sq = 69.74 μm
 St = 307.80 μm
 Sp = 99.14 μm
 Sv = 208.66 μm
 Sz = 303.89 μm
 S $\Delta a = 9.16$
 S $\Delta q = 98.62$
 Ssk = -1.59
 Sku = 4.99
 Sk = 87.22 μm
 Spk = 39.28 μm
 Svk = 181.30 μm
 Sr1 = 0.80 μm
 Sr2 = 19.60 μm



Parâmetros e funções estatísticas de caracterização (ISO 4287...)

Rugosidade média

Rugosidade total e os 4 momentos da função relevo

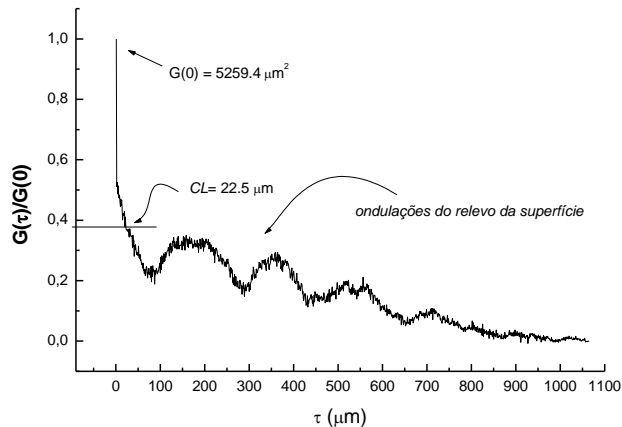
Função relevo $Z=f(X, Y)$

Parâmetros de espaçamento

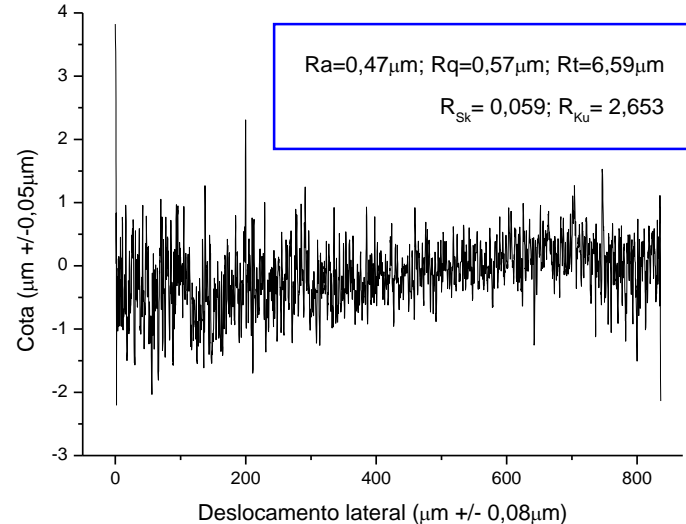
Parâmetros híbridos

Parâmetros 3D

Funções



Perfil obtido na superfície de uma placa de aço polido



Alguns parâmetros estatísticos

$$R_a = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |\Delta Z_i|$$

$\Delta Z_i = |Z_m - Z_i|$, em que

$$Z_m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Z_i$$

$$R_a = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |\Delta Z(x)| dx$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta Z_i^2}$$

$$R_t = R_p + R_v \quad (\textit{peak to valley})$$

$$R_p = |\text{máx}\{\Delta Z_1, \Delta Z_2, \dots, \Delta Z_N\}| \quad R_v = |\text{mín}\{\Delta Z_1, \Delta Z_2, \dots, \Delta Z_N\}|$$

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \left[\sum_{i=1}^5 |\Delta Z_{p_i}| + \sum_{i=1}^5 |\Delta Z_{v_i}| \right] \quad (\textit{ten-point height})$$



$$R_{sk} = \frac{1}{N \cdot R_q^3} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta Z_i^3 \quad (\textit{skewness})$$

$$R_{ku} = \frac{1}{N \cdot R_q^4} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta Z_i^4 \quad (\textit{kurtosis})$$

Quando $R_{sk}=0$ e $R_{ku}=3$ a superfície terá uma distribuição normal de cotas.

$$R_a = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot R_q$$

Comprimento de onda médio

$$\lambda_a = 2\pi \cdot \frac{R_a}{m}$$

em que \bar{m} é a média dos declives da superfície.

Espaçamento médio entre picos

$$S_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n s_i$$

onde n indica o número de picos encontrados no perfil, sendo s_i a distância entre dois zeros alternados da função relevo.



Declive local, m_i , será:

$$m_i = (Z_{i+1} - Z_i) / \tau_0$$

em que τ_0 representa a distancia entre pontos de amostragem consecutivos, e $i = 1, 2, \dots, N - 1$.

$$\bar{m} = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} m_i$$

$$\Delta m_a = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} |\bar{m} - m_i|$$

$$\Delta m_q = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} (\bar{m} - m_i)^2}$$

Parâmetros 3D

$$S_a = \frac{1}{M \cdot N} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |\Delta Z_{ij}|$$

Isotropia $S_{tr} = \frac{\tau_f}{\tau_s}$ (*texture aspect ratio*)

$$S_{sc} = -\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \sum_{k=1}^n \left[\frac{\Delta Z_{k_x+1, k_y} + \Delta Z_{k_x-1, k_y} - 2 \cdot \Delta Z_{k_x, k_y}}{\Delta x^2} + \frac{\Delta Z_{k_x, k_y+1} + \Delta Z_{k_x, k_y-1} - 2 \cdot \Delta Z_{k_x, k_y}}{\Delta y^2} \right]$$

curvatura média dos picos da superfície



A forma de representação ou apresentação dos resultados de uma avaliação rugométrica, perfilométrica em particular, está definida pela norma ISO 1302 de 1994:

$$e^a \sqrt[d]{d}^{c(f)-b}$$

em que,

a – rugosidade média

b – método de produção da superfície

c – comprimento de amostragem

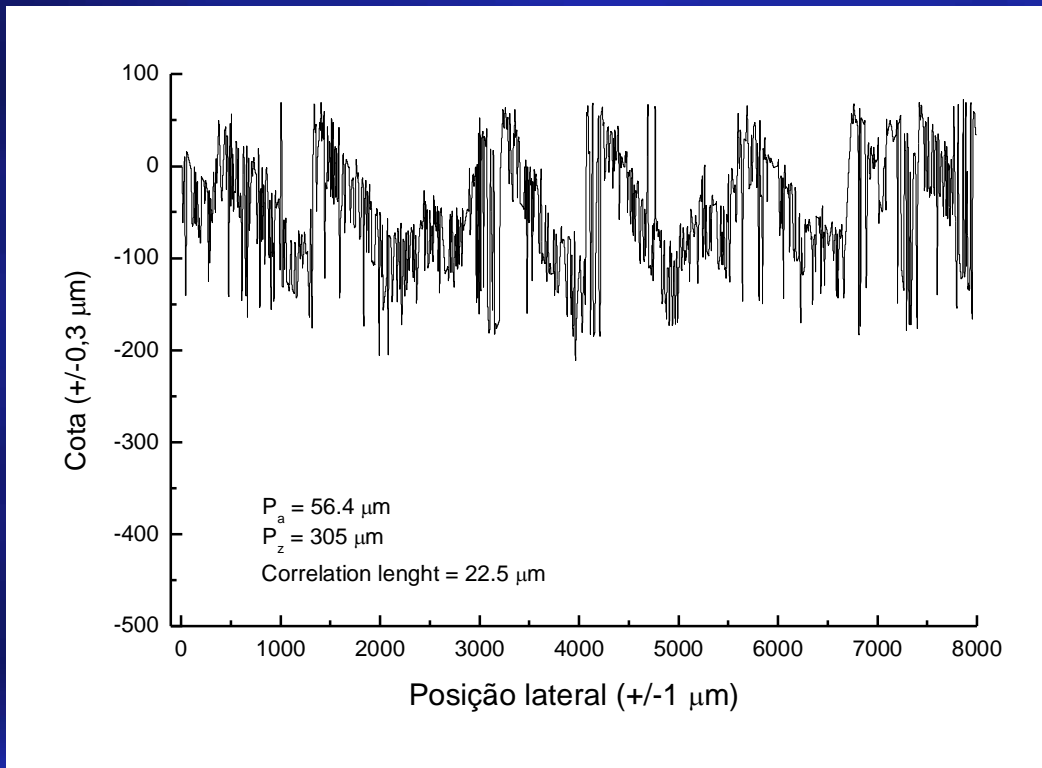
d – direcção de lay (representação simbólica)

e – tolerância de maquinação

f – outros parâmetros de rugosidade (Rq, Rt, Rz,...)



Técnicas de Fourier

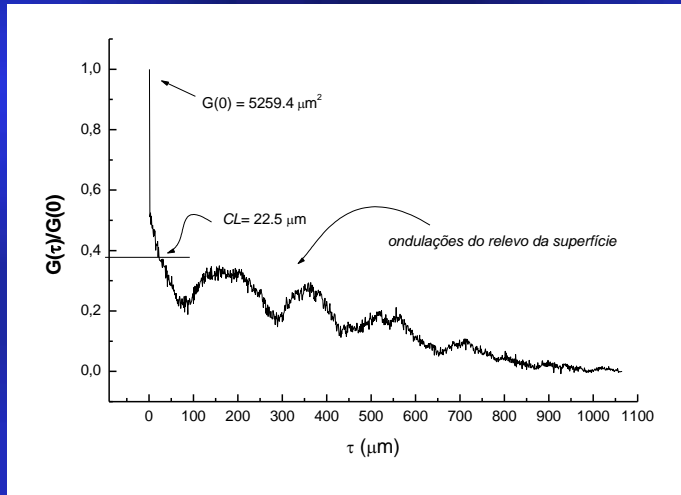


Perfil de uma sola de borracha termoplástica

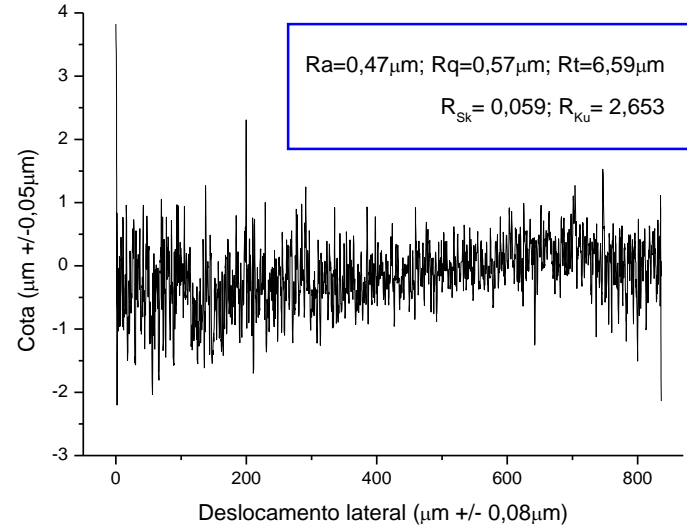


Funções

Autocorrelação



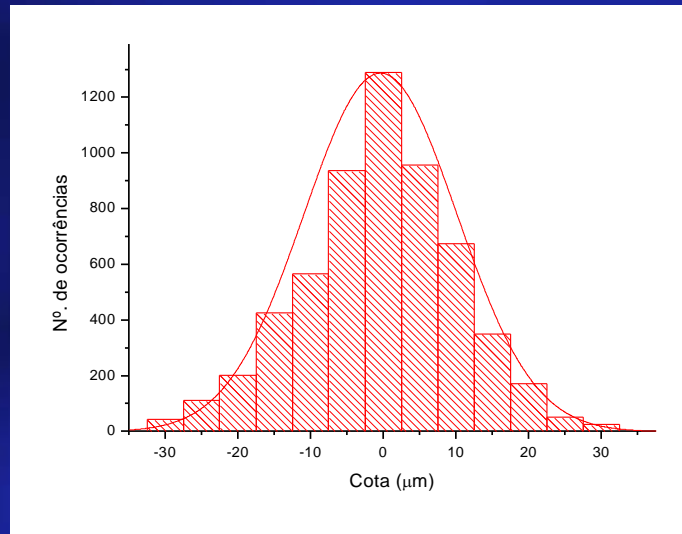
Perfil de rugosidade obtido na superfície de uma placa de aço polido



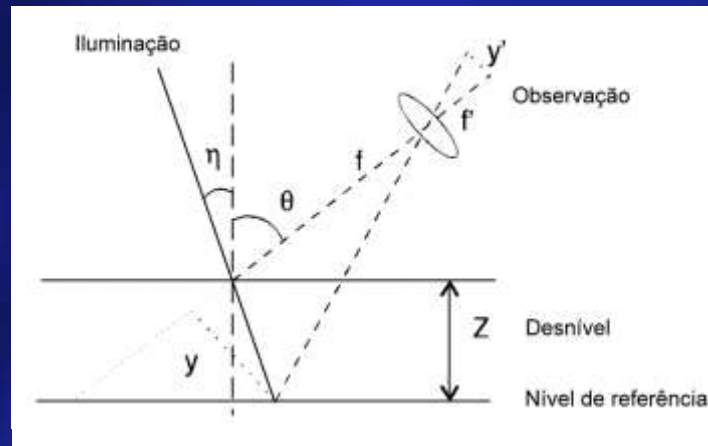
$$AC_Z(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(x')Z(x' - x)dx'$$



Funções



Triangulação



Esquema de triangulação activa com uma direcção de incidência e uma direcção de observação.

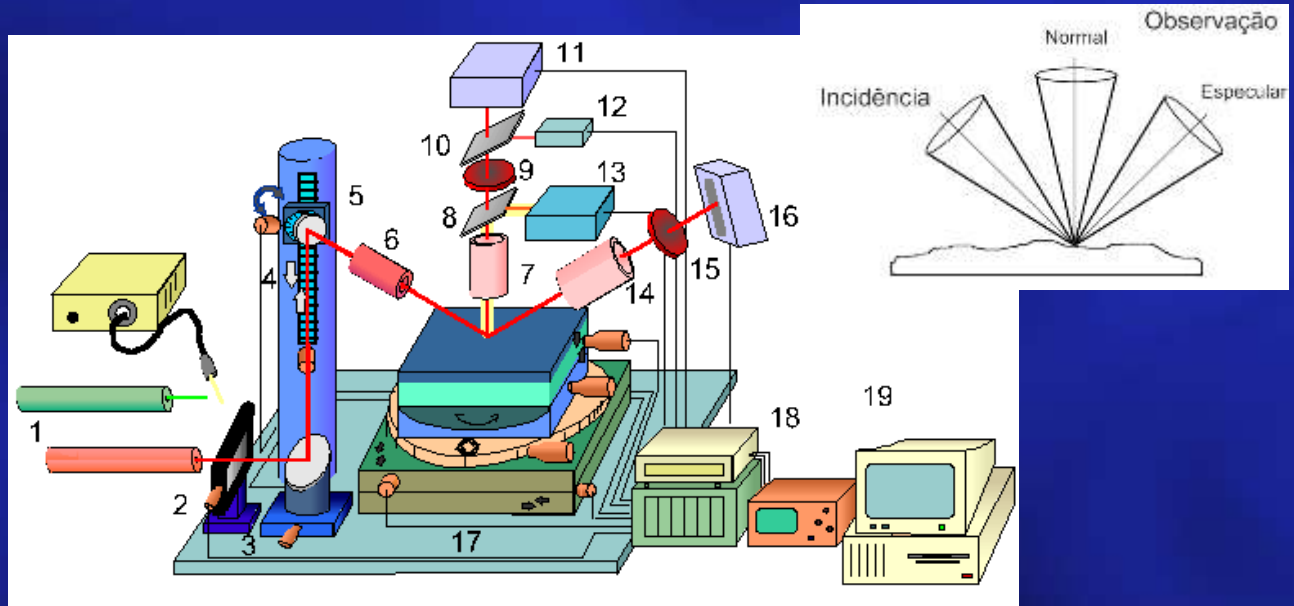
$$y' = M \frac{Z \sin(\eta + \theta)}{\cos \eta + (Z/f) \cot(\eta + \theta)}$$



O sistema de inspeção micrográfica que desenvolvemos foi concebido de forma a permitir a implementação de diferentes aproximações ao método de triangulação óptica.

A inspeção terá de ter em conta as características da amostra em causa e a tarefa metrológica a desenvolver.





Representação esquemática da evolução do sistema desenvolvido para o sistema **MICROTOP.06.MFC**:
 1- sistema de iluminação intermutável; 2- sistema de suporte e isolamento de vibrações; 3- filtro neutro;
 4- sistema de guiagem de luz; 5- sistema motorizado de controlo de ângulo de incidência; 6- sistema óptico de incidência; 7- sistema óptico de observação na direcção normal; 8 e 9- separadores de feixe; 10- filtro de interferência; 11- sistema optoelectrónico de detecção na direcção normal; 12- fotodetector; 13- câmara de vídeo com sistema de iluminação coaxial; 14- sistema óptico de observação na direcção normal; 15- filtro de interferência; 16- sistema optoelectrónico de detecção na direcção normal; 17- suporte da amostra e sistema de posicionamento e varrimento; 18- sistema de controle e aquisição de dados; 19 Microcomputador.



- medição de desníveis com resoluções nanométricas
- inspeção tridimensional de superfícies rugosas com resoluções de poucas centésimas a vários micron
- medição de desníveis até 25 mm,
- com gamas dinâmicas de 1:500 a 1:20000;
- repetibilidades sub-micrométricas;
- resolução lateral da ordem das décimas a alguns micron,
- velocidades de inspeção que podem chegar aos 2000 pontos/s.

Typical figures:

Vertical resolution from 3nm to 0.3 μ m

Lateral resolution 1 μ m

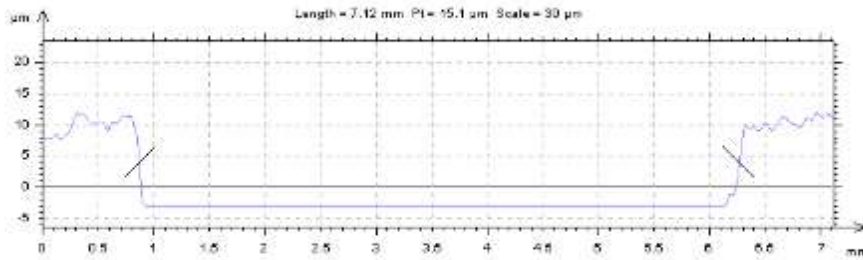
Dynamic range from 1:5000 to 1:20000





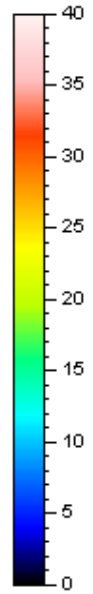
IN

DEL

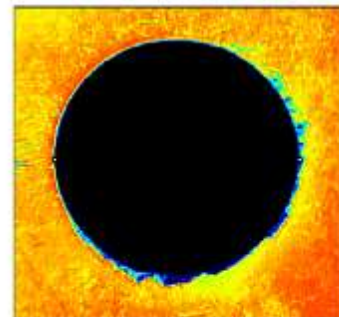
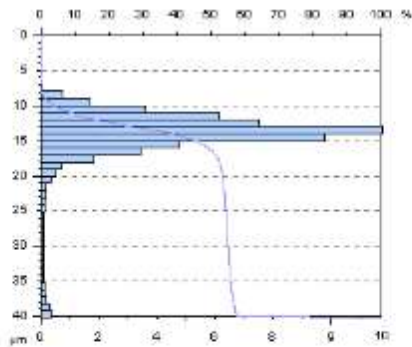


clude parameters μm

- = 8.19 μm
- = 8.33 μm
- = 15.8 μm
- = 9.21 μm
- = 25 μm
- = -0.143
- = 1.09
- = 20.9 μm



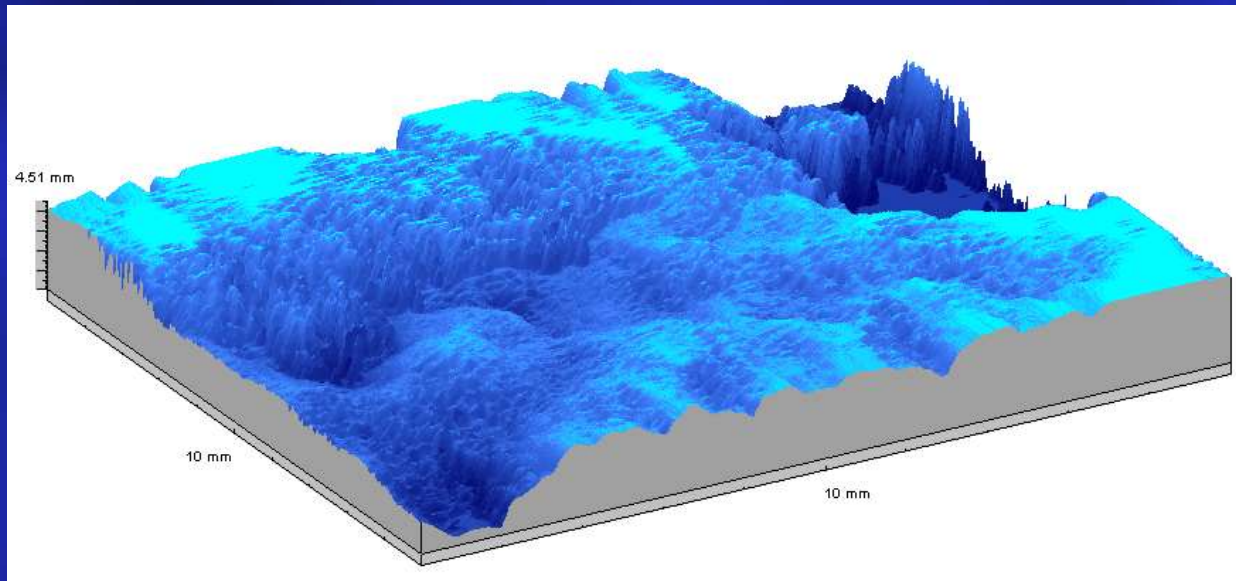
40 μm



Cursor 1: X = 0,006 mm Y = 3,40 mm Z = 0,515 μm
 Cursor 2: X = 6,2 mm Y = 3,40 mm Z = 1,79 μm
 Horizontal distance : 6,29 mm
 Variation in height : 1,28 μm
 Oblique distance : 6,29 mm



Inspeção topográfica da superfície de fractura em blocos de granitos



Mapa de relevo da superfície de um revestimento de barreira térmica de $\text{ZrO}_2\text{Gd}_2\text{O}_3$

Filmes finos e revestimentos

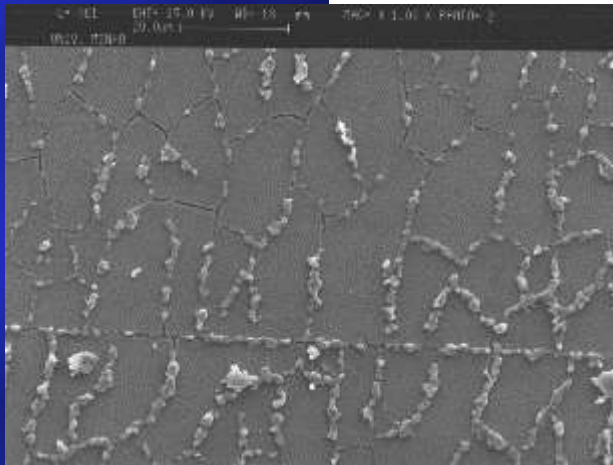
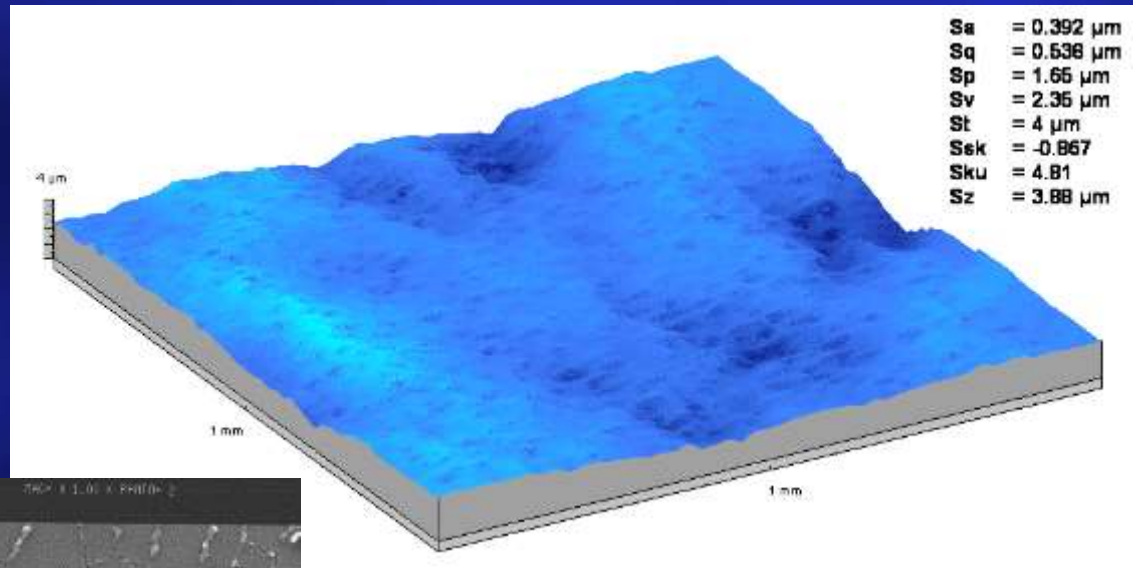
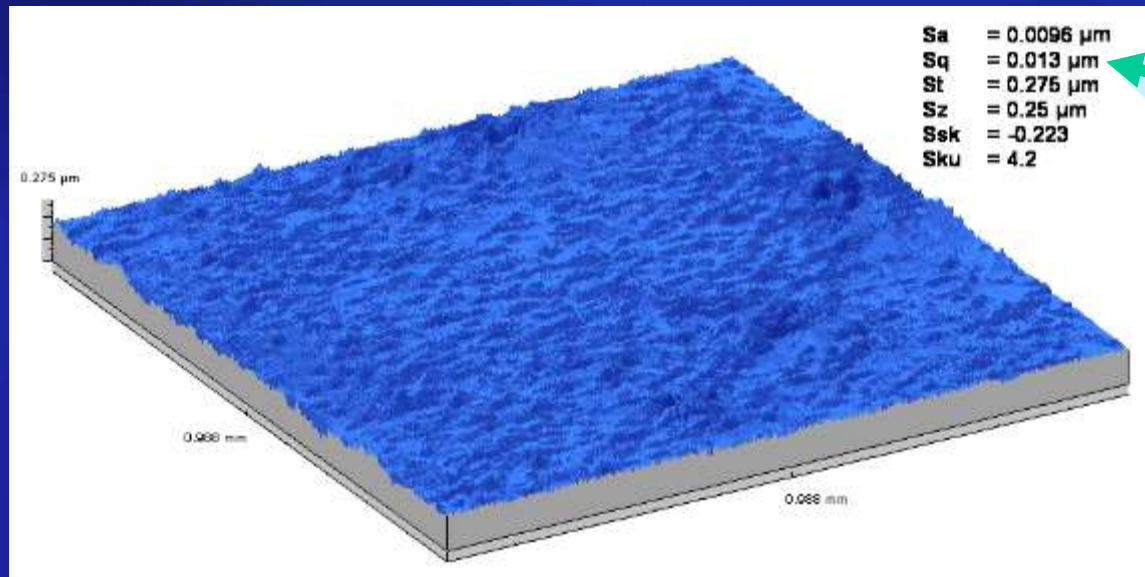


Imagem SEM da superfície

As zonas do filme, entre fracturas, apresentam rugosidades R_q medidas por AFM da ordem dos 5,2 nm, e de 13,6 nm quando medidas por TIS.

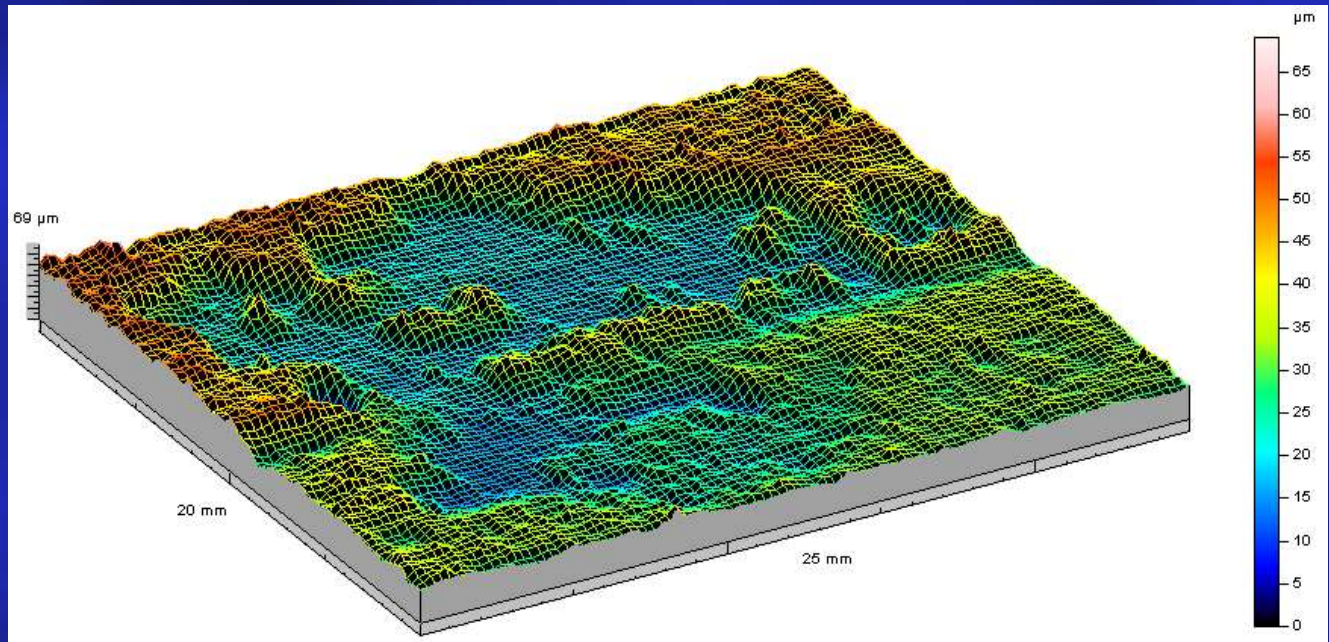




Mapa de relevo da *rugosidade* da superfície obtido por filtragem a um nível de discriminação λ_c de 10 μm



Degradation of the gold coating layer on a French oak bed dated from late XVIII century.



“Programa Doutoral em Engenharia Física”
Disciplina de Tecnologias Ópticas
Universidade de Aveiro, 13 de Fevereiro de 2015

Obrigado

mfcosta@fisica.uminho.pt

