



Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Otimização dos parâmetros de soldagem a laser de junta dissimilar de Inox 304 e Cobre Cromo C18200

Bolsista: Mariana Tomé da Silva

Orientador(a): Sheila Medeiros de Carvalho

Período a que se refere o relatório: Julho de 2014 a Agosto de 2015

Resumo

O material utilizado na câmara de empuxo do Motor Foguete a Propelente Líquido (MFPL) L75 é a liga de cobre cromo C18200. Entretanto o material utilizado na jaqueta de refrigeração, responsável pela extração de calor, é o aço inoxidável AISI 316L. No que tange ao processo de fabricação, a união entre a câmara de combustão e a jaqueta de refrigeração é uma etapa crítica, pois envolve processos de união de materiais dissimilares e de componentes de geometria complexas. Este trabalho visou avaliar a possibilidade de empregar a soldagem a laser no processo de união entre a câmara de empuxo e a jaqueta de refrigeração do Motor L75. Com o uso do laser a fibra de alta potência, foi possível verificar que existe uma condição otimizada de solda sobreposta, inox sobre cobre 18200, com potências entre 1000 e 1300 W e velocidades de soldagem de 0,05 m/min a 1 m/min. Embora as análises mostrem heterogeneidade microestrutural, pela dissolução parcial de uma fase na outra, obteve-se níveis de dureza aproximadamente constantes ao longo da profundidade da junta. Porém, os ensaios de tração na condição otimizadas, mostraram que a resistência do conjunto soldado foi insatisfatória, aproximadamente 14% da resistência a tração da liga de cobre C18200.



1. Introdução

O desenvolvimento do Motor Foguete a Propelente Líquido (MFPL) L75 é baseado em modernos e complexos processos tecnológicos, além de requerer investimentos em longo prazo [1]. Nesse contexto, a especificação, o projeto e a construção do MFPL L75 é fruto de uma parceria entre o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), a Agência Espacial Brasileira (AEB), e a Agência Espacial Alemã (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt - DLR), através do convênio SICONV no 755573/2012.

Os principais componentes do motor MFPL L75 são o sistema de alimentação, o sistema de combustão, o sistema de ancoragem, o sistema de ignição e o sistema de controle. No que tange aos processos de fabricação, a câmara de combustão é de particular interesse. Nela ocorre a queima do propelente, produzindo gases que podem atingir temperaturas da ordem de 3.300 °C. Dessa forma, no processo de fabricação dessa câmara, há a necessidade de emprego de matérias com elevada condutibilidade térmica, bem como elevada resistência mecânica em tração em altas temperaturas (300 °C).

O material utilizado na câmara de combustão do MFPL L75 é o cobre cromo C18200, por apresentar alta condutividade térmica e elevada resistência mecânica em tração quando tratado termicamente [2]. Visando aumentar a taxa de extração de calor da câmara de combustão, está é envolta por uma jaqueta de refrigeração, fabricada de aço inoxidável AISI 316L [3,4,5,6].

O aço AISI 316L e a liga cobre cromo C18200 também foram utilizados na câmara de empuxo do motor foguete a propelente líquido L15, uma versão anterior a do MFPL L75. Na ocasião, utilizou-se o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo não consumível de Tungstênio, também conhecido como processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas). Após a soldagem dos componentes foi observado que houve aquecimento de uma região de cerca



de 40 mm além da zona fundida (ZF), a qual media 3mm. Os ensaios em tração demonstraram que o conjunto soldado apresentou resistência a tração de 60% do metal base (cobre cromo C18200). Baseado nesses resultados, o processo de soldagem TIG foi descartado.

Como o aporte térmico na soldagem TIG é elevado, quando comparado com os processos de alta densidade de energia, o cordão de solda é largo e mais suscetível a defeitos de soldagem [7,8]. Existe também a possibilidade do surgimento de fases frágeis, uma vez que a liga de cobre cromo C18200 apresenta precipitados dispersos que são instáveis em altas temperaturas [9,10,11]. A extensão da região fragilizada varia com o processo de soldagem, isto é, quanto menor o aporte térmico, menor é a zona termicamente afetada e, conseqüentemente, menor tendência à falha por trincamento [12,13].

Para resolver estes problemas, é necessário optar por um processo de soldagem que minimize a extensão da zona termicamente afetada (ZTA). Nesse aspecto, os melhores resultados são obtidos por soldagem por feixe de elétrons (Electron Beam Welding - EBW) e pela soldagem a laser (Laser Beam Welding - LBW) [13,14]. O método EBW não será considerado, pois necessita de vácuo durante a soldagem, o que é impeditivo para o componente em questão.

A soldagem a laser tem sido estudada no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, mais especificamente no Instituto de Estudos Avançados (IEAv). O IEAv acumula mais de dez anos de experiência na soldagem de componentes estruturais aeroespaciais, inclusive ligas de ultra-alta resistência, ligas de titânio e materiais dissimilares [15,16,17].

Mai e Spowage [18] investigaram a soldagem a laser entre o aço AISI 304 e o Cobre, utilizando um laser de Nd:YAG de 350 W de potência. Os melhores resultados foram obtidos com a focalização do laser no aço inoxidável, resultando em menos de 2% de cobre diluído na zona fundida do aço inox, ausência de microtrincas nas zonas fundida e termicamente



afetada, além de uma microestrutura dendrítica na zona fundida com a presença de martensita.

Igualmente, Tosto e colaboradores [19] também soldaram o aço AISI 304 L com o cobre, porém o processo utilizado foi o por feixe de elétrons. As juntas de topo possuíam 25 mm de espessura. Esses autores também obtiveram um cordão de solda livre de porosidades e microtrincas, tanto na ZF quanto na ZTA, porém eles enfatizaram que podem surgir problemas em serviço devido à instabilidade da microestrutura observada, nas temperaturas de operação do conjunto.

Espera-se que a tecnologia de soldagem a laser possa ser aplicada na manufatura dos componentes da câmara de combustão, de forma a substituir com vantagens o processo TIG manual.

2. Material e Métodos

Os materiais utilizados no presente estudo foram chapas de aço inox 304, de 0,75 mm de espessura e chapas de cobre cromo C18200, de 2,18 mm de espessura. A chapa de cobre cromo C18220 foi fornecida pela empresa Artisa Metais EIRELI EPP, na forma de placas 10 mm de espessura. A chapa de cbre cromo C18200 foi usinada na divisão de mecânica do IAE, até a espessura final de 2,18 mm. Os materiais base apresentaram dureza Vickers de 130 HV, para o cobre cromo e de 230 HV, para o inox 304. A composição nominal do aço inox AISI 304 e do cobre cromo C18200 são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Propriedades mecânicas nominais do cobre cromo C18200 e aço AISI 304L .

	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Cobre C18200	530	450	16
Inox 304	588,0	294,0	55

Tabela 2. Composição nominal do aço AISI 304L (%p).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
0,07	2,00	0,75	0,045	0,015	17,5 A 19,5	8,0 A 10,5	0,10

Tabela 3. Composição nominal do cobre cromo C18200 (%p).

Cu	Ni	Pb	Sn	P	Al	Fe	Zn	Zr	Cr	Si
99,139	0,005	0,005	0,005	0,007	0,008	0,02	0,032	0,072	0,704	0,003

A seguir, tem-se uma breve descrição dos métodos empregados nesse trabalho. Todas as análises e processos envolvidos no presente estudo foram realizados nos laboratórios da Divisão de Fotônica (EFO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv).

2.1 Soldagem

O laser a fibra utilizado neste trabalho está instalado no Laboratório Multiusuário de Desenvolvimento de Aplicações de Laser e Ótica (DEDALO) da Divisão de Fotônica (EFO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv). Trata-se de um laser de 2 kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000) com comprimento de onda de 1,07 μm .

Antes da realização do processo de soldagem, as chapas de inox e de cobre cromo foram lixadas com a lixa de granulometria 600 μ . O tipo de junta utilizado na soldagem foi sobreposta. A liga de aço inox foi sobreposta 10 mm sobre a liga de cobre cromo C18200, conforme Figura 1. Sendo assim, o feixe de laser incidiu diretamente sobre a chapa de inox AISI 304 e o foco do laser foi posicionado na superfície superior da chapa de inox.

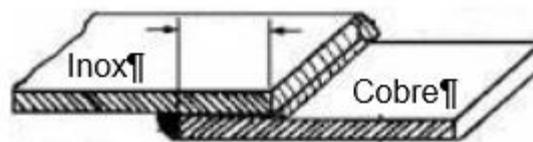


Figura 1. Desenho representativo de junta sobreposta.



A fim de se verificar qual era a melhor condição de soldagem, foi realizada uma carta de processo de soldagem. A carta de processo associou dois parâmetros de soldagem (velocidade e potência), a uma determinada qualidade da solda (parâmetros de saída). Os parâmetros de saída foram a penetração e o aspecto superficial. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de processos utilizados.

Tabela 4. Carta de processo de soldagem.

Identificação dos corpos de prova	Potência (W)	Velocidade de soldagem (m/min)
CDP_1000W_1m_min	1000	1
CDP_1200W_1m_min	1200	1
CDP_1300W_1m_min	1300	1
CDP_1400W_1m_min	1400	1
CDP_1200W_1,5m_min	1200	1,5
CDP_1200W_0,5m_min	1200	0,5

2.2 Embutimento

Foi utilizada a resina fenólica baquelite. O processo de embutimento foi a quente e a vácuo. Após as peças serem embutidas, as amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 4.

2.3 Lixamento

O equipamento utilizado foi uma politriz da marca AROTEC, modelo AROPOL 2V. As lixas utilizadas eram da marca 3M. e a sequência de lixas utilizadas foi de 220 a 1200 μ .

2.4 Polimento

O polimento foi realizado após a etapa de lixamento das peças, sendo utilizado também a politriz AROTEC, modelo AROPOL 2V. As peças foram polidas com o pano especial de polimento e pasta de diamante de 6 μ ; 3 μ ; 0.5 μ e 0.25 μ , da marca AROTEC.

2.5 Ataque químico

Após o término do polimento, as peças foram uma a uma atacada quimicamente. A solução utilizada foi a de cloreto férrico (5 partes de $FeCl_3$; 50 partes de HCl ; 100 partes de água destilada). O tempo de ataque foi de 10 segundos. Em seguida, a amostra foi lavada com água corrente, álcool etílico, e seca com jatos de ar comprimido.

2.6 Metalografia

As análises foram realizadas em um microscópio óptico ZEISS. Neste equipamento foram obtidas as imagens das peças atacadas pelo cloreto férrico.

2.7 Microdureza

Foi utilizado um microdurometro Vicker.. A carga utilizada foi 50gf e o tempo de endentação foi de 9s. A dureza foi medida primeiramente por toda a extensão da solda (zona fundida - ZF, zona termicamente afetada -ZTA e do Metal Base -MB) para ser analisada a influência do processo de soldagem em cada material. A distância de uma medida para outra foi de 0.001 mm.

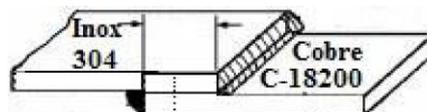


Figura 2 – Sentido da medição da Microdureza Vickers nos cordões de solda.

2.6 Ensaio de Tração

Foi realizado o ensaio de tração em 4 CDPs com os parâmetros de soldagem escolhido como o mais apropriado (1300W_1m_min). A velocidade do ensaio foi de 1 mm/min, o comprimento da amostra era de 50 mm e a largura de 10 mm.



3. Resultados

A Figura 3 apresenta as micrografias das seções transversal das soldas. Verifica-se que a condição CDP_1000W_1m_min não produziu união metalúrgica entre o aço e o cobre. Na Figura 3b foi observado uma pequena união, com poro central. Na condição CDP_1200W_1m_min (Figura 3d) a união fez-se mais visível e as zonas ricas em Fe e Cu são visíveis na Figura 3e. A partir desta condição, tanto diminuindo a velocidade de soldagem para 0,5 m/min (Figuras 3g, 3h e 3i) quanto aumentando a potência para 1300 W (Figuras 3j, 3k e 3l) foi obtido boa mistura de fases.

Não foram observadas trincas ou porosidades na extensão da seção transversal das soldas apresentadas na Figura 3.

O gráfico da Figura 4 correlaciona o aporte térmico com a penetração para as diferentes condições de soldagem. Observa-se que o aporte térmico se relaciona assintoticamente com a penetração. Pois, para pequenas variações no aporte térmico, a penetração aumenta substancialmente, vide a condição CDP_1000W_1_m_min quando comparado a condição CDP_1200W_1_m_min.

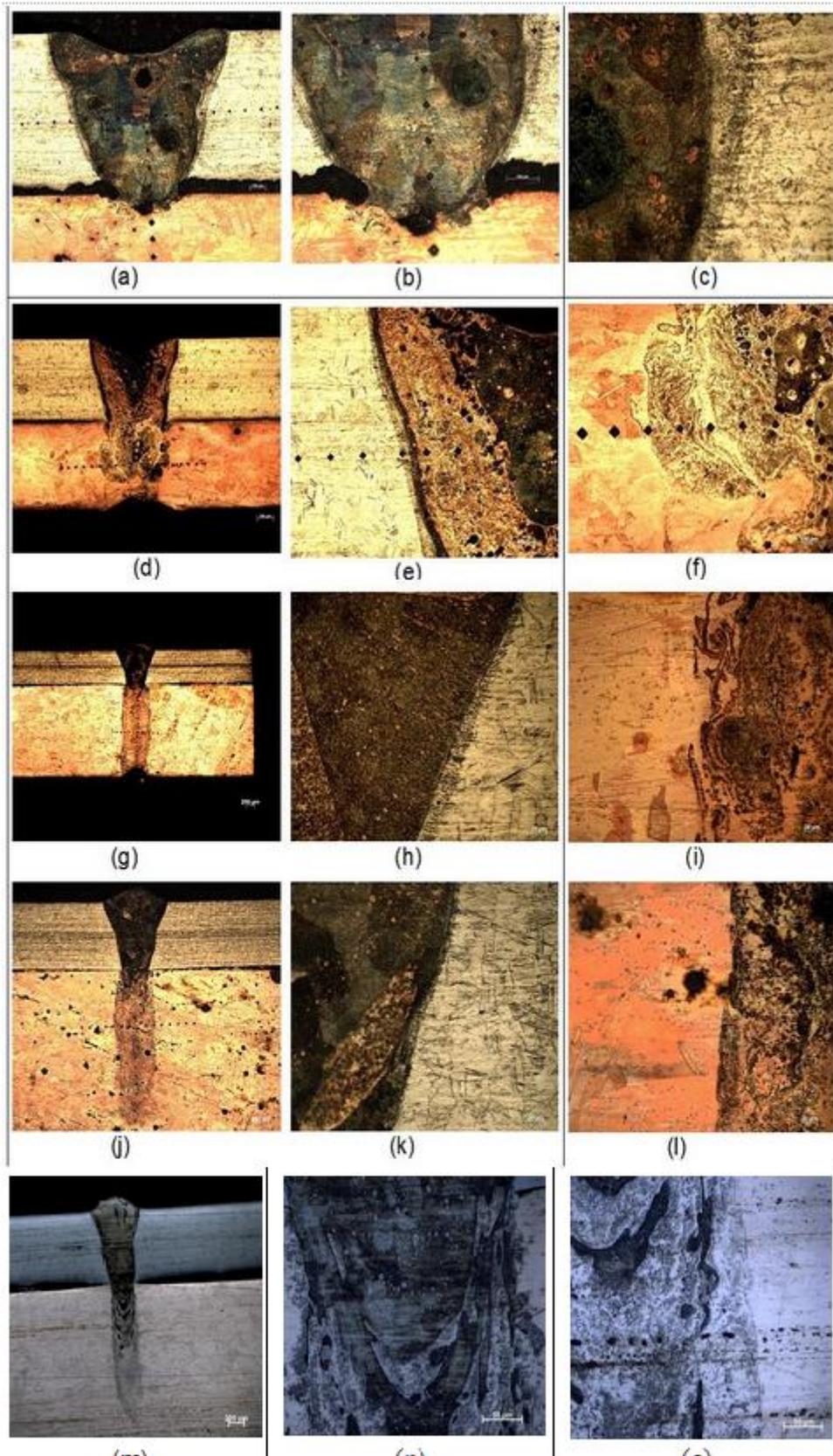


Figura 3. Micrografias das soldas dissimilares de inox 304 com cobre cromo C18200:

a) Cordão de solda CDP_1000W_1m_min; b) Centro da solda CDP_1000W_1m_min; c) Interface ZF e MB do CDP_1000W_1.0m_min; d) Cordão de solda CDP_1200W_1m_min; e) Interface da ZF e MB do inox da CDP_1200W_1m_min; f) Interface da ZF e MB cobre-C18200 da CDP_1000W_1.0m_min; g) Cordão de solda CDP_1200W_0.5m_min; h) Interface ZF e MB inox do CDP_1200W_0.5m_min; i) Interface ZF e MB do cobre C18200 da CDP_1200W_0.5m_min; j) Cordão de solda CDP_1300W_1m_min; k) Interface da ZF e MB do inox do CDP_1300W_1m_min; l) Interface ZF e MB do cobre C18200 da CDP_1300W_1.0m_min; m) Cordão de solda CDP_1200W_1.5m_min; n) Centro da solda CDP_1200W_1.5m_min; o) Interface ZF e MB do inox da CDP_1200W_1.5m_min; p) Cordão de solda CDP_1400W_1m_min; q) Interface da ZF e MB do cobre C18200 do CDP_1400W_1m_min; r) Interface ZF e MB do da CDP_1400W_1.0m_min.

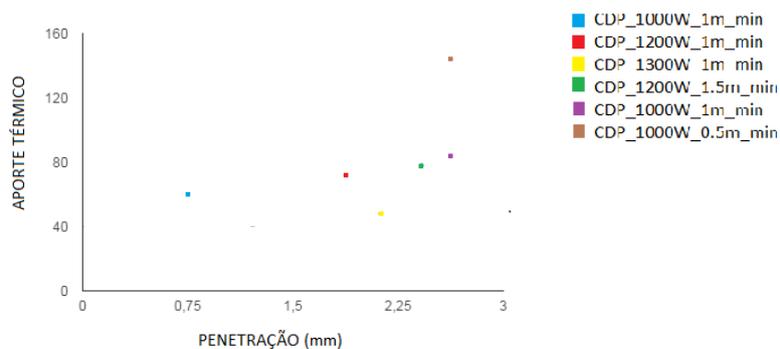


Figura 4. Gráfico correlacionando aporte térmico e penetração.

A Figura 5 apresenta os valores de dureza Vickers ao longo do sentido da penetração. Observa-se na Figura 5 que a dureza diminui ao longo da penetração, uma vez que as medidas se iniciam na chapa de inox e terminam na chapa de cobre cromo C18200. A dureza na solda na região do inox é menor do que a encontrada no inox longe da fusão (metal base). O cobre tem efeito austenitizante na estrutura do ferro, portanto, há a tendência de se observar austenita na região solidificada do inox, com muito pouca ou nenhuma ferrita. Isto explica os valores baixos de dureza na zona fundida do inox.

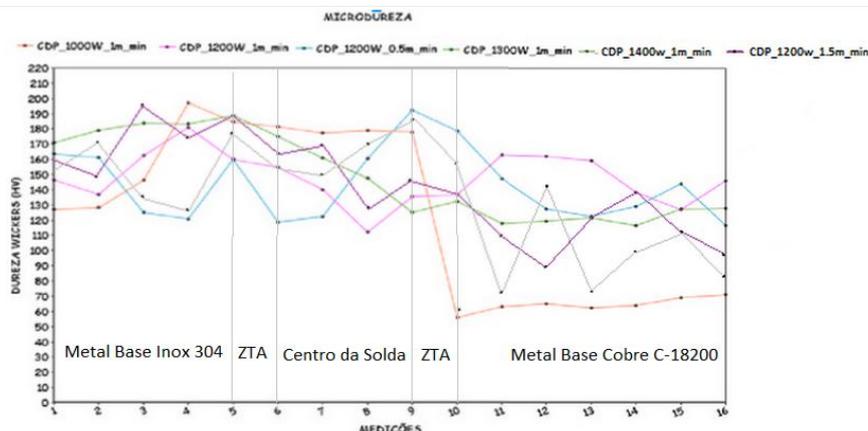


Figura 5 - Microdureza Vickers referente aos cordões de solda.

Nota-se na Figura 5 que, para condição CDP_1000W_1m_min e CDP_1400W_1m_min, o perfil de dureza apresenta uma queda brusca após a região de transição do inox com cobre cromo. Isso ocorre, uma vez que nessa condição a energia de soldagem foi insuficiente para fundir completamente as duas chapas. A dureza apresentada na região cobre cromo C18200 é cerca de 60 HV. No entanto, esse valor é abaixo do valor encontrado para a dureza do metal base do cobre cromo. Provavelmente, houve calor suficiente para solubilizar a fase cromo nos grãos, mas sem tempo suficiente para precipitação no estado sólido. Portanto, o amolecimento pode ter acontecido por perda de precipitados de cromo.

Nas condições CDP_1200W_1m_min, CDP_1200W_0,5_m_min, CDP_1300W_1m_min e CDP_1200W_1.5m_min, observa-se uma oscilação nas medidas de dureza ao longo do perfil. Essa oscilação ocorre devido à dissolução incompleta das fases na zona fundida. Como se vê na Figura 3, as zonas fundidas apresentam glóbulos de cobre na linha do inox.

Após a análise dos resultados acima, tomou-se como parâmetros otimizada de soldagem os utilizados para a soldagem do CDP_1300W_1m_min, potência de 1300W e velocidade de 1m/min. As soldas obtidas nessa condição, apresentaram excelente aspecto visual, qualidade



metalúrgica, formato dos cordões, baixo aporte térmico e penetração satisfatória, quando comparado as demais condições de soldagem.

Sendo assim, foram realizados ensaios de tração em 4 CDPs da condição 1300W_1m_min, vide Figura 7. Nota-se, na Figura 7, que a tensão máxima média e a deformação máxima média em tração dos corpos de prova ensaiados foi de aproximadamente 80 MPa e 1,4%, respectivamente. Com relação ao aspecto da fratura dos corpos de prova, observa-se que os mesmos cisalharam e romperam-se sempre na região da zona fundida.

Como a tensão máxima média foi 14% da tensão máxima da liga de cobre cromo (530 MPa). E está deveria ser equivalente à tensão da liga de menor resistência (cobre C18200) ou no máximo cerca de 20% menor, conclui-se que as condições de soldagem tidas como ideais precisam ser revistas.

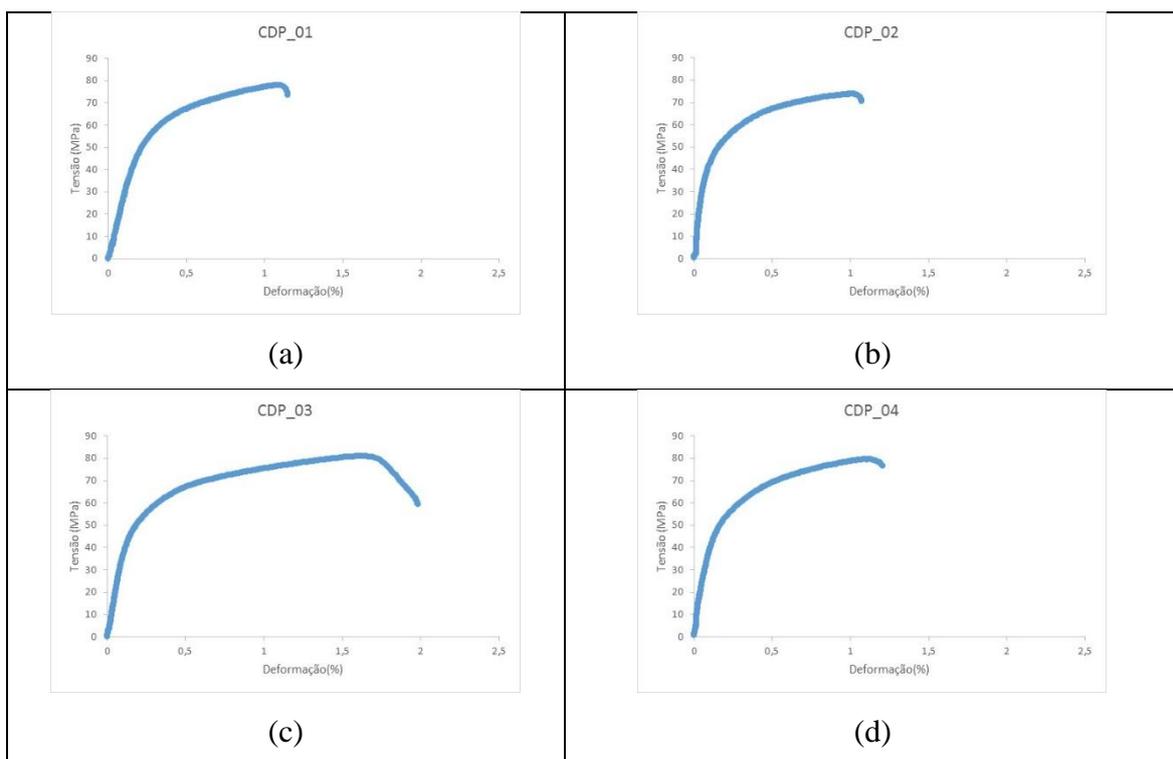




Figura 7. Ensaio de tração das soldas dissimilares de inox 304 com cobre cromo C18200 com parâmetros de 1300W de potência e 1_m_min de velocidade.

4. Divulgação dos Resultados

Os resultados da presente pesquisa serão divulgados em uma apresentação Oral no 15º ENEMET, que compõe a ABM Week, que será realizado no período de 17 a 20 de Agosto de 2015, no Rio de Janeiro.

5. Conclusões

Após a realização das análises das soldas entre o aço inoxidável 316L e da liga cobre cromo C18200, foi possível concluir que:

As melhores condições de soldagem, considerando qualidade metalúrgica, formato dos cordões e penetração é aquela com potência de 1300 W e 1 m/min.

O perfil de dureza obtido nas condições otimizadas mostrou-se uniforme em profundidade, o que pode ser um indicativo de boas propriedades mecânicas da junta.

A resistência em tração média do conjunto soldado na condição 1300 W e 1 m/min não foi satisfatória, uma vez que está foi de 14 % em relação a resistência da liga de cobre cromo C18200.

Referências

[1] Almeida, J. da E. “Especificação do sistema de partida da turbina da turbobomba do Motor Foguete a Propelente Líquido L75”, IAE, São José dos Campos, 2011. (Relatório Técnico 003-430000-B2001).



- [2] Santana JR. A. Investigation of Passive Control Devices to Suppress Acoustic Instability in Combustion Chambers. 2008. 165f. Thesis (Doctor in science of Aeronautics and Mechanics Engineering). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [3] Almeida, J. da E. Motor Foguete a Propelente Líquido L75. Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento, São José dos Campos, 2012.
- [4] Aerospace Technology and Management, Vol.1, No.1, pp.99-106. doi: 10.5028/jatm.2009.010199106.
- [5] GAHUN, G. G., 1989, “Construction and design of Liquid Rocket Engines”, (in Russian), Moscow, Mashinostroenie Press, 424p.
- [6] Ribeiro, Rosinei Batista. Análise morfológica de pites em aços inoxidáveis austeníticos ABNT 304 e 310 submetidos à névoa salina. 249 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.
- [7] Ion, J. C. Laser Processing of Engineering Materials. Oxford: Elsevier, 2005. 556 p. ISBN 0 7506 6079 1.
- [8] Marques P. V. et al. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 363 p. ISBN: 85-7041-437-4.
- [9] AWS Handbook. Metals and Their Weldability. 7th ed. Miami: American Welding Society, 1982. v. 4, p. 434 - 472, ISBN 0-87171-218-0
- [10] ASM International Handbook. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, Metals Park: ASM International, 1990. v. 2
- [11] Lancaster, J.F. Metallurgy of welding. Cambridge: Abington Publishing, 1999. 446 p.
- [12] Lima, M. S. F. Lasers in material processing. In: Lasers in Chemistry: Influencing Matter. Weinheim: Edited by Maximilian Lackner, 2008. p.1195 - 1209, ISBN: 978-3-527-31997-8.



- [13] Steen, W. M. Laser material processing. 2nd ed. London: Springer. 2001. p.346. ISBN: 3-540-76174-8
- [14] Scotti, A.; REIS, R. P. Fundamentos da prática da soldagem a plasma. São Paulo: ABS, 2007, 152 p.
- [15] Carvalho, S. M. ; Lima, M. S. F. . Laser Beam Welding Tempered 300M Ultrahigh Mechanical Strength Steel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (Impresso), v. 34, p. 18-23, 2012.
- [16] Carvalho, S. M. ; Baptista, C. A. R. P. ; Lima, M. S. F. . Simulating the damage accumulation in aircraft bleed system ducts joined by laser and arc welding processes. Procedia Engineering,. Procedia Engineering, v. v. 10, p. 1322-1327, 2011.
- [17] Siqueira, G. Soldagem a laser autógena da liga de alumínio aeronáutico AA6013: Otimização de parâmetros e Análise microestrutural. 2007. 105f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.
- [18] Mai, T. A. and Spowage, A. C. Characterisation of Dissimilar Joints in Laser Welding of Steel-Kovar, Copper-Steel and Copper-Aluminium. Mater. Sci. Eng., A, 2004, 374: 224-233.
- [19] Tosto, S., Nenci, F., Hu Jiandong, G., Corniani, F., Pierdominici. Microstructure of copper–AISI type 304L electron beam welded alloy. Mater. Sci Technol, 19, 2003, 519-522.