

RAPID TOOLING

SINTERIZAÇÃO DIRECTA POR LASER DE METAIS

L. Esperto^a, A. Osório^b

^aInvestigador Auxiliar (*luis.esperto@ineti.pt*), ^bInvestigador Principal (*antonio.osorio@ineti.pt*)
INETI, DMTP/UTP, Edifício C, Estrada do Paço do Lumiar, 1649-038 Lisboa

RESUMO

A tecnologia DMLS (Sinterização Directa por Laser de Metais) permite o fabrico rápido de componentes e ferramentas de produção com forma quase definitiva a partir da sinterização de misturas de pós metálicos, com base numa geometria gerada em sistemas CAD 3D. As propriedades das misturas de pós e os parâmetros do processo condicionam os mecanismos de ligação entre partículas e o grau de densificação do material, que por sua vez determinam as propriedades mecânicas e térmicas do material sinterizado e a precisão dimensional da peça. A redução de tempo e custo de produção de peças com geometria complexa é significativa em relação às tecnologias convencionais, como a maquinagem ou a electroerosão (EDM).

ABSTRACT

Direct Metal Laser Sintering (DMLS) technology enables the production in a near net shape and accurate of rapid tools and components, directly from 3D CAD data, by sintering metal powder mixtures with a high power laser. Materials properties and process parameters affect directly the powder sintering process and resultant properties and dimensional precision of the parts. DMLS technology is used to save time and costs both in the product development process and part production, when compared with conventional technologies like milling and electrical discharge machining (EDM).

1. INTRODUÇÃO

O conceito de ferramenta rápida (*Rapid Tooling*) nasceu e desenvolveu-se tendo por base as tecnologias de prototipagem rápida, sendo aceite, que as cadeias de produção de ferramentas rápidas envolvam sempre uma tarefa de prototipagem rápida.

As soluções utilizadas serão tanto mais interessantes industrialmente, quanto maiores forem os ganhos potenciais nos custos de fabrico ou nos prazos de entrega.

De um modo geral as ferramentas rápidas

não dispõem de todas as funcionalidades ou características das ferramentas de produção convencionais, sendo inadequadas para o fabrico de grandes séries. Como causas comuns de tais limitações podem ser referidas as seguintes, a título de exemplo:

- a) fraca resistência ao desgaste da qual resulta uma vida útil reduzida;
- b) mais reduzida condutibilidade térmica originando menor produtividade;
- c) alteração das características dos produtos fabricados;
- d) menor precisão dimensional.

Se bem que apresentem características diferentes das ferramentas de produção convencional, as ferramentas rápidas têm a vantagem de possibilitar a concepção, o desenvolvimento, a simulação, o fabrico e a reengenharia da ferramenta ou do produto, num curto espaço de tempo e com menores custos, vantagens estas que são em muitos casos determinantes para o sucesso do produto ou das actividades industriais intervenientes.

A opção pelo uso de ferramentas rápidas e pela selecção do tipo de tecnologia mais adequada exige uma ponderação das vantagens e limitações das diferentes soluções disponíveis no mercado, face às condições reais de produção e às exigências particulares de cada projecto em concreto.

O processo DMLS existente no INETI permite a construção de ferramentas rápidas até um máximo volumétrico de 15.625dm^3 a partir da sinterização de misturas de pós metálicos por acção de um laser de CO_2 .

As peças são obtidas numa única operação e apresentam resistência mecânica, rigor dimensional, reprodução de detalhes e rugosidade superficial, permitindo servirem como protótipos funcionais ou ferramentas de produção, como nos moldes para injeção de plástico ou metal.

Neste trabalho descreve-se a tecnologia DMLS e apresentam-se diversos exemplos de peças destinadas a aplicações típicas produzidas na máquina EOSINT M250 Xtended.

2. TECNOLOGIA DMLS

2.1. Processo DMLS

O processo DMLS, sinterização directa de metais por laser, baseia-se na construção de peças, camada a camada, como sejam os protótipos funcionais ou as ferramentas de produção, através da sinterização de misturas de pós 100% metálicos, formados a partir de ligas em bronze ou aço, por acção de um laser de CO_2 com 240W de potência máxima (Fig. 1).

O processo de construção tem início no projecto gráfico da peça em sistemas CAD 3D, criando-se ficheiros *stl*. Estes ficheiros são convertidos por *software* apropriado em ficheiros *sli*, para permitir uma construção camada em camada, com selecção da espessura entre os 20 e $60\mu\text{m}$, sendo em seguida transferidos para a máquina de sinterização.

A construção da peça começa com o distribuidor de pó a espalhar o pó numa placa de construção ($250\times 250\text{mm}$), formando camadas com espessura uniforme.

O laser efectua em seguida o varrimento da área a sinterizar correspondente a cada camada (secção XY) da peça, promovendo a fusão do material e a sua ligação metalúrgica à placa de aço se for a primeira camada, ou a uma camada de pó sinterizado.

Após o varrimento da área a densificar, a plataforma de construção move-se para baixo (d direcção Z), o correspondente a uma camada, criando as condições para que nova camada de pó seja espalhada e sinterizada. Esta sequência de operações repete-se até que a construção esteja concluída (Fig. 1).

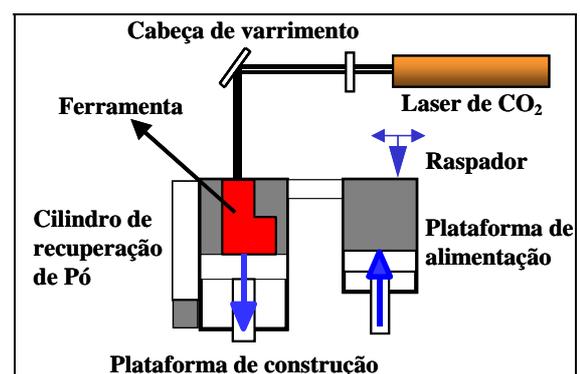


Fig. 1 – Esquema do processo DMLS.

No final as peças são retiradas por corte da placa de aço e o pó não sinterizado é introduzido no depósito da máquina para nova utilização [1, 2, 3].

Ao processo DMLS estão associados os seguintes condicionamentos:

- a) protecção com uma atmosfera de azoto de modo a minimizar a oxidação dos materiais;
- b) plataforma de construção aquecida com o objectivo de atenuar as tensões residuais geradas durante a solidificação;
- c) plataforma de construção formada por uma placa espessa de aço para aumentar a rigidez durante a construção da peça e evitar distorções de forma associadas ao processo de sinterização.

2.2. Parâmetros da Tecnologia DMLS

Os parâmetros da tecnologia DMLS, que influenciam o processo de sinterização são a potência do laser (%), a velocidade de varrimento (mm/s) e a distância entre linhas de varrimento (mm). A estratégia de construção (volume ou Skin&Core) também condiciona o processo.

Observando o processo de construção, em cada camada de peça a construir, o laser começa por sinterizar o contorno com uma determinada velocidade. Uma vez que a zona afectada pelo laser é superior à dimensão do foco ($\approx 0,4\text{mm}$), a posição deste tem que ser deslocada para o interior da camada cerca de metade do diâmetro da referida zona, de modo a que a linha traçada corresponda ao contorno definido no CAD.

Esta correcção à posição do foco do laser é designada por compensação do laser e tem uma influência decisiva sobre a precisão dimensional das peças.

A contracção do material nas direcções X e Y também influencia a precisão dimensional da peça sinterizada.

A potência, a velocidade de varrimento e a distância entre as linhas de varrimento do laser são os parâmetros que controlam o fornecimento de energia ao material e por conseguinte o processo de sinterização e densificação.

A forma como o laser efectua os varrimentos (estratégia de iluminação)

determina não só a densificação do material como o tempo de construção das peças. O varrimento pode ser efectuado em banda (Fig. 2), em linha ou em quadrados (Fig. 3) em X, Y, ou alternadamente em X e Y.

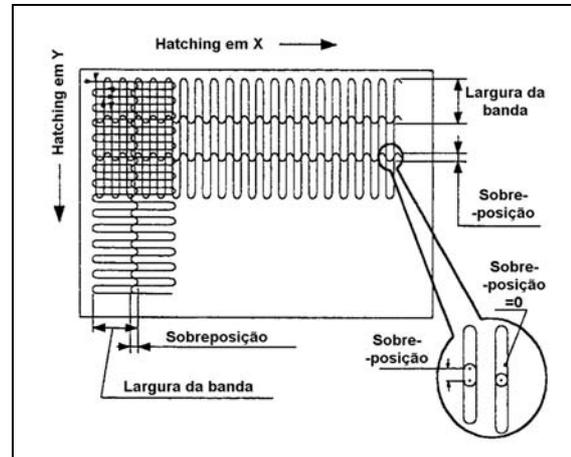


Fig. 2 – Hatching do tipo Up-Down Stripes.

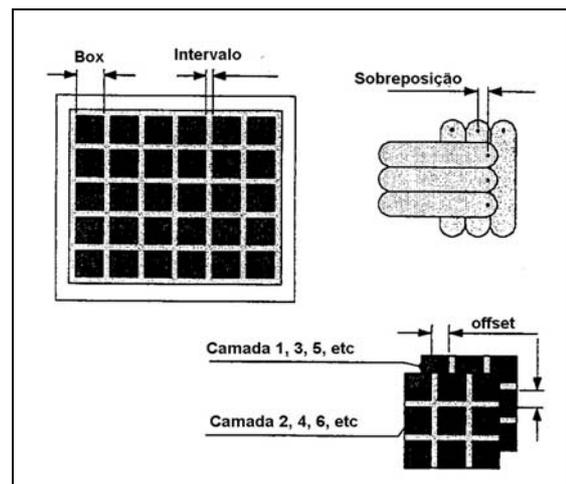


Fig. 3 – Hatching do tipo Squares.

A área da camada sinterizada, a altura de construção, a velocidade de varrimento, a distância entre linhas de varrimento e a estratégia de iluminação são as variáveis, que condicionam o tempo de construção das peças [1, 2, 3, 4].

2.3. Misturas de Pós

A tecnologia DMLS utiliza misturas de materiais metálicos especificamente desenvolvidas para o efeito.

As misturas baseadas em bronze (*DirectMetal 20 e 50*), são constituídas por

Cu/Sn, Ni e Cu/P. O níquel é o componente com temperatura de fusão mais elevada, enquanto que os outros dois asseguram a formação da fase líquida necessária ao processo de sinterização.

Nas misturas baseadas em aço (*DirectSteel 20 e 50*), a componente estrutural é o Fe/C, enquanto que a fase líquida é assegurada pelo Ni e o Cu/P.

Tabela 1 – Propriedades das misturas de pó.

MATERIAL	Densidade aparente (g/cm ³)	Granulometria (µm)		
		D10	D50	D90
<i>DirectMetal 20</i>	4,48	12	24	40
<i>DirectSteel 20</i>	3,35	6	24	61
<i>DirectMetal 50</i>	4,69	19	35	56
<i>DirectSteel 50</i>	3,28	10	35	63

A função do fósforo nos dois sistemas de misturas de materiais consiste na eliminação do oxigénio e dos óxidos presentes na superfície das partículas sólidas, aumentando assim a sua molhabilidade pelo líquido, o que facilita a ligação metalúrgica entre os diferentes componentes [5].

A dimensão das partículas e a respectiva distribuição granulométrica condicionam a densidade aparente, que por sua vez vai ser determinante para o processo de densificação (Tabela 1).

2.4. Processo de Densificação

No processo de sinterização por laser, o material recebe energia apenas durante fracções de segundo, arrefecendo logo em seguida, devido à velocidade com que o laser se desloca. Uma vez que o processo é tão rápido e localizado é necessário que:

- a fase líquida presente em quantidade suficiente para assegurar um rápido enchimento dos poros, possua uma baixa viscosidade;
- a molhabilidade do sólido pelo líquido seja elevada, para que ocorra a densificação do material.

Para se dar a molhabilidade do sólido pelo líquido é necessário que a tensão superficial do líquido seja inferior à do sólido. Assim, a molhabilidade é assegurada pela quantidade de energia fornecida ao material e por uma selecção adequada dos elementos que constituem a mistura de materiais, particularmente através da presença de elementos desoxidantes [5, 6, 7, 8].

Por outro lado, a viscosidade da fase líquida deve ser suficientemente baixa para envolver completamente as partículas que se mantêm sólidas. No entanto, a viscosidade da mistura sólido/líquido também deve ser suficientemente elevada de modo a evitar o fenómeno de *balling* (formação de esferas de metal com diâmetro igual ao do foco do laser). O primeiro aspecto depende directamente da temperatura, enquanto que o segundo pode ser alcançado através de uma relação sólido/líquido adequada.

A solubilidade do sólido no líquido e a possibilidade de ocorrerem reacções entre os constituintes do pó, são factores que dependem da composição e da temperatura e que também influenciam a densificação e a microestrutura final [5, 6, 8].

A densificação do material depende em larga medida das características dos pós, uma vez que o processo de sinterização decorre em camadas de pó. Aspectos como a distribuição granulométrica, forma da partícula e densidade aparente interferem directamente com o nível de temperatura atingido localmente e com os gradientes de temperatura em cada camada e entre camadas de pó adjacentes.

A energia absorvida e transmitida por condução é tanto maior quanto maior for a área específica dos pós e o respectivo empacotamento, beneficiando assim o processo de densificação.

A taxa de absorção/emissão do laser pelo material e as respectivas propriedades térmicas também influenciam a temperatura atingida localmente e os gradientes de temperatura na camada de pó. A absorção e

a reflectividade dos materiais variam com a composição e a qualidade superficial (ausência ou não de óxidos) [5, 6, 7, 8].

A selecção adequada da potência do laser, do *hatching*, da distância entre linhas de varrimento e da estratégia de construção (volume ou Skin&Core) permitirá atingir a densificação requerida para a peça.

2.5 Propriedades do Sinterizado

A densificação depende da quantidade de energia fornecida pelo laser, aumentando a energia com o aumento da potência do laser e, com a diminuição da velocidade e da distância entre linhas de varrimento.

A velocidade de varrimento do laser é o parâmetro, que mais influencia a densidade do sinterizado (Fig. 4).

Variações na potência e na distância entre linhas de varrimento não afectam de forma significativa a densidade (Figuras 5 e 6) [7].

As propriedades mecânicas e térmicas dos materiais sinterizados (Tabela 2) dependem da

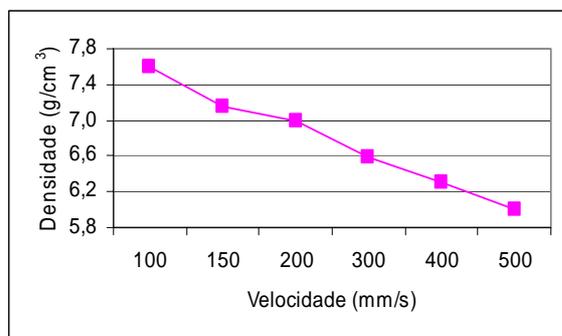


Fig. 4 – Variação da densidade do DS50 com a velocidade de varrimento.

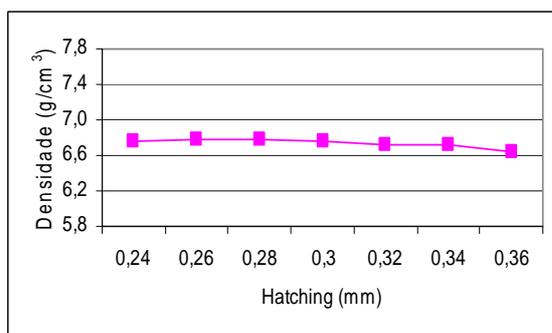


Fig. 5 – Variação da densidade do DS50 com o *Hatching*.

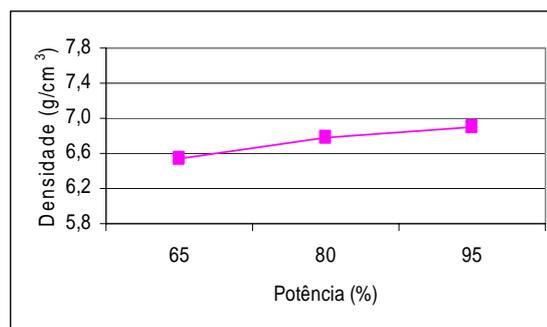


Fig. 6 – Variação da densidade do DS50 com a potência.

densidade obtida, a qual por sua vez depende como dos parâmetros do processo, da estratégia de iluminação e das propriedades das misturas de pós metálicos (Tabela 2) [9, 10].

Os valores das propriedades apresentados foram obtidos com parâmetros de processo que optimizam a densidade.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais sinterizados.

PROPRIEDADES	DM 50	DS 50	DM 20	DS 20
Espessura de camada mínima	50	50	20	20
Densidade (g/cm ³)	7,0	7,6	7,6	7,6
Densidade relativa (%)	80	95	92	98
Resistência à tração (MPa)	200	500	400	600
Dureza (HB)	90	200	110	220
Rugosidade Ra (µm)	14	18	9	10
Conductividade térmica a 50°C (W/mK)	15	25	25	13

No entanto, a maximização da densificação conduz ao aumento das tensões residuais, o que pode induzir alterações dimensionais, de forma ou fissuração nas peças.

A redução da espessura de camada inerente à utilização de pós mais finos e a utilização de novas estratégias de iluminação, permitem a obtenção de sinterizados com resistência mecânica mais elevada e uma rugosidade superficial menor.

3. APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA

O fabrico de insertos e cavidades moldantes para moldes de injeção de plástico constitui a área mais comum de aplicação da tecnologia DMLS. Nessa perspectiva apresentam-se alguns exemplos de ferramentas produzidas em bronze (Fig. 7) e aço (Figuras 8, 9 e 10).



Fig. 7 - Inserto em DM50 para molde de injeção de plástico (componente injectado à direita).

Tempo de construção: Bronze - 8h; Aço - 17h.

Dimensões: X - 46mm; Y - 46mm; Z - 51mm

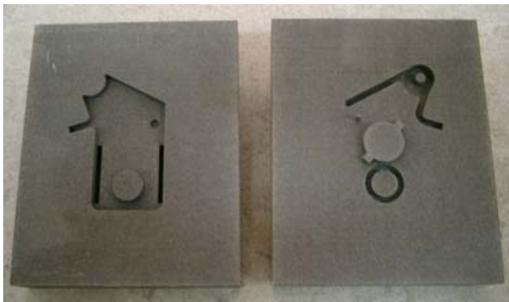


Fig. 8 - Inserto em DS50 para molde de injeção de plástico.

Tempo de construção: 33h.

Cavidade: X - 83mm; Y - 103mm; Z - 15mm.

Bucha: X - 83mm; Y - 103mm; Z - 20mm.



Fig. 9 - Inserto em DS50 para molde de extrusão por sopragem de plástico.

Tempo de construção: 19h.

Dimensões: X - 87mm; Y - 44mm; Z - 41mm.

As potencialidades do processo em termos de reprodução de pequenos detalhes e geometria complexa são demonstradas na Fig. 11, em que se apresenta a reprodução em bronze de uma imagem parcelar de uma gravura rupestre de Foz Côa.

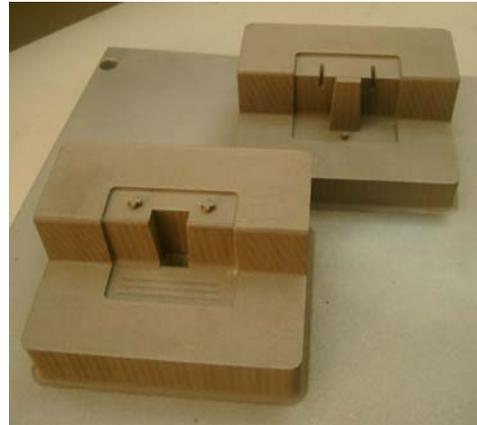


Fig. 10 - Inserto em DS20 para molde de injeção de plástico.

Tempo de construção: 68h.

Cavidade: X - 108mm; Y - 88mm; Z - 53mm.

Bucha: X - 108mm; Y - 88mm; Z - 49mm.



Fig. 11 - Reprodução em DM50 de uma gravura de Foz Côa.

Tempo de construção: 24h.

Dimensões: X - 236mm; Y - 242mm; Z - 9mm.

A rugosidade superficial dos insertos pode ser ajustada à aplicação pretendida, recorrendo para o efeito às técnicas e materiais correntemente utilizados para o efeito na indústria dos moldes.

A utilização dos novos materiais com $20\mu\text{m}$ reduz substancialmente ou elimina as operações de acabamento, reduzindo assim o tempo de fabrico das ferramentas.

A tecnologia DMLS apresenta ainda a vantagem de se poder incluir canais de arrefecimento nos insertos (*conformal cooling*). Este aspecto é importante, principalmente, quando o canal de arrefecimento tem de contornar a geometria do produto.

4. CONCLUSÕES

A- Uma densificação adequada das misturas de pós metálicos pelo processo DMLS depende das seguintes propriedades dos materiais:

- Distribuição granulométrica com D50 inferior a 35 μ m e sem finos (<10 μ m).
- Partículas com forma essencialmente esférica.
- Densidade relativa do pó elevada (40-50%).
- Teor de oxigénio reduzido.
- Temperaturas de fusão diferenciadas.
- Viscosidade da fase líquida baixa.
- Molhabilidade adequada do sólido pelo líquido.
- Absorção boa e reflexão baixa da energia do laser.
- Propriedades térmicas e capacidade de favoráveis à transmissão da energia.

B- A densificação depende igualmente de dois aspectos fundamentais:

- Energia fornecida pelo laser.
- Estratégia de iluminação.

C- A maximização da densidade do *DirectSteel 50* obteve-se para os seguintes parâmetros:

- Uma potência do laser de 95%.
- Uma distância entre linhas de varrimento de 0,30mm.
- Uma velocidade de varrimento de 100mm/s.

D- Em relação às aplicações, a tecnologia DMLS garante:

- Precisão dimensionais entre 0,05 e 0,1mm.

- Rugosidades superficiais médias (Ra) de 20 μ m para a mistura DS50 e de 12 μ m para a mistura DS20.
- Tempos de fabrico em *DirectMetal* bastante inferiores ao do *DirectSteel*.

E- A produção obtida utilizando ferramentas produzidas por DMLS depende da mistura utilizada:

- Ferramentas construídas em *DirectMetal* podem ser utilizados como ferramentas de produção de pequenas séries de peças plásticas (1000 peças).
- Ferramenta construídas em *DirectSteel* podem ser utilizadas como ferramentas de produção de séries médias, na ordem das 50.000 a 100.000 de peças.

5. AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio financeiro proporcionado pelo Programa PEDIP ao Projecto Mobilizador “RNPR - Rede Nacional de Prototipagem Rápida” e pelo Programa PRIME ao Projecto Mobilizador “FRF – Fabrico Rápido de Ferramentas”.

6. REFERÊNCIAS

- [1] EOS Gmbh – EOS International User Meeting '99.
- [2] Hänninen J. – Direct Metal Laser Sintering, Advanced Materials & Processes, Maio 2002, p. 33-36.
- [3] EOS Gmbh, Operating Manual EOSINT M250 Xtended, 2000/2004.
- [4] Osório A., Esperto L., “Processo DMLS - Influência das Principais Variáveis sobre o Rigor Dimensional e a Densidade”, Projecto Mobilizador RNPR, Relatório Técnico, INETI, 2000.
- [5] Agarwala, M., Bourell D., Beaman J., Marcus H, Barlow J. - Direct selective laser sintering of metals, Rapid Prototyping Journal, Vol. 1, n^o1 (1995), p. 26-36.
- [6] Simchi A., Petzoldt F., Pohl H. – Direct Metal Laser Sintering: Material Considerations and Mechanisms of Particle Bonding, The International

- Journal of Powder Metallurgy, Vol. 37, n° 2 (2001), p. 49-61.
- [7] Esperto L., “Fabrico de Eléctrodos Rápidos para Electroerosão pela Tecnologia de Sinterização Directa por Laser de Metais”, Tese para Investigador Auxiliar, INETI, 2003.
- [8] Esperto L., Santos M., “Desenho de misturas de pós metálicos para aplicações de engenharia”, Projecto Mobilizador FRF, Workshop “Tecnologias Inovadoras para o Fabrico Rápido de Ferramentas”, INETI, 2004.
- [9] EOS Gmbh – Steel powder ups DMLS applications, Metal Powder Report, Setembro 2000, p. 28.
- [10] EOS Gmbh – Material Data Sheet, Setembro 2002.
- [11] Osório A., Esperto L., “Controlo Dimensional de Insetos Fabricados por DMLS e Determinação de Parâmetros Optimizados para Construção”, Projecto Mobilizador RNPR, Relatório Técnico, INETI, 2003.