

ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA DE TREINAMENTO PARA INSPETORES DE ULTRA-SOM A PARTIR DE UMA METODOLOGIA FUZZY

Jesús Domech Moré¹ (Universidade Estácio de Sá), Ricardo Tanscheit² (Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro), Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco³ (Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro), Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco⁴ (Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro), Daise Rosas da Natividade⁵ (Universidade Federal de Rio de Janeiro), Luis Mamede Gonzalez Magalhães⁶ (Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear)

¹Ave. Presidente Vargas, 642, 22º andar, Centro, CEP 20071-001, jesus.more@estacio.br

²Rua Marquês de São Vicente 225, 4º andar, Gávea – RJ – CEP: 22453-900, ricardo@ele.puc-rio.br

³Rua Marquês de São Vicente 225, 4º andar, Gávea – RJ – CEP: 22453-900, marley@ele.puc-rio.br

O objetivo deste trabalho é criar um programa de treinamento, apoiado na NBR ISSO 10015, com vistas à capacitação de inspetores de ultra – som na indústria de petróleo e gás. Desenvolvido para a identificação de necessidades de treinamento dos inspetores de ensaios não destrutivos por ultra – som, o modelo identifica as ações humanas que compõem o procedimento de inspeção ultrasônica a partir das opiniões de especialistas, e especifica um conjunto de fatores cognitivos que possam ser importantes para a execução do procedimento como um todo. A definição das necessidades de treinamento dos inspetores é obtida com qualidade a partir da aplicação de uma metodologia *fuzzy* onde são medidas a possibilidade de falha do inspetor na interação com o procedimento e o grau de influência de cada fator cognitivo na execução do procedimento. Mediante questionários a especialistas são levantados os dados que representam as demandas cognitivas em cada ação humana do procedimento. Testes psicológicos são aplicados aos inspetores com o objetivo de conhecer o atendimento destes às demandas cognitivas. Finalmente, estas informações ajudam à tomada de decisões na concepção do projeto e planejamento das necessidades de treinamento individualizado para cada inspetor de ultra – som. A metodologia permite identificar as lacunas existentes em cada inspetor que a sua vez podem constituir causas latentes de possibilidade de erro humano, fazer um estudo dos procedimentos técnicos e da informação presente nos elementos cognitivos dos inspetores. A utilização desta metodologia não está restrita à indústria de petróleo e gás, podendo ser empregado em diversas atividades de alto risco (indústria nuclear, de processos, termoeletricas, intervenções cirúrgicas com ajuda de computadores, atividades na área odontológica, indústrias farmacêuticas, aeronáutica, indústria mineira, etc).

Palavras-chave: treinamento, conjuntos fuzzy, testes psicológicos, demandas cognitivas, inspeção ultra-som.

1. INTRODUÇÃO

O ensaio não destrutivo por ultra-som tem como objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos, metálicos e não metálicos. Muitas das vezes tais defeitos são produtos do próprio processo de fabricação das peças ou do componente a ser examinado como, por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro-trincas em forjados, inclusões de escoria em uniões soldadas e muitas outras.

O feixe ultra-sônico com características compatíveis com a estrutura do material a ser ensaiado, é introduzido numa direção favorável em relação à descontinuidade (interface), e, se for refletido por esta continuidade, será mostrado na tela do aparelho como um pico (eco). Simultaneamente, sensores adequados irão detectar as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e caracterizando essas descontinuidades. Algumas descontinuidades superficiais também podem ser detectadas com este ensaio não destrutivo.

A aplicação do ultra-som se faz em instalações, equipamentos e materiais, normalmente submetidos a requisitos de alta segurança e que requerem alta confiabilidade, tais como usinas nucleares, plantas petroquímicas, plataformas de petróleo, aeronaves, navios, embarcações, tanques de combustíveis e veículos de transporte. Hoje, na moderna indústria, o exame ultra-sônico constitui uma ferramenta indispensável para a engenharia de segurança e a garantia da qualidade de peças de grandes espessuras, geometria complexa de juntas soldadas, chapas e outros.

A tecnologia moderna criou uma tendência para produzir equipamentos e sistemas de grande custo de capital, sofisticação, complexidade e capacidade. As consequências de um comportamento não confiável dos equipamentos e sistemas tornaram-se crescentemente mais graves e exigiram melhores níveis de confiabilidade. Assim como todo ensaio não destrutivo (END), o exame ultra-sônico possui limitações nas aplicações que atentam contra esses níveis de confiabilidade.

A pesar de possuir vantagens, como o grande poder de penetração, a alta sensibilidade (detecta descontinuidades de 0,5 mm ou menores), a precisão maior do que os outros ensaios, e de não requerer cuidados especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação, apresenta como desvantagens a necessidade de uma grande atenção, de pessoal qualificado e do uso de blocos padrões e de referência. Ou seja, este tipo requer grande conhecimento teórico, qualificação, habilidades e experiência por parte do inspetor (SANTIN, 1996). O fator humano tem grande importância na localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas.

A fim de melhorar a confiabilidade destes processos é imprescindível aplicar os princípios de gestão de qualidade que fundamentam as normas da família NBR ISO 9000 (da qual a série NBR ISO 10000 é parte integrante) enfatizando a importância da gerência de recursos humanos e da necessidade de treinamento adequado.

A Norma ISO 10015 “Gestão da qualidade- Diretrizes para treinamento” (NBR ISO 10015, 2001) pode ser aplicada sempre que uma orientação for necessária para interpretar referências à “educação” e “treinamento”. A função desta Norma é fornecer diretrizes que possam auxiliar uma organização a identificar e analisar as necessidades de treinamento, projetar e planejar o treinamento, executar o treinamento, avaliar os resultados do treinamento, monitorar e melhorar o processo de treinamento, de modo a atingir seus objetivos. Esta Norma enfatiza a contribuição do treinamento para a melhoria contínua e tem como objetivo ajudar as organizações a tornar seu treinamento um investimento mais eficiente e eficaz.

Nesta Norma o treinamento é considerado um processo em quatro estágios: definição das necessidades de treinamento, projeto e planejamento do treinamento, execução do treinamento e, avaliação dos resultados do treinamento. O primeiro estágio apresenta como objetivo definir as lacunas entre a competência existente e a requerida, definir as necessidades de treinamento dos empregados cuja competência existente não atenda àquelas requeridas para o trabalho; e documentar as necessidades de treinamento especificadas.

Este primeiro estágio constitui um processo de avaliação subjetiva. O que significa competência existente? Qual é a competência requerida para uma função específica? O que significa *competência adequada* para a função?. Essa linguagem contém ambigüidades e multiplicidade de sentidos. A teoria dos conjuntos *fuzzy* é capaz de lidar com informações de caráter subjetivo, impreciso ou vago, tratar estas imperfeições através de um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores hoje em dia e chegar a conclusões que possibilitam estratégias para a tomada de decisão em problemas complexos.

No trabalho é apresentada uma metodologia para definir as necessidades de treinamento de 6 inspetores de ensaios não destrutivos por ultra-som. O estudo é feito em relação à informação presente nas demandas cognitivas e comportamentais que exige a execução dos procedimentos e nas características técnicas destes inspetores de END. As características cognitivas e comportamentais são também consideradas como competências. Elas são observadas a partir da aplicação de testes psicométricos (*Inventário Fatorial de Personalidade, Teste Equicultural de Inteligência, Teste de Atenção – AC15 e Inventário de Habilidades Sociais – IHS*) e de exames teóricos específicos e práticos específicos.

A aplicação da teoria dos conjuntos *fuzzy* tem como objetivo definir as lacunas entre a competência existente e a requerida e desta forma conhecer as necessidades de treinamento dos inspetores o que permite criar estratégias de treinamento individualizadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Justificativa da importância do trabalho

A literatura mostra inúmeros exemplos de acidentes importantes causados por falhas do inspetor durante as inspeções de END. As trincas por corrosão intergranular sob tensão, que não foram encontradas durante uma inspeção por ultra-som na *Nine Mile Point Nuclear Plant* em 1981, tiveram um grande impacto na indústria nuclear. Elas foram encontradas depois por inspeção visual (ASME, 2000).

Como aparece documentado no relatório N75B/AAR-98-01 do Conselho de Segurança Nacional do Transporte nos Estados Unidos (NTSB), dois passageiros morreram no voo *Delta 1288* como resultado da falha de uma máquina durante a decolagem em Pensacola, Flórida, no dia 6 de julho de 1998 (*Report*, 1998). O incidente foi atribuído à falha no sistema de END para detectar trincas na máquina JT-8D. Relatórios prévios – NTSB/AAR-90/06 – direcionados às falhas dos sistemas END incluem o desastre ocorrido no dia 17 de julho de 1989 em *Sioux City* na Aerolínea Americana *United Airlines* (*Report*, 1990).

O Conselho Canadense para a Segurança no Transporte (CTSB) reportou uma falha ocorrida na Aerolínea Canadense, *Canadian Airlines B-767*, em Beijing, China no dia 7 de setembro de 1997. A morte de 46 pessoas devido à queda da ponte *Silver* no dia 15 de dezembro de 1967, é outro exemplo de falha do sistema END utilizado para a inspeção. Estes exemplos e outros mais que não aparecem na literatura enfatizam a importância da implementação de metodologias qualitativas e quantitativas de aprofundamento na questão de confiabilidade nos END para nossa segurança.

Os laboratórios de END que atuam no mercado de trabalho têm implementado um Sistema de Gestão de Qualidade em correspondência com os requisitos estabelecidos na Norma ISO/IEC GUIA 25 (ISO/IEC GUIA 25, 1999) como expressão qualitativa das necessidades dos clientes e como um dos requisitos da qualidade. Estes laboratórios contam com inspetores altamente qualificados e treinados, equipamentos modernos e procedimentos certificados para a execução dos ensaios. Mesmo assim os inspetores podem errar no momento de localizar, dimensionar e interpretar as descontinuidades. Por quê o inspetor erra? É o ensaio por ultra-som confiável ou não? Quão confiável ele é?.

Segundo Sthepens (2000) “os elementos do fator humano que afetam a confiabilidade dos END são os fatores físicos, mentais (características comportamentais e cognitivas), o treinamento do pessoal e as condições de operação”.

More (2004) considera que “o treinamento é o atributo que mais influencia na confiabilidade do ensaio, por isso os treinamentos e as práticas devem acontecer no campo para criar o ambiente mais adequado à realidade (barulho, calor, interação com processos, vibrações, etc). De igual maneira deveria se proceder no momento do exame de requalificação”. More (2004) explica que “com o objetivo de melhorar o desempenho dos inspetores é de vital significância implementar gráficos e estratégias de treinamento dirigidos fundamentalmente ao uso adequado de procedimentos e ao tratamento e desenvolvimento do mecanismo cognitivo do inspetor (elementos de visão, busca, percepção, classificação, interpretação e tomada de decisão) através de testes psicológicos existentes para isto”.

2.2. Situação no Brasil

No Brasil existe um Sistema Nacional de Qualificação e Certificação de Pessoal em END (SNQC/END), que tem a finalidade de promover ações para a qualificação e certificação de pessoal em END, através de procedimentos e sistemáticas definidas pelos órgãos envolvidos no Sistema. Os níveis de competência dos inspetores de ultra-som podem ser: nível I, nível II e nível III.

O pessoal certificado com nível I está qualificado para executar ensaios de acordo com procedimentos escritos e sob a supervisão do pessoal de nível II ou nível III. Eles estão capacitados para instalar ou montar o aparelho, executar ensaios, registrar os resultados obtidos, classificar os resultados de acordo com os critérios de aceitação e reportá-los.

O pessoal certificado com nível II está qualificado para executar ensaios de acordo com técnicas reconhecidas e estabelecidas. O pessoal deve ser competente para escolher a técnica de ensaio a utilizar, montar e calibrar o aparelho, interpretar e avaliar os resultados de acordo com os códigos aplicáveis, normas e especificações; para executar todos os itens para o qual o inspetor de nível I está qualificado; verificar quais ensaios executados pelos inspetores de nível I foram executados adequadamente, e preparar instruções escritas.

O pessoal certificado com nível III está qualificado para estabelecer procedimentos, interpretar códigos, normas, especificações, assim como desenhar métodos de ensaios particulares, técnicas e procedimentos a serem usados. O inspetor tem competência para interpretar e avaliar resultados de acordo com códigos existentes, normas e especificações; e tem habilidade para treinar os inspetores de nível I e II; segundo as normas ISO 9712, 1999.

2.3. A Norma NBR ISO 10015

Esta Norma fornece as diretrizes que abrangem o desenvolvimento, implementação, manutenção e melhoria das estratégias e dos métodos de treinamento que afetem a qualidade dos produtos fornecidos por uma organização.

Conforme ilustrado na figura 1, a saída de um estágio alimenta a entrada do estágio seguinte. Vemos que o estágio mais importante é o primeiro onde são definidas as necessidades de treinamento (NBR ISO 10015: 2001).

Um processo de treinamento planejado e sistemático pode dar uma importante contribuição para auxiliar uma organização a melhorar suas capacidades e para alcançar seus objetivos da qualidade. Segundo a Norma NBR ISO 10015, “para selecionar e implementar o treinamento que objetiva reduzir as lacunas entre as competências requeridas e as existentes, recomenda-se que a gerência monitore os seguintes estágios: definição das necessidades de treinamento; projeto e planejamento do treinamento; execução do treinamento e, avaliação dos resultados do treinamento”.

A proposta desta pesquisa é aplicar testes psicométricos em cada um dos inspetores com o objetivo de avaliar as características cognitivas e comportamentais. Seguidamente, fazer a análise crítica das competências deles ao serem comparadas essas características com as demandas cognitivas (estabelecidas pelos especialistas) que se requerem no momento da execução do procedimento sobre o ensaio não destrutivo por ultra-som. Na Norma esta análise se recomenda fazer através de entrevistas / questionários dirigidos a empregados, supervisores e gerentes; observações, discussões em grupo e pareceres de especialistas.

A Norma também propõe identificar as soluções para eliminar as lacunas de competência. Estas soluções podem ser os treinamentos ou outras ações da organização, tais como a reformulação dos processos, recrutamento de pessoal treinado, terceirização, melhoria de outros recursos, redução de rotatividade e modificação dos procedimentos técnicos. Neste trabalho, como ferramenta de análise é utilizada a avaliação a través de testes psicométricos.

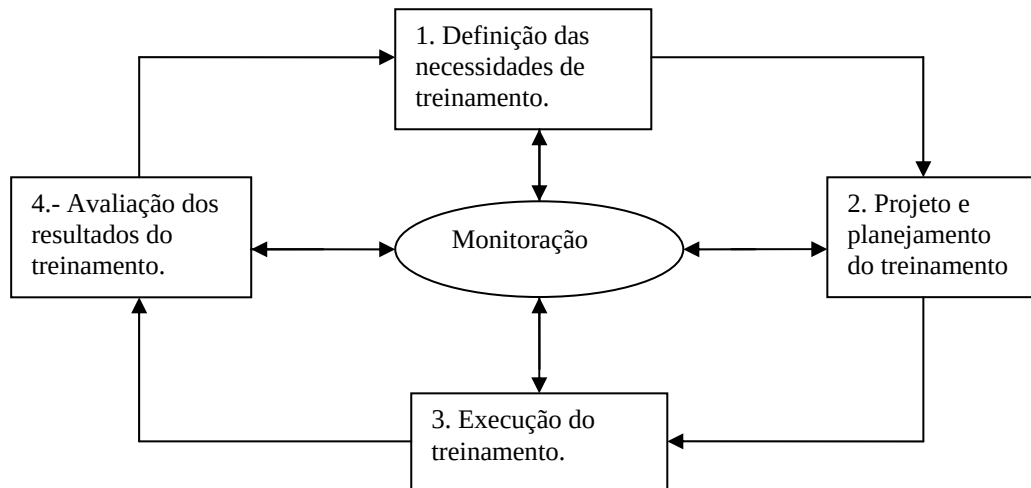


Figura 1.- Ciclo de treinamento.

2.4. Testes psicométricos

Nos últimos anos várias pesquisas têm sido geradas sobre o desempenho do inspetor durante o ensaio. Os erros dos inspetores acontecem de forma inerente à tarefa de inspeção. Comumente são classificados como erros do tipo I e II. Um erro de tipo I ocorre quando um item aceitável é rejeitado e de tipo II, quando um item falhado é aceito. Segundo Drury (1975) ao subdividirmos a tarefa de inspeção como subsistemas de busca e tomada de decisão os erros de inspeção podem ser divididos em (1) erros de busca, quando o inspetor falha ao localizar a falha, e em (2) erros de tomada de decisão, quando o inspetor classifica incorretamente a falha como aceitável ou rejeitável. A variável “tempo de resposta” tem sido usada frequentemente para avaliar o desempenho do inspetor.

A maior parte da literatura sobre medição de desempenho do inspetor se refere aos fatores que influenciam nele, tais como ambientais, organizacionais e individuais (Megaw, 1979).

Wang (1986) aplicou testes psicométricos (*WAIS-Digit Span*, *WAIS-Digit Symbol*, *Perceptual Speed*, *Embedded Figure Test*, *PSI-Basic Skills Tests: Visual Speed and accuracy*, *PSI-Basic Skills Tests: Classifying*, *IPI- Aptitude Series: Memory*, *IPI- Aptitude Series: Judgment*, *Circle Judgment Test*, *Line Judgment Test*) para medir as competências individuais devido a que grande parte das diferenças entre os inspetores devem ser atribuídas às diferenças nos aspectos cognitivos.

A suposição básica dos métodos cognitivos é que o erro cognitivo é oriundo da existência de gradientes no modelo mental (se comparado à realidade), os quais determinam seu comportamento e suas características. Os enlaces e dependências entre os parâmetros do fenômeno e os cognitivos, que especificam o mecanismo de rápidas e lentas mudanças na estrutura e propriedades da interação homem – máquina, determinam a regularidade do fenômeno.

No trabalho são aplicados quatro tipos de testes validados pela Sociedade Brasileira de Psicologia: o Inventário de Habilidade Social, o Inventário Fatorial de Personalidade, o Teste de Atenção e o Teste Equicultural de Inteligência.

O Inventário de Habilidade Social (IHS) permite analisar 5 conjuntos de fatores comportamentais: enfrentamento, relacionamento inter-pessoal, comunicação, auto-exposição a desconhecidos e situações novas e autocontrole da agressividade. Este teste analisa fatores sociais que quando existem déficits e possíveis comprometimentos nas suas relações afetam o relacionamento interpessoal e o processo de comunicação.

O Inventário Fatorial de Personalidade (IFP) fornece os indicadores de Desejabilidade Social e o de Validade. No primeiro, é possível avaliar se o entrevistado se apresenta da maneira com que deseja que os outros o notem; caso isto aconteça, a interpretação deve ser feita com cautela. Por meio do segundo, é possível desconsiderar alguns entrevistados.

O Teste de Atenção (AC15) tem por finalidade avaliar a capacidade de atenção concentrada por um período prolongado. A sua execução permite levantar hipóteses sobre a rapidez e a qualidade de rendimento de trabalho que está ligada à fadiga, resistência à monotonia (trabalho repetitivo de conferência) e de maneira indireta ao

interesse por este tipo de trabalho, enquanto o teste de personalidade o faz de uma maneira direta. Os fatores analisados são: raciocínio lógico, resistência à monotonia, resistência à fadiga, atenção concentrada, qualidade do trabalho aliado à produção e quantidade do trabalho aliado à precisão.

O Teste Equicultural de Inteligência (TE13) avalia os fatores de inteligência abstrata, verbal e numérica e a predisposição para novos conhecimentos.

2.5.- Teoria dos conjuntos fuzzy

Em 1965, o Professor Lofti Zadeh, publicou o primeiro artigo sobre teoria dos conjuntos *fuzzy* (Zadeh, 1965). Esta teoria apresentava a proposta de fazer uma função de pertinência operar dentro do intervalo de números reais $[0,1]$. No artigo, Zadeh explicava que um conjunto *fuzzy* é uma classe de objetos com um grau de pertinência contínuo.

Um conjunto *fuzzy* “A” é caracterizado por uma função de pertinência, relacionando os elementos de um domínio, espaço, ou universo de discurso X, ao intervalo unitário $[0,1]$. Matematicamente, essa relação é descrita como: $\mu_A : x \rightarrow [0,1]$, em que o valor $\mu_A(x) \in [0,1]$, onde “x” é a variável do universo em estudo e é uma função cuja imagem pertence ao intervalo $[0,1]$ e indica o grau com que o elemento x de X está no conjunto *fuzzy* A, com $\mu_A(x) = 0$ e $\mu_A(x) = 1$, indicando respectivamente, a não-pertinência e a pertinência completa de x ao conjunto *fuzzy* A. A variável “x” pode ser discreta ou contínua.

A nebulosidade é uma característica da inteligência humana, por ter a capacidade de resumir os fatos observados e, mesmo tendo uma grande capacidade para informações adquiridas, pode selecionar as mais importantes. Na teoria dos conjuntos *fuzzy*, as variáveis lingüísticas se apresentam como os tijolos das proposições difusas uma vez que possuem conteúdo variável como em uma linguagem de programação, assumem valores lingüísticos como alto, baixo, médio e quente, e são representados por conjuntos *fuzzy* que possuem identificação nominal. Na possibilidade de reconhecer uma transição com relativa dose de ambigüidade, dicotomias do tipo pertence / não pertence, verdadeiro / falso do conjunto clássico, o conjunto *fuzzy* obriga a que se considere a maior ou menor pertinência, sentido ou significado do valor da variável. Os valores da função de pertinência são indicadores de tendências atribuídas subjetivamente por alguém, e dependem do contexto no qual estão inseridos.

O conceito de variável lingüística é muito útil para se lidar com situações que são muito complexas ou muito mal definidas para serem racionalmente descritas nas expressões quantitativas convencionais. Uma variável lingüística é uma variável cujos valores são palavras ou sentenças em linguagem natural ou artificial. Por exemplo: competência é uma variável lingüística e seus valores são: *muito competente*, *competente*, *médio*, *pouca competência*, *não competente*. O valor lingüístico pode ser também representado pelo raciocínio aproximado da teoria dos conjuntos *fuzzy*.

Imagine-se que o inspetor precise ter um nível de atenção *acima da média*, um coeficiente de inteligência *médio*, uma *boa* coordenação olhos – mãos, um *bom* relacionamento inter-pessoal e níveis de percepção e capacidade de classificação *elevados*. Os termos *acima da média*, *médio*, *boa*, *bom*, e *elevados* representam informações difusas, nebulosas ou *fuzzy*. A pergunta que se põe é: quando o inspetor é *competente*, *pouco competente* ou *muito competente*? Quando o inspetor *pouco competente* se tornaria *competente*? A teoria clássica *fuzzy* resolve esse problema criando os conjuntos *fuzzy*, atribuindo ao inspetor, graus de pertinência aos conjuntos *pouco competente* e *competente*.

Da mesma maneira, o mundo que envolve avaliações comportamentais e cognitivas, não possui fronteiras nítidas e bem definidas, e é repleto de ambigüidades e incertezas. Assim, é razoável a idéia de que, ao se utilizar os conjuntos clássicos na formulação e modelagem de problemas de definição de competências e necessidades de treinamento, criam-se fronteiras arbitrárias que se tornam, na verdade, zonas sobre as quais reinam os conflitos.

3. METODOLOGIA

Para avaliar as necessidades de treinamento foi realizado um estudo do procedimento técnico utilizado pelos inspetores durante a execução dos ensaios ultra-sônicos. Nove especialistas identificaram as ações humanas presentes no procedimento e avaliaram as possibilidades de falhas humanas para determinar a influência das ações humanas na confiabilidade do ensaio. As possibilidades de falha *fuzzy* foram determinadas utilizando o modelo de *Similary Aggregation Method (SAM)* (His-Mei-Hsu et. al, 1996). Sendo assim se definiram os itens que mais influenciam para o erro humano.

A aplicação de um exame teórico e outro prático resultam uma ferramenta para avaliar os conhecimentos gerais, métodos e princípios de aplicação do ensaio não destrutivo por ultra-som. Um exame específico em relação a um sistema com componentes, equipamentos, procedimentos e técnicas de ensaio é importante para avaliar os conhecimentos referentes ao produto testado, cobrindo especificações aplicáveis, códigos e critérios de

aceitação. Este exame inclui duas partes: um exame teórico específico (ETE) e um exame prático específico (EPE).

Segundo avaliação da psicóloga e de um especialista técnico foram identificadas as demandas cognitivas, ou seja, a influência dos aspectos cognitivos na execução dos itens mais susceptíveis ao erro. Na sequência, a psicóloga determinou os fatores comportamentais que deveriam ser avaliados através de testes psicométricos. Assim as ações humanas presentes no procedimento, os fatores cognitivos e comportamentais são tratados como variáveis lingüísticas. Com isto definimos os requisitos de competência o que constitui um padrão de referência na avaliação.

A aplicação de exames teóricos, práticos, específicos e de testes psicométricos permite avaliar o grau de desempenho dos inspetores que ao serem comparados com os requisitos de competência a partir de uma função *fuzzy* nos mostra quais são as lacunas existentes em cada um dos inspetores.

A matriz de incidências *fuzzy* que relaciona as características dos inspetores à diversas formas de treinamento nos oferece informação quanto à tomada de decisões na criação de estratégias de treinamento individualizadas.

3.1 Modelo matemático

Primeira etapa: Estudo do procedimento técnico. Construção de seqüências de tarefas executadas pelo inspetor durante o ensaio e as possibilidades de falha humana por tarefas.

Segunda etapa: Escolha dos especialistas segundo a experiência o conhecimento e a prática com ensaios não destrutivos por ultra-som. Foram escolhidos nove especialistas, deles quatro são de nível III, quatro de nível II e um sem qualificação, mas com elevada experiência como Professor e pesquisador na área de ultra-som.

Terceira etapa: Escolha dos termos lingüísticos *fuzzy* para avaliar as probabilidades de falha do inspetor durante a execução de cada tarefa. Foram escolhidos sete termos (*muito alta*, *alta*, *moderada*, *baixa*, *muito baixa*, *quase zero*, *zero*).

Tabela 1. Números *fuzzy* triangulares correspondentes aos conjuntos *fuzzy* de probabilidades de falha

Probabilidades de falha <i>fuzzy</i>				
Conjunto <i>fuzzy</i>	Peso	a	m	b
Muito Alta	6	5	6	6
Alta	5	4	5	6
Moderada	4	3	4	5
Baixa	3	2	3	4
Muito Baixa	2	1	2	3
Quase Zero	1	0	1	2
Zero	0	0	0	1

Quarta etapa: *Fuzzificação*. Criar as funções de pertinências para cada um dos conjuntos *fuzzy*.

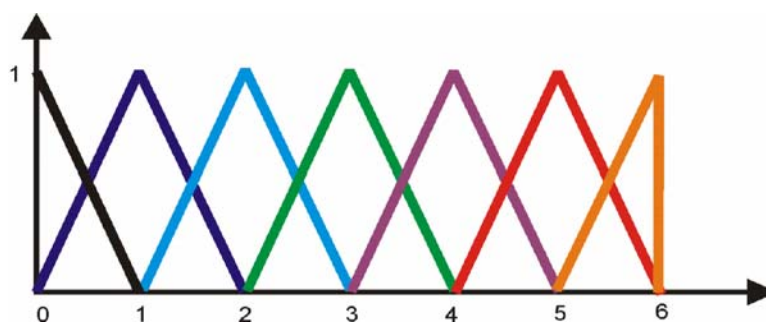


Figura 2.- Triângulos *fuzzy* que representam as funções de pertinências dos seis conjuntos *fuzzy*.

Quarta etapa: Aplicação de um questionário aos especialistas com o objetivo de conhecer os julgamentos a respeito das probabilidades de falhas em cada tarefa no momento de o inspetor executar o ensaio por ultra-som.

Quinta etapa: Coleta e tratamento dos dados segundo o modelo de *Similary Aggregation Method* (SAM).

a) Obtenção de uma medida de função de similaridade (matriz de concordância (MC) de opiniões *fuzzy*) a partir da razão entre a interseção de cada dois opiniões dos especialistas e a união dessas opiniões.

$$MC = \frac{\int_x \min \left(\mu_{\tilde{A}_i}(x), \mu_{\tilde{A}_j}(x) \right) dx}{\int_x \max \left(\mu_{\tilde{A}_i}(x), \mu_{\tilde{A}_j}(x) \right) dx} \quad (1)$$

b) Cálculo do Coeficiente de Concordância Relativa (CR) através dos dados obtidos da matriz de concordância relativa (CRI) de cada especialista envolvido neste processo, pela média quadrática do grau de concordância entre eles.

$$CR_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} * [(GC)_{i1}^2 + (GC)_{i2}^2 + (GC)_{i3}^2 + \dots + (GC)_{in}^2]} \quad (2)$$

onde GC_{ij} representa o grau de concordância entre a opinião do especialista i e a opinião do especialista j ($n=9$).

c) Cálculo do Grau de Concordância Relativa (GCR) de cada especialista.

$$GCR_k = \frac{CR_k}{\sum_{i=1}^n CR_i} \quad (3)$$

d) Cálculo do coeficiente de consenso de cada especialista (CCE_k) considerando o peso do especialista PE_k segundo o QIPE (Questionário de Avaliação do Perfil do Especialista) utilizado em More (2004). O coeficiente de consenso (CCE_i) foi obtido para cada especialista sendo considerado tanto o grau de concordância relativa GCR_k , quanto o peso do especialista PE_k .

e) Avaliação da possibilidade de falha *fuzzy* da tarefa do procedimento em análise.

$$\tilde{N} = \sum_{i=1}^n (CCE_i * \tilde{n}_i) \quad (4)$$

Onde $\tilde{n}_i$ é o número *fuzzy* triangular em dependência da avaliação lingüística feita pelos especialistas.

Sexta etapa: Obtenção do número real associado a cada número triangular *fuzzy* (a,m,b) (Lazzari, 1998).

$$GP_{Fi} = \frac{(a + 2m + b)}{4} \quad (5)$$

onde GP_{Fi} é o grau de probabilidade de falha da tarefa i , a representa o menor valor com a menor possibilidade de pertencer ao conjunto *fuzzy* agregado, m é o valor com maior possibilidade de pertencer ao conjunto *fuzzy* agregado e b representa o maior valor com a maior possibilidade de pertencer ao conjunto *fuzzy* agregado. Na tabela 2 esse grau aparece representado como o valor real do triângulo *fuzzy* agregado.

Sétima etapa: Tabulação dos resultados. Os dados processados foram tabulados. Na tabela 2 aparecem os dados representados a partir das opiniões dos especialistas sobre as probabilidades de falha dos inspetores durante a execução do procedimento, os triângulos *fuzzy* obtidos como resultado da aplicação do modelo SAM para o tratamento dos julgamentos dos especialistas A, B, C, D, E, F, G, I e J; o valor do número real $VReal$ (*crisp*) associado a cada número triangular *fuzzy* (a,m,b) e o valor normalizado $VNor$ ("Equação 6") obtido ao se dividir todos os valores reais pelo maior valor (nesse caso 4,59). Estes valores normalizados representam a importância da falha de cada tarefa do procedimento.

$$VNor = \frac{VReal_j}{VReal_{max}} \quad (6)$$

Oitava etapa: Identificação de necessidades de conhecimentos técnicos. A partir dos resultados obtidos comprovamos que as maiores possibilidades de falha do inspetor durante o ensaio estão centradas durante a execução das tarefas 13, 14, 15, 16 e 17. Desta forma conhecemos quais são os itens mais importantes para o ensaio, os mais críticos e susceptíveis ao erro humano. Estas são as tarefas que demandam maior conhecimento teórico, prático e específico.

Nona etapa: Identificação de necessidades cognitivas e comportamentais para a execução correta do procedimento. É construída uma sequência de ações humanas detalhadas que formam parte das tarefas 13, 14, 15, 16 e 17. Foram identificadas 41 ações humanas. Todas elas relacionadas com processos de busca, classificação, medição, cálculos, comparação com critérios de aceitação pré-estabelecidos, memorização, interpretação e tomada de decisão.

A psicóloga e um especialista de nível III avaliaram as influências de elementos cognitivos na execução dessas ações humanas e determinaram como demandas cognitivas e comportamentais durante a execução das tarefas mais críticas do procedimento os seguintes fatores: *habilidades motoras*, *coordenação olhos – mãos*, *capacidade de visão*, *necessidade de percepção*, *necessidade de atenção*, *necessidade de processamento da informação*, *necessidade de memorização*, *necessidade de tomada de decisão durante a execução do ensaio*, *intracepção* (tendência de se deixar determinar pelas condições concretas, observáveis e físicas), *afago* (o sujeito com *score* alto deseja apoio, orientação e, sofre de insegurança), *ordem* (tendência de organização, equilíbrio e organização), *nível de inteligência*, (poder de abstração possibilitando a migração de conhecimento latente ou potencial para conhecimento aplicado no ambiente de trabalho, processamento da informação, interpretação e tomada de decisões) e o *nível de atenção* e a *auto-exposição a situações novas*.

Tabela 2. Tabulação das opiniões dos especialistas sobre as probabilidades de falha *fuzzy* por tarefa.

Tarefas do procedimento	Opiniões especialistas												Valor	Valor
	A	B	C	D	E	F	G	I	J	a	m	b	Real	Nor
1. Verificar a linearidade horizontal do aparelho	2	3	3	3	3	1	2	3	3	1,98	3	4	2,98	0,649
2. Verificar a linearidade vertical do aparelho	2	4	4	3	3	1	1	4	3	1,76	2,8	3,8	2,76	0,601
3. Solicitar informações sobre a peça	0	4	4	4	4	4	1	4	3	2,75	3,7	4,7	3,68	0,802
4. Escolher o bloco de referência em função da espessura	2	3	4	4	4	1	0	3	3	2,1	3	4	3,04	0,662
5. Escolher o cabeçote e o ângulo	1	3	2	4	4	1	0	2	3	1,41	2,4	3,4	2,37	0,515
6. Escolher a frequência	1	3	1	4	4	1	0	2	3	1,16	2,1	3,1	2,12	0,462
7. Preparação da superfície da peça	1	2	1	3	3	2	0	4	3	1,3	2,2	3,2	2,26	0,491
8. Determinar a sensibilidade correta para a varredura	2	4	5	5	5	1	1	3	3	2,5	3,5	4,5	3,5	0,763
9. Determinar as perdas por transferência	2	4	5	5	5	1	1	2	3	2,33	3,3	4,3	3,33	0,725
10. Usar corretamente as técnicas de varredura	0	5	4	5	5	1	1	4	3	2,59	3,5	4,5	3,55	0,772
11. Determinar corretamente a área de varredura	0	4	3	4	4	1	1	3	3	1,91	2,9	3,9	2,87	0,625
12. Examinar corretamente a área de varredura	1	4	3	5	5	1	1	3	3	1,85	2,9	3,9	2,85	0,621
13. Localizar as descontinuidades em sentido longitudinal	1	4	4	5	5	5	1	4	3	2,86	3,9	4,9	3,86	0,841
14. Localizar as descontinuidades em sentido transversal	4	4	6	6	6	5	1	4	3	3,69	4,7	5,3	4,59	0,999
15. Localizar as descontinuidades na profundidade	4	4	5	6	6	5	1	3	3	3,33	4,3	5,1	4,27	0,93
16. Dimensionar as descontinuidades	3	5	5	5	5	5	1	4	3	3,46	4,5	5,5	4,46	0,972
17. Avaliar as reflexões da raiz de solda	3	5	6	6	6	4	1	4	3	3,61	4,6	5,2	4,5	0,981
18. Emitir o laudo	1	3	4	5	5	1	1	4	3	2,03	3	4	3,03	0,66
19. Preencher o relatório	1	4	4	5	5	1	1	3	3	2,01	3	4	3,01	0,656

3.2 Aplicação de exames teóricos, práticos e testes psicométricos

Um inspetor de nível III aplicou um exame teórico específico (ETE) e um exame prático específico (EPE) a 6 inspetores com o objetivo de identificar as lacunas de conhecimento existentes em cada um deles. Cada uma das 19 tarefas do procedimento foi avaliada nos dois exames e como resultado se obtiveram avaliações por tarefa de *satisfatório, não satisfatório ou parcialmente satisfatório*.

As avaliações por tarefas sendo subjetivas e expressadas de forma lingüística são consideradas conjuntos *fuzzy*. Assignamos graus de pertinências para cada um dos conjuntos *fuzzy* segundo a tendência das opiniões dos especialistas. Ver na tabela 3.

Tabela 3. Graus de pertinência para cada um dos conjuntos *fuzzy*.

Conjunto <i>fuzzy</i>	Grau de pertinência
Satisfatório	1
Parcialmente Satisfatório	0,40
Não Satisfatório	0

Segundo Buckley (1984), existem vários métodos para agregar as opiniões individuais, por exemplo, a média, a mediana, o operador **max**, o operador **min** e os operadores misturados. Para se obter a avaliação agregada de dois exames diferentes é usado o operador mínimo representado através da “Equação 7” (interseção dos conjuntos *fuzzy* pertencentes a duas avaliações subjetivas).

$$GA = \min(\mu_{ETE}(x); \mu_{EPE}(x)) \quad (7)$$

onde GA é o grau de avaliação após a agregação das avaliações do exame teórico específico e do exame prático específico.

As lacunas presentes em cada inspetor por tarefa foram obtidas utilizando a fórmula de distância de Hamming sem considerar a função absoluta.

$$d(GI, GA) = \mu_{GI}(i) - \mu_{GA}(i) \quad (8)$$

Onde GI é o grau de importância de cada tarefa (a medida que o valor se aproxima de 1, a importância na execução da tarefa é maior e as demandas de conhecimentos teóricos e práticos sobre a execução da tarefa aumentam), *i* é a tarefa do procedimento e μ o grau de pertinência.

O processo de *defuzzificação* (More, 2004) nos permite obter um único valor numérico discreto que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos da variável lingüística de saída (índice de atendimento ao padrão de importâncias, que significa a sua vez um índice de competência *fuzzy*).

Utilizando o método COG (*Center of Gravity*) (“Equação 9”) calculamos o índice CFI para cada inspetor.

$$CFI = \frac{\sum_{j=1}^k GI_j * GA_{rj}}{\sum_{j=1}^k GI_j} \quad (9)$$

Onde j representa o conjunto de tarefas do procedimento (j=1,2,3.....k, sendo k=19) e r é o inspetor (r=1,2,...,6). Na tabela 4 aparecem representadas as tarefas do procedimento, os graus de importância de cada tarefa - GI (VNor obtido na tabela anterior), a agregação das avaliações recebidas por cada inspetor na execução do ETE e EPE (GA1, GA2, GA3, GA4, GA5 e GA6), as lacunas presentes em cada um dos inspetores por tarefas (LA1, LA2, LA3, LA4, LA5 e LA6) e o Índice de Competência Fuzzy (Competence Fuzzy Index-CFI).

Tabela 4. Avaliações recebidas pelos inspetores durante a execução dos exames teórico e prático													
Tarefa	GI	GA1	LA1	GA2	LA2	GA3	LA3	GA4	LA4	GA5	LA5	GA6	LA6
1	0,65	1	0,35	0	-0,65	1	0,35	1	0,35	1	0,35	0	-0,65
2	0,6	1	0,4	0,4	-0,2	1	0,4	1	0,4	1	0,4	0	-0,6
3	0,8	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2
4	0,66	1	0,34	0,4	-0,26	1	0,34	0,4	-0,26	0,4	-0,26	0,4	-0,26
5	0,52	1	0,48	1	0,48	1	0,48	0,4	-0,12	1	0,48	1	0,48
6	0,46	1	0,54	1	0,54	1	0,54	0,4	-0,06	0	-0,46	1	0,54
7	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5
8	0,76	1	0,24	1	0,24	0	-0,76	1	0,24	0,4	-0,36	0	-0,76
9	0,73	1	0,27	1	0,27	1	0,27	1	0,27	0	-0,73	0	-0,73
10	0,77	0	-0,8	0	-0,77	0	-0,77	0,4	-0,37	0	-0,77	0	-0,77
11	0,63	0,4	-0,2	0,4	-0,23	0	-0,63	0	-0,63	0	-0,63	0,4	-0,23
12	0,62	0	-0,6	0	-0,62	0	-0,62	0,4	-0,22	0	-0,62	0	-0,62
13	0,84	0	-0,8	0	-0,84	0	-0,84	0	-0,84	0	-0,84	0	-0,84
14	1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1
15	0,93	0	-0,9	0	-0,93	0	-0,93	0,4	-0,53	0	-0,93	0	-0,93
16	0,97	1	0,03	0,4	-0,57	0,4	-0,57	1	0,03	1	0,03	0,4	-0,57
17	0,98	1	0,02	0	-0,98	0,4	-0,58	1	0,02	1	0,02	0,4	-0,58
18	0,66	1	0,34	1	0,34	1	0,34	1	0,34	1	0,34	1	0,34
19	0,66	1	0,34	0,4	-0,26	0,4	-0,26	1	0,34	0	-0,66	0,7	0,04
CFI	0,67			0,44		0,74		0,87		0,504		0,534	

Para avaliar o atendimento dos fatores cognitivos nos seis inspetores são aplicados testes psicométricos. Os resultados (*Inferior, Médio Inferior, Médio, Médio Superior, Superior ou Muito Superior*) obtidos respondem às características avaliadas de *Intracção, Afago, Ordem, Nível de Inteligência, Nível de Atenção e Auto-Exposição a situações novas*). Ver na seguinte tabela os resultados.

Tabela 5. Avaliações recebidas pelos inspetores durante a execução dos testes psicométricos						
Inspektor (CFI)	Intracção	Afago	Ordem	Nível de Inteligência	Nível de Atenção	Auto-exposição a situações novas
1 (0,67)	Inferior	Inferior	Abaixo da média	Inferior	Médio	Inferior
2 (0,44)	Muito Superior	Muito Superior	Abaixo da média	Inferior	Inferior	Inferior
3 (0,74)	Abaixo da média	Inferior	Muito Superior	Médio	Inferior	Médio inferior
4 (0,87)	Inferior	Inferior	Abaixo da média	Médio	Inferior	Superior
5 (0,50)	Inferior	Inferior	Abaixo da média	Inferior	Inferior	Superior
6 (0,53)	Acima da média	Muito Superior	Muito Superior	Inferior	Médio	Inferior

4. RESULTADOS

Os resultados mostram que os itens 13, 14, 15, 16 e 17 são os mais susceptíveis ao erro humano. O maior *Índice de Competência Fuzzy* (CFI) pertence ao inspetor 4 com valor de 0,87, e o menor CFI pertence ao inspetor 2 com valor de 0,44. Maiores recursos durante o treinamento devem ser aplicados no inspetor 2.

O conhecimento das lacunas (valores negativos da tabela 4) ajudam a um melhor planejamento dos treinamentos. Existe uma relação direta entre o CFI do inspetor e os gradientes existentes no mecanismo cognitivo deste. A argumentação está dada pelos resultados obtidos nos exames específicos teóricos e práticos (avaliação das competências técnicas) e as avaliações recebidas nos testes psicométricos. Nos inspetores 2 e 6 existem alterações das características de *intracepção* e *afago*, enquanto a característica de *ordem* encontra-se alterada nos inspetores 1, 2, 4 e 5. O *nível de inteligência*, se observou afetado nos inspetores 1, 2, 5 e 6; enquanto o *nível de atenção* e a *auto-exposição a situações novas* aparece em **níveis** abaixo da média nos inspetores 2,3, 4, 5 e 1, 2, 3, 6 respectivamente.

5. CONCLUSÃO

O uso da teoria dos conjuntos *fuzzy* para determinar as probabilidades de falha do inspetor durante a execução do ensaio não destrutivo por ultra-som, a partir de julgamentos subjetivos de especialistas, permitiu conhecer as tarefas mais críticas e estabelecer um conjunto de demandas de conhecimento e competências.

É demonstrada a possibilidade de aplicar exames específicos, teóricos e práticos, tratar as avaliações subjetivas matematicamente com a ajuda da teoria dos conjuntos *fuzzy* e obter de forma inédita um *Índice de Competência Fuzzy* que a sua vez nos mostra as lacunas técnicas presentes em cada inspetor avaliado. Estas lacunas constituem causas latentes de falha humana e informação importante para o treinamento do inspetor.

A aplicação de testes psicométricos nos permite conhecer os gradientes existentes no modelo mental dos inspetores que determinam seus comportamentos. O conceito de competência movimenta-se de uma abordagem objetiva (conhecimento técnico) para uma abordagem intersubjetiva (associada às características cognitivas dos inspetores) e esta informação contribui para a tomada de decisões na concepção do projeto e planejamento das necessidades de treinamento individualizado em cada inspetor de ultra – som .

6. REFERÊNCIAS

- ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, Appendix VIII,. 2001
- BUCKLEY, J, The multiple judge, multiple criteria ranking problem: A fuzzy set approach. **Fuzzy Sets and Systems**, v.13, p.25-37, 1984.
- DRURY, C, Human Factors, v.17, p.257-65, 1975.
- HIS-MEI-HSU, CHEN-TUNG-CHEN, Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 79, p. 279-85, 1996.
- ISO 9712:1999, Nondestructive testing – Qualification and certification of personnel, 1999
- ISO/IEC GUIA 25, General Requirements for the competence of calibration and testing laboratories, 1999.
- LAZZARI, L, MACHADO A, **Teoría de la decisión fuzzy**. Ediciones Macchi, Buenos Aires, 1998.
- MEGAW, E, Applied Ergonomics, v.10, p.27-32, 1979
- MORE, J D, A fuzzy approach to evaluation the human reliability in the ultrasonic nondestructive examinations, unpublished Doctoral dissertation, (UFRJ/PEMM/COPPE), 2004.
- National Transportation Safety Board, Report # NTSB/AAR-90/06. 1990
- National Transportation Safety Board, Report #N75B/AAR-98/01., 1998.
- NBR ISO 10015, Gestão da qualidade- Diretrizes para treinamento, 2001.
- SANTIN, J. L., Ultra-Som. Técnica e Aplicação.1ed. Rio de Janeiro, ed.Qualitymark, 1996.
- STEPHENS, H. M., NDE Reliability – Human Factors – Basic Considerations, In **15 th WCNDT**, Roma, 2000.
- WANG, M., SHARIT, J., DRURY, C., An application of fuzzy set theory for evaluation of human performance on an inspection task, **Applications of Fuzzy Set Theory in Human Factors**, edited by W. Karwowski and A. Mital, Amsterdam,1986
- ZADEH, L. A., Fuzzy Sets, **Information and Control**, v. 8, p.338-53, 1965.

PAPER TITLE

An application of *fuzzy* set theory for elaboration of training program to ultrasonic inspectors.

keyword -training, fuzzy sets, psychometric test, cognitive demands, ultrasonic inspection

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.