



SEM 0534 – Processos de Fabricação Mecânica

USINAGEM DE MATERIAIS AERONÁUTICOS

MATERIAIS NÃO METÁLICOS

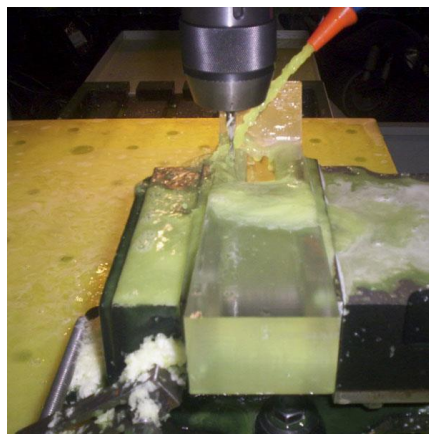
POLÍMEROS, CERÂMICAS E COMPÓSITOS



POLÍMEROS



Torneamento



Furação





Definições

Moléculas: H-C

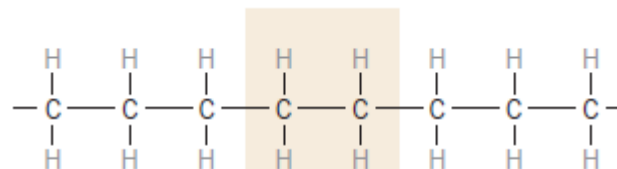
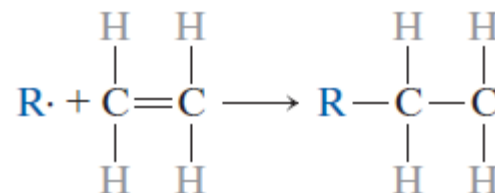
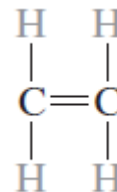
Mero: menor unidade

Propriedades

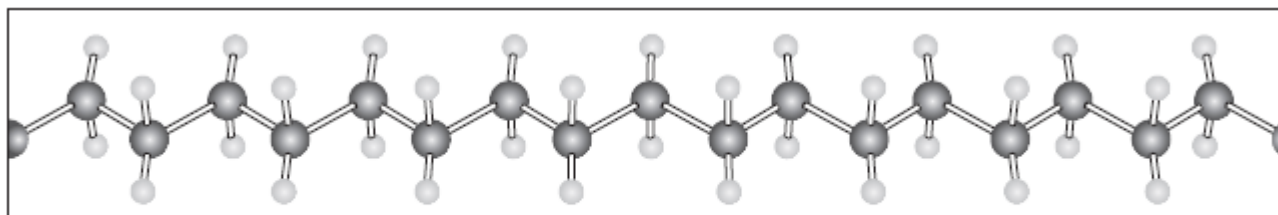
Baixo peso

Resistência à corrosão e dielétrica

Fácil fabricação*



Repeat unit





Classificação

Polímeros naturais

Plantas e animais (celulose, borracha, algodão)



Polímeros sintéticos

Carvão e Petróleo (polietileno, teflon, acrílico)



Polímeros termoplásticos

Flexíveis e remoldados

Poliâmidas, policarbonatos e poliacetatos



Polímeros termorrígidos

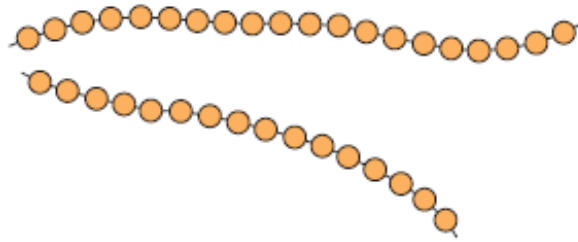
Não deformáveis

Elastômeros, epóxis e poliésteres

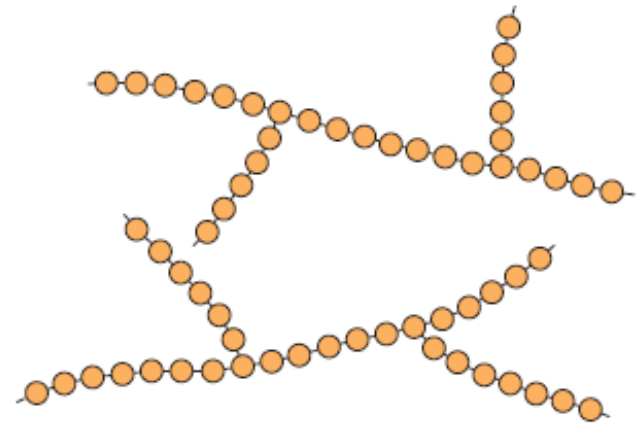




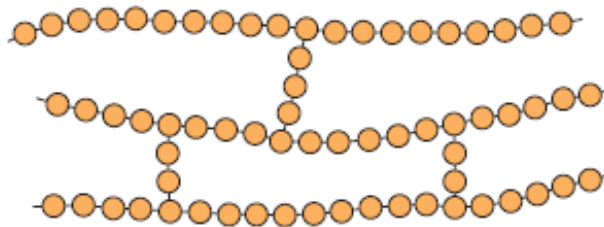
Estrutura Molecular



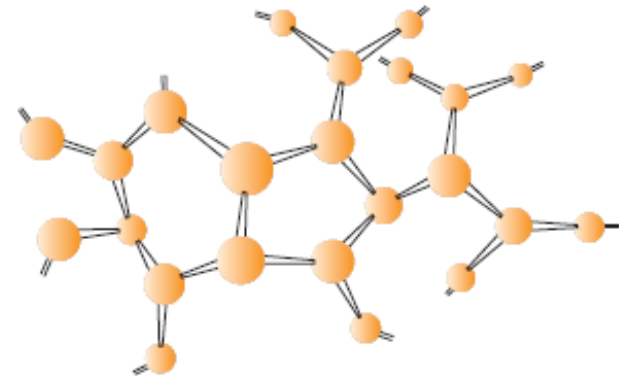
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) linear, (b) ramificada, (c) cruzada e (d) reticulada



Comportamento Térmico dos Polímeros

Temperatura de Transição Vítreia (T_g)

Temperatura em que a mobilidade das cadeias moleculares se torna restrita

Rotação de grupos laterais em torno das ligações primárias (coesão intramolecular)

Temperaturas $< T_g$: polímero rígido e quebradiço

Temperatura de Fusão Cristalina (T_m)

Temperatura em que as regiões cristalinas mudam de fase

Termoplásticos: $T_m < 330$ °C

Termorrígidos: carbonização



Comportamento Térmico dos Polímeros

Temperatura de Transição Vítreia (T_g) e de Fusão (T_m)

<i>Material</i>	<i>Glass Transition Temperature [°C (°F)]</i>	<i>Melting Temperature [°C (°F)]</i>
Polyethylene (low density)	-110 (-165)	115 (240)
Polytetrafluoroethylene	-97 (-140)	327 (620)
Polyethylene (high density)	-90 (-130)	137 (279)
Polypropylene	-18 (0)	175 (347)
Nylon 6,6	57 (135)	265 (510)
Polyester (PET)	69 (155)	265 (510)
Poly(vinyl chloride)	87 (190)	212 (415)
Polystyrene	100 (212)	240 (465)
Polycarbonate	150 (300)	265 (510)



Morfologia

Polímero amorfo:

Cadeias moleculares aleatórias

Geralmente são transparentes

Ex: PMMA, PS, PC

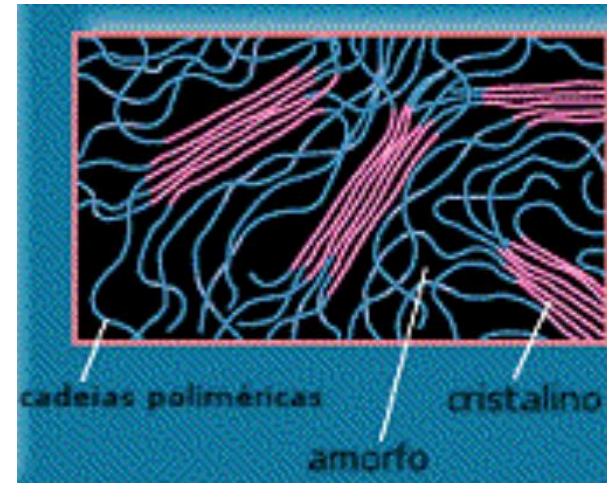
Polímero cristalino*:

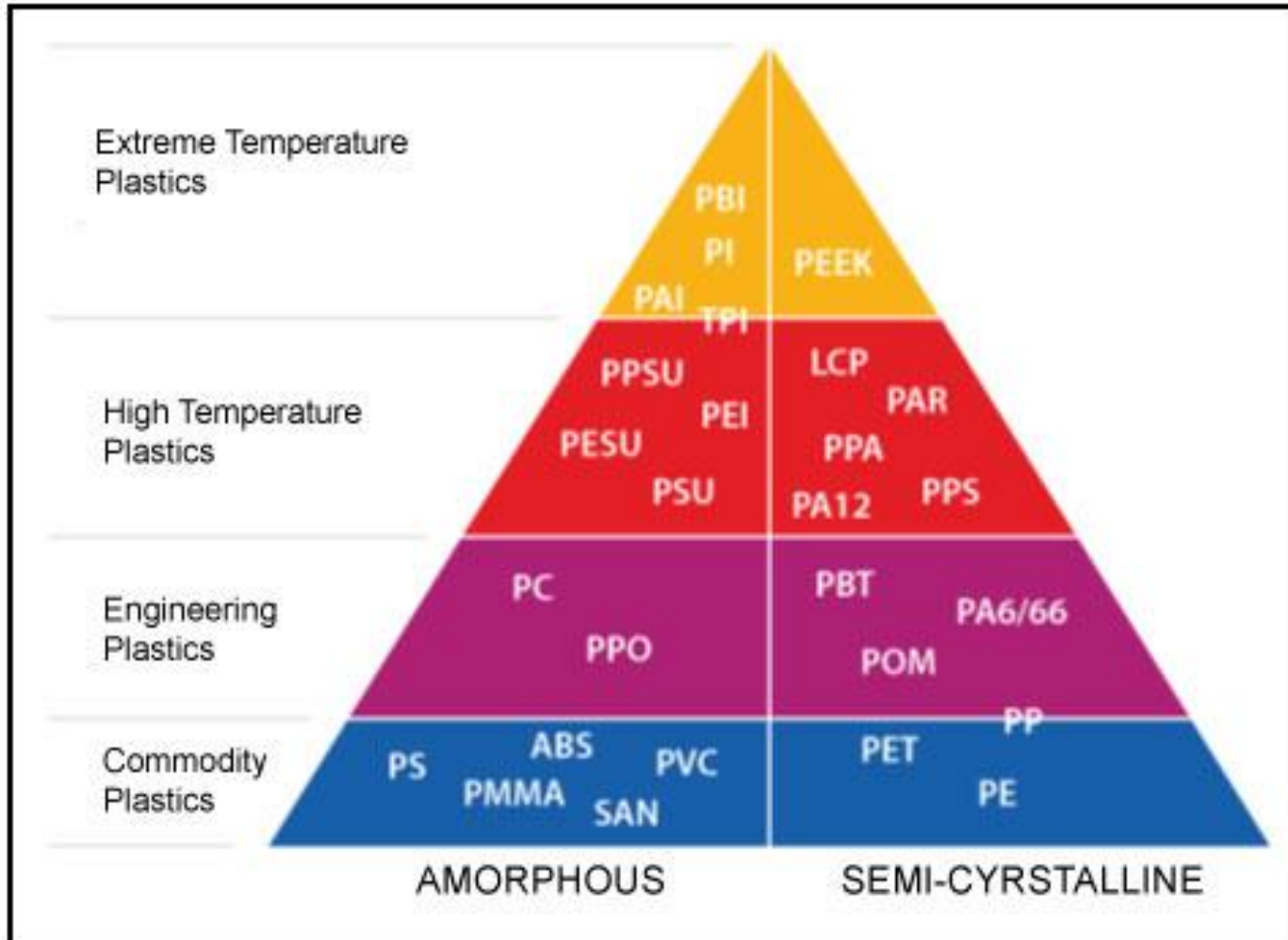
Massa polimérica ordenada com distância atômica $< 10 \text{ \AA}$

Geralmente são opacos

Ex: PA, PE, PP, PTFE

* Nenhum polímero é 100% cristalino







Propriedades Mecânicas

<i>Material</i>	<i>Specific Gravity</i>	<i>Tensile Modulus [GPa (ksi)]</i>	<i>Tensile Strength [MPa (ksi)]</i>	<i>Yield Strength [MPa (ksi)]</i>	<i>Elongation at Break (%)</i>
Polyethylene (low density)	0.917–0.932	0.17–0.28 (25–41)	8.3–31.4 (1.2–4.55)	9.0–14.5 (1.3–2.1)	100–650
Polyethylene (high density)	0.952–0.965	1.06–1.09 (155–158)	22.1–31.0 (3.2–4.5)	26.2–33.1 (3.8–4.8)	10–1200
Poly(vinyl chloride)	1.30–1.58	2.4–4.1 (350–600)	40.7–51.7 (5.9–7.5)	40.7–44.8 (5.9–6.5)	40–80
Polytetrafluoroethylene	2.14–2.20	0.40–0.55 (58–80)	20.7–34.5 (3.0–5.0)	—	200–400
Polypropylene	0.90–0.91	1.14–1.55 (165–225)	31–41.4 (4.5–6.0)	31.0–37.2 (4.5–5.4)	100–600
Polystyrene	1.04–1.05	2.28–3.28 (330–475)	35.9–51.7 (5.2–7.5)	—	1.2–2.5
Poly(methyl methacrylate)	1.17–1.20	2.24–3.24 (325–470)	48.3–72.4 (7.0–10.5)	53.8–73.1 (7.8–10.6)	2.0–5.5
Phenol-formaldehyde	1.24–1.32	2.76–4.83 (400–700)	34.5–62.1 (5.0–9.0)	—	1.5–2.0
Nylon 6,6	1.13–1.15	1.58–3.80 (230–550)	75.9–94.5 (11.0–13.7)	44.8–82.8 (6.5–12)	15–300
Polyester (PET)	1.29–1.40	2.8–4.1 (400–600)	48.3–72.4 (7.0–10.5)	59.3 (8.6)	30–300
Polycarbonate	1.20	2.38 (345)	62.8–72.4 (9.1–10.5)	62.1 (9.0)	110–150



Exemplos e Aplicações

Polietileno (PE)

Embalagens plásticas flexíveis

Polipropileno (PP)

Pára-choques e cadeiras

Policloreto de Vinila (PVC)

Encanamentos hidráulicos

Polimetacrilato de Metila (PMMA)

(Acrílico)

Lentes, portas e janelas

Politetrafluoretileno (PTFE)

(Teflon)

Revestimentos

Polihexametilenoadipamida (PA)

(Nylon)

Elementos de máquina (polias, engrenagem)

Poliestireno (PS)

(Isopor)

Isolantes térmicos

Poliuretano (PUE)

Roldanas, gaxetas, espumas, tintas



Peças Plásticas Aeronáuticas



- Mobiliário: bagageiros, mesas, poltronas
- Design de interiores: placas/revestimentos de PC
 - Nível de transparência, retardância à chama, emissão de fumação e toxicidade
 - Substitui PVC ou blendas com resina acrílica PVC/PMMA*
 - Assentos, alojamentos da cabine, divisórias, compartimentos de bagagem
- Pode reduzir em 40% o peso de aeronaves (gravidade específica 0,85)
- Consumo: 0,03 kg combustível/hora/kg a bordo
- Frota comercial: 57 mi horas voo/ano (reduzir 1 kg/voo = economia anual de 1700 ton de combustível e 5400 ton de CO₂)
- * Uma única aeronave: redução de 126 kg (190 passageiros), economia de combustível de 207 mil ton e 657 mil ton de CO₂ da frota total



Peças Plásticas Aeronáuticas

- Dutos de admissão de PEEK (Airbus)
- Suportes de tanques de combustível de PEEK (Bombardier)
 - Antes Al, Ti imersos em fluidos





Peças Plásticas Aeronáuticas

- Avião solar (aeronave tripulada) Si2
- 6 mil peças plásticas (Empresa Solvey)
- 72 m de envergadura
- 2,3 ton de peso
- Longarina (colméia + plástico): resistência à torção, flexão e vibração
- Peças mecânicas e parafusos: PEEK
- Cockpit: Poliamida 6





Usinabilidade

Diferenças entre plásticos e metais

Plástico é mau condutor de calor (dissipado lentamente)

Dilatação térmica elevada

Sensibilidade ao entalhe

Menor rigidez que os metais (forças de usinagem menores)



Metal



Polímero



Usinabilidade

Processos

Torneamento, Fresamento, Furação, Roscamento e Serramento

Materiais: acrílico, nylon, teflon, plásticos laminados

Cuidados: pós e fumos (atacam a saúde do operador)

Experiência acumulada nos metais e correlações com alumínio e latão



Torneamento



Usinabilidade



Fresamento



Furação



Serramento



Ferramenta de Corte

Em geral, usa-se as mesmas ferramentas para metais (Al e Latão)

Aço rápido

Metal duro (Al)

Desempenho das ferramentas na usinagem de polímeros

Maior vida e menor custo

Polímeros ópticos

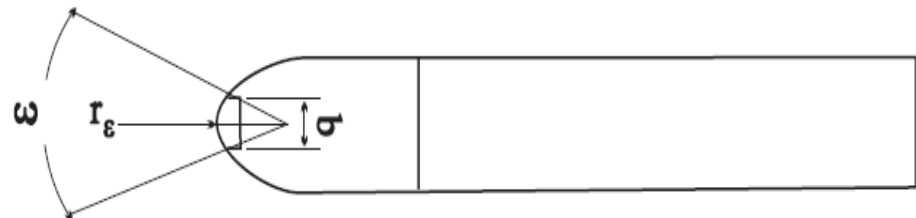
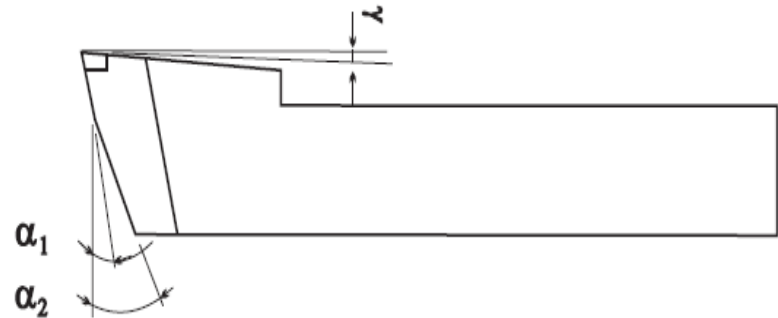
Ferramenta de diamante monocristalino

Raio de aresta mínimo ($\sim 0,5$ nm)

Baixa rugosidade da face de saída

Mínimo atrito e aderência de polímero

Resistência ao desgaste





Desgaste da Ferramenta

Geração de calor

Cavaco-ferramenta

Peça-ferramenta

Metais

Alta condutividade térmica

Remoção do calor pelo cavaco

Polímeros

Baixa condutividade térmica

Remoção do calor pela ferramenta

Aumento do calor e do desgaste

Usinagem de PMMA

Lentes

Torneamento com diamante

Reação: silicone (polímero) com C (ferramenta)

Erosão química da ferramenta

Usinagem de PC

Polímero amorfo e diamante (isolantes elétricos)

Atrito na usinagem (eletricidade estática)

Cisão das cadeias poliméricas

Acúmulo de carga adicional na superfície da peça

Descarga peça-ferramenta (luminescência)

Lascamento das arestas da ferramenta



Fluido de Corte

$\sigma \times \varepsilon = \text{função (temperatura)}$

Controle da temperatura na usinagem

Compostos químicos

Reações químicas

Fluidos a base de água e ar



Solventes nos fluidos

Termoplásticos:

Quebra das ligações

Surge uma mais forte (ainda Van der Waals)

Reduz o grau de ligações

Aumenta a mobilidade entre cadeias

Desintegração e solubilização do material

Termorrígidos:

Cadeias primárias de alta energia

Insolúveis aos solventes

Inserção dos fluidos nas cadeias

Inchamento do polímero

Depende: afinidade (fluido) e retículo (polímero)



Estabilidade Dimensional

Plásticos = função (temperatura, pressão, umidade)

Podem sofrer variação de formato e dimensões

Usinagem: dilatação térmica e absorção de umidade

Resfriamento: contração dimensional

Tolerâncias Dimensionais

Polímeros > Metais

$\pm 0,3$ mm ou maiores (se possível)

Evolução dos polímeros: menores tolerâncias (centésimos de mm)



Acabamento da Peça

Metais: usinagem dúctil preferida (F_c menores)

Polímeros: melhores acabamentos no regime dúctil (acima da T_g)

Regime dúctil: deformação plástica e fratura dúctil (PC e PE)

Regime frágil: trincas antecedem a fratura frágil (PMMA e PS)

Estado vítreo: usinagem provoca trincas superficiais

Ex: T_g (PS) ~ 100 °C

Maior mobilidade atômica

Maior deformação

Maior área de contato peça-ferramenta

Maior força de corte

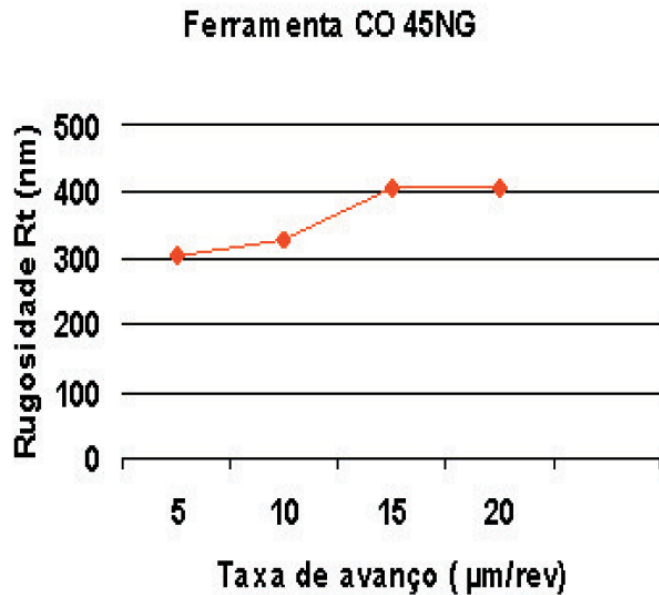


Acabamento da Peça (Estudo de Caso)

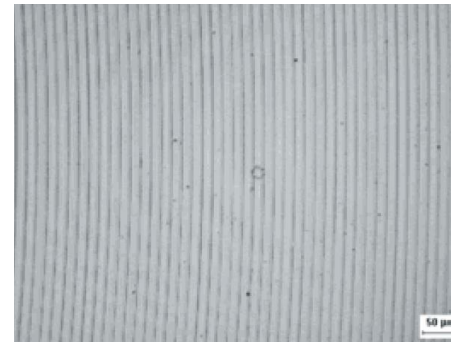
Torneamento de PMMA (1000 rpm)

Ferramenta de diamante ($\gamma = -5^\circ$)

$a_p = 10 \mu\text{m}$



$f = 10 \mu\text{m/rot}$



$f = 15 \mu\text{m/rot}$



$f = 20 \mu\text{m/rot}$

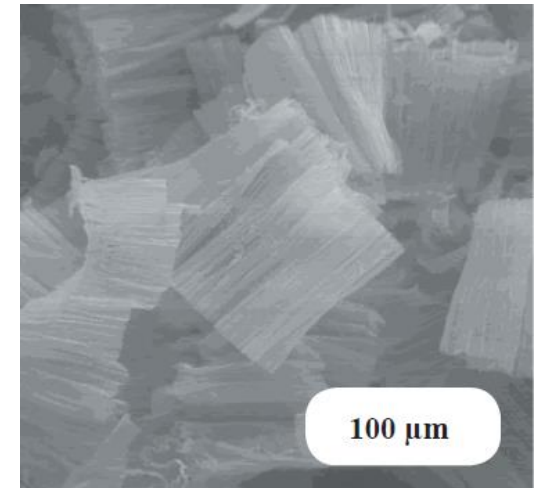
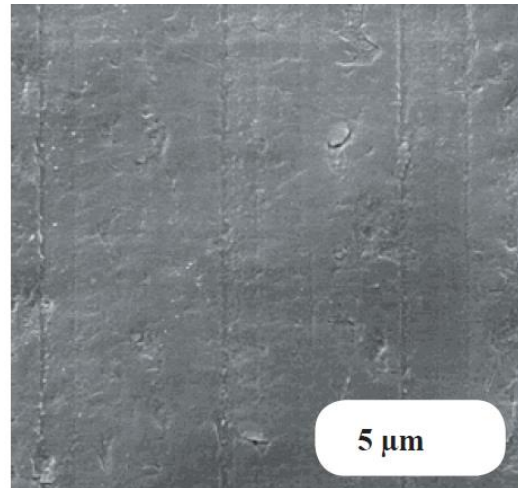
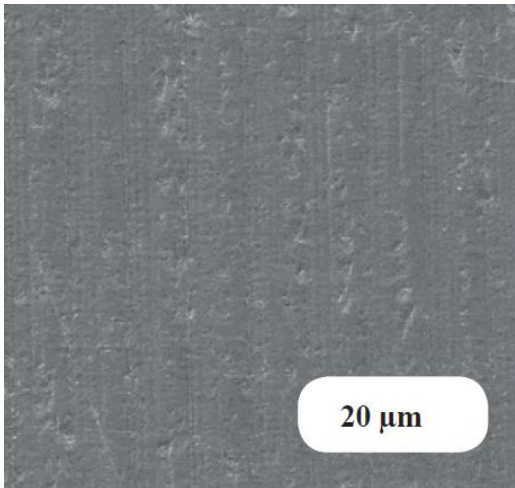


Acabamento da Peça

Torneamento de PMMA (1000 rpm)

Ferramenta de diamante ($\gamma = -5^\circ$)

$a_p = 10 \mu\text{m}$



$f = 10 \mu\text{m/rot}$

Cavaco contínuo



Recomendações na Usinagem

Fixação

Causa de maior refugo de peças plásticas

Problemas:

Falta de adesão

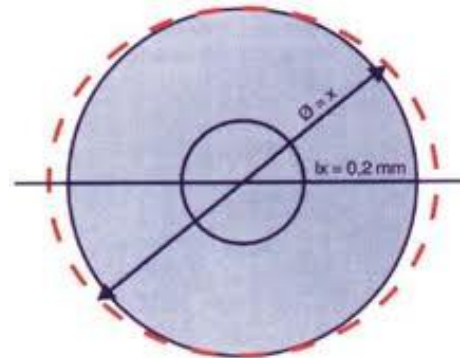
Falta de repetibilidade do lote

Ovalização

Triangularização

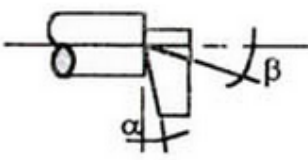

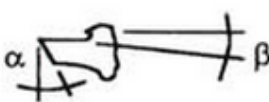
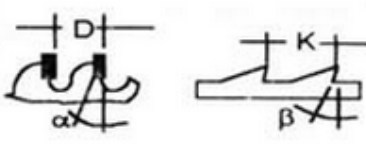
Descentralização

Falta de paralelismo





Condições de Corte e de Ferramenta

Usinagem de Plásticos de Engenharia						
	PC MGS®	PBT MGS®, PET MGS®, POM MGS® Homo., POM MGS® Copo.	PEEK™ MGS®, PPS MGS®	PTFE MGS®	PVDF MGS®	
Torneamento Torneado Turning 	m/min	300	300 - 500	90 - 200	150 - 250	150 - 500
	mm/U	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5	0,1 - 0,3	0,1 - 0,3	0,1 - 0,3
	α	5° - 10°	0° - 5°	5° - 10°	0° - 5°	10°
	β	6° - 8°	5° - 10°	5° - 10°	5° - 12°	5° - 8°
Furação Taladrado Drilling 	m/min	50 - 100	50 - 100	70 - 100	150 - 250	150 - 200
	mm/U	0,2 - 0,3	0,01 - 0,2	0,07 - 0,2	0,2 - 0,6	0,1 - 0,3
	α	8° - 10°	15° - 30°	8° - 10°	5° - 20°	5° - 20°
	β	90°	60° - 90°	118°	110° - 130°	130°
	γ	5° - 10°	5° - 10°	5° - 10°	10° - 15°	5° - 10°
Fresagem Fresado Milling 	m/min	300	< 1000	200 - 500	< 800	250 - 500
	mm/dente	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,5	< 0,4
	α	5° - 15°	5° - 10°	5° - 15°	10° - 20°	5° - 15°
	β	10° - 20°	5° - 15°	5° - 15°	5° - 15°	5° - 15°
Corte Serra Corte Sierra Cutting 	m/min	~ 3000	~ 3000	~ 3000	~ 2000	~ 3000
	D (mm)	15 - 40	15 - 40	15 - 40	15 - 40	15 - 40
	α	5° - 8°	0° - 15°	0° - 5°	0° - 10°	5° - 8°
	m/min	300	500 - 900	500 - 800	300 - 500	300
	K (mm)	3 - 8	5 - 10	3 - 5	2 - 5	2 - 5
	β	5° - 8°	0° - 5°	0° - 5°	0° - 10°	5° - 8°
	Tolerâncias (ISO R286)	14	12 - 14	12	18	16



CERÂMICA



Roscamento



Fresamento



Usinagem a Laser



Torneamento



Classificação

Cerâmicas tradicionais: argilas, minerais, cimento

Louça, porcelana, tijolos, revestimentos, pisos, telhas, refratários, vidros

Cerâmicas termomecânicas:

Óxidos: SiO_2 , CaO , Na_2O , K_2O , Al_2O_3

Nitretos: Si_3N_4 , TiN

Carbetos: TiC , SiC , WC , TaC , MoC

Boretos: Fe_2B , TiB_2 , ZnB_2 , CrB





Classificação

Tradicional (silicatos)	Naturais e minerais industriais	Heterogênea e porosa	Mecânica e estética	Materiais de construção e produtos domésticos
Avançada	Produtos químicos industriais	Homogênea e densa	Elétrica magnética nuclear ótica mecânica térmica química biológica	Produtos funcionais



Propriedades

Alta dureza

Baixa densidade

Frágil

Grande resistência a altas temperaturas

Alta resistência ao desgaste e à corrosão

Estabilidade química

Baixa condutividade elétrica

Pode ser translúcida, transparente ou opaca

Comportamento magnético

<i>Material</i>	<i>Approximate Knoop Hardness</i>
Diamond (carbon)	7000
Boron carbide (B ₄ C)	2800
Silicon carbide (SiC)	2500
Tungsten carbide (WC)	2100
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	2100
Quartz (SiO ₂)	800
Glass	550



Processamento

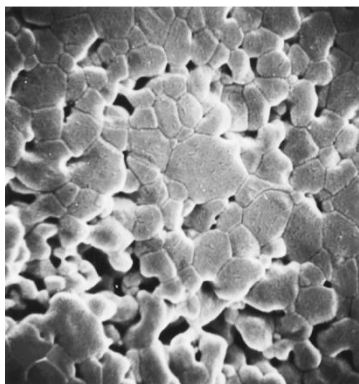
Metalurgia do Pó

(a) Enchimento

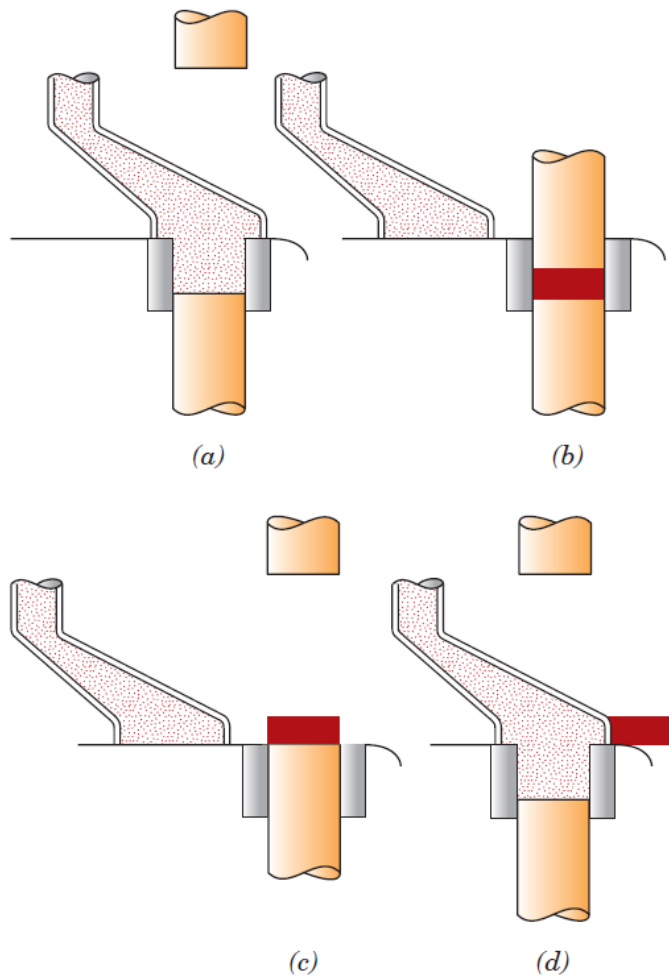
(b) Compactação

(c) Ejeção

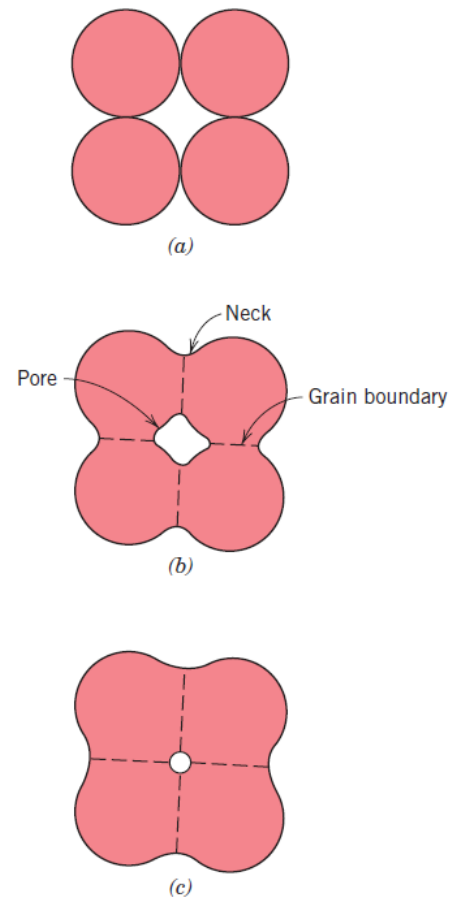
(d) Expulsão



Alumina sinterizada a 1700 °C por 6 min



Compactação



Sinterização



Aplicações (Indústria)

Eletrônica: sensores, capacitores, resistores, piezelétricos

Térmica: turbinas, turbo-compressores, trocadores de calor, fornos, isolantes

Mecânica: ferramentas de corte, filtros, rolamentos, freios

Têxtil: guia-fios

Biomédica: próteses ósseas e dentárias, implantes, juntas

Automotiva: funções mecânicas x eletrônicas

Sensores para sistemas de segurança (freios, air-bag, direção)

Sedes de válvulas, guias de cilindros, sistemas de transmissão

Disco de freios, anéis, válvulas, pistões, camisas, cabeçotes, motores



Processos de Usinagem

Evolução da usinagem de cerâmicas nos últimos anos

Compressão: peça alcança sua geometria (usinagem em verde)

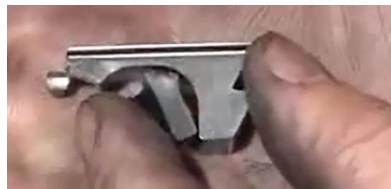
Processos com ferramenta de geometria definida

Furação, fresamento e torneamento (para baixas forças de corte)

Sinterização: peça alcança a resistência mecânica completa

Processos com ferramenta de geometria indefinida

Polimento, retificação e lapidação



Peça em verde



Peça sinterizada



Processos de Usinagem

Lapidação

Processo abrasivo de refinamento de acabamento final

Visa produzir superfícies simples (planas e cilíndricas)

Elevada exatidão

Produção de cerâmicas => geração de microtrincas

Sem identificação a olho nu (luz negra + corantes)

Lapidação pode eliminar microtrincas superficiais

Peças sem tolerâncias: apenas limpas

Peças com tolerâncias: medidas finais

Peças sob altas tensões mecânicas em serviço: lapidação





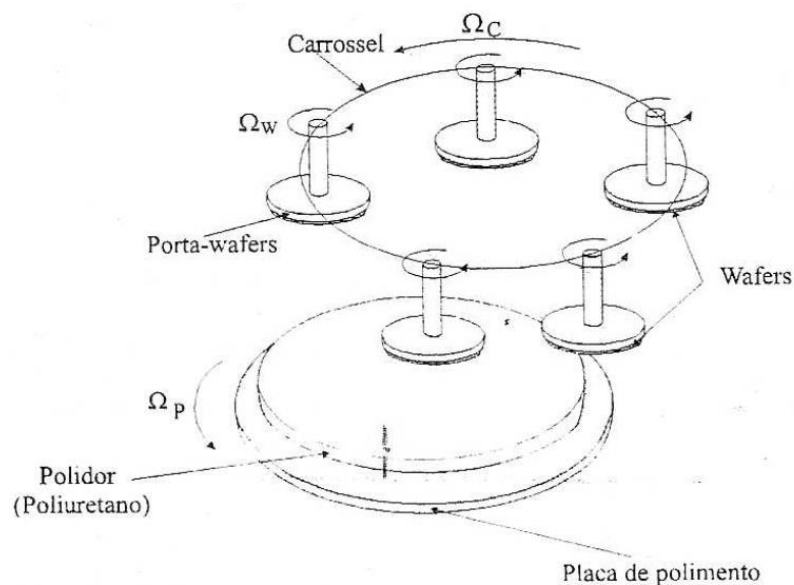
Processos de Usinagem

Polimento

Necessário em materiais frágeis após lapidação se $R_a > 10 \mu\text{m}$

Textura especular (semicondutores)

Remoção de defeitos superficiais





Processos de Usinagem

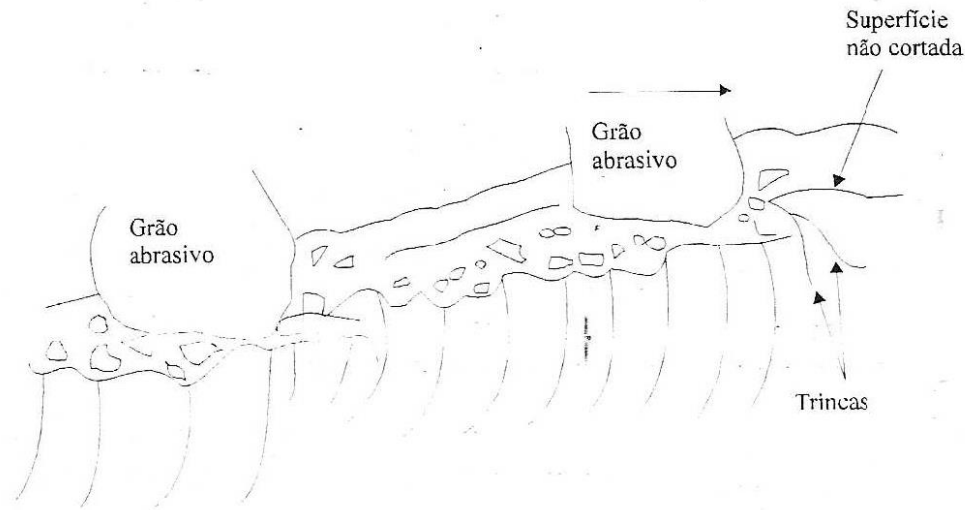
Retificação

Usinagem abrasiva com grãos aleatórios unidos por ligante

Cavaco formado por trincas em materiais frágeis

Rebolo de diamante

Tamanho do campo de tensões x modo de remoção de cavaco





Processos de Usinagem

Retificação (Remoção no Modo Dúctil)

Cargas ou profundidades < produção de trincas

Fluxo plástico ou cisalhamento

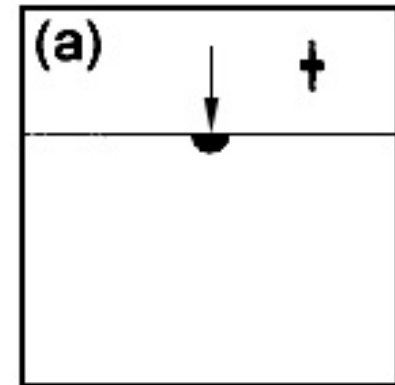
Ausência de trincas residuais na peça

Estratégias (modo dúctil): controlar a_p e F_n por grão

a_p crítica = 0,5 a 1 μm (cerâmicas)

Mesmo material: modos dúctil e frágil

Transição: parâmetros de processo





Processos de Usinagem

Torneamento de Materiais Frágeis

Modo dúctil: a_p pequeno + condições de processo

Geometria da ferramenta

Velocidade de corte

Avanço por dente

Refrigeração

Deformação Plástica

Torneamento no regime dúctil = qualidade óptica em materiais frágeis



Processos de Usinagem

Torneamento de Materiais Frágeis

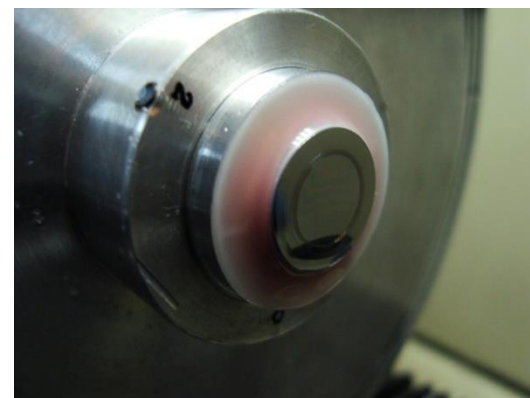
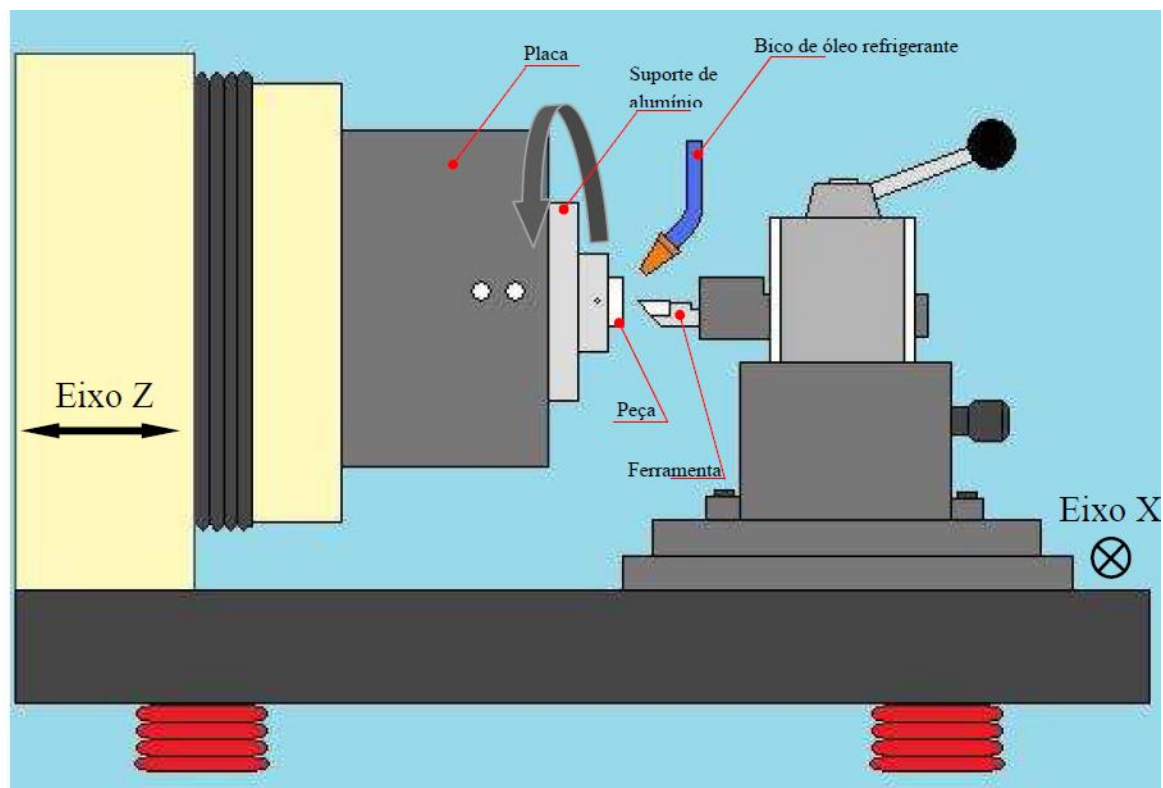
Materiais torneáveis com ferramenta de diamante em ultraprecisão

METAIS	POLÍMEROS	CRISTAIS
Alumínio	Acrílico	Silício
Cobre	Nylon	Germânio
Latão	Policarbonato	Arseneto de Gálio
Bronze	Poliestireno	Antimoneto de Índio
Níquel Eletrolítico	Polisulfonados	Sulfeto de Zinco
Zinco	Acetato	Niobato de Lítio
Prata	Fluoroplásticos	Fosfato de Potássio
Ouro		Sulfeto de Cádmio
Chumbo		Dióxido de Telúrio
Estanho		Iodeto de Césio
Platina		Fluoreto de Cálcio
Magnésio		Fluoreto de Estrôncio



Processos de Usinagem

Torneamento de Carbeto de Tungstênio (WC)

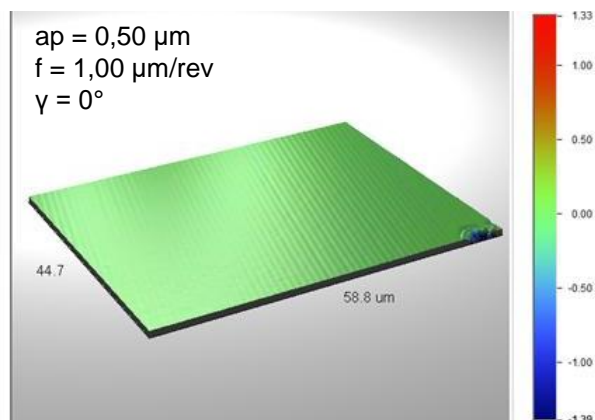




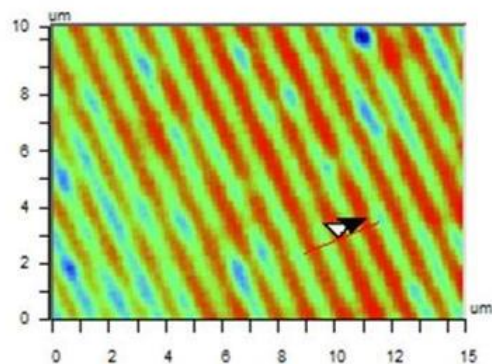
Processos de Usinagem

Torneamento de Carbeto de Tungstênio (WC)

Acabamento Superficial



Ausência de microtrincas
Usinagem em regime dúctil

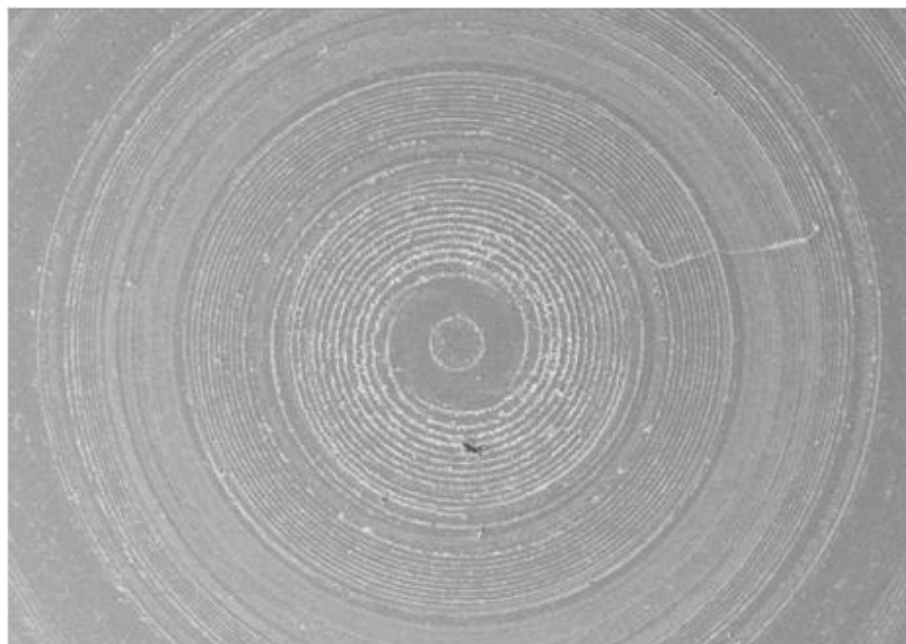




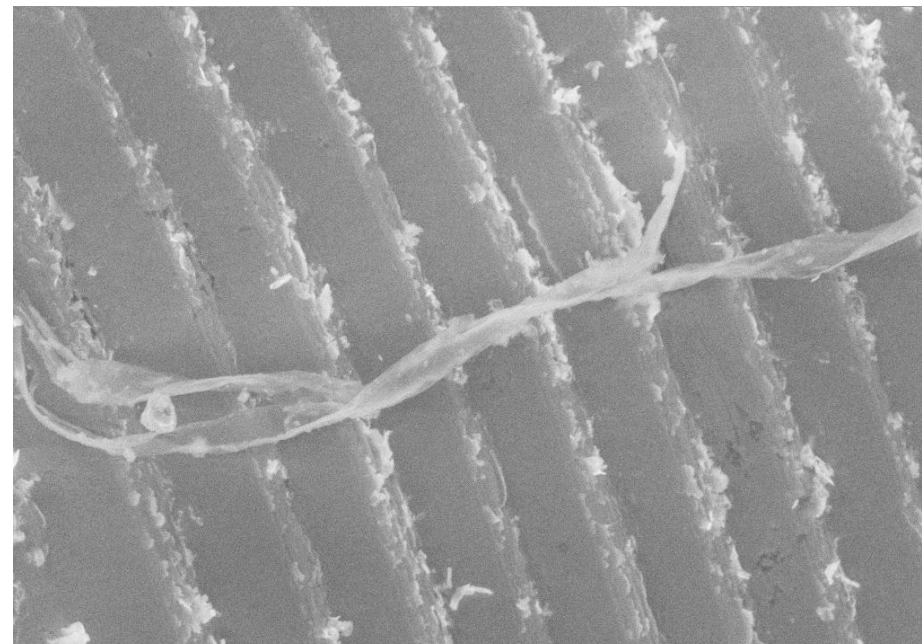
Processos de Usinagem

Torneamento de Carbeto de Tungstênio (WC)

Formação de Cavaco Dúctil



IQSC EHT=20.00 kV WD= 4 nm Mag= 113 X Detector= SE1
100µm Photo No.=1 S-May-2009



IQSC EHT=20.00 kV WD= 22 nm Mag= 2.00 K X Detector= SE1
3µm Photo No.=2 S-May-2009

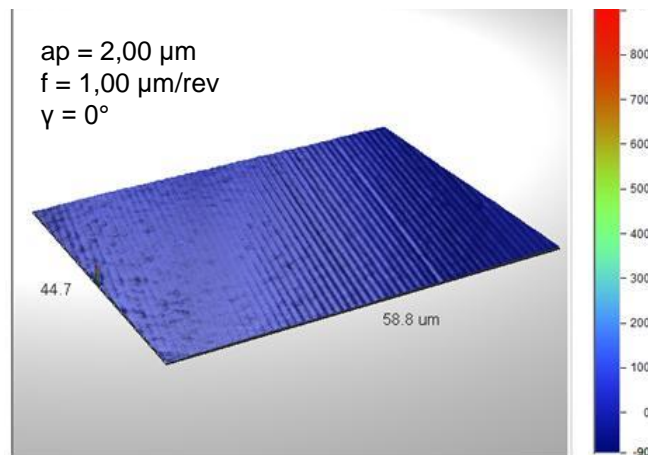
Superfície usinada com ferramenta CO60LG



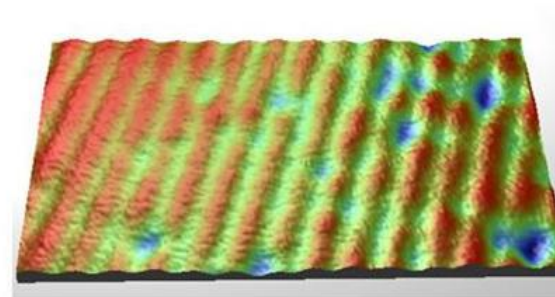
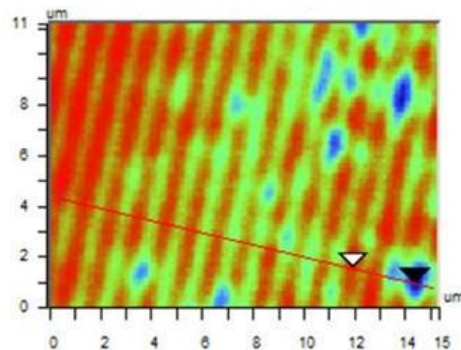
Processos de Usinagem

Torneamento de Carbeto de Tungstênio (WC)

Acabamento Superficial



Presença de microtrincas
Usinagem em regime frágil

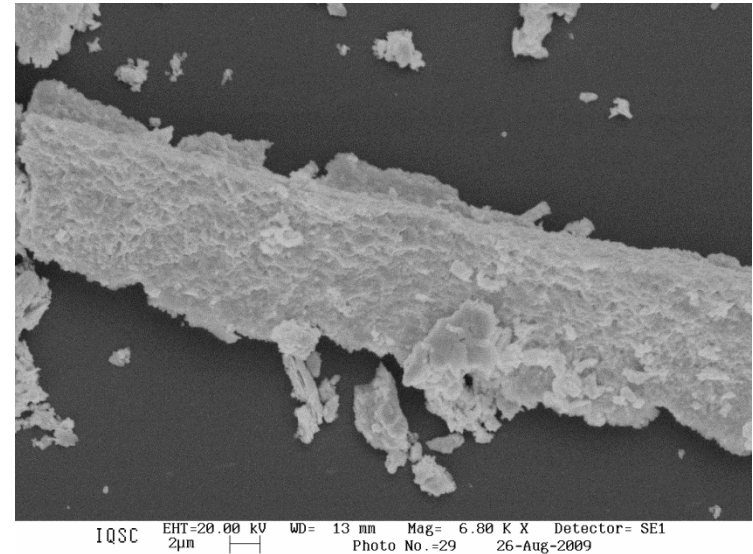
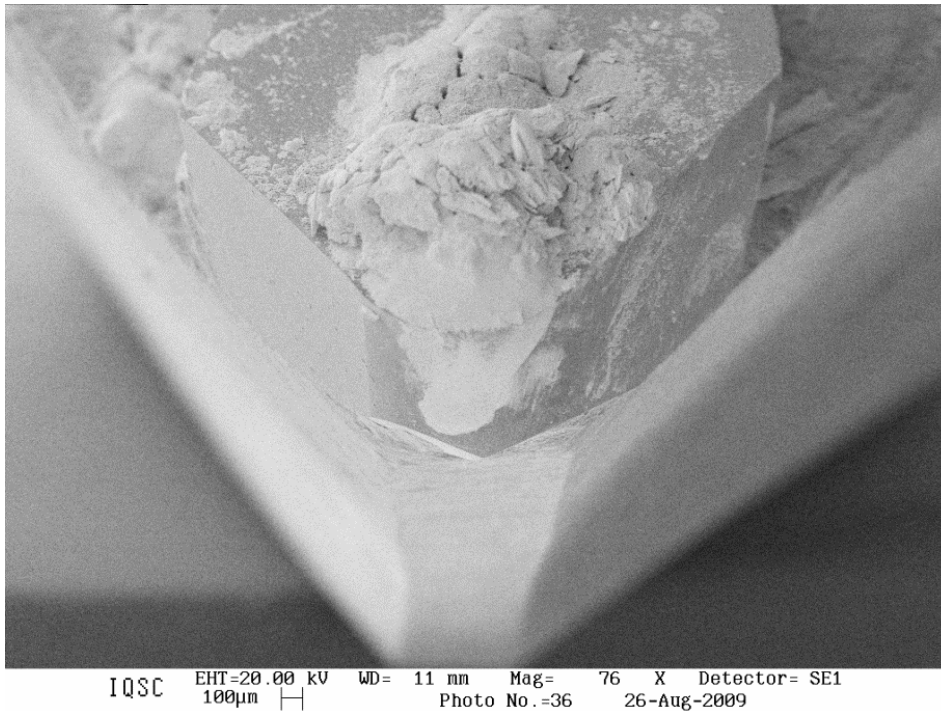




Processos de Usinagem

Torneamento de Carbeto de Tungstênio (WC)

Formação de Cavaco Frágil



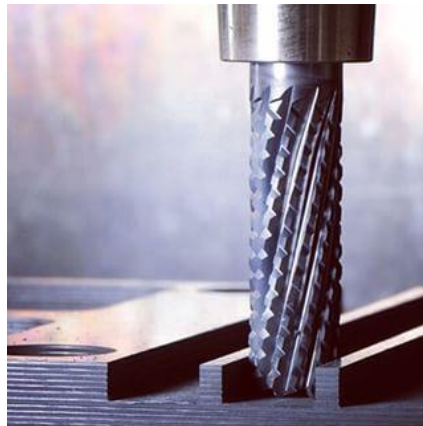
Ferramenta CO60WG e profundidades de usinagem e avanços superiores a 2 µm.



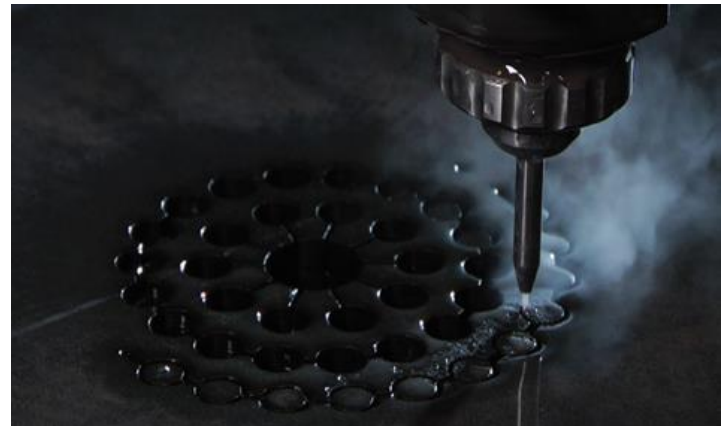
COMPÓSITOS



Furação



Fresamento



Jato de Água

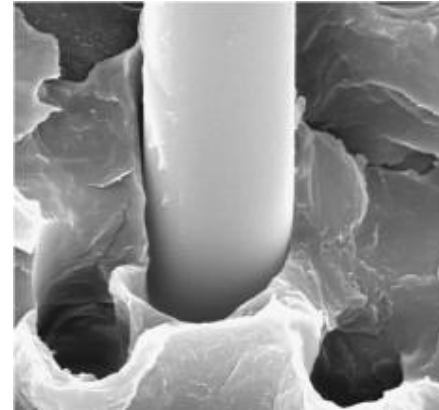


Definição

Sem definição universal

Composto formado por partes

Depende da escala



1. Material formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macroconstituintes, que diferem na forma e composição química e que, na sua essência, são insolúveis uns nos outros (Smith, 1998).

2. Material formado por dois ou mais componentes, com identidade química e forma diferentes, que se conservam distintos após o processamento, e que são separados por uma interface mais ou menos bem definida (Ferrante, 2002).



Constituição

Multifásico

Aglomerante ou matriz

Reforçantes ou cargas

Aglomerante

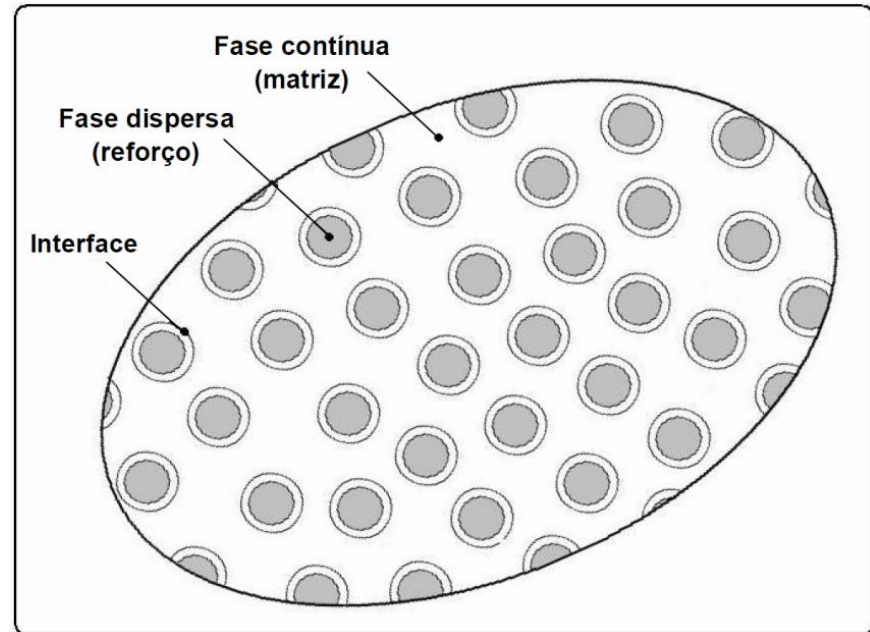
União dos reforços

Transmissão das cargas

Reforços

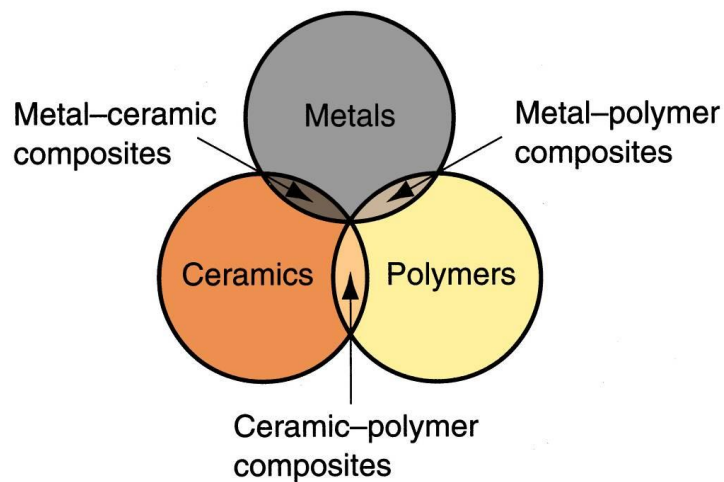
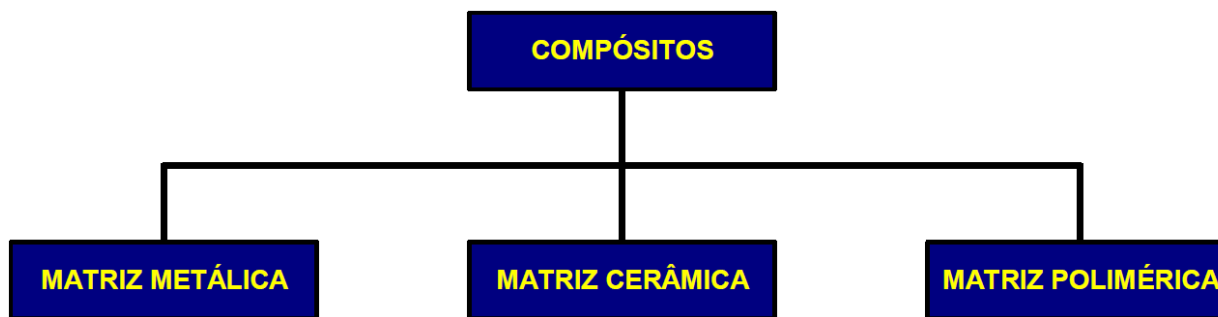
Suporte de carga

Transmissão de calor e eletricidade



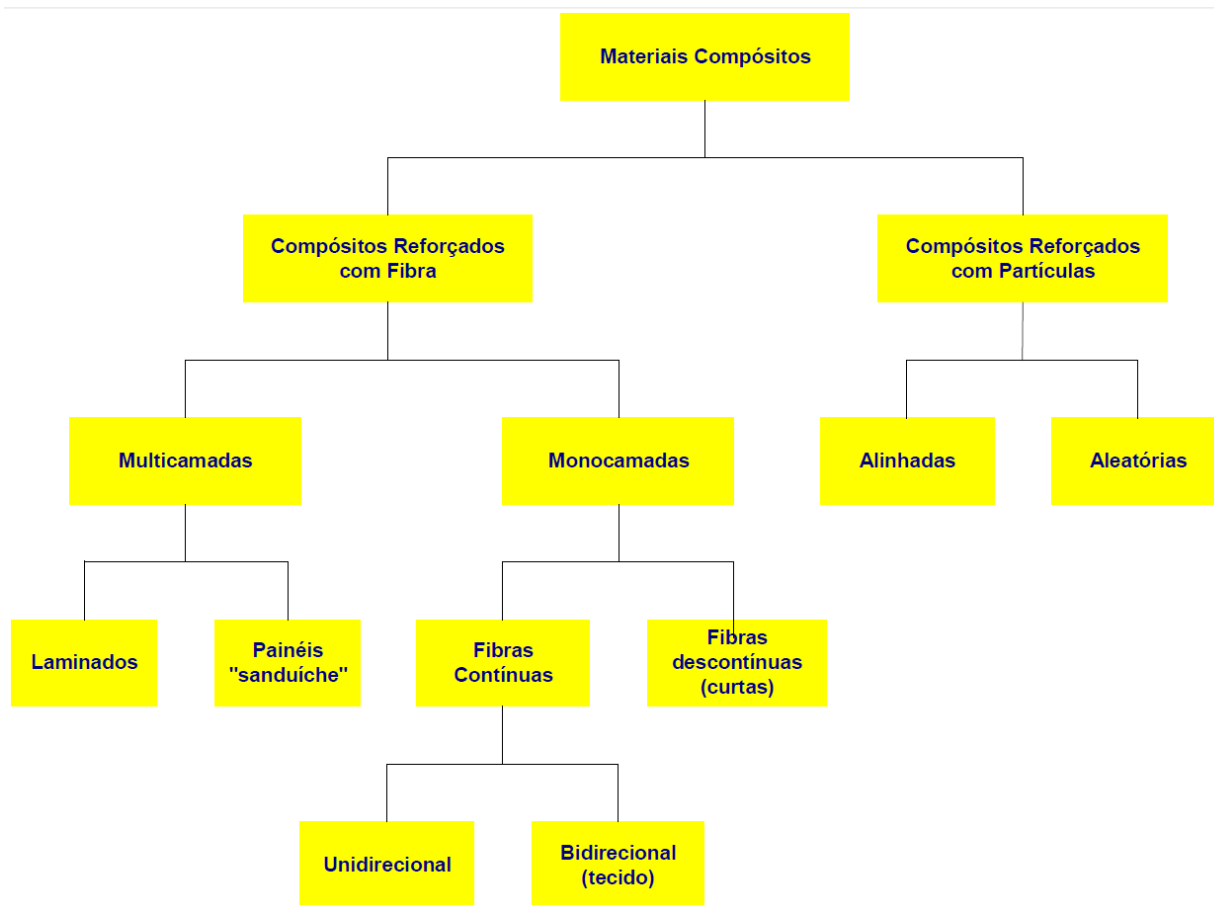


Tipos de Compósitos (Constituição)





Tipos de Compósitos (Forma)





Exemplos e Aplicações

Matriz Polimérica

Fenóis, Epóxis, Poliésteres

(Leves e resistentes)

Matriz Metálica

Ti, Al, Mg e Cu

(Mais pesadas)

Matriz Cerâmica

SiC, Al₂O₃, ZrC, Si₃N₄

(Uso entre 1000 e 2000 °C)

Matriz Carbono

Elevada energia de absorção

(Uso acima de 2000 °C)

Indústrias

Automotiva, aeronáutica, aeroespacial, naval, nuclear, biomédica etc.

Componentes

Aeronaves

(Fuselagem, asa, turbinas, freios)

Foguetes

(Tubos)

Reservatórios

(Fluidos, alimentos)

Peças estruturais

(Chassis automotivos)

Características de Funcionalidade

Resistência x Peso

Amortecimento, fadiga, inércia química

Material compósito no EMB170

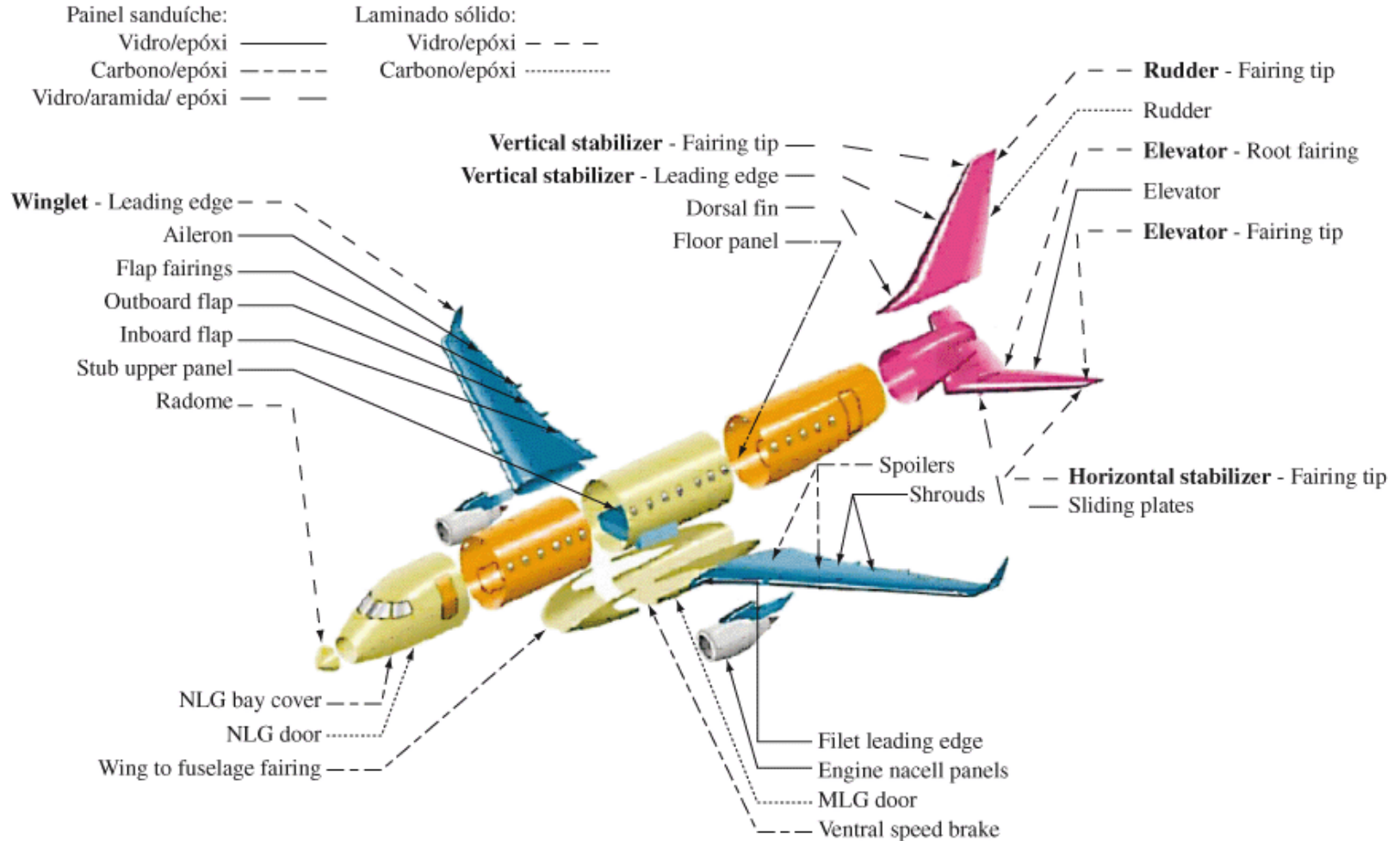


Figura 2. Vista explodida da aeronave EMB-170, mostrando os componentes fabricados em compósitos poliméricos avançados (cortesia da Embraer).



Processos de Usinagem

Moldagem x Usinagem

(flexibilidade x precisão e acabamento)

Processos não-convencionais

Ultrassom, laser, eletroerosão, jato d'água, plasma

(Degradação térmica e absorção de umidade)

Processos convencionais

Furação, fresamento, torneamento, roscamento

(Depende da geometria da peça e do domínio da tecnologia)

Fluido de Corte

Raros na usinagem de compósitos (absorção da umidade)



Mecanismo de Corte (Usinabilidade)

Concentração de calor na zona de corte

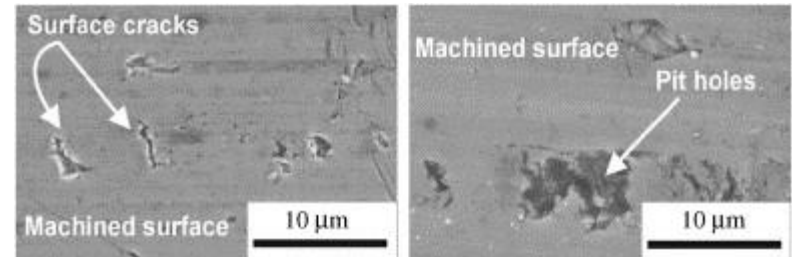
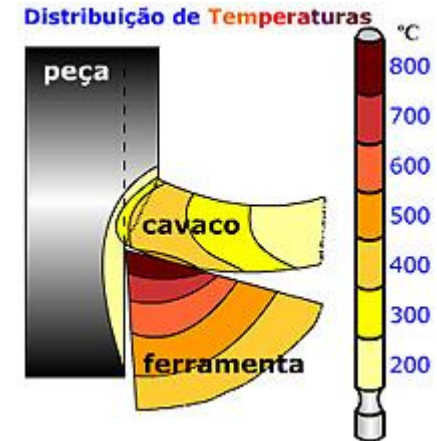
Ferramenta é o principal meio de dissipação de calor

Dureza a quente, condutividade térmica e tenacidade

Qualidade superficial da peça usinada

Delaminações, extração de reforços (*pullout*)

Tensões residuais, trincas, queima





Ferramenta de Corte

Efeitos

Atrito das fibras

Forças pulsantes

Elevadas temperaturas

Causas

Fadiga

Degradação térmica

Abrasão

Abrasividade dos compósitos

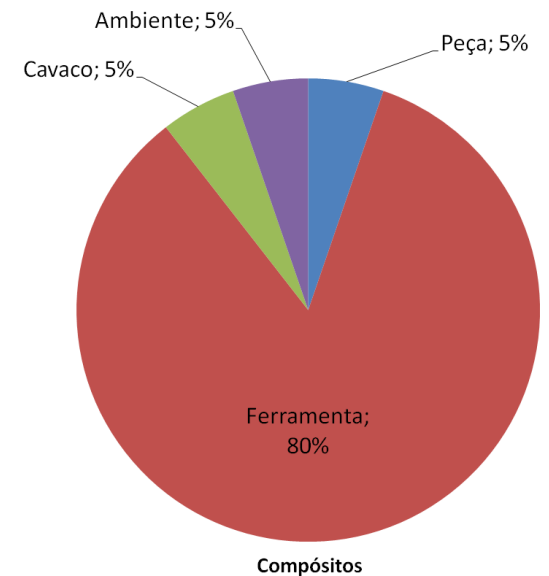
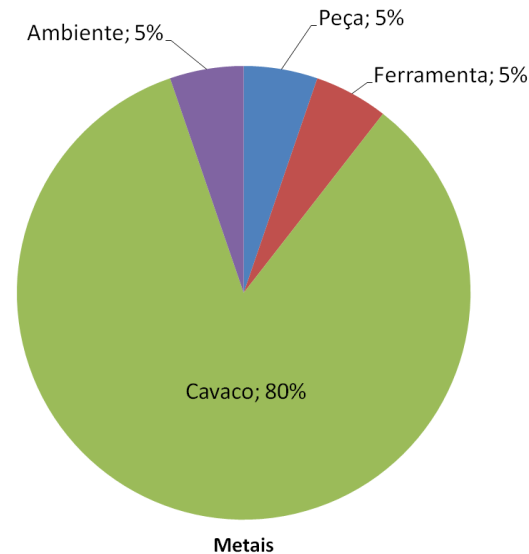
Menor qualidade de corte

Menor vida da ferramenta

Melhor emprego

Metal duro, CBN, Diamante

Transporte do calor na usinagem





Desgaste da Ferramenta

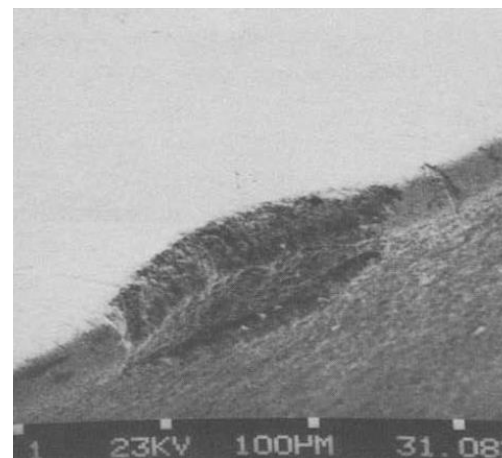
Desgaste de flanco em metal duro

Abrasão e *Attrition*

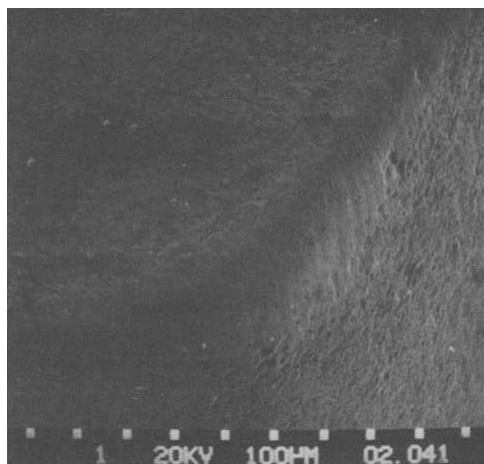
Perda de revestimento TiC = Entalhe

Sem desgaste de cratera

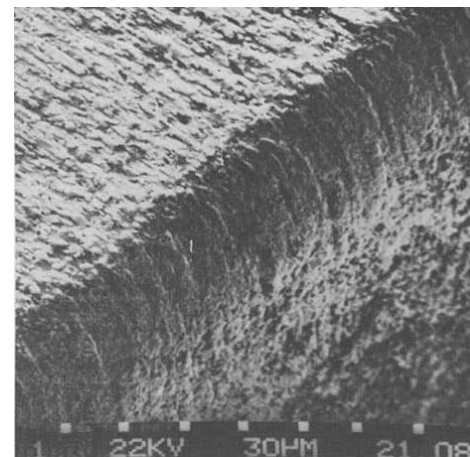
Arredondamento da aresta



Desgaste de Entalhe



Desgaste de flanco

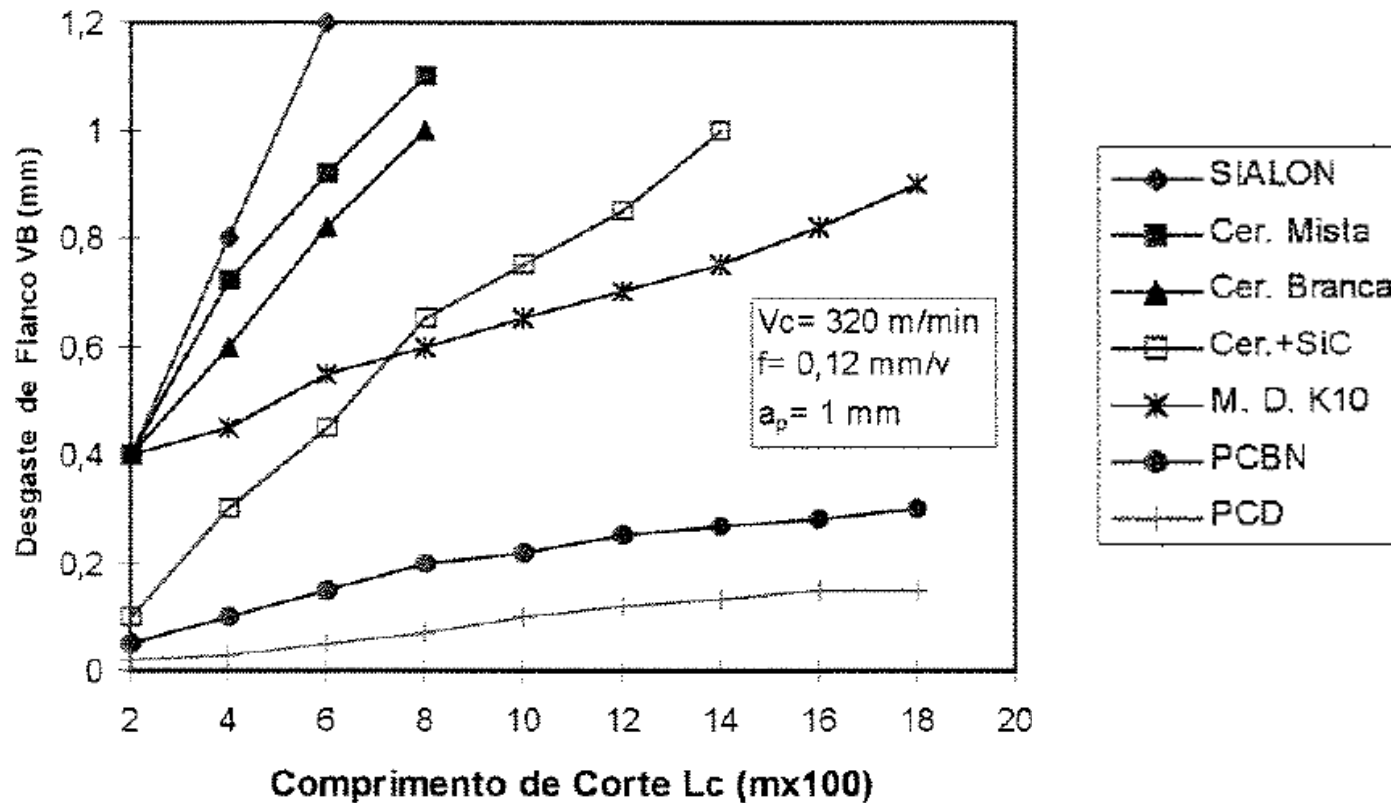


Arredondamento de aresta



Vida da Ferramenta

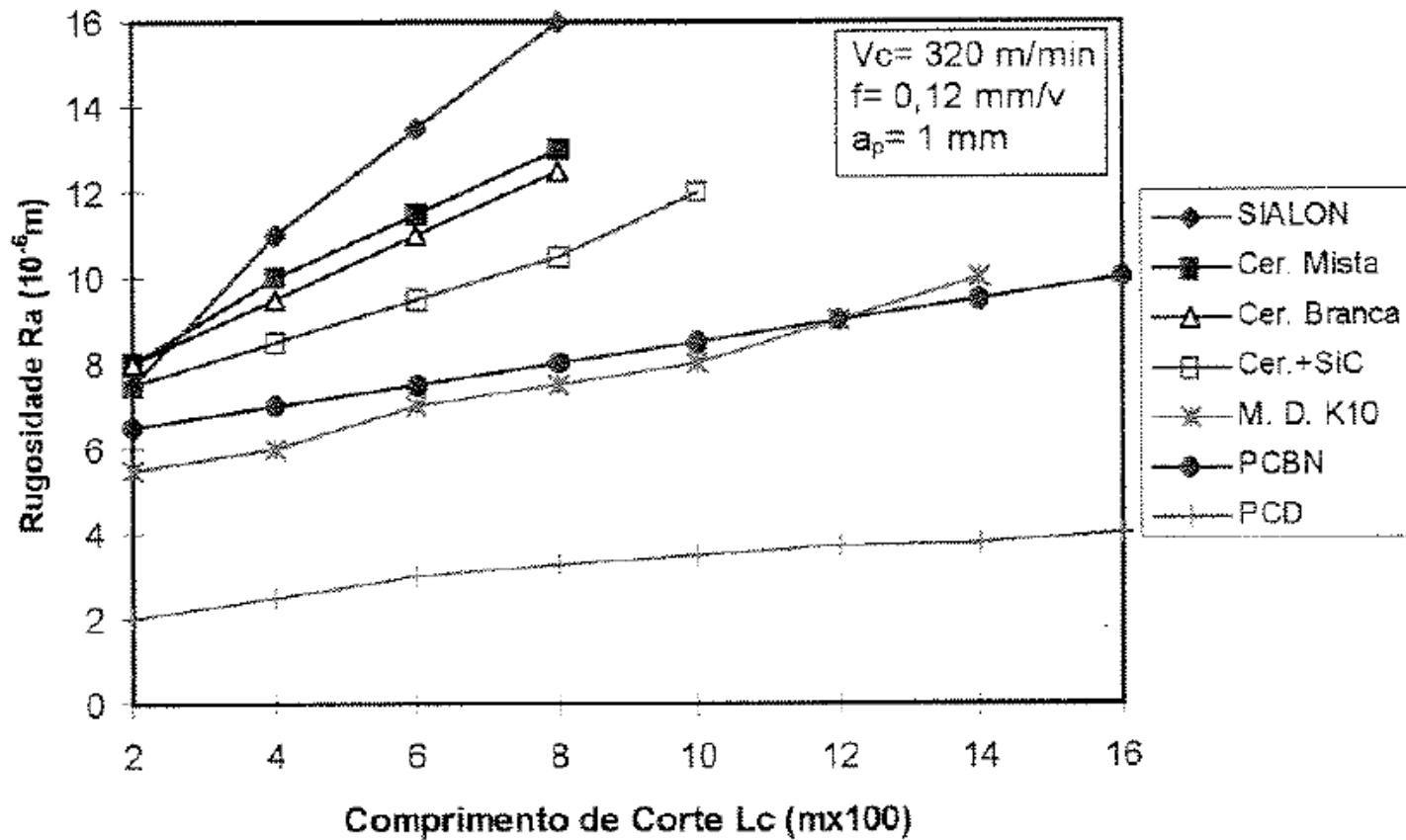
PRFV-C 60% V_f (70% C + 30% V) bobinado





Acabamento Superficial

Torneamento de PRFC-V bobinado usando diversas ferramentas





Furação de Compósitos

Naval, automobilística e aeronáutica

Circuitos impressos

Vida da união x qualidade dos furos

100 mil x mais de 1 milhão de furos

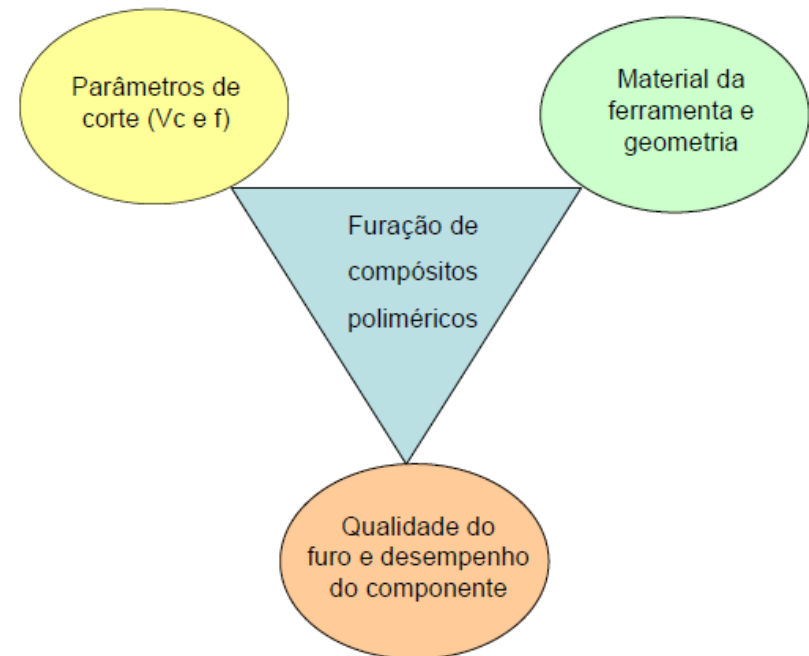
Rebites, porcas e parafusos

Montagem = 50% do custo da fuselagem

Furação: operação final

Rejeição: 60%

Considerações para furação



Furação de Compósitos

Classificação dos Danos na Furação

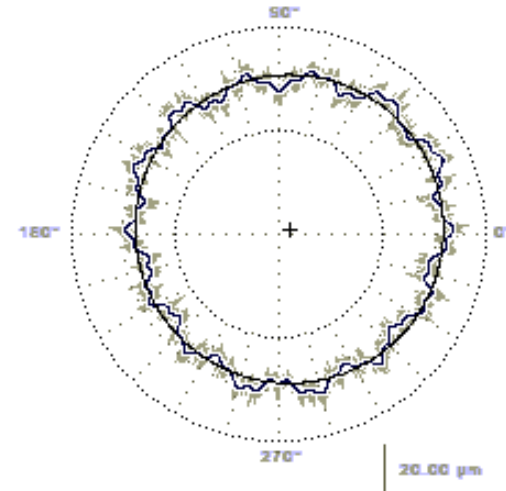
Delaminação na entrada e saída* do furo

Circularidade

Rugosidade da parede interna

Danos térmicos na parede interna

Arrancamento da fibra/resina



Circularidade



Delaminação



Arrancamento de fibra

Furação de Compósitos

Medidas das Delaminações

Direta: largura, área e fator de delaminação (Raio-x, ultrassom, imagem)

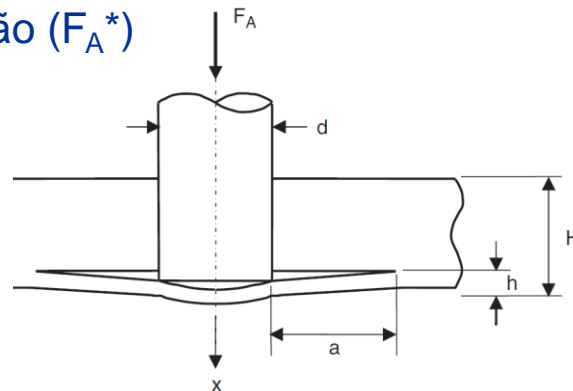
Indireta: Força de avanço*, torque e potência de corte

Delaminação: externa x interna (ensaios não destrutivos)

Externa: suportes x tempo/custo

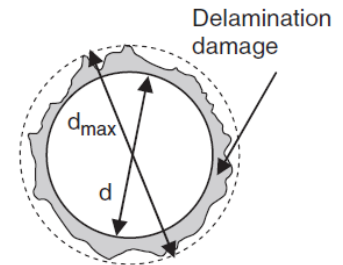
Força crítica de delaminação (F_A^*)

$$F_A^* = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)}}$$



Fator de delaminação

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D}$$



G_{IC} : taxa crítica de liberação de energia (modo I)

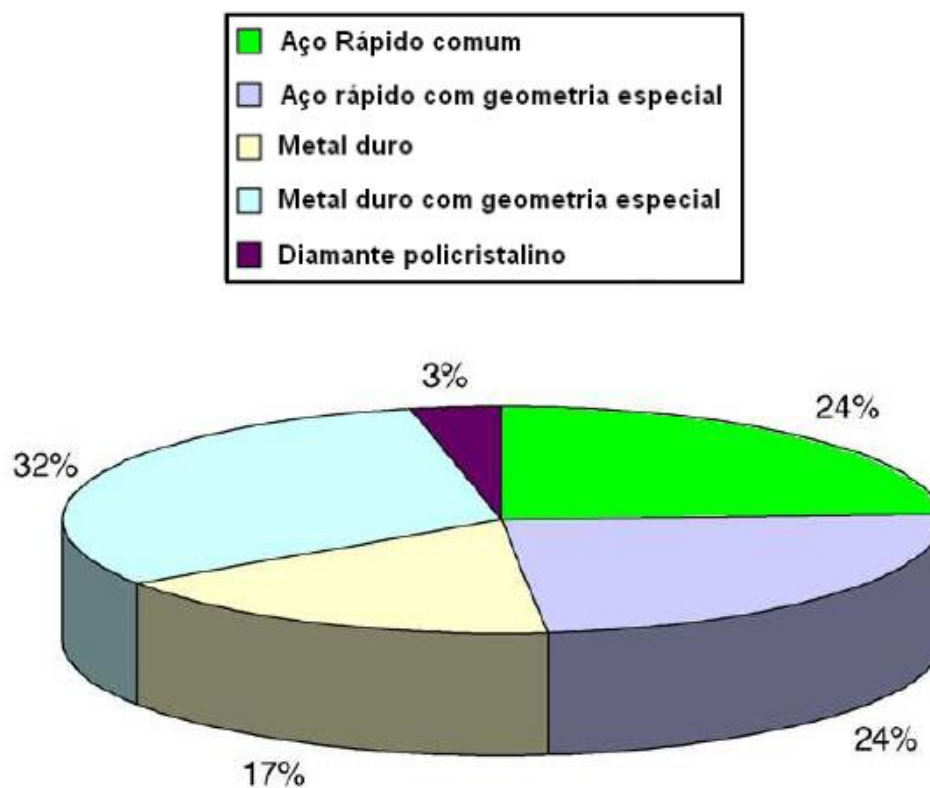
D_{\max} : \varnothing Delaminado

D : \varnothing furo



Furação de Compósitos

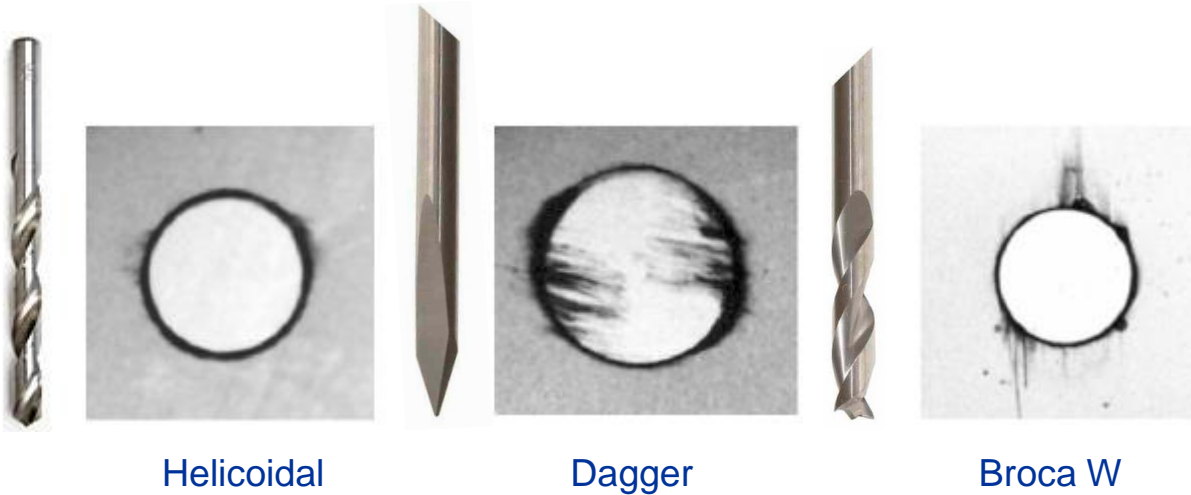
Material para brocas





Furação de Compósitos

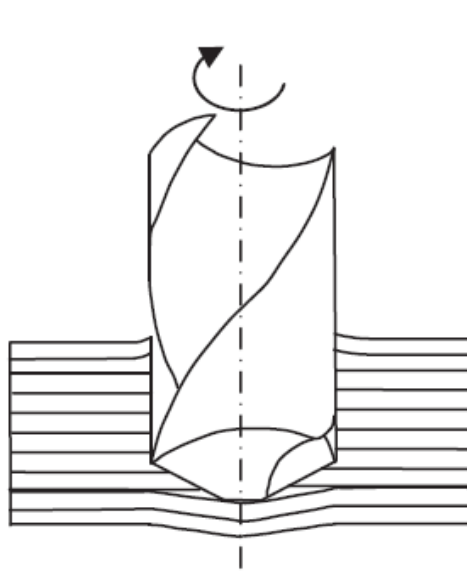
PRFC





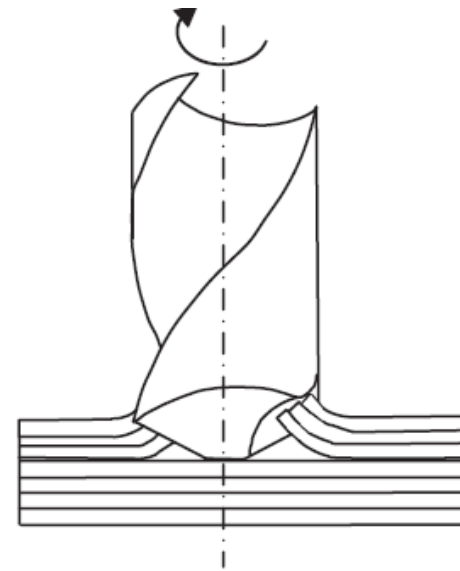
Furação de Compósitos

Mecânica da Delaminação



(a) Push-out

Alma x flexão da camada x trinca
(modo de fratura I e III)

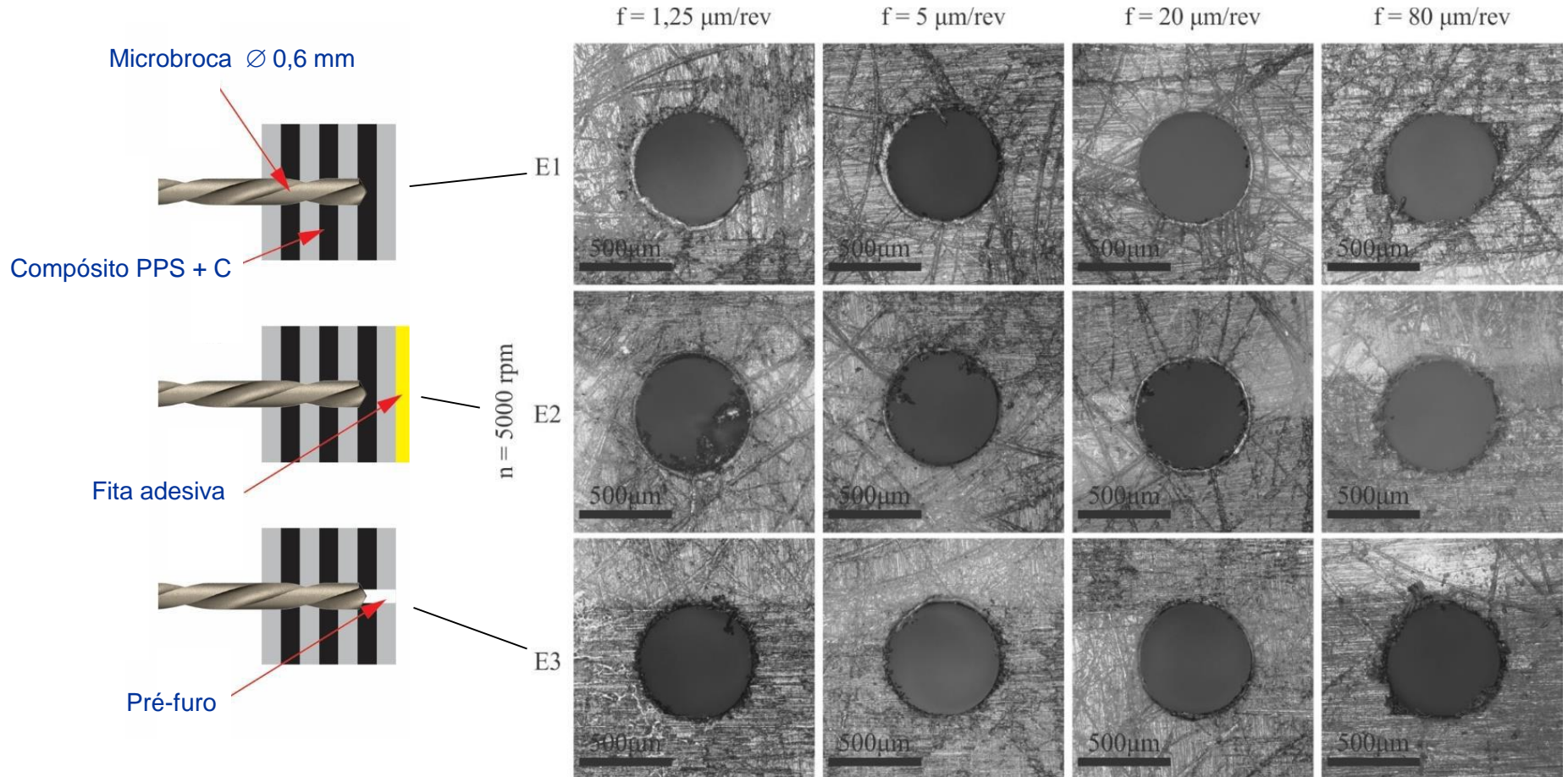


(b) Peel-up

Escorregamento x canais da broca
(modo de fratura III)

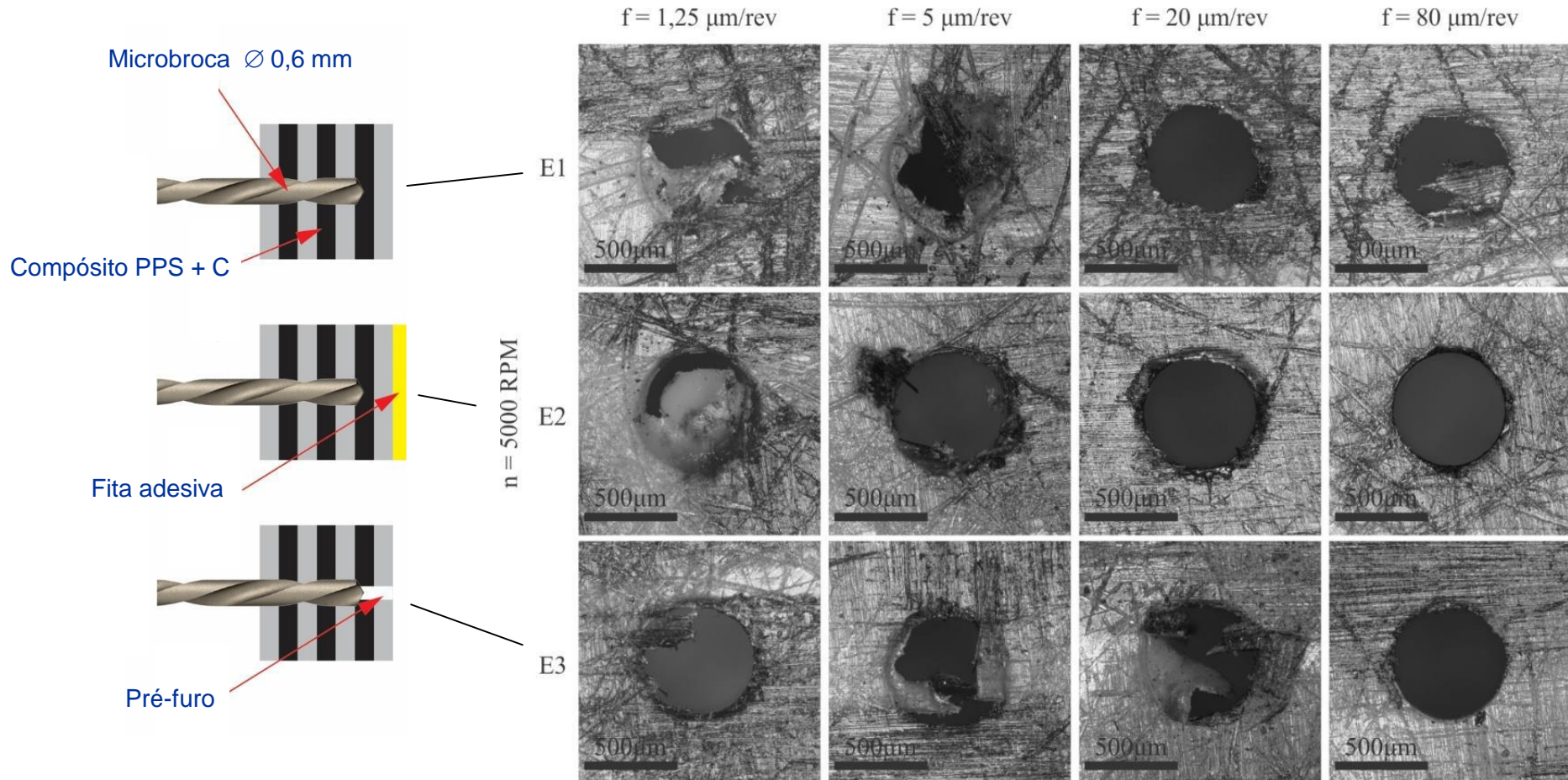
Furação de Compósitos

Mecânica da Delaminação (entrada do furo)



Furação de Compósitos

Mecânica da Delaminação (saída do furo)





Furação de Compósitos

Recomendações Práticas

Diminuir f_n na entrada e saída

Aumentar a rigidez na saída

Usar brocas com alma pequena

Furar dois lados

Minimizar o desgaste da broca

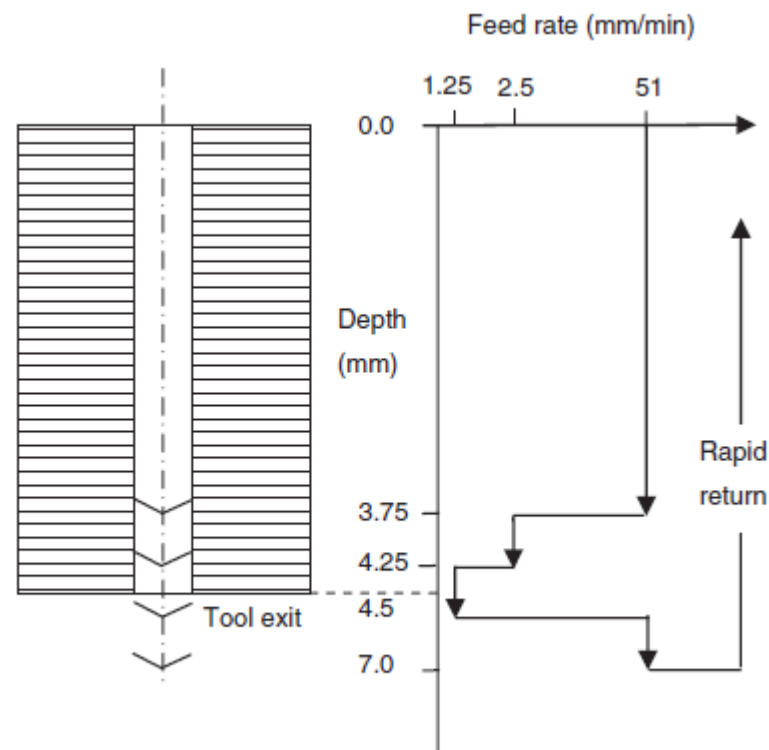
Usar broca de MD

Usar revestimentos (PCD)

Empregar fluido (se possível)

Usar broca Tipo Brad e Spur (W)

Aplicar ciclo “pica-pau”



Broca Brad e Spur



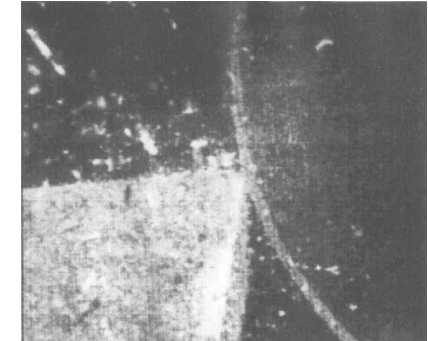
Aspectos de Segurança

Cavacos em forma de pó

Névoa durante a usinagem

Dispersão de partículas dos reforços + matriz

Aquecimento + névoa = risco à saúde do operador



Pó abrasivo prejudicial à máquina-ferramenta

Condução de eletricidade = curto circuitos

Acúmulo = eletricidade estática + risco de explosões

Sistema de exaustão na máquina e ambiente externo

Uso de EPIs e proteção da máquina

CAPACETE DE SEGURANÇA

ÓCULOS DE SEGURANÇA

ABAFADOR DE RUÍDO

CINTO DE SEGURANÇA

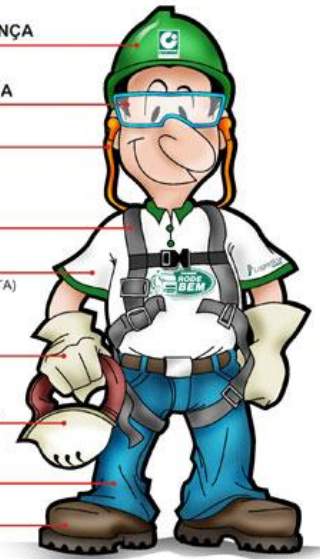
CAMISA OU CAMISETA
(NÃO PODE SER MANGA REGATA)

LUVAS DE RASPA

MÁSCARA FILTRADORA

CALÇA COMPRIDA

CALÇADO FECHADO



OBS: TODOS OS EQUIPAMENTOS DE SEGURANÇA DEVEM POSSUIR CERTIFICADO DE AUTENTICIDADE.