

Tecnologias de corte con haces de alta densidad (chorros de água y láser) de rocas naturales

Rosa Miranda

Professora no Departamento de Eng^a Mecânica e Industrial FCT-UNL

Investigadora do Instituto de Eng^a Mecânica IST-UTL

rmiranda@fct.unl.pt

rmiranda@ist.utl.pt

Sumário

Importância económica do sector das rochas ornamentais

Tecnologias de processamento não convencionais

- LASER

- Jacto de Água

Breve historial

Princípios de funcionamento

Mecanismos envolvidos no corte por laser e por jacto de água

Aplicações

Aspectos económicos

Importância do Sector

Portugal e Espanha são dois dos maiores produtores europeus de rochas ornamentais (mármore, calcários, granitos e ardósias) usadas na construção civil e em decoração.

Nas ultimas décadas investiram na transformação de blocos em produtos finais com maior valor acrescentado.

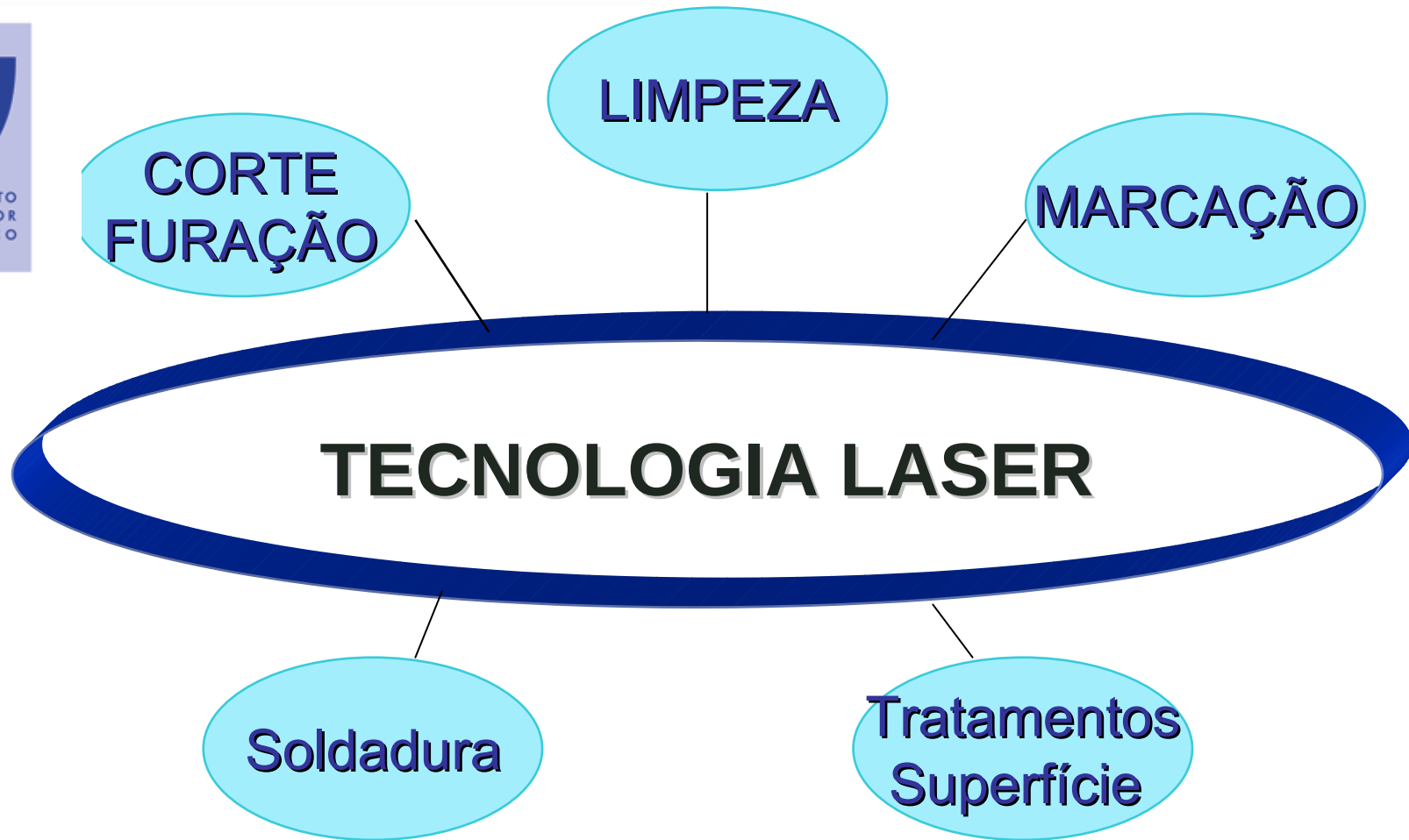
Tecnologias investigadas

Laser – corte, marcação, furação e limpeza de obras de arte

Jacto de água abrasivo – corte, marcação e extracção

Objectivo de aumentar:

- Flexibilidade
- Produtividade
- Qualidade
- Condições ambientais



BREVE HISTORIAL

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



- Einstein 1917- física de emissão espontânea e estimulada
- Bohr e Planck formularam a teoria da mecânica quântica
- Townes 1954 – confirmaram a possibilidade de aplicar a emissão estimulada à amplificação de ondas ultracurtas
- Theodore Maimann 1960 – constrói o primeiro laser de estado sólido (rubi, excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio e filamento helicoidal) nos laboratórios de investigação Hughes, na Califórnia
- Desde 70 - industrializado em processamento de materiais
- Lasers de sólido (Nd:YAG, díodos, fibras) de gás (CO₂, excimeros)

Características da radiação laser

- monocromática - os fótons emitidos têm todos a mesma energia e o mesmo comprimento de onda
- coerente (espacial e temporalmente) - os fótons que constituem a radiação emitida por um laser estão em fase
- direccional
- baixa divergência (da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} mrad).

São estas características que tornam a radiação laser particularmente adequada ao processamento de materiais



3 kW CO₂ laser



3 kW CO₂ laser

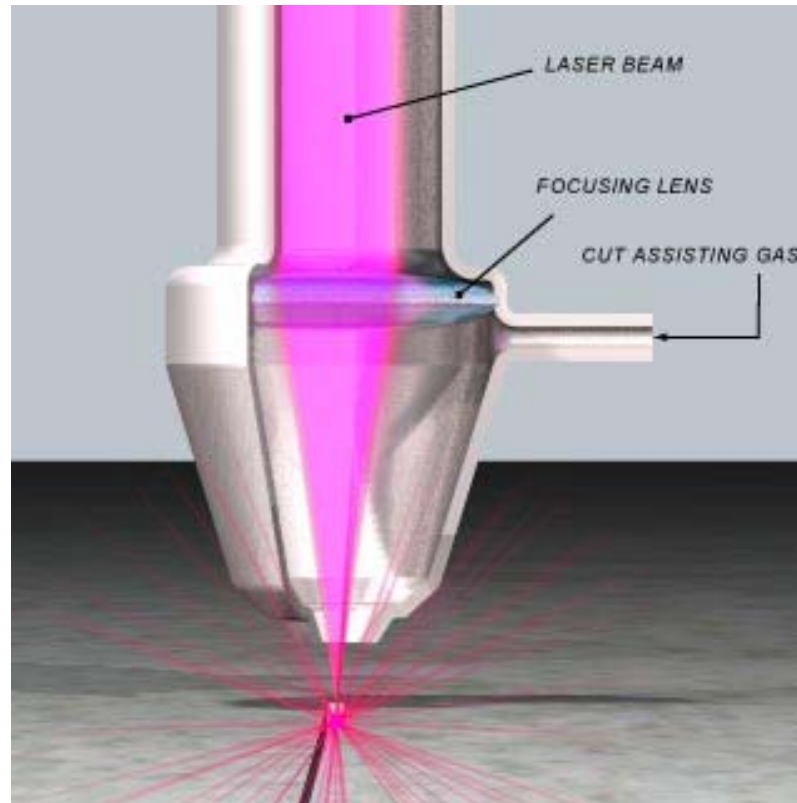


1.5 kW CO₂ laser



3 kW laser diodos

PRINCÍPIO DO CORTE POR LASER



Esquema do processo de corte por laser

PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO

- Potência
- Velocidade de deslocamento
- Gás de assistência

Funções:

Proteger as lentes

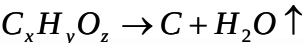
Expelir o material da frente de corte

Arrefecer as superfícies de corte

Pressão:

muito baixa → deficiente remoção do material fundido

muito elevada → turbulência e aumento da rugosidade das superfícies



Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Mecanismos de corte

Vaporização - a energia do feixe aquece o material acima da Temp. ebulição e o material deixa a superfície sob a forma de vapor. Ocorre, sobretudo, no corte em modo pulsado ou em materiais com pontos de fusão e de ebulição próximos, como em **alguns polímeros**.

Fusão - Difere do processo anterior porque o material é removido no estado líquido. **Ex: metais e nos termoplásticos**.

Na superfície de corte notam-se frequentemente estrias, devidas a instabilidades hidrodinâmicas do processo (oscilações na potência do laser ou no caudal do gás, vibrações no sistema de deslocamento ou de velocidade)

Fusão reactiva - usa um gás de assistência reactivo (ex: oxigénio) que origina reacções exotérmicas na frente de corte em alguns materiais, **Ex: nos aços e nas madeiras**.

Degradação química - observado na maior parte dos materiais à base de **hidrocarbonetos e nas rochas**. A radiação laser quebra as ligações químicas com decomposição.

Fractura controlada - ocorre principalmente em **materiais frágeis**. O laser provoca gradientes térmicos induzindo tensões mecânicas.



Mecanismos de corte em rochas

O processo de corte por laser de IV envolve um processo térmico - aquecimento localizado da rocha com formação de um plasma ligeiramente azulado a elevadas densidades de energia.

Tanto o plasma como as partículas resultantes da decomposição absorvem a radiação.

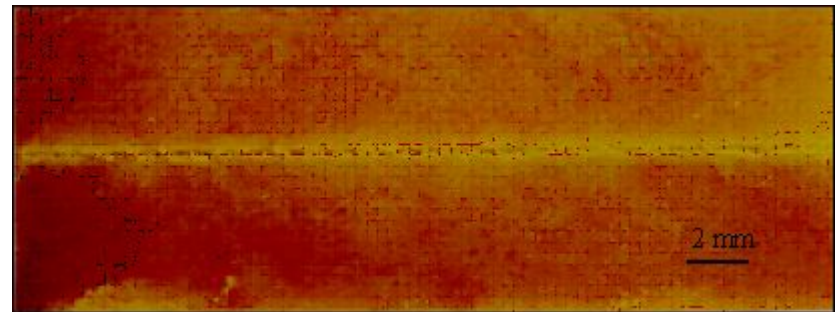
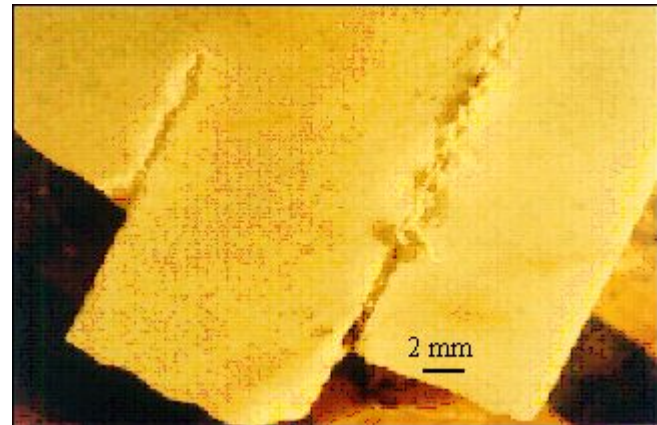
A separação das partes produz-se quando o plasma e o material fundido são ejectados da zona de interacção pelo gás de assistência coaxialmente com o feixe.

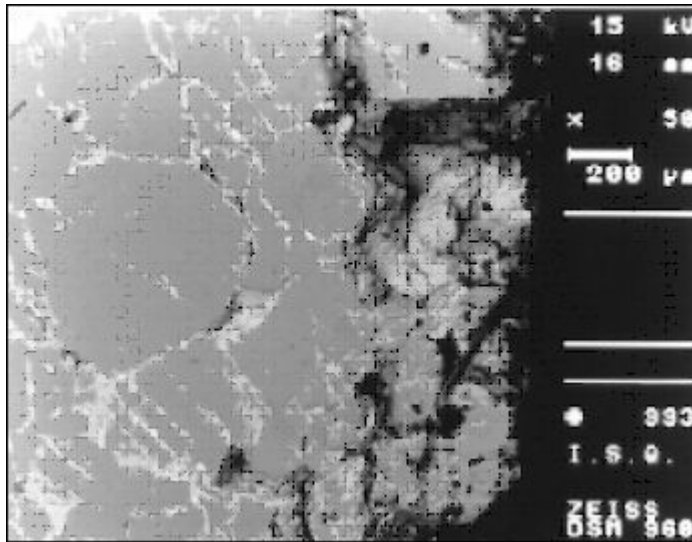
O gás tem ainda um efeito arrefecedor das paredes de corte diminuindo a extensão da zona afectada pelo calor.

Mármore

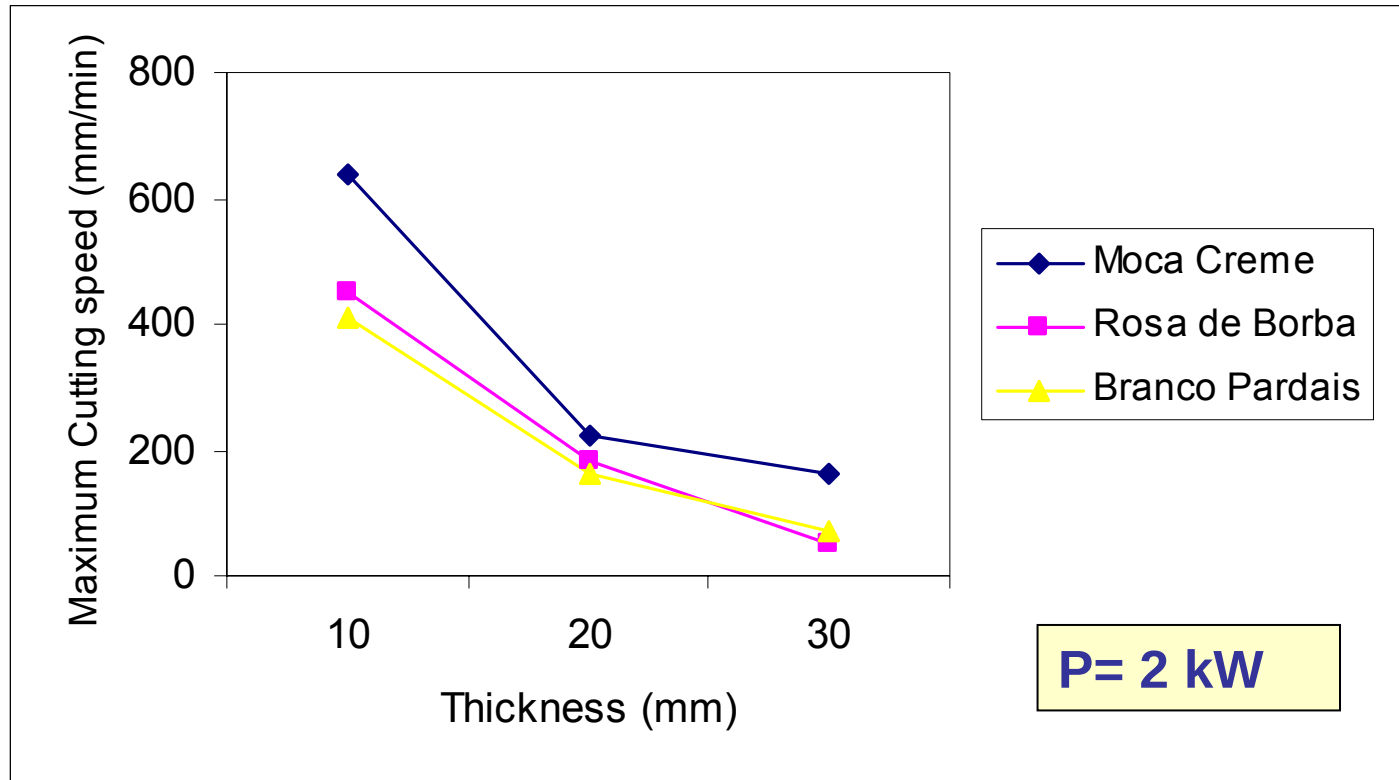
Mármore calcítico e granitos formam uma rebarba aderente e frágil. Os mármore dolomíticos e os calcários têm melhores superfícies de corte.

Rosa de Borba, evidencia descoloração da superfície devida à decomposição da calcite.

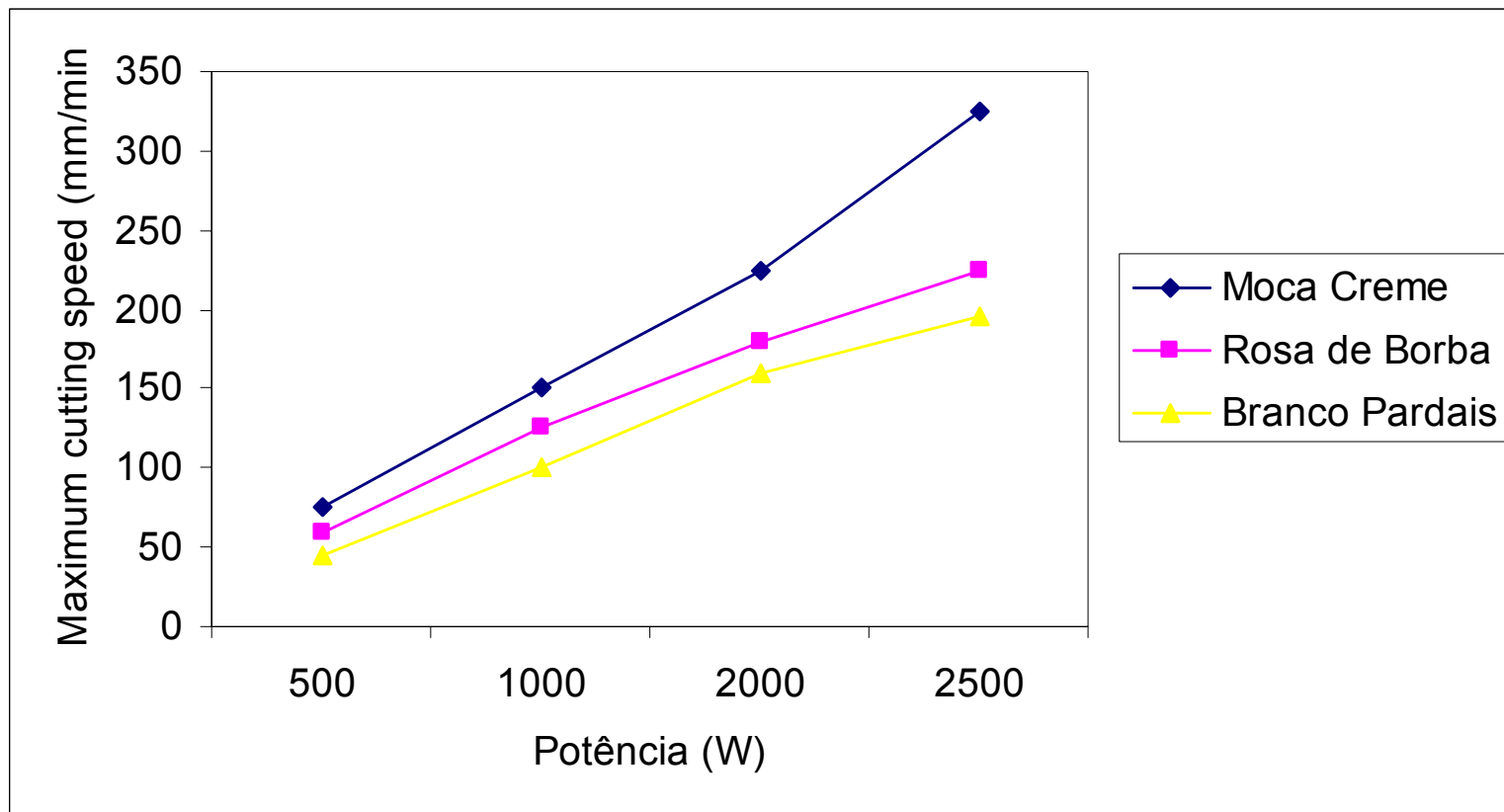




De um modo geral as superfícies de corte revelam pequenas fissuras e destacamentos de grãos numa extensão afectada termicamente da ordem de 0,3 mm que é facilmente removida.

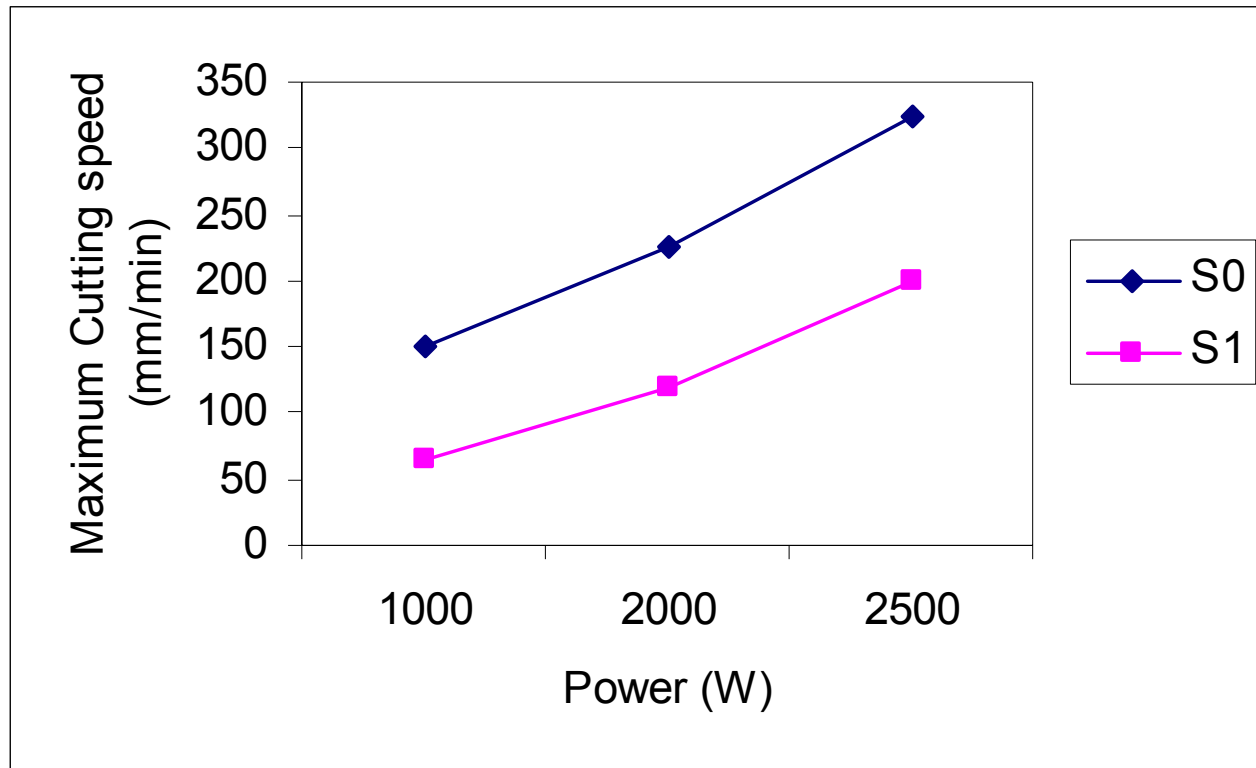


Quando a velocidade de corte diminui, a qualidade da superfície aumenta e o material é removido mais eficientemente. Espessura crítica: entre 10 e 15 mm



Espessura: 20 mm

**Gás assistência: ar
comprimido a 5 bar**

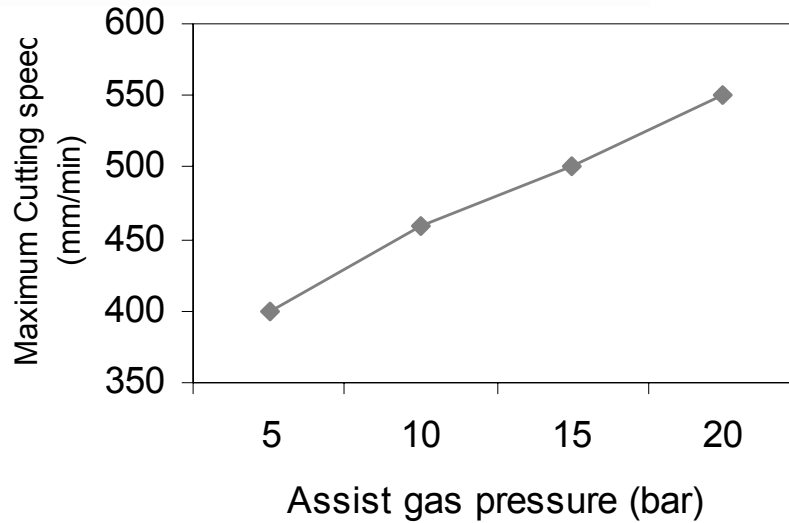


Moca Creme

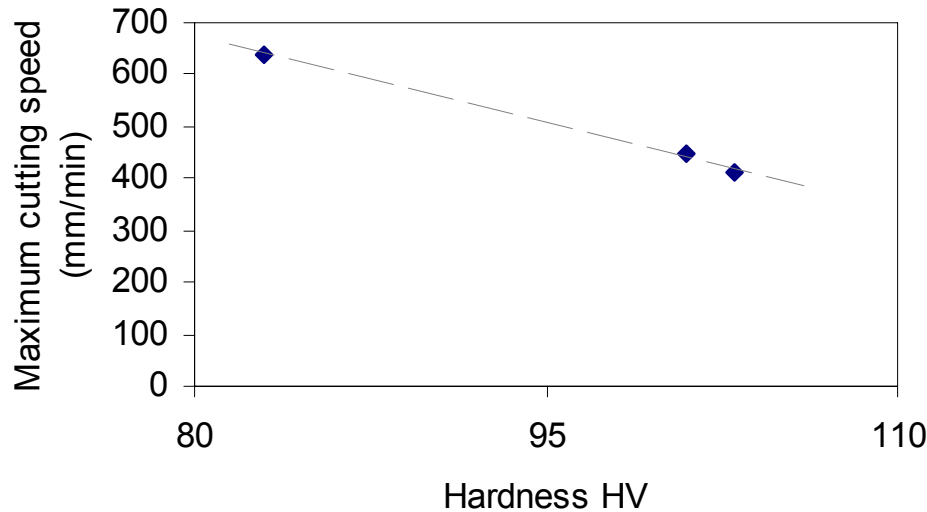
S0 – plano de sedimentação

S1 – plano perpendicular ao plano de sedimentação

Espessura: 20 mm

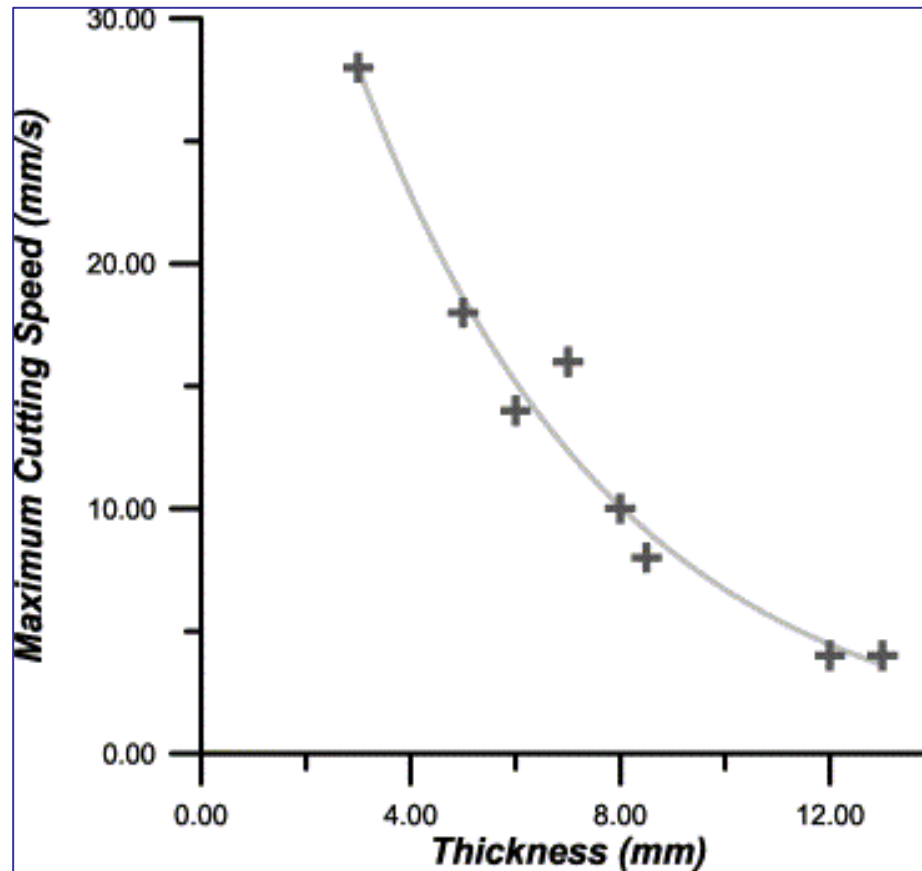


Moca Creme
Espessura: 10mm
P: 1000 W



Velocidade máxima de
corte vs. dureza da
rocha
Espessura: 20mm

Ardósias



P: 1200 W
Gás: Oxigénio,
2 bar

Boutinguiza M., Pou J., Lusquinos F., Quintero F., Soto R., Perez-Amor M., Watkins K., Steen W. M., Optics and Lasers in Eng., 37, 2002, p. 15-25

Velocidade de corte
vs. Potência laser

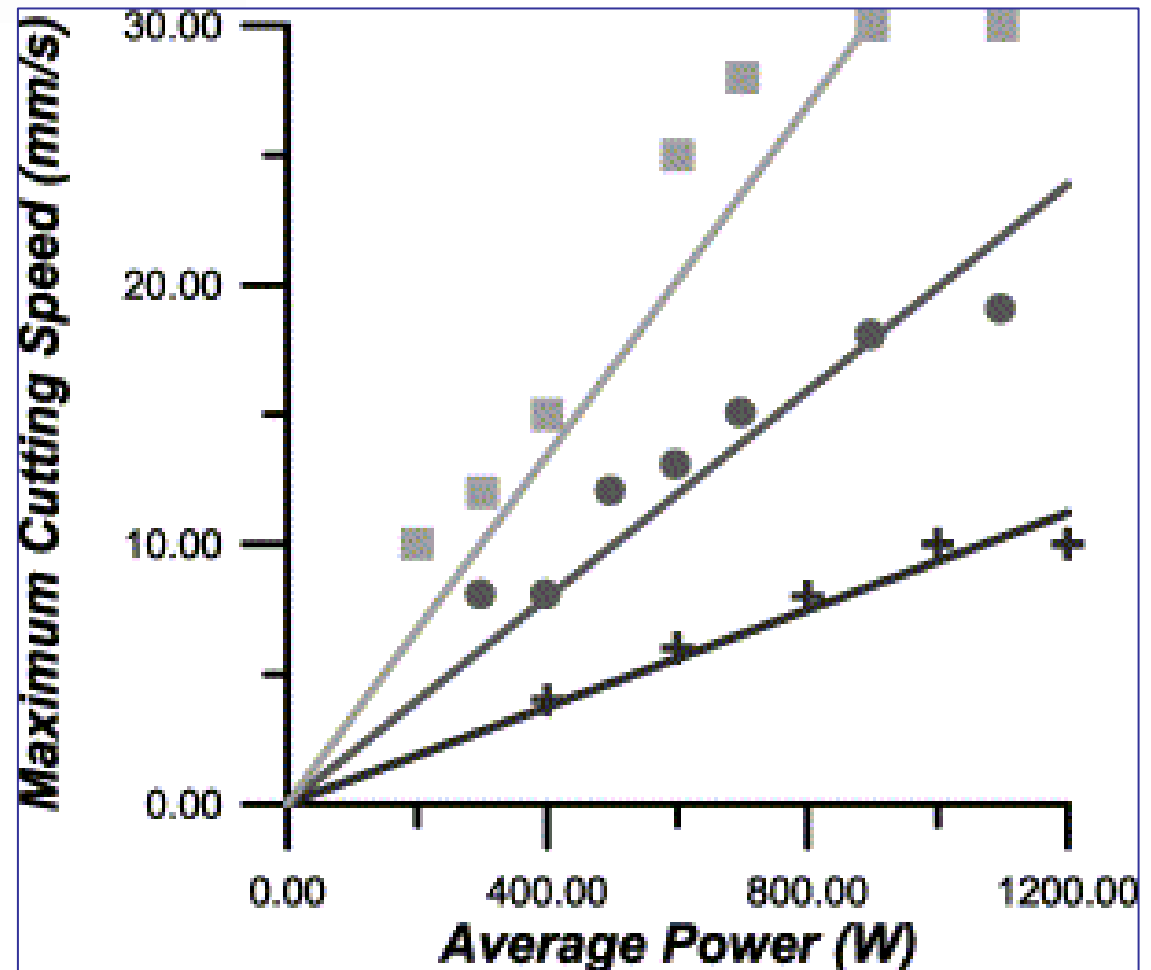
Espessuras:

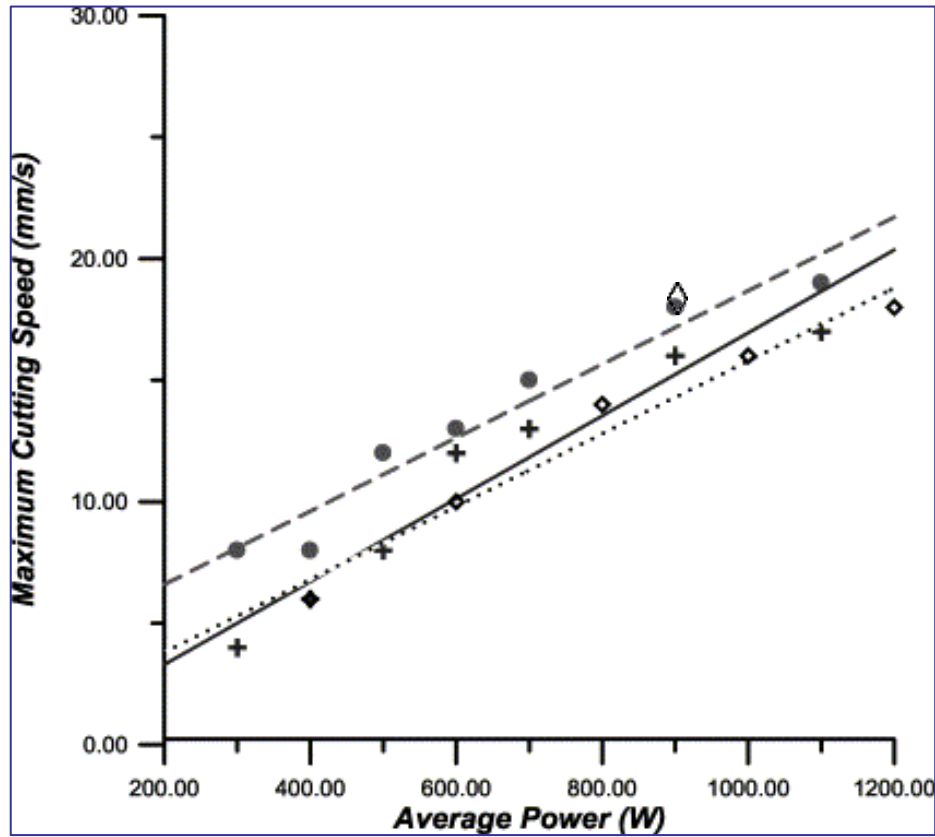
(▪) 3 mm

(•) 5 mm

(+) 8 mm

Gás: Oxigénio 2 bar





Vel. Corte máxima
vs. Potência

Gás assistência

P: 2 bar

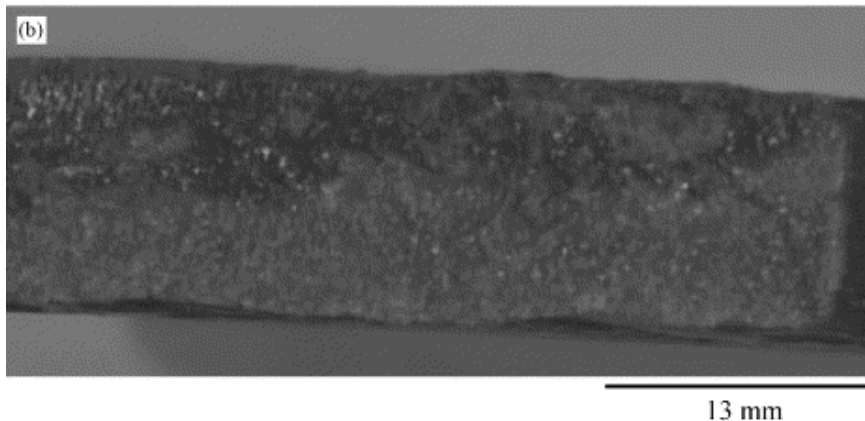
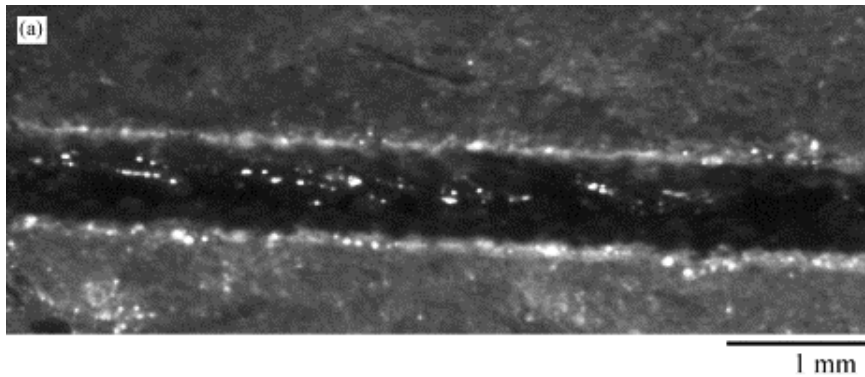
() Argon

(•) Oxigénio

(+) Azoto

Espessura: 5 mm

Corte laser de ardósias



Geometria do corte
Espessura: 13.5 mm
P: 1200 W
Gás: O₂, 2 bar
V: 6 mm/s

Marcação por LASER



Marcação de ardósia com
laser de Nd/YAG

Marcação de mármore com
lasers de excímeros.
Processo fotoablativo,
sem efeito térmico, quebra das
ligações químicas dos
consituíntes da rocha



VANTAGENS

- Pequenas larguras de corte
- Ausência de contacto físico ferramenta/material
- Baixa entrega térmica
zona termicamente afectadas estreitas
- Boa qualidade das superfícies de corte
- Versatilidade
formas
operações: corte, marcação

As aplicações dos lasers no corte de rochas estão limitadas por:

- Fragilização das superfícies de corte
- Baixas velocidades
- Espessuras máximas
- Elevados custos

Emergência de outras tecnologias de corte não térmico





Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia

BREVE HISTORIAL JACTO DE ÁGUA

Egípcios - água e areia para limpeza e mineração

Séc. XIX - EUA mineração de ouro

- 1968 - Norman Franz – patenteou primeiro equipamento de jacto água de alta pressão
- 1971 - comercializado primeiro equipamento para corte de papel laminado
- 1979 – Mohamed Hashish adicionou abrasivo à água para aumentar o poder erosivo e cortar materiais duros

JACTO DE ÁGUA ABRASIVO

- 1983 - 1º equipamento comercializado AWJ
- 1984 - 1º equipamento comercializado SAJ





VANTAGENS

- Técnica fria
- Tecnologia versátil - pode cortar qualquer material
- Flexível - corte 2 e 3D em sistemas controlados a distância
- Facilidade de automatizar e robotizar - baixa força de reacção no braço dum robot
- Maquinação de materiais frágeis (força na peça < 10 N)
- Não produz gases ou poeiras
- Não existe contacto físico ferramenta-peça
- Largura do corte estreitas (< 1 mm)
- Boa qualidade de acabamento das superfícies
- Ideal para protótipos, peças únicas ou pequenas séries

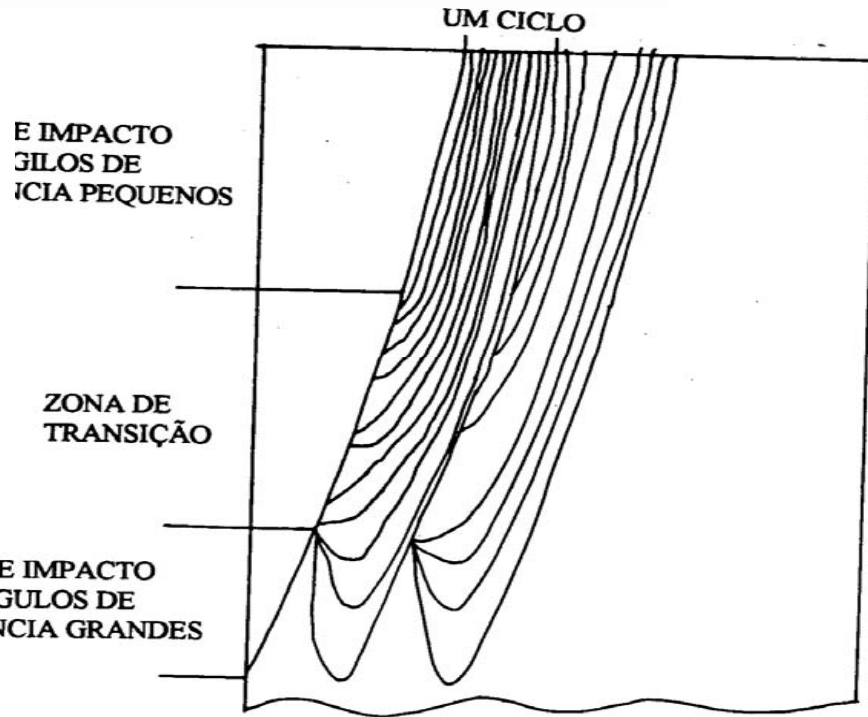


FUNDAMENTOS do CORTE POR JAA



- jacto de água de alta pressão (< 400 MPa) gerado numa bomba intensificadora é feito chegar à cabeça de corte através de tubagem blindada
- jacto passa numa safira industrial de diâmetro 0,2 a 0,8 mm, transformando um jacto de alta pressão, num jacto de alta velocidade (até cerca de 800m/s)
- quando o jacto de alta velocidade atinge o alvo, exerce sobre este uma força de compressão. Dependendo das propriedades mecânicas e do comportamento à deformação do alvo, o jacto pode desenvolver uma acção erosiva, de corte ou de rotura, sob a acção de uma variação rápida dos campos de tensões localizados.

Água mole em pedra dura tanto bate até que fura!

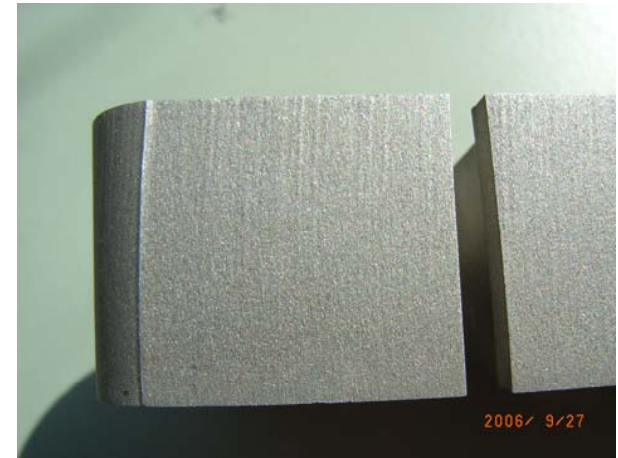


Na primeira zona as partículas de abrasivo atingem o material sob ângulos de incidência baixos e com elevada energia cinética, efectuando a remoção de material por desgaste por corte.

- À medida que o jacto progride no material, a sua eficiência baixa e o jacto torna-se instável.

- As partículas de abrasivo deflectem no sentido ascendente, continuando a acção erosiva por incidência com ângulos de impacto maiores. A instabilidade do jacto é responsável pela iniciação de estrias devidas à remoção de material por desgaste por deformação.
- O processo de penetração global é semelhante em materiais dúcteis e frágeis, a diferença reside na dinâmica do processo de erosão das partículas no material. O processo global é cíclico.

Em materiais dúcteis a remoção dá-se por fractura a uma deformação crítica - desgaste por deformação



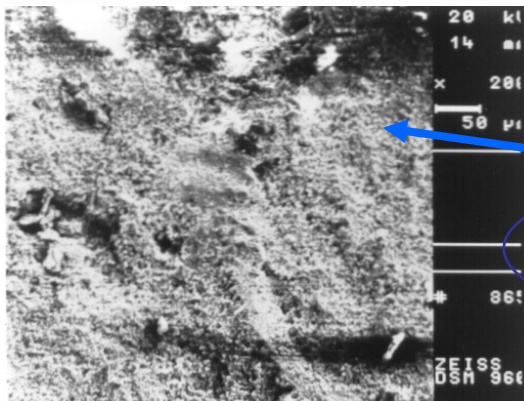
Em materiais frágeis a remoção ocorre por desgaste por corte



As propriedades mecânicas do material alvo (ex: resistência à deformação), e as do abrasivo (tenacidade à fractura), desempenham um papel importante no(s) mecanismo(s) envolvido(s)

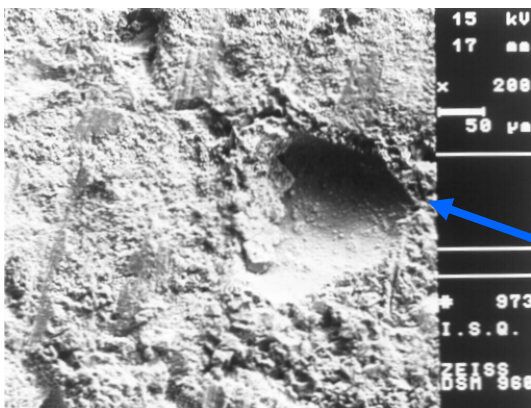
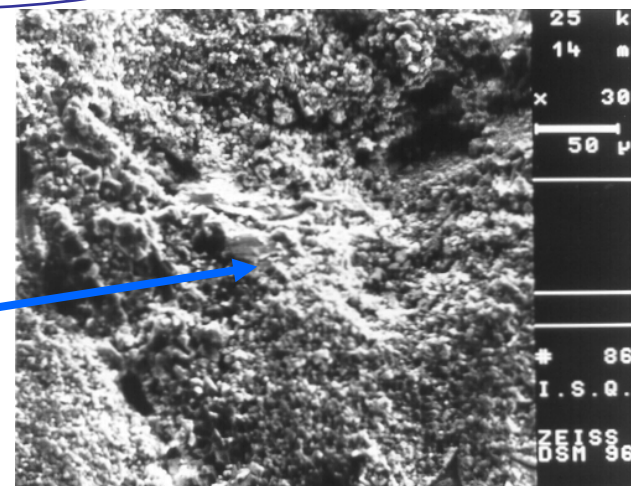
Moca Creme

Grãos de quartzo e calcite
numa matriz de argila



Superfície lisa junto à
face de ataque do jacto

Fissuras ao longo da
calcite romboédrica com
deformação plástica dos
bordos



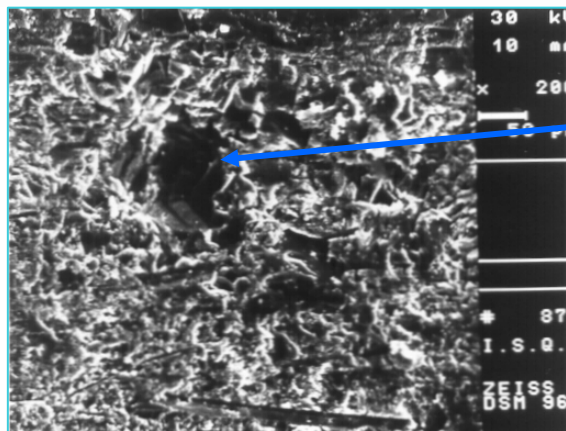
Cratera na superfície
inferior com deformação
plástica significativa

Mármore cristalino

Calcite com estrutura
granoblástica.

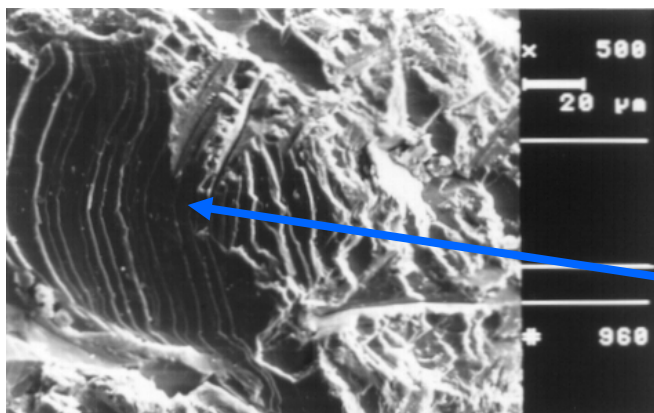
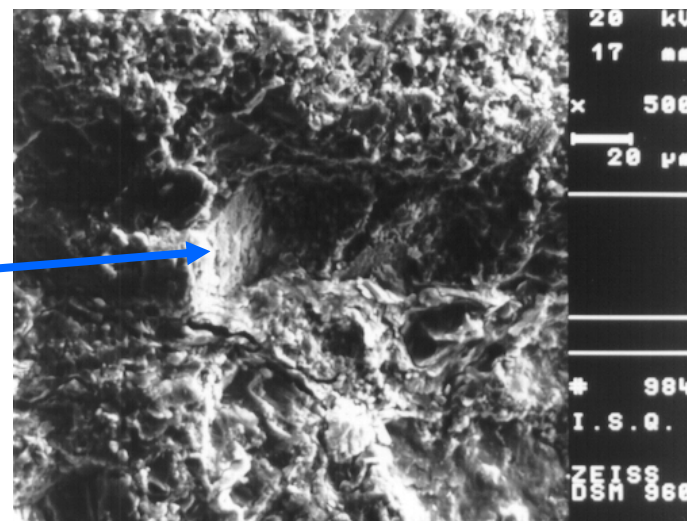
Quartzo acessório

Porosidade < 0,4%



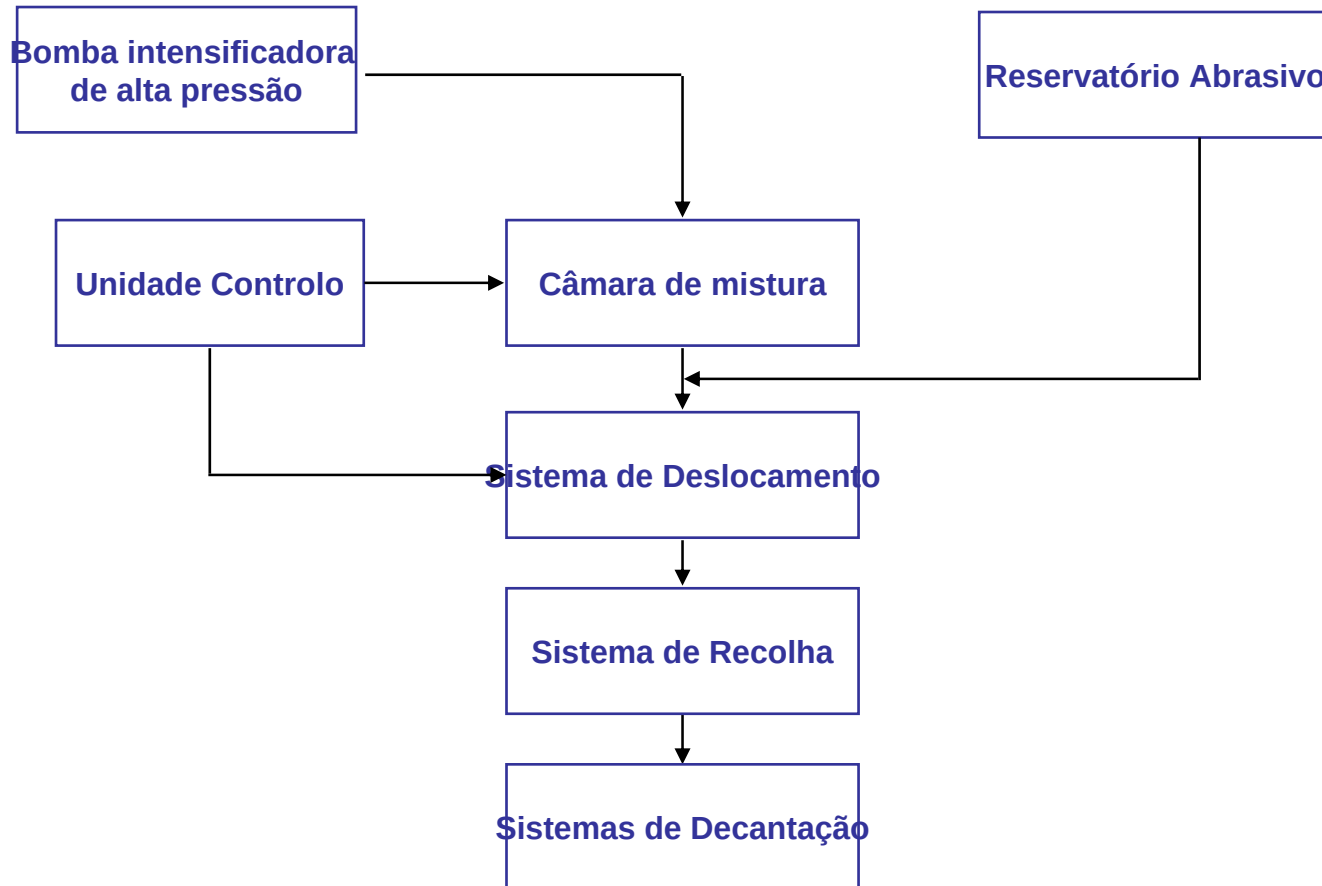
Clivagem da calcite
sem deformação
plástica

Rede de fissuras
rodeadas de fissuras
intergranulares



Clivagem da calcite
com diferente
morfologia

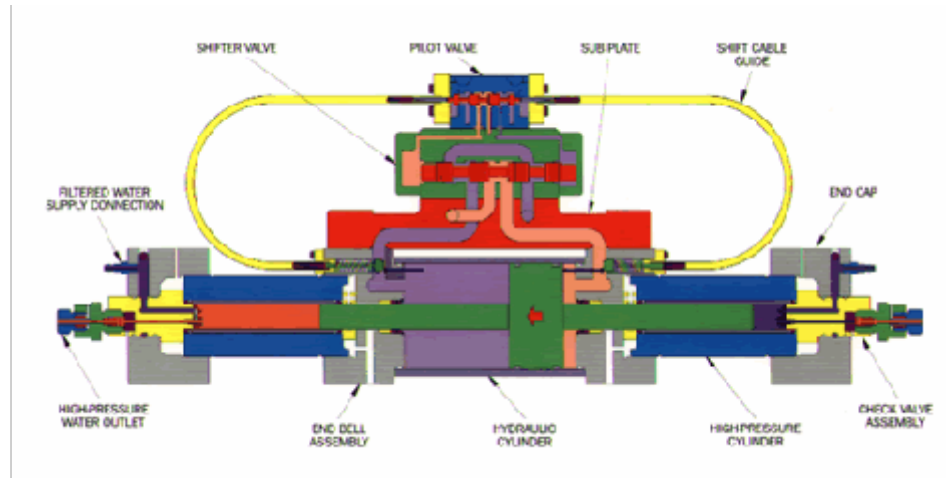
EQUIPAMENTO



Esquema de um sistema de corte por jacto de água abrasivo de alta pressão

BOMBAS

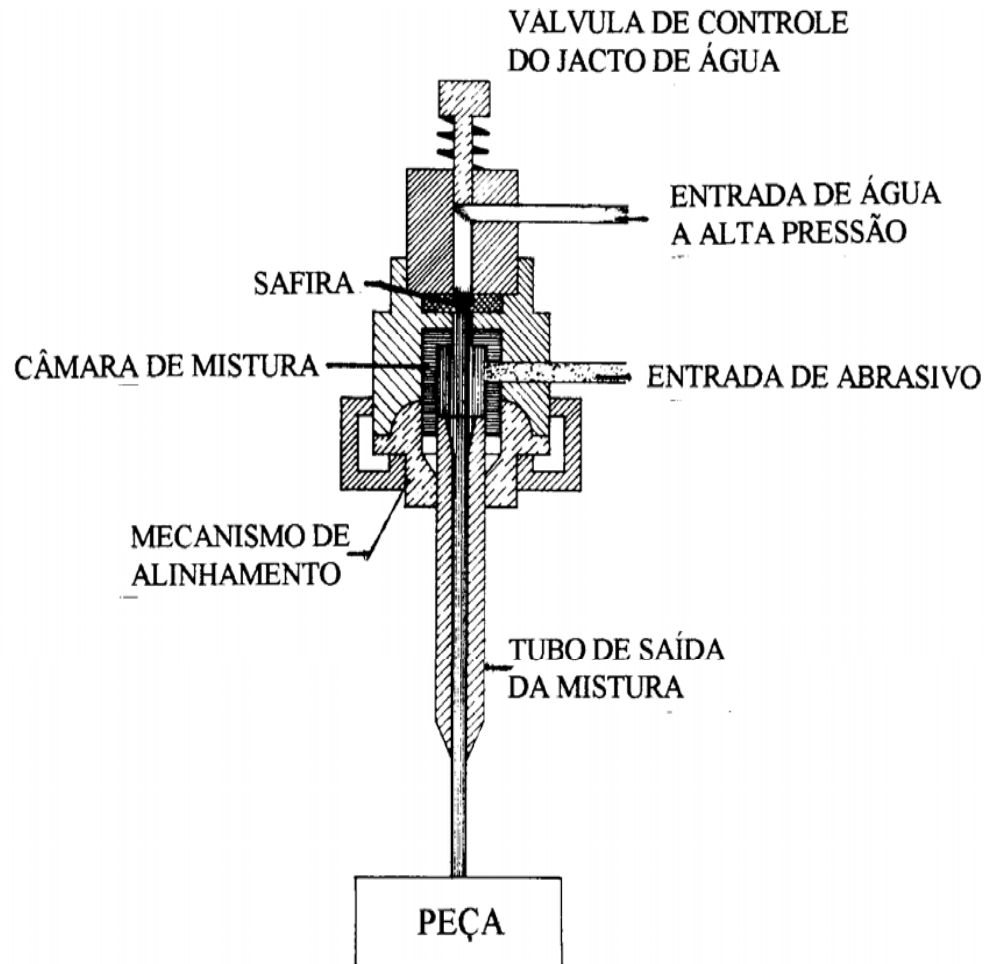
Esquema de uma bomba intensificadora



Efeito simples ou duplo com áreas diferentes de modo a multiplicar pressão por efeito de deslocamentos variáveis da bomba hidráulica.

Pressões da ordem de 400 MPa e caudais de água que variam entre 4 e 7 l/min.

CÂMARA DE MISTURA





Aspecto de um equipamento comercializado



Sistemas de CAD/CAM
Softwares de nesting



Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO



PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO

- **Hidráulicos:**
pressão
caudal de água (controlado pelo diâmetro de safira)
- **Do abrasivo:**
tipo, tamanho e forma do grão
estado do abrasivo (seco ou húmido)
caudal
- **Da mistura:**
diâmetro interno e comprimento do tubo de mistura
condição do abrasivo: seco ou húmido
modo de mistura: por sucção ou pré-misturado
- **De corte:**
velocidade de deslocamento
distância tubo/peça
ângulo de ataque
material a cortar

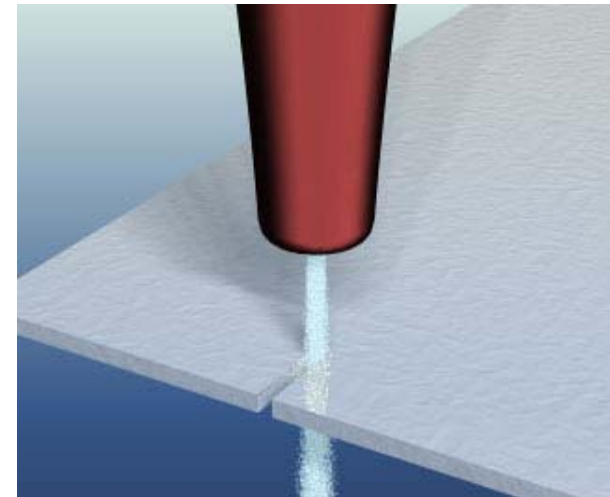
A correcta selecção dos parâmetros determina:

- a profundidade de corte obtida
- a largura do corte e o paralelismo entre faces
- a qualidade do corte

PRINCIPAIS PARÂMETROS

Corte JAA

- i - pressão da água
- ii - diâmetro da safira
- iii - diâmetro e comprimento do tubo de mistura
- iv - velocidade de deslocamento
- v - tipo de abrasivo, granulometria e caudal



PRESSÃO DA ÁGUA

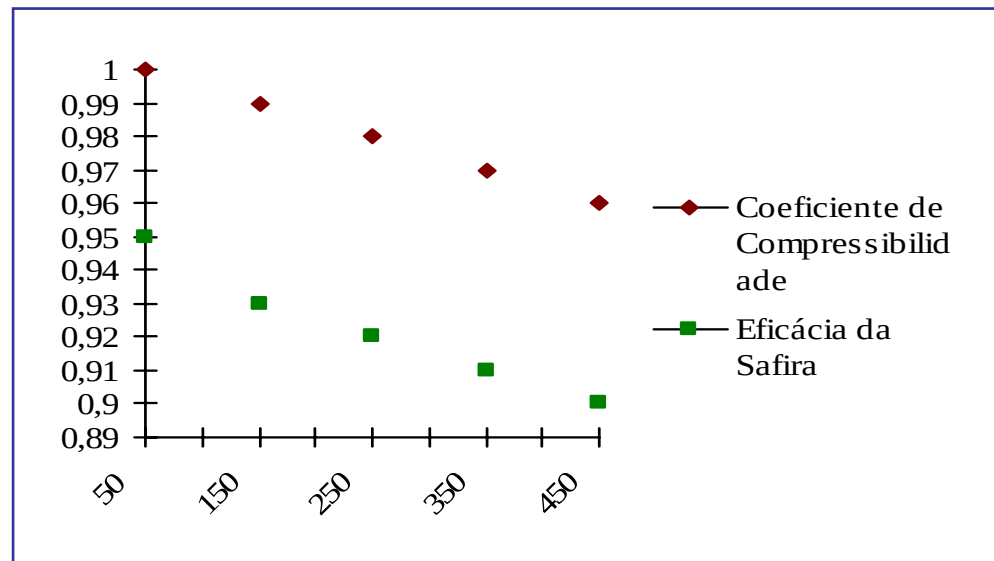
A pressão da água determina a velocidade máxima do jacto e das partículas de abrasivo.

$$v_j = C_v C_y \sqrt{\frac{2 P}{\rho_o}}$$

v_j , é a velocidade do jacto;

C_v , um coeficiente de velocidade que considera as perdas por fricção na safira; C_y , o coeficiente de compressibilidade; P e ρ_o , a pressão e a densidade da água, respectivamente.

Um aumento da pressão traduz-se num aumento da velocidade,
uma vez que C_v e C_y decrescem com a Pressão



Efeito da pressão na eficiência da safira e no coeficiente de compressibilidade

$$h = \frac{C}{2(1+R)} \sqrt{\frac{\dot{m}_a P}{\rho_o \sigma_f v}} + \frac{C y (1-C) \dot{m}_a P}{\pi \rho_o \varepsilon v d_j (1+R)^2}$$

$\dot{m}_a$, é o caudal de abrasivo;

R , a razão entre os caudais mássicos do abrasivo e da água;

v , a velocidade de deslocamento;

ρ_o , a densidade da água;

σ_f , a tensão de fluência do material a cortar;

ε , a energia requerida para remover uma unidade de volume por desgaste por deformação;

P , a pressão;

d_j , o diâmetro do jacto.

O aumento da profundidade de corte com a pressão é quase linear e o aumento da pressão da água aumenta com a velocidade das partículas de abrasivo.

A adição de polímeros solúveis em água aumenta a coerência do jacto : SUPERWATER®

A pressões muito altas, os custos de manutenção da bomba aumentam, assim como o desgaste do tubo da mistura e os coeficientes de descarga e de eficiência hidráulica diminuem.

O facto de a altas pressões serem admitidos caudais de água e abrasivo baixos permite reduzir o custo total de corte e os problemas ambientais de tratamento dos resíduos de corte.

DIÂMETRO DA SAFIRA

O diâmetro da safira determina o caudal de água para uma pressão constante, a velocidade da água e a energia cinética do abrasivo. Para uma pressão constante, o aumento do diâmetro da safira traduz-se no aumento da profundidade de corte.

O diâmetro das safiras varia entre 0,2 e 0,6 mm, mas deve ser seleccionado conjuntamente com o diâmetro do tubo de mistura. Se a safira tiver um diâmetro muito grande e o tubo de mistura for estreito, então há acumulação de água na cabeça de mistura e pode haver humedecimento do abrasivo com aglutinação deste e interrupção do processo. As razões entre os diâmetros da safira e do tubo de misturam situam-se entre 0,3 e 0,4.

DÉBITO DE ÁGUA

Varia com: pressão e diâmetro da safira

> $P \rightarrow$ > débito

> diâmetro de safira $\rightarrow$ > débito de água



DIÂMETRO DO TUBO DE MISTURA

De per si, tem um efeito pouco acentuado.

Tubos de grande diâmetro produzem larguras de corte maiores e menores profundidades de corte.

O comprimento deve permitir boa homogeneização entre as partículas de abrasivo e o jacto de água e é habitualmente em operações de corte de 76 mm.

TIPO DE ABRASIVO

Função da natureza do material a cortar e da espessura.
Mais duros para materiais mais duros e/ou mais espessos

Abrasivos mais usuais: granada, olivina, alumina, areia

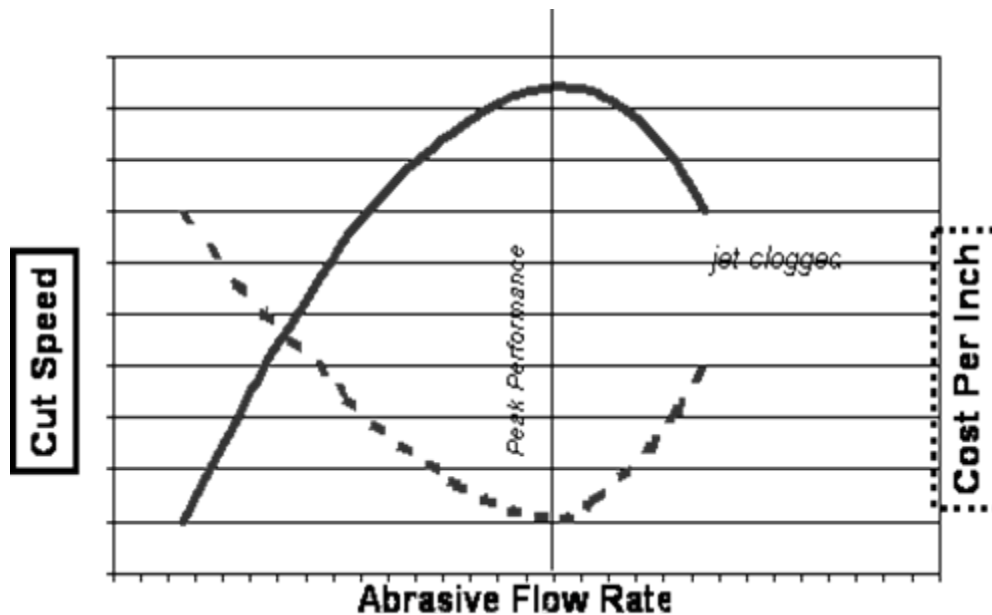
GRANULOMETRIA DO ABRASIVO

Mais finos → Melhores acabamentos e mais difíceis de alimentar

Mais grossos → tubos de maior diâmetro e câmaras de mistura maiores

Granulometrias usadas: 60-120 mesh

CAUDAL DO ABRASIVO



Maior caudal → maior desgaste → > custos → < eficiência na mistura com água.

Mas...

aumenta a velocidade e a profundidade de corte e melhora a qualidade de acabamento

Custos!



VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO

Maior velocidade $\rightarrow$ < profundidade de corte

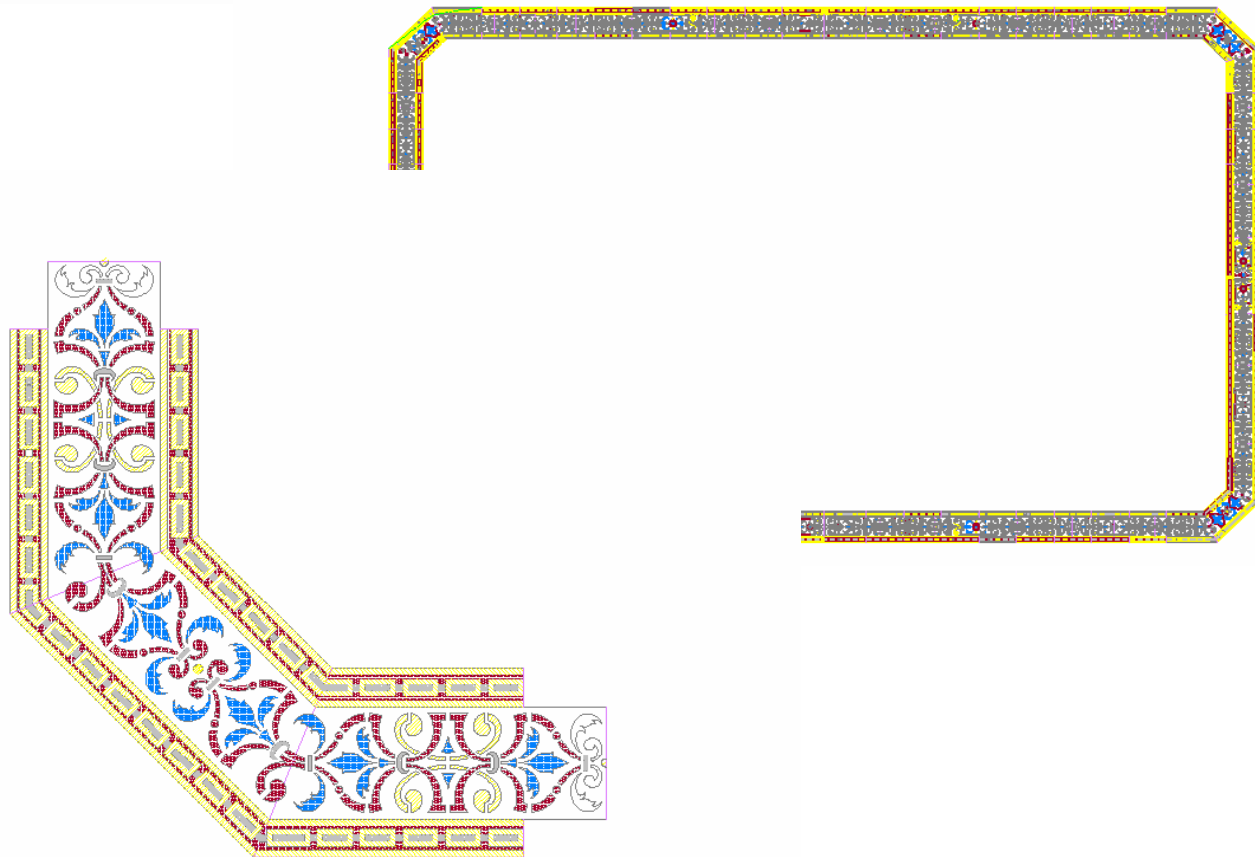
Menor velocidade $\rightarrow$ melhor qualidade de corte e
menor rugosidade



APLICAÇÕES



- maquinação: corte, furação e torneamento;
- extracção mineira incluindo escavações, abertura de túneis e desmantelamento de pedreiras;
- processamento de alimentos;
- limpeza incluindo a remoção de revestimentos e camadas alteradas por efeito de agentes atmosféricos.

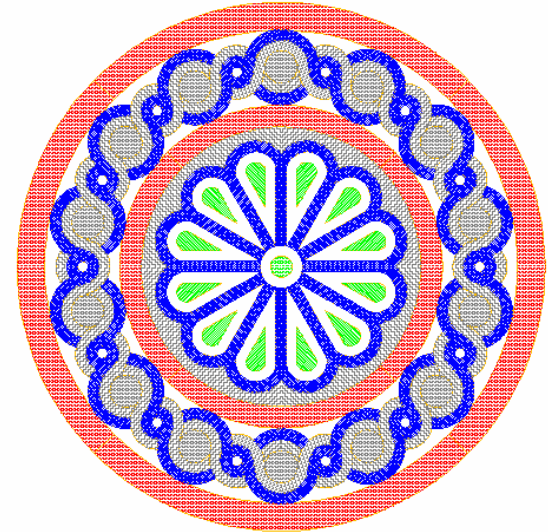


Friso para chão com 11x7m em mármore 12 mm espessura

Custo: 10 000 €

Centro para chão com 1260mm
em mármore 20mm espessura

Custo: 800 €



CENTRO PARA CHÃO COM 1260mm DE DIÂMETRO
EM MÁRMORE DE 20mm ESPESSURA
CUSTO DE CORTE - € 800,00

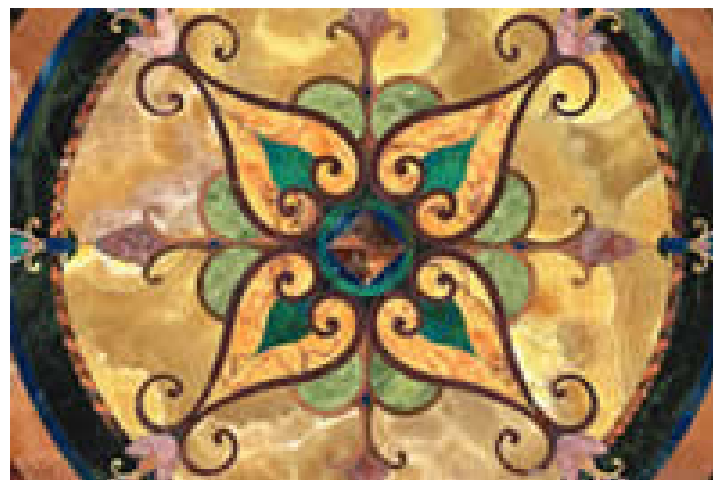


MODULO COM 240x240mm PARA PAREDE EM
MÁRMORE DE 30mm ESPESSURA
CUSTO DE CORTE - € 60,00

Módulo para parede com 240x240 mm
em mármore 30mm espessura

Custo: 60 €







Segurança

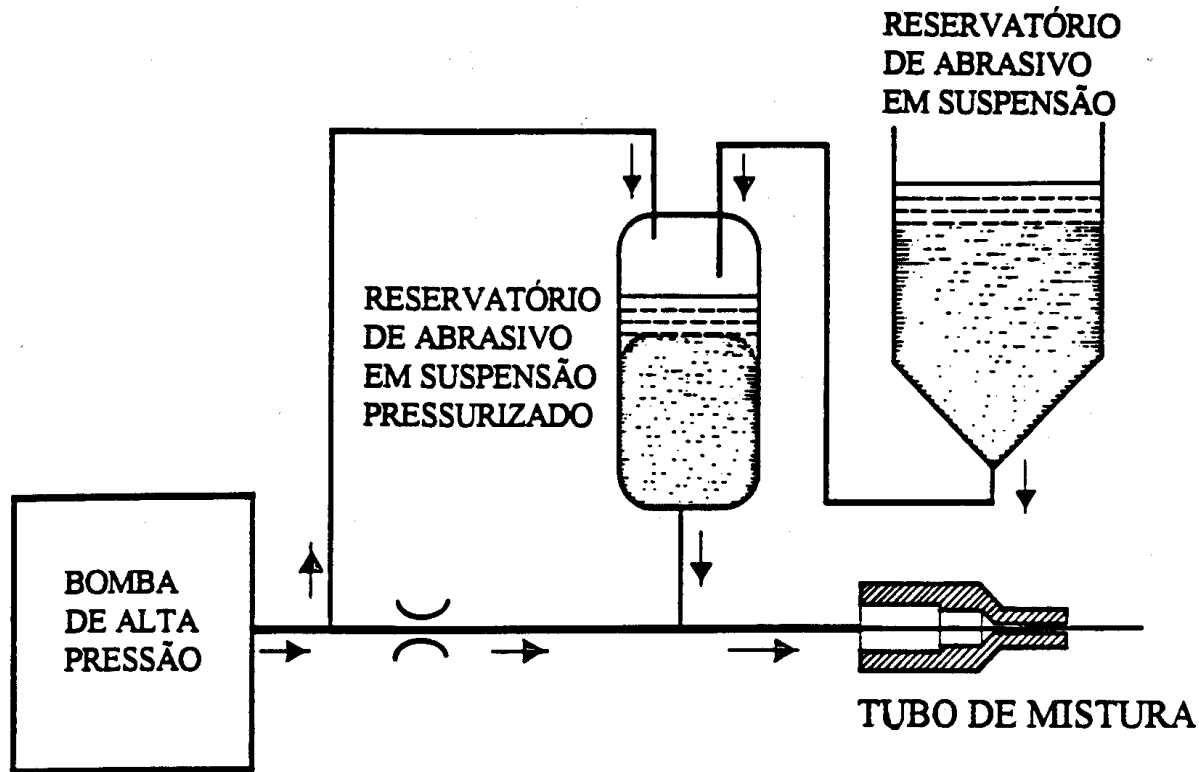
- Produção do jacto - bomba e intensificador
- Transporte de água
- Área de trabalho - delimitar áreas e recolha de resíduos
- Vestuário e protecções
 - Protecções auriculares
 - Óculos de protecção
 - Botas com biqueira de aço



Comparação laser vs jacto água

Factor	Laser	Jacto de água
Contacto físico "ferramenta"-peça	Nenhum	Nenhuma
Distorção térmica	ZTA pequena	Nenhuma
Distorção mecânica	Nenhuma	Nenhuma
Facilidade de automação	Boa	Boa
Interface com robots	Boa	Boa
Modo de corte	Fusão/vaporização	Erosão/corte

Jacto de Água Abrasivo em Suspensão



- Produção do jacto de água abrasivo de alta pressão (ASJ)



Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia



Características

Pressão máxima inferior a 800 Pa

Velocidade do jacto da ordem de 450m/s

Aplicações em campo

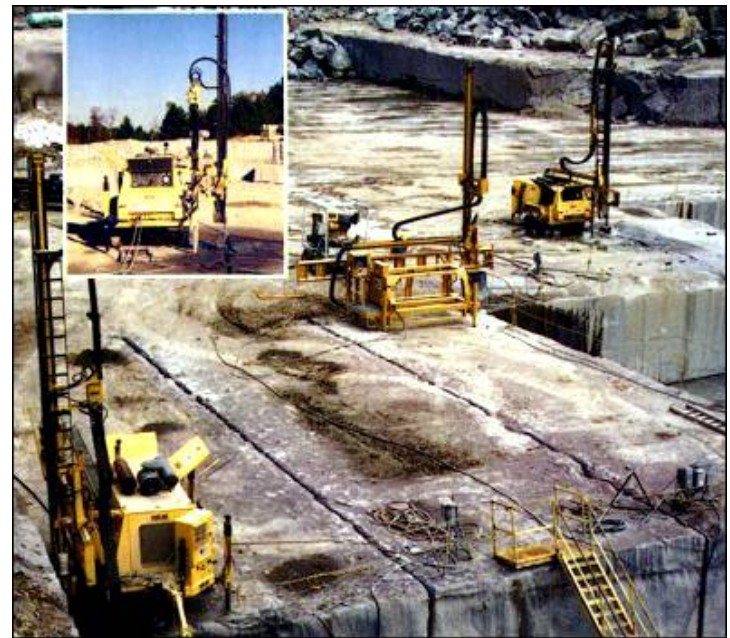
- corte de estruturas *offshore*
- desmantelamento de equipamentos militares
- desmantelamentos em construção civil

EXTRACÇÃO EM PEDREIRA EUA



200 Pa, 24l/min

Vel. Corte: 0,6 m/h em granito

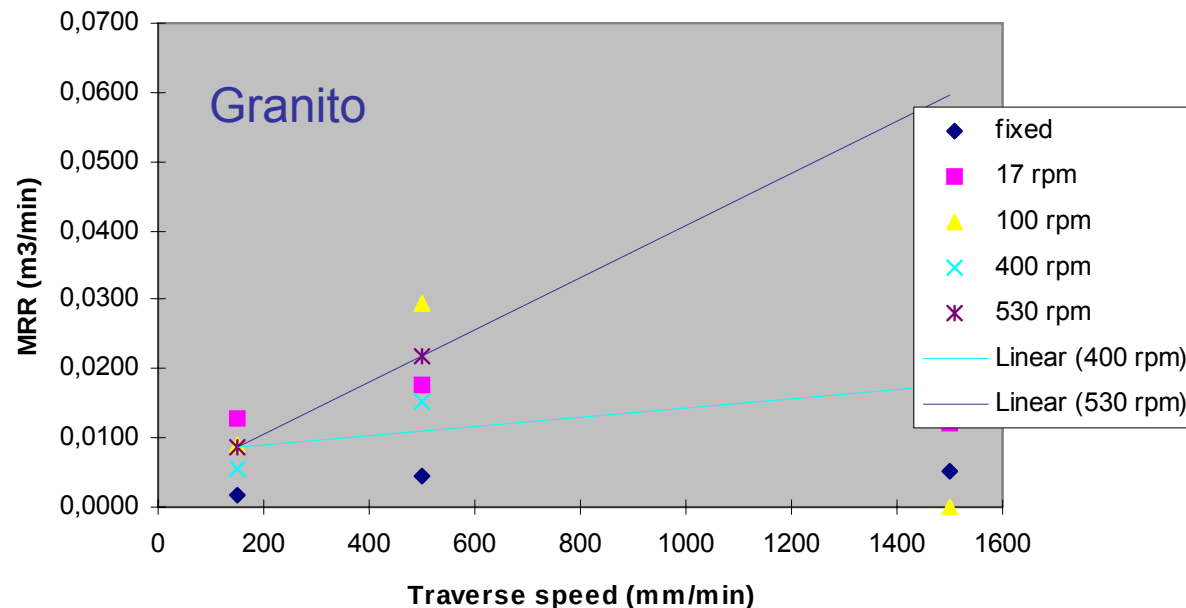


EXTRACÇÃO EM PEDREIRA



BRITE-EURAM –
Downhole abrasive jet
cutting operations in
quarrying, mining and
civil engineering

P: 690 bar
Caudal água: 10l/min
Concentração de
abrasivo: 10%





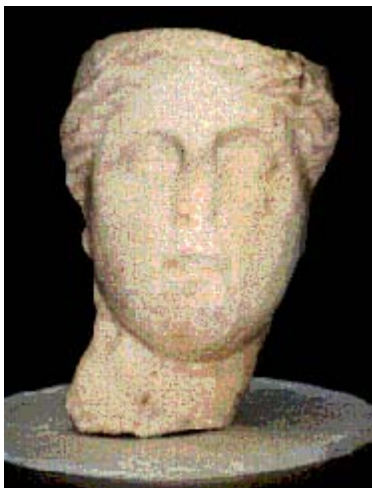
TRM = 80% chama

Custo de corte: 84 €/m²

Chama: 47% menor

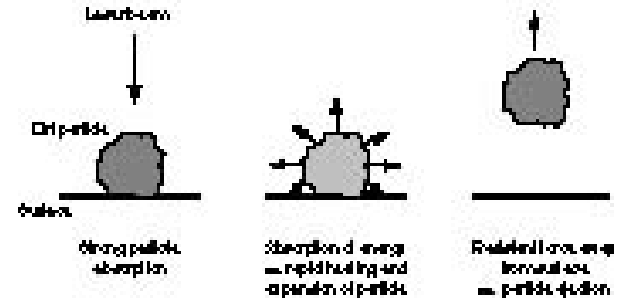


Limpeza de obras de arte em pedra com laser



Lasers: Nd/YAG Q-switched (pulsos: 5-10ns)
Sistemas portáteis : 125 Kg
Parâmetro: fluência (Energia por pulso/ área
do feixe na zona de interacção - $<1\text{J/cm}^2$)

Mecanismos de Limpeza



Patines absorvem a radiação YAG com fluências baixas para minimizar o risco de dano do substrato.

Mecanismos envolvidos:

- Absorção intensa da energia da radiação com aquecimento rápido das partículas de superfície que expandem. As tensões desenvolvidas são suficientes para ejectar a partícula.
- Formação de plasma e ondas de choque – a fluências maiores (risco de dano do substrato)

Selectividade – pode remover só o que se deseja eliminar efectivamente sem alterar patines originais e sem sobrelimpeza

Ausência de contacto mecânico – superfícies frágeis

Localizado – o diâmetro do feixe pode variar da fracção de mm até 1 cm

Controlo em tempo real – monitorização durante processo

Ambiental – gera muito pequenas quantidades de resíduos (100g/m² para uma pedra de exterior enegrecida). Não há produtos químicos, ou solventes

Versatilidade – sujidades e outros revestimentos de mármore, calcários, terracotas, alabastro, etc

Fiabilidade

Maior desvantagem: CUSTO



Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia



Agradecimentos

Lasindustria SA

***Y, sobretudo, a la assistência
presente y remota***

MUCHAS GRACIAS!