

**ENDs – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS – APLICADOS À
FABRICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO**

**João Bosco Santini Pereira
PETROBRAS S. A.**

**Renato Bernardes
PETROBRAS S. A.**

**Trabalho apresentado na 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos
Salvador/BA, 19 a 21 de Agosto de 2002**

SINÓPSE

No projeto dos vasos de pressão é especificado um determinado nível de inspeção para o controle de qualidade, definido na folha de dados do equipamento, e expresso pelo tipo de exame radiográfico requerido na fabricação.

Em função da extensão definida para a radiografia, parcial ou total, o código de projeto e construção define a eficiência das juntas soldadas, o que influi diretamente no valor das tensões máximas de trabalho admitidas no dimensionamento do vaso de pressão.

Sabidamente a radiografia não é a única inspeção a ser realizada no vaso de pressão, para assegurar a qualidade da fabricação, dentre outros motivos porque somente as juntas soldadas de topo são possíveis de radiografar.

Portanto, na realidade, o exame radiográfico previsto no código de projeto e construção corresponde a um “sistema de controle da matéria prima e das etapas de fabricação”.

Este sistema é executado através dos Ensaio não destrutivos –ENDs, desde o fornecimento dos materiais construtivos até ao final da fabricação do vaso de pressão, o que inclui as etapas de conformação das chapas, calandragem, prensagem, rebordamento, furação, mandrilhamento, soldagem, até ao tratamento térmico de alívio das tensões residuais e teste de pressão.

A finalidade precípua deste trabalho é especificar quais os ENDs aplicáveis à fabricação de vasos de pressão, dependendo do serviço na unidade de processamento da planta industrial.

Assim, a partir do nível de inspeção radiográfica, parcial ou total, prescrito no código de projeto e construção, é selecionado o conjunto de ENDs e testes para a aceitação do vaso de pressão, compreendendo as fases de aquisição da matéria prima, etapas de fabricação, alívio térmico das tensões provenientes da fabricação e o teste de pressão de aceitação do vaso de pressão.

1. Introdução

O projeto mecânico dos vasos de pressão especifica um determinado nível de inspeção de fabricação, definido na folha de dados do equipamento, expresso pelo exame radiográfico requerido na fabricação.

Em função da extensão da radiografia, parcial ou total, a ser aplicada no vaso, o código de projeto e construção define a eficiência estrutural das juntas soldadas de topo. Essa eficiência de solda influencia diretamente o valor das tensões máximas admitidas, a considerar no dimensionamento das partes pressurizadas do equipamento.

A radiografia não é a única inspeção, a ser realizada no vaso, que vai garantir a qualidade da fabricação, pois nem todas as soldas das partes sob pressão são radiografáveis.

Assim, na realidade, a extensão do exame radiográfico, definido no projeto, determina um “sistema de inspeção da matéria-prima e das etapas de fabricação”, que são os ENDS – Ensaios ou Exames Não Destrutivos – a serem executados no fornecimento dos materiais construtivos e durante a fabricação, sendo aplicáveis às etapas:

- a) Materiais de fabricação: chapas, tubos, forjados, fundidos, consumíveis de soldagem;
- b) Componentes pré-fabricados adquiridos de terceiros: tampos, flanges, tubos e acessórios de tubulação, válvulas, parafusos e porcas, barras e perfis;
- c) Operações de fabricação do tipo usinagem, prensagem, calandragem, dobramento e rebordeamento;
- d) Ligações soldadas, aparafusadas, roscadas e mandriladas, executadas durante a fabricação e montagem do equipamento.

Acresçam-se também os ensaios próprios, para as etapas de tratamento térmico de alívio das tensões residuais da fabricação e do teste de pressão dos equipamentos.

O requisito mínimo para a inspeção das soldas pressurizadas do corpo de vasos de pressão é a radiografia parcial ou por pontos (“spot X-ray”), à medida que o serviço do equipamento na planta de processo é especial ou crítico, os requisitos de controle da qualidade da fabricação se tornam mais complexos.

Assim, considerando o tipo de inspeção radiográfica, parcial ou total, prescrito para as soldas de topo do corpo do vaso de pressão, é estabelecido um conjunto de ENDS e testes que se aplicam a todas as fases da fabricação e montagem do equipamento.

2- Aplicação

Para o fornecimento de um vaso de pressão, o fabricante deve emitir o “plano de fabricação e inspeção” e o “mapa de soldas”, onde são definidos os ENDS que serão aplicados, durante a fabricação, os parâmetros de controle, os procedimentos de execução e os critérios de aceitação.

Os ENDS normalmente utilizados são os seguintes:

VI: visual e dimensional;
ME: medição de espessura;
RT: radiografia;
LP: líquido penetrante;
PM: partículas magnéticas;
UT: ultra-som;
Dureza;
Visual e martelamento de refratários;
Estanqueidade de chapas de reforço de bocais.

3. Definição

3.1. ENDS – Ensaios Não-Destrutivos comumente utilizados no controle da qualidade da fabricação de vasos de pressão

SIGLA	DESCRIÇÃO	EXECUÇÃO	ACEITAÇÃO
RT	Exame radiográfico a- Total ou “full X-ray” b- Parcial ou “spot X-ray”	ASME Sec V	a- ASME VIII Div 1 UW-51 b- ASME VIII Div 1 UW-52
UT	Exame por ultra-som(1)	ASME Sec V	ASME VIII Div 1 App. 12
PM	Exame por partículas magnéticas	ASME Sec V	ASME VIII Div 1 App. 6
LP	Exame por líquido penetrante(2)	ASME Sec V	ASME VIII Div 1 App. 8
VI	Exame visual	ASME Sec V	Isento de defeitos
ME	Medição de espessura	PF	Critério próprio
EE	Exame de Estanqueidade	PF	Critério próprio
MD	Medição de dureza	PF	Critério próprio

Obs: PF – pelo fabricante.

(1)- não aplicável para espessuras menores que 13 mm e para aço inoxidável;

(2)- teor máximo de cloretos 10 ppm na solução

3.2. Ensaio e testes aplicáveis à matéria prima de fabricação

Matéria prima	Tipo de ensaio ou teste	Norma ASME SEC II aplicável
Chapas	Propriedades mecânicas Ultra-som	SA-20 SA-435
Chapas “cladeadas”	Propriedades mecânicas Ultra-som	SA-20 SA-578
Tubos de troca térmica	“Eddy current” Campo remoto IRIS	Material não metálico Material metálico
Flanges e peças forjadas	Ultra-som	SA-388
Consumíveis de soldagem	Análise composição química Propriedades mecânicas	AWS

Notas:

- a- Para toda matéria prima devem ser apresentados os certificados de qualidade os materiais empregados, com os resultados da análise química, propriedades mecânicas e tenacidade.
- b- Na fábrica toda matéria prima deve ser submetida ao teste de identificação do material.

3.3. Equipamentos em Serviço Geral

São os equipamentos que operam com fluidos ou produtos que não acarretam qualquer processo especial de deterioração localizada ou perda de tenacidade, a saber:

- a) água, ar, vapor de baixa pressão, condensado;
- b) produtos químicos;
- c) nitrogênio;
- d) hidrocarbonetos em geral, sem contaminantes e abaixo de 200°C.

3.4. Equipamentos em Serviço Especial

São os equipamentos que operam com fluidos ou produtos específicos que determinam mecanismos de deterioração localizada ou acentuada e/ou em condições que provocam risco acentuado.

3.4.1. Serviços especiais de vasos de pressão e tubulações, em Refinarias de Petróleo, em função do tipo de ataque do fluido armazenado ou processado.

a- Meios que promovem a corrosão sob tensão após soldagem:

- * Aminas > 2% em peso;
- * Cáusticos > 2% em peso;
- * H₂S úmido em temperatura < 150°C e H₂S > 100 ppm peso: conforme NACE MR 0175;
- * Amônia em presença de água.

b- Meios que provoquem fragilização pelo Hidrogênio : HIC e SOHIC

- * H₂S úmido em temperatura < 150°C e H₂S > 100 ppm peso: conforme NACE MR 0175;

- c- Meios que provocam “empolamentos” pela presença de Hidrogênio: conforme API 941
 - * Fluidos com pressão parcial $H_2 > 7,0 \text{ kgf/cm}_2$ e temperatura $> 200^\circ\text{C}$;
 - d- Meios altamente corrosivos: taxas superiores a 1mm/ano:
 - * Enxofre $> 3\%$ peso em temperaturas $> 200^\circ\text{C}$;
 - * CO_2 úmido;
 - * Ácidos diluídos.
 - e- Meios altamente erosivos ou abrasivos:
 - * Catalisadores finos;
 - * Borras de coque;
 - * Vapor de alta pressão;
 - * Correntes de vapor em alta velocidade;
 - * Meios contendo hidrocarbonetos com acidez naftênica (0,5 mg KOH) em alta velocidade ou turbulência e alta temperatura ($> 200^\circ\text{C}$).
 - * Fluidos em escoamento bi-fásico.
 - f- Condições que provocam perda de propriedades mecânicas dos materiais:
 - * Risco de fratura frágil pela redução localizada da temperatura, no caso de depressurização brusca de gás natural, ou GLP, ou propeno em vazamento de bocal;
 - * Fragilização em temperaturas que levam a transformações metalúrgicas durante a operação com a redução da tenacidade a frio.
- 3.4.2. Serviços especiais de vasos de pressão e tubulações industriais, em Refinarias de Petróleo, função das condições críticas de operação:
- a- Equipamentos sujeitos à operação em situações anormais, de curta duração, superiores às condições de projeto:
 - * Disparo de temperatura ou de pressão ou de vazão;
 - * Risco de explosão interna;
 - * Risco de falhas do revestimento refratário.
 - b- Equipamentos com produtos inflamáveis em temperaturas acima de 200°C :
 - * Risco de “flasheamento” no vazamento para a atmosfera;
 - c- Equipamentos em baixas temperaturas ($< 15^\circ\text{C}$) e criogênicas ($< 0^\circ\text{C}$):
 - * Risco de fratura frágil;
 - d- Equipamentos que armazenam grandes volumes de produtos leves (butano, propano, etano, metano e suas misturas):
 - * Riscos de explosão;
 - e- Equipamentos com variação cíclica intensa das condições de operação: temperatura e/ou pressão:
 - * Risco de trincamento por fadiga;
 - f- Equipamentos contendo fluidos tóxicos ou poluentes, tipo benzeno, gás sulfídrico, etc, com limite de tolerância de 20 ppm para a exposição humana:

- * Risco de contaminação ambiental;
- * Risco à saúde e segurança do trabalhador;

g- Água desmineralizada para caldeira;

h.- Vapor d'água em alta pressão maior ou igual a 40 bar.

3.5. Níveis de inspeção radiográfica da fabricação

De forma geral o controle de fabricação é exercido nos seguintes níveis:

Tipo do Serviço do equipamento	Nível de Inspeção radiográfica	Necessidade do Tratamento térmico de alívio-TTAT-das tensões geradas na fabricação do equipamento
Serviço Geral	RT parcial	Não. Somente exigido para aço carbono acima de 38 mm de espessura e aço de baixa liga (Cr-Mo).
Serviço Especial	RT total	Sim.
Equipamento a ser submetido a teste de pressão pneumático	RT total	Sim.

4. Requisitos aplicáveis aos vasos de pressão com inspeção por radiografia parcial

Além da radiografia parcial ou por pontos das soldas de topo do corpo do vaso de pressão, devem ser executados:

4.1- Inspeção visual dos chanfros para solda nas chapas e componentes.

4.2. Exame por líquido penetrante em 100% das soldas de raiz, após goivagem, sempre que possível de ambos os lados em vasos construídos de aços liga Ni; aços inoxidáveis; metais e ligas não ferrosos.

4.3. Radiografar também os cruzamentos de soldas circunferenciais e longitudinais, as extremidades de soldas e os locais de acesso difícil para inspeção em operação.

4.4. Fazer radiografia total em soldas que fiquem sob chapas de reforço ou orelhas (“clips”) soldadas vaso.

4.5. Fazer exame de partículas magnéticas ou líquido penetrante nas seguintes regiões:

4.5.1. Em todas as soldas não radiografáveis, em toda a extensão, para os vasos construídos de aço carbono com exigências de impacto; aços liga C-Mo; aços liga Cr-Mo; aços liga Ni; aços inoxidáveis; metais e ligas de não ferrosos.

4.5.2. Nos locais de soldas provisórias, após a remoção, de dispositivos auxiliares de montagem e de fixação de termopares para a execução do TTAT.

4.5.3. Nas soldas de anéis de reforço e de olhais de içamento ao corpo de equipamento.

4.5.4. Em todas as soldas de acessórios internos e externos com o corpo, para os vasos de pressão de aços liga Ni, aços inoxidáveis, metais e ligas de não ferrosos.

4.5.5. Nas soldas de fixação dos suportes do equipamento e nas soldas de chapas de reforço em locais de suportes de tubulação e de plataformas.

4.5.6. Na superfície externa da região conformada das partes e componentes fabricados por rebordeamento e/ou prensagem.

4.6. Executar exames com ultra-som e partículas magnéticas ou líquido penetrante nesta sequência, em soldas de topo de fechamento e em soldas de topo de difícil acesso para a radiografia.

4.7. Verificar a espessura mínima dos tampos rebordeados e partes ou componentes prensados e, quando aplicável, a espessura da chapa de “clad” ou de “lining”.

4.8. Inspeção dos bocais e demais aberturas no corpo conforme item 6 “Inspeção de Bocais” deste procedimento.

5. Requisitos aplicáveis aos vasos de pressão com inspeção por radiografia total

Além da radiografia total das soldas de topo do corpo do vaso de pressão, devem ser executados:

5.1. Inspeção visual e por líquido penetrante ou partículas magnéticas dos chanfros de solda, de chapas e componente.

5.2. Exame por líquido penetrante em 100% do passe de raiz, após goivagem, sempre que possível de ambos os lados em vasos construídos de aços liga Ni; aços inoxidáveis; metais e ligas de não ferrosos.

5.3. Exame de ultra-som e exames de partículas magnéticas ou líquido penetrante, nesta sequência, nas seguintes regiões:

5.3.1. Em todas as soldas de topo de fechamento e nas soldas de topo de acesso difícil para radiografia;

5.3.2. Nos locais de soldas provisórias, após remoção, de dispositivos auxiliares de montagem e de fixação de termopares para a execução do TTAT;

5.3.3. Na superfície externa da região conformada das partes e componentes fabricados por rebordeamento e/ou prensagem.

5.4. Fazer exame de partículas magnéticas ou de líquido penetrante nas seguintes regiões:

5.4.1. Nas soldas de anéis de reforço e de olhais de içamento no corpo do equipamento;

5.4.2. Em todas as soldas de acessórios internos e externos com o corpo, para os vasos de pressão de aços liga Ni, aços inoxidáveis, metais e ligas de não ferrosos;

5.4.3. Nas soldas de fixação dos suportes do equipamento e nas soldas de chapas de reforço de locais de suportes de tubulação e de plataforma;

5.5. Verificação da espessura mínima dos tampos rebordeados, de partes ou componentes prensados e, quando aplicável, a espessura da chapa de “clad” ou de “lining”;

5.5. Inspeção dos bocais e demais aberturas no corpo conforme item 6 “Inspeção de Bocais”, deste procedimento.

6. Inspeção de bocais

A inspeção das ligações soldadas de bocais, bocas de inspeção, bocas de visita e bocais de descarte deve ser realizada durante a fabricação e montagem, conforme tabelas a seguir:

ENDs – EXAMES NÃO DESTRUTIVOS APLICÁVEIS			
BOCAL φ NOMINAL	LIGAÇÃO SOLDADA: PESCOÇO DO BOCAL X FLANGE DE PESCOÇO	LIGAÇÃO SOLDADA: PESCOÇO DO BOCAL X FLANGE SOBREPOSTO	LIGAÇÃO SOLDADA: PESCOÇO DO BOCAL X CORPO OU CHAPA “INSERT PLATE”
< 4”	Visual e dimensional LP solda de raiz (1) RT solda acabada LP solda acabada (2)	Visual e dimensional LP solda acabada	Visual e dimensional LP chanfro LP solda de raiz (1) LP solda acabada (2)
≥ 4”	Visual e dimensional LP chanfros LP solda de raiz (1) RT solda acabada LP solda acabada (2)	Visual e dimensional LP solda acabada	Visual e dimensional LP região do chanfro LP passe de raiz (1) UT solda acabada LP solda acabada (2)
ENDs - EXAMES NÃO DESTRUTIVOS APLICÁVEIS			
BOCAL φ NOMINAL	LIGAÇÃO SOLDADA: PESCOÇO DO BOCAL X CHAPA DE REFORÇO	LIGAÇÃO SOLDADA: CHAPA DE REFORÇO X CORPO	LIGAÇÃO SOLDADA: CHAPA “INSERT PLATE” X CORPO
< 4”	NA	NA	NA
≥ 4”	Visual e dimensional UT solda acabada LP solda acabada(2)	Visual e dimensional LP solda acabada (2) Teste de estanqueidade da chapa de reforço	Visual e dimensional LP região dos chanfros LP passe de raiz (1) RT solda acabada LP solda acabada (2)

NA: não aplicável

RT – Radiografia parcial ou total, a depender do definido no projeto mecânico do vaso

(1) Para vasos construídos de aços liga Ni; aços inoxidáveis; metais e ligas não ferrosos.

(2) Para vasos construídos de aço carbono com exigências de impacto; aços liga C-Mo; aços liga Cr-Mo; aços liga Ni; aços inoxidáveis; metais e ligas não ferrosos.

7. Seqüência de ENDS em vasos de pressão com ou sem tratamento térmico de alívio de tensos da fabricação – TTAT

7.1. Vasos de pressão sem TTAT:

7.1.1. ENDS conforme especificados para a fabricação nos itens 4, 5 e 6 anteriores;

7.1.2. Execução do teste hidrostático;

7.1.3. Após o teste hidrostático executar inspeção por partículas magnéticas ou líquido penetrante nos seguintes pontos críticos, interna e externamente, para vasos construídos de aço carbono com exigências de impacto; aços liga C-Mo; aços liga Cr-Mo; aços liga Ni; aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos; metais e ligas de não ferrosos.

- a) soldas de conexão dos bocais com o corpo;
- b) soldas de fixação do suporte do equipamento;
- c) soldas em transições e descontinuidades geométricas;
- d) cruzamento de soldas circunferenciais e longitudinais.

7.2. Vasos de pressão com TTAT:

7.2.1. Avaliar a necessidade de suportaçõ adicional do equipamento, antes de iniciar o TTAT;

7.2.2. Executar os END's conforme especificados para a fabricação nos itens 4, 5 e 6 anteriores;

7.2.3. Execução do TTAT;

7.2.4. Após o TTAT executar a inspeção por partículas magnéticas ou líquido penetrante nos seguintes pontos críticos, interna e externamente, para vasos construídos de aço carbono com exigências de impacto; aços liga C-Mo; aços liga Cr-Mo; aços liga Ni; aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos; metais e ligas de não ferrosos.

- a) soldas de conexão dos bocais com o corpo;
- b) soldas de fixação do suporte do equipamento;
- c) soldas em transições e descontinuidades geométricas;
- d) cruzamento de soldas circunferenciais e longitudinais.

7.2.5. Controle da dureza;

7.2.6. Execução do teste hidrostático;

7.2.7. Partículas Magnéticas ou Líquido Penetrante nos mesmos pontos críticos anteriores, após o teste hidrostático.

8. Requisitos complementares para a medição de dureza

8.1. A medição de dureza nas juntas soldadas deve ser feita sobre o cordão de solda acabado, na zona termicamente afetada e no metal base e também em locais de soldas provisórias, após a remoção e esmerilhamento.

8.2. Medir ainda em todos os locais da junta soldada onde ocorreu defasagem superior a 30°C, durante o período do patamar de TTAT; ou que tiverem TTAT localizado devido a reparos.

8.3. Locação dos locais de medição, no mínimo a cada 5 metros de extensão da junta soldada.

8.4. Em cada ponto realizar, no mínimo: duas medições no metal de adição, duas em cada ZTA, e uma no metal base, assumindo-se o maior valor medido em cada região. As medições serão no sentido longitudinal do cordão de solda.

9. Conclusão

O controle da qualidade de fabricação de vasos de pressão começa com os ensaios e exames na aquisição da matéria prima, continua através da inspeção durante a fabricação e se estende até aos testes de pressão para a aceitação do equipamento.

A criticidade do serviço de equipamento na planta de processo determina o nível de controle aplicável na fabricação.

A forma simplificada de categorizar a inspeção na construção do vaso de pressão, por radiografia parcial ou total, resume um sistema de controle da qualidade da matéria prima e das etapas da fabricação do equipamento.

O esquema proposto permite facilmente verificar se as fases de inspeção, listadas no Plano de fabricação e inspeção preparado pelo fabricante do vaso de pressão, atendem à confiabilidade esperada para o equipamento, e previamente, planejar o acompanhamento do equipamento durante a fabricação.