



# PME 3430

## *Materials para Construção Mecânica*

**Profs. Drs.: Newton K. Fukumasu, Deniol K. Tanaka & Amilton Sinatora**

### **Referências:**

**CALLISTER, William D., *Materials science and engineering: an introduction*. 8ed. New York: John Wiley, 2009. 122p. ISBN-13: 978-0-471-73696-7**

**MEYERS, M. A. & Chawla K. K. *Mechanical Behavior of Materials*. Prentice Hall, 1999, 680. ISBN 0-13-262817-1 2**



# Cronograma de Atividades – 1º Semestre 2017

## Proposta – 2

Aula	Data	Tópico do Programa
01	08/03	Apresentação da disciplina, critérios de avaliação e revisão de conceitos
02	15/03	Definição dos temas de trabalho e revisão de conceitos
03	22/03	Processamento de ligas metálicas (fundição)
04	29/03	Processamento de ligas metálicas (laminação e forjamento)
05	05/04	Tratamento térmico de ligas metálicas (diagrama TTT)
-	12/04	<b>SEMANA SANTA – Não haverá aula</b>
06	19/04	Tratamento de superfícies de ligas metálicas (químico e mecânico)
07	26/04	Ligas contra corrosão (Aço Inox)
08	03/05	Aula de exercícios
09	10/05	<b>PROVA – P1 e entrega de TRABALHOS – T1</b>
10	17/05	Processamento de Polímeros (polimerização, vulcanização, temperatura vítrea)
11	24/05	Processamento de Cerâmicas (fundição, sinterização, tratamento térmico)
12	31/05	Cerâmicas avançadas (piezos e termo-elétricos)
13	07/06	Recobrimentos cerâmicos (carbonetos, nitretos, óxidos)
14	14/06	Recobrimentos cerâmicos (carbonetos, nitretos, óxidos)
15	21/06	Compósitos metal/polímero/cerâmicos (fibras de carbono, aramida)
16	28/06	Exercícios e entrega de TRABALHOS – T2
17	05/07	<b>PROVA – P2</b>
18	07/07	<b>PROVA Substitutiva</b>



# Trabalho

- ❖ Trabalho em duas partes:
  - ❖ **T1 entrega em 10 de maio de 2017**
  - ❖ **T2 entrega em 28 de junho de 2017**
  
- ❖ Primeira parte: pesquisa de uma peça/sistema
  - ❖ A seleção de um componente é semi-aberta (depende do aval do professor)
  - ❖ Descrição funcional desse componente (Por que ele é feito com os materiais escolhidos? Quais os requisitos desse componente? Quais os carregamentos? Quais os processos de fabricação?)
  
- ❖ **Segunda parte:** troca do material da peça escolhida
  - ❖ Indicar a rota de fabricação da peça escolhida utilizando outro material (metálico, cerâmico, polímero, compósito)
  - ❖ Comparar as duas rotas e indicar as diferenças
  - ❖ Indicar os motivos específicos da escolha do segundo material e sua rota de fabricação

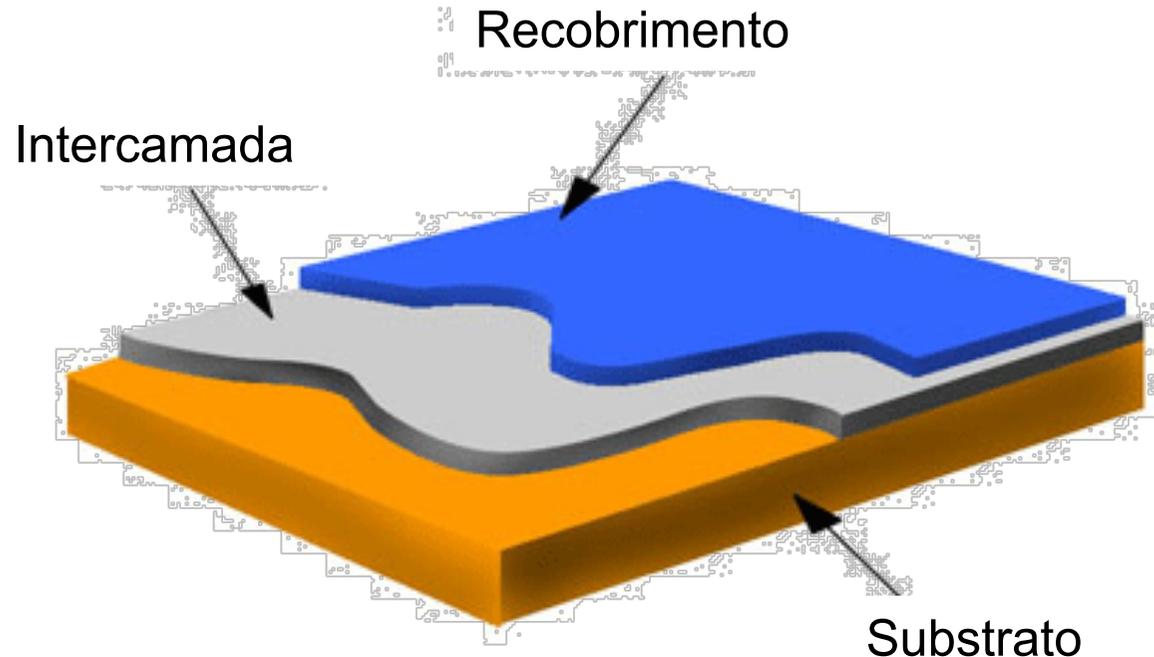


# Tipos de Recobrimentos

- ❖ **Metálicos**
  - ❖ Zn, Cr, Ag, Au, Cu...
- ❖ **Cerâmicos**
  - ❖ Óxidos ( $ZnO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_x$ )
  - ❖ Carbonetos ( $NbC$ ,  $TiC$ ,  $SiC$ )
  - ❖ Nitretos, Boretos...
- ❖ **Poliméricos**
  - ❖ PVA
  - ❖ PU
  - ❖ Resina acrílica



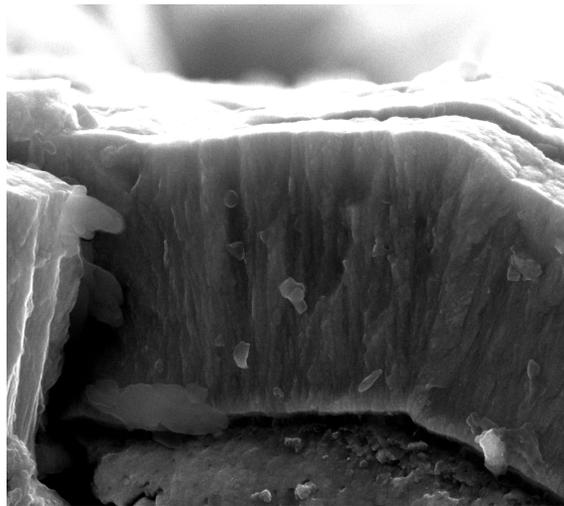
<http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-679742179-400gr-corante-em-po-para-fabricaco-de-tinta-para-impressora-JM>



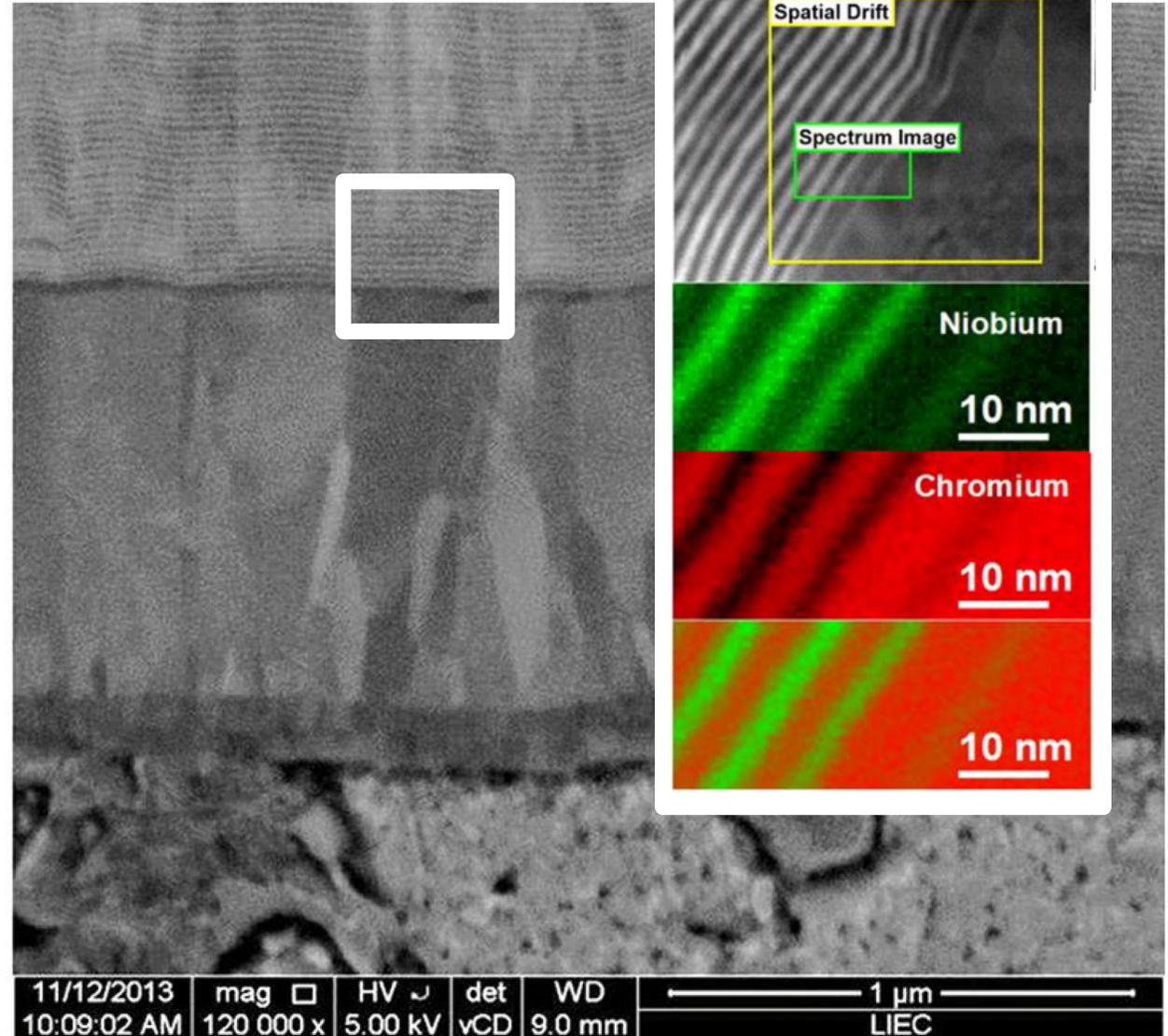
[http://www.globalspec.com/learnmore/materials\\_chemicals\\_adhesives/industrial\\_sealants\\_coatings/industrial\\_coatings](http://www.globalspec.com/learnmore/materials_chemicals_adhesives/industrial_sealants_coatings/industrial_coatings)

# Recobrimentos em camadas

Mono-camada



Multilayer  
Bond layer (Cr)  
Base Material

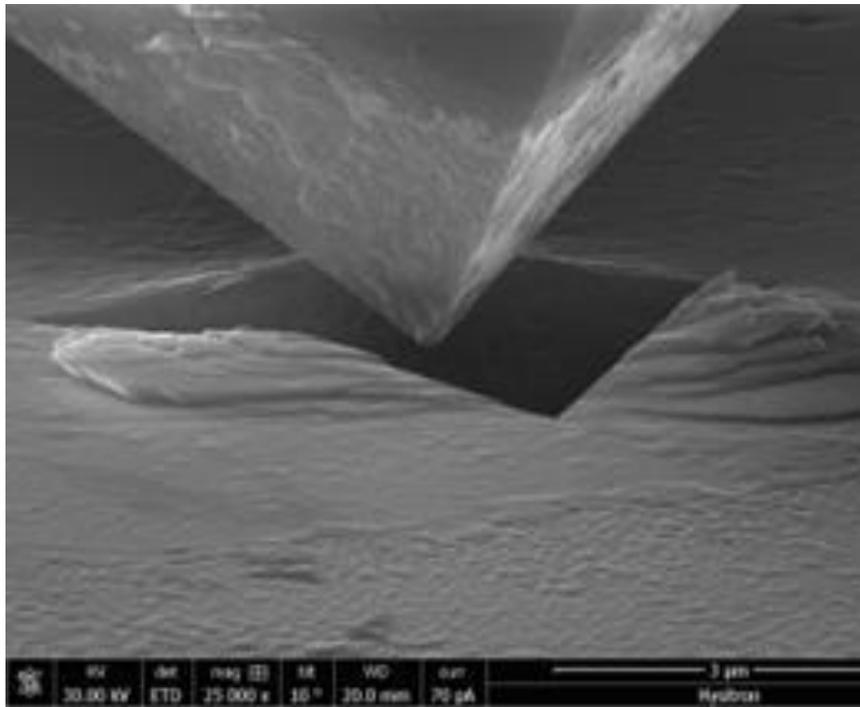




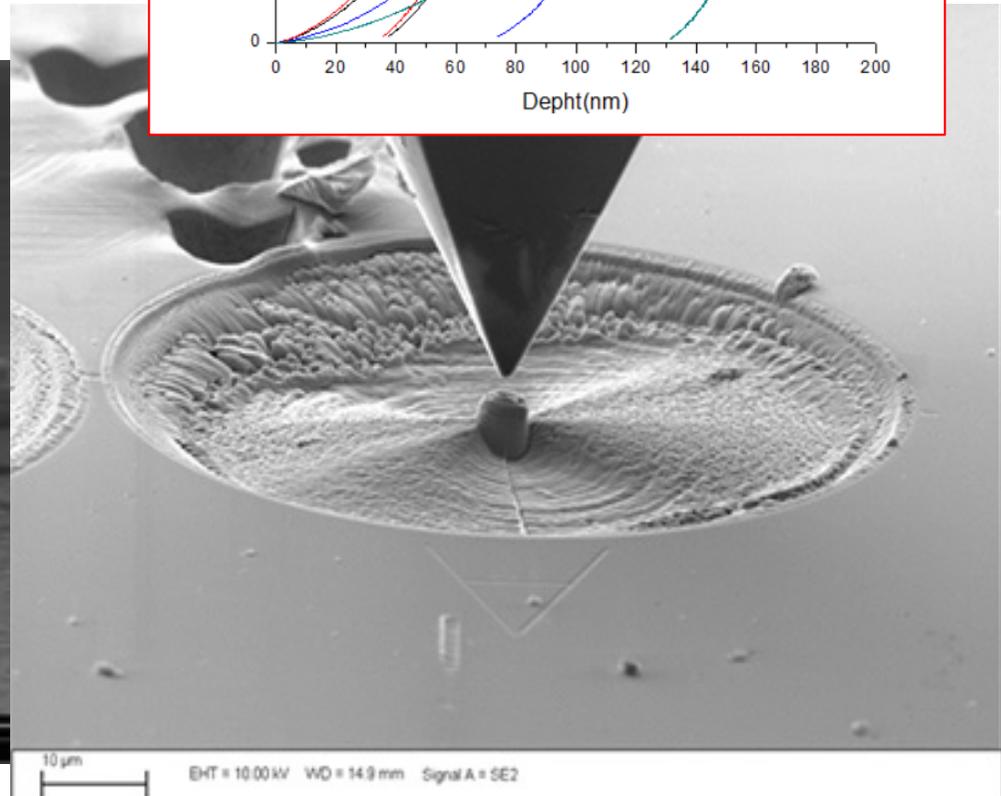
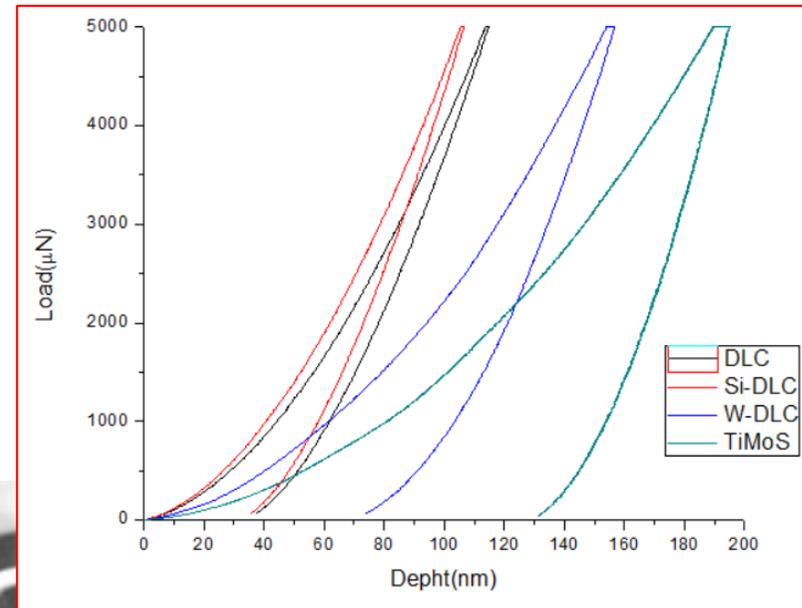
LFS

# Caracterização dos Recobrimentos

- ❖ Nano-indentação
  - ❖ Método indireto
  - ❖ Baixo custo
  - ❖ Influência da rugosidade
  - ❖ Influência do substrato



<http://www.blue-scientific.com/picoindenter/>



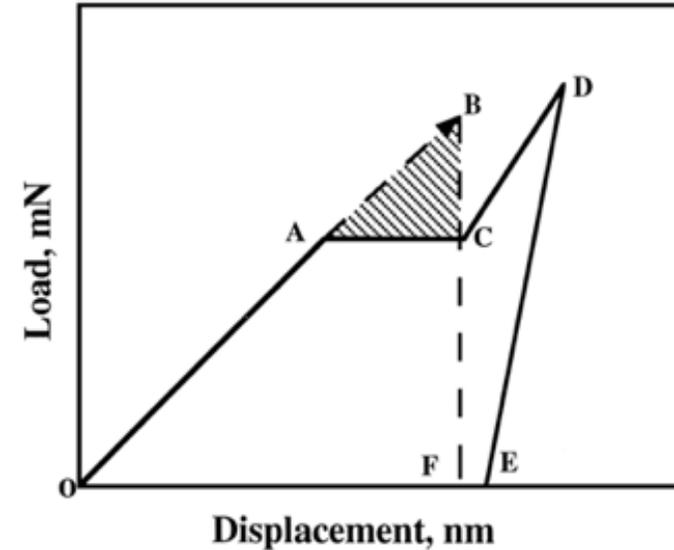


LFS

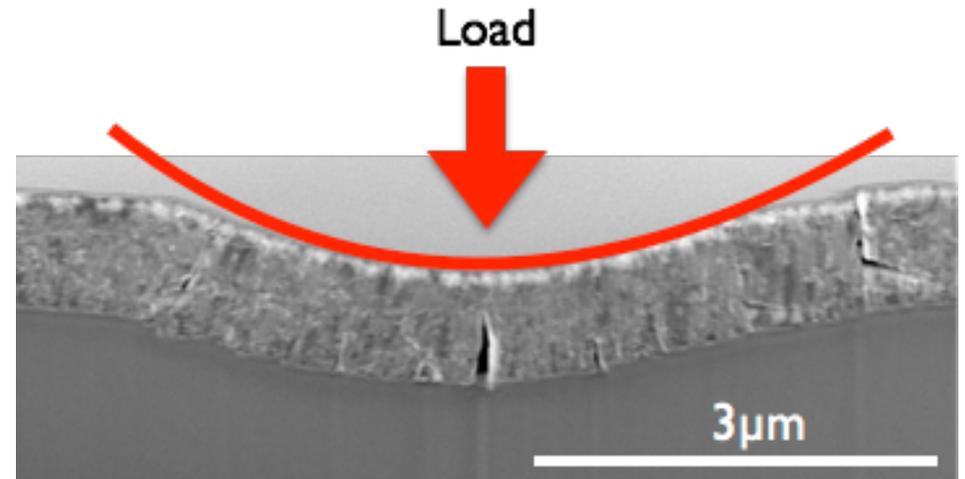
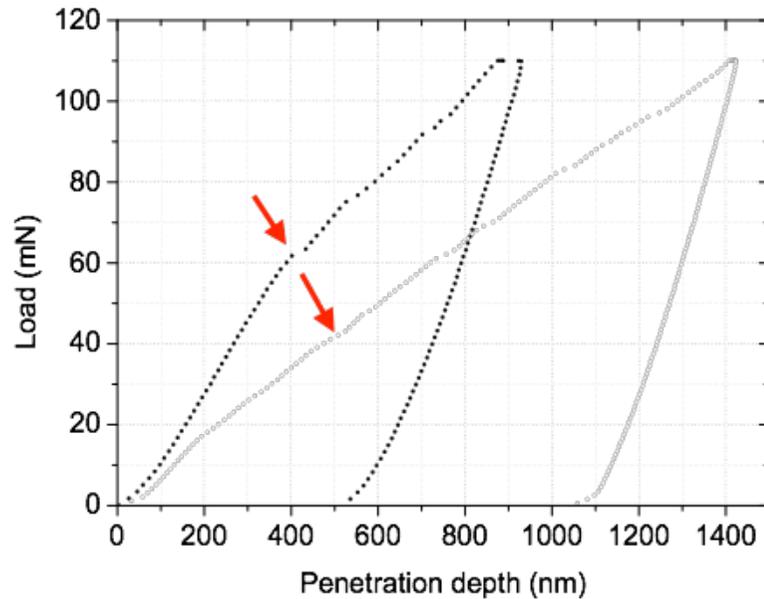
# Caracterização dos Recobrimentos

❖ Tenacidade a fratura: 0.1 a 7 MPa m<sup>1/2</sup>

$$K_{IC} = \left[ \left( \frac{E}{(1 - \nu^2) 2\pi C_R} \right) \left( \frac{U}{t} \right) \right]^{1/2}$$

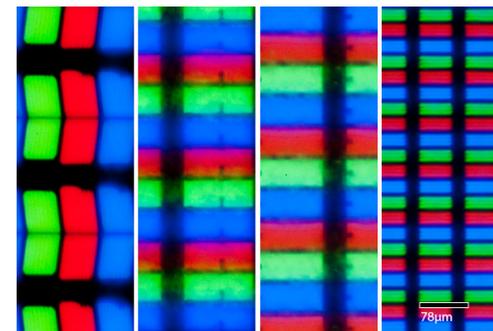
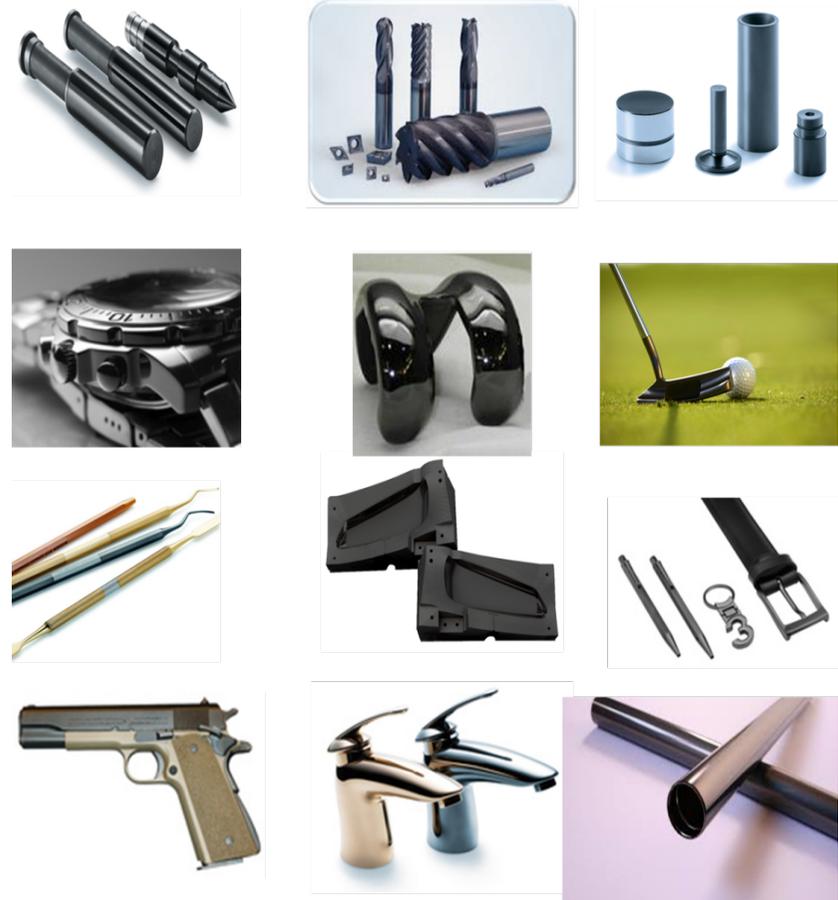


X. Li, B. Bhushan, Thin Solid Films 315 (1998) 214



# Aplicações de Recobrimentos

- ❖ Proteção a oxidação e corrosão
- ❖ Redução de desgaste e atrito
- ❖ Resistência térmica
- ❖ Agente bactericida
- ❖ Componentes eletrônicos
- ❖ Sistemas eletro-mecânicos



Ionbond (2015)

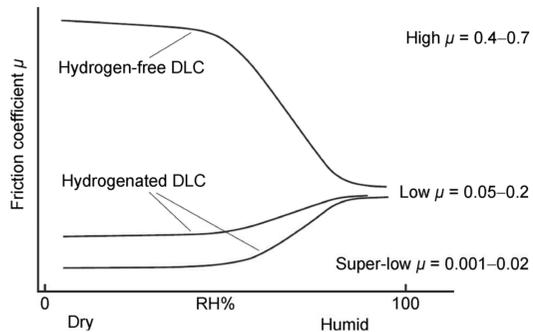
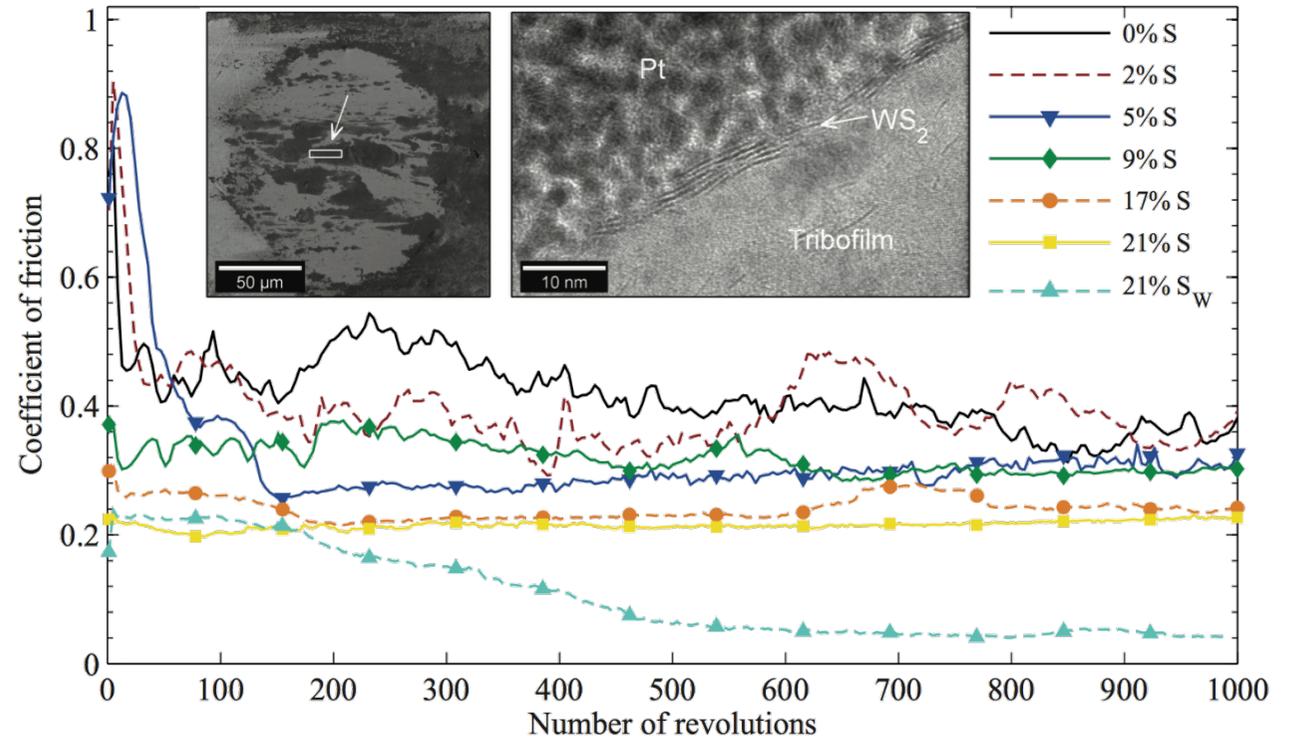
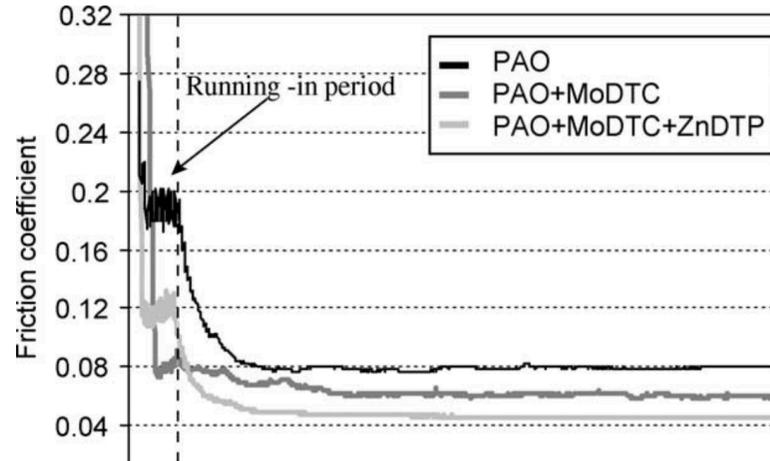
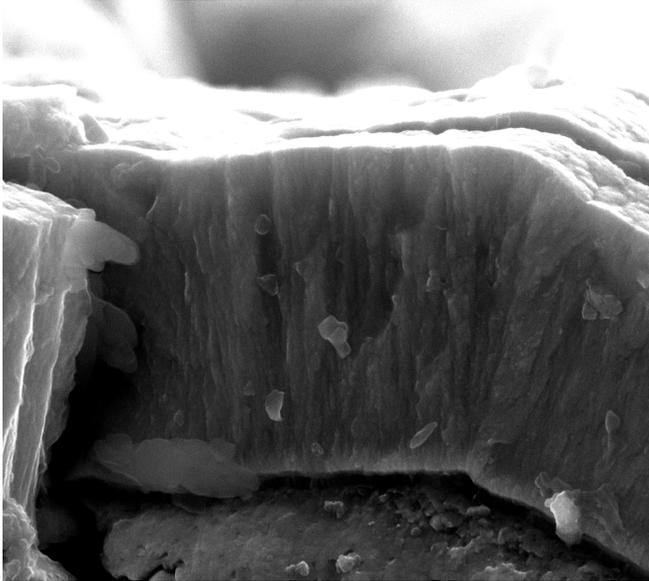
<http://prometheus.med.utah.edu/~bwjones/2010/06/apple-retina-display/>



LFS

# Recobrimentos: Redução de Atrito

## ❖ Lubrificantes sólidos



<http://friction.tsinghuajournals.com/EN/10.1007/s40544-014-0055-1#1>

<https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:754210/FULLTEXT01.pdf>

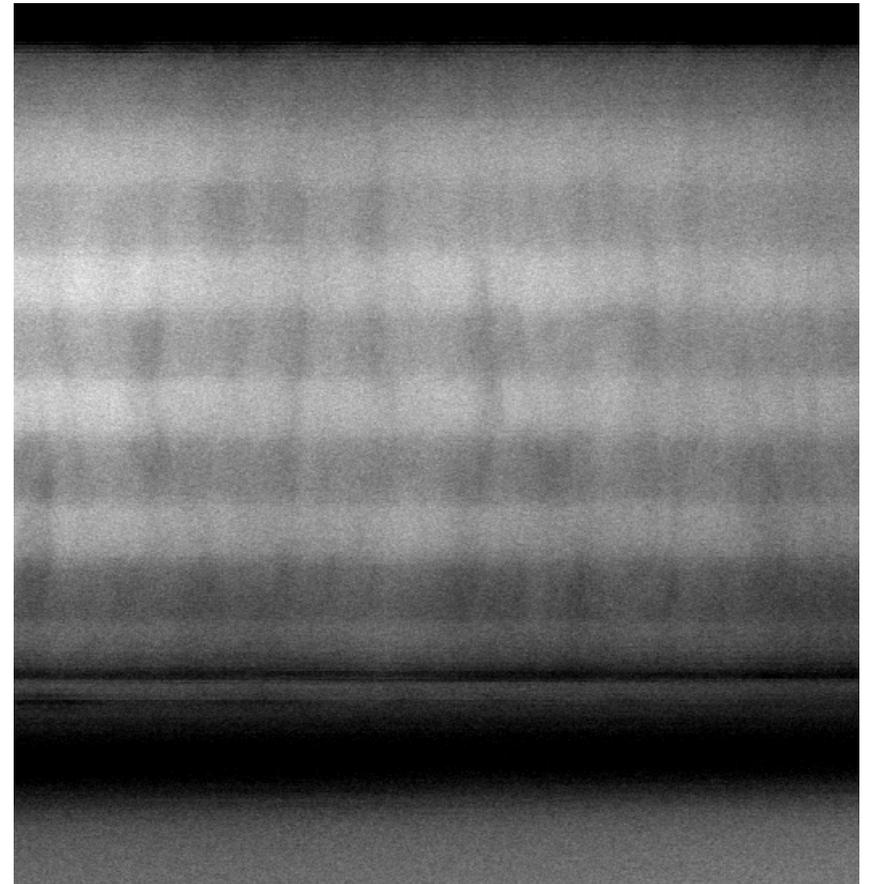


LFS

# Recobrimentos: Ferramentas

- ❖ Recobrimentos típicos: TiN, CrN, WC, NbC, ta-C
- ❖ Alta dureza (> 20GPa)
- ❖ Alto módulo de elasticidade (> 300GPa)
- ❖ Deposição por PVD ou CVD
- ❖ Baixa espessura (< 10 µm)
- ❖ Alta tensão residual

$$Q = \frac{kWL}{H}$$



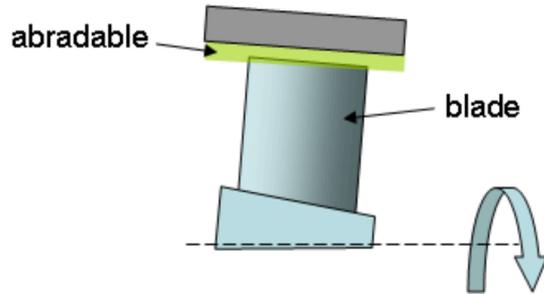
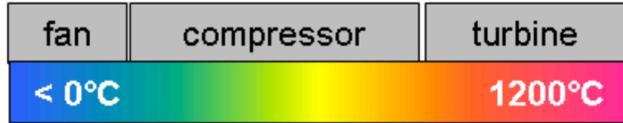
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058415300158>



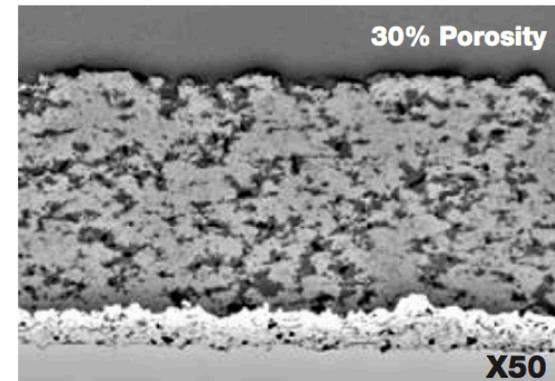
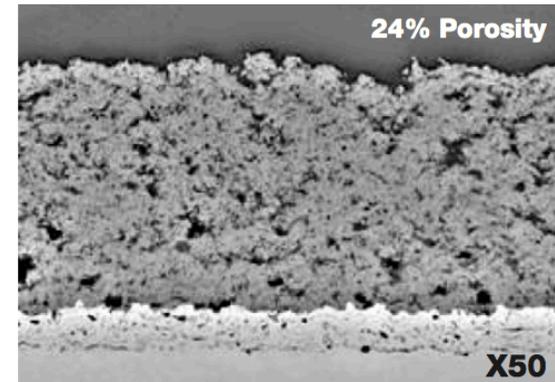
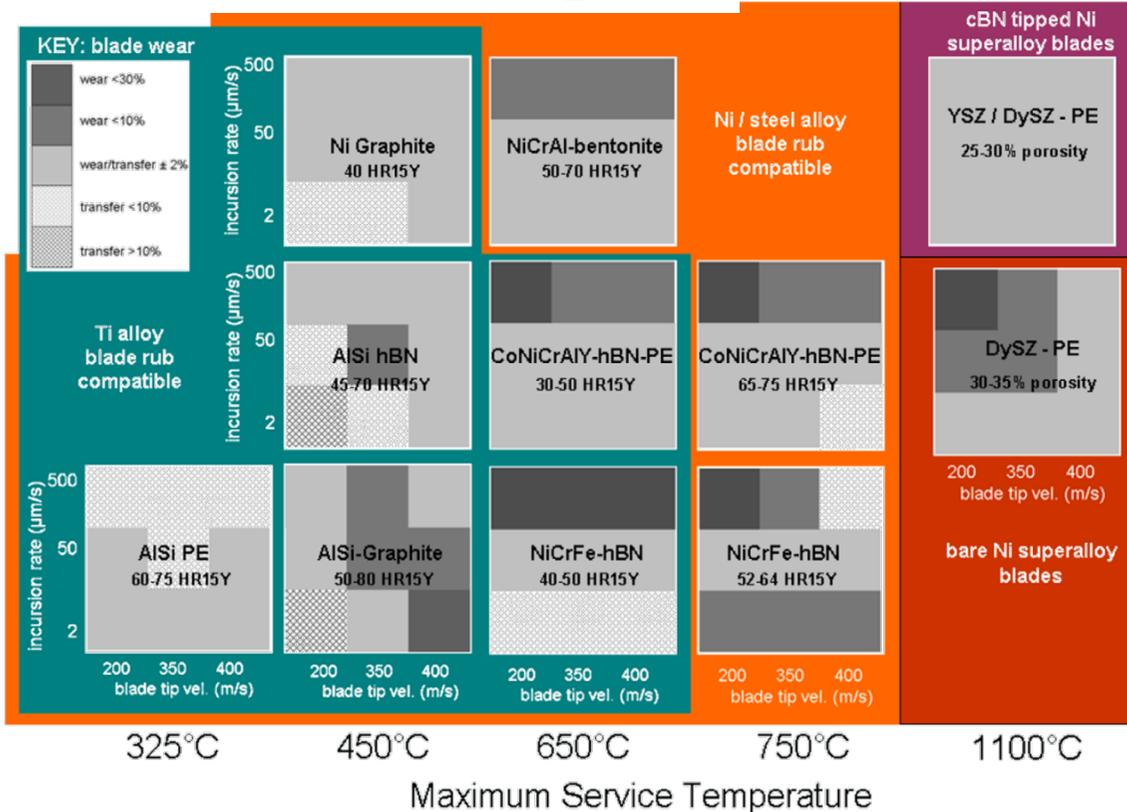
LFS

# Recobrimientos: Desgaste

un-shrouded blades



$$Q = \frac{kWL}{H}$$



[https://www.oerlikon.com/fecomaXL/files/erlikon\\_ThermallySprayedAbradableCoatings\\_2012.10.pdf](https://www.oerlikon.com/fecomaXL/files/erlikon_ThermallySprayedAbradableCoatings_2012.10.pdf)

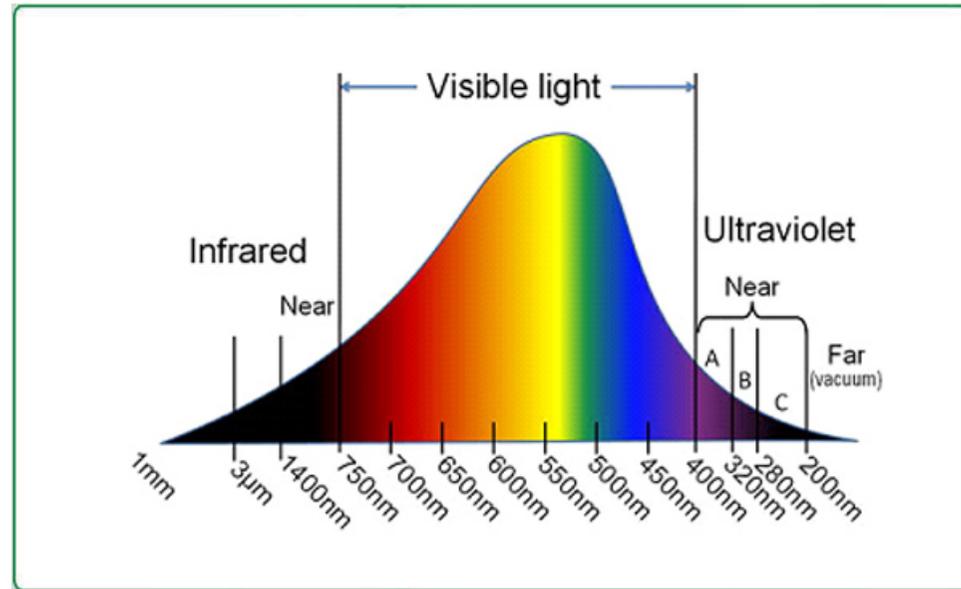


# Recobrimientos: Filtros ópticos

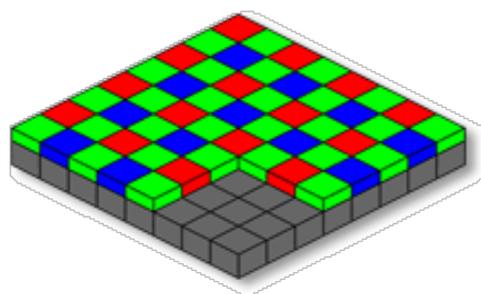
## ❖ Filtros dicroicos



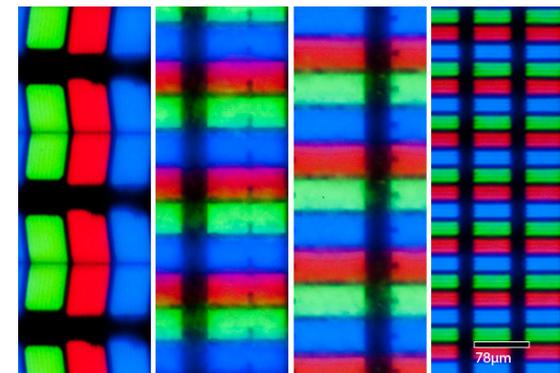
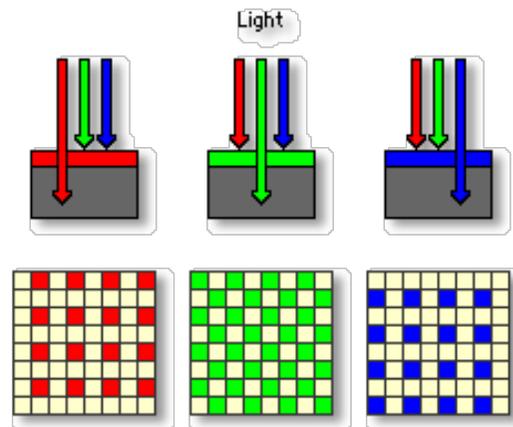
<http://www.sherlan.com/bandpass-filters.html>



<https://www.go-ttv.com/optical-filters/>



Color Filter Array Sensor



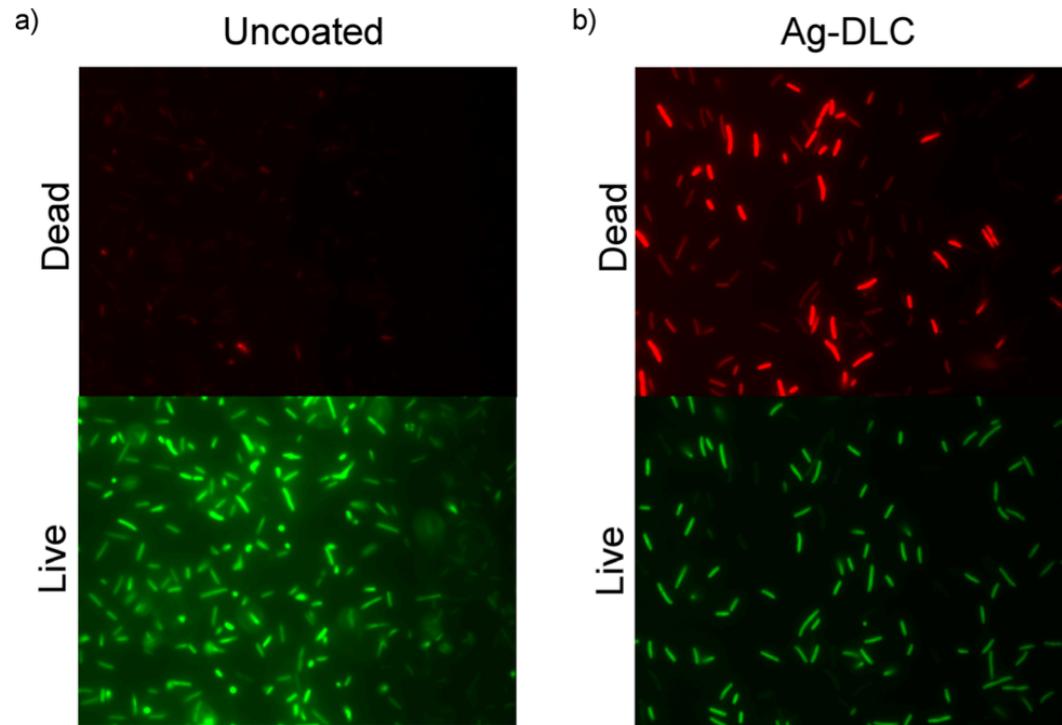
<http://prometheus.med.utah.edu/~bwjones/2010/06/apple-retina-display/>

© 2003 Vincent Bockaert [123di.com](http://www.123di.com)

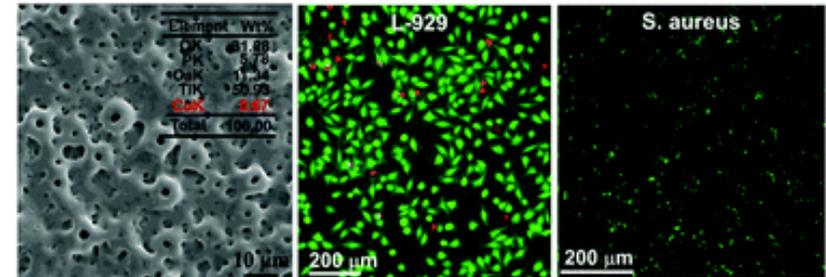
<https://fotobellarte.wordpress.com/category/funcionamento/>

# Recobrimentos: Outros

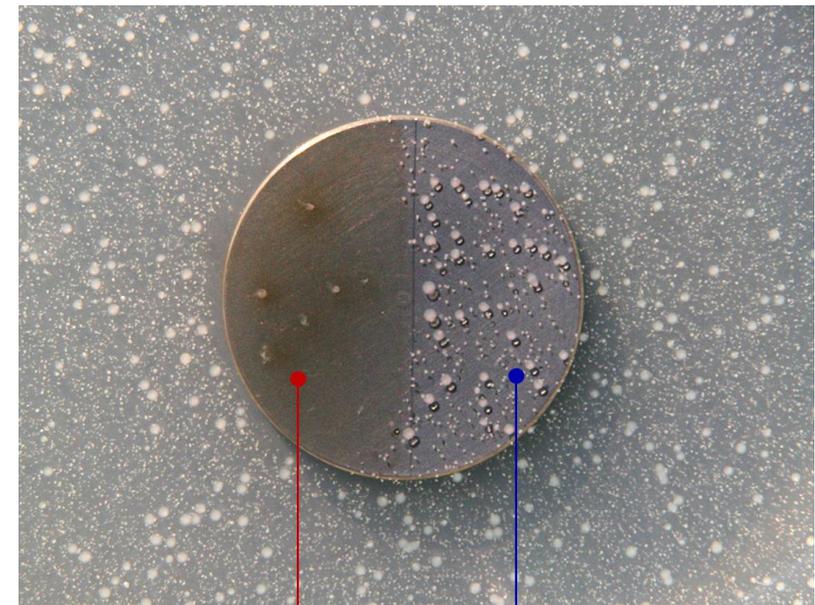
- ❖ Recobrimentos bactericidas e bio-compatíveis
- ❖ Dopados por Ag e Cu



<http://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.4871435>



<http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2016/TB/c6tb00563b#!divAbstract>



Antibacterial Coated      Non-Coated  
 Material: Ti Al6 V4      Bacterium: E-Coli

<http://www.artworldmedical.com/antibacterial.html>

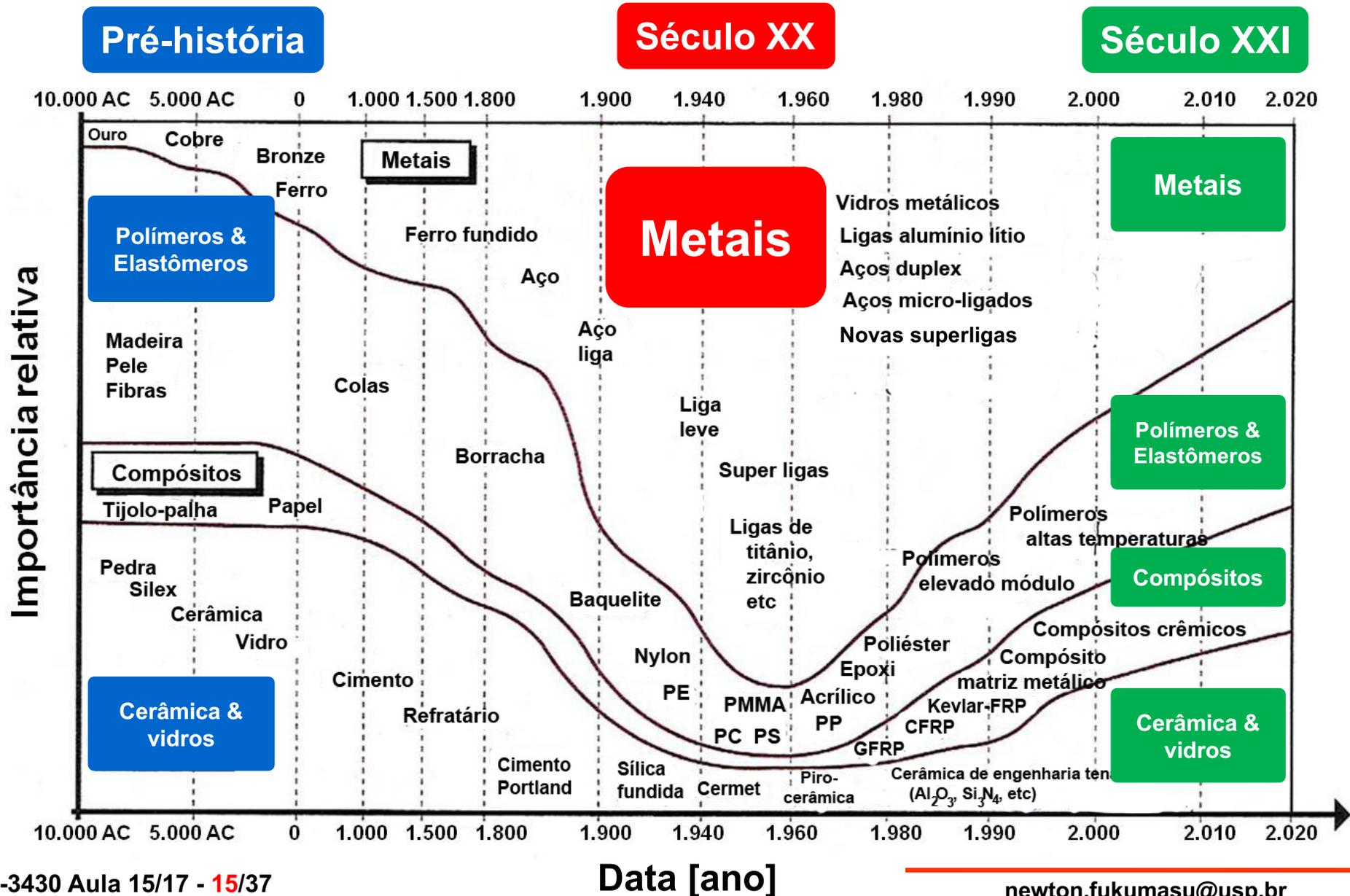


# Compósitos



# Uso de materiais

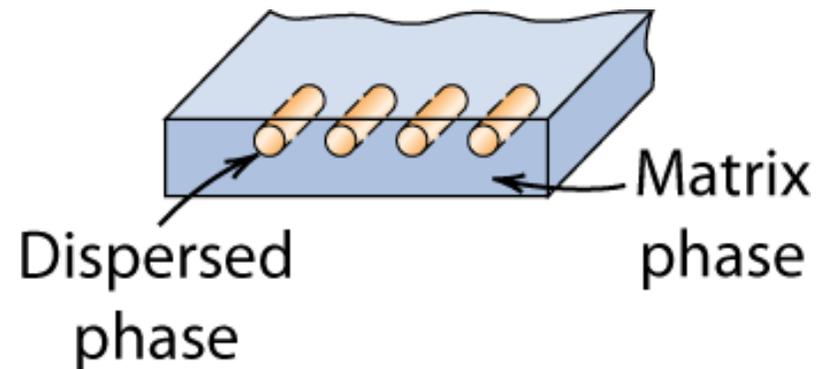
Materiais são substituídos em função do custo e desempenho





# Compósitos

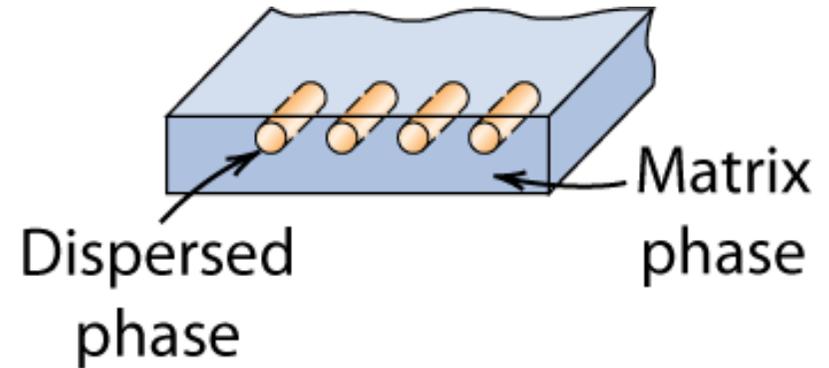
- ❖ Combinação de dois ou mais materiais
- ❖ Busca pela melhor característica combinada
- ❖ São materiais feitos de forma "artificial"
- ❖ Composto por:
  - ❖ Fase contínua (Matriz)
  - ❖ Fases dispersas



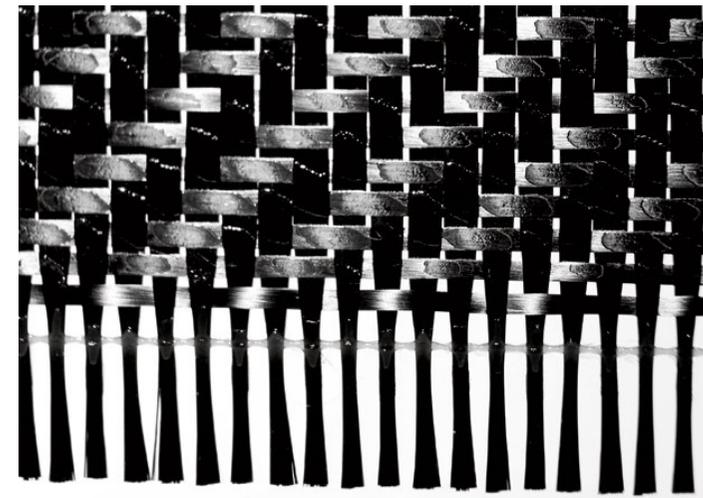


# Compósitos

- ❖ Fase contínua (Matriz)
  - ❖ Transferir a carga
  - ❖ Proteção a fase dispersa
  - ❖ Composição: metálica, cerâmica ou polimérica
  
- ❖ Fase dispersa
  - ❖ Melhorar as propriedades mecânicas, tenacidade a fratura, resistência a fluência



<https://avopix.com/tag/premium-photos/aramid-fiber>



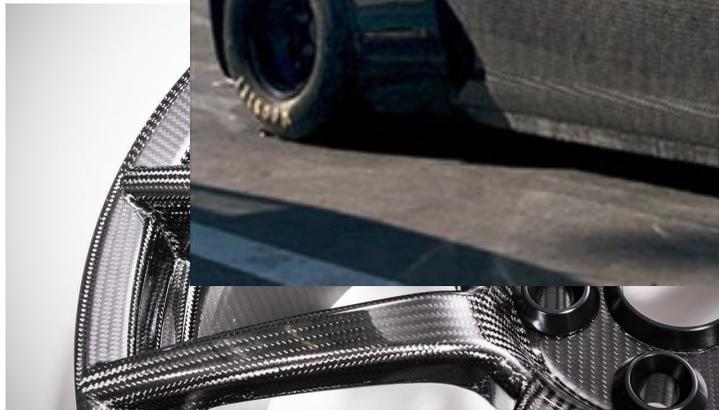
<http://www.bicycling.com/bikes-and-gear-features/how-its-made/carbon-fiber-peeling-back-layers>



# Aplicações



<http://thewrapwizard.com/45-killer-carbon-fiber-wraps/>



<https://www.flatout.com.br/cientistas-descobrem-uma-maneira-nova-e-simples-de-reciclar-fibra-de-carbono/>

<http://badasshelmetstore.com/carbon-fiber-motorcycle-helmets/>



# Aplicações

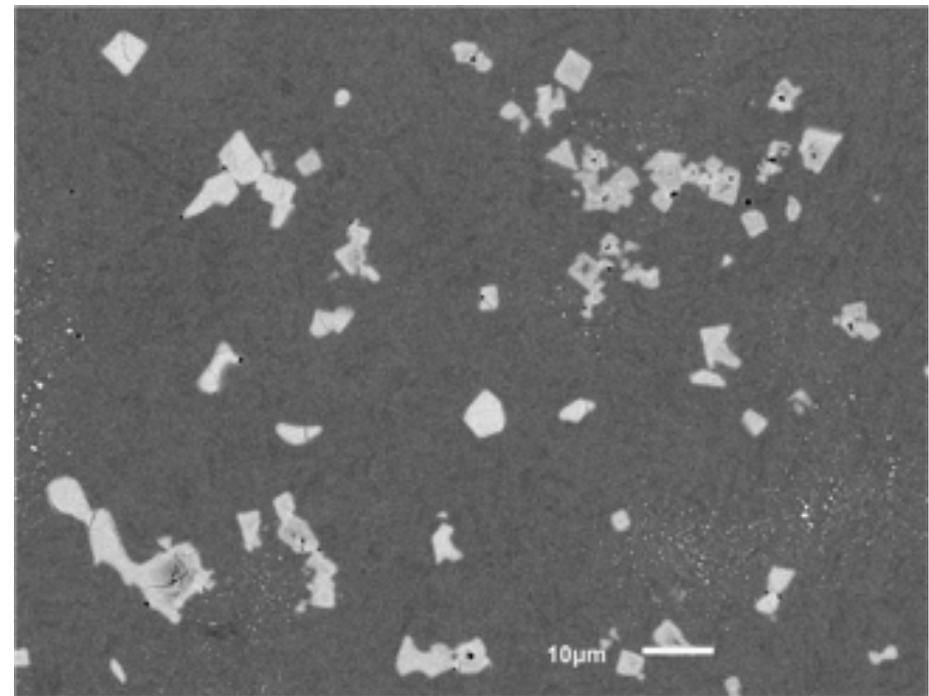
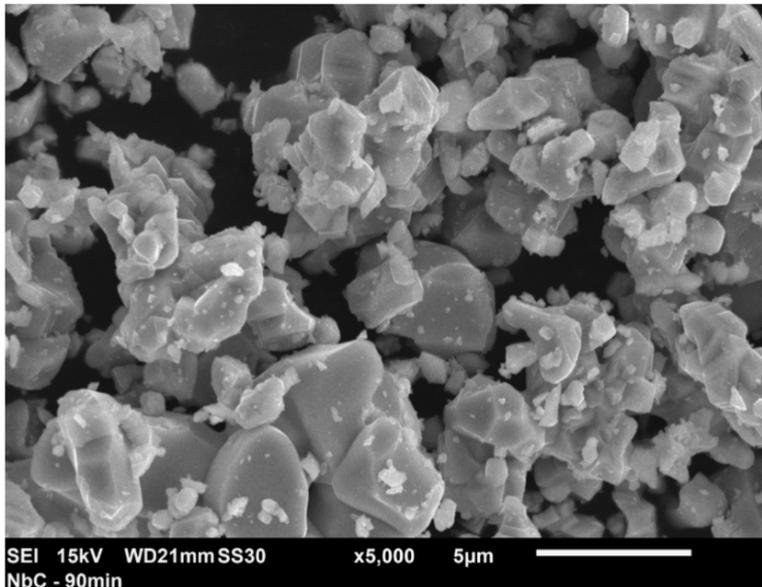


<http://www.lexicarbrasil.com.br/cta-i/>

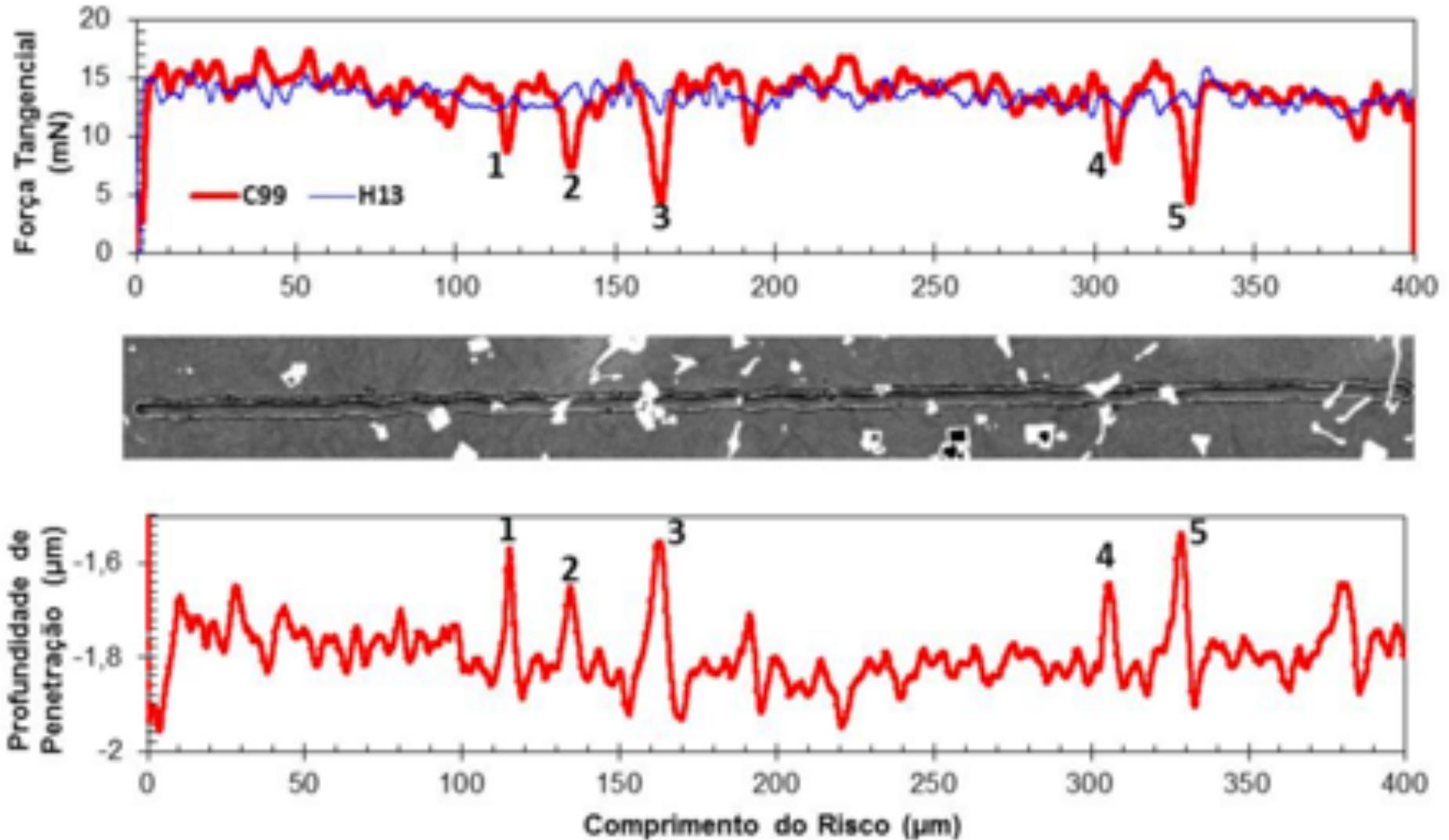


# Compósitos: reforço por partículas

- ❖ Reforço por partículas
  - ❖ Formação por precipitação
  - ❖ Formação por mistrura



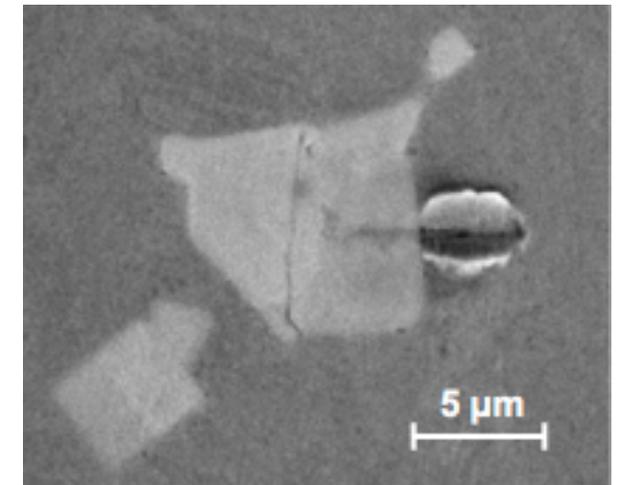
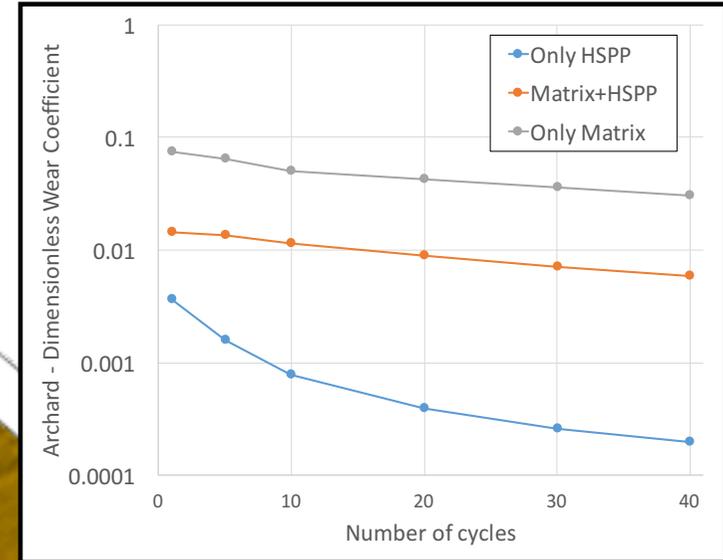
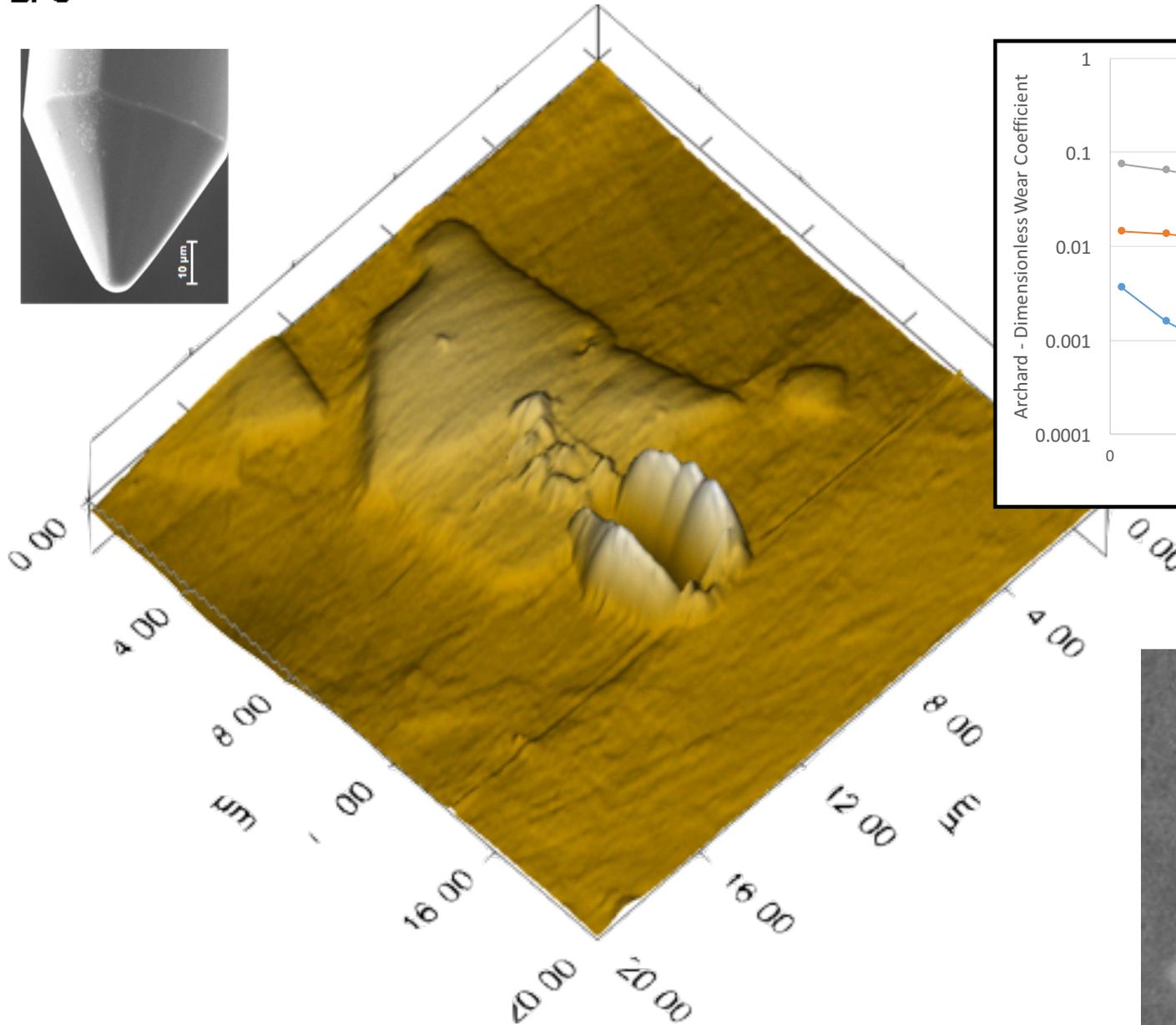
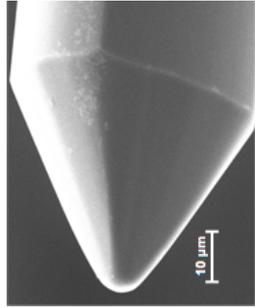
# Compósitos: reforço por partículas





LFS

# Compósitos: reforço por partículas





# Compósitos: reforço por partículas

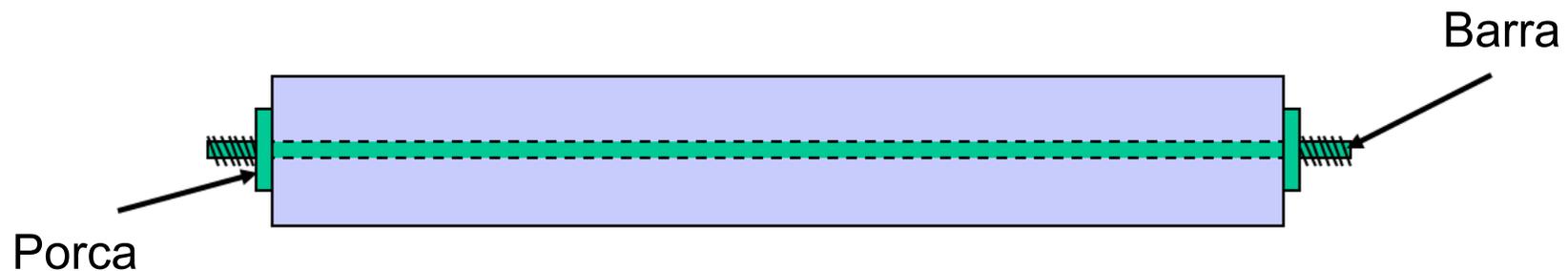
- ❖ **Concreto**
  - ❖ **Cascalho + areia + cimento + água**



[https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/concreto-armado-e-solucao-duravel-e-economica\\_6993\\_0\\_1](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/concreto-armado-e-solucao-duravel-e-economica_6993_0_1)

- ❖ **Concreto reforçado ou armado**
  - ❖ **Uso de barras de aço**

- ❖ **Concreto pré e pós-tensionado**
  - ❖ **Aplicação de tensão de compressão ao concreto**

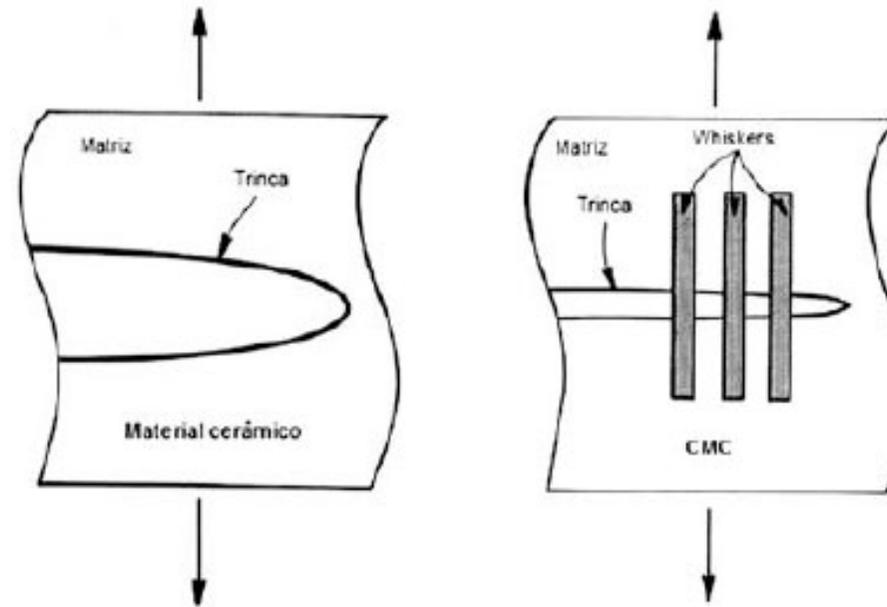




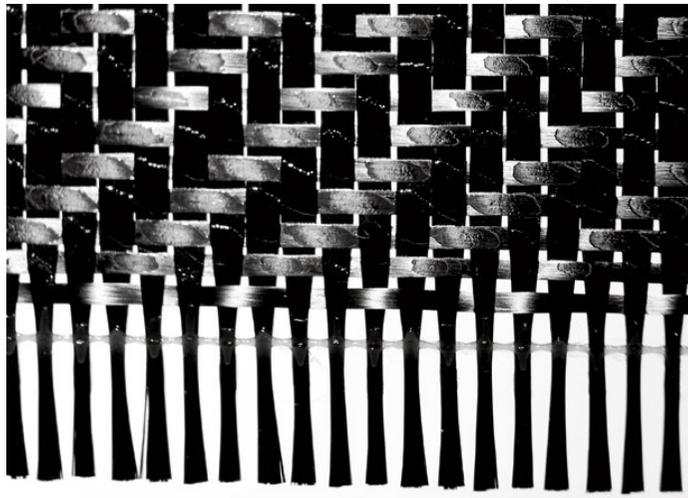
LFS

# Compósitos: reforço por fibras

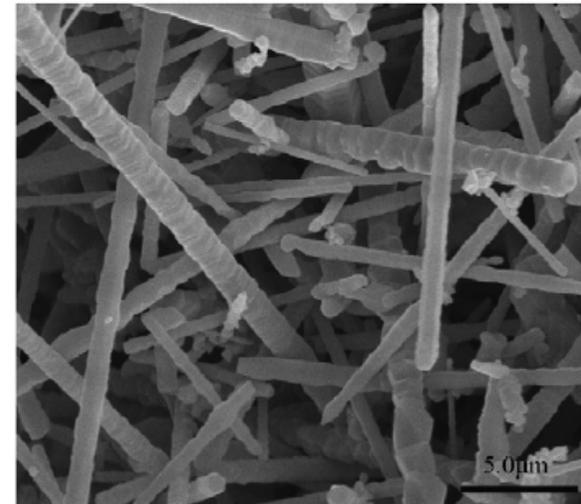
- ❖ **Reforço por fibras**
  - ❖ **Resistência a tração**
  - ❖ **Tenacidade a fratura**
- ❖ **Tipos de fibras**
  - ❖ **Whiskers**
  - ❖ **Fibras**
  - ❖ **Fios**



[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132014000300003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132014000300003)



<http://www.bicycling.com/bikes-and-gear-features/how-its-made/carbon-fiber-peeling-back-layers>

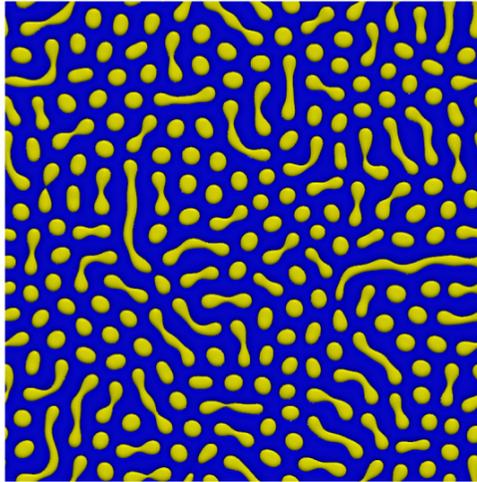


[https://www.researchgate.net/publication/257107163\\_Fabrication\\_and\\_characterization\\_of\\_SiC\\_whisker\\_reinforced\\_reaction\\_bonded\\_SiC\\_composite/figures?lo=1&utm\\_source=google&utm\\_medium=organic](https://www.researchgate.net/publication/257107163_Fabrication_and_characterization_of_SiC_whisker_reinforced_reaction_bonded_SiC_composite/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic)



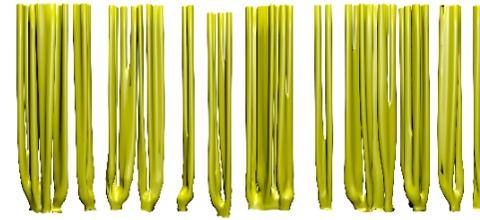
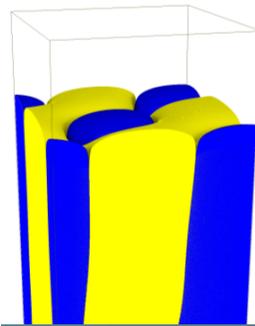
LFS

# Compósitos: reforço por fibras

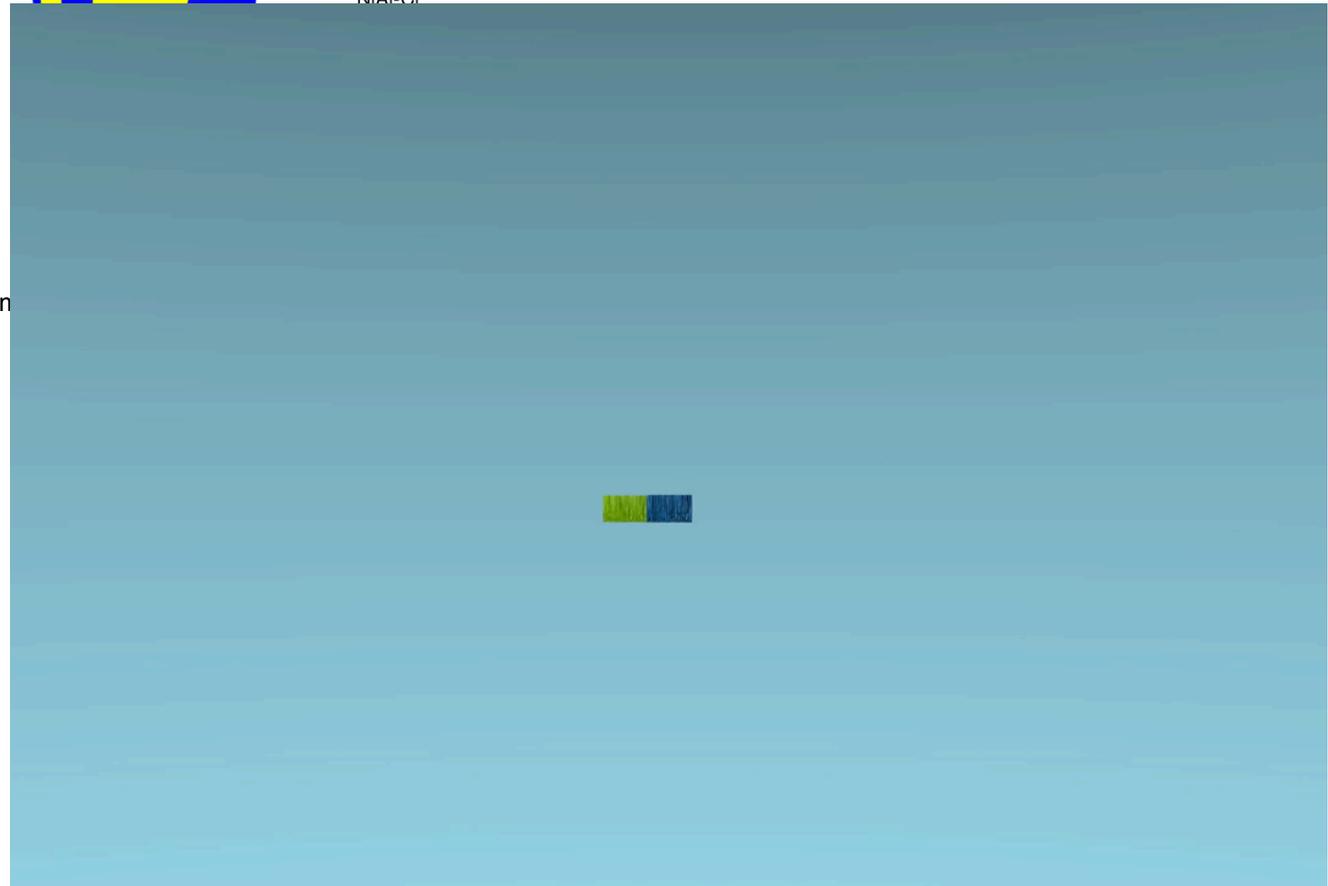


Directional solidification of *NiAl-Cr* - Domain size:  $800 \times 800 \times 900$  at SuperMUC with 11200 cores - temperature velocity: **40 mm/h**

<https://www.ian>



Cr-fibres from the simulation of the vertical section  
*NiAl-Cr*





LFS

# Compósitos: reforço por fibras

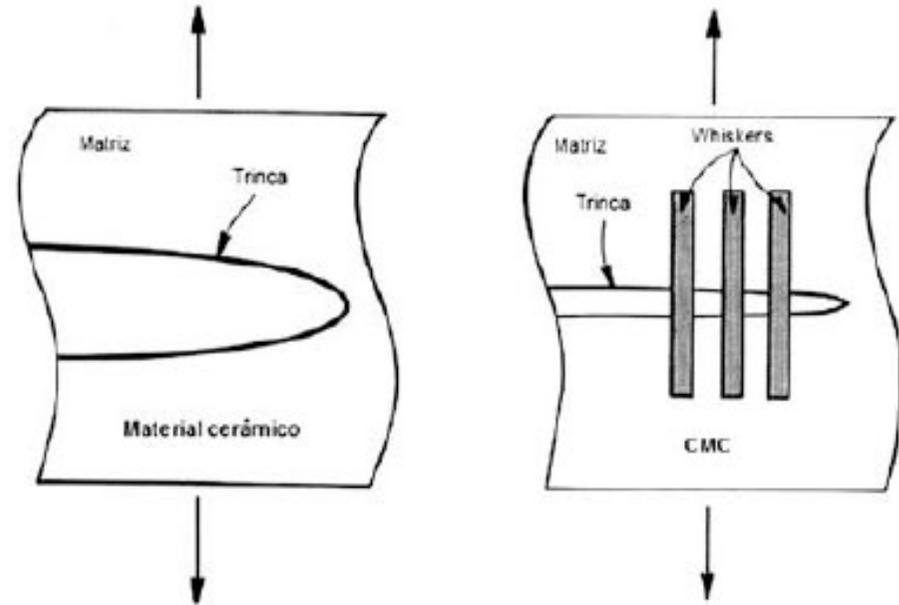
## ❖ Comprimento crítico das fibras

Tensão máxima da fibra

Diâmetro da fibra

$$L_f > \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$

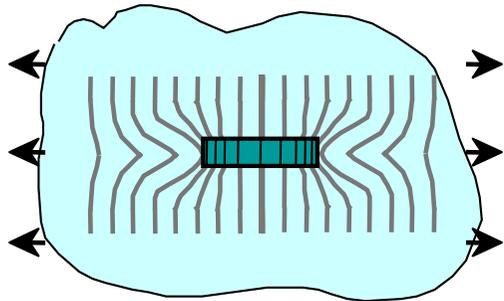
Resistência ao cisalhamento na interface



[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132014000300003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132014000300003)

Fibras curtas e grossas:

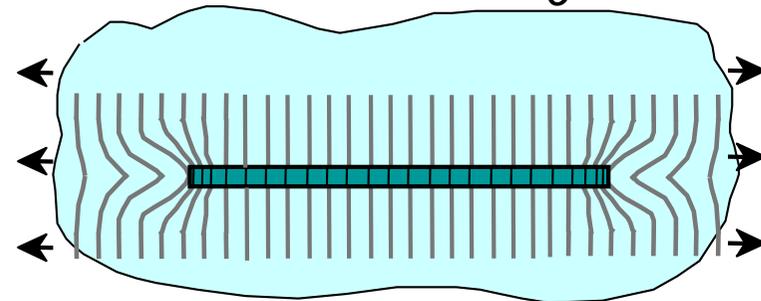
$$L_f < \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$



Baixa eficiência

Fibras longas e finas:

$$L_f > \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$



Alta eficiência



# Compósitos: reforço por fibras

## ❖ Módulo elástico do material

### ❖ Direção longitudinal

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$$

↑
↑  
 fração volumétrica      mesma deformação

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f$$

### ❖ Direção transversal

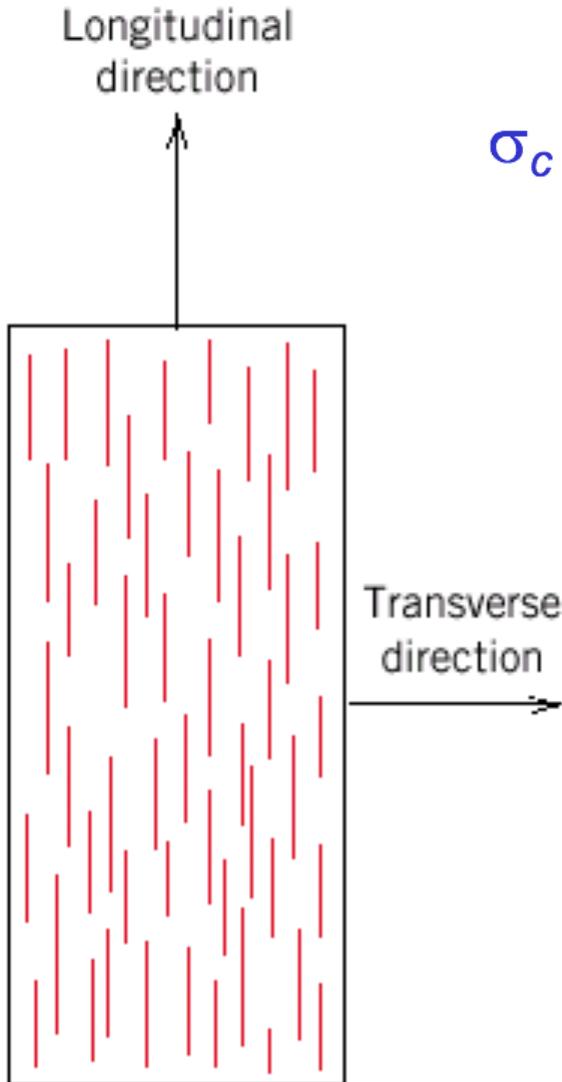
$$\epsilon_c = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f$$

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma$$

↑  
 mesma tensão

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$$

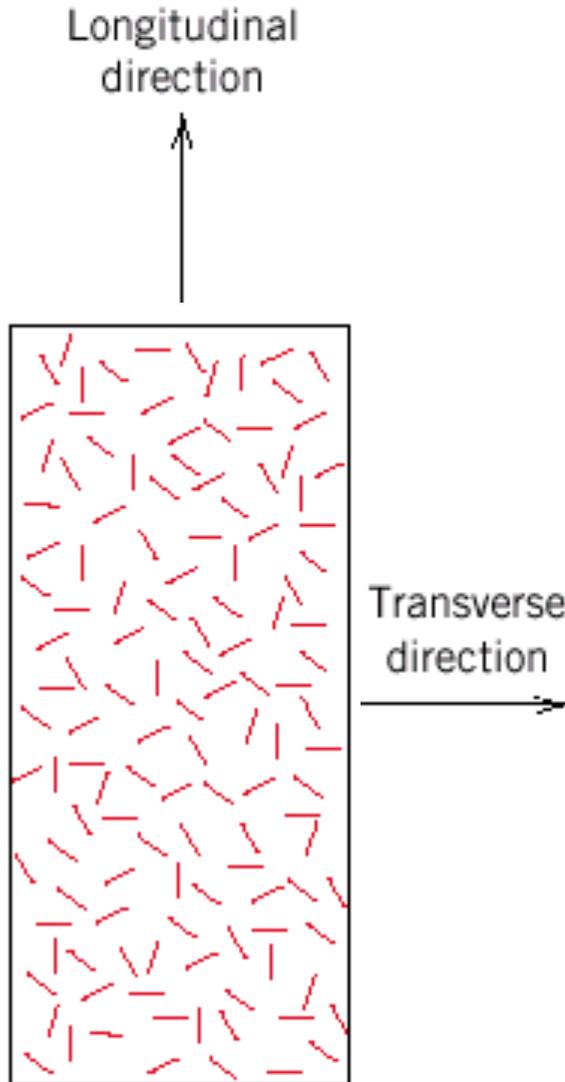
*c* = compósito  
*f* = fibra  
*m* = matriz





# Compósitos: reforço por fibras

- ❖ Módulo elástico do material
- ❖ Fibra descontínua



$$E_{cd} = E_m V_m + K E_f V_f$$

Fator de eficiência:

- alinhado:  $K = 1$  (paralelo)
- alinhado:  $K = 0$  (perpendicular)
- aleatório 2D:  $K = 3/8$  (2D isotrópico)
- aleatório 3D:  $K = 1/5$  (3D isotrópico)

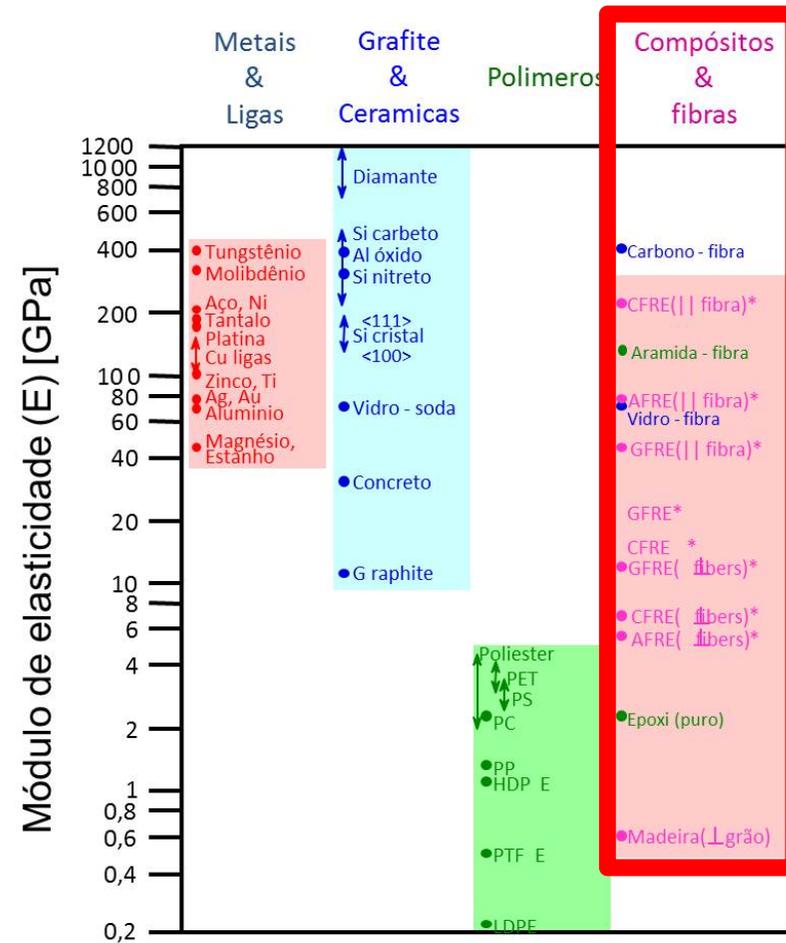
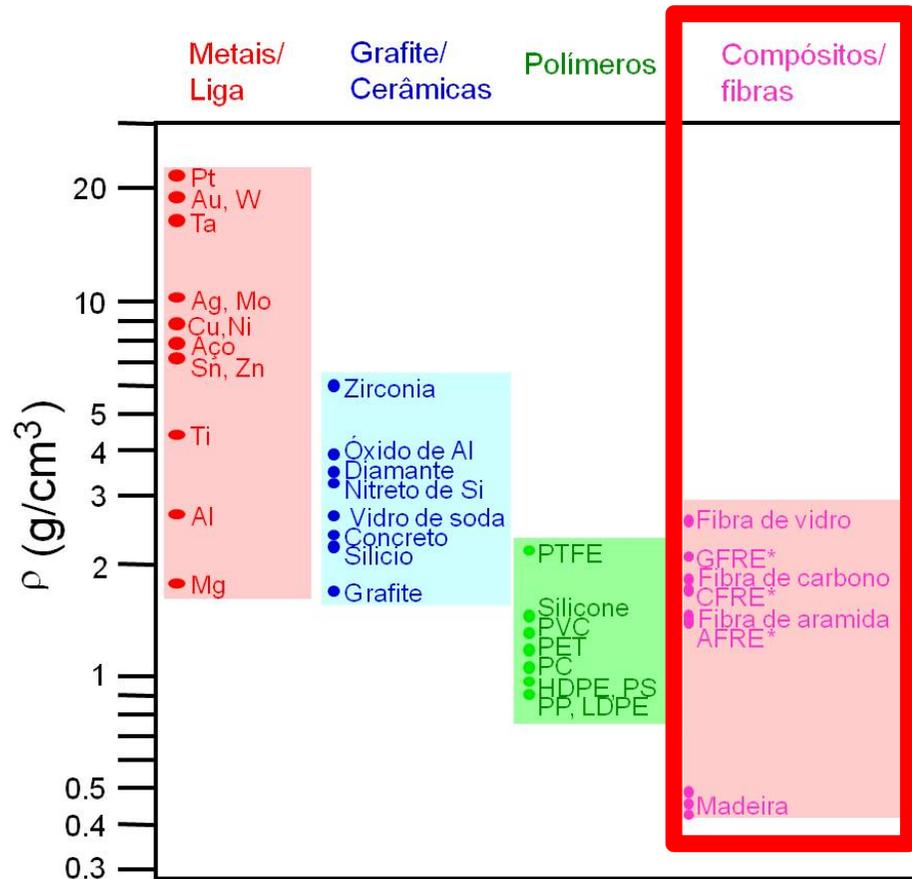
$c$  = compósito

$f$  = fibra

$m$  = matriz

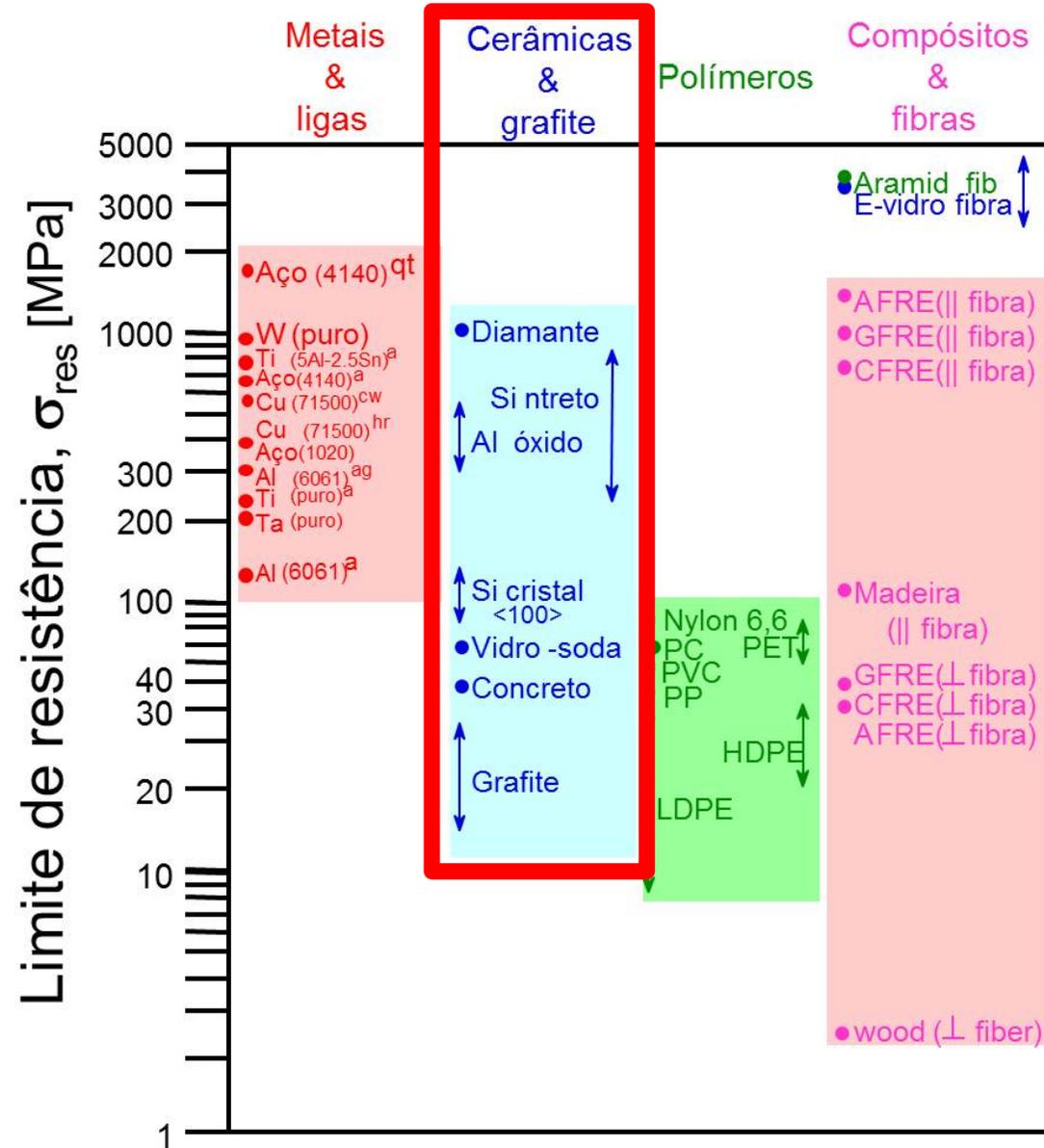


# Compósitos: propriedades



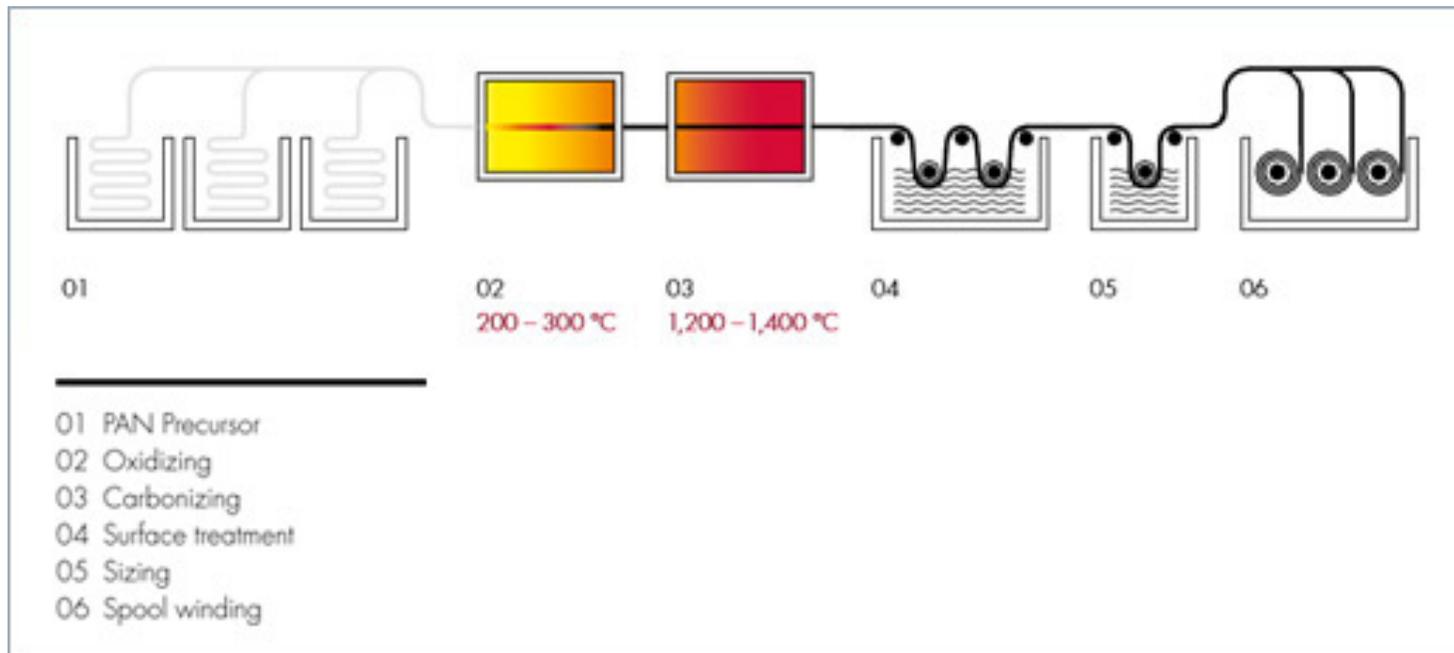
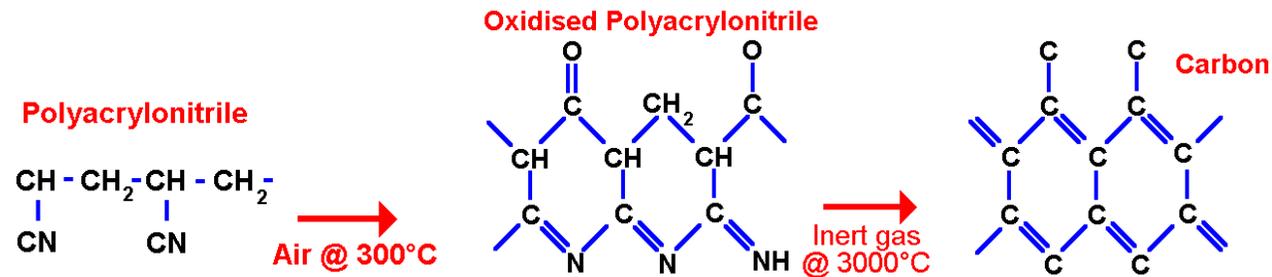


# Compósitos: propriedades



# Compósitos: fabricação

## ❖ Fabricação da fibra de carbono



[http://www2.sglgroup.com/cms/international/products/lexicon-of-materials/index.html?\\_\\_locale=en&letter=C](http://www2.sglgroup.com/cms/international/products/lexicon-of-materials/index.html?__locale=en&letter=C)



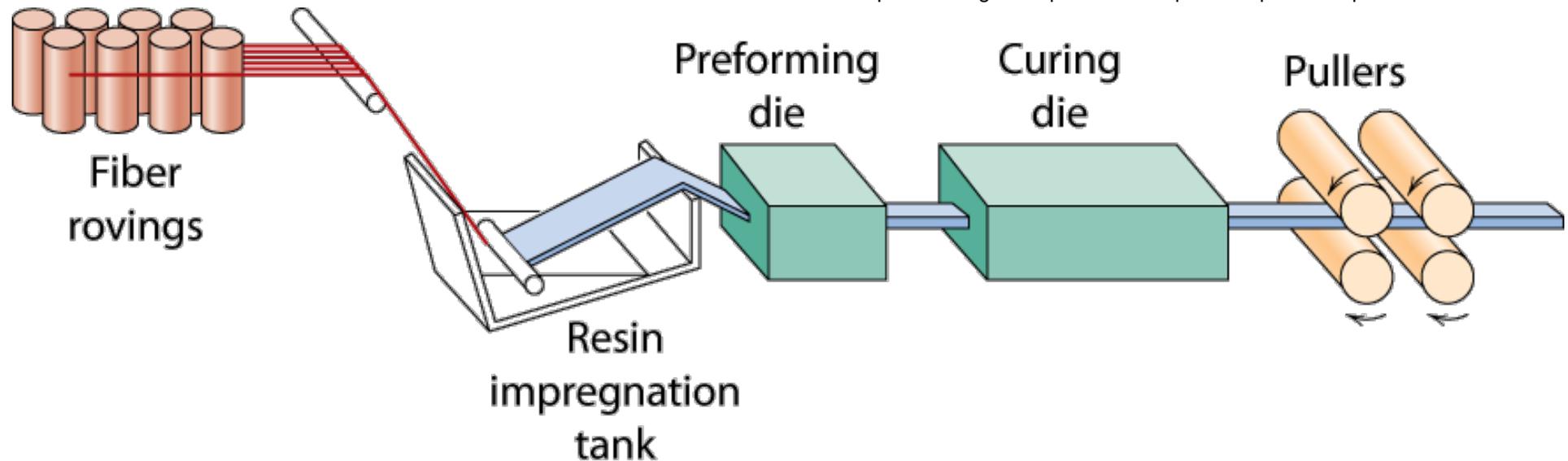
LFS

# Compósitos: fabricação

- ❖ Pultrusion (pultrusão)
  - ❖ Pull + extrusion
  - ❖ Fibras contínuas
  - ❖ Peças longas
  - ❖ Seção constante
  - ❖ Matriz polimérica

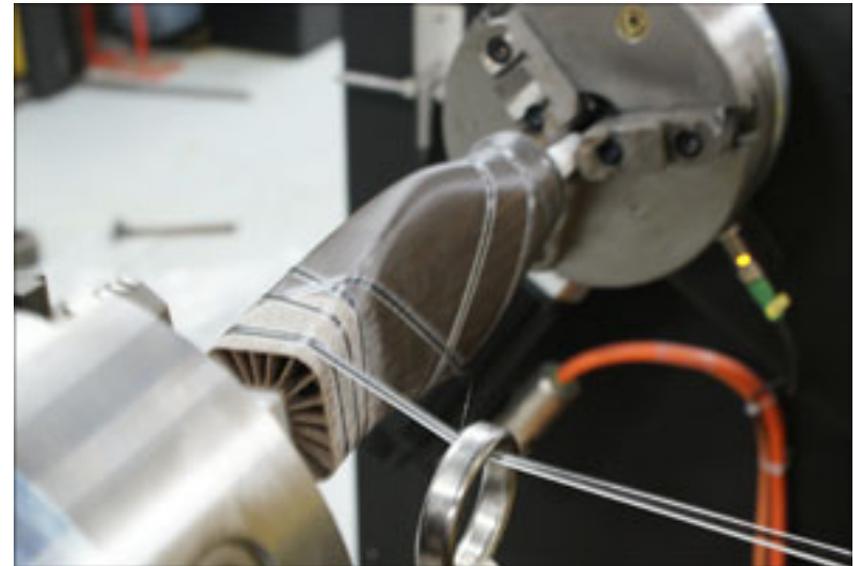


<http://www.angliacomposites.co.uk/products/pultruded-profiles/>

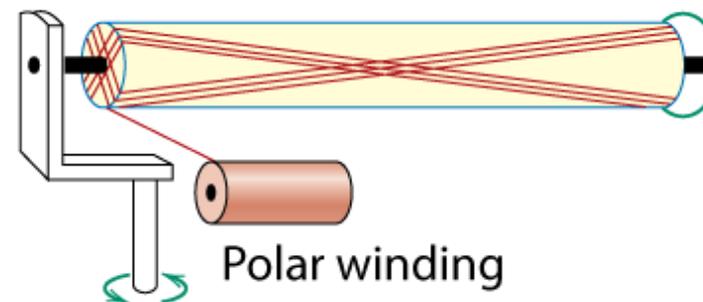
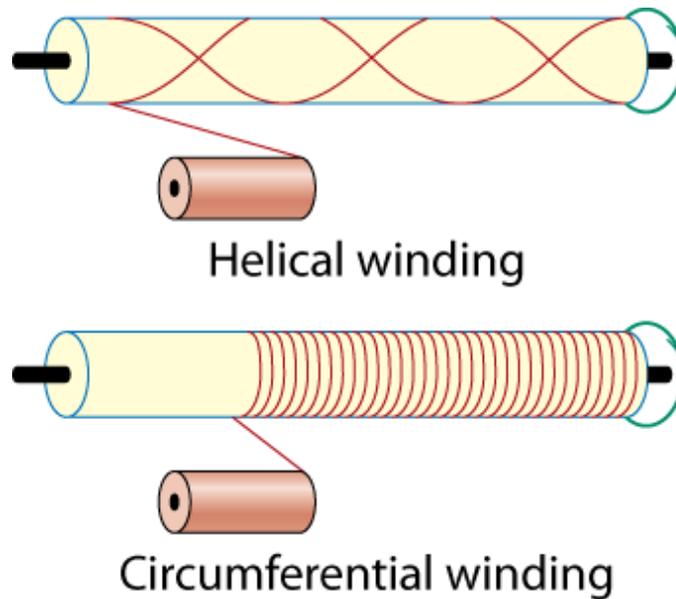


# Compósitos: fabricação

- ❖ Enrolamento de filamento
  - ❖ Peças ocas
  - ❖ Fibras contínuas
  - ❖ Seção variável
  - ❖ Matriz polimérica



<http://mccleananderson.com/index.cfm?pid=31&pageTitle=What-is-Filament-Winding?>





# *Compósitos: fabricação*

# TCR Composites

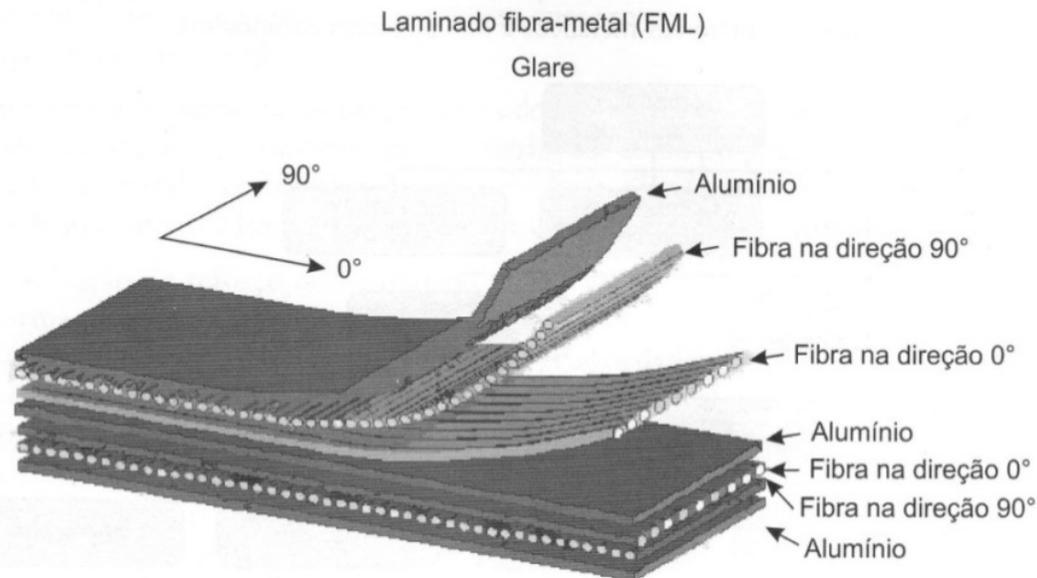
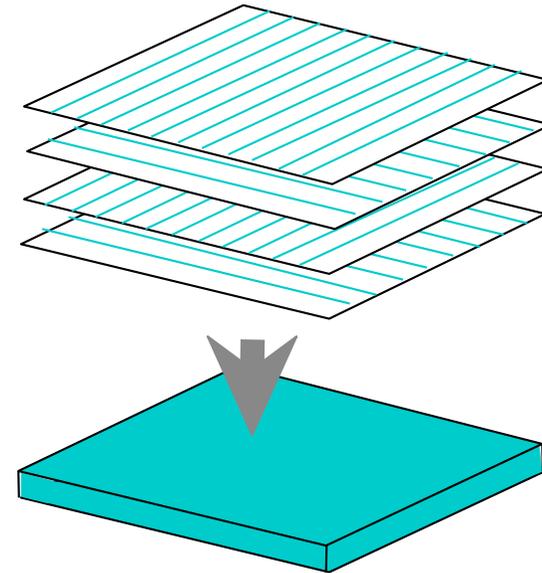
# Towpreg Winding Demonstration



# Compósitos: fabricação

## ❖ Laminados

- ❖ Peças planas
- ❖ Fibras em folhas ou tecidos
- ❖ Composição direcional entre folhas
- ❖ Matriz polimérica
- ❖ Multi-camadas



<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgxYMAC/trabalho-elton-final?part=2>



LFS

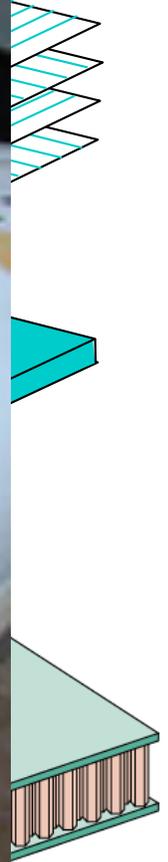
# Compósitos: fabricação

## ❖ Lamina

- ❖ F
- ❖ F
- ❖ F
- ❖ A



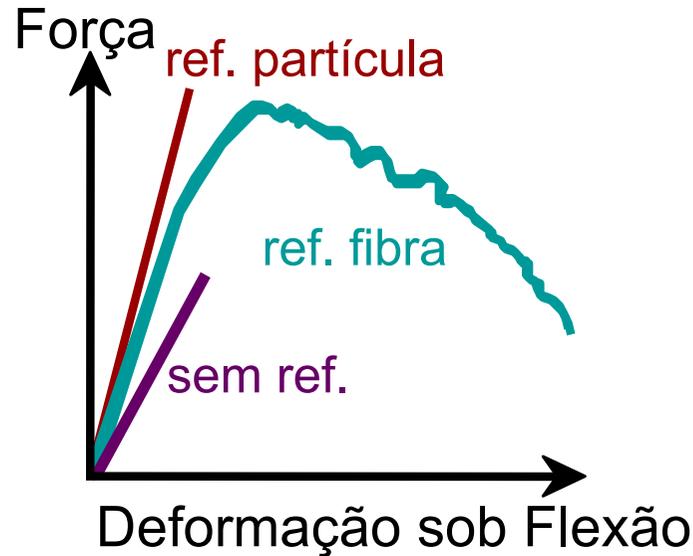
[http://www.docent\\_id=5596](http://www.docent_id=5596)



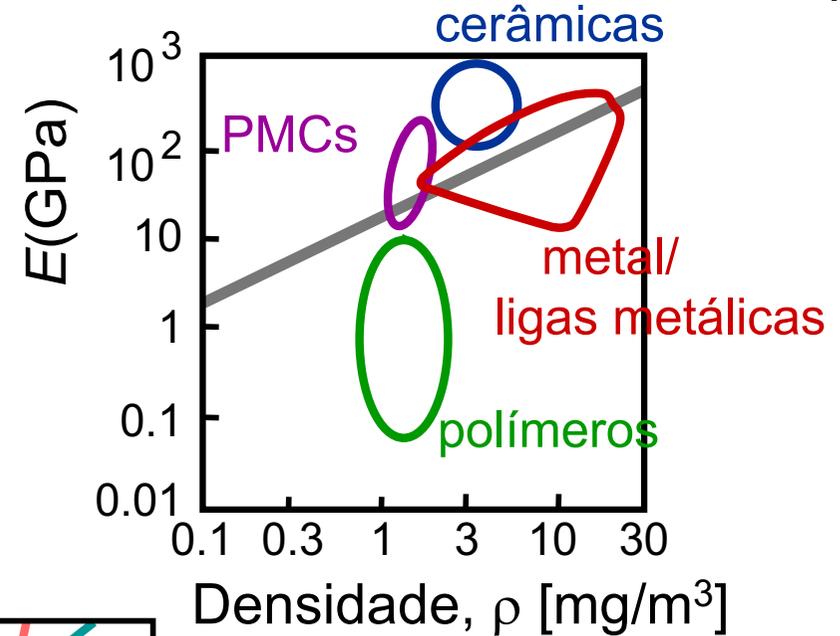


# Compósitos

- CMCs: Aumento de tenacidade



- PMCs: Aumento de  $E/\rho$



- MMCs:  
Aumento de  
resistência a  
fluência

