



CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E INSPEÇÃO RADIOGRÁFICA DE UMA LUVA DE REDUÇÃO METÁLICA FABRICADA POR MADA (WAAM)

Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva, 1ª edição, de 30/11/2020 a 01/12/2020
ISBN dos Anais: 978-65-86861-62-4

CARVALHO; Cristhian Silva ¹, MENEZES; Marcy Saturno de ², WILL; Cristhian Ramos ³, FILHO; José Martins Diogo de Siqueira ⁴, RANIERI; Kratus ⁵

RESUMO

Resumo

Em outubro de 2019, foi instalada na Petrobras a primeira peça metálica fabricada por Manufatura Aditiva do Brasil: uma luva de redução roscada de 4 x 3 pol., em aço carbono e classe de pressão 300lb. O componente foi fabricado por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) pelo grupo LAPROSOLDA da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em uma cooperação técnico-científica entre a Petrobras e a Universidade. Para a aplicação segura da peça em ambiente operacional, ensaios mecânicos, metalográficos e inspeções por radiografia foram conduzidos de forma a assegurar as suas propriedades mecânicas e garantir a sua integridade física. Neste trabalho serão apresentados tanto a metodologia aplicada quanto os resultados obtidos no controle de qualidade final do componente.

1. Introdução

A luva de redução original, que foi reproduzida por MADA, é em ferro fundido maleável fabricada conforme a norma ASME B16.3 e ASTM A197. Já o novo componente foi fabricado em aço carbono manganês, consumível AWS 5.18 ER70S-6, e possui pequenas variações geométricas, em relação à original, que otimizaram a fabricação sem comprometer o seu desempenho mecânico. Ambos os componentes são galvanizados conforme a norma ASTM A123. A figura 1 apresenta a peça fabricada em três estágios distintos: conforme depositada, após a usinagem e após a galvanização.

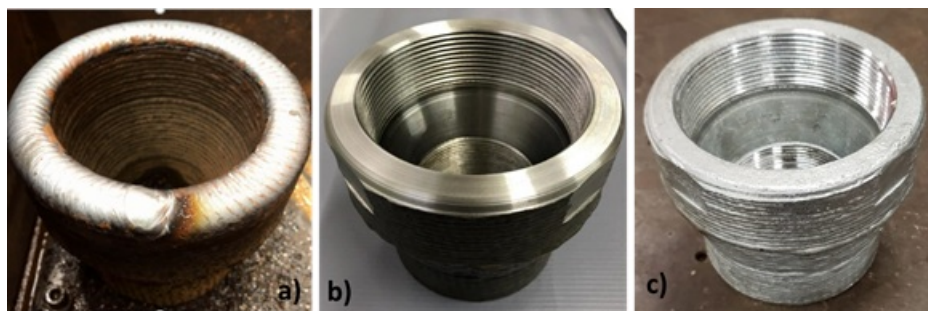


Figura 1 - A peça em várias etapas de fabricação: a) após a deposição - espessura média de 20mm e 140mm de comprimento; b) após a usinagem; c) após a galvanização - espessura média de 16 mm e 120 mm de comprimento.

¹ Petrobras, cristhian@petrobras.com.br

² Petrobras, saturno@petrobras.com.br

³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br

⁴ Petrobras, jmdiago@petrobras.com.br

⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br

2. Matérias e Métodos

Para viabilizar os ensaios mecânicos de caracterização, três peças (amostras) adicionais foram fabricadas com os mesmos parâmetros da peça principal, permitindo que fossem extraídos corpos de prova representativos de cada região: diâmetro maior (4 pol), cônica e diâmetro menor (3 pol). A figura 2 apresenta as 3 amostras utilizadas.

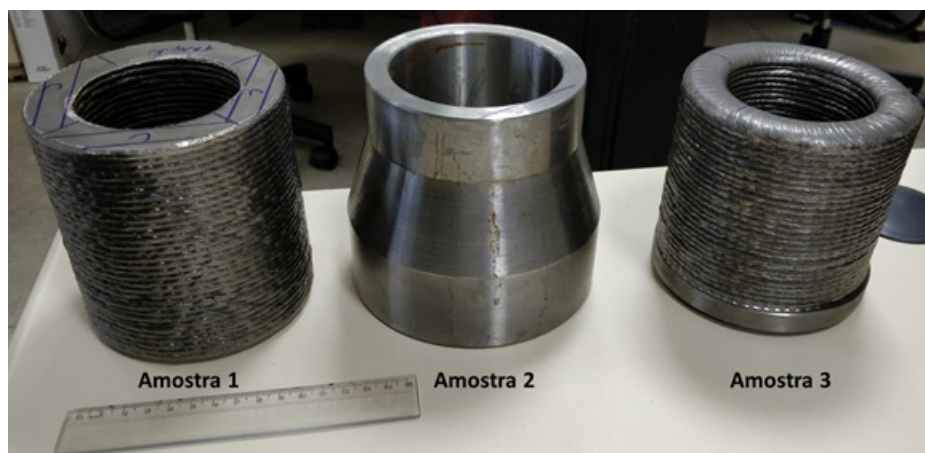


Figura 2 - Foto comparativa das três amostras utilizadas para a caracterização mecânica: Amostra 1 - tubo com 4 pol. de diâmetro; Amostra 2 - peça cônica usinada após a deposição; Amostra 3 - tubo com 3 pol. de diâmetro.

Foram realizados ensaios de tração (longitudinal e transversal) e de impacto *Charpy* nas amostras conforme a norma ASTM A370. Em função da dimensão limitada da Amostra 2, nesta realizou-se apenas ensaios de impacto Charpy. As direções e as posições de cada *set* de corpos de prova *Charpy*, retirados das 3 amostras, podem ser visualizados no desenho esquemático da figura 3 a seguir. Para os ensaios de tração transversal, Amostras 1 e 2, foram utilizados corpos de prova *subsize*, conforme estabelecido pela norma ASTM A370. Todos os ensaios de impacto *Charpy* foram conduzidos a uma temperatura de teste de 0°C (zero grau *Celsius*). Ressalta-se que a peça original em ferro fundido (ASTM A197) não possui a exigência de ensaio de impacto.

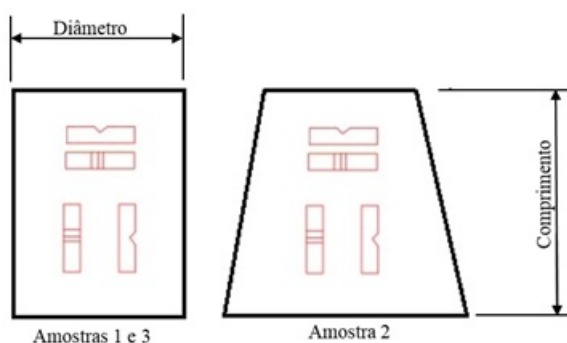


Figura 3 - Desenho esquemático mostrando as direções e posições do entalhe de cada set de corpos de prova *Charpy* nas três amostras. Cada corpo de prova representado corresponde a um conjunto (*set*) de 3, num total de 12 corpos de prova *Charpy* por amostra.

Além dos ensaios mecânicos, tração e *Charpy*, foram realizadas micrografias em regiões selecionadas das três amostras representativas, com ataque de Nital 2% e ampliação em microscópio óptico, a fim de determinar os microconstituintes predominantes.

¹ Petrobras, cristhian@petrobras.com.br
² Petrobras, saturno@petrobras.com.br
³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br
⁴ Petrobras, jmdioigo@petrobras.com.br
⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br

Uma inspeção completa por radiografia digital foi realizada na luva de redução acabada, ou seja, após a etapa de galvanização a quente. O objetivo dessa inspeção foi garantir que a peça estava isenta de defeitos ou indicações relevantes que poderiam comprometer a sua integridade e desempenho. Os parâmetros do ensaio radiográfico são apresentados na tabela 1. Foi utilizado um detector (placa) de fósforo azul reutilizável, em substituição aos filmes radiográficos convencionais.

Tabela 1 – Parâmetros do ensaio radiográfico.

Tensão:

150 kV

Corrente:

3 mA

Tempo exposição:

40s

DFF:

700mm

IQI:

6FE DIN

Arame essencial:

W 11 (ISO 17636-2, Anexo B)

Detector:

Placa de fósforo azul 240 x 111 mm

Nº de setores:

6 (60 graus)

Sobreposição:

20 mm

O arranjo radiográfico empregado foi o Parede simples Vista Simples (PSVS) como pode ser observado na figura 4. O detector de fósforo foi inserido no interior da peça, e a cada exposição a peça era girada em 60°, com uma sobreposição de 20 mm. O ensaio radiográfico foi executado conforme os critérios da norma ISO 17636-2 e do código ASME BPVC, seção V e critérios de aceitação conforme o código ASME B31.3.

¹ Petrobras, cristian@petrobras.com.br

² Petrobras, saturno@petrobras.com.br

³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br

⁴ Petrobras, jmdioigo@petrobras.com.br

⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br



Figura 4 – Arranjo radiográfico (PSVS). Aparelho YXLON 225 kV e Scanner DURR HD CR35 NDT.

3. Resultados e Discussão

Os resultados dos ensaios de tração executados nas amostras 1 e 3 são apresentados na tabela 2 e 3, respectivamente. Nota-se que o menor valor de Limite de escoamento (LE) encontrado foi de 359Mpa, Amostra 1, na direção transversal, e o menor Limite de Resistência (LR) obtido foi de 503Mpa, Amostra 1, na direção longitudinal. Os valores de alongamento e redução de área observados indicam que o material possui uma boa ductilidade. Para efeito de comparação, os Limites de escoamento e de Resistência mínimos especificados para a Luva de Redução original em ferro fundido é de 200 MPa e 250 MPa, respectivamente. Portanto, a peça fabricada por MADA supera, em muito, os requisitos de resistência especificados para a peça original.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de tração da Amostra 1 (diâmetro de 4 pol.).

Identificação

Direção

Diâmetro do cp (mm)

Área da Seção do cp (mm²)

LE (Mpa)

LR (Mpa)

Along. (%)

Redução de área (%)

cp 1

Transv.

6,24

30,58

¹ Petrobras, cristhian@petrobras.com.br

² Petrobras, saturno@petrobras.com.br

³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br

⁴ Petrobras, jmdioogo@petrobras.com.br

⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br

359

512

37

77

cp 2

Long.

12,52

123,11

361

503

35

76

cp 3

Long.

12,52

123,11

370

515

33

77

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de tração da Amostra 3 (diâmetro de 4 pol.).

Identificação

Direção

Diâmetro do cp (mm)

Área da Seção do cp (mm²)

LE (Mpa)

LR (Mpa)

Along. (%)

Redução de área (%)

cp 1

Transv.

6,17

29,90

375

538

36

76

cp 2

Long.

¹ Petrobras, cristhian@petrobras.com.br

² Petrobras, saturno@petrobras.com.br

³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br

⁴ Petrobras, jmdioogo@petrobras.com.br

⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br

12,52

123,11

379

537

33

77

cp 3

Long.

12,52

123,11

385

544

33

77

Os resultados dos ensaios de impacto Charpy das três amostras são apresentados na tabela 4. O menor valor de energia médio obtido foi de 150J, Amostra 2, na direção transversal. Considerando-se que valor médio exigido pelo código ASME B31.3 para o aço carbono (PN-1) é de 21J, na temperatura de interesse, a peças fabricada por MADA apresentaram uma ótima medida de tenacidade ao impacto (Charpy).

Tabela 4 - Resultados dos ensaios Charpy das Amostras 1,2 e 3.

Número da Amostra

Identificação

Orientação dos cps

Direção do entalhe¹

Valor médio (J)

Valor mínimo (J)

Expansão lateral média (mm)

1

set 1

transversal

longitudinal

194

166

2,43

set 2

transversal

radial

168

153

2,37

¹ Petrobras, cristhian@petrobras.com.br

² Petrobras, saturno@petrobras.com.br

³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br

⁴ Petrobras, jmdioogo@petrobras.com.br

⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br

set 3

longitudinal

circunferencial

270

221

2,44

set 4

longitudinal

radial

207

198

2,53

2

set 5

transversal

longitudinal

184

161

2,35

set 6

transversal

radial

150

138

2,24

set 7

longitudinal

circunferencial

238

216

2,51

set 8

longitudinal

radial

184

156

2,37

3

set 9

¹ Petrobras, cristhian@petrobras.com.br

² Petrobras, saturno@petrobras.com.br

³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br

⁴ Petrobras, jmdioogo@petrobras.com.br

⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br

transversal

longitudinal

222

158

2,33

set 10

transversal

radial

213

165

2,34

set 11

longitudinal

circunferencial

286

278

2,33

set 12

longitudinal

radial

305

278

2,29

Nota 1: A direção do entalhe refere-se à sua orientação em relação à linha de centro da amostra (ver figura 3).

Os resultados de micrografia são apresentados na figura 5. Nota-se que as três amostras apresentaram uma microestrutura dúctil (ferrítica-perlítica), com granulometria fina típica de metal de solda revenido por camadas subsequentes.



Figura 5 - Microestrutura típica das amostras com ampliação de 500x e ataque de Nital 2%. As três amostras apresentaram uma microestrutura composta por ferrita e perlita fina.

As figuras de 6 a 11 apresentam as imagens radiográficas da peça acabada em cada um dos 6 setores de exposição, variando-se gradativamente (em 60°) da posição 0° até a posição 300°. A figura 12 mostra uma foto da peça com a identificação dos setores de exposição equidistantes em 60°. Nenhuma indicação relevante foi revelada segundo o critério de aceitação do ASME B31.3 - Tabela 341.3.2. Alguns pontos e fragmentos de linhas que aparecem nas imagens são ruídos originados da reutilização da placa de fósforo ao longo de sua vida útil.

¹ Petrobras, cristhian@petrobras.com.br

² Petrobras, saturno@petrobras.com.br

³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br

⁴ Petrobras, jmdioigo@petrobras.com.br

⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br

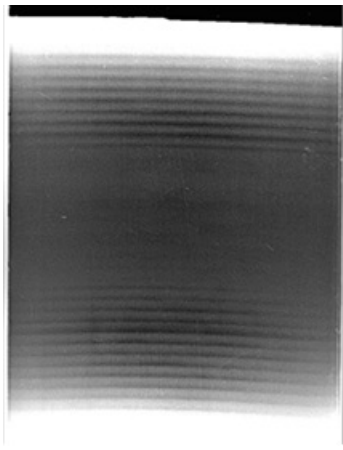


Figura 6 - Imagem radiográfica do setor 1 - posição 0°.

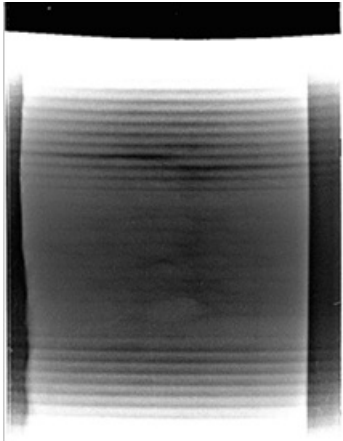


Figura 7 - Imagem radiográfica do setor 2 - posição 60°.

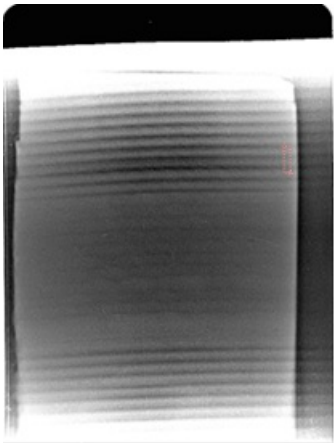


Figura 8 - Imagem radiográfica do setor 3 - posição 120°.

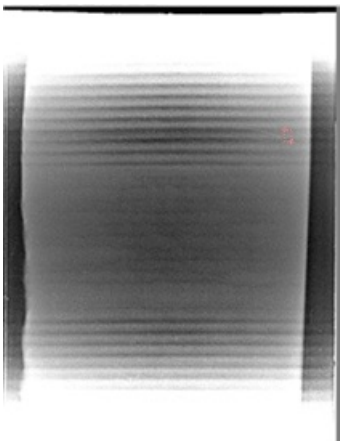


Figura 9 - Imagem radiográfica do setor 4 - posição 180°.

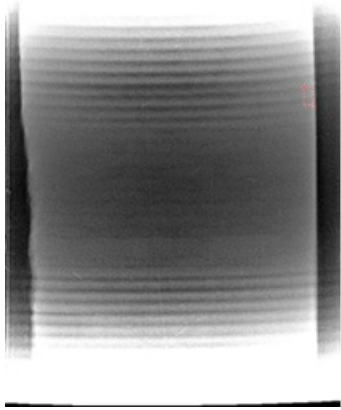


Figura 10 - Imagem radiográfica do setor 5 - posição 240°.

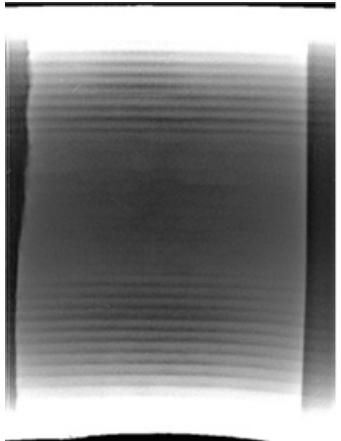


Figura 11 - Imagem radiográfica do setor 6 - posição 300°.



Figura 12 - Fotografia da luva de redução mostrando a identificação dos setores (posições) de exposição. Em detalhe a identificação do setor 6 (posição 300°).

4. Conclusões

As propriedades mecânicas obtidas pelos ensaios de tração, nas amostras representativas da peça, superaram em muito as requeridas, pela norma ASTM A-197, para uma luva convencional em ferro fundido maleável. Em relação à energia Charpy, os valores obtidos se encontram bem acima do requerido pelo código ASME B31.3 para aço carbono ou carbono manganês.

A microestrutura da peça encontrada, ferrita e perlita fina, é típica de metal de solda de um aço C-Mn revenido, sem presença de fases frágeis e com granulometria refinada. Tal microestrutura corrobora com os ótimos resultados obtidos nos ensaios de impacto.

Os ensaios radiográficos não evidenciaram a presença de indicações relevantes, conforme os critérios de aceitação do código ASME B31.3 - Tabela 341.3.2.

Por fim, a escolha da peça e os resultados obtidos nesse estudo permitem concluir que a técnica

¹ Petrobras, cristhian@petrobras.com.br

² Petrobras, saturno@petrobras.com.br

³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br

⁴ Petrobras, jmdiego@petrobras.com.br

⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br

de MADA apresenta um grande potencial para fabricação de peças de geometria simples, podendo ser um divisor de águas para a gestão de inventário do setor de Óleo e Gás.

5. Referências Bibliográficas

- [1]. ASME B16.3 - Malleable Iron Threaded Fittings: Classes 150 and 300, Ed. 2016.
- [2]. ASTM A-197 - Standard Specification for Cupola Malleable Iron, Ed. 2019.
- [3]. ASTM A123 - Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products, Ed. 2017.
- [4]. AWS 5.18 - Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. Ed. 2017.
- [5]. ASTM A-370 - Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, Ed. 2016.
- [6]. ASME B31.3 - Process Piping, Ed. 2018.
- [7]. ISO 17636-2 - Non-destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 2: X and gamma-ray techniques with digital detectors, Ed. 2013.
- [8]. ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section V - Nondestructive Examination, Ed. 2017.

PALAVRAS-CHAVE: Caracterização Mecânica, Radiografia, MADA, WAAM.

¹ Petrobras, cristhian@petrobras.com.br

² Petrobras, saturno@petrobras.com.br

³ Petrobras, crwill@petrobras.com.br

⁴ Petrobras, jmdioogo@petrobras.com.br

⁵ Petrobras, kratus@petrobras.com.br