

# ASPERSÃO TÉRMICA

Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Engº.

Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR

[ramon@ufpr.br](mailto:ramon@ufpr.br)

IIIM 2016



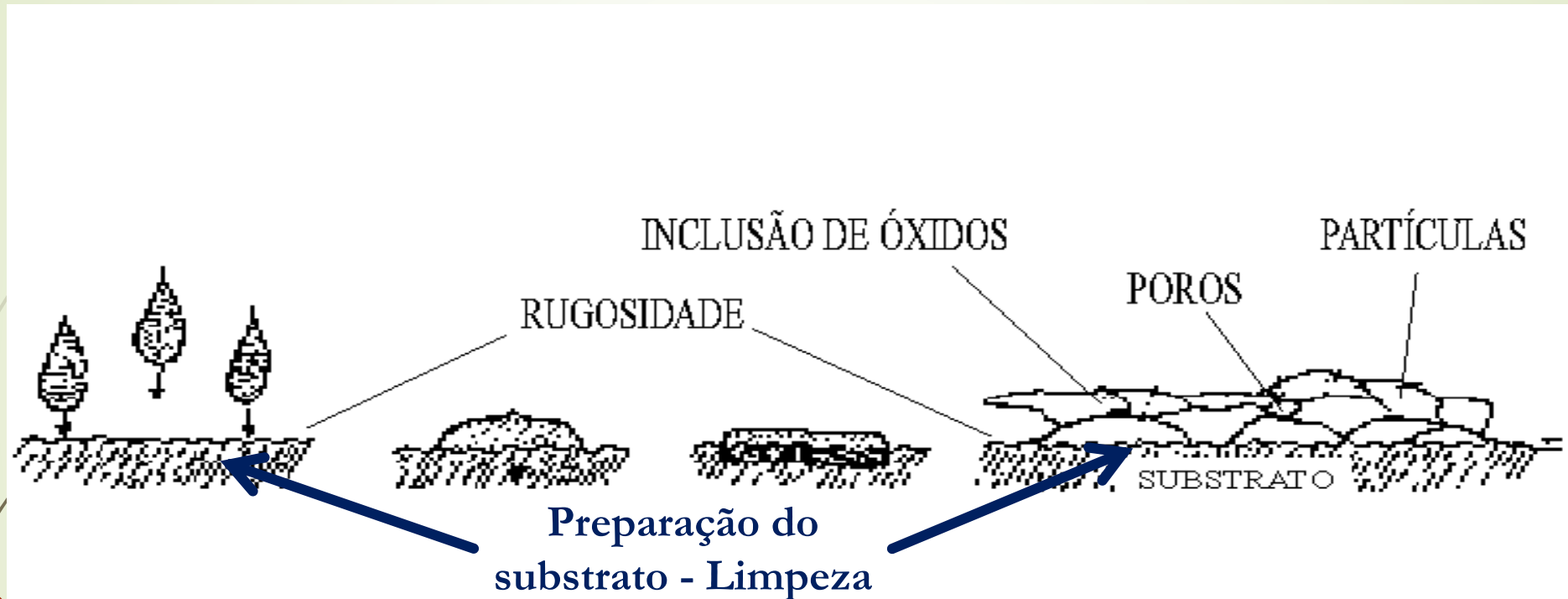
Flame.wmv

**LABORATÓRIO DE ASPERSÃO TÉRMICA E SOLDAGEM ESPECIAIS**

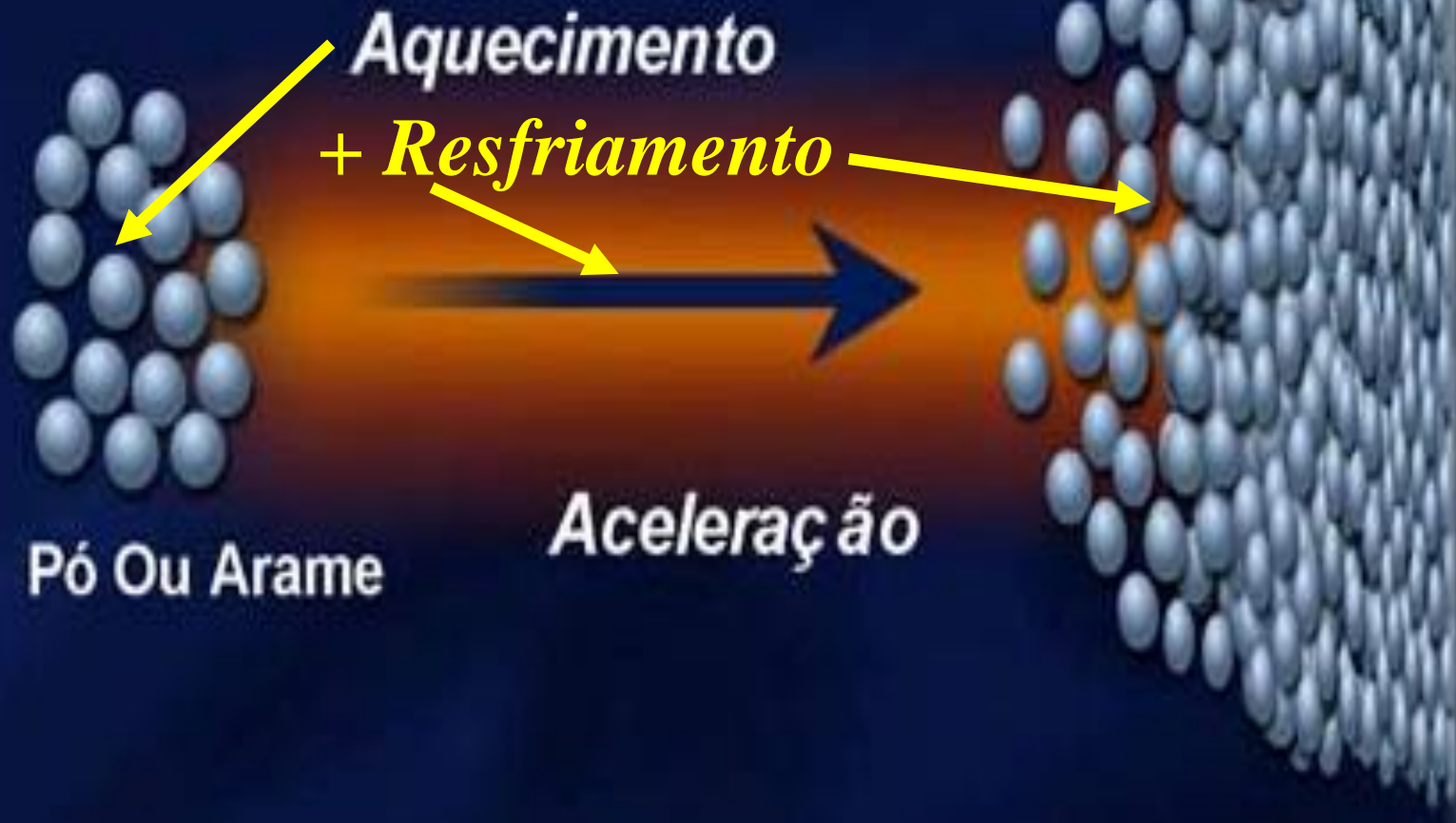


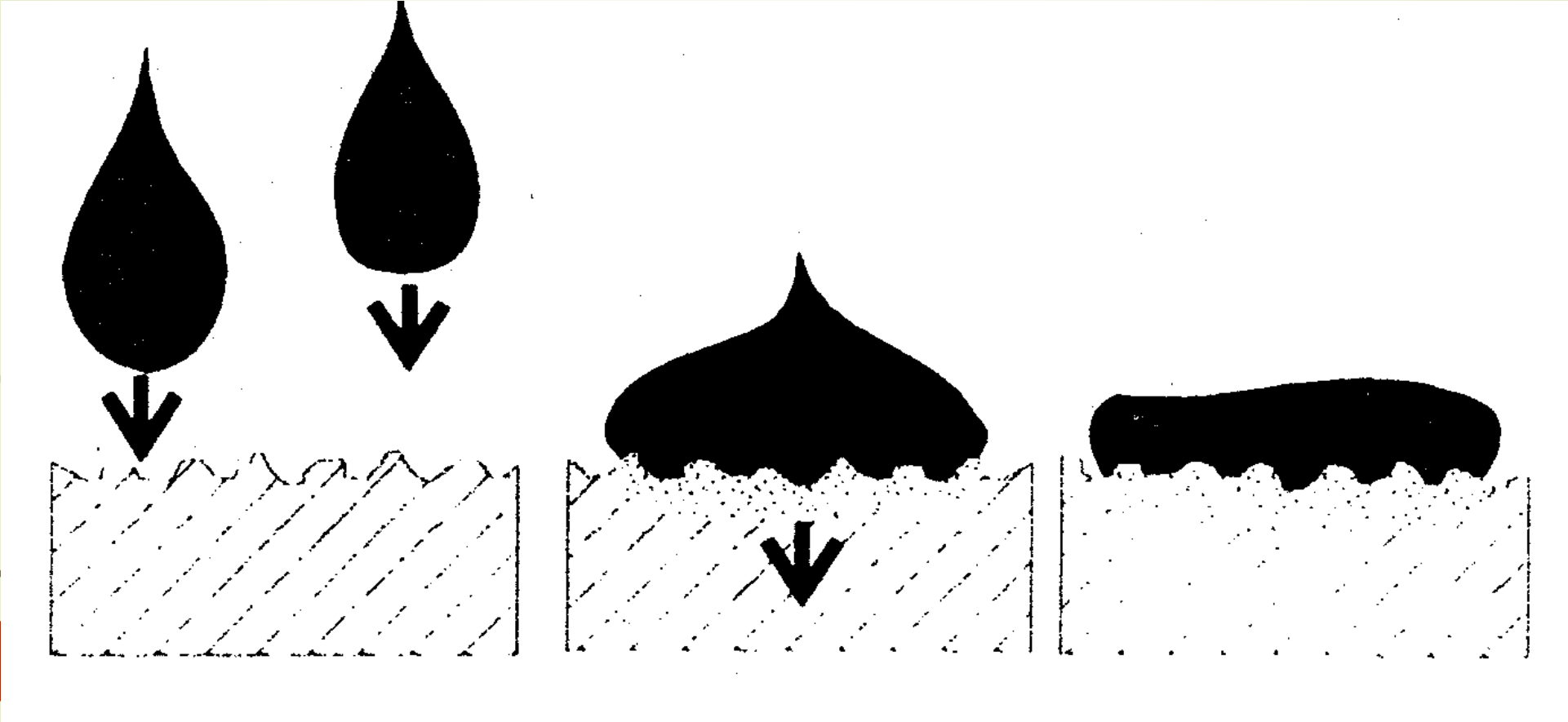
## **ASPERSÃO TÉRMICA - AT**

**Os processos de AT são uma tecnologia composta de diversos processos e são utilizados para a proteção de superfícies contra a corrosão e/ou desgaste pela deposição de revestimentos.**

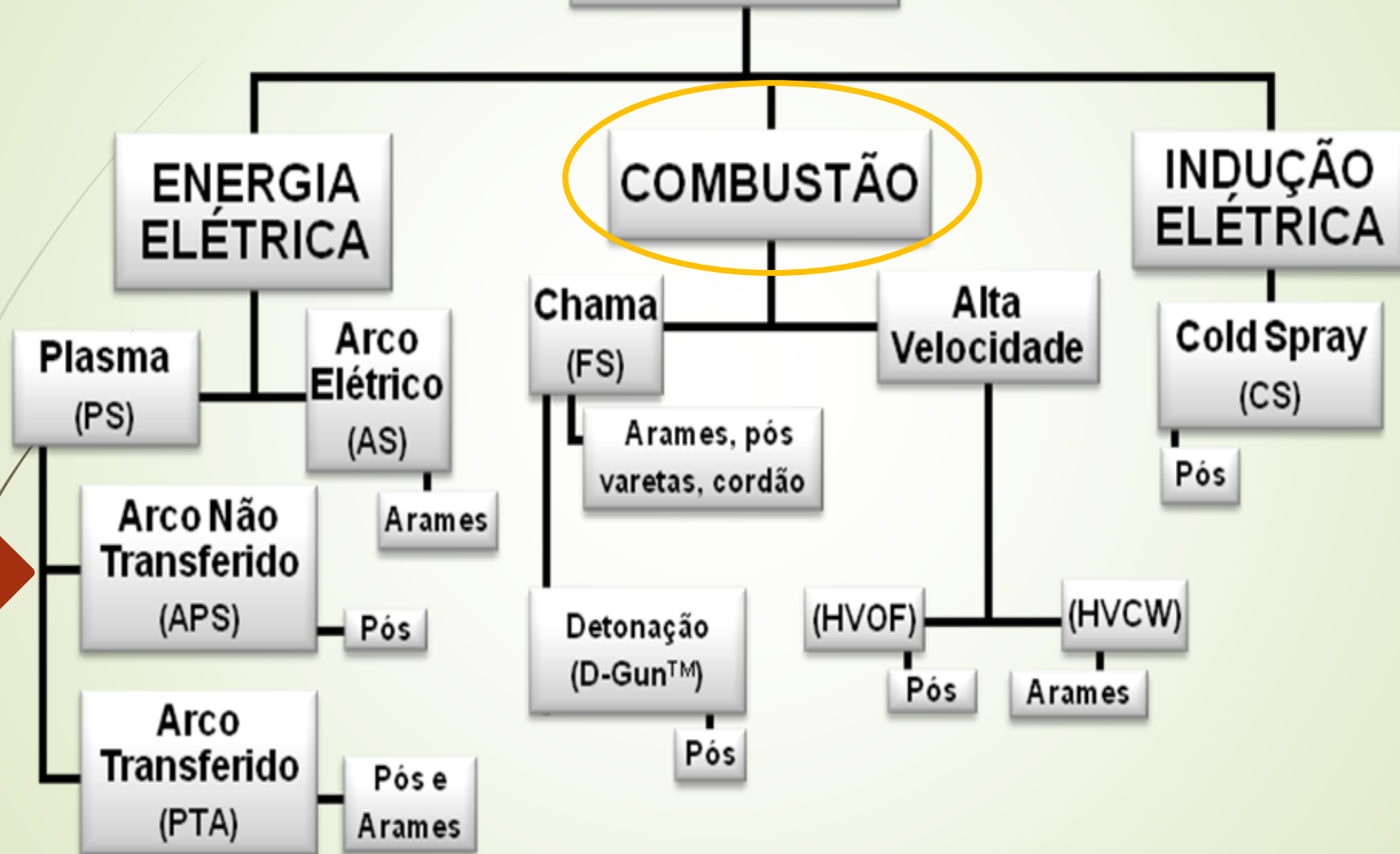


# Mecanismos





# ASPERSÃO TÉRMICA

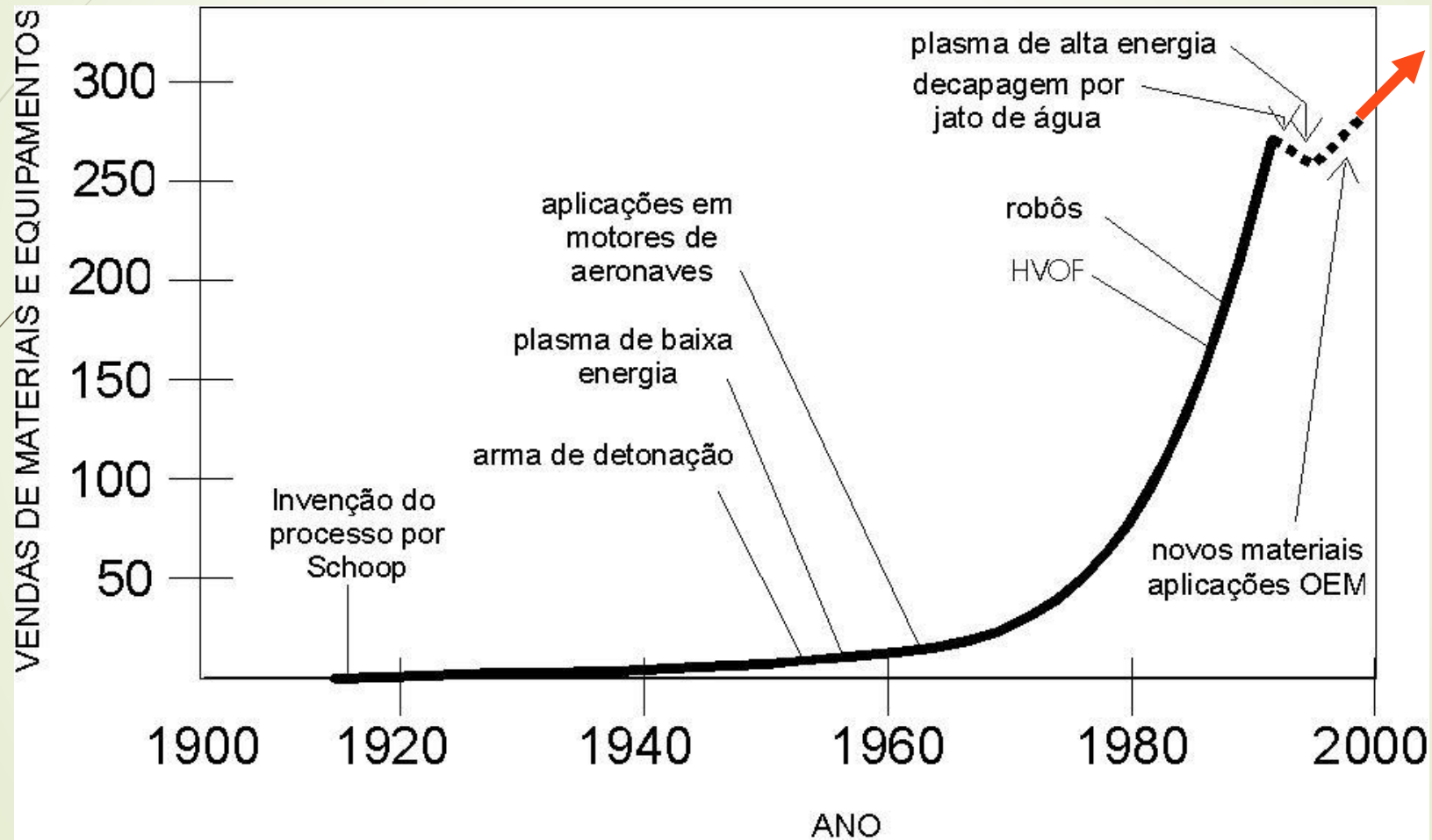




De acordo com os processos de aplicação de revestimentos protetores podemos classificar os processos de aplicação em três grandes grupos:

- 1. Aqueles que envolvem fusão do metal e do material de aporte.**
- 2. Aqueles que envolvem somente a fusão do material de aporte.**
- 3. Aqueles que envolvem um processo de difusão [2+3].**

## Historia e crescimento da indústria de AT (THORPE, 1998).





# Áreas de atuação da Aspersão Térmica [Thermal Spray]

**Aero espacial**

**Agricultura**

**Marítimo**

**Metal Trabalho**

**Papel e Imprensa**

**Bombas / Motores**

**Eletrônica / Computadores**

**Implantes**

**Petro Produtos Químicos**

**Geotérmica**

**Nuclear Power**

**Utilidades / Energia / Água / Esgoto**

**Golfe**

**Militar**

**Offshore submersas Pipe Lines**

**Plataformas de petróleo offshore**

**Refinarias**

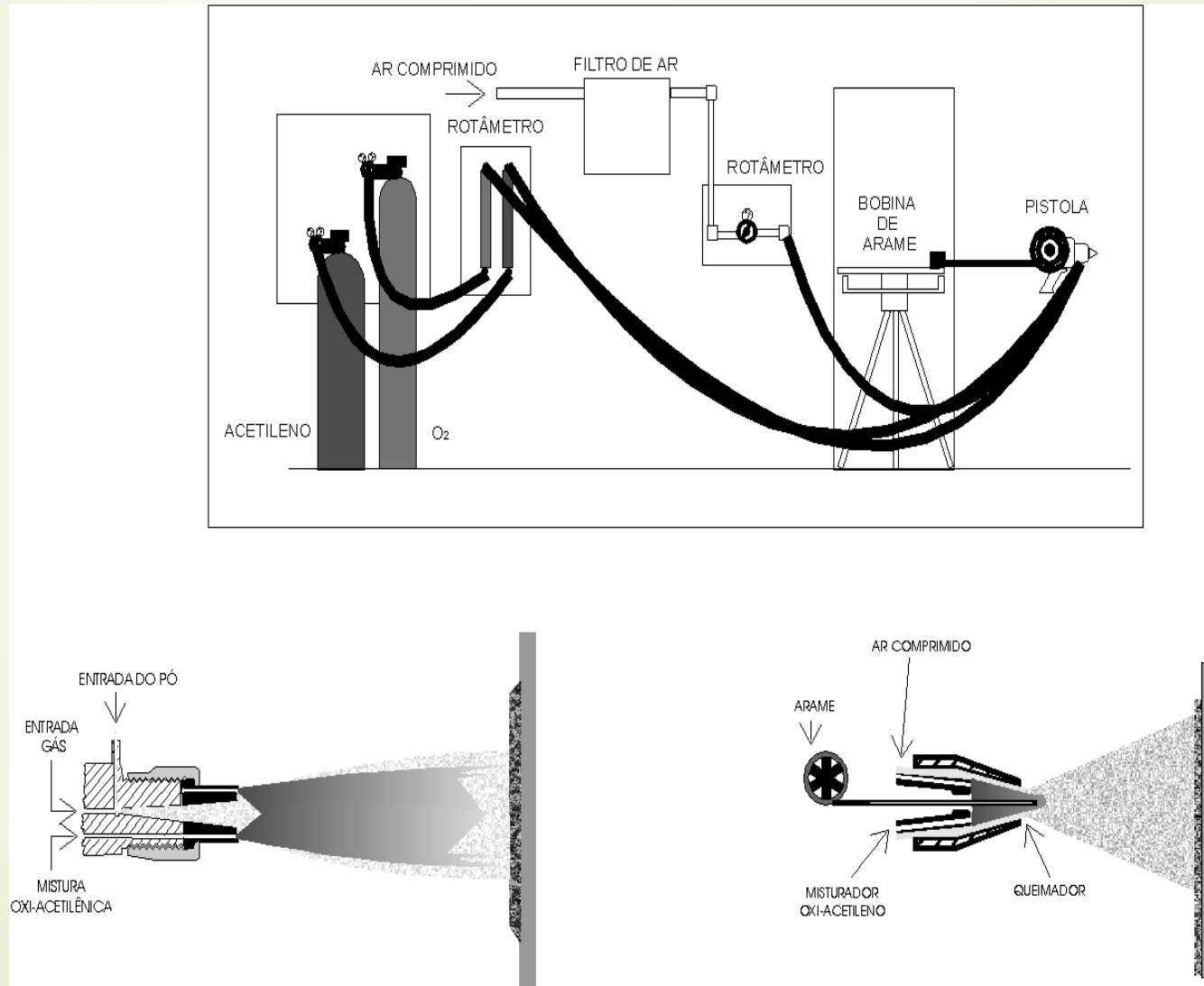
**Railroad**

**Automóveis**

**Diesel**

# Processo de aspersão térmica a chama oxiacetilênica

## FS – “Flame Spray”

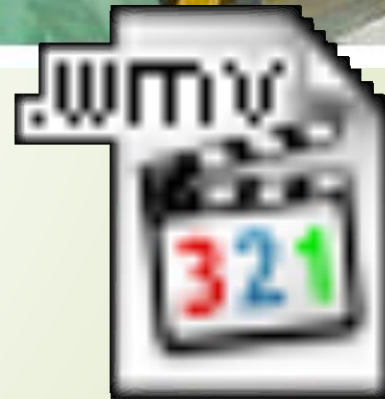


## Equipamento

- Tipo de pistola : pó e arame
- Pressão e fluxo do ar comprimido utilizado para transferir as partículas até o substrato.
- Pressão e Fluxo de oxigênio e acetileno utilizado para a formação da chama.

## Procedimento

- Distância de deposição
- Velocidade de deposição ↔ ↑↓
- Limpeza e Rugosidade
  - Preaquecimento
  - Selante



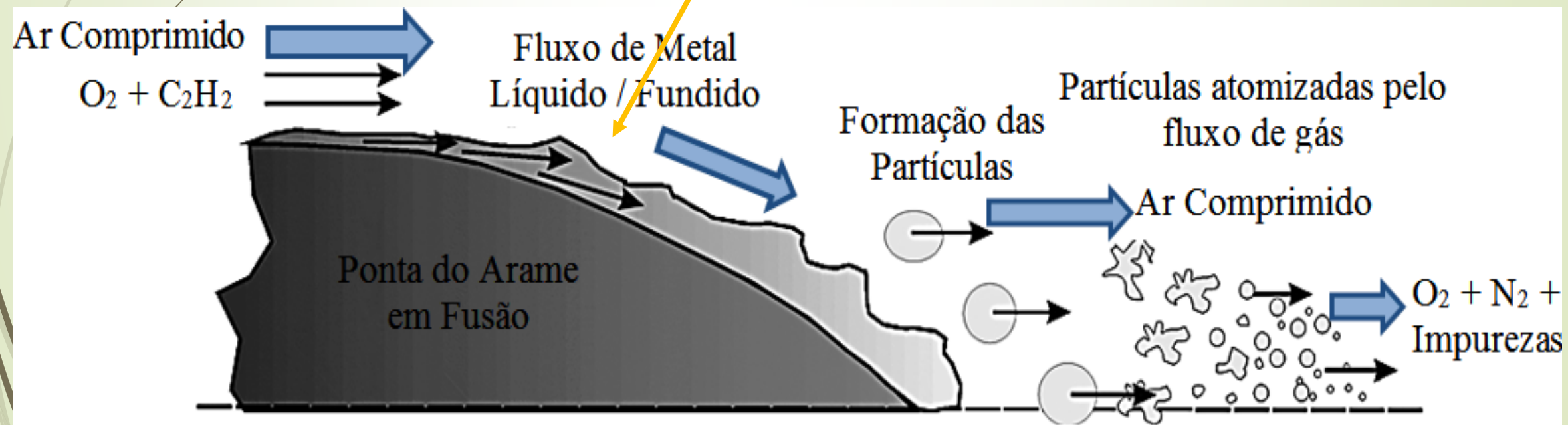
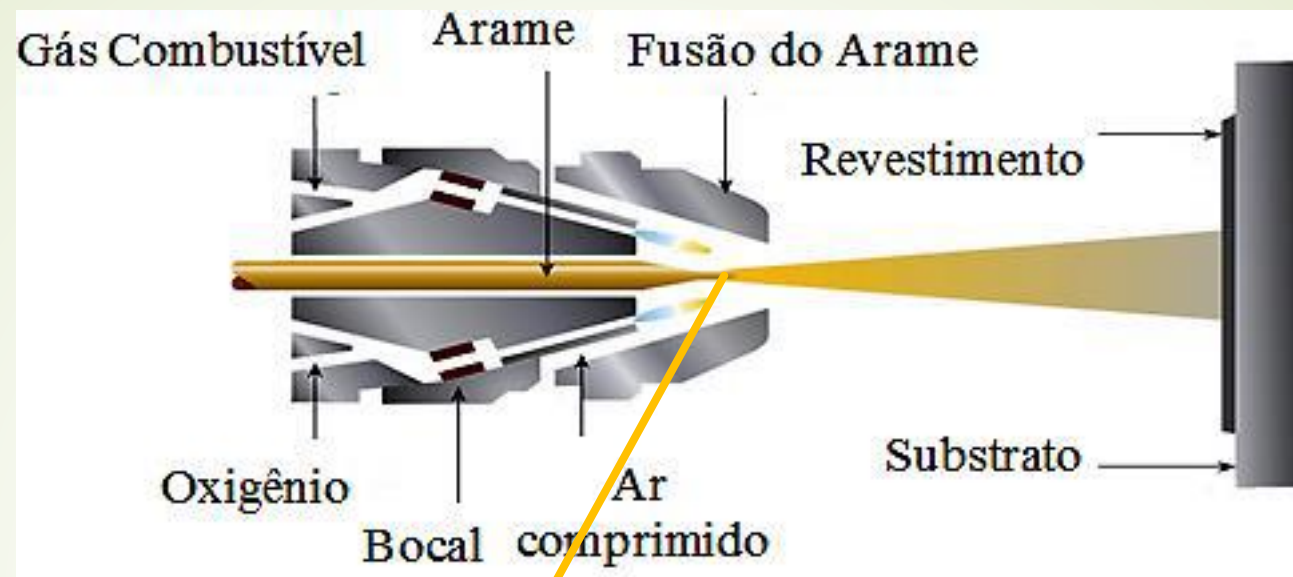
Flame.wmv



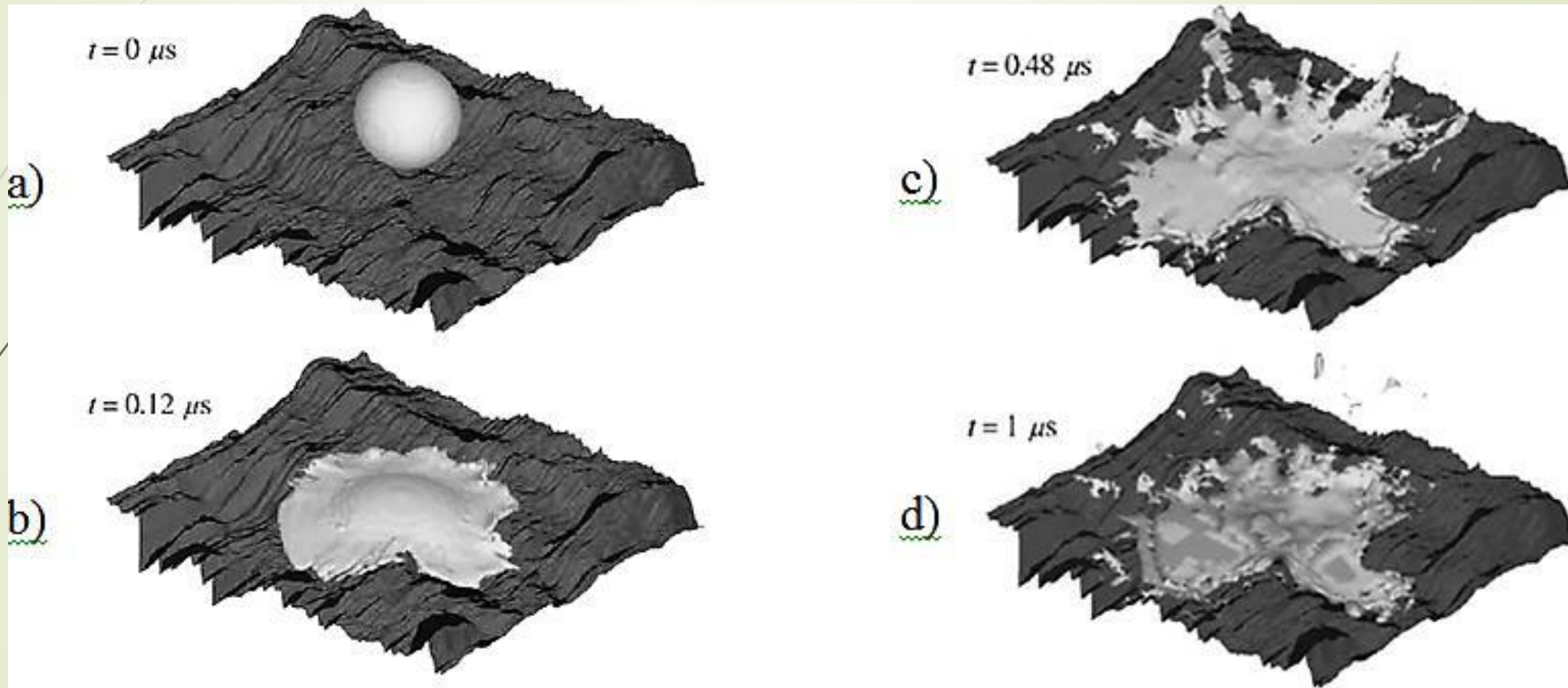




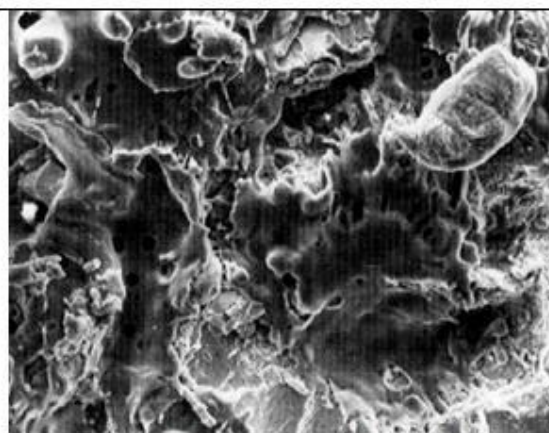




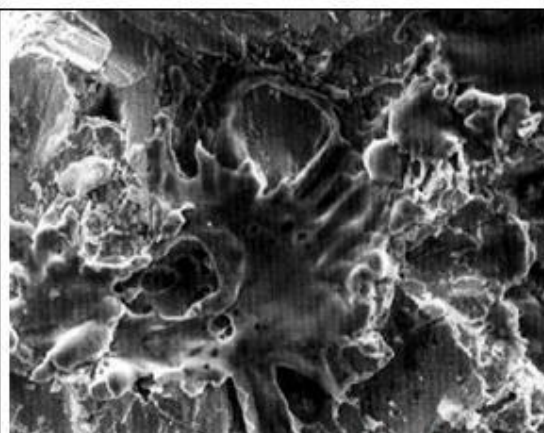
# Formação da Panqueca



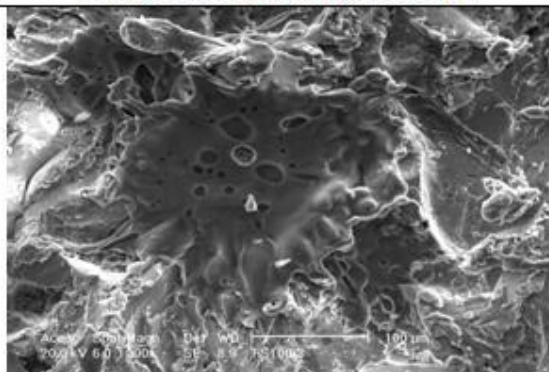




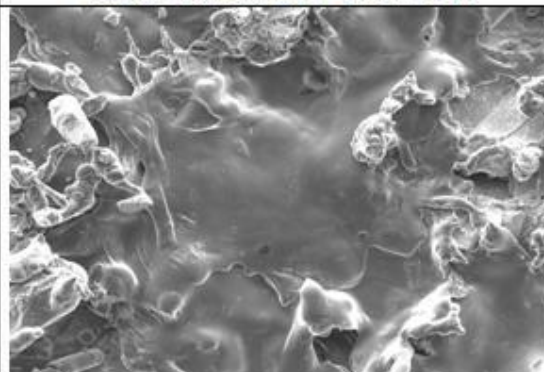
(a) rugosidade do substrato Ry 70/80  $\mu\text{m}$   
sem pré-aquecimento / processo FS



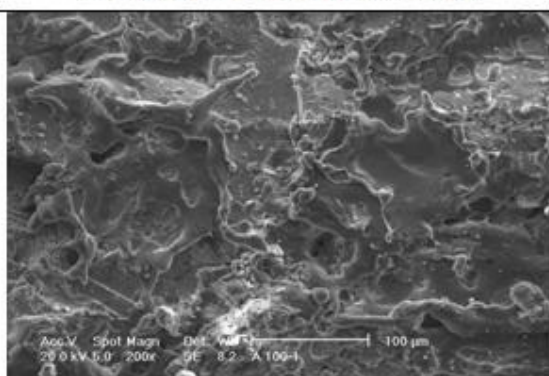
(b) rugosidade do substrato Ry 70/80  $\mu\text{m}$   
com pré-aquecimento / processo FS



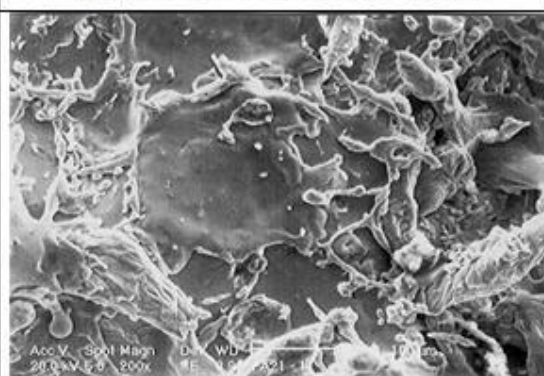
(c) rugosidade do substrato Ry 50/60  $\mu\text{m}$   
sem pré-aquecimento / processo FS



(d) rugosidade do substrato Ry 50/60  $\mu\text{m}$   
com pré-aquecimento / processo FS

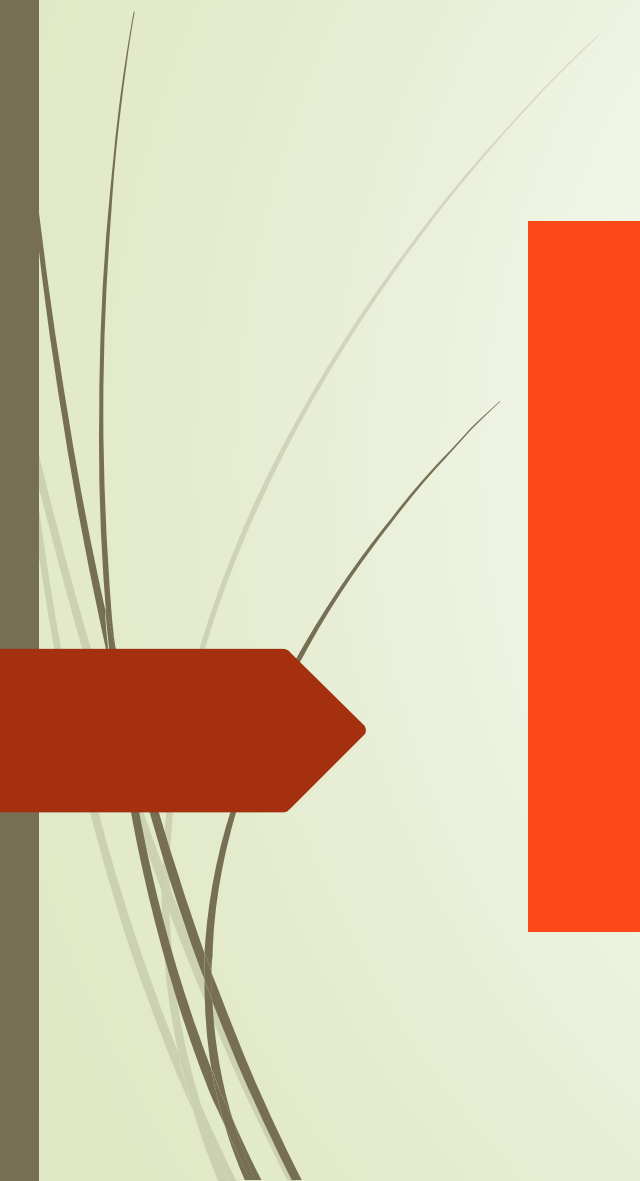


(e) rugosidade do substrato Ry 50/60  $\mu\text{m}$   
sem pré-aquecimento / processo ASP



(f) rugosidade do substrato Ry 50/60  $\mu\text{m}$   
com pré-aquecimento / processo ASP

Temperaturas das fontes de calor adaptado, (ASM, 1994).



Fonte	Temperatura (°C)
Propano + Oxigênio	2526
Gás Natural + Oxigênio	2538
Hidrogênio + Oxigênio	2660
Propileno + Oxigênio	2843
Acetileno + Oxigênio	3087
Arco Plasma	2200 - 28000

## Composição e forma de alguns Materiais Ferrosos

Composição % em peso	Formas disponíveis		Tipo Material
	pó	arame	
Mn 0,5; C 0,10; Fe balanço	<b>x</b>	<b>x</b>	Aço baixo carbono
C 0,80; P 0,04; S 0,04; Mn 0,7; Fe resto		<b>x</b>	Aço alto carbono
Al 10,0; Mo 1,0; C 0,2; Fe resto	<b>x</b>		Aço liga baixo carbono
Al 3,0; Mo 3,0; C 3,0; Fe resto	<b>x</b>		Aço liga alto carbono
C 0,15; P 0,06; S 0,03; Mn 8,5; Ni 5,1; Cr 18,0; Si 1,0; Fe resto		<b>x</b>	Aço inoxidável tipo 202
Cr 17,0; Ni 12,0; Mo 2,5; Si 1,0; C 0,1; Fe resto	<b>x</b>	<b>x</b>	Aço inoxidável tipo 316
Cr 19,0; Ni 9,5; Mn 2,0; Si 1,0; Fe b resto	<b>x</b>	<b>x</b>	Aço inoxidável tipo 304
C 0,35; Cr 13,0; Si 0,5; Fe resto		<b>x</b>	Aço inoxidável tipo 420

## Materiais não Ferrosos

Composição % em peso	Forma disponíveis		Tipo Material
	pó	Arame	
Al 95,0; Fe 1,0; Cu resto	<b>x</b>	<b>X</b>	Bronze alumínio
Si 12,0, Al resto		<b>X</b>	Liga AlSi
Al 99,0 +	<b>x</b>	<b>x</b>	Al puro
Cu 99,0 +	<b>x</b>	<b>x</b>	Cobre desoxidado
Ni 38,0; Cu resto	<b>x</b>	<b>x</b>	Monel
Zn 99,9 +		<b>x</b>	Zinco puro
Cu 66,0; Zn 34,0		<b>x</b>	Latão
Cu 95,0; Sn 5,0		<b>x</b>	Bronze fosforoso
Sn 90,0; Sb 12,5; Cu 3,0		<b>x</b>	Metal patente base estanho
Pb 78,0; Sb 12,5; Sn 10,0; Cu 0,5		<b>x</b>	Metal patente base chumbo
Zn 85,0; Al 15,0		<b>x</b>	Liga ZnAl



# Ligas Especiais

Composição % em peso	Formas disponíveis		Tipo Material
	pó	arame	
$\text{Cr}_3\text{C}_2$ 99,9	x		Carbeto de cromo
$\text{Cr}_3\text{C}_2$ 75; Ni 20; Cr 5	x		Carbeto de Cr em matriz de Ni Cr
Co 12; C 4; Fe 1; W resto	x		Carbeto de W em matriz de Co
$\text{Al}_2\text{O}_3$ 98,0; $\text{SiO}_2$ 0,5; outros 0,5	x		Cerâmica a base de $\text{Al}_2\text{O}_3$ branco
$\text{Al}_2\text{O}_3$ 94,0; $\text{TiO}_2$ 2,5; $\text{SiO}_2$ 2,0; $\text{FeO}_3$ 1,0; outros resto	x	<b>vareta</b>	Cerâmica a base de $\text{Al}_2\text{O}_3$ cinza
$\text{Cr}_2\text{O}_3$ 98	x		Cerâmica a base de óxido de cromo
$\text{Al}_2\text{O}_3$ 87; $\text{TiO}_2$ 13	x		Oxi-cerâmico a base de óxido de Al.
$\text{TiO}_2$ 99,0	x		Oxi-cerâmico a base de dióxido de Ti
MgO 24; $\text{ZrO}_2$ resto	x		Oxi- cerâmico a base de zirconato de Mg
Cr 10; B 2,5; Fe 2,5; Si 2,5; C 0,15; Ni resto	x	Ø 1/8"	Auto fluxante de media dureza
Cr 17; Fe 4,0; Si 4,0; B 3,5; C 1,0; Ni resto	x	Ø 1/8"	Auto fluxante de alta dureza

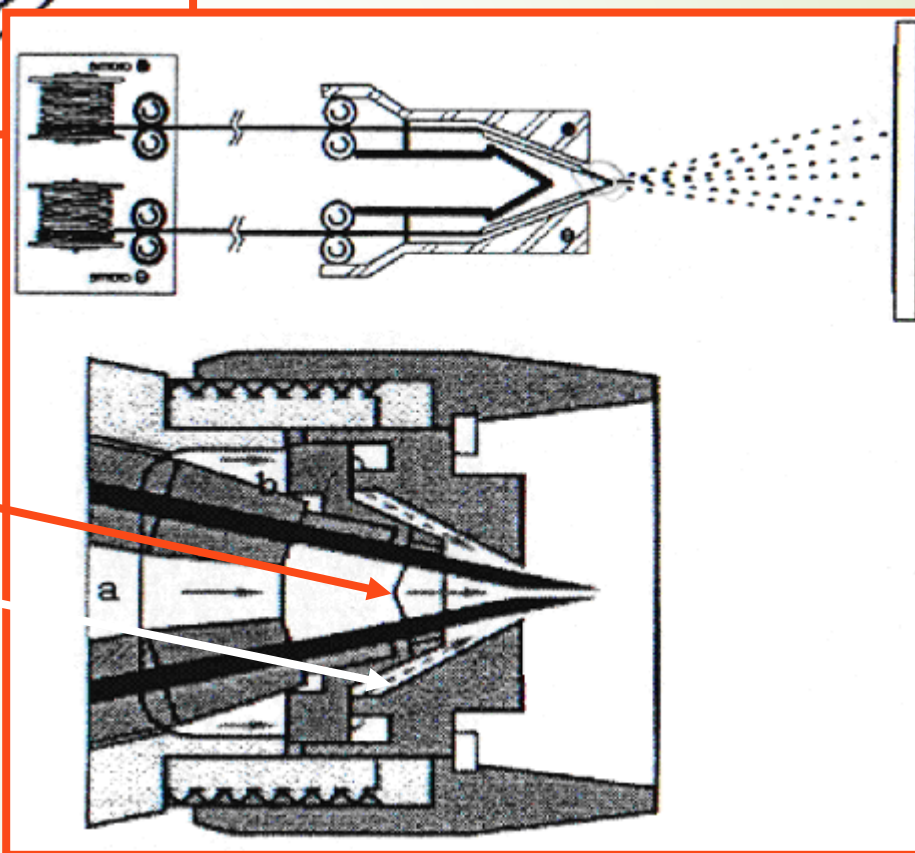
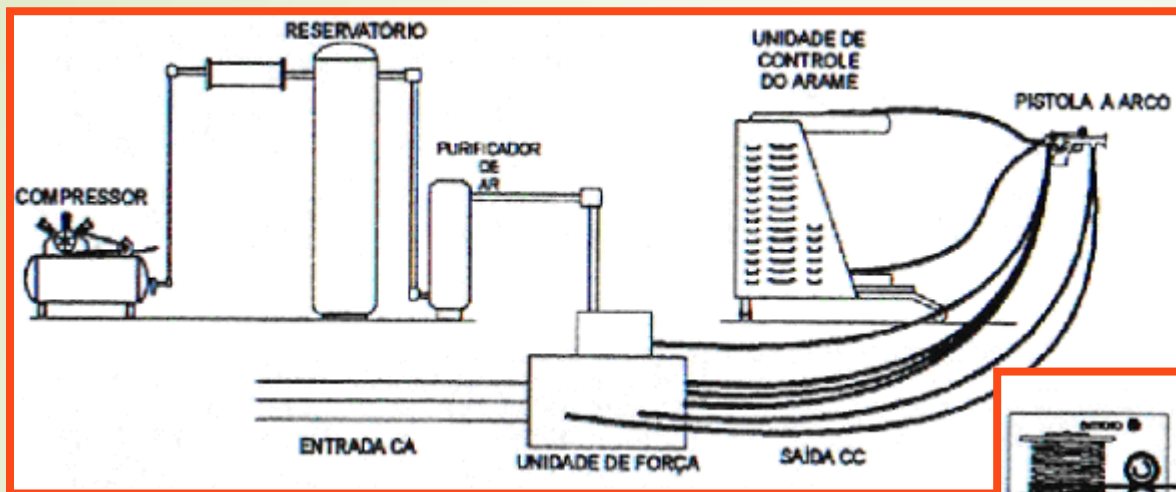
## Processo de aspersão térmica por arco elétrico “Arc Spray Process” ASP

O processo ASP é um método com boa relação custo-benefício e é usada para possibilitar resistência ao desgaste em componentes industriais e/ou resistência à corrosão em grandes estruturas.

É um processo de deposição no qual é geralmente utilizado ar comprimido como gás de transporte. O gás e todos os constituintes do consumível atomizam-se quando da formação do arco elétrico ( $T > 4000^{\circ}\text{C}$ ) e interagem entre si.

**Principais parâmetros que afetam a microestrutura:**

**Limpeza e rugosidade do substrato, pressão do ar comprimido - gás de transporte, tensão, corrente, pré-aquecimento do substrato e distância de aplicação.**



- (a) Fluxo de ar primário
- (b) Fluxo de ar secundário

AT ASP Cascadura





## Equipamento de Aspersão Térmica à Arco Elétrico

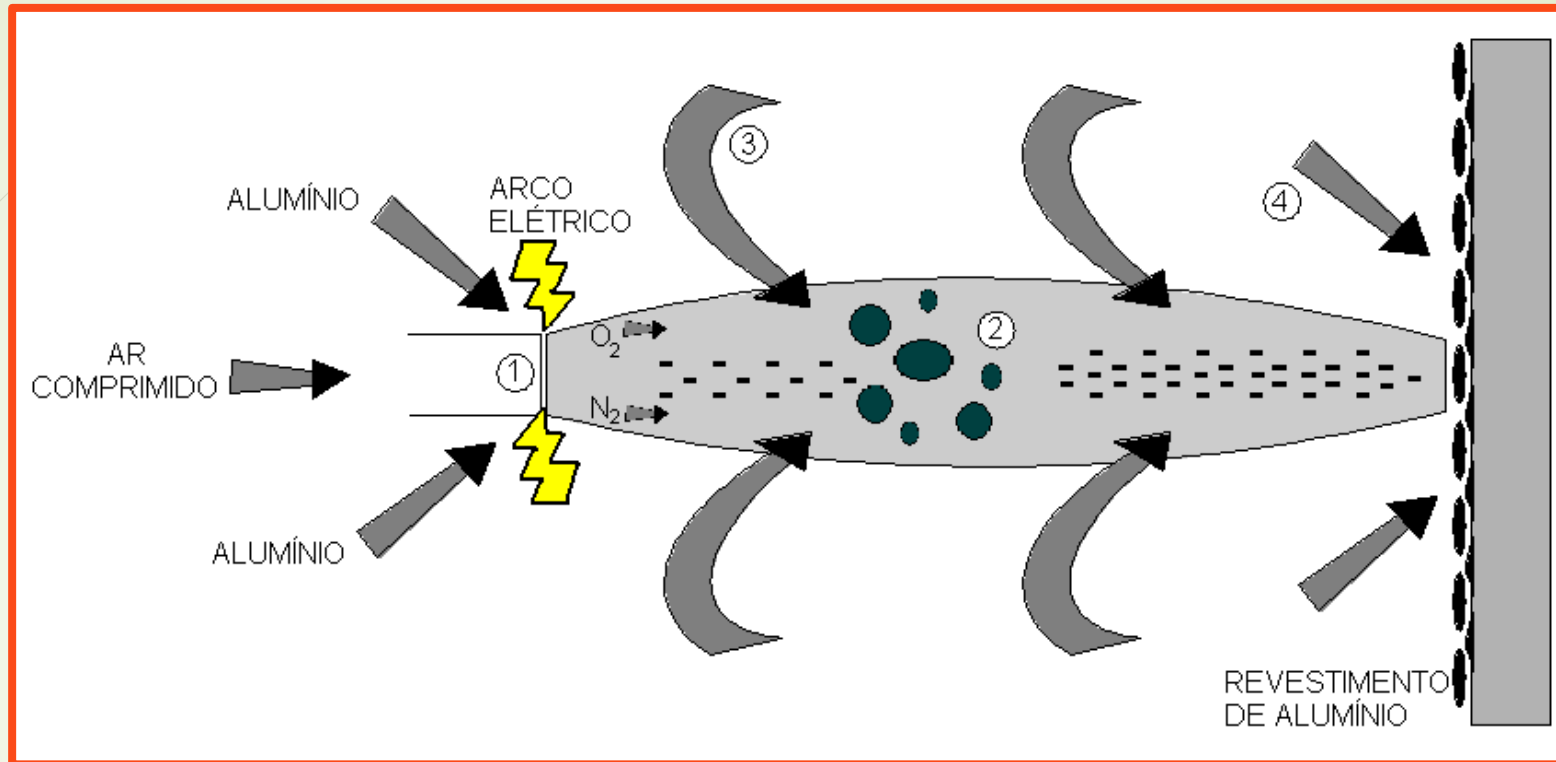


Electric\_arc video.wmv



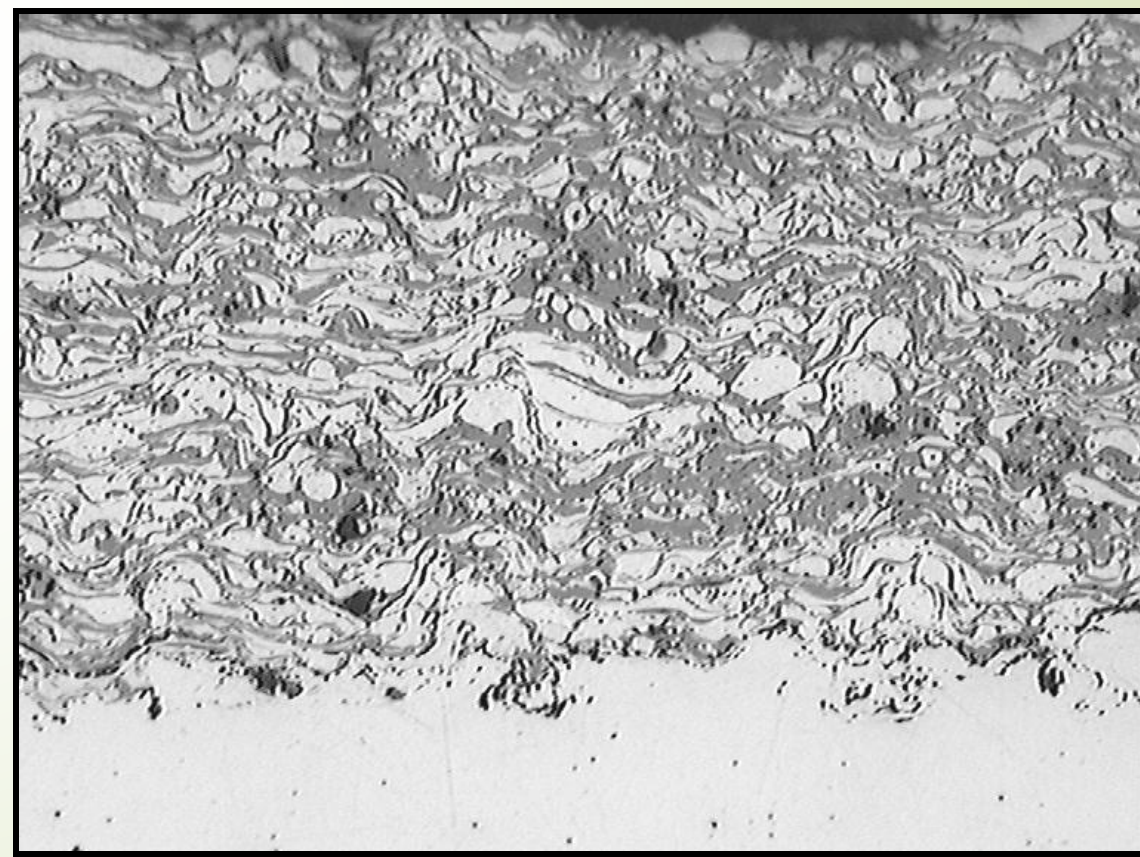
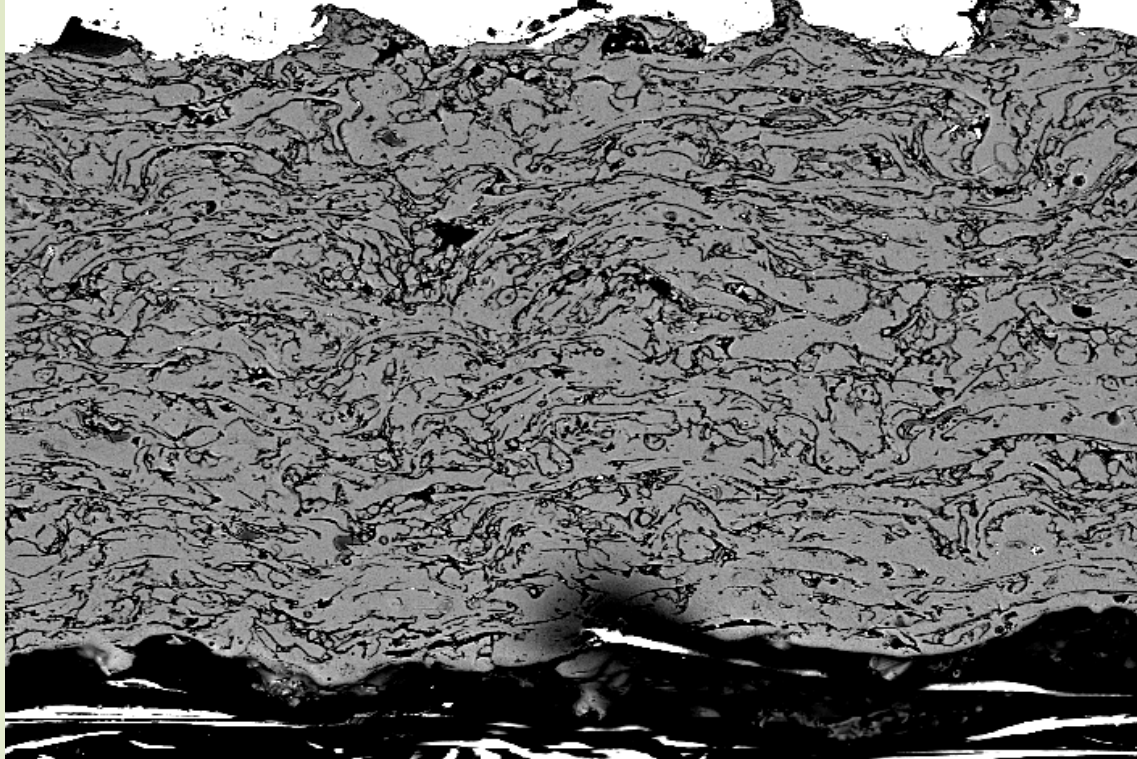
Vídeo transferência ASP

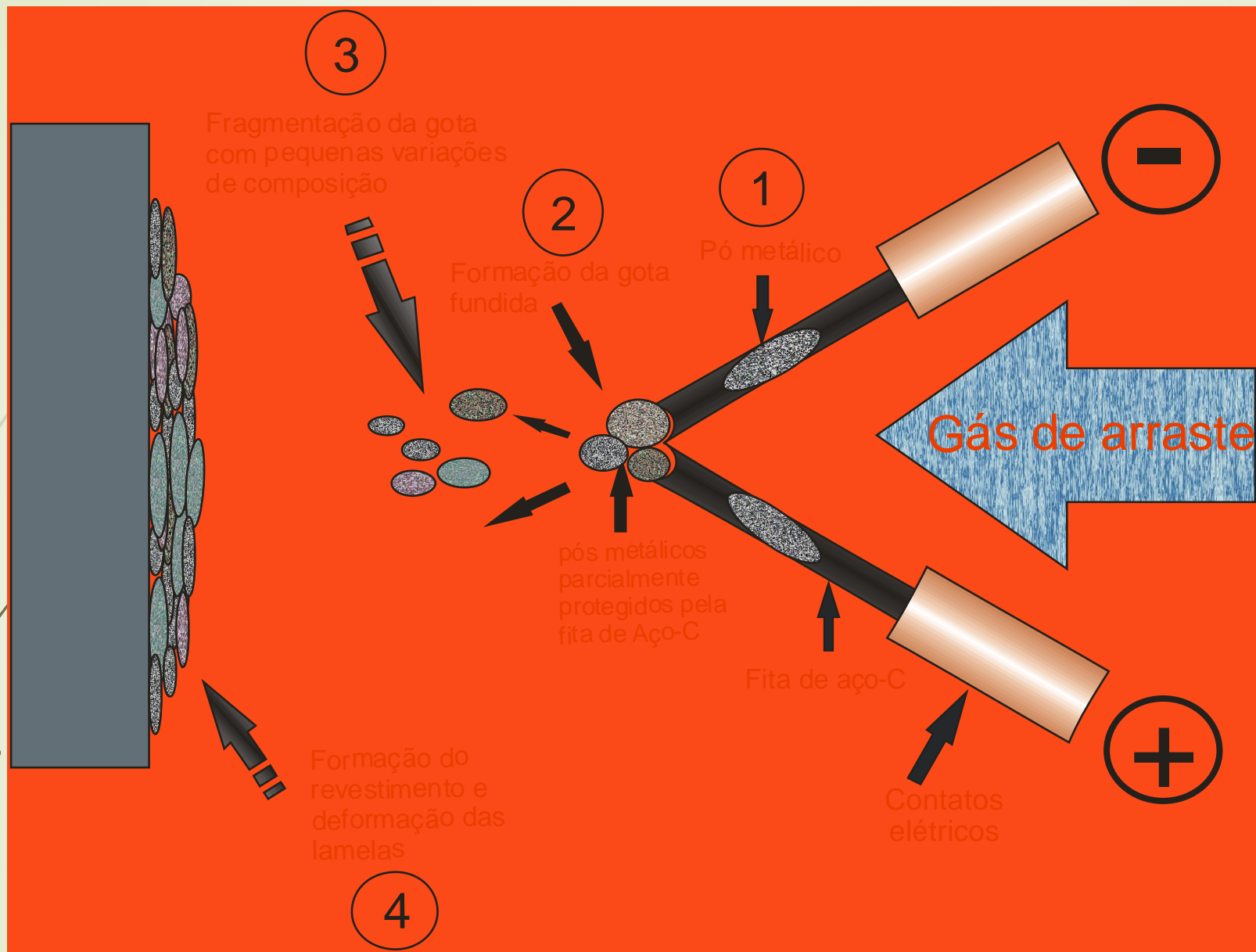
# OXIDAÇÃO NA ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO



- **Mecanismo 1** – fonte de calor, partículas têm o primeiro e mais relevante contato com ambiente oxidativo. Exclusivo para o processo ASP.
- **Mecanismo 2** – oxidação entre a partícula e o gás de transporte.
- **Mecanismo 3** – ar do meio ambiente que envolve a zona de transferência das partículas.
- **Mecanismo 4** - partículas e/ou camadas já ancoradas ao substrato e que ficam expostas ao ar do meio ambiente.

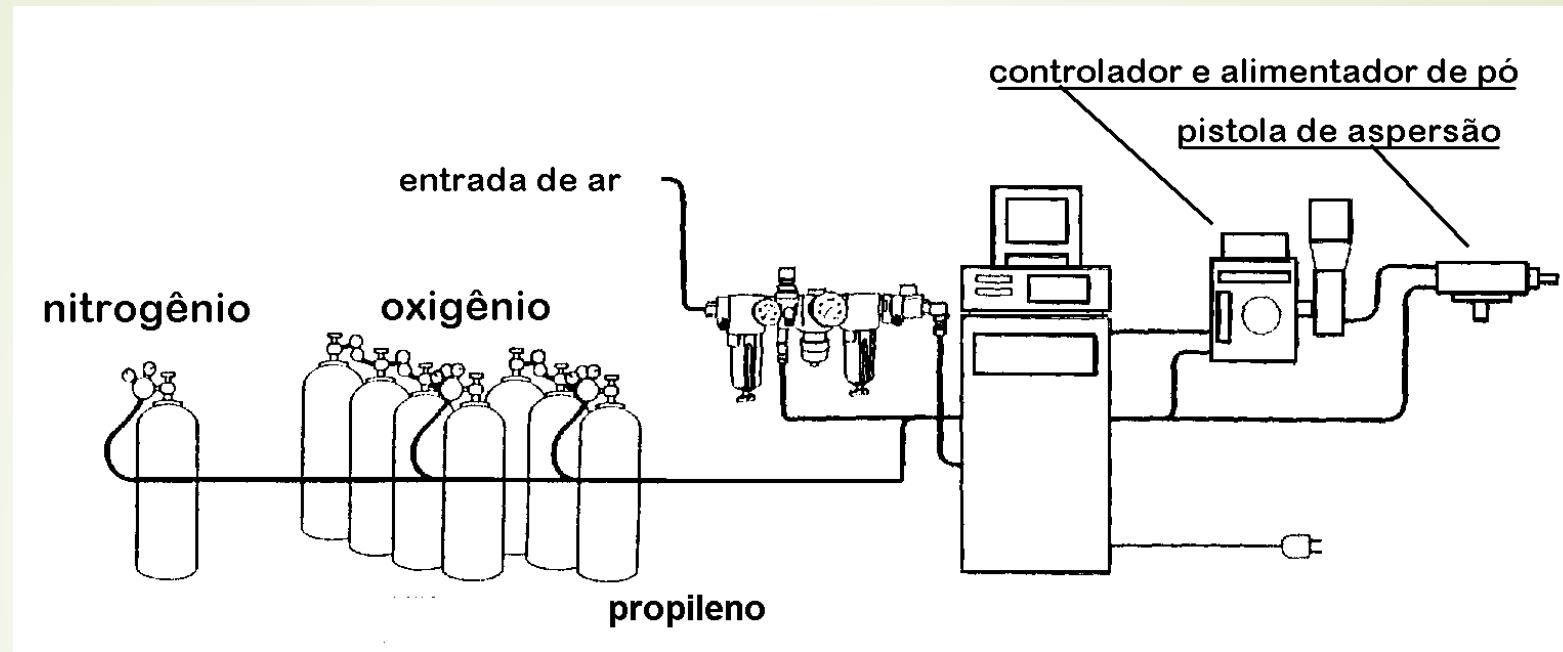




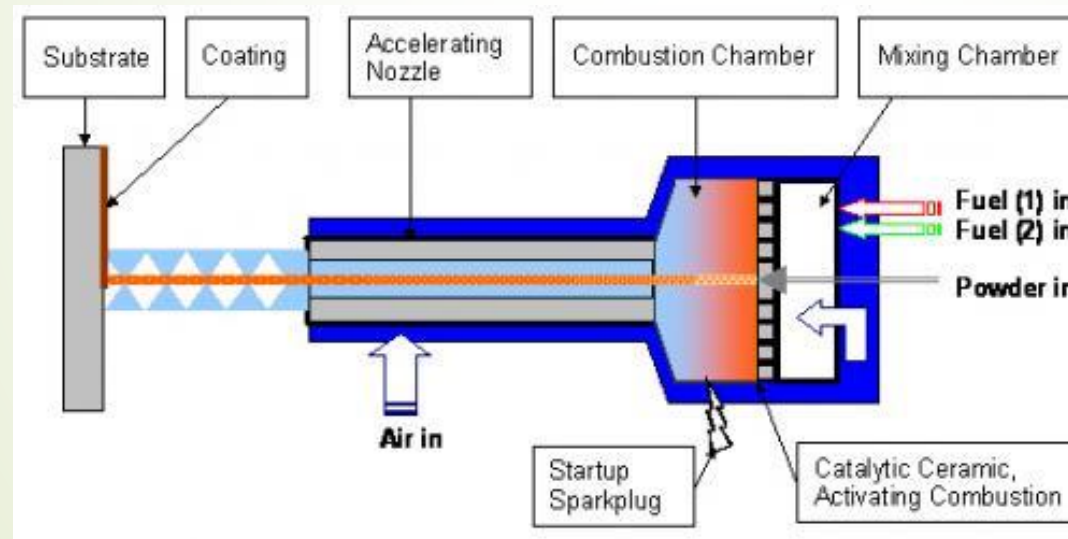
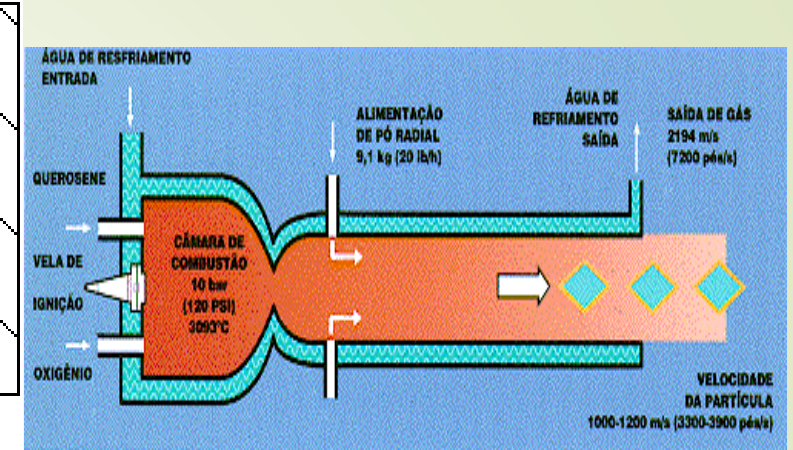
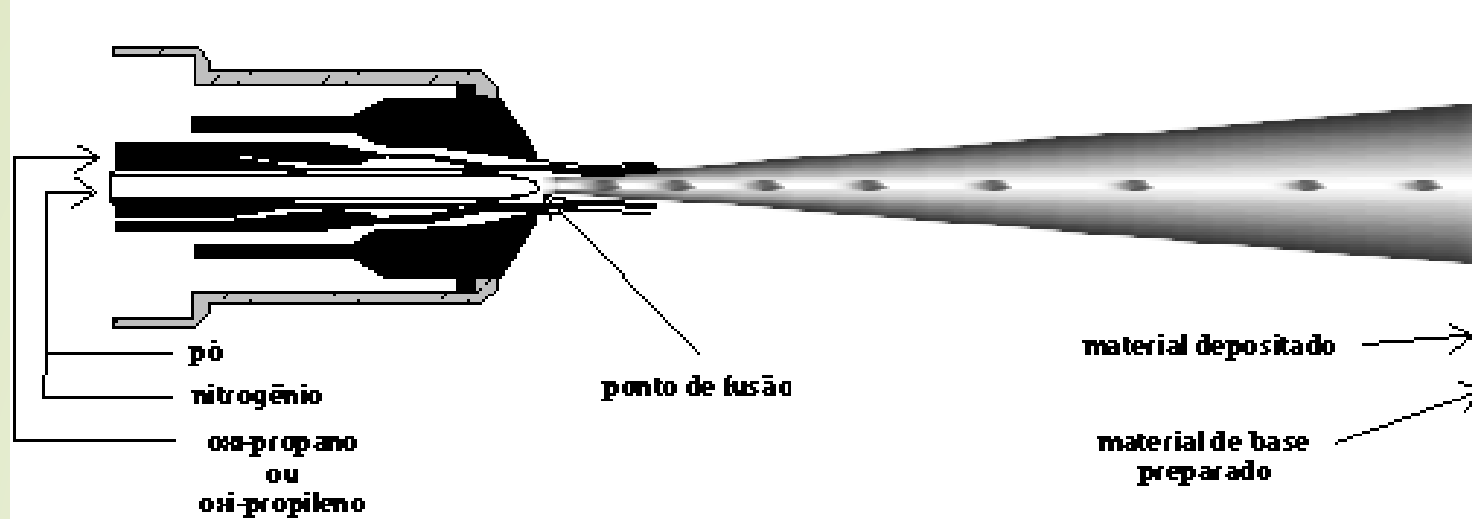




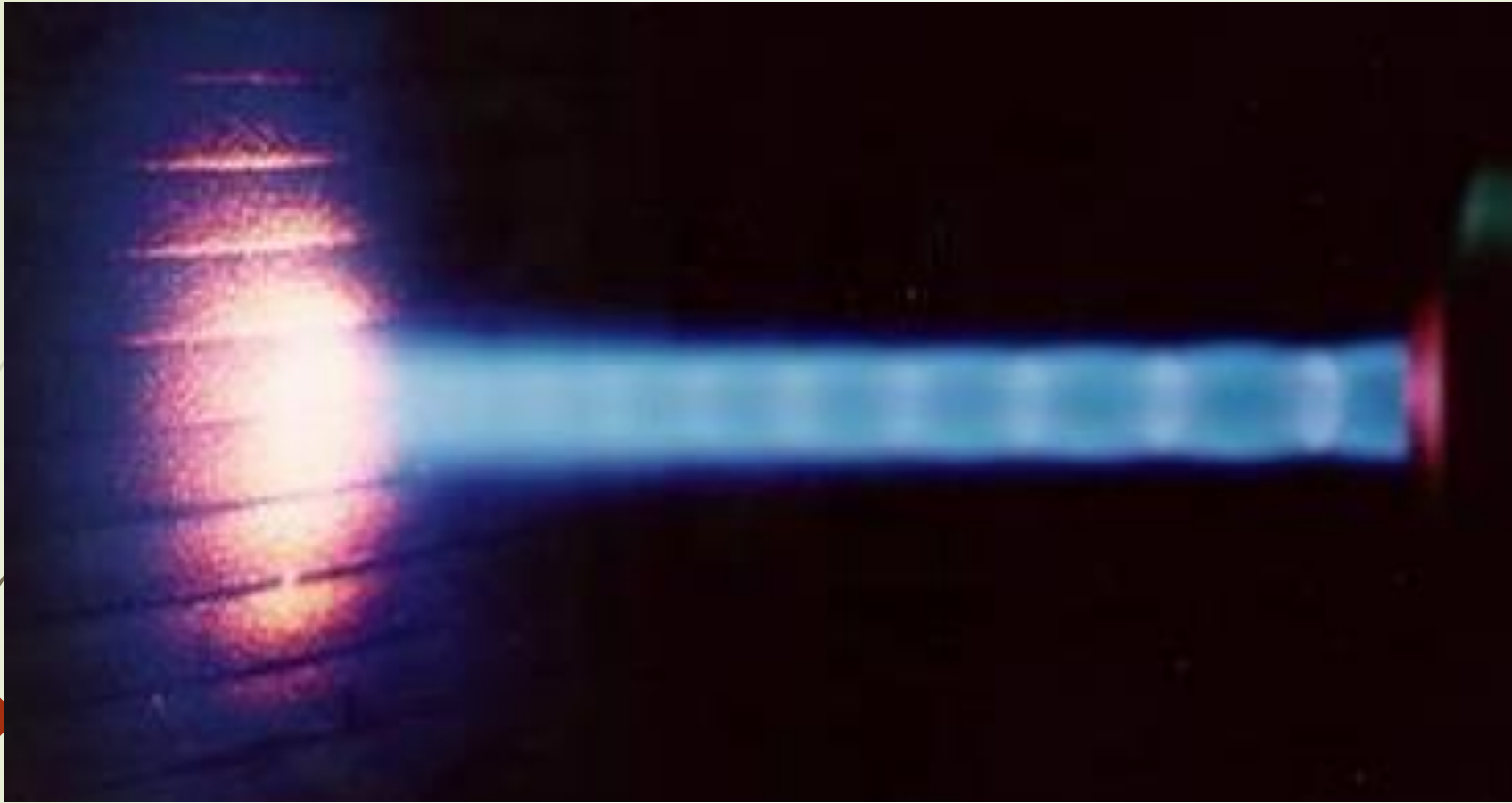
## Processo a chama de alta velocidade - HVOF (High Velocity Oxi-Fuel)



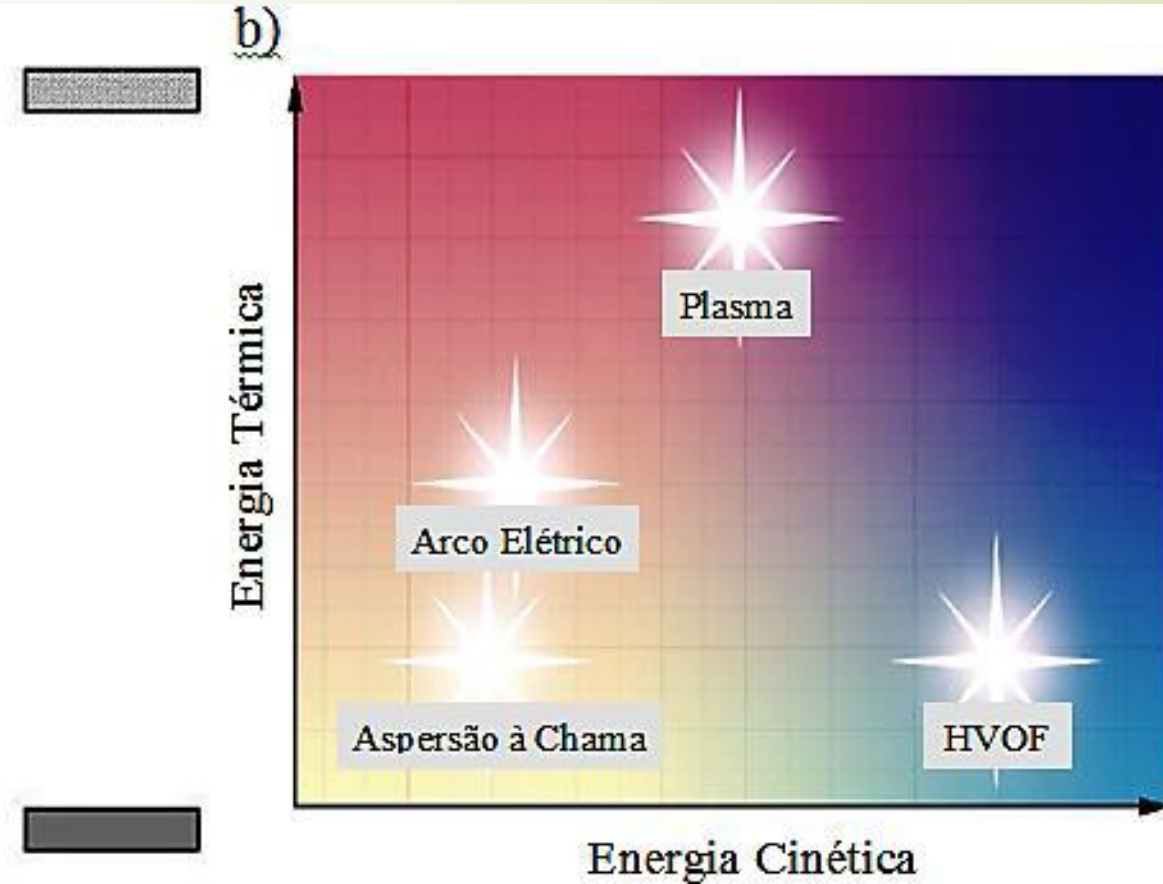
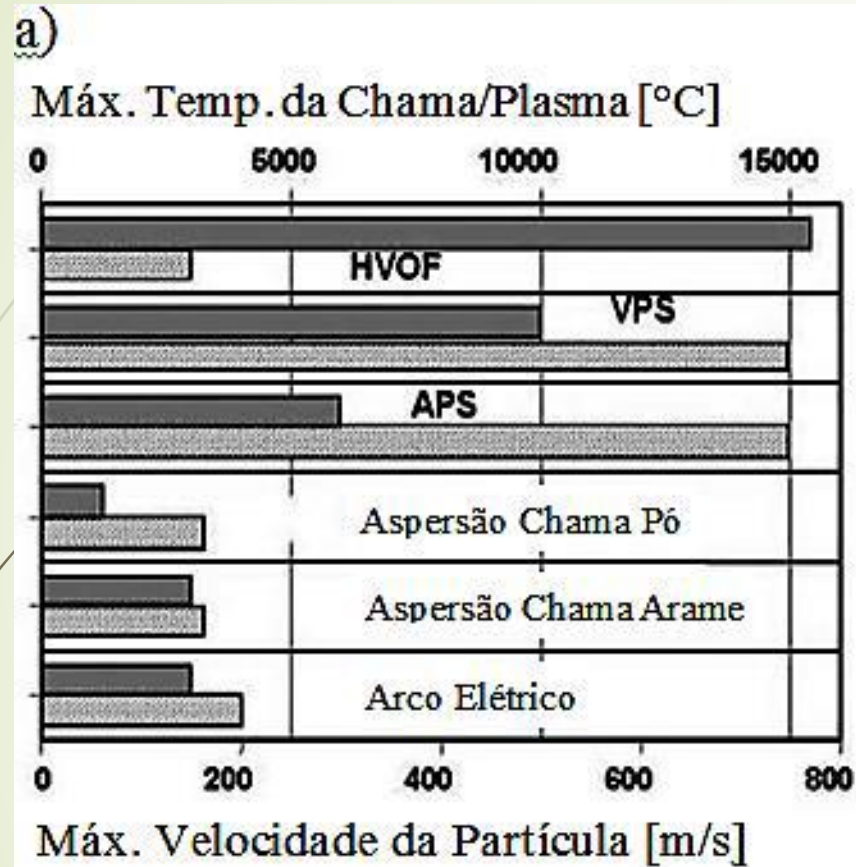
Este processo é mais moderno que os anteriores, o calor gerado na combustão utiliza uma mistura de oxigênio com gases combustíveis (propileno, propano ou kerosene), a chama atinge temperaturas na faixa entre 2700 e 3100 °C.



Hvof.wmv

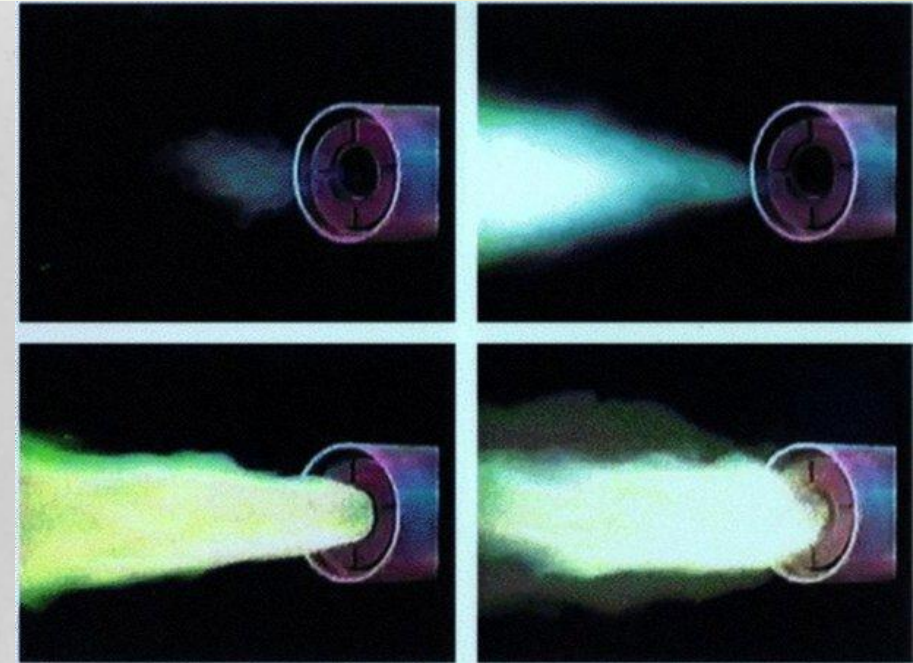
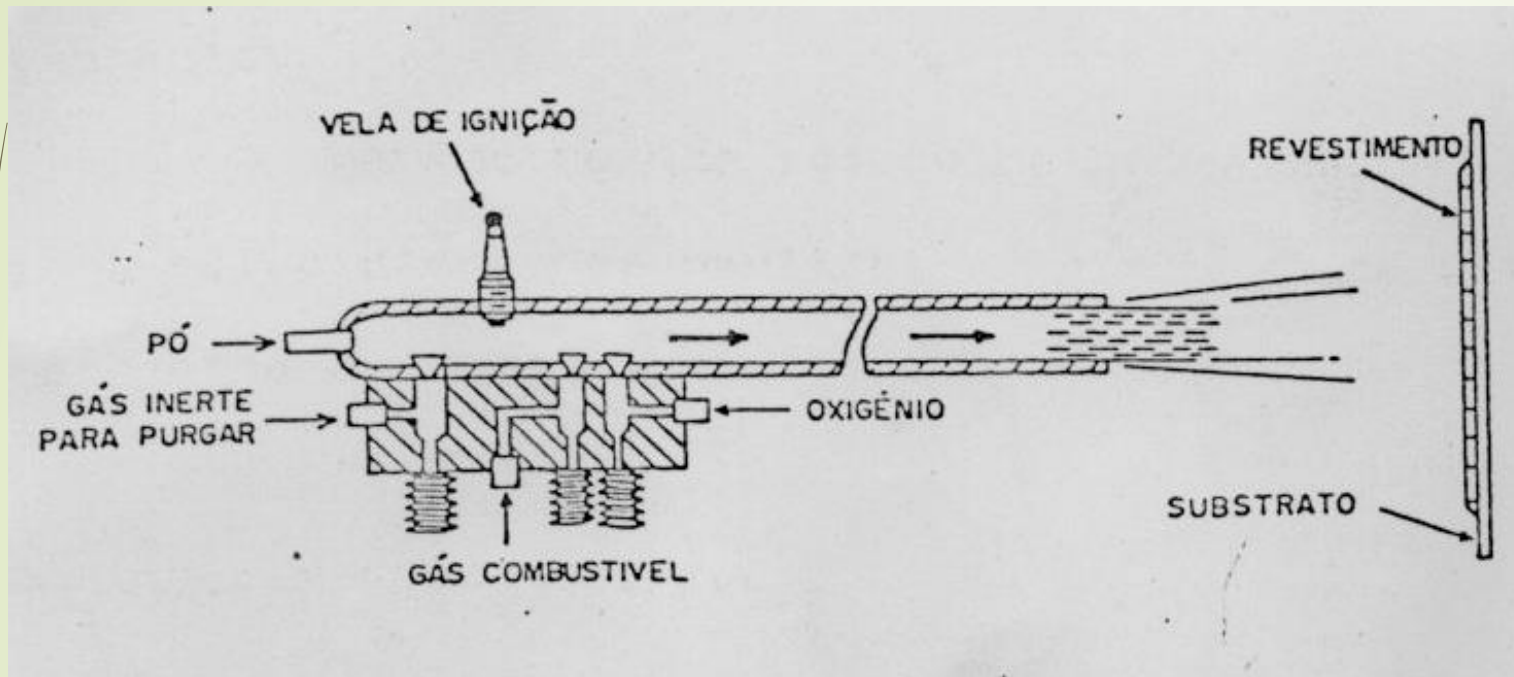


# Comparativo Energia Térmica e Cinética





# Processo por Detonação

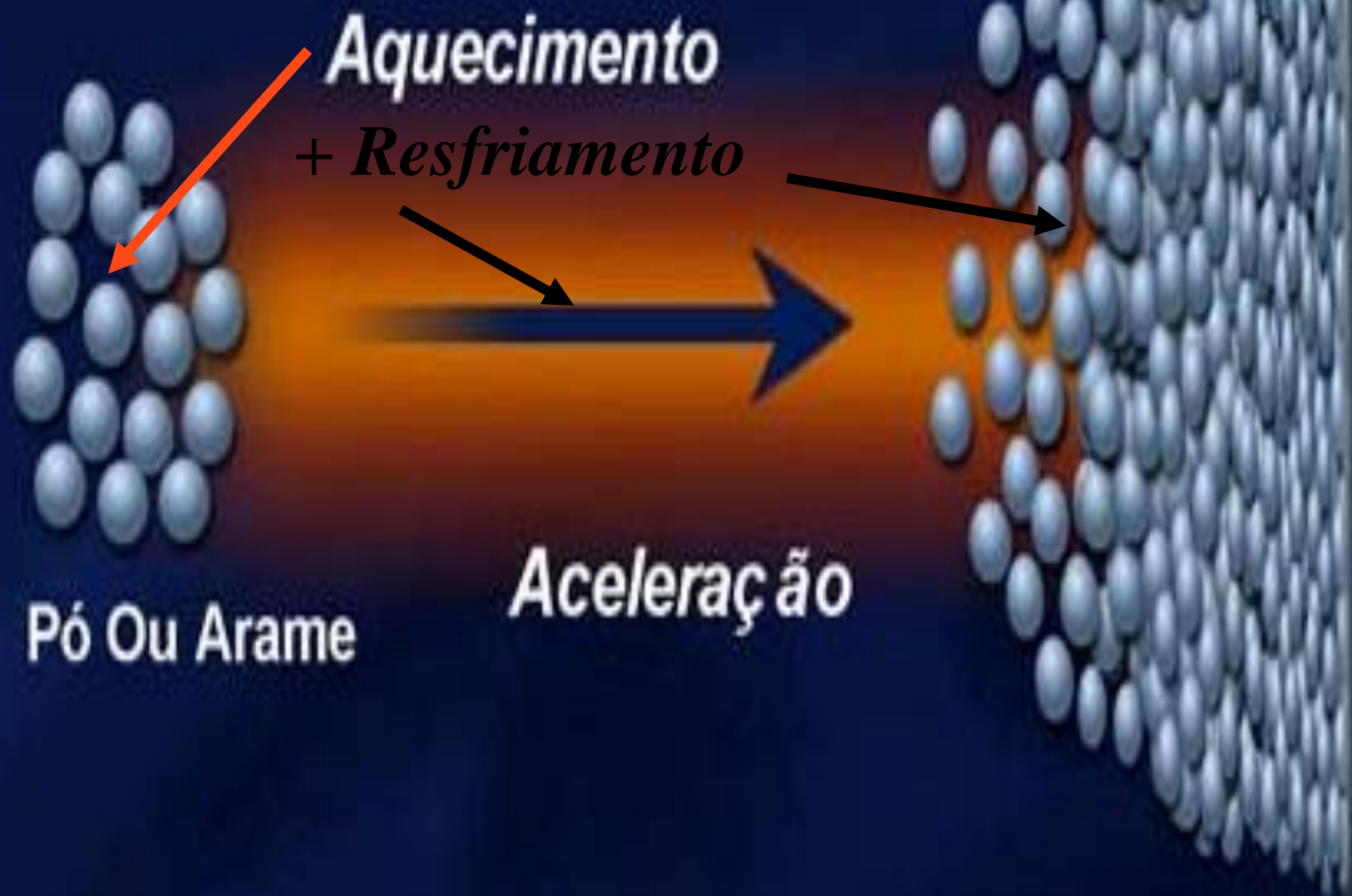


Neste processo utiliza-se a energia da explosão de uma mistura oxiacetilênica que aquece e impele o material, sempre sob forma de pó, de encontro à superfície do substrato a ser revestido.

**As camadas resultantes deste processo são extremamente duras, densas e firmemente aderidas ao material de base.**

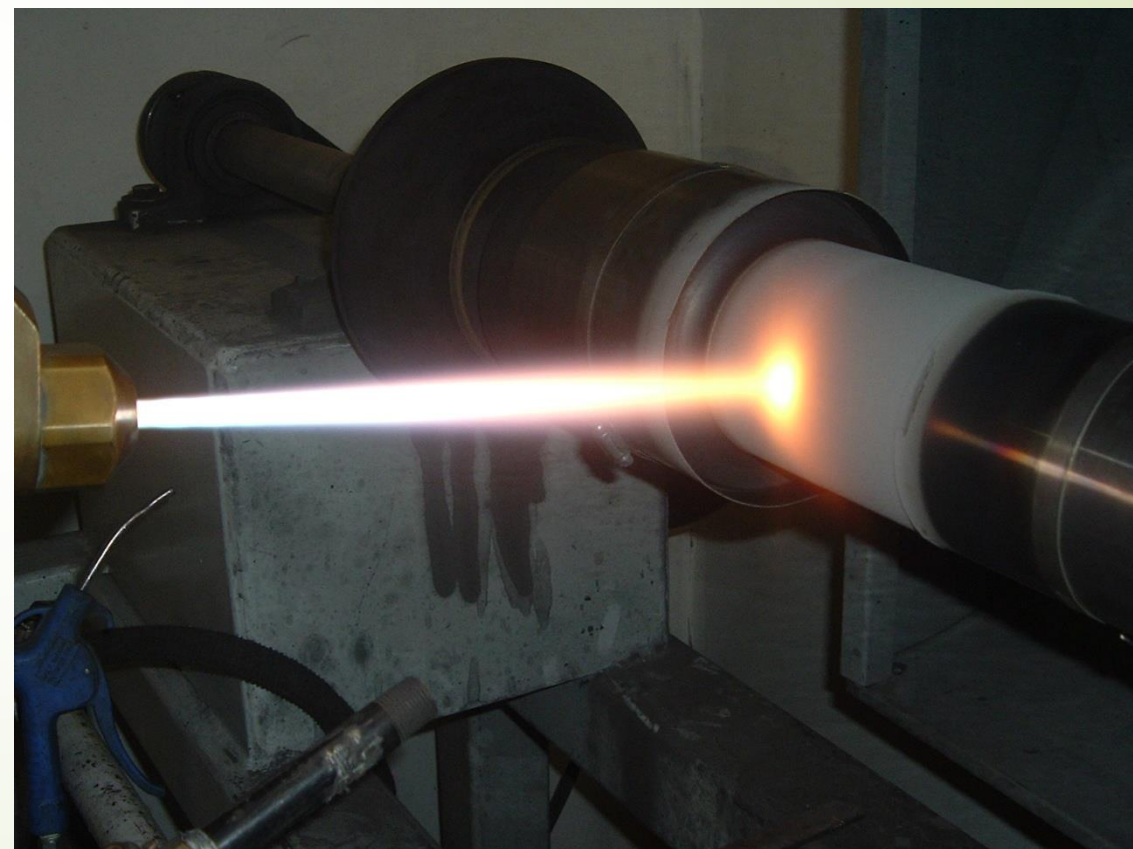
# Parâmetros dos Processos de AT Convencionais

Processo → Parâmetros ↓	FS [pó]	FS [arame]	HVOF [pó]	Detonação	ASP [arame]
<b>Temperatura Chama/Arco [°C]</b>	2200/3200	2800/3200	2700/3100	3900	4000/6000
<b>Veloc. Transferência [m/s]</b>	30-150	100-250	400-1200 Até 5000	910	100-350
<b>Atmosfera da Chama/Arco</b>	CO,CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>
<b>Teor de Óxidos    [%]</b>	0,4 – 10	0,4 – 10	1 - 5	1-5	2,5 - 15
<b>Porosidade        [%]</b>	05 - 15	05 - 15	<3	<3	2 -15
<b>Aderência        [MPa]</b>	4 -20	4 - 20	>40	>40	10 - 36

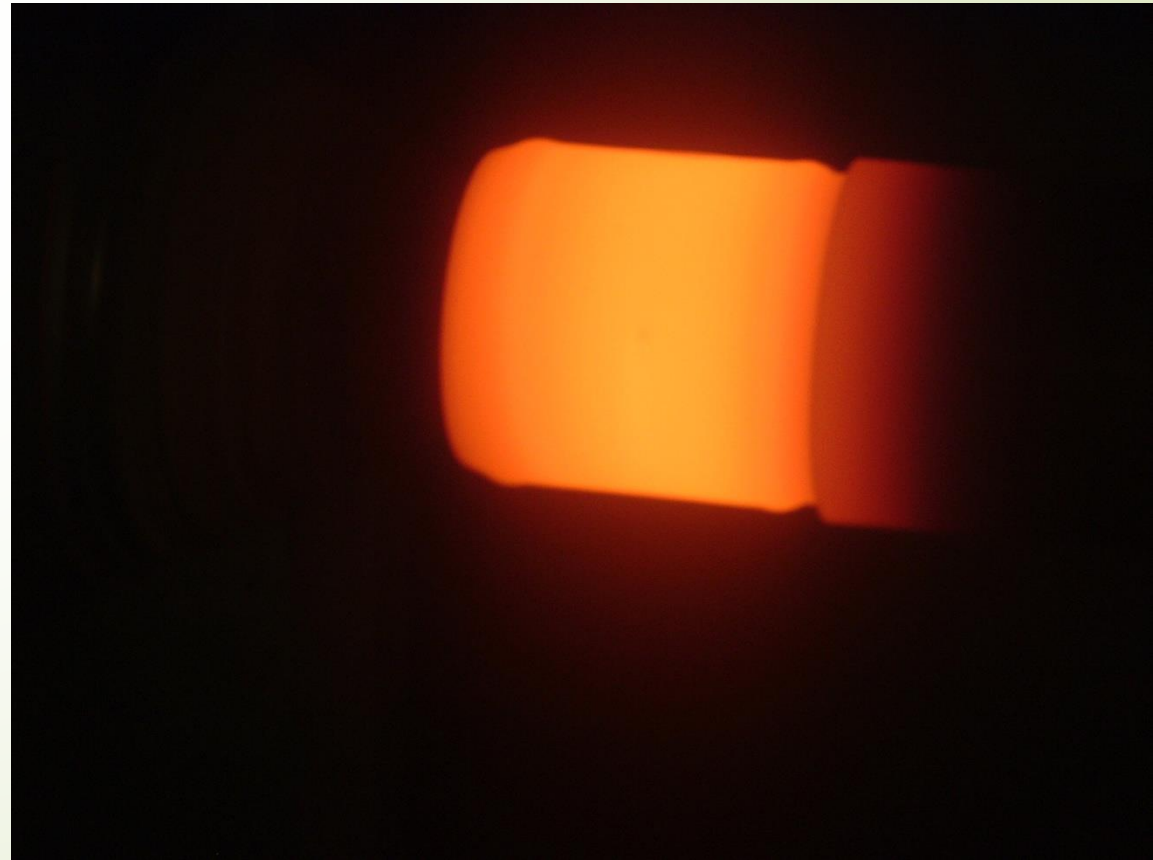
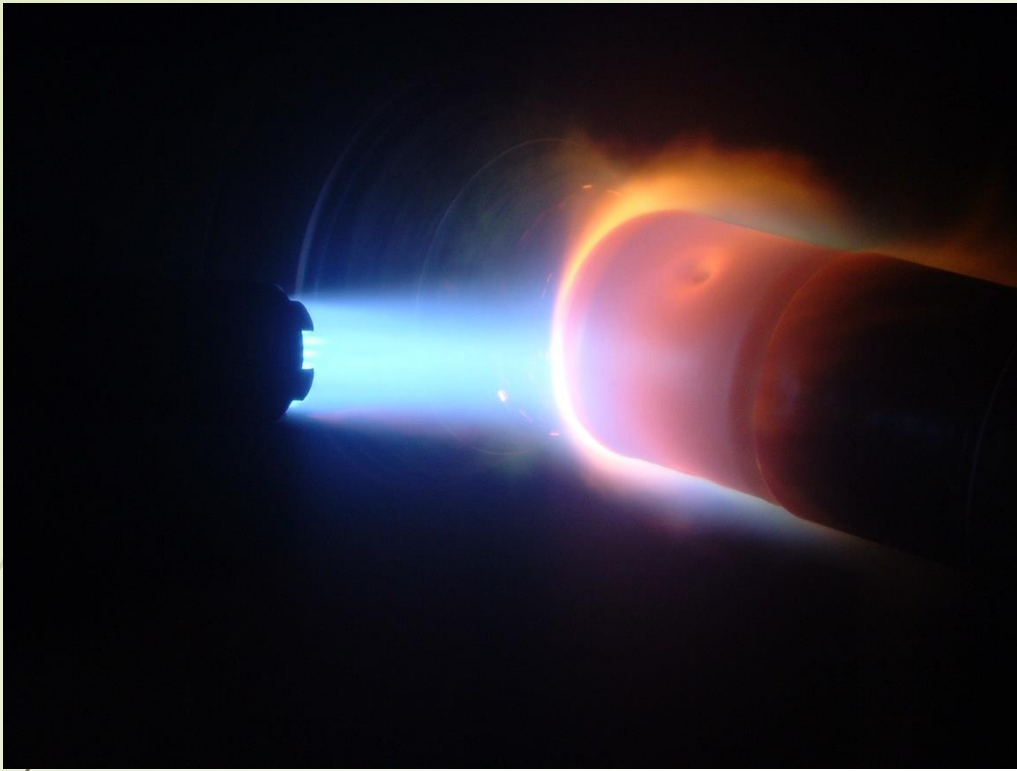


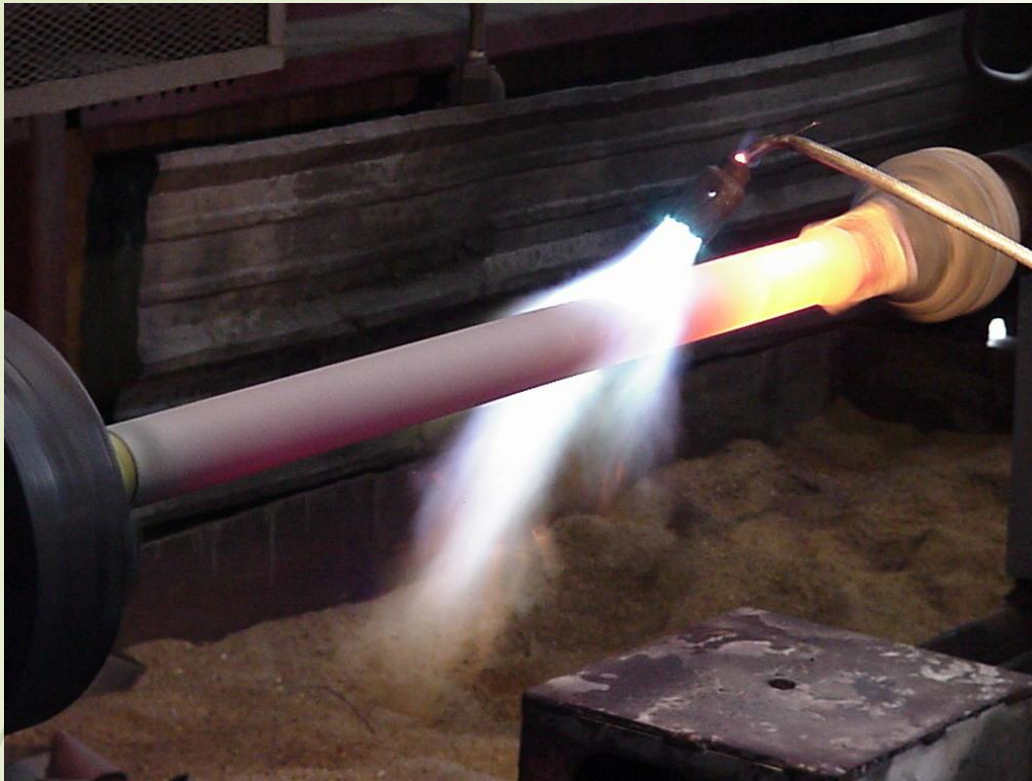


# Aplicações

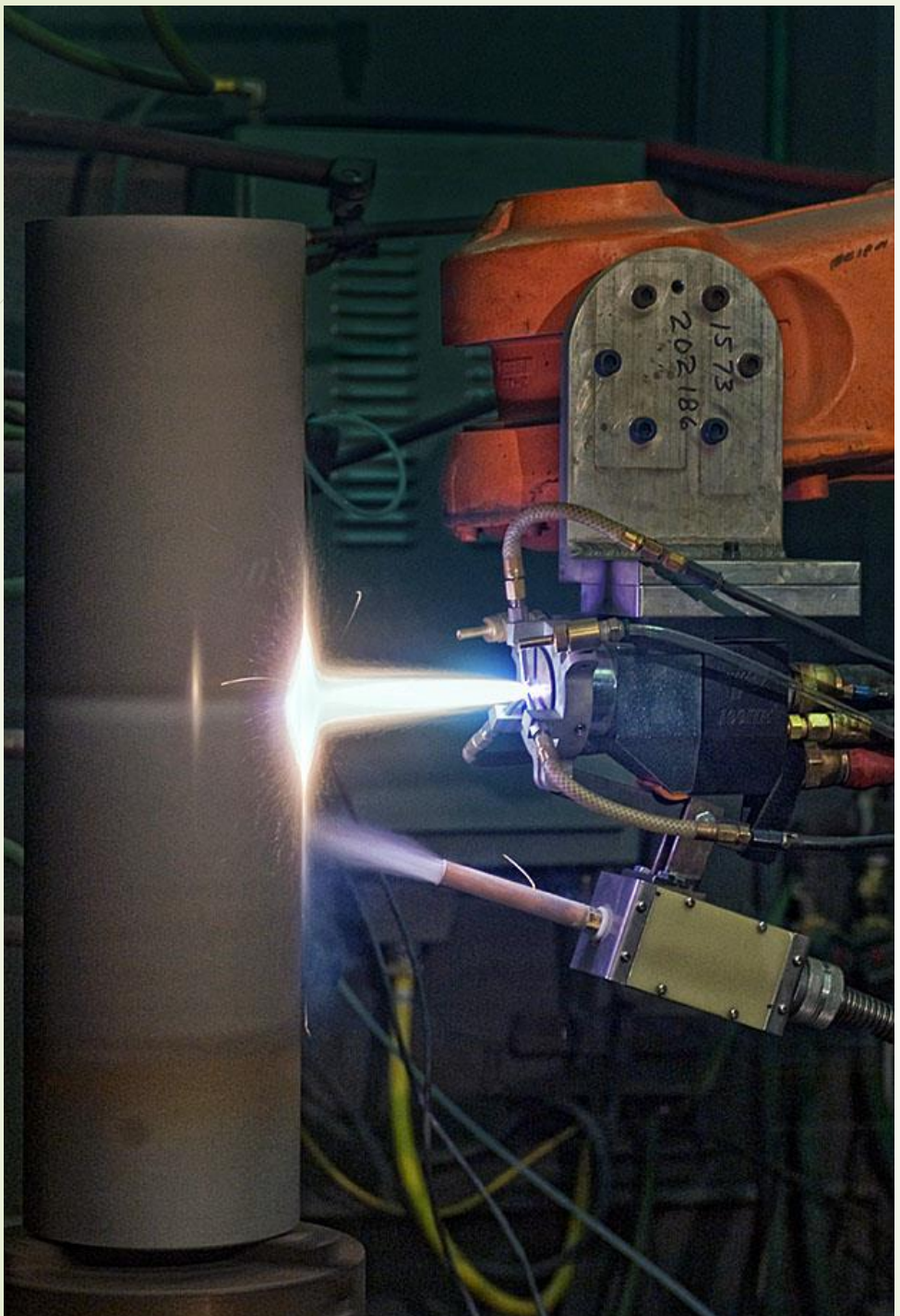


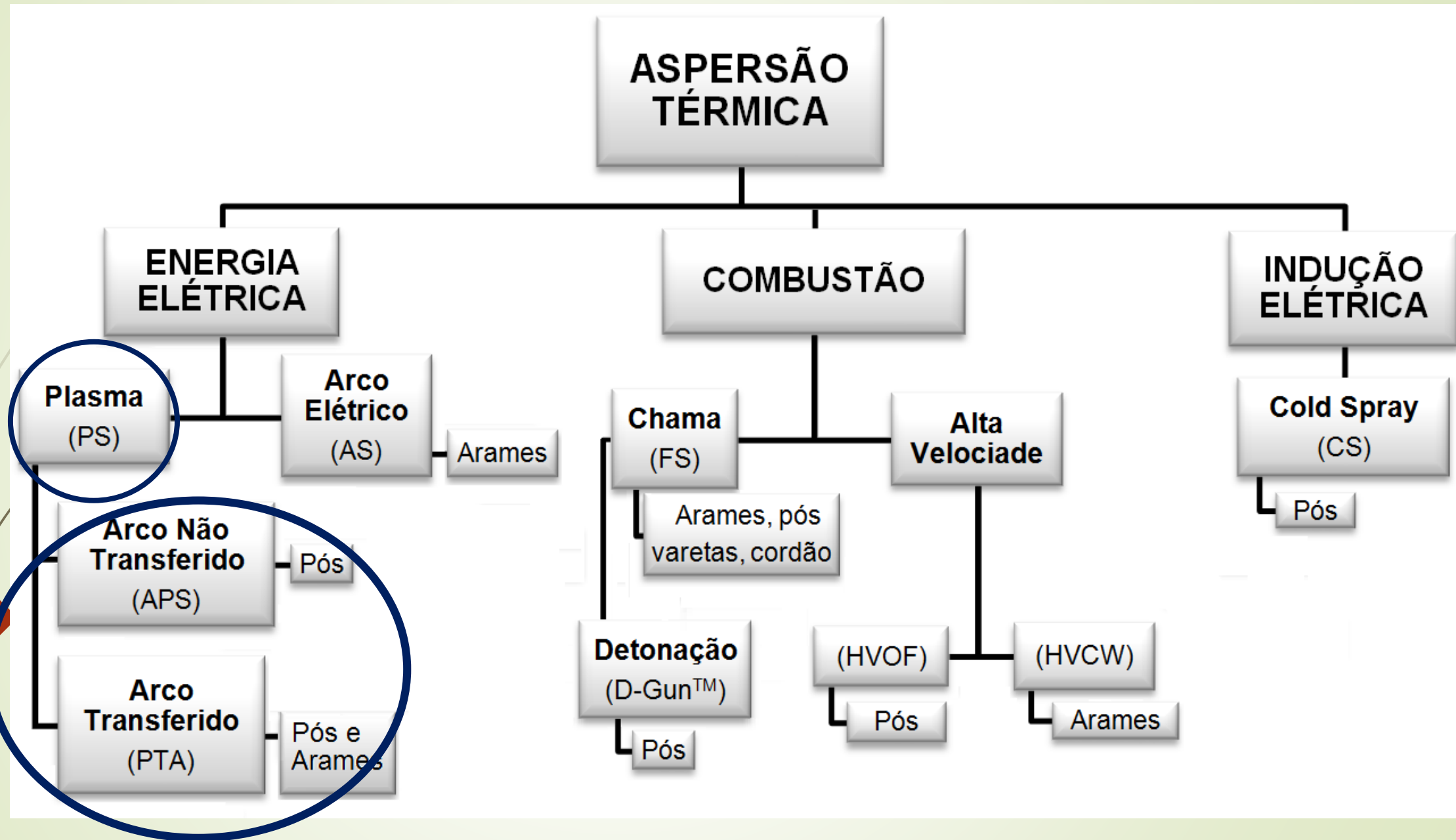






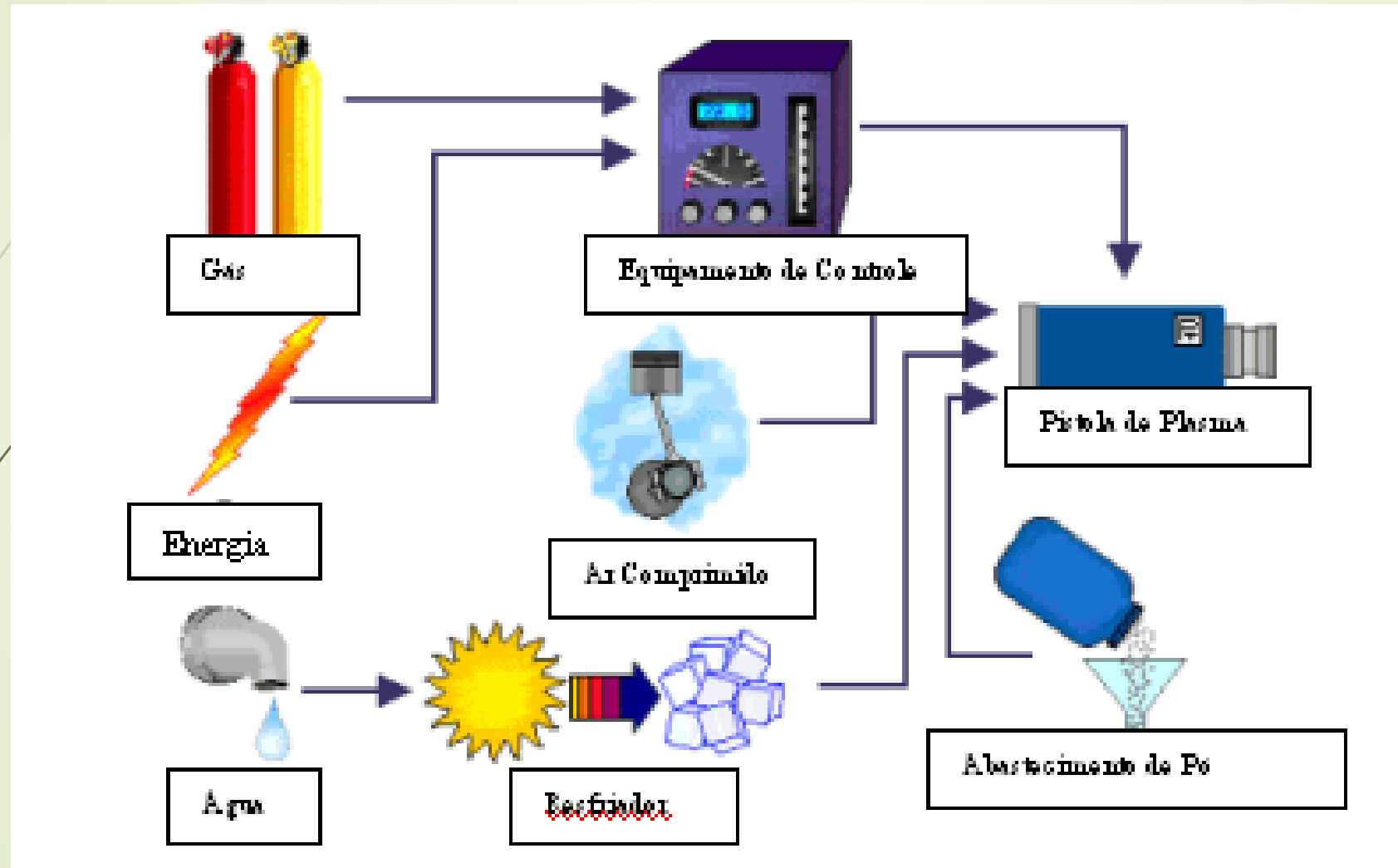


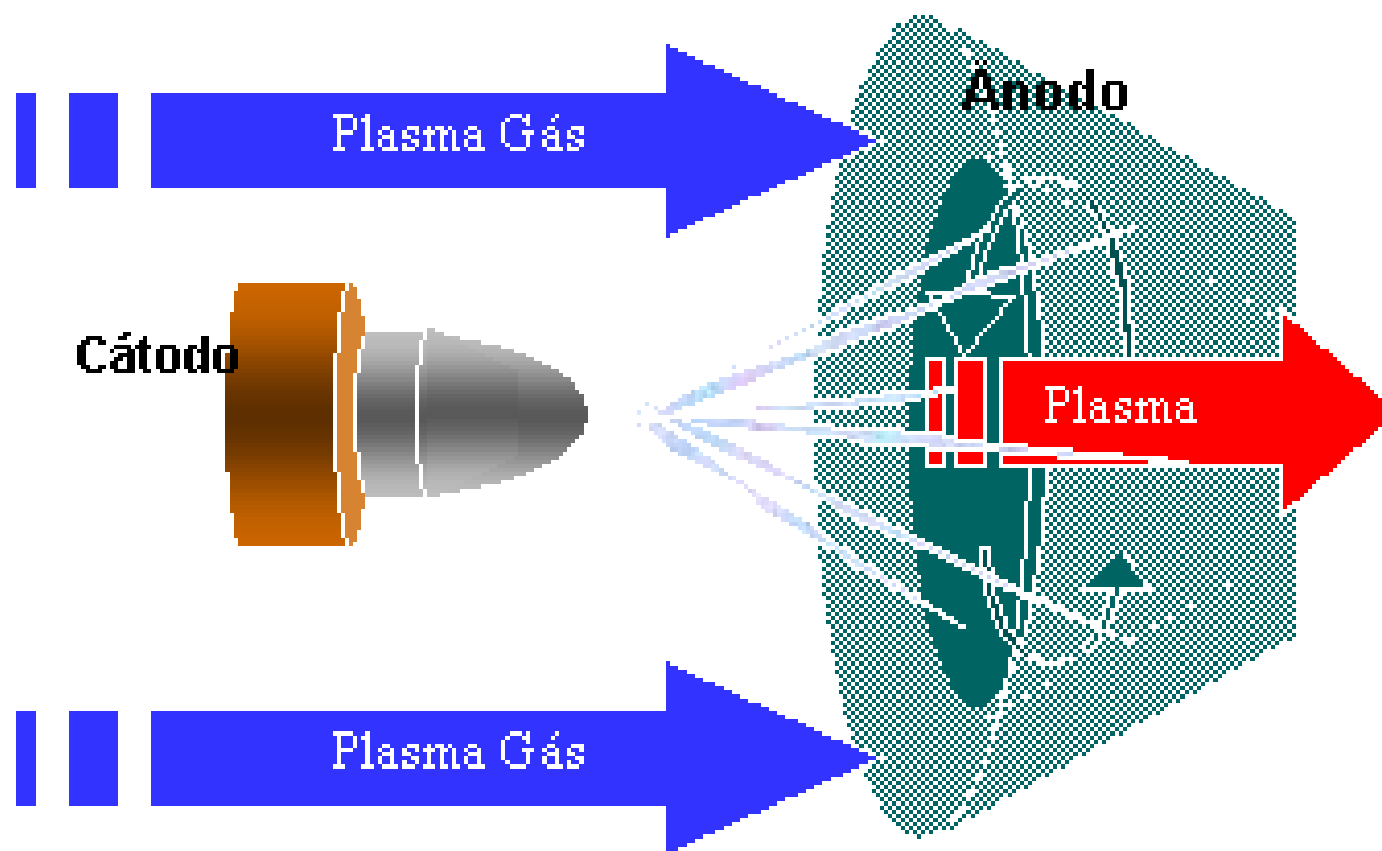




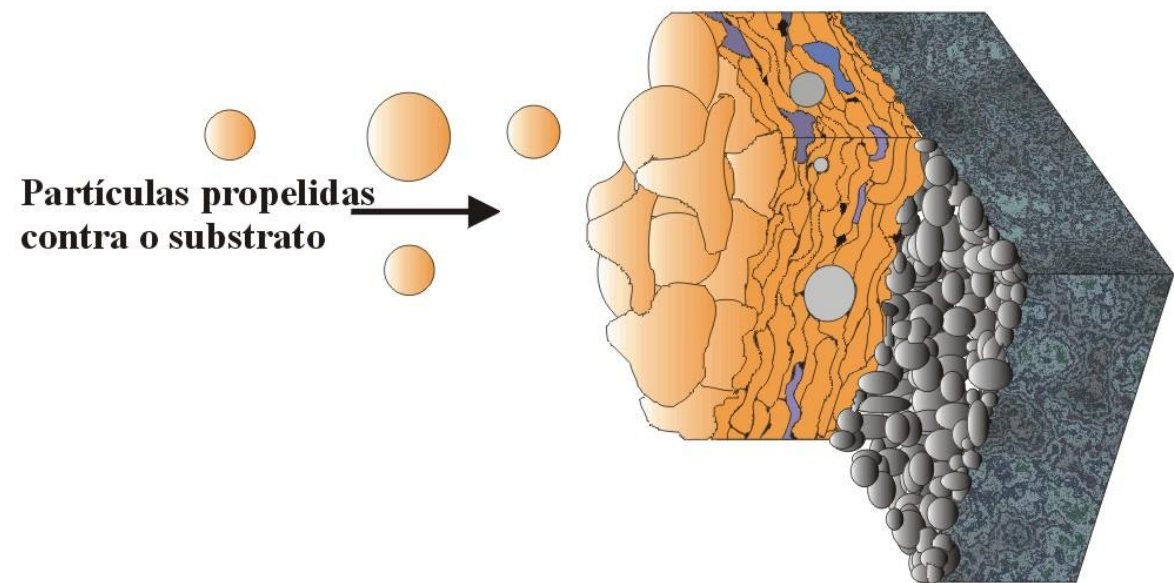
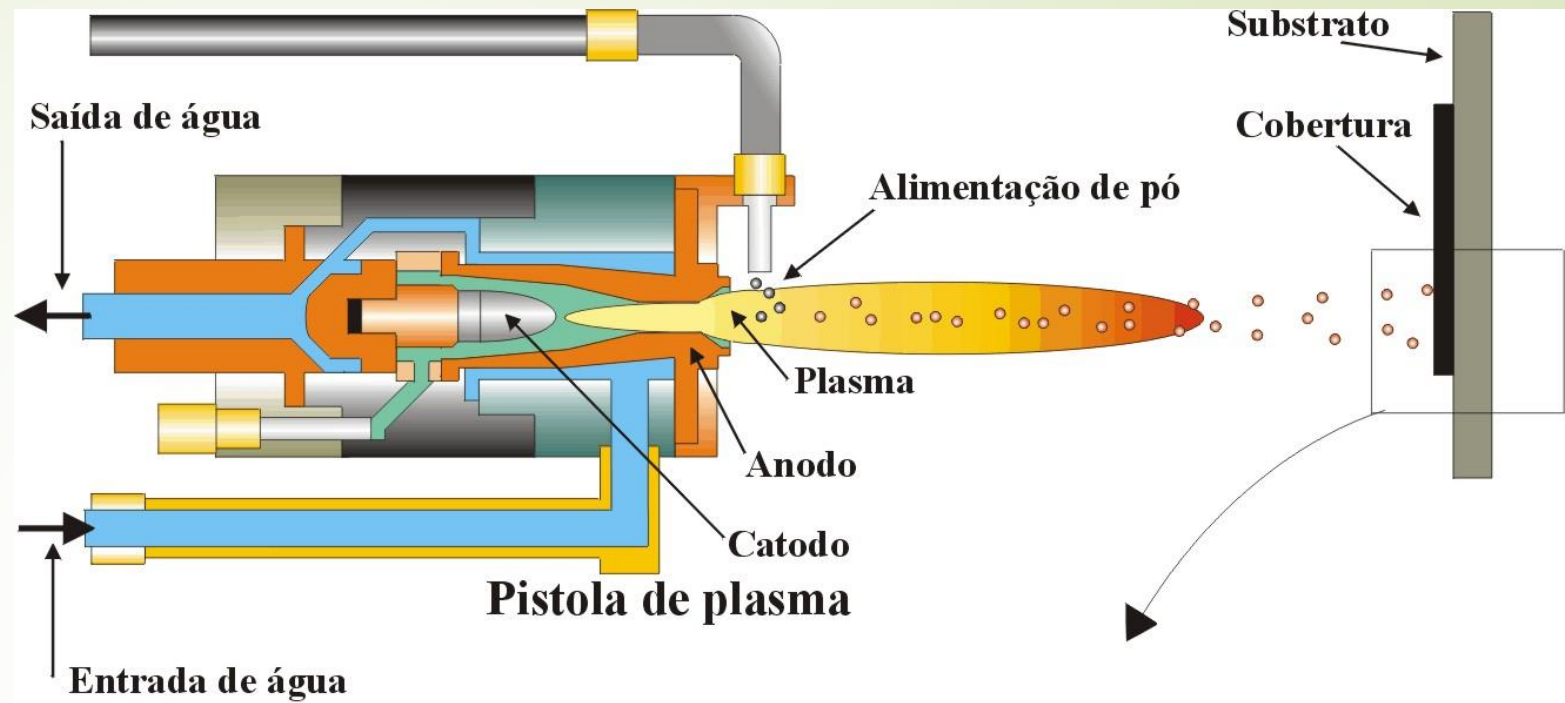


# Aspersão Térmica Plasma Spray

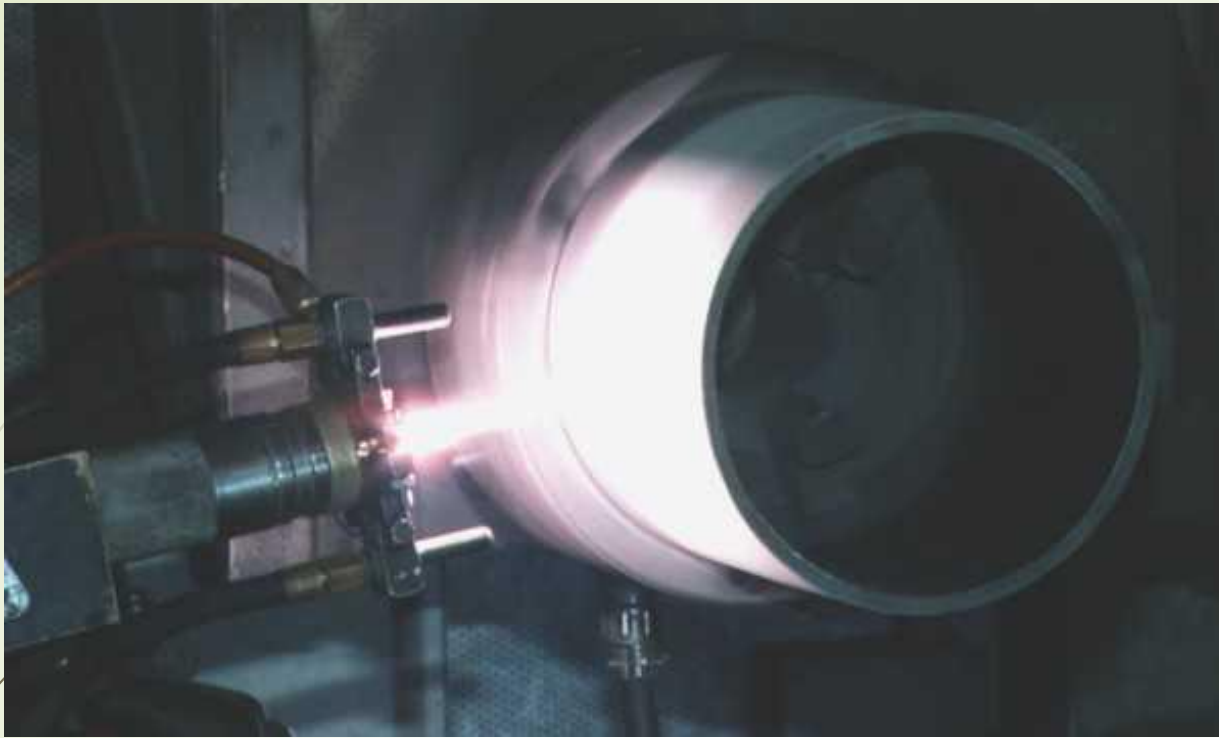




Esquema em corte de uma pistola para  
aspersão térmica a plasma spray



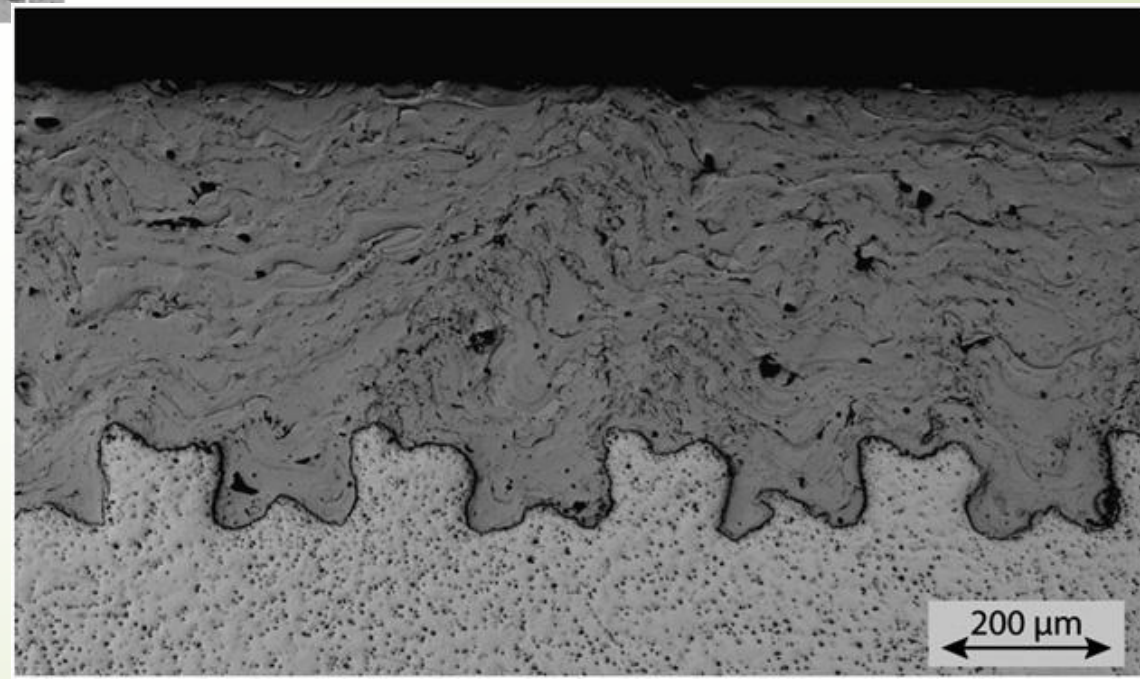
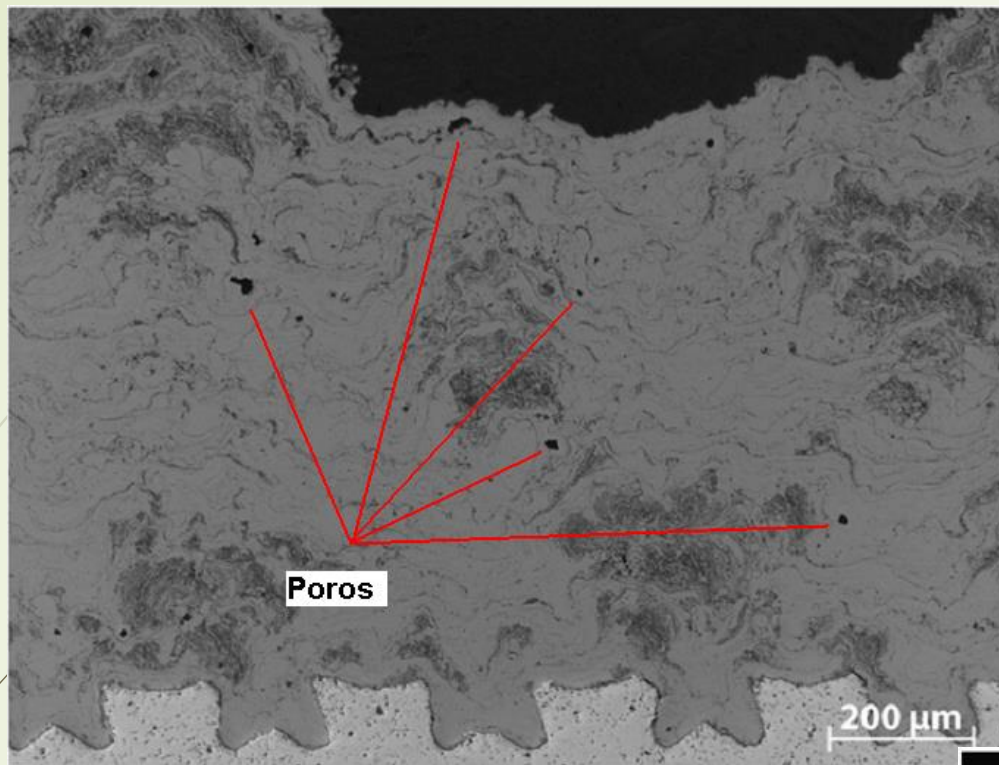
**Detalhe da cobertura**



Plasma.wmv



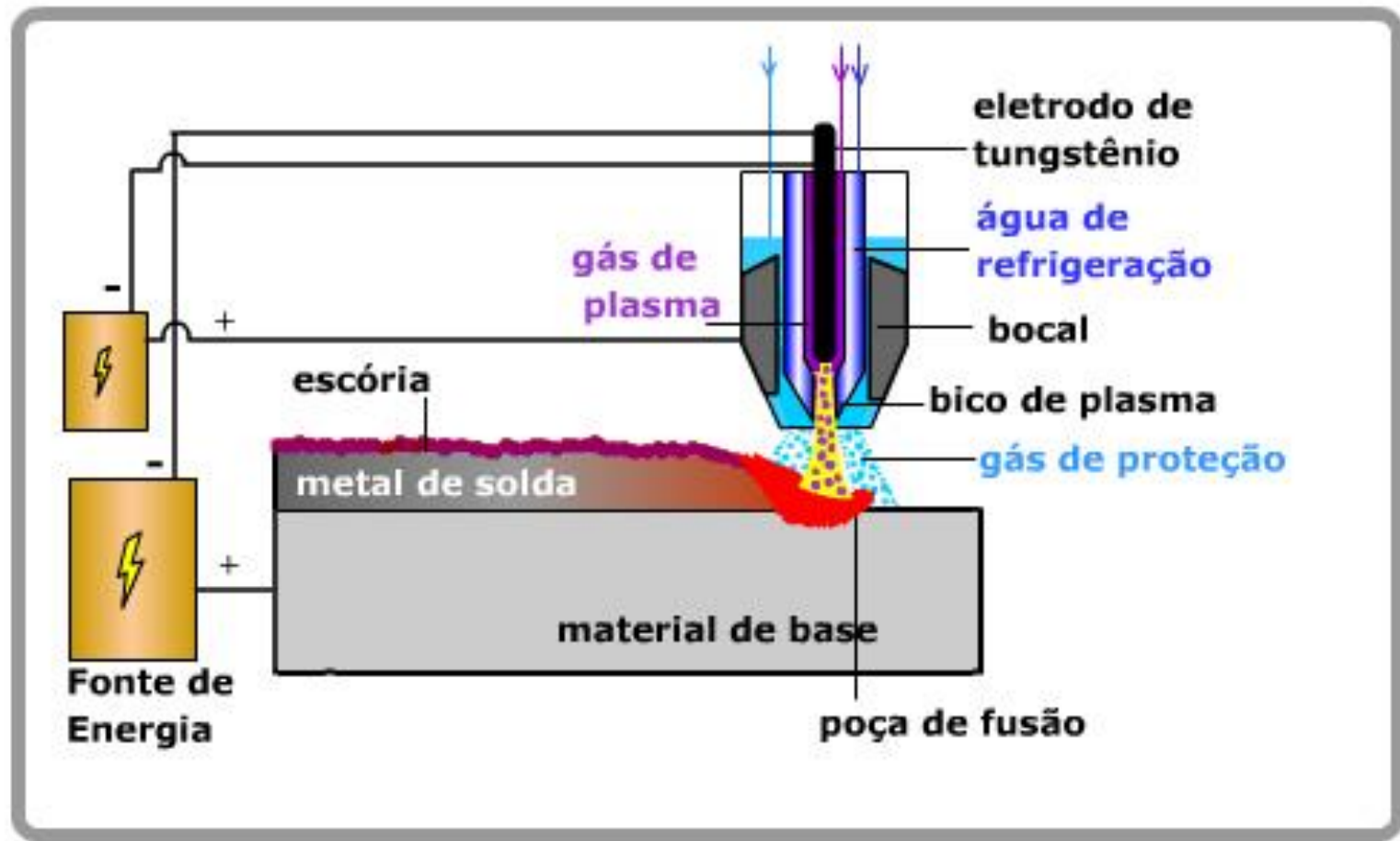




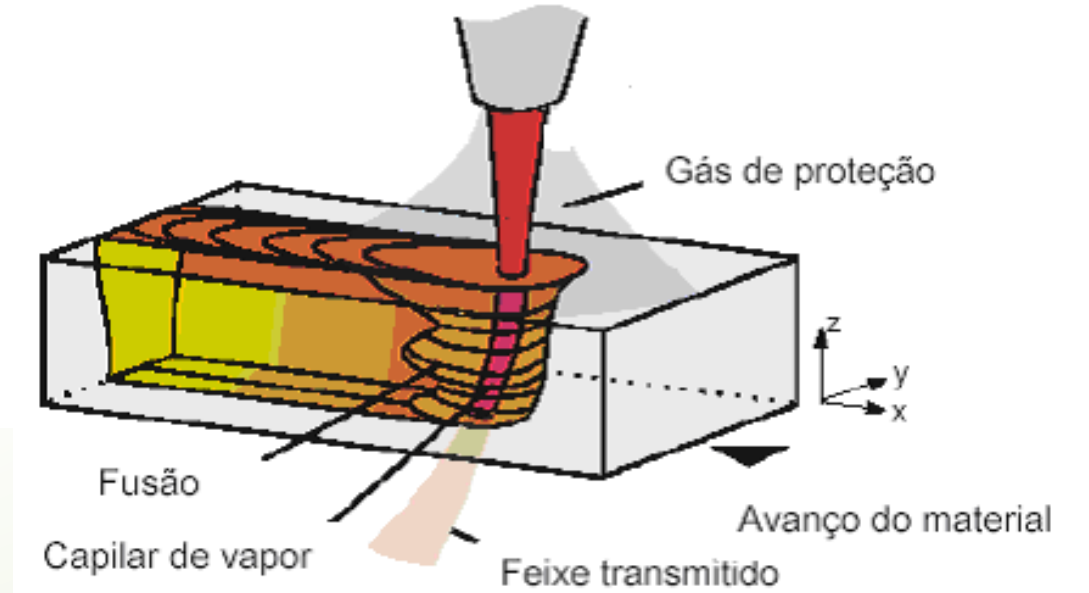
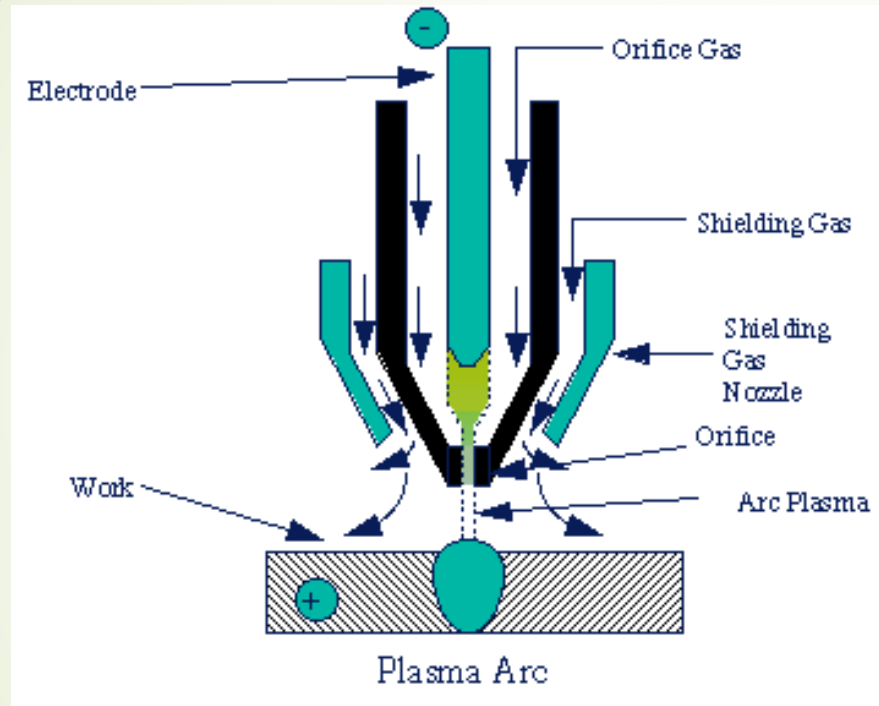
# Ligas Especiais

Composição % em peso	Formas disponíveis		Tipo Material
	pó	arame	
$\text{Cr}_3\text{C}_2$ 99,9	x		Carbeto de cromo
$\text{Cr}_3\text{C}_2$ 75; Ni 20; Cr 5	x		Carbeto de Cr em matriz de Ni Cr
Co 12; C 4; Fe 1; W resto	x		Carbeto de W em matriz de Co
$\text{Al}_2\text{O}_3$ 98,0; $\text{SiO}_2$ 0,5; outros 0,5	x		Cerâmica a base de $\text{Al}_2\text{O}_3$ branco
$\text{Al}_2\text{O}_3$ 94,0; $\text{TiO}_2$ 2,5; $\text{SiO}_2$ 2,0; $\text{FeO}_3$ 1,0; outros resto	x	vareta	Cerâmica a base de $\text{Al}_2\text{O}_3$ cinza
$\text{Cr}_2\text{O}_3$ 98	x		Cerâmica a base de óxido de cromo
$\text{Al}_2\text{O}_3$ 87; $\text{TiO}_2$ 13	x		Oxi-cerâmico a base de óxido de Al.
$\text{TiO}_2$ 99,0	x		Oxi-cerâmico a base de dióxido de Ti
MgO 24; $\text{ZrO}_2$ resto	x		Oxi- cerâmico a base de zirconato de Mg
Cr 10; B 2,5; Fe 2,5; Si 2,5; C 0,15; Ni resto	x	Ø 1/8"	Auto fluxante de media dureza
Cr 17; Fe 4,0; Si 4,0; B 3,5; C 1,0; Ni resto	x	Ø 1/8"	Auto fluxante de alta dureza

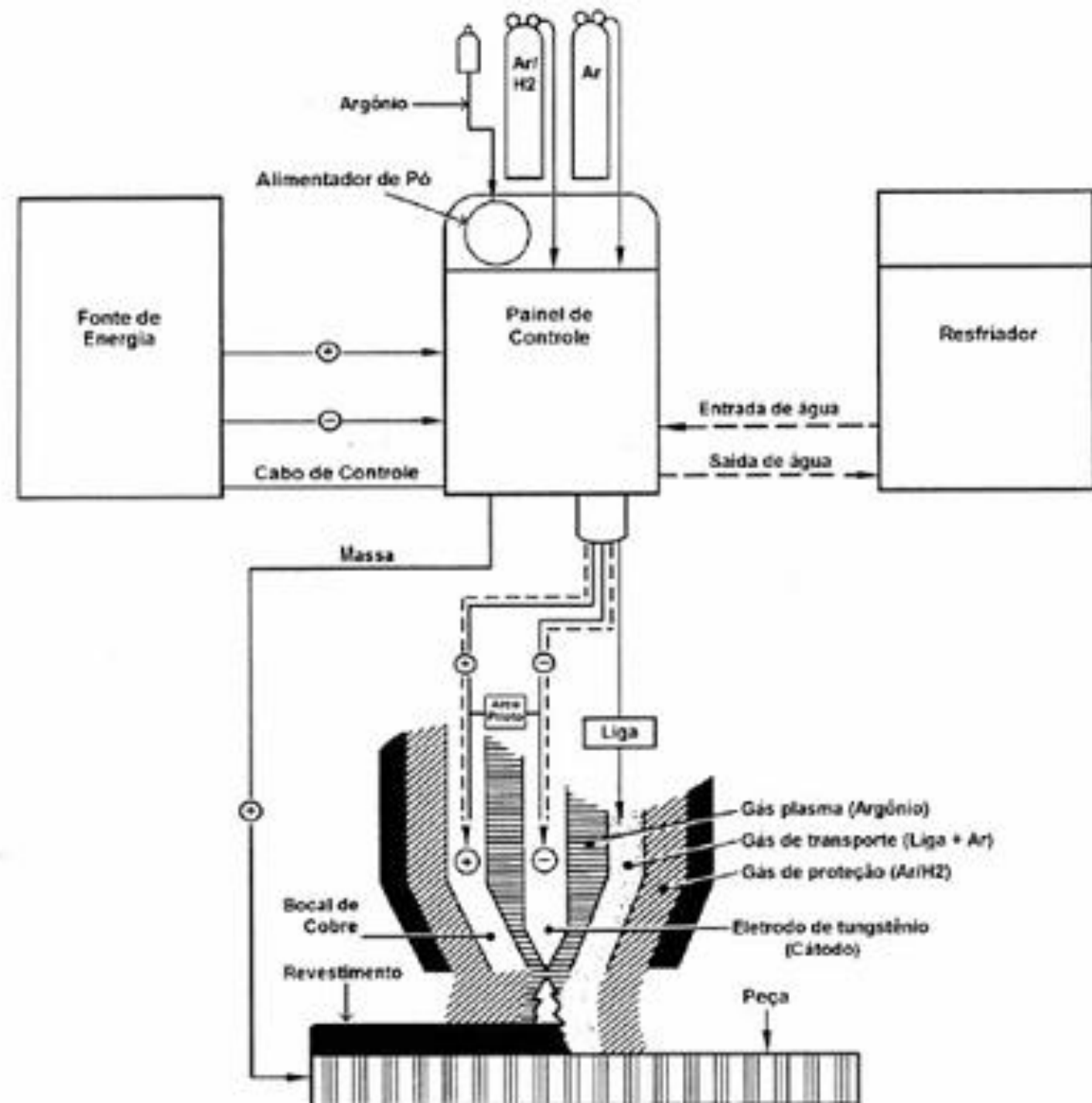
# Processo Plasma PTA

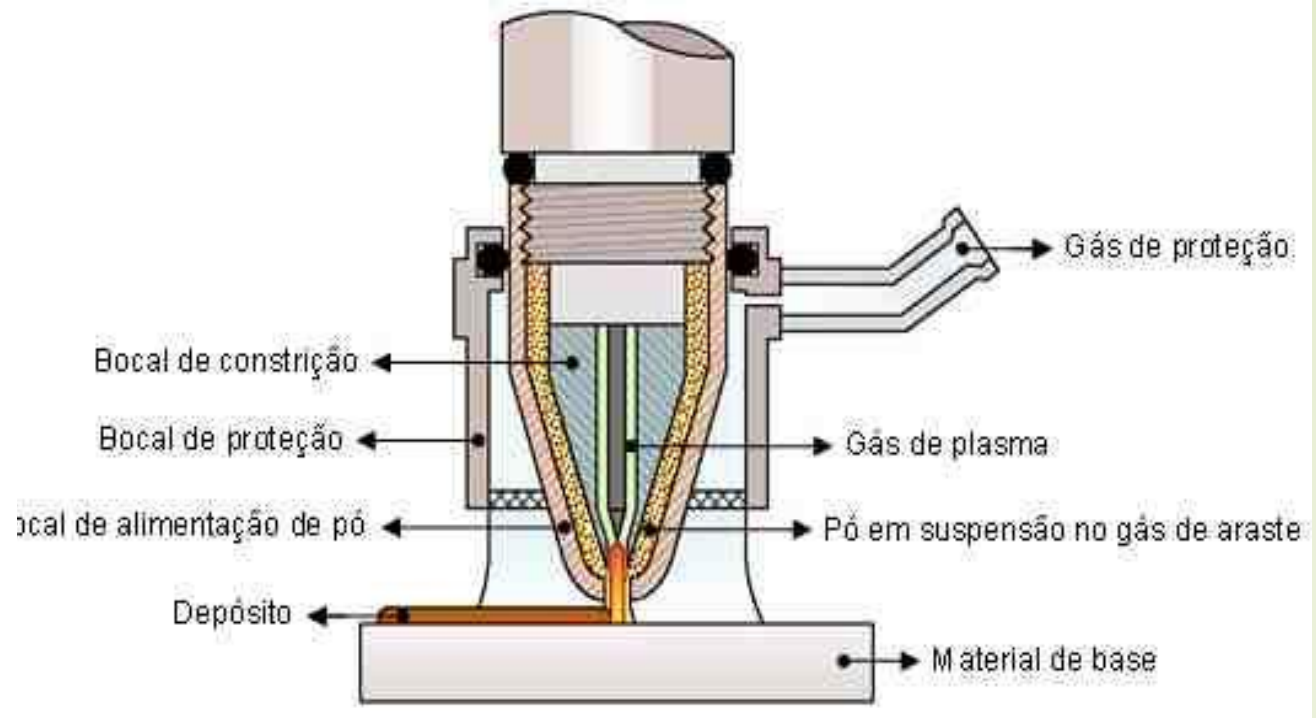


# Processo Plasma PTA





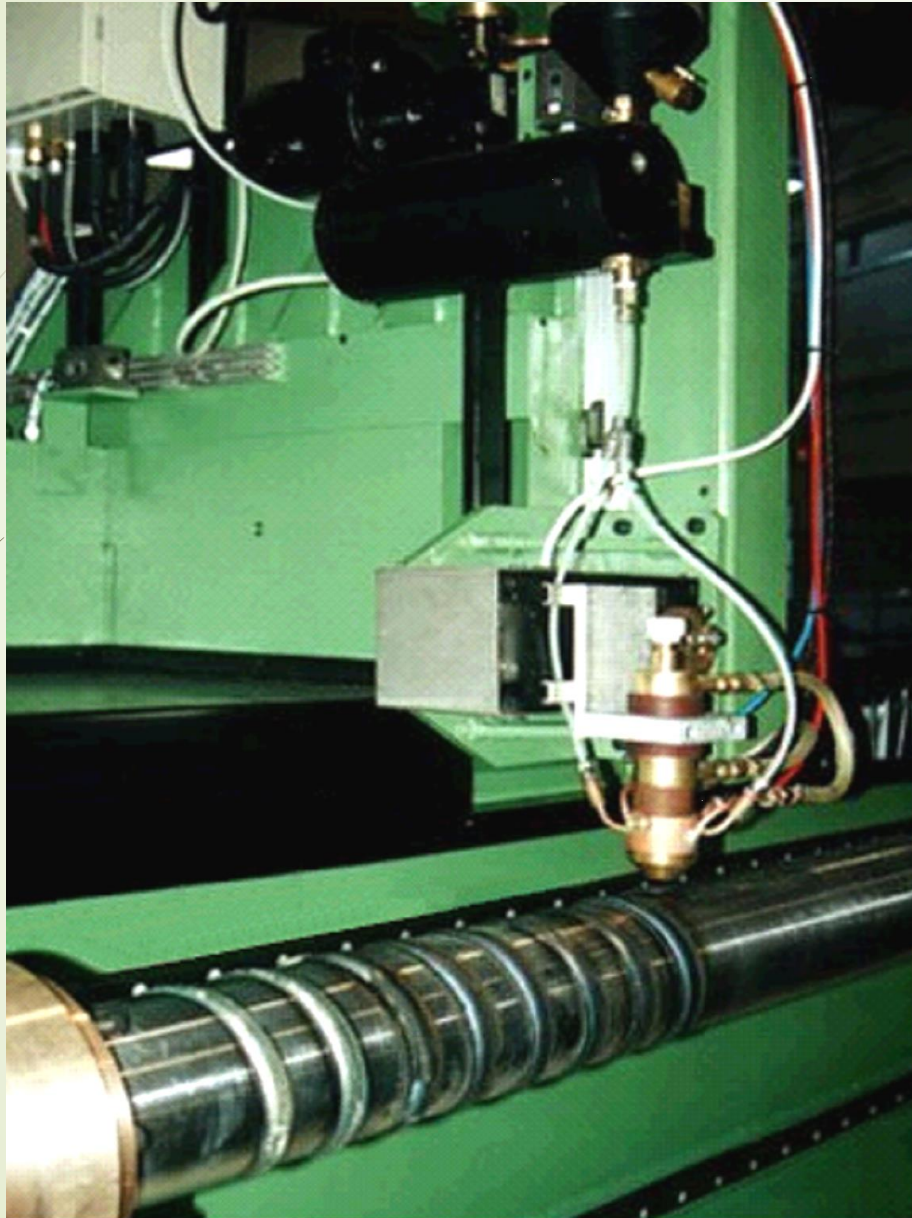


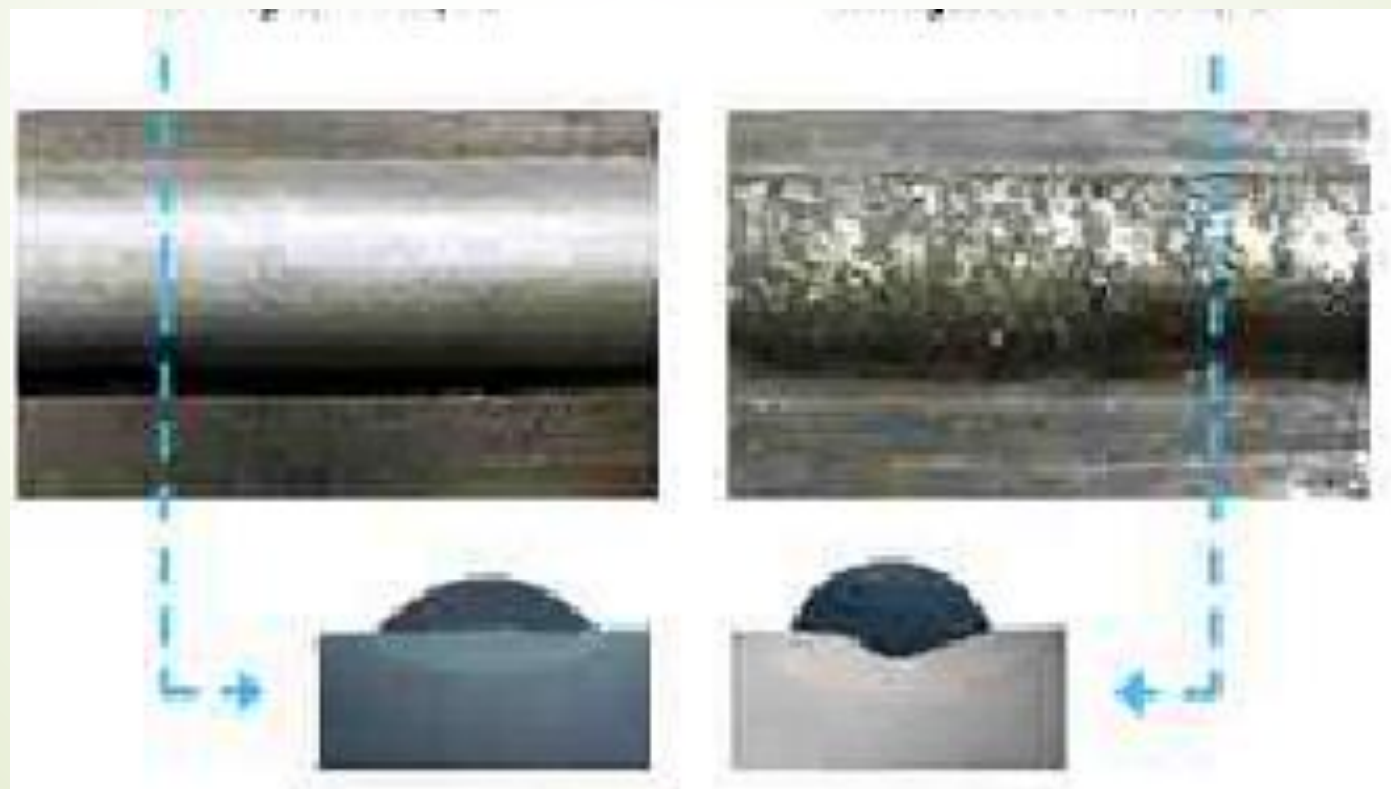
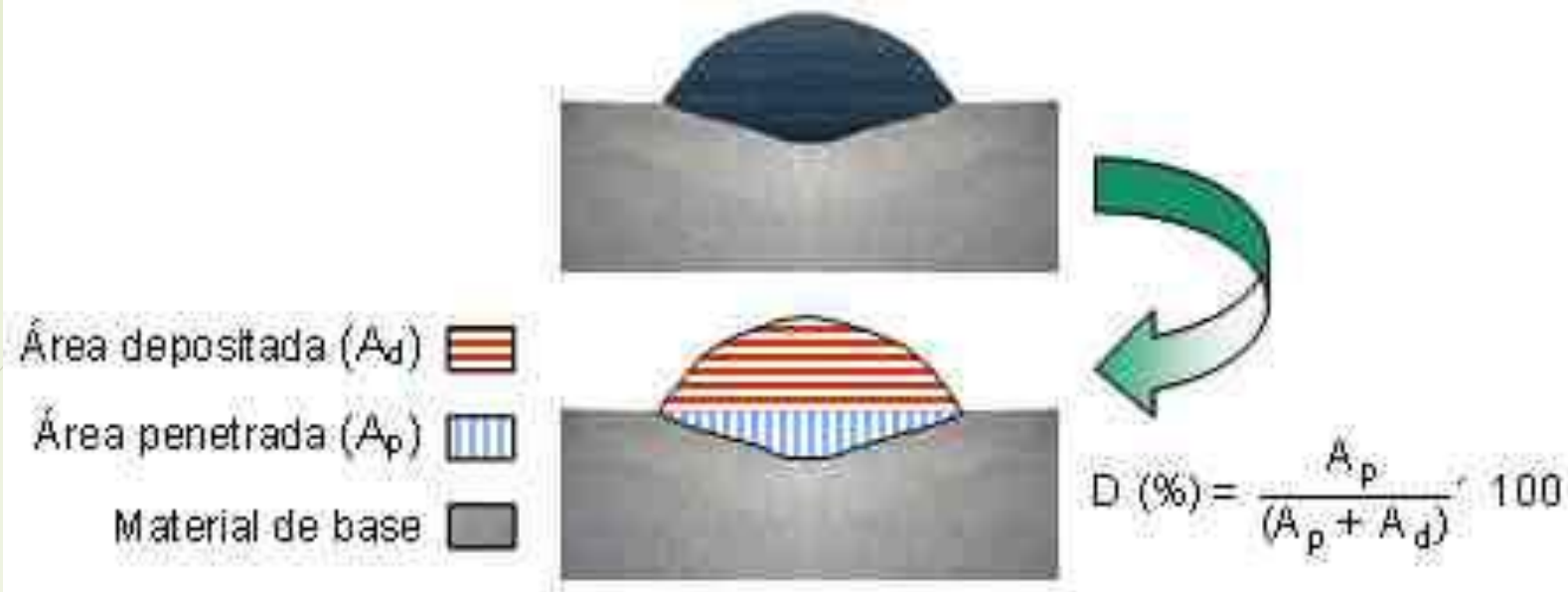


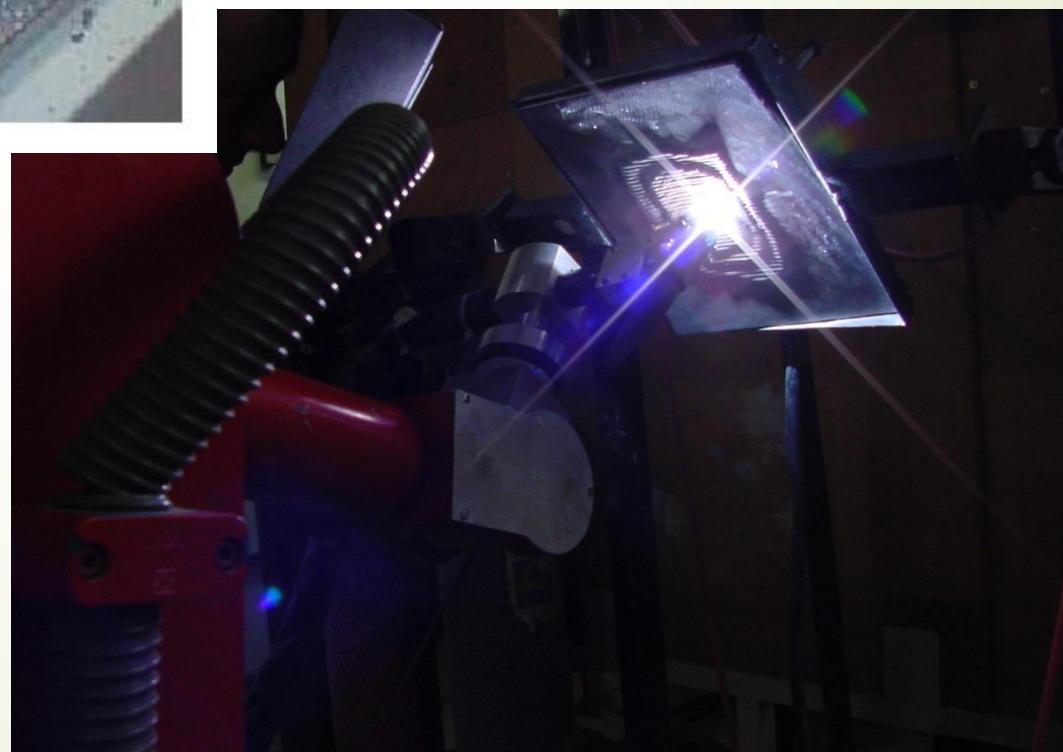
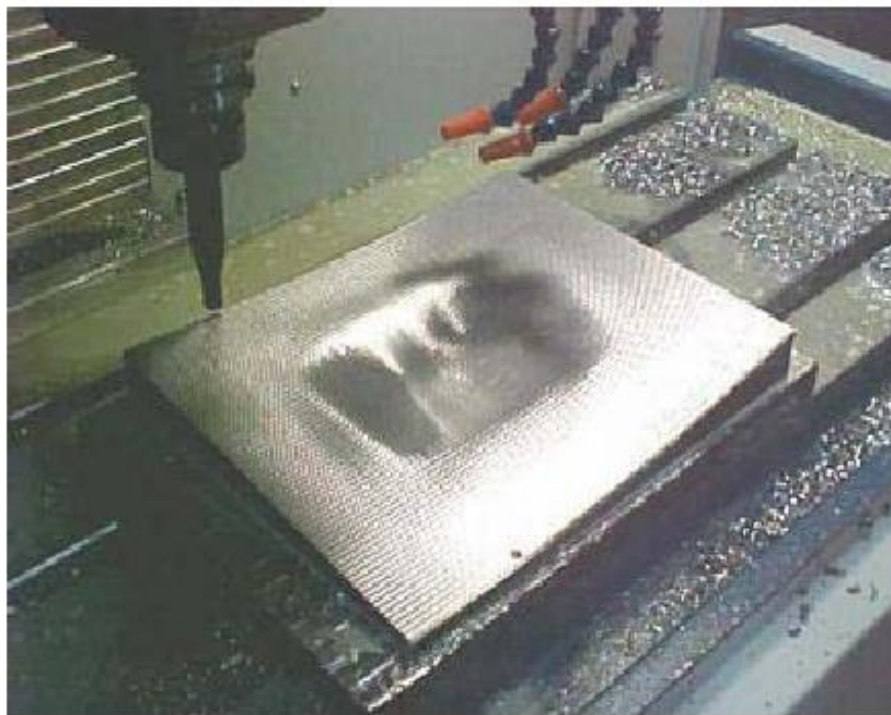










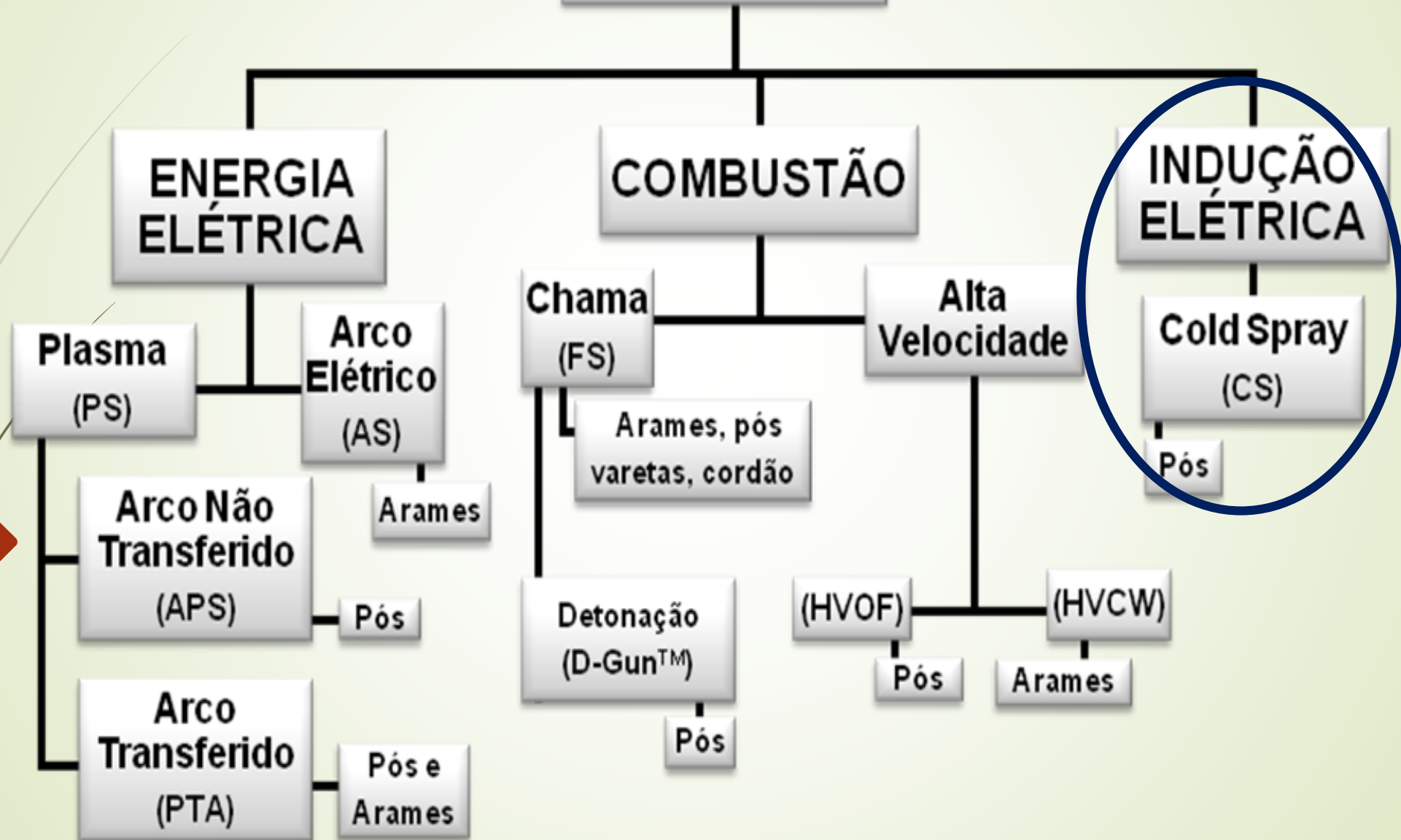


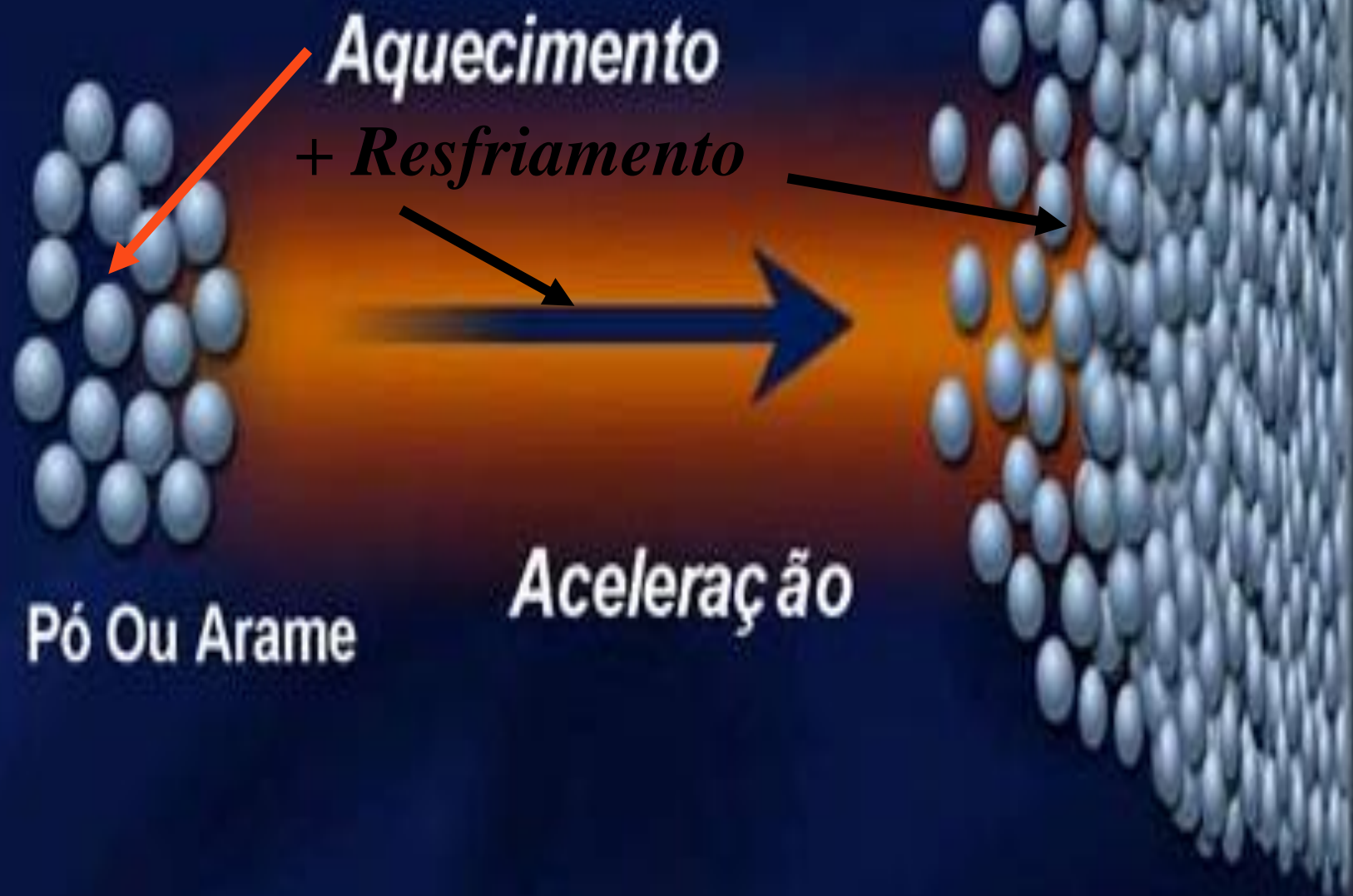




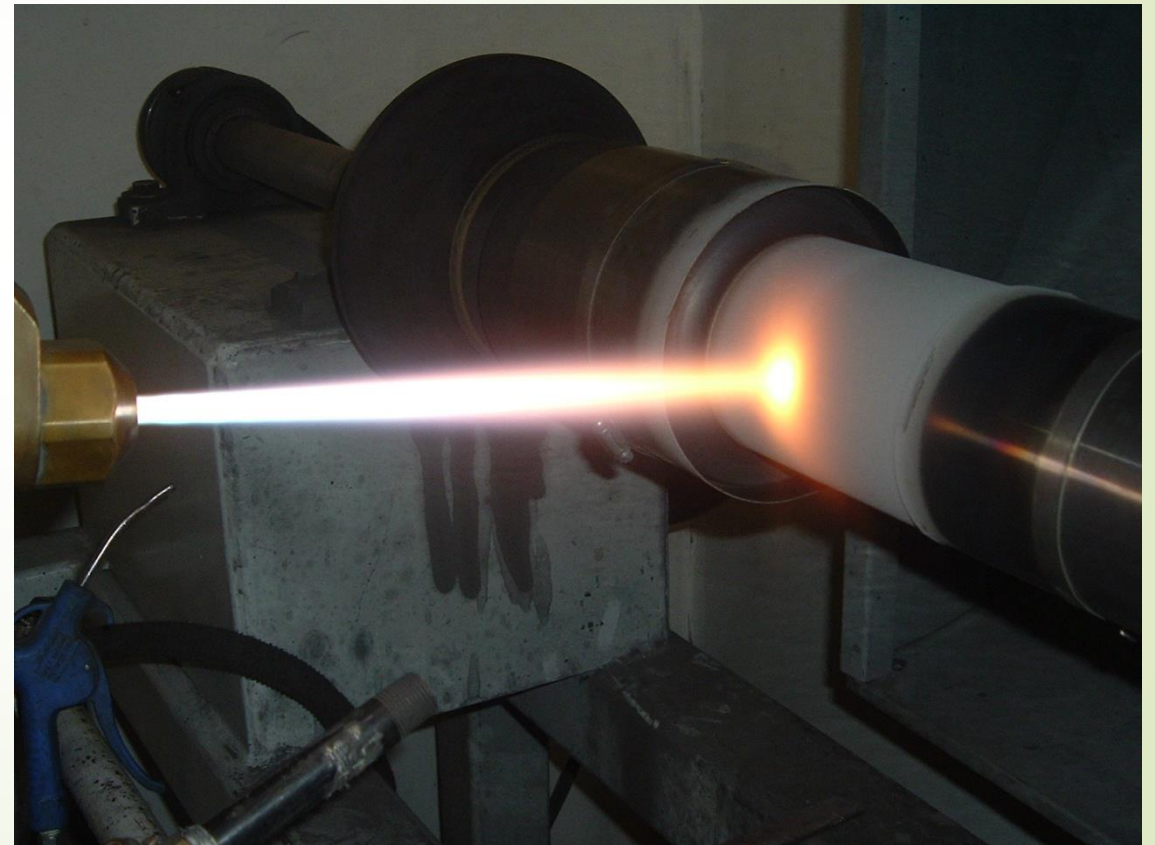


# ASPERSÃO TÉRMICA





# Aplicações HVOF





# COLD SPRAY

## PROCESSO

- Projeção de partículas metálicas e não-metálicas contra um substrato;
- Utiliza gás aquecido (100°C a 600°C);
- Utiliza pressões de 15 a 35 bar;
- Velocidade Crítica;
- Tipos de Gases;
- Tipos de Bocais;
- Tamanhos de Partículas;
- Distância do Bocal ao Substrato

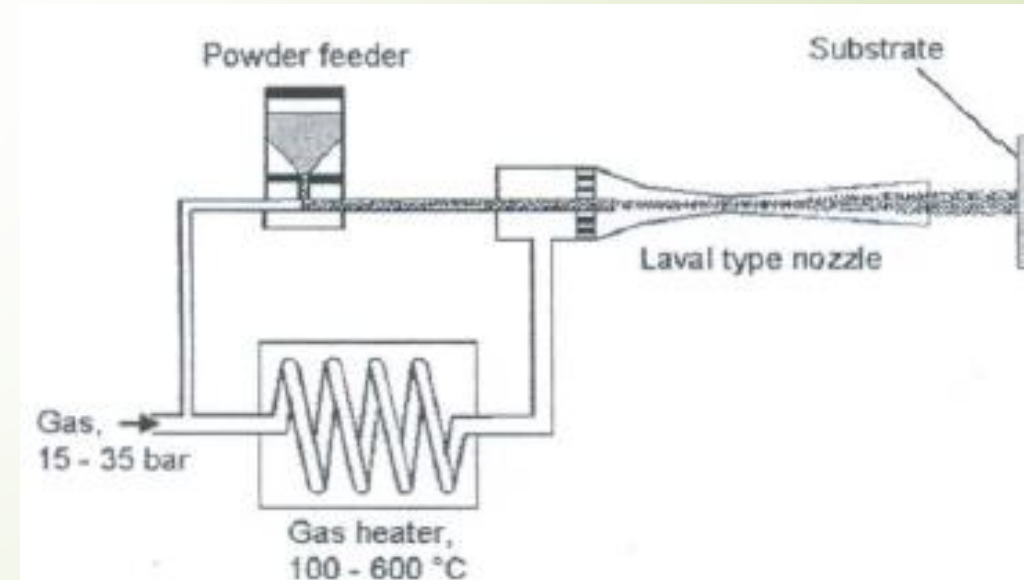
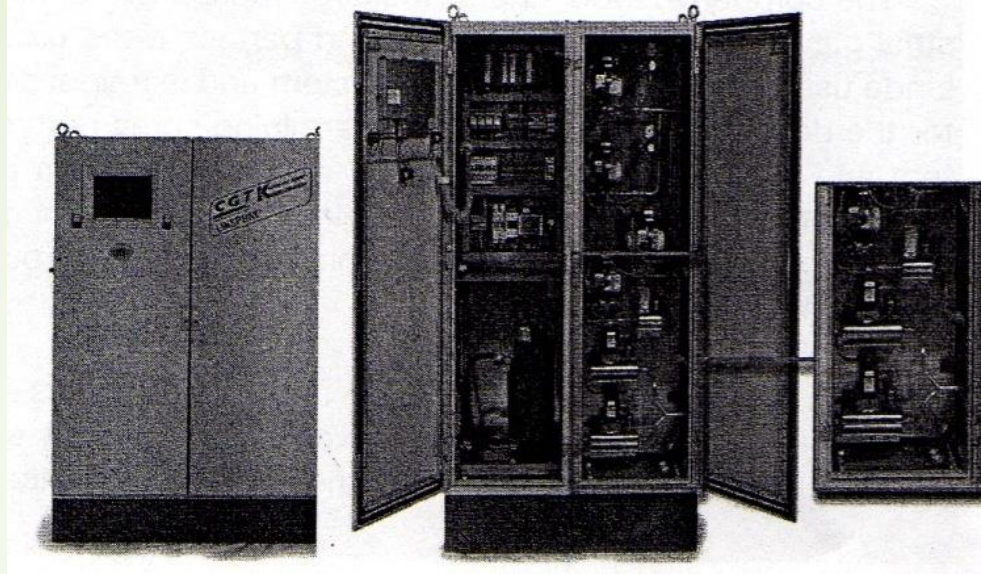


Abb. 1 Prinzip des Kaltgasspritzens.

Figure 1 Schematic of the cold spray process.



## CONTROL UNIT



# 1 – Unidade de controle

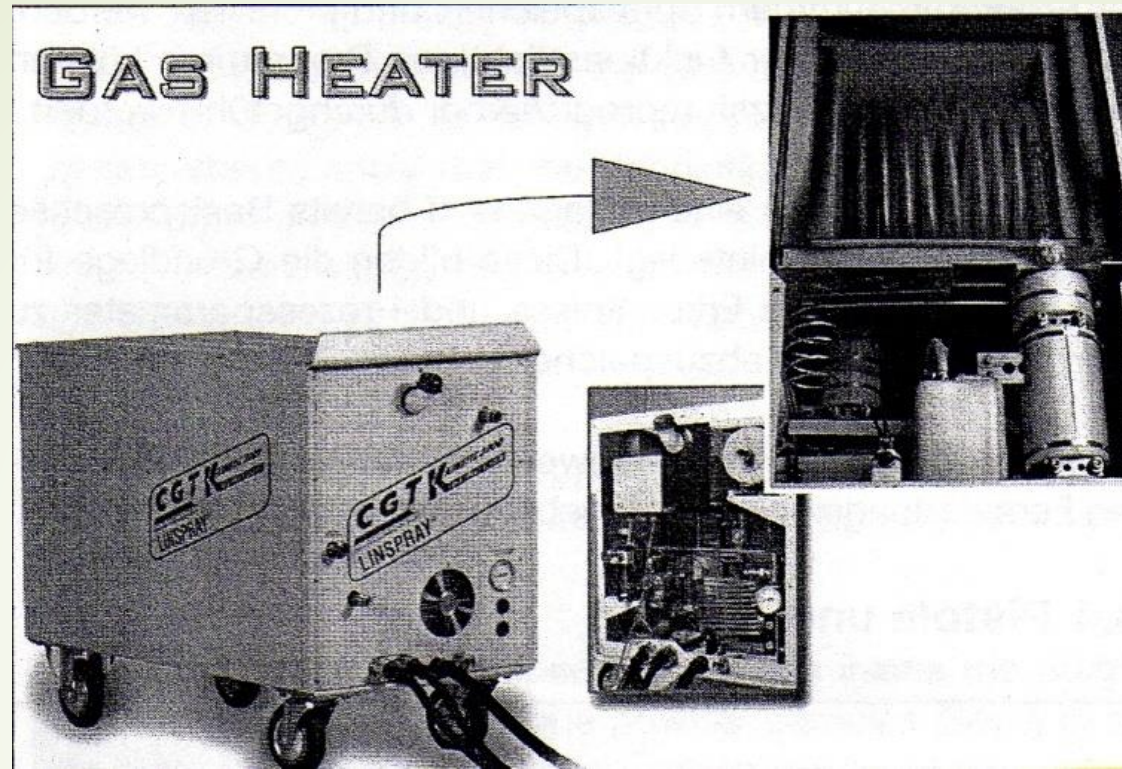
Todos os componentes elétricos

Suprimento de gás e unidades reguladoras

Mais de 20kW de potencia

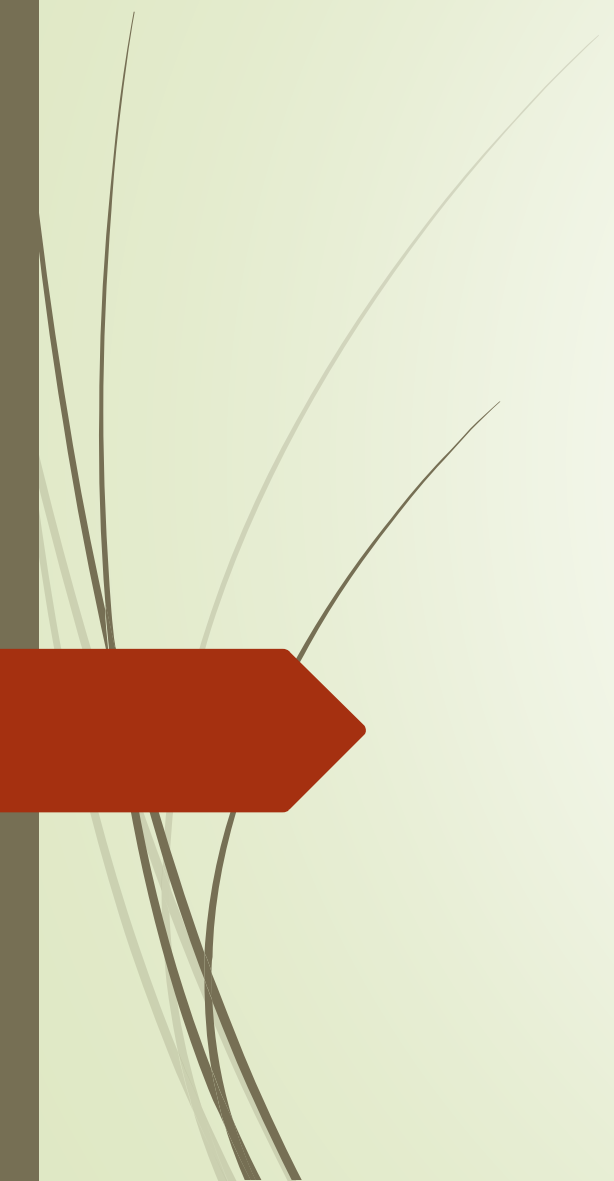
0 a 800°C em 1-2 minutos

Resistência a 50 bar de pressão

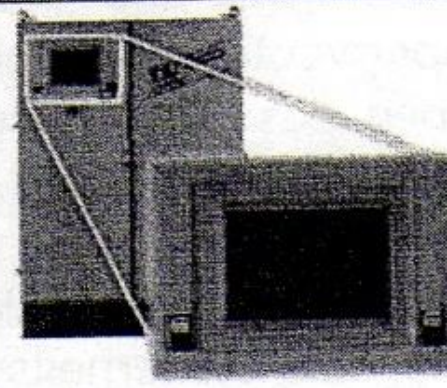
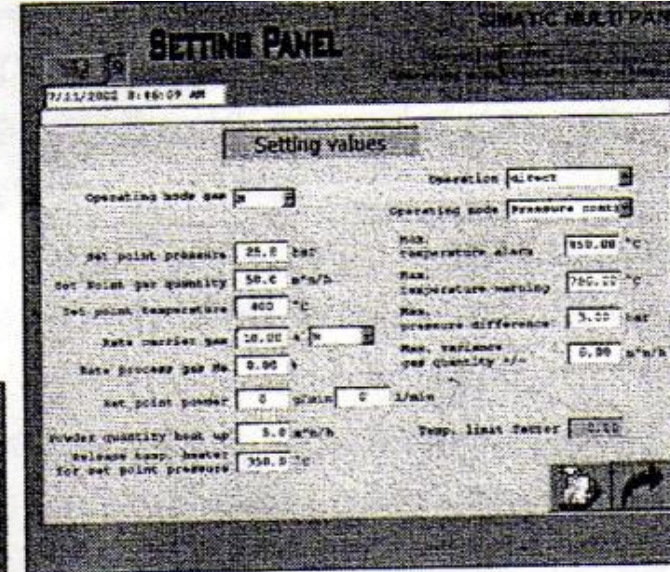
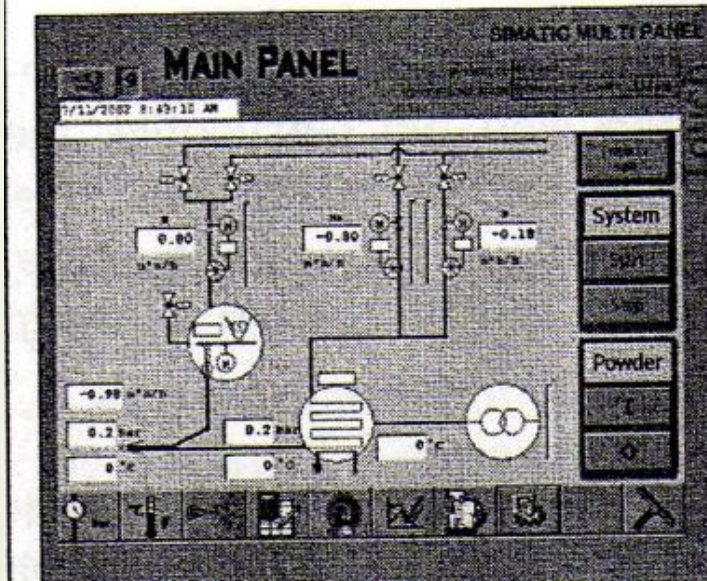


2 – Aquecedor





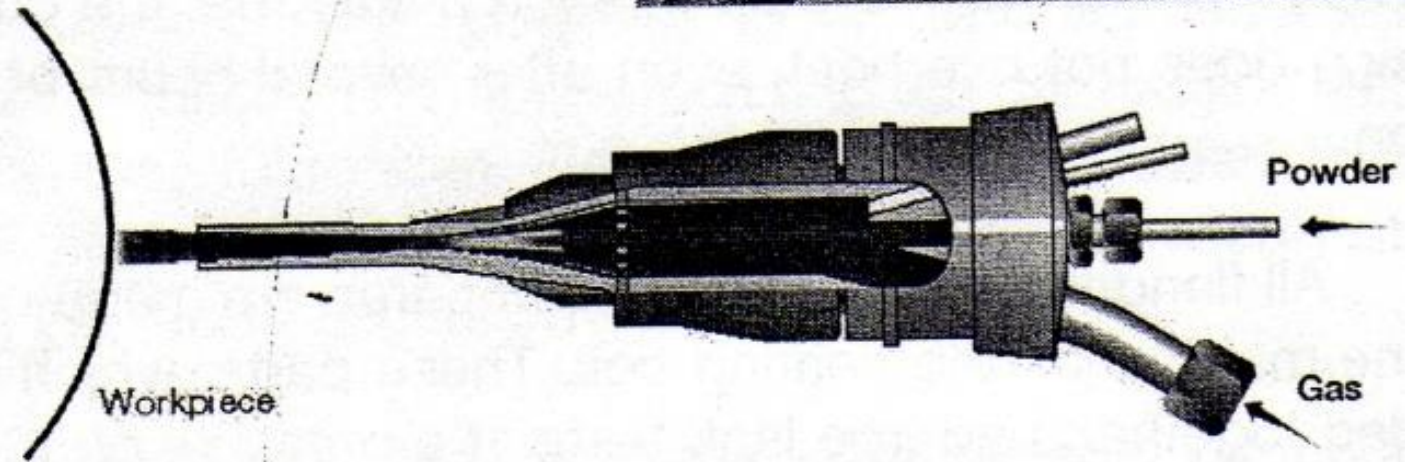
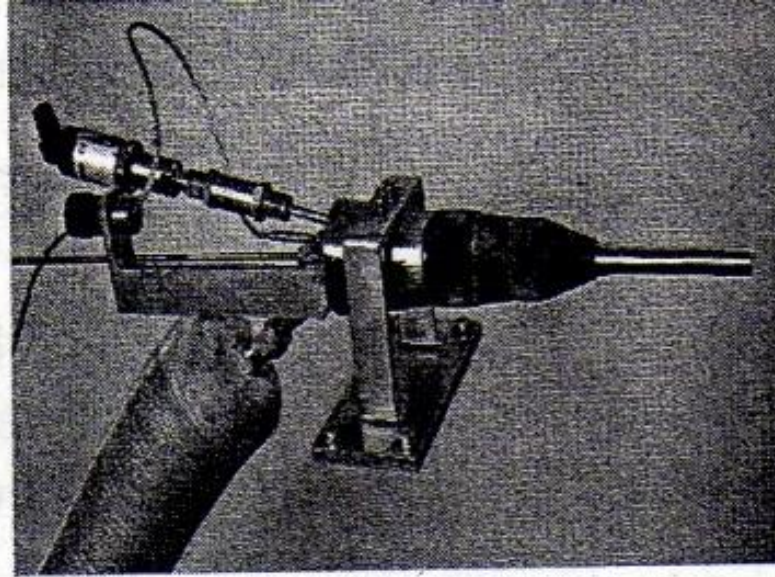
# OPERATING INTERFACE



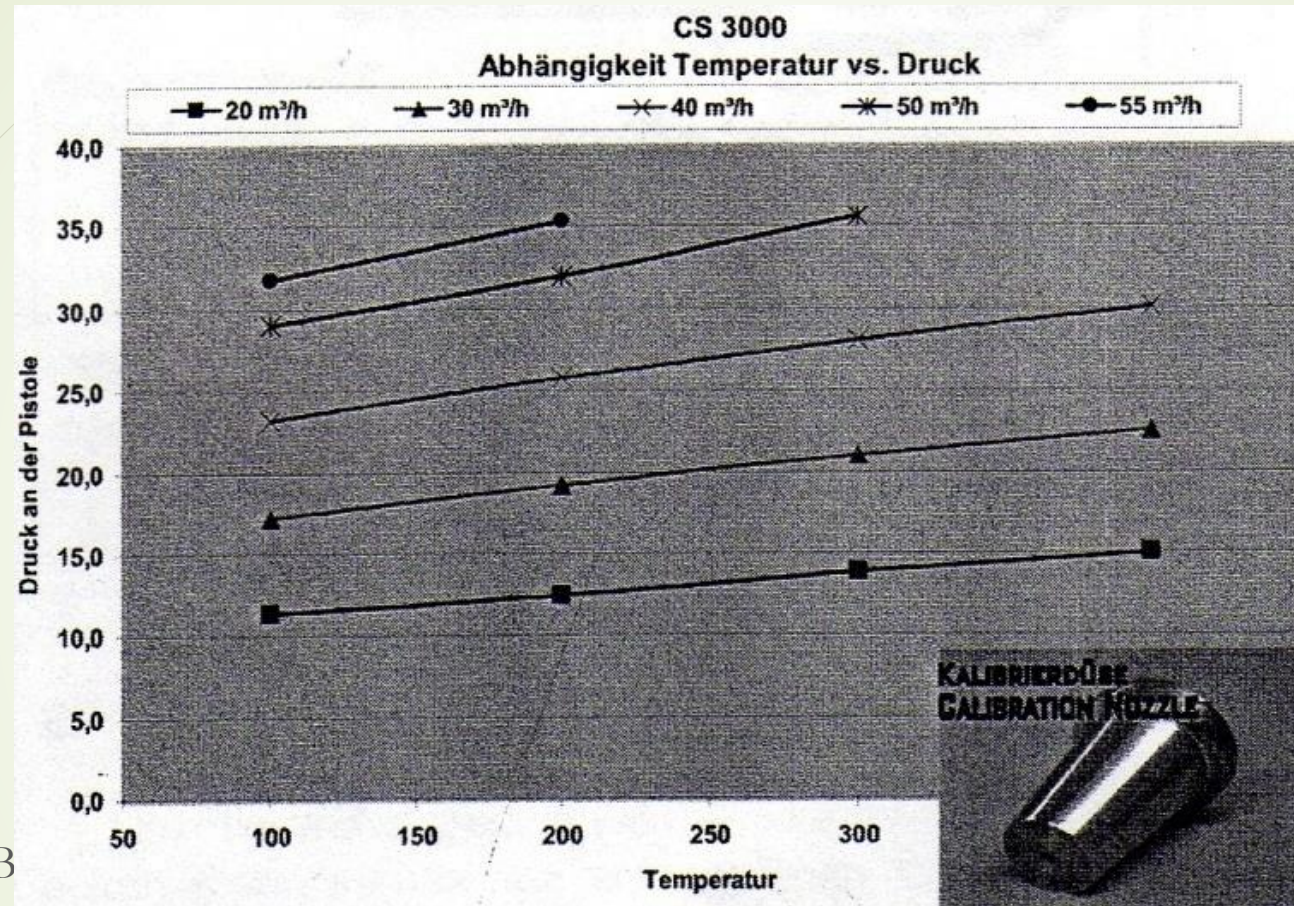
3 – Interface operacional



## COLD SPRAY NOZZLE







# Pistola e Bocal

Material a ser depositado e injetado na forma de pó

Carboneto de Tungstênio

Bocal especial para pó de cobre, aumentando de até 85% a eficiência

Um gás comprimido e aquecido, normalmente nitrogênio ou Hélio, ou ainda uma mistura entre eles

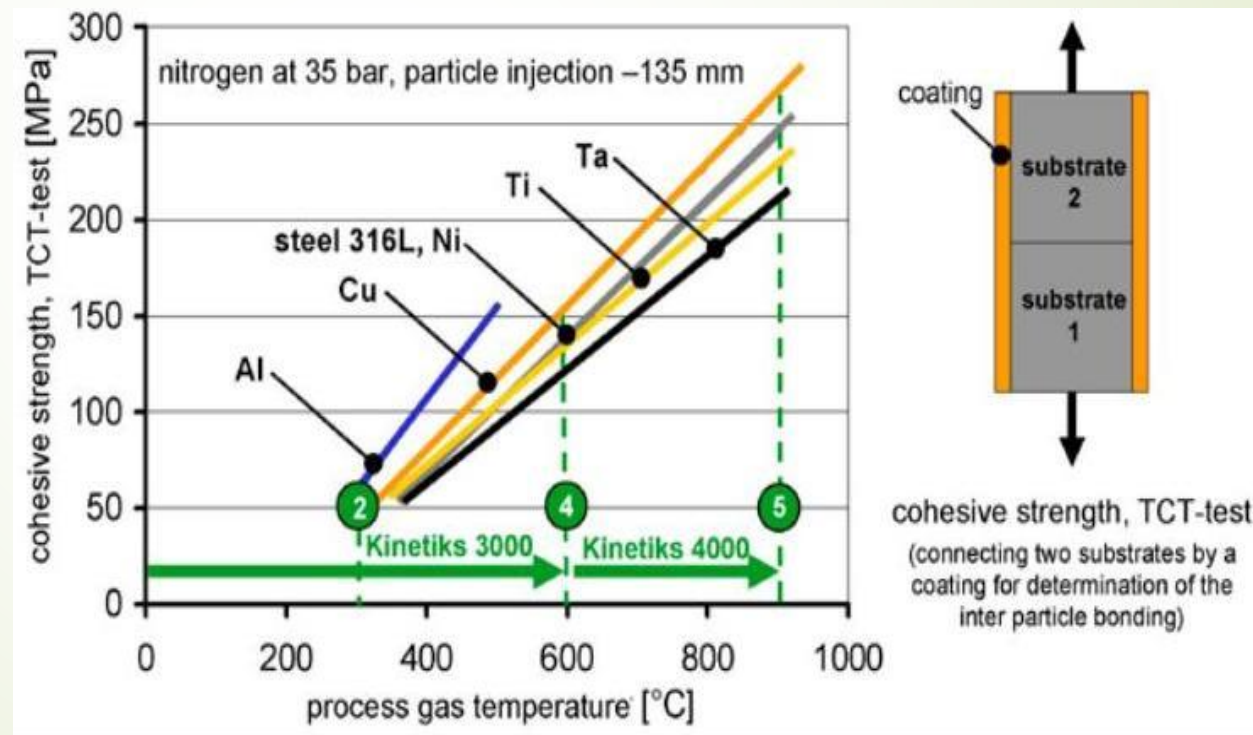


# COLD SPRAY

## O REVESTIMENTO

- Eficiência da deposição em mais de 90%.
- Baixa carga térmica (substrato 50 - 250°C, material de spray 50 - 900°C).
- Custo aproximado 50 - 150 €/h. Taxa de deposição 15kg/h.
- Tensão residual no revestimento provocada pela deformação.
- Em geral boas propriedades mecânicas.

Ensaio de tração.  
Verificação da  
coesividade do  
revestimento aplicado.



Linha de tendência, ensaio de resistência do revestimento (ensaio TCT).

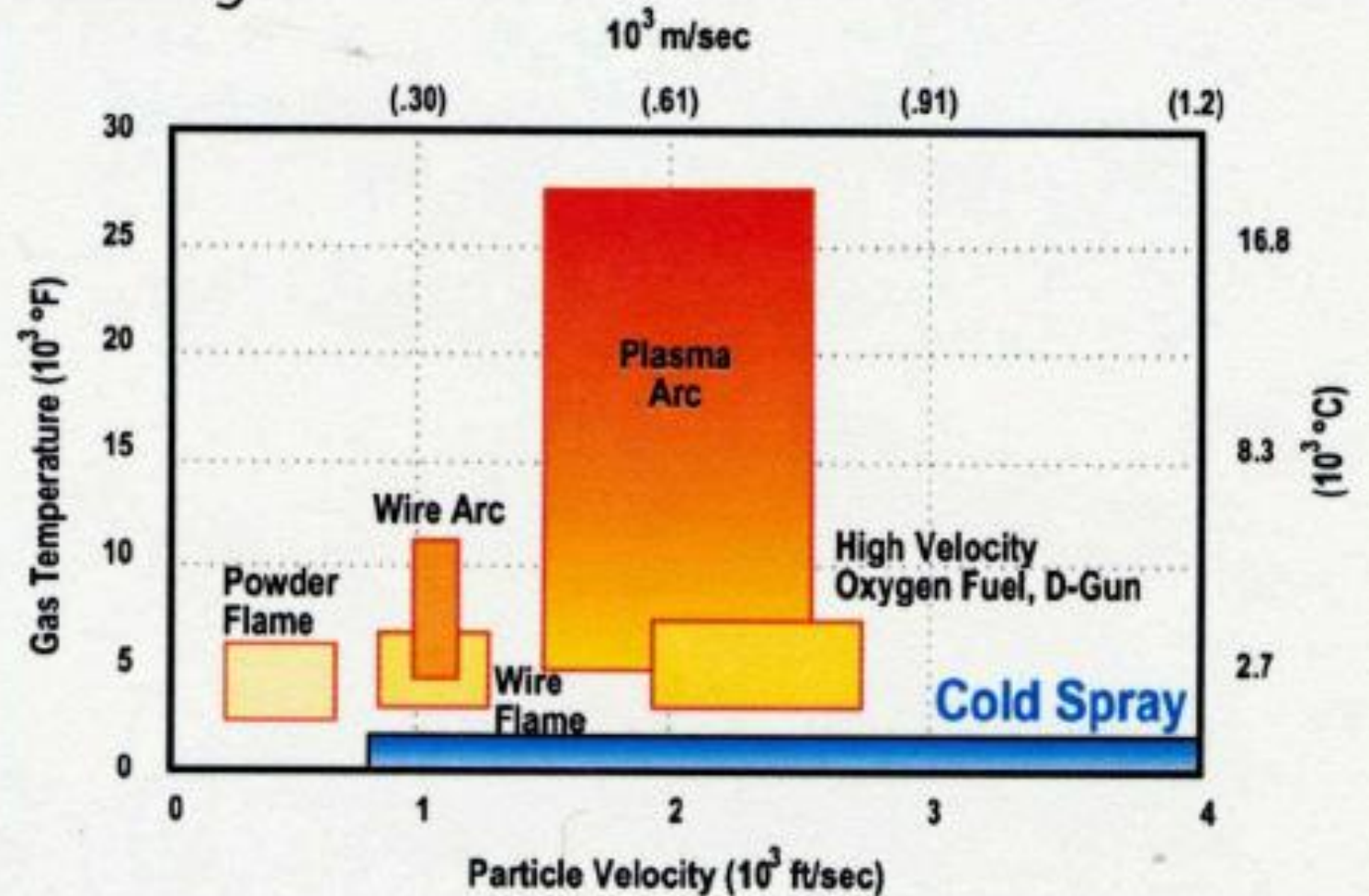


Precision coating videos 1.mpeg



Precision coating videos 3.mpeg

# Cold Spray vs. Thermal Spray



Comparison of thermal spray and cold spray particle velocity and gas temperature.



# Parâmetros dos Processos de AT Convencionais

Processo → Parâmetros ↓	FS [pó]	FS [arame]	HVOF [pó]	Detonação	ASP [arame]
<b>Temperatura Chama/Arco [°C]</b>	2200/3200	2800/3200	2700/3100	3900	4000/6000
<b>Veloc. Transferência [m/s]</b>	30-150	100-250	400-1200 Até 5000	910	100-350
<b>Atmosfera da Chama/Arco</b>	CO,CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>
<b>Teor de Óxidos    [%]</b>	0,4 – 10	0,4 – 10	1 - 5	1-5	2,5 - 15
<b>Porosidade    [%]</b>	05 - 15	05 - 15	<3	<3	2 -15
<b>Aderência    [MPa]</b>	4 -20	4 - 20	>40	>40	10 - 36

# ASPERSÃO TÉRMICA

