

## **Ensaio e avaliação por líquidos penetrantes em placas de bocais de elementos combustíveis na área nuclear**

### **Testing and evaluation by penetrating liquids in nozzle plates of fuel elements in the nuclear area**

DOI:10.34117/bjdv7n1-211

Recebimento dos originais: 05/12/2020

Aceitação para publicação: 10/01/2021

#### **Alexandre Roberto Soares**

Eng.º Me.

Mestrando em Engenharia Mecânica pela UNITAU

Instituições: Universidade de Taubaté - UNITAU1 e Indústrias Nucleares do Brasil S.A  
- INB2

Endereço: Rua Daniel Danielli, s/n, Taubaté-SP, Brasil, CEP: 12060-440

E-mail: alexandre.rsoares@unitau.br

#### **Wendell de Queiróz Lamas**

Professor Dr. da Escola de Engenharia de Lorena – EEL-USP

Endereço: Estrada Municipal do Campinho, s/n. Ponte Nova – Lorena - SP, Brasil  
Instituição: Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo – EEL-USP

E-mail: wendell.lamas@usp.br

#### **José Rubens Camargo**

Professor Dr. da Universidade de Taubaté - UNITAU

Instituição: Universidade de Taubaté – UNITAU1 e FATEC de Pindamonhangaba

Endereço: Rua Daniel Danielli, s/n, Taubaté-SP, Brasil, CEP: 12060-440

E-mail: jrubenscamargo@gmail.com

### **RESUMO**

A área nuclear brasileira é competência da União, monopólio constitucional. Duas empresas atuam no programa nuclear brasileiro além do órgão regulador, as Indústrias Nucleares do Brasil S.A. - INB responsável por produzir os EC - Elementos Combustíveis nucleares e a Eletronuclear responsável em operá-los. Os EC atendem a demanda das usinas de Angra 1 e Angra 2. Os EC são estruturas formadas de material nuclear e componentes estruturais para sustentação e resistência do EC. Os componentes estruturais são bocais, grades espaçadoras, tubos guia, etc. Observando os bocais, esses são montados e soldados a partir de placas de aço por EBW– *Electron Beam Welding* e as soldas são ensaiadas também por LP – Líquido Penetrante para verificação de descontinuidades, com o padrão ASME V. Neste estudo foram investigados ensaios de LP para placas de bocais soldadas, visando o controle de processo e níveis de qualidade. Os resultados por LP demonstram que os ensaios são válidos como ferramenta de avaliação da fabricação.

**Palavras-chave:** Nuclear, bocais, EBW, ASME V e LP.

## ABSTRACT

The Brazilian nuclear area is the competence of the Union, constitutional monopoly. Two companies operate in the Brazilian nuclear program in addition to the regulatory body, Indústrias Nucleares do Brasil S.A. - INB responsible for producing the EC - Nuclear Fuel Elements and Eletronuclear responsible for operating them. The EC meets the demand of the Angra 1 and Angra 2 nuclear plants. The ECs are structures formed of nuclear material and structural components for support and resistance of EC. The structural components are nozzles, spacer grids, guide tubes, etc. Observing the nozzles, these are assembled and welded from steel plates by EBW—Electron Beam Welding and the welds are also tested by PL – Penetrating Liquid for verification of discontinuities, with the ASME V standard. The results by PL demonstrate that the tests are valid as a manufacturing evaluation tool.

**Keywords:** Nuclear, nozzles, EBW, ASME V and PL.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria nuclear brasileira processa um grande volume de urânio natural enriquecido com o seu isótopo U-235 anualmente, chegando ao montante de centenas de toneladas. Esta produção é realizada exclusivamente pelas Indústrias Nucleares do Brasil SA – INB, empresa estatal que exerce o monopólio constitucional para a produção do combustível nuclear em território brasileiro. Tal produção visa suprir a demanda por elementos combustíveis para os reatores nucleares tipo PWR – *Pressurized Water Reactor* hoje operados no Brasil por outra empresa estatal, a Eletronuclear do grupo Eletrobrás. A Eletronuclear opera as usinas nucleares de Angra 1 e de Angra 2, futuramente de Angra 3. Ao se observar a fabricação do elemento combustível nuclear em si, em termos das plantas de produção, excetuando-se deste contexto a mineração e o enriquecimento que exige outros detalhamentos técnicos muito específicos, a produção divide-se basicamente em duas grandes áreas, a metalurgia do pó de UO<sub>2</sub> (dióxido de urânio) para a produção de pastilhas e a fabricação metal mecânica para a montagem das varetas combustíveis e posteriormente o elemento combustível. Na Figura 1 é apresentado um detalhe de um elemento combustível típico do projeto de Angra 1.

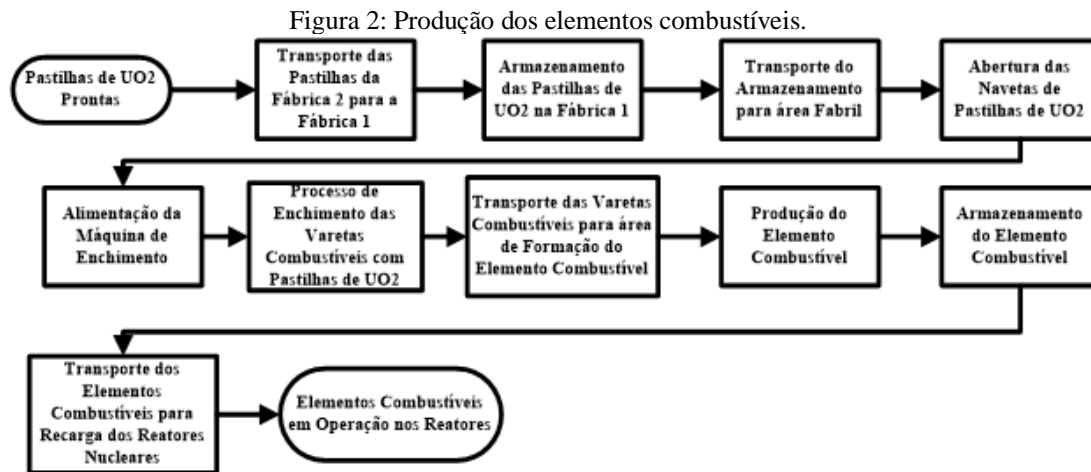
Figura 1: Detalhe de um elemento combustível.



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

A produção do elemento combustível envolve um conjunto de materiais, operações e processos de fabricação de componentes estruturais que darão a sustentação e resistência mecânica para a operação dos elementos combustíveis no reator.

Primeiramente ocorre a montagem das varetas combustíveis com as pastilhas de  $UO_2$ , onde as pastilhas são inseridas em tubos de ligas de zircônio, em seguida são pré-pressurizadas e soldadas em suas extremidades. Essas varetas combustíveis prontas são inseridas em estruturas metálicas especiais destinadas a suportarem as varetas, os chamados esqueletos dos elementos combustíveis, que são compostos de tubos de instrumentação, tubos guia e um conjunto de grades com funções estruturais e termohidráulicas. Por fim, são montados dois bocais nas extremidades do elemento combustível, os chamados bocais inferiores e bocais superiores, após essa montagem e inspeção o elemento combustível está pronto para ser transportado para a operação nos reatores pela Eletronuclear. Na Figura 2 é apresentado um fluxo macro e simplificado da produção dos elementos combustíveis.



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

Na Figura 2 é possível observar a etapa de produção do elemento combustível, que foi colocado no fluxo de forma macro e simplificada para melhor entendimento. Esta etapa na verdade envolve uma série de operações e processos de fabricação para os componentes estruturais, entre esses componentes os mencionados bocais que serão o foco dos estudos seguintes. Atualmente os bocais são produzidos de acordo com os projetos nucleares em demanda, ou seja, para o projeto de Angra 1 ou para o projeto de Angra 2 que estejam em produção. No caso dos projetos para Angra 1, esses componentes mecânicos estruturais são projetados para serem montados a partir de chapas de aço inoxidável AISI 304. As chapas de aço são soldadas por processos de soldagem de feixe de elétrons (EBW – *Electron Beam Welding*) dando origem a conjuntos mecânicos específicos, como placas, caixas, cantoneiras e quadros completos dos bocais.

Na Figura 3 é apresentada uma máquina usada para os processos de soldagem de feixe de elétrons (EBW).

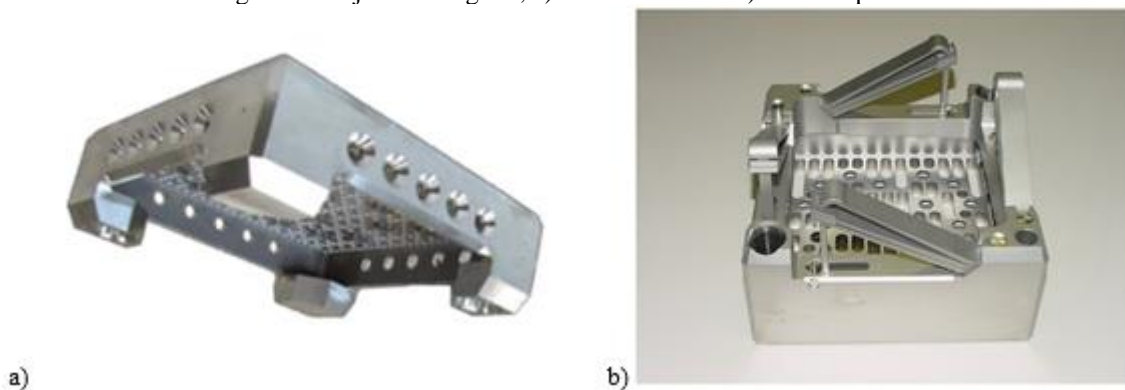
Figura 3: Máquina para soldagem por feixe de elétrons (EBW).



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

Os bocais inferiores dos elementos combustíveis referentes ao projeto nuclear de Angra 1 são formados por uma placa superior, uma caixa e quatro cantoneiras, já os bocais superiores são formados por uma placa adaptadora, uma caixa e um quadro completo, todos esses conjuntos são soldados por EBW. Na Figura 4 é apresentado a) Bocal inferior e b) Bocal superior do projeto de Angra 1.

Figura 4: Projeto de Angra 1, a) Bocal inferior e b) Bocal superior.

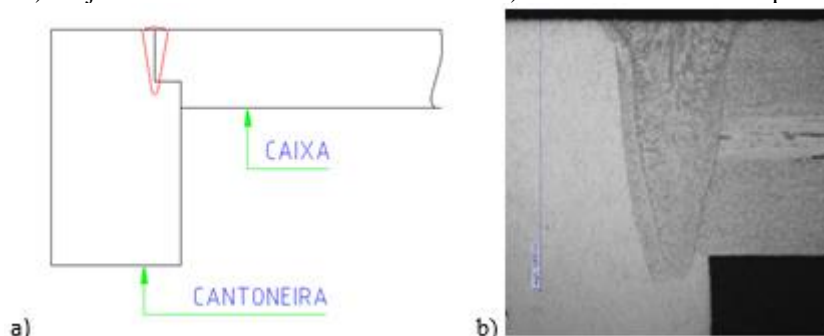


Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

Durante a fabricação, observa-se a região soldada por EBW dos componentes dos bocais, e fica nítido a necessidade de cuidados especiais especificados para o projeto, como a verificação da profundidade da soldagem e a presença ou não de defeitos decorrentes do processo de soldagem.

Na Figura 5 é apresentado a) Projeto da solda da caixa e a cantoneira e b) Solda EBW executada para o projeto.

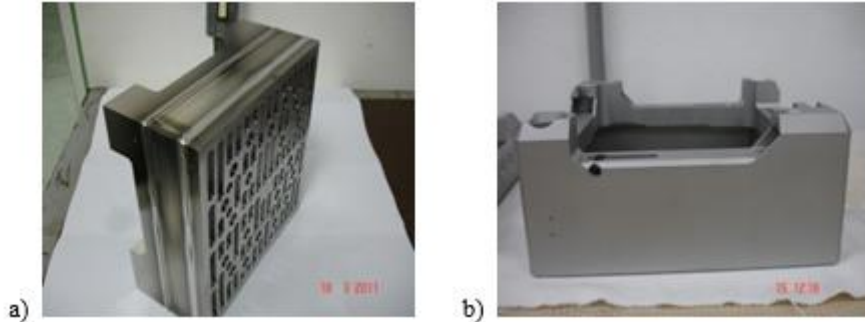
Figura 5: a) Projeto da solda da caixa e a cantoneira e b) Solda EBW executada para o projeto.



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

Os bocais são soldados através de seus conjuntos e partes delineadas do projeto, em seguida são usinados para o correto dimensionamento e acabamento superficial, por fim são inspecionados, limpos e certificados para o uso nos elementos combustíveis. Na Figura 6 é apresentado a) Bocal soldado por EBW e b) Bocal usinado.

Figura 6: a) Conjuntos do bocal b) Bocal soldado por EBW e c) Bocal usinado.



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores, 2020

Uma etapa importante da avaliação das soldas EBW realizadas nos bocais é a verificação de descontinuidades e defeitos nas superfícies das junções das placas, caixas e cantoneiras. Por questões de projeto e especificação são realizadas avaliações através de ensaios não destrutivos, pela técnica líquidos penetrantes (LP). Vale salientar que ensaios não destrutivos em outros tipos de indústria são bem conhecidos e registrados, tal como em publicações voltadas para a indústria automotiva (NASCIMENTO, da SILVA e CAMARGO, 2020), contudo para a indústria nuclear, em especial para a indústria nuclear brasileira não existem publicações representativas das práticas fabris atuais.

## 2 METODOLOGIA

Nesta pesquisa será abordada a metodologia usada para os ensaios por LP - Líquidos Penetrantes na área nuclear. Será investigado como são aplicadas tal metodologia e técnicas para a verificação das condições superficiais nas regiões soldadas dos componentes estruturais dos elementos combustíveis, bocais inferiores e superiores em seus conjuntos. Inicialmente será abordado como a área nuclear encara e usa tais técnicas, quais são seus fundamentos, normativos e exigências. Em seguida, será apresentado o conjunto de interesse desse estudo, algumas avaliações realizadas, uma breve discussão e conclusões sobre a importância dos ensaios por LP - Líquidos Penetrantes na área nuclear.

### 2.1 ENSAIOS POR LP - LÍQUIDO PENETRANTE NA ÁREA NUCLEAR

O ensaio por LP - Líquidos Penetrantes na área nuclear é encarado como um método desenvolvido especialmente para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, ainda que estejam abertas na superfície do material ou estrutura sendo analisada. O método em si consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido em materiais sólidos não porosos (CETRE, 2009). Após a remoção do excesso de



líquido da superfície, faz-se sair da descontinuidade o líquido retido através de um revelador (RICARDO ANDREUCCI, 2014).

Normalmente para as avaliações utiliza-se um bloco padrão de descontinuidade, por exemplo um bloco padrão conforme a norma ASME V, que fundamentalmente é usado para controle de processo. Outro ponto importante é que a utilização de um bloco padrão permite também estabelecer um procedimento para o ensaio com líquido penetrante. As empresas consolidadas em suas atividades, tal como aquelas da área nuclear, trabalham com especificações de processo para os ensaios por líquido penetrante, o que oportuniza o estabelecimento de controles de processo, muitas vezes na forma de verificações da produção de forma diária, semanais ou mensais.

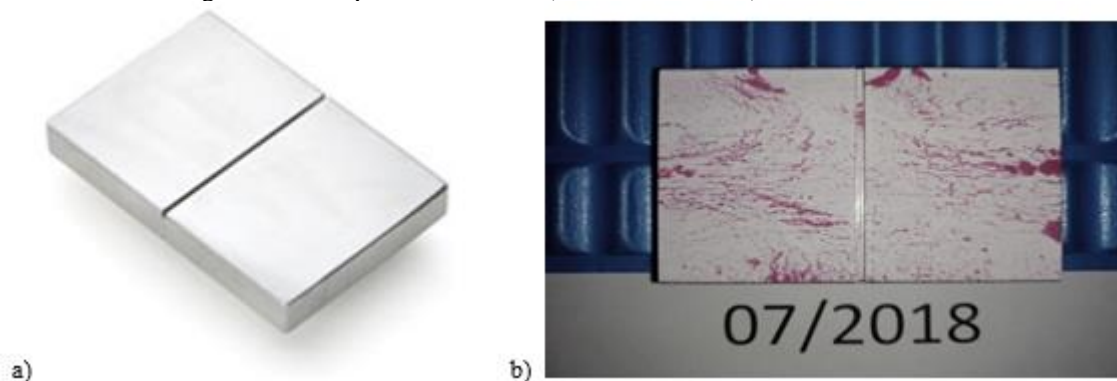
Os sistemas de ensaios por LP na área nuclear podem ter líquidos fluorescentes, que utilizam blocos padrões específicos para essa revelação, tal como o bloco TAM ou podem ter líquidos não fluorescentes (coloridos) que podem adotar blocos padrões segundo a norma ASME V. O bloco padrão segundo a ASME V é um bloco de teste comparador, um corpo de prova de alumínio ASTM B209 tipo 2024 (da SILVA, 2010) com dimensões 75 mm x 50 mm x 10 mm com um sulco de 3 mm de largura que divide o bloco ao meio. Esse bloco apresenta diversas trincas pré-fabricadas espalhadas na sua superfície, sendo utilizado para verificar a sensibilidade do penetrante em uso.

A sensibilidade do penetrante é uma questão importante nos ensaios de LP, pois relaciona-se a capacidade de detectar descontinuidades. Pode-se dizer que um penetrante é mais sensível que outro quando, para aquelas descontinuidades em particular, o primeiro detecta melhor os defeitos que o segundo (RICARDO ANDREUCCI, 2014).

Na área nuclear os sistemas de ensaio por LP normalmente utilizam líquidos fluorescentes. O bloco padrão tipo TAM é bastante utilizado e a utilização deste bloco exige quase que exclusivamente sistemas de penetrantes fluorescentes. Contudo na indústria nuclear brasileira adota-se o sistema de ensaio por LP com penetrante colorido, logo o bloco TAM não é aplicável.

Já que o bloco tipo TAM não é utilizado, adota-se de forma conservativa outro sistema para o controle de processo, neste caso realiza-se uma verificação qualitativa utilizando um padrão ASME V. Na Figura 7 é demonstrado o bloco padrão ASME V a) Não ensaiado e b) Ensaiado na INB.

Figura 7: Bloco padrão ASME V a) Não ensaiado e b) Ensaiado na INB.



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

Um detalhe importante é que de acordo com o item III-641.3 da norma (ASME BPVC V, 2019), o bloco padrão ASME V pode ser utilizado para comparação contra padrões fotográficos estabelecidos.

Os ensaios por LP na área nuclear segundo o padrão ASME V seguem procedimentos específicos quanto ao líquido penetrante, o removedor, o revelador, o tempo de penetração, a temperatura do ensaio, a umidade local, o tempo de revelação e o resultado conforme o padrão fotográfico. Na Figura 8 é apresentado o procedimento que acompanha o bloco padrão ASME V indicando os parâmetros obrigatórios para o teste padrão.

Figura 8: Bloco padrão ASME V ensaiado.



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

O controle de processo utilizando LP consiste na realização de teste utilizando o bloco padrão ASME V segundo uma periodicidade definida para ser realizada

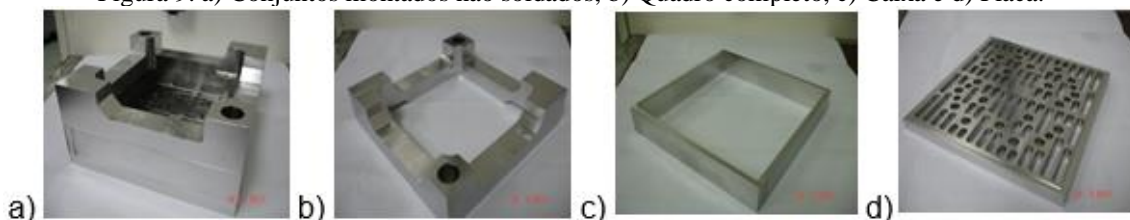


mensalmente, caso pelos menos um ensaio tenha sido realizado no mês, durante o recebimento de novo penetrante colorido ou novo revelador e ao início de cada recarga ou remessa (campanha de produção). O resultado do teste deve ser fotografado, arquivado e comparado ao teste anterior. Em caso de dúvida quanto ao resultado, deve ser consultado o padrão fotográfico do bloco. O teste será considerado satisfatório se as descontinuidades reveladas apresentarem aspecto visual próximo aos do ensaio anterior e ao padrão. Caso o resultado não seja satisfatório, um estudo deve ser realizado para identificar o fator causador de distúrbio no processo. Como recomendação, antes de cada teste o bloco deve passar por uma limpeza em banho ultrassônico e outra com solvente, já que a presença de resquícios de revelador pode mascarar o resultado do teste.

## 2.2 CONJUNTOS MECÂNICOS DOS BOCAIS - INTERESSE PARA AVALIAÇÃO POR LP

Nos bocais, sejam eles inferiores ou superiores, os conjuntos de interesse para a aplicação de ensaios por LP são os quadros completos, caixas e placas quando soldados por EBW conforme letra a) da Figura 6. Na Figura 9 é apresentado a) Conjuntos montados não soldados, b) Quadro completo, c) Caixa e d) Placa.

Figura 9: a) Conjuntos montados não soldados, b) Quadro completo, c) Caixa e d) Placa.



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

## 3 RESULTADOS

### 3.1 AVALIAÇÕES DOS CONJUNTOS MECÂNICOS SOLDADOS POR EBW

Quando da soldagem dos bocais, união dos conjuntos de interesse para avaliação por LP apontados na Figura 10, emprega-se como condição de liberação de processo a produção de corpos de prova. Utiliza-se placas do mesmo material dos conjuntos citados e realiza-se a soldagem por EBW para verificar parâmetros e condições da soldagem, além disso esses corpos de prova são submetidos aos ensaios por LP para a verificação de descontinuidades da região soldada através da comparação com o padrão ASME V. Na Figura 10 é demonstrado os corpos de prova típicos já preparados para ensaio por LP,

sendo: a) Corpo de prova de raiz, b) Corpo de prova de topo e c) Bloco padrão ASME V para avaliação.

Figura 10: a) Corpo de prova de raiz, b) Corpo de prova de topo e c) Bloco padrão ASME V.

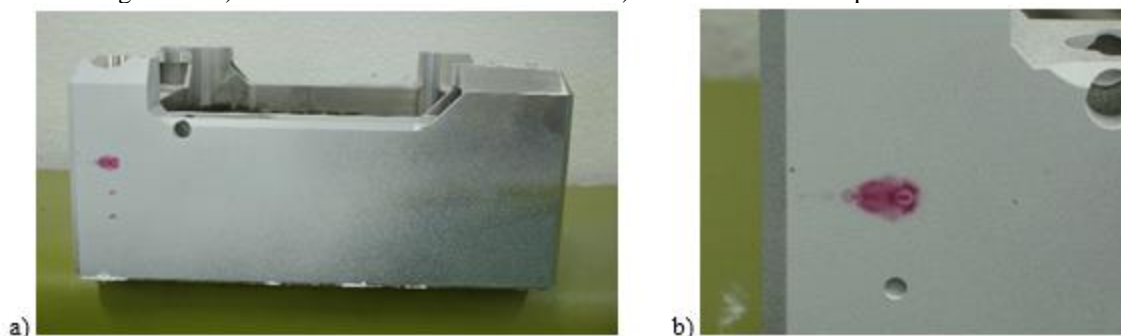


Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

Além das etapas de liberação de processo, os ensaios por LP são utilizados nas etapas intermediárias de soldagem e na etapa final, como nos bocais prontos. Os bocais após a soldagem sofrem desbastes, adequações geométricas, acabamentos por usinagem e os potenciais danos causados por essas operações devem ser analisados, comparados com padrões e as peças devem ser certificadas para a utilização.

Para verificar as condições superficiais, adota-se caso necessário e em regiões definidas, os ensaios por LP nos bocais finalizados na etapa produtiva, mas ainda não montados no elemento combustível. Na Figura 11 é demonstrado um ensaio sendo realizado numa superfície específica do bocal, a) Bocal submetido a ensaio de LP e b) Detalhe do LP na superfície do bocal.

Figura 11: a) Bocal submetido a ensaio de LP e b) Detalhe do LP na superfície do bocal.



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil S.A.- INB, adaptado pelos autores (2020)

#### 4 DISCUSSÃO

Como foi observado ao longo deste artigo, os elementos combustíveis são a junção de um projeto nuclear no que se refere aos materiais nucleares com um projeto mecânico estrutural. O projeto mecânico estrutural envolve processos de soldagem e por consequência todo o cuidado referente às soldas, em especial os componentes chamados de bocais, que são formados por soldas de chapas de aços inoxidáveis por processo EBW

sujeitas a discontinuidades. Os ensaios por LP aplicados na área nuclear são normatizados pelo código ASME e utiliza-se o padrão ASME V. Os ensaios servem de apoio ao controle de processo e a qualidade final dos componentes. São típicos os ensaios de LP em chapas soldadas de aço inoxidáveis, como nos corpos de prova, entre as caixas e cantoneira e entre as caixas e placas superior e adaptadora com periodicidade definida nas especificações de produto e processos. Normalmente são verificadas discontinuidades, porosidades e outros defeitos com base em padrões e/ou medindo as dimensões como em potenciais trincas. Além de ser uma obrigação contratual e especificada, os ensaios não destrutivos por LP, normatizados pelo código ASME, mostram-se uma ferramenta muito adequada a verificação de qualidade superficial dos bocais, sejam nas regiões soldadas ou fora da mesma, contudo mostram-se mandatórias nas regiões de soldas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção do bloco padrão ASME V permite uma garantia fundamental nos níveis da qualidade dos produtos dos elementos combustíveis. Esses ensaios por LP realizados pela indústria nuclear brasileira são aplicados de forma rigorosa aos seus componentes, em especial aos componentes com funções estruturais como os bocais. A utilização desse padrão conjuntamente com outras documentações de qualidade, de engenharia e de processos, como padrões, instruções operacionais e de inspeção, permitem elevar a confiabilidade do processo produtivo nuclear. A tecnologia nuclear envolve muitas vertentes de fabricação e ensaios especializados, mas os ensaios por líquidos penetrantes é uma técnica primordial e no status atual do desenvolvimento ainda insubstituíveis para alguns componentes. A qualidade dos bocais utilizados nos projetos nucleares brasileiros em operação, possuem as mesmas exigências e atendimento, nos mais rigorosos quesitos do segmento internacional.

## REFERÊNCIAS

ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) V – Nondestructive Examination, The American Society of Mechanical Engineers, 2019. ISBN 9780791872840.

CETRE DO BRASIL. Apostila: Noções Básicas sobre Ensaio Não Destrutivos, Qualificação SNQC, Segurança, Processos de Fabricação, Processos de Soldagem e Terminologia, Revisão 09, [www.cetre.com.br](http://www.cetre.com.br), Abril de 2009.

DENIS NASCIMENTO, DANILO AUGUSTO OLIVEIRA DA SILVA e JOSÉ RUBENS DE CAMARGO. A importância do ensaio de estanqueidade (END) nos filtros automotivos. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n.12, p.94103-94109 dec. 2020. ISSN 2525-8761.

LUIZ EDUARDO DA SILVA. Líquidos Penetrantes. ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 5ª edição, São Paulo, 2010. ISBN 85-99153-04-8.

RICARDO ANDREUCCI. Apostila: Líquidos Penetrantes. ABENDI– Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo, 2014. Acesso no site <[http://www.abendi.org.br/abendi/upload/file/lp\\_2014\\_atual.pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/upload/file/lp_2014_atual.pdf)> em 26 de Agosto de 2020 às 13:30 horas.