

Revestimentos de cobre em aço inoxidável 304L por laser cladding

M. Reis^(*), S. Estanislau^(*), A. Cabral^(*), P. Peças^(*) e H. Gouveia^(*)

Resumo: Foi estudada a aplicação de revestimentos de Cobre sobre aço inoxidável AISI 304L, pela técnica de Laser Cladding. Analisam-se alguns aspectos do processo, relacionando-os com a qualidade do revestimento. E também discutida a influência de vários parâmetros do processo como a velocidade de processamento e distância focal. Tendo-se obtido revestimentos de pista simples de Cobre com uma boa aparência, uma elevada aderência e um bom acabamento superficial, criou-se uma base de referência para estudos posteriores nomeadamente de aplicação multi-pista tendo em vista a aplicação industrial.

Palavras Chave: **Laser cladding. Revestimentos de cobre.**

Copper coatings on stainless steel by laser cladding

Abstract: Copper laser cladding was performed on AISI 304L stainless steel. Some process parameters like process speed and focal point were analysed and it was established its influence on the quality of the coating. Simple track coatings were achieved with good aspect, good adherence and good surface finishing. Therefore, a reference basis for further developments related to industrial application, was created.

Keywords: **Laser cladding. Copper coatings.**

1. INTRODUÇÃO

A vasta aplicabilidade do Laser, nos nossos dias resulta das suas grandes potencialidades relativamente ao processamento de materiais. Os processos para os quais se encontram mais direccionados são nomeadamente a soldadura, o corte, a marcação e os tratamentos superficiais, nos quais se inclui o revestimento de superfícies - Laser Cladding.

Esta técnica, tem como objectivo a fusão de um metal sobre a superfície de um substrato com a menor diluição possível (inferior a 10%). Uma diluição igual a zero corresponderia a uma situação ideal equivalente à ausência de contaminação do revestimento. Por seu turno para situações em que a diluição da superfície solidificada é superior a 20% o processo designa-se por "Alloying". (1)

O material do revestimento apresenta-se na forma de um pó fino que é introduzido numa corrente de gás inerte e direccionado para a zona de

interacção entre o Laser e o substrato. (Figura 1). As partículas de pó aderem ao substrato formando o revestimento após a fusão deste, situação que apenas ocorre se a potência fornecida ao sistema for suficiente. Em condições de funcionamento optimizadas a radiação Laser será responsável pela fusão dos pó e do substrato.(2)

A extensão da diluição é controlada através do fluxo de pó fornecido ao processo. A optimização do fluxo de pó irá corresponder a uma diluição mínima e a uma deposição máxima, este parâmetro será também dependente da densidade de potência e

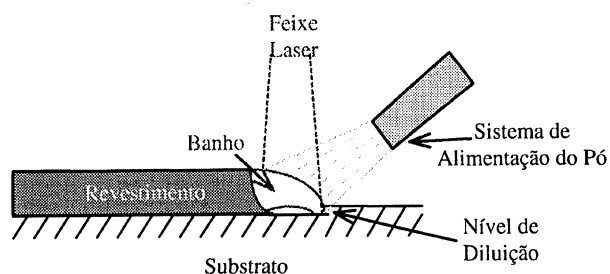


FIG. 1.— Laser cladding com injeção de pó.

FIG. 1.— Laser cladding with blown powder.

^(*) ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, Portugal. Estrada Nacional 249 - Km 3, Cabanas - Leião (TagusPark), Apartado 119, 2781 OEIRAS Codex. (Portugal).

do modo do feixe laser. Fluxos de pó baixos originam um aumento da diluição e conseqüentemente uma diminuição da deposição de pó. Para fluxos de pó elevados o efeito é revertido até que, para um determinado fluxo a pista torna-se contínua.

Relativamente ao ângulo de injeção de pó, o seu maior efeito recai na variação da velocidade de injeção de pó no banho de fusão. O injetor deve ser posicionado por forma a que toda a zona de fusão seja preenchida com pó. Se a velocidade de injeção de pó for muito elevada, não haverá tempo para ocorrer fusão nas partículas do revestimento e conseqüentemente o revestimento será de baixa qualidade tendo em conta que as ligações pó - substrato são de fraca intensidade.

O Cobre apresenta uma vasta gama de propriedades que justificam a sua utilização extensiva como material de revestimento. Destas propriedades destaca-se a elevada condutividade eléctrica.

2. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

O material base utilizado (substrato a revestir) foi o aço inoxidável austenítico AISI 304L cuja composição química e propriedades mecânicas podem ser observadas na tabela I. A preparação das amostras foi realizada através da remoção das sujidades com acetona, visto que quaisquer impurezas na superfície da amostra irão interagir com a radiação incidente provocando alteração da absorção de energia por parte dos materiais.

O material a pulverizar foi o pó AMDRY 3263, cujas características podem ser observadas na tabela II.

Na figura 2 e 3, ilustra-se o diagrama esquemático da montagem experimental utilizada e que a seguir se descreve (sistema completo e um pormenor da cabeça de cladding, respectivamente).

O sistema Laser utilizado foi um Rofin-Sinar

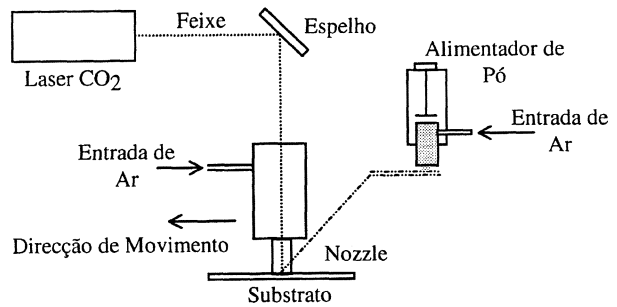


FIG. 2.— Representação esquemática da montagem experimental.

FIG. 2.— Schematic representation of the experimental setting.

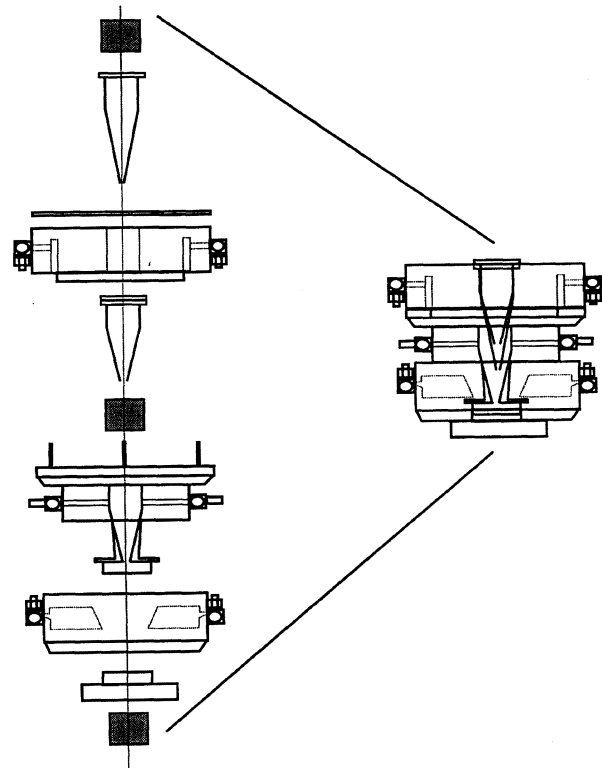


FIG. 3.— Cabeça de Laser Cladding.

FIG. 3.— Laser Cladding nozzle.

TABELA I.— Composição química (% peso) e propriedades mecânicas da liga AISI 304L.

TABLE I.— Chemical composition (% weight) and mechanical properties of AISI 304L.

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros	Dimensões (mm)	σ cedência (N/mm ²)	UTS (N/mm ²)
AISI 304L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00-20,00	8,00-12,00	—	50x80x3	170	485

TABELA II.— Composição química e granulometria dos pós depositados nos ensaios de plasma.

TABLE II.— Chemical composition and ganule size of powders used in plasma experiments.

Material Depositado	Tipo	Composição Química						Ponto de Fusão	Granulometria
		Cu	Al	Fe+Si	Zn	Mg	Outros		
AMDRY 3263	Cu 99,5%	95,5	—	—	—	—	—	1080 °C	—45+5 μ m

RS600 de 6 kW de potência, a operar em contínuo. Para cada valor de potência a ser utilizada, a respectiva densidade de potência é controlada através de um ajuste do diâmetro do feixe no ponto de interacção com o material a tratar, factor este que se controla através da variação da distância focal do sistema óptico. Relativamente à alimentação de pó, esta é feita com recurso a um sistema de injeção de pó Plasma-Technik, que debita uma quantidade de pó proporcional à rotação imprimida ao seu prato giratório. O pó é fornecido através de uma corrente gasosa e depositado num dos cones da cabeça de cladding que o distribui pelo feixe de Laser. A combinação correcta da velocidade do disco e do fluxo de gás asseguram o fornecimento adequado do pó ao Laser. Para a alimentação de pó se dar de forma mais homogénea, utiliza-se Argon com uma pressão de 1.5 bar e um caudal de 4l/min para a injeção de pó. Para assegurar a ausência de oxidação nas pistas a depositar, é utilizado um gás de protecção coaxial (Argon) com um caudal da ordem dos 15 l/min.

Na tabela III podem observar-se as condições de ensaio utilizadas no decurso deste trabalho de investigação.

As amostras revestidas por Laser Cladding são classificadas em dois grupos correspondentes a duas distâncias de focagem (30 e 35 mm abaixo do ponto focal) como se pode observar nas tabelas IV e V.

A análise laboratorial executada consistiu nos seguintes ensaios:

- Caracterização microestrutural das secções transversais das pistas (microscópio óptico);
- Medidas das dimensões das pistas (microscópio óptico);
- Ensaio de rugosidade sobre a superfície revestida (rugómetro Mahr Perthen modelo S6P);
- Ensaio de dureza vickers nas secções transversais das pistas com uma carga de 200g a actuar durante 15s (microdurómetro Shimadzu modelo HSV-20);

TABELA III.- Condições de teste utilizadas no decorrer dos testes.

TABLE III.- Experimental test conditions.

Sistema Laser	2500 RF, 2.5 KW C.W. laser de CO2
Modo do feixe	Simetria circular, TEM ₂₀
Distância Focal da Lente	127 mm
Gás de protecção	Argon, Fluxo de 15l/min
Material base	AISI 304L, espessura 3 mm
Alimentado de pó	PZ Twin-10C, gás utilizado: Argon a 4 l/min, 1.5 bar
Mesa	ESAB XY, ópticas flutuantes
Posição de cladding	Pistas simples, arrefecimento ao ar

- Medidas de diluição pelo método das áreas (figura 4) nas secções transversais das amostras polidas e contrastadas;
- Ensaio de determinação das tensões residuais nas secções transversais (difractómetro de raios-X Rigaku Strainflex).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Macro e Microestrutural

Após observação de todas as pistas simples é possível destacar as seguintes.

- Amostra 2.2 que apresenta um revestimento bastante uniforme apesar da reduzida espessura figuras 5 e 7;
- Amostra 2.5 que apresenta, apesar de não uniforme, uma boa forma e uma zona de revestimento figura 6.

Observa-se uma total ausência de porosidade no revestimento ocorrendo, no entanto, a formação de fissuras na direcção perpendicular à velocidade de processamento. O aparecimento destas fissuras está associado a uma das características da utilização do feixe Laser como fonte de calor que é a localização numa área reduzida da entrega de calor. O aquecimento localizado causa um arrefecimento muito rápido assim como um gradiente de temperaturas acentuado que causam frequentemente fissuração na solidificação.

Ambas as pistas seleccionadas foram realizadas a uma distância de 35mm abaixo do ponto focal. Na realidade, como se confirma nos resultados posteriores, esta desfocalização permitiu alcançar valores de diluição em média mais reduzidos, pistas com aspecto mais uniforme e espessuras de revestimento superiores. Estes resultados podem ser explicados devido ao facto de a zona de interacção feixe laser/material ser superior originando um menor fornecimento de energia por área (densidade de energia).

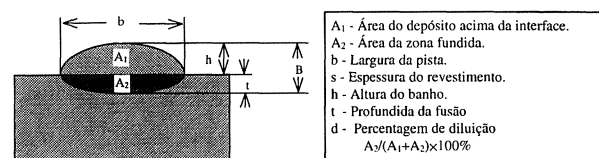


FIG. 4.— Cálculo da percentagem de diluição presente nos revestimentos por Laser.

FIG. 4.— Calculation of dilution present on the laser coatings.

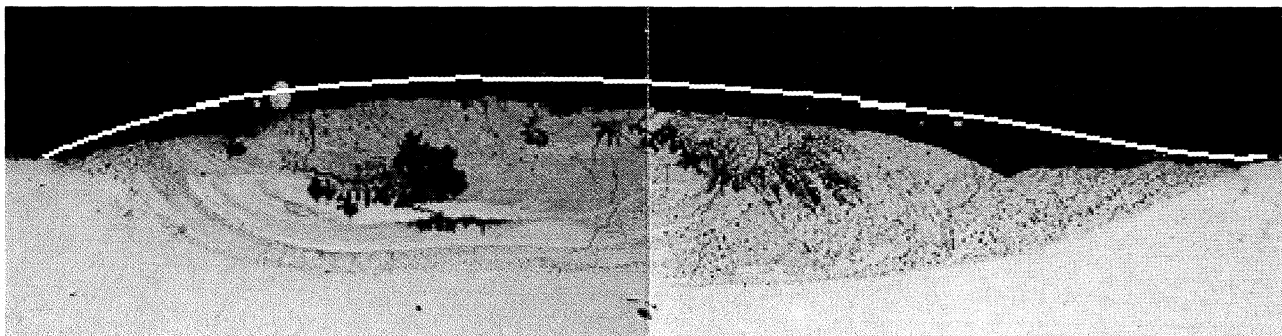


FIG. 5.— Secção transversal da pista 2.2 (50×).

FIG. 5.— Cross section of the track 2.2 (×50).

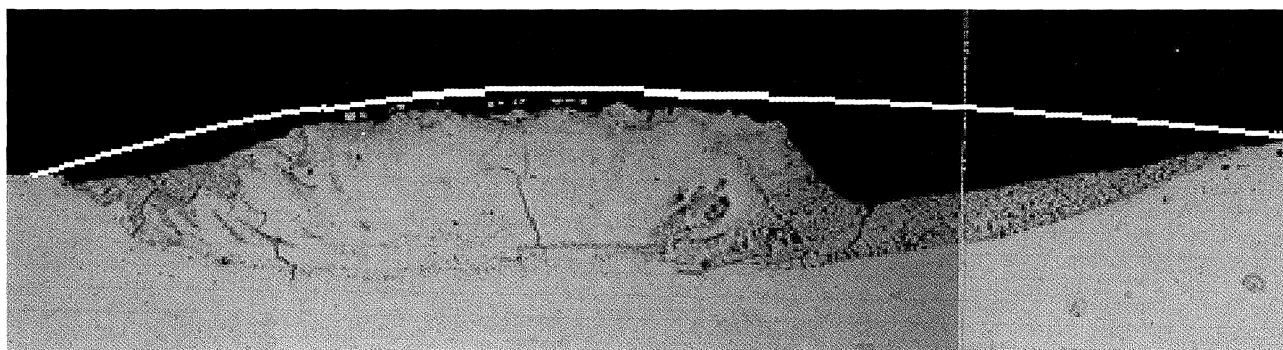


FIG. 6.— Secção transversal da Pista 2.5 (50×).

FIG. 6.— Cross section of the track 2.5 (×50).

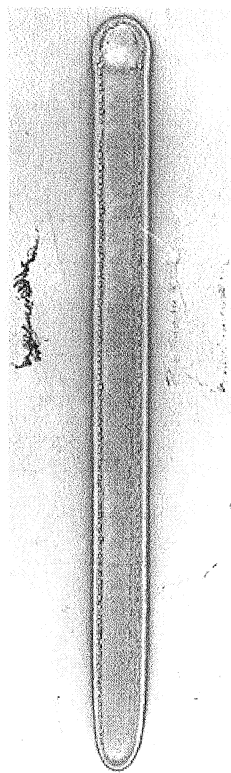


FIG. 7.— Pista 2.2.

FIG. 7.— Aspect of Track 2.2.

Na figura 8 pode observar-se a microestrutura da zona de diluição assim como da zona termicamente afectada. Em ambas as zonas verifica-se uma estrutura dendrítica, sendo a primeira mais fina devido a uma velocidade de arrefecimento mais elevada.

3.2. Diluição

Os resultados dos ensaios de diluição e de medida do perfil das pistas podem ser observados nas tabelas IV e V.

A sua observação para uma distância de 35mm abaixo do ponto focal, permitiu relacionar a amostra com menor diluição com uma velocidade de 500 mm/min (pista 2.5). Pela análise da figura 9 pode observar-se a sensibilidade da diluição do revestimento à flutuação da velocidade de processamento. O aumento de diluição corresponde no caso de velocidades superiores a 500mm/min a uma insuficiência de deposição de pó e no caso de velocidades inferiores a entregas térmicas excessivas. Esta situação reflecte o efeito conjunto dos parâmetros na qualidade do revestimento e coaduna-se perfeitamente com os fundamentos teóricos que nos dizem que, para velocidades de processamento menores, o tempo de interacção do

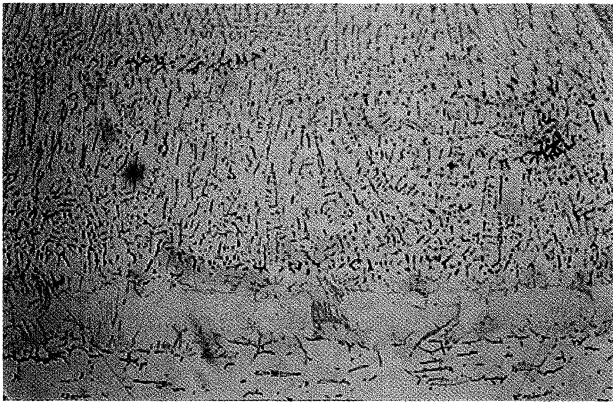


FIG. 8.— Microestrutura da zona de diluição de uma pista (500×).

FIG. 8.— Dilution zone Microstructure of a Laser Cladding track (×500).

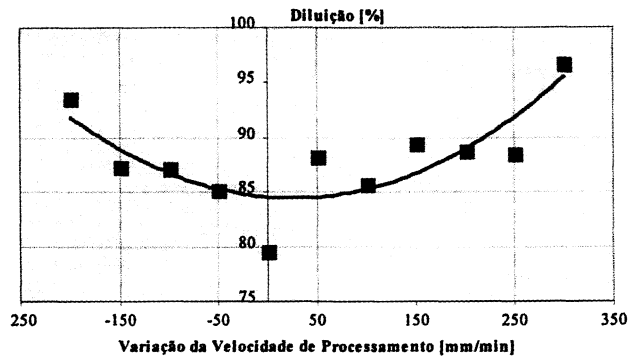


FIG. 9.— Variação da Velocidade de Prrocessamento vs Diluição para uma Distância de 35 mm Abaixo do Ponto Focal.

FIG. 9.— Process Speed Variation vs Dilution for a distance below the focal point of 35mm.

TABELA IV.— Resultados das amostras revestidas (Grupo 1).

TABLE IV.— Results of the coated samples (Group 1).

Amostra	Potência [W]	Velocidade [mm//min]	Caudal de Pó [%rpm]	Largura da Pista [µm]	Profundidade da Zona Fundida [µm]	Diluição [%]
1.1	2.000	300	10	2.820	360	90,2
1.2	2.000	350	10	2.780	320	93,6
1.3	2.000	400	10	2.220	300	—
1.4	2.000	450	10	2.120	300	93,8
1.5	2.000	500	10	2.000	340	97,4
1.6	2.000	550	10	2.040	280	91,0
1.7	2.000	600	10	2.930	220	87,2
1.8	2.000	650	10	2.940	220	91,3
1.9	2.000	700	10	2.920	220	92,2

TABELA V.— Resultados das amostras revestidas (Grupo 2).

TABLE V.— Results of the coated samples (Group 2).

Amostra	Potência [W]	Velocidade [mm//min]	Caudal de Pó [%rpm]	Largura da Pista [µm]	Profundidade da Zona Fundida [µm]	Diluição [%]
2.1	2.000	300	10	2.760	520	93,6
2.2	2.000	350	10	2.660	500	87,3
2.3	2.000	400	10	2.560	460	87,1
2.4	2.000	450	10	2.360	400	85,2
2.5	2.000	500	10	2.340	240	79,6
2.6	2.000	550	10	2.180	340	88,3
2.7	2.000	600	10	2.060	300	85,7
2.8	2.000	650	10	2.160	300	89,4
2.9	2.000	700	10	1.880	260	88,8
3.0	2.000	750	10	1.820	280	88,5
3.1	2.000	800	10	1.760	220	96,6

feixe laser com o material vai ser maior e como tal, o material será mais afectado.

A pista com menor diluição apresentou um valor de 79.6%, valor que se encontra muito acima do resultado pretendido (10%). Este facto deve-se a um fornecimento de energia exagerado para as velocidades utilizadas no processo, no entanto, permite concluir que a aderência do revestimento foi na realidade efectiva.

3.3. Dimensões das Pistas

As medidas das dimensões das pistas permitiram relacionar o seu perfil com a velocidade de processamento utilizada.

Ambas as medidas do perfil das pistas mostraram uma forte dependência da velocidade de processamento, conforme mostram as figuras 10 e 11. Como era de esperar observa-se um aumento da largura da pista e uma diminuição da profundidade com o aumento da velocidade. No que se refere à comparação entre as duas distâncias abaixo do ponto focal, os maiores valores observados para os 35mm podem ser justificados pela zona fundida incluir o revestimento. Isto é, para uma distância de 35mm abaixo do ponto focal embora a zona de

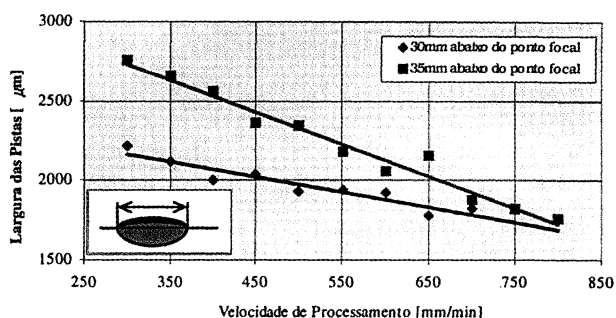


FIG. 10.— Velocidade de Processamento vs Largura das Pistas.

FIG. 10.— Process Speed vs Width of the tracks.

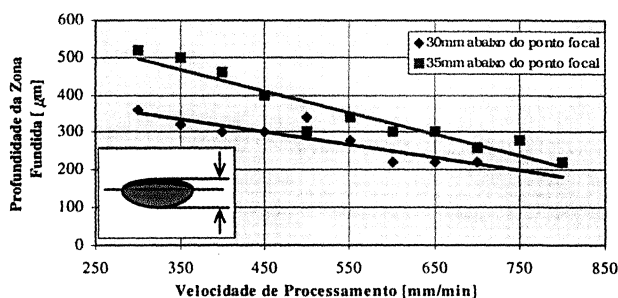


FIG. 11.— Velocidade de Processamento vs Profundidade da Zona Fundida.

FIG. 11.— Process Speed vs Depth of the melted zone.

diluição seja inferior a espessura do revestimento é em média superior.

A avaliação da espessura das pistas não foi quantitativa devido à não homogeneidade das mesmas, mas foi possível eleger a pista 2.5 (2000 KW; 500mm/min; 35mm abaixo do ponto focal) como aquela com um valor superior. Por seu turno a pista 2.2 (200KW; 350mm/min; 35mm abaixo do ponto focal) mostrou apesar de reduzida uma espessura mais homogênea.

3.4. Rugosidade

Os ensaios de rugosidade realizados permitiram obter os valores de Ra (média aritmética de todas as áreas do perfil de rugosidade). Observa-se sempre uma superfície do revestimento rugosa, com partículas de cobre não fundidas e distribuição não homogênea de pó, situação que influencia os valores de rugosidade obtidos. Na realidade um aumento da velocidade de processamento conduz a uma menor quantidade de partículas não fundidas assim como a uma diminuição da rugosidade média (Ra). Esta relação pode ser observada no gráfico 12. O mesmo gráfico permite verificar que as pistas efectuadas a 35mm abaixo do ponto focal apresentam uma rugosidade média inferior às pistas com as mesmas velocidades mas efectuadas a 30mm abaixo do ponto focal. Esta consideração apoia a afirmação de que este desfocamento será favorável.

3.5. Microdureza

Os ensaios de microdureza foram efectuados com uma carga de 200g a actuar durante 15 s (Tabela VI).

Interessa referir que o aço inoxidável utilizado nos testes apresenta uma dureza de aproximadamente 160 HV sem qualquer tratamento por Laser. Por seu turno o revestimento de Cobre apresentou durezas de 114HV.

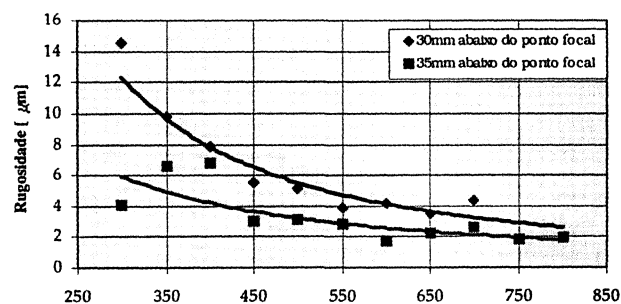


FIG. 12.— Velocidade de Processamento vs Rugosidade.

FIG. 12.— Process Speed vs Roughness.

TABELA VI.– Medição das microdurezas nas amostras mais exemplificativas do terceiro grupo de ensaios. Dureza Vickers [HV0.2].

TABLE VI.– Microhardness measurements of the most representative samples in the third group of experiments.

Amostra	Dureza Vickers [HV0,2]								
	50µm	100µm	200µm	400µm	600µm	800µm	1.000µm	2.600µm	2.800µm
2.2	102	100	119	139	198	200	190	203	187
2.5	136	161	190	200	205	190	193	178	

TABELA VII.– Resultados das tensões residuais para as amostras mais representativas do terceiro grupo de ensaios.

TABLE VII.– Residual tensile of the most representative samples in the third group of experiments.

Amostra	Tensões Residuais [Mpa]		
	Medida Exterior	Medida Interior	Medida Exterior
Aço Inoxidável (Superfície)	-76 ± 6		
Aço Inoxidável (Secção Transversal)	-247 ± 42		
1.7	-125 ± 1	40 ± 4	86 ± 8
1.4	-	10 ± 7	47 ± 8
1.5	16 ± 2	-43 ± 6	- 113 ± 15
1.7	-93 ± 5	38 ± 8	58 ± 16
1.8	116 ± 11	92 ± 3	41 ± 13

Por observação dos valores obtidos verificamos que, no geral as amostras diminuíram a dureza na zona de diluição (50 e 100 µm) relativamente ao material base. Este facto é esperado uma vez que na zona de diluição existe uma inserção de cobre, elemento mais ductil. No que se refere ao material base este sofreu um a grande entrega térmica que conduziu a um aumento de dureza por recristalização do aço inoxidável. A área afectada pela calor chegou a atingir o extremo oposto da chapa revestida, situação a minimizar em futuros ensaios.

3.6. Tensões Residuais

Em todos os processos que utilizam radiação laser podem surgir problemas pela formação de tensões residuais. Estas podem causar distorção ou mesmo fissuração, situações a evitar. Deste modo é importante ter em conta a influência do procedimento nas tensões residuais. A sua origem recai num arrefecimento não uniforme conjuntamente com qualquer transformação de estado que possa ocorrer.

As medidas das tensões residuais foram realizadas na secção transversal da amostra sempre à mesma distância da superfície revestida. Os resultados mostram que são induzidas tensões residuais de tracção na superfície revestida do

substrato. Este facto resulta na inserção de fissuras no revestimento e na zona de diluição assim como na deformação da chapa, situação a evitar. Deste modo em futuros trabalhos torna-se imperativo um controlo cuidado das tensões residuais.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para os revestimentos realizados por laser permitiram uma análise geral da influência dos diferentes parâmetros nas características dos revestimentos e conduziram a revestimentos com um bom aspecto, uma elevada aderência e um bom acabamento superficial. As características anteriores foram acompanhadas de níveis de diluição muito elevados cujo melhoramento se impõe. Podemos concluir que os revestimentos por laser apresentam-se como promissores para o revestimento de peças de reduzidas dimensões - trabalhos de precisão.

REFERENCIAS

- (1) "Laser Materials Processing", LU/TWI Laser Materials Processing Course, 29 April - 1 May 1997.
- (2) WEERASINGHE, V.M., STEEN, W.M. "Laser Cladding with Pneumatic Powder Delivery", Applied Laser Tooling, 1987.

- (3) CRAFER, R.C., OAKLEY, P.J. "Process and Physical Aspects of Continuous Wave Laser Processing", Applied Laser Tooling, 1987.
- (4) HONEYCOMBE, R.W.K. "Aços - Microestrutura e Propriedades", Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.
- (5) BROOKS C. R. "Heat Treatment Structure and Properties of Nonferrous Alloys", American Society for Metals, 1982.
- (6) "Melhoramento das Características Eléctricas e Magnéticas Superficiais do Aço Inoxidável, por Revestimento por Laser e por Plasma", Projecto CERN/P/FAE/1041/95.
- (7) PEÇAS P., RODRIGUES S. "Laser Cladding for Thin Copper Layer on 316L Stainless Steel", Instituto de soldadura e Qualidade, Lisboa, 1975.
- (8) PELLETIER J.M. "Surface Modifications of Materials: New Technologies", Comett 8709 Ca, France, 1995.
- (9) CRAFER, R.C., OAKLEY P.J. "Laser Processing in Manufacturing", Chapman & Hall, London, 1993.
- (10) "5th European Conference on Laser Treatment of Materials", ECLAT'94, 1994.
- (11) COTTRELL A.H. "Introdução à Metalurgia", (Tradução M.A. Fortes, J.P. Botas), Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1975.
- (12) SMITH W.F. "Principles of Materials Science and Engineering", 2nd Edition, McGraw-Hill International Editions, 1990.
- (13) STEVENS R.H. "Atlas of Microstructures of Industrial Alloys", Metals Handbook, 8th Edition, Vol. 7, , ASM 1979.
- (14) "Produção de revestimentos de Alumínio em aços inoxidáveis e Nb" Projecto CERN/P/CA/135/94.