

**APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE
HUMANA NOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR ULTRA-SOM**

Jesús Domech Moré

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovado por:

Prof. Ari Sauer Guimarães, Dr. Sc.

Prof. Geraldo Bonorino Xexéo, D.Sc.

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, Dr.Sc.

Prof. Carlos Nunes Cosenza, Ph.D.

Prof. Ricardo Tanscheit, Ph.D.

Prof. Mauricio Saldanha Motta, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2004

DOMECH, JESUS MORE

Aplicação da Lógica Fuzzy na
Avaliação da Confiabilidade Humana nos
Ensaaios Não Destrutivos por ultra-som.
[Rio de Janeiro] 2004.

XI, 173 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ),
D.Sc., Engenharia Metalúrgica e de
Materiais , 2004).

Tese- Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE.

1. Confiabilidade humana.
2. Lógica Fuzzy.
3. Possibilidade de erro.

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

À minha mãe Ena, ao meu pai Silvio,
às minhas irmãs Ena Lidia e Silvita,
à minha esposa Lien, ao meu filho Danilo Jesús,
aos meus sobrinhos Dairon, Javi e Dunia.
À minha avó sempre presente Guille.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pela razão da minha existência, pelos ensinamentos, pela formação moral e pelo incentivo especial nos últimos 17 anos.

À minha esposa, “ nenê ”, pelo apoio, dedicação, ajuda, incentivo e, principalmente, por todo o amor, carinho e pelo presente entregue durante esta longa jornada – meu filho Danilo Jesús – sem os quais seria impossível concluir a presente tese.

Ao Prof. Ari Sauer pela paciência, confiança e apoio durante todo o curso e pela competência na orientação da tese.

Ao Prof. Geraldo Xexéo pela dedicação, amizade, competência e atuação decisiva na orientação da tese.

Ao Prof. Carlos Cosenza, pela valiosa colaboração e apoio durante a realização da tese

Ao meu irmão Juan C Sánchez Periche pelo apoio pessoal irrestrito.

Ao meu irmão Luiz Mamede Magalhães e à sua família pelo apoio, amizade, pela gentileza e participação.

Ao meu irmão Gustavo A. Benítez pelo constante apoio e ajuda durante esta jornada.

Ao meu amigo Manuel F. Rondón pela confiança, apoio e pela amizade.

Ao meu grande amigo Hélcio B. Mosciaro pela amizade e apoio em todo momento.

Aos meus queridos amigos Normita, Ochoa, Maritza, Rossilda, Papiti, Lubián, René Sena, Harvey Cosenza, Ronaldo Pollis, Lúcio Vasconcellos, Filiberto, Maria Elena e Marcelo pela acolhida, sensibilidade e apoio nos momentos que precisei.

Aos especialistas Ronald Manfred, Humberto Campinho, Luiz Mamede, Ricardo Teixeira, Paulo César Henriques, José Renato Henriques, Sergio Damasceno, Ricardo Carneval, Fernando Verdasca e Luis Sérgio pela participação decisiva.

Ao Diretor Superintendente do IBQN Wilson Paulucci Rodrigues e ao Diretor Técnico do IBQN André Luiz V. Da Costa e Silva pelo apoio.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Nuclear, Instituto Superior de Ciências e Tecnologias Nucleares em Havana (1987-88) pelo incentivo e a força proporcionada nos últimos 17 anos.

Ao CNPQ pelo auxílio, ao meu governo e ao povo cubano por subsidiar meus estudos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE HUMANA NOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR ULTRA-SOM.

Jesús Domech Moré.

Abril 2004

Orientadores: Ari Sauer Guimarães.

Geraldo Bonorino Xexéo

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Este trabalho desenvolve uma metodologia *fuzzy* para avaliação da confiabilidade humana nos ensaios não destrutivos tipo ultra-som. Além disso desenvolve também um modelo *fuzzy* baseado em 59 fatores que influenciam no desempenho do inspetor criando um padrão de qualidade do ensaio. Assim sendo, este padrão pode ajudar a trazer informações úteis para medir o índice de confiabilidade humana em diferentes ambientes físicos. Uma árvore de falhas *fuzzy* foi construída para o ensaio por ultra-som e utilizada para obter a probabilidade de erro humano durante a execução da inspeção manual ultra-sônica. A Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* mostrou-se uma ferramenta poderosa na avaliação dos atributos de confiabilidade humana e dos eventos durante a execução do procedimento de ultra-som.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

**A FUZZY APPROACH TO EVALUATION THE HUMAN RELIABILITY IN
THE ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE EXAMINATIONS.**

Jesús Domech Moré

Abril 2004

Advisors: Ari Sauer Guimarães

Geraldo Bonorino Xexéo.

Department: Materials and Metallurgical Engineering.

This work presents a fuzzy methodology for evaluation of human reliability in ultrasonic nondestructive examinations. In addition, a fuzzy model based on 59 performance shaping factors forming a quality pattern of test is presented. This pattern can help bring useful information to establish a human reliability index in the different physical environment. A fuzzy failure was constructed for the ultrasonic nondestructive examination and used in order to obtain the human possibility error during the manual ultrasonic examination. Fuzzy Set Theory revealed itself as a powerful tool either for evaluation of human reliability or during the execution of events of the manual procedure of the test.

INDICE

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Lista de siglas.....	ix
I.- INTRODUÇÃO.....	1
I.1.Justificativa da importância do trabalho.....	4
A situação no Brasil.....	4
I.2.Objetivos.....	6
II.-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
II.1.- Confiabilidade humana convencional.....	8
II.2.-Confiabilidade dos Ensaios Não Destrutivos.....	21
II.3.- Confiabilidade humana <i>fuzzy</i>	35
II.3.1.- Introdução à Lógica <i>fuzzy</i>	35
II.3.2.- Conjuntos <i>fuzzy</i>	37
II.3.3.-Representação.....	39
II.3.4.- Características.....	40
II.3.5.- Operações.....	43
II.3.6.- Variáveis lingüísticas.....	46
II.3.7.- Operações de agregação.....	48
II.3.8.- Relação <i>fuzzy</i>	50
II.3.9.- Números <i>fuzzy</i>	51

II.3.10.- Aritmética <i>fuzzy</i>	55
II.3.11.- Defuzzificação.....	56
II.3.12.- Confiabilidade <i>fuzzy</i>	56
 III.- MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
III.1.- Investigação do problema de confiabilidade humana em ensaios não destrutivos por ultra – som.....	62
III.2.- Avaliação da Confiabilidade Humana considerando os PSFs.....	76
III.2.1 Aplicação da metodologia para avaliação da confiabilidade humana.....	80
 IV.- CONCLUSÕES.....	131
 V.- RECOMENDAÇÕES PARA O TRABALHO FUTURO.....	133
 VI.-BIBLIOGRAFIA.....	134
 VII.- ANEXOS.....	140
 VIII.- GLOSÁRIO SOBRE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR ULTRA-SOM..	156

LISTA DE SIMBOLOS E NOMENCLATURA.

e.- espessura

Ø.- diâmetro

A.- Aprovado

AIR.- Instituto Americano de Pesquisa para o Armazenamento de Dados (American Institute Research Data Store).

AIs.- Ações Inseguras (Action of Insecurity).

ASME.- Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (American Society of Mechanical Engineers)

ASEP.- Projeto de Avaliação de Seqüências de Acidentes (Accident Sequence Evaluation Program).

ATHEANA.- Uma Técnica para a Análise do Erro Humano (A Technique for Human Error Analysis).

CEC/JRC.- Centro da Comissão Européia/Centro de Pesquisa Conjunta (Center of the European Comission/Joint Research Center).

CFP.- Probabilidade de Falha Cognitiva (Cognitive Failure Probability)

CPCs.- Condições de Desempenho Comum (Common Performance Conditions).

CREAM.- Método de Análise do Erro e da Confiabilidade Humana (Cognitive Reliability and Error Analysis Method).

CTSB.- Conselho Canadense para a Segurança no Transporte.

DC-001.- Procedimento para a Qualificação e Certificação de pessoal em ensaios não destrutivos.

EFC.- Contexto de Indução ao Erro (Error Failure Context).

EN 473.-Norma européia para a Qualificação e Certificação de pessoal em ensaios não destrutivos.

END.- Ensaio Não Destrutivo.

ENIQ.- Engine Titanium Consortium

ENSIP.- Projeto de Integridade Estrutural de Engenharia (Engine Structural Integrity Program).

EPE.- Exame Prático Específico.

ETE: Exame teórico específico.

EPRI.- Instituto de Pesquisas de Potência Elétrica (Electric Potency Research Institute).

HCR.- Confiabilidade Cognitiva Humana (Human Cognitive Reliability).

HEP.- Probabilidade de erro Humano (Human Error Probability).

HFE.- Eventos de falha humana (Human Failure Events)

ISA.- Análise de Segurança Integrado (Integral Security Analysis)

ISO.- Organização Internacional de Normalização (International for Standardization Organization).

MAUD.- Multiple Attribute Utility Decomposition

NTSB.- Conselho de Segurança Nacional do Transporte nos Estados Unidos.

PDI.- Iniciativa de Demonstração do Desempenho (Performance Demonstration Initiative).

PFA.- Probabilidade de Falso Alarme (Probability of False Alarm).

PHRA.- Análise Probabilística de Confiabilidade Humana (Probabilistic Human Reliability Analysis)

PISC.- Program for Inspection of Steel Components (Projeto de Inspeção aos Componentes de aço).

POD.- Probabilidade de Detecção do Defeito.

PR-011.- Procedimento usado pelos inspetores de END (fixa as condições para a execução do ensaio por ultra-som em juntas soldadas).

PRA.- Gerenciamento Probabilístico de Risco (Probabilistic Risk Administration).

PSF.- Fator de Incidência no Desempenho (Performance Shaping Factor)

PSA.- Análise Probabilística de Segurança (Probabilistic Security Analysis)

ROC.- Características de Operação Relativa (Relative Operating Receiver).

S2, S5.- Subníveis de qualificação dos inspetores

SEQUI.- Centro de Qualificação de Inspetores.

SHARP.- Procedimento de Confiabilidade Humana Sistêmica

SLI.- Índice de Probabilidade de Sucesso (Success Likelihood Index)

SNQC/END.- Sistema Nacional de Qualificação e Certificação de Pessoal em END.

S-R-K.- Destreza, Regras, Conhecimento (Skill, Rule, Knowledge)

THERP.- Técnica para a Predição da Taxa de Erro Humano (Technical for Human Error Rate Prediction).

I. INTRODUÇÃO

O ensaio ultra-sônico tem como objetivo a detecção de defeitos ou discontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos, metálicos e não metálicos. Muitas das vezes tais defeitos são característicos 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 discontinuidade (interface), e, se for refletido por esta discontinuidade, 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 discontinuidades. Algumas discontinuidades superficiais também podem ser detectadas com este ensaio não destrutivo.

Existem vários métodos e técnicas de inspeção, tais como método pulso-eco, método por transparência, método por ressonância, técnica por contato, técnica por imersão, inspeção manual e inspeção automática. Ao mesmo tempo, as informações obtidas nos sistemas de inspeção podem ser representadas por vários tipos de mostradores [1]. As abordagens neste trabalho referem-se ao método pulso-eco, à técnica por contato e à inspeção manual.

No método pulso-eco, o transdutor emite pulsos de energia ultra-sônica, que são introduzidos no material em intervalos regulares de tempo, através de um acoplante. Se os pulsos encontram uma superfície refletora, parte ou toda a energia é refletida e retorna ao transdutor, que converte as vibrações em energia elétrica e a transforma em sinal na tela do aparelho. Tanto a quantidade de energia refletida como o tempo decorrido entre a transmissão do pulso inicial e a recepção são medidos pelo equipamento. Este processo de emissão e recepção de pulsos de energia ultra-sônica é repetido para cada pulso sucessivo.

Com relação ao método pulso-eco, temos os mostradores de sinais tipo A, tipo B, tipo C e tipo P. O mostrador tipo A (*A-scan display*) (ver Figura I.1) aqui apresentado mostra como as ondas ultrasônicas ao se propagar em um meio e encontrar

uma barreira são refletidas mostrando a existência da descontinuidade. A linha horizontal em um osciloscópio representa o tempo decorrido, e as deflexões verticais, a amplitude dos ecos. O tamanho das descontinuidades pode ser estimado por comparação da altura do eco da descontinuidade com um outro refletor de tamanho conhecido. A localização da descontinuidade (profundidade) é determinada através da leitura de uma escala graduada no osciloscópio do aparelho.

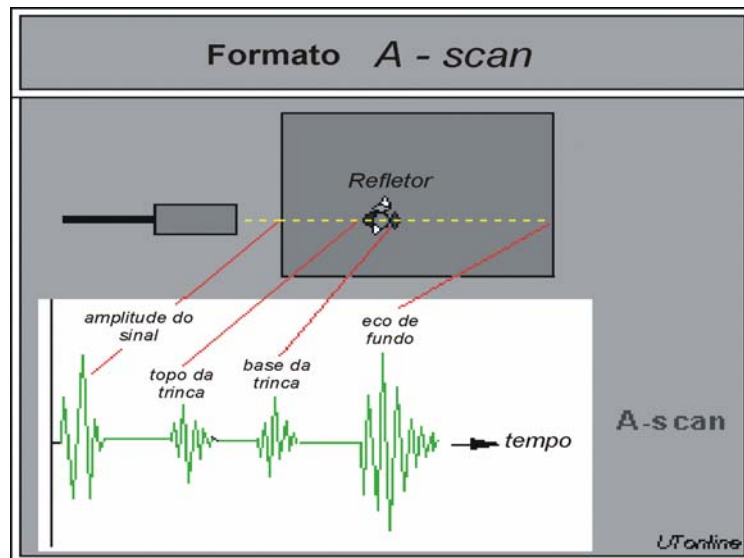


Figura I.1.- Mostrador tipo A.

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.

Apesar 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 de ensaio requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor. 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 fazer um estudo da confiabilidade humana. Historicamente o fator humano tem sido um item importante nos acidentes tecnológicos devido a falhas durante o projeto de equipamentos, durante a calibração, execução e/ou interpretação de procedimentos orais ou escritos, fatores organizacionais e, ainda, outras falhas. Mesmo assim, quando a questão é aumento de rendimentos e de elevação do fator operacional, geralmente as estratégias de gestão priorizam a aplicação de recursos em estudos de confiabilidade de equipamentos e de otimização de processos através da automação em tempo real. De forma geral são desenvolvidas estas linhas para depois se adaptar o homem ao processo quando na realidade dever-se-ia pesquisar a confiabilidade humana para, na medida do possível adaptar o equipamento e o meio – ambiente ao homem.

Os laboratórios de END que atuam no mercado de trabalho têm implementado um Sistema de Gestão da Qualidade em correspondência com os requisitos estabelecidos na norma ISSO/IEC GUIA 25 [2] 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? Não podemos garantir a qualidade do ensaio sem antes ter feito um estudo da confiabilidade do sistema de inspeção e mais especificamente da confiabilidade humana.

I.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 [3].

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 [4]. 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* [5].

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.

- **A 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 exigem as normas ISO 9712:1999 [6].

A cada nível pertencem diferentes subníveis em dependência das atribuições e competências. Por exemplo, no procedimento DC-001 [7] aparecem as atribuições e competências de um inspetor de ultra-som nível II e subnível S2 :

- i. Execução de ensaio de medição de espessura em materiais metálicos, com avaliação de resultados.
- ii. Execução de ensaios em laminados com cabeçotes normais e duplo cristal, com avaliação de resultados.
- iii. Inspeção de fundidos e forjados.
- iv. Inspeção de soldas de topo em peças planas com $e \geq 15$ mm. (e = espessura).
- v. Inspeção em soldas de topo circunferencial em tubos com $e \geq 15$ mm e $\varnothing$ externo ≥ 220 mm ($\varnothing$ nominal ≥ 8 ").
- vi. Inspeção em soldas de topo longitudinais em tubos com $6 \text{ mm} \leq e < 15 \text{ mm}$, e $\varnothing$ externo ≥ 508 mm ($\varnothing$ nominal ≥ 20 ").

Já um inspetor de ultra-som nível II e subnível S5 estará qualificado para ter as mesmas atribuições e competências do inspetor de subnível S2, e para fazer inspeções em soldas de topo circunferenciais em tubos com $e \geq 6$ mm e diâmetro externo entre $114 \text{ mm} \leq \varnothing \text{ externo} < 220 \text{ mm}$ ($4" \leq \varnothing \text{ nominal} < 8"$) .

Durante as paradas de manutenção, na construção de novas unidades ou nas grandes modificações de projeto, numerosos ensaios são realizados para garantia da qualidade dos serviços e reparos executados e para avaliação de integridade de

equipamentos e tubulações. Tais serviços são executados usualmente por firmas contratadas que utilizam mão de obra terceirizada que não tem um vínculo de longo prazo com a contratada. Desta forma a qualidade dos serviços irá depender diretamente do apoio que tais profissionais tiverem da contratada em termos de procedimentos, equipamento e consumíveis. Como tais serviços, especialmente os relacionados a controle de qualidade, implicam em uma tarefa a mais na seqüência de serviços executados, é exigida de tais profissionais uma elevada produtividade. O resultado é que estes se encontram sob pressão da contratada para adiantarem as frentes de manutenção, realizando rapidamente os ensaios. Na ânsia de atenderem a esta necessidade não é difícil que os profissionais se encontrem sob o dilema da manutenção da produtividade em detrimento da qualidade. Segundo SANTOS [8], o equilíbrio desta delicada balança depende cada vez mais de uma atuação externa que venha a contrapor-se à pressão pela produtividade, gerando daí a necessidade das auditorias de END's.

I.2 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é implementar a metodologia *fuzzy* de análise de confiabilidade humana de um sistema de inspeção por ultra-som. Duas principais suposições são feitas na pesquisa:

- i. Somente os erros humanos são considerados; todos os outros elementos do sistema de inspeção atuam de maneira satisfatória.
- ii. A falha do sistema de inspeção deve-se a erros humanos; outros defeitos inerentes do sistema não são considerados nesta análise.

Para desenvolver esta metodologia, vários métodos de análise de confiabilidade humana foram estudados, entre eles THERP, CREAM, o método de RASSMUSSEN e ATHEANA [9,10,11,12].

Nos estudos do desempenho humano é necessário considerar aqueles fatores que têm o maior efeito no desempenho. Num ambiente de interação homem – máquina muitos são os fatores que incidem no desempenho humano (PSFs - *performance shaping factors*). Alguns como o equipamento, os procedimentos ou as instruções orais são fatores externos. Outros como as características individuais do inspetor, as suas motivações, suas destrezas e habilidades, são fatores internos. Os fatores de incidência no comportamento humano serão analisados como atributos de confiabilidade humana.

Um estudo de elicitación de conhecimento de especialistas é feito com o objetivo de obter os dados expressados em termos lingüísticos, para conhecer o nível de importância de cada atributo de confiabilidade. Buscando oferecer uma perspectiva mais poderosa de Análise de Confiabilidade, constrói-se um modelo que faz uso de uma abordagem heurística, utilizando a informação imprecisa ou mesmo a ausência dela, tendo como saída a avaliação da confiabilidade humana em termos de grau de atendimento a um padrão de desempenho do inspetor.

O estudo do procedimento PR-011 que fixa as condições exigíveis e práticas recomendadas na realização do ensaio não destrutivo por ultra-som através da construção de uma boa seqüência de tarefas, a mais pulverizada possível, facilita a identificação daqueles eventos humanos (tarefas ou ações) que afetam a confiabilidade do sistema de inspeção. As opiniões dos especialistas, em termos de “*probabilidades de falha*” (presentes em cada ação humana do procedimento de ensaio), o nível de dependência entre tarefas e o grau de transtorno que ocasiona uma falha nos eventos subsequentes, são os dados de entrada de uma árvore de falhas do inspetor. Combinar as curvas de possibilidades para cada ação humana numa só permite ter-se um conceito de medida *fuzzy* usado durante a análise qualitativa e quantitativa da árvore de falha do inspetor. Na saída dos cálculos da árvore de falhas, obtemos uma probabilidade de erro expressa através de um subconjunto *fuzzy* no intervalo $[0,1]$ que representa a confiabilidade humana durante a interação do inspetor com o procedimento PR-011.

Devido à necessidade constante de altos níveis de confiabilidade, este trabalho é uma tentativa de avaliar a confiabilidade humana do ensaio não destrutivo por ultra-som.

II.- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

II.1 Confiabilidade humana convencional.

A falha é um fenômeno praticamente inevitável nos sistemas e produtos tecnológicos. Na teoria convencional, a confiabilidade de um sistema é definida como a probabilidade que tem o sistema para desempenhar funções predefinidas (sem falhas) num tempo predeterminado sob condições pré-especificadas. A teoria convencional de confiabilidade é baseada em duas suposições:

- i. A probabilidade que falhe o comportamento do sistema está inteiramente caracterizada num contexto de medidas de probabilidade.
- ii. O sistema demonstra somente dois estados nítidos: funcionando ou falhado; em qualquer instante, o sistema se encontra em um dos dois estados.

Segundo FUJITA [13] o início da análise de confiabilidade humana data dos anos 50. Um dos estudos mais antigos, baseado na análise convencional de confiabilidade, foi feito no Sandia National Laboratory nos Estados Unidos, envolvendo sistemas de armas nucleares. Muito esforço foi feito para desenvolver um banco de dados de confiabilidade humana no Instituto Americano de Pesquisa para o Armazenamento de Dados (American Institute Research Data Store – AIR) até o início dos anos 60.

Em 1964, foi realizado um simpósio nos Estados Unidos no qual o estado da arte dos métodos de Confiabilidade Humana foi apresentado, sendo a técnica THERP (Technical for Human Error Rate Prediction) e a simulação de Monte Carlo as mais destacadas. SWAIN [14] classificou os métodos de análise de confiabilidade humana como métodos da primeira e da segunda geração. Esta primeira geração de métodos foi influenciada amplamente pelo enfoque de análise probabilística de segurança (PSA). Nos anos 70, o pesquisador Swain afirmou que a metodologia THERP tinha chegado a um nível que podia ser aplicada a problemas industriais reais. Ao mesmo tempo, a técnica de simulação de Monte Carlo emergiu como uma metodologia significativa de pesquisa.

Todos estes métodos dependem de dados para a avaliação das ações humanas. O conceito de dados aqui inclui os dados qualitativos (ações de erros e PSFs) e os dados

quantitativos referentes às probabilidades de erros humanos (HEP). Nem todos os métodos são igualmente significantes, aqui são apresentados cinco métodos fundamentais representando a primeira geração: THERP (Technique for Human Error Rate Prediction), ASEP (Accident Sequence Evaluation Program), HCR (Human Cognitive Reliability), PHRA (Probabilistic Human Reliability Analysis) e SLIM (Success Likelihood Index Method). Geralmente são quatro as fontes de onde são obtidos os dados: estimados de especialistas, estudos de simulação (em HCR e PHRA), experimentos e experiências operacionais (em THERP e ASEP).

SWAIN [9] considerou como as mais notáveis características comuns dos métodos da primeira geração tipificadas através da THERP as seguintes:

- i. O enfoque da THERP usa a tecnologia convencional de confiabilidade onde o desempenho humano é comparado ao desempenho do equipamento, i.e as tarefas humanas são substituídas por probabilidades nominais de erros.
- ii. A análise de confiabilidade humana é limitada somente às ações humanas que são incluídas na análise probabilística de segurança na árvore de eventos (diagrama lógico utilizado para representar as diferentes subtarefas que formam parte de uma tarefa principal com seus correspondentes valores de HEP, necessários para estimar o valor de HEP da tarefa) e como resultado a qualidade da análise depende da precisão e o cuidado do modelo de análise probabilística de segurança.
- iii. A ação humana é representada de forma binária, ou seja, na hora de fazer uma ação o resultado poderia ser ou sucesso ou falha. A árvore de eventos humanos é um exemplo típico desta representação binária das ações humanas.
- iv. Os aspectos cognitivos internos não tiveram o tratamento adequado, ou seja, os erros cognitivos podem ser a causa de uma omissão (uma tarefa ou parte da tarefa que deveria ser executada, mas não foi) ou de uma comissão (uma tarefa ou parte da tarefa que é executada incorretamente), quando na realidade o erro cognitivo acontece durante os processos de diagnoses (busca, classificação, interpretação, tomada de decisões, etc).
- v. A confiabilidade humana é a probabilidade de que a ação humana requerida seja realizada corretamente no momento requerido (se existirem limitações do tempo), ou seja, a probabilidade de que não se produz erro humano. O erro humano é determinado pelos limites de tolerância estabelecidos pelo sistema sobre o qual se

atua; por isso a definição de confiabilidade humana está associada à confiabilidade e disponibilidade dos sistemas. É feita uma ênfase sobre a quantificação das probabilidades do desempenho incorreto das ações humanas, identificadas nos PSA das árvores de eventos. Esta quantificação criou a necessidade de ter um banco de dados sobre as probabilidades de erros humanos (HEP) para diferentes tarefas. Alguns desses dados podem ser efetivamente usados somente para aquelas situações onde as ações humanas podem ser descritas relativamente fáceis num ambiente simples. Entretanto, para as situações onde as ações humanas devem ser realizadas num ambiente mais complicado, a aplicação desses dados pode ser, praticamente, sem efeito.

- vi. Tratamento indireto do contexto: As ações humanas que necessitam ser analisadas são identificadas dentro de uma árvore de eventos. A tarefa de interesse é decomposta em subtarefas com suas correspondentes “probabilidades nominais de erros humanos”. A análise da tarefa é complementada com os fatores de incidência no comportamento (*performance shaping factors- PSFs*). Um PSF é qualquer fator que influencia no comportamento humano e portanto na qualidade de sua resposta ou desempenho (ver Figura II.1). Entretanto os mecanismos no qual os PSFs exercem uma influência sobre o desempenho humano não são descritos através do modelo do operário. A influência dos PSFs sobre o desempenho do operário é simplesmente levado em conta através da multiplicação de HEPs nominais e

$$\Pr(\text{HEP} | \text{Context}) = \Pr(\text{Basic HEP}) * [\sum \text{PSF}_i * W_i] \quad (\text{II.1})$$

onde W_i refere-se a um fator de peso do i -th PSF para uma tarefa específica.

Procedimento usado para o cálculo de THERP [9]:

1. Coleção de informação relevante sobre a tarefa a executar.
2. Decomposição de tarefas em ações elementares.
3. Geração da árvore de eventos (identificação de erros).
4. Assinação da taxa de erro básica em dependência do modo de erro.
5. Avaliação do Fator de Incidência no Comportamento (PSF).
6. Avaliação da dependência entre ações.
7. Avaliação da HEP (Probabilidade de erro humano).
8. Ajuste dos efeitos de recuperação de erros.
9. Análise de sensibilidade (se necessário).

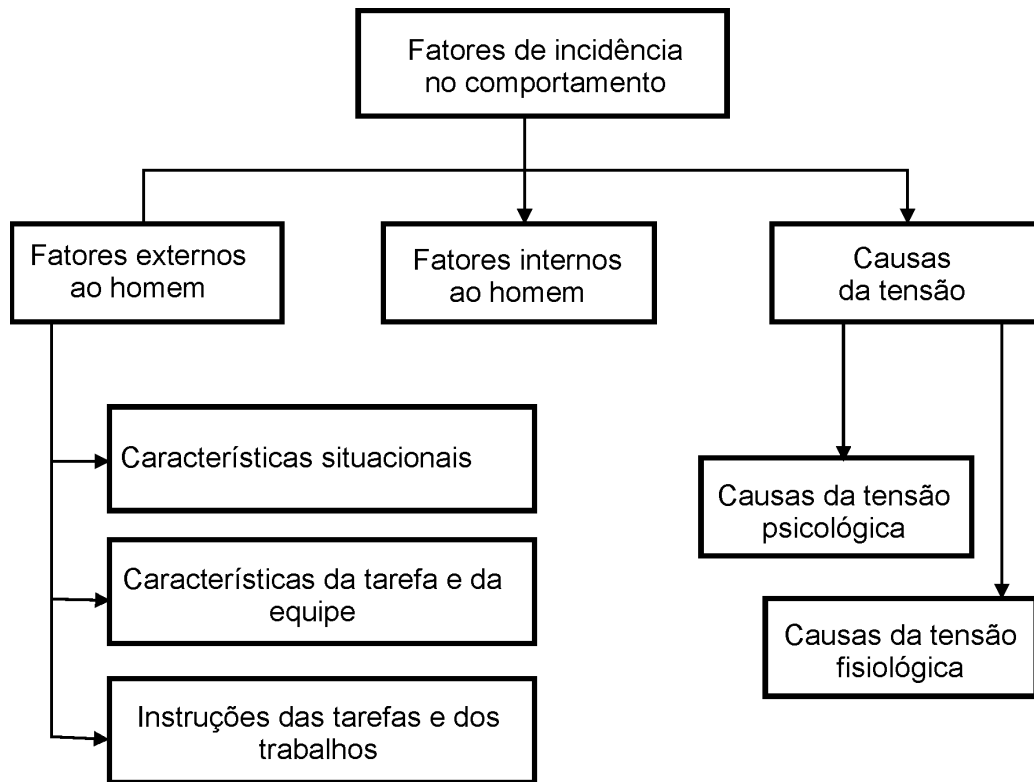


Figura II.1.- Fatores de incidência no comportamento humano (PSF).

Embora o método THERP continuasse a ser identificado como a análise mais genérica durante este período, os pesquisadores começaram a perceber a necessidade de se estabelecer um método capaz de trabalhar com as falhas cognitivas, a saber, "a diagnose".

As correlações tempo-confiabilidade emergiram como uma medida de tempo (tempo disponível para diagnose). Elas são uma técnica analítica para a quantificação da probabilidade de erro humano utilizando a árvore de ações do operário e os erros cognitivos. Essas correlações constituem uma curva de probabilidade de falha em função do tempo disponível para executar determinada ação. As curvas são construídas a partir de julgamentos de especialistas ou de dados de um simulador (Ver Figura II.2). A proposta mais antiga foi a Correlação 'Tempo – Confiabilidade' desenvolvida por Wreathall e seus colegas. Eles propuseram determinar as probabilidades do erro humano em função do tempo disponível para diagnose.

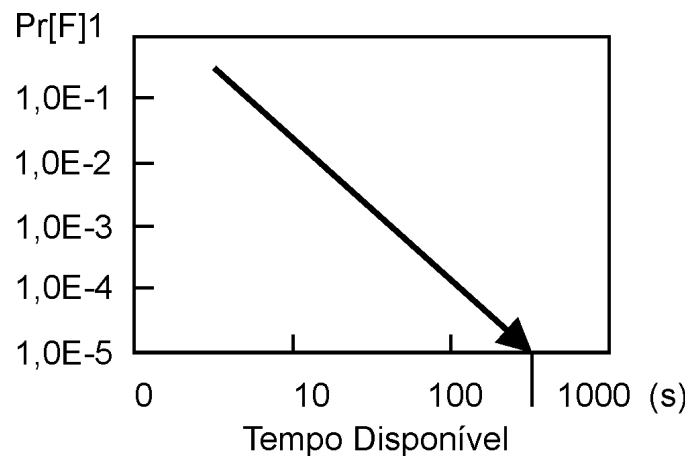


Figura II.2.- Correlação ‘Tempo – Confiabilidade’.

RASSMUSSEN desenvolveu o esquema S-R-K [11], o qual forneceu uma influência marcante no tempo de pesquisa dos fatores humanos na área nuclear. Ele considerava três tipos de comportamento humano: comportamento baseado na destreza (onde existe uma relação automática “estímulo – resposta”; não existe um processo de interpretação ou diagnóstico e depende do nível de treinamento e prática mas não da complexidade da tarefa); comportamento baseado em regras (é governado por regras que o operário conhece, tem um nível de prática menor do que o comportamento anterior devido a que as tarefas são executadas comparando a informação que se recebe com regras e padrões com os que está familiarizado usando o enfoque SE-ENTÃO, requer de certo nível de interpretação e diagnóstico) e o comportamento baseado no conhecimento, que depende totalmente dos conhecimentos do operário e habilidade para utiliza-los.

O modelo de Rasmussen é baseado na suposição de que os seres humanos geralmente realizam suas tarefas no nível mais baixo possível para minimizar o volume de elementos de tomada de decisões ou de processos cognitivos. As tarefas baseadas na destreza requerem pouco ou nenhum processo de tomada de decisões e, por isso, ao receber o estímulo a tarefa é diretamente executada. No caso das tarefas baseadas em regras requer-se certo processo de tomada de decisões; por isso ao receber o estímulo inicial, a informação recebida passa por um processo de integração, processamento e planejamento do que será feito, isto é, seleção do procedimento adequado para a situação e sua execução.

HANNAMAN e seus colegas tentaram combinar o esquema S-R-K com o conceito de correlação tempo-confiabilidade [13], e propuseram um método chamado Confiabilidade Cognitiva Humana (HCR – Human Cognitive Reliability). Este método considerava os três tipos de comportamento humano: destreza, regras e conhecimento; assim como três fatores de incidência no comportamento: experiência, stress e interação homem - máquina.

$$P(t) = \{[(t / T_o) - B] / C\}^A \quad (II.2)$$

onde,

P(t) – Probabilidade de não resposta

t - tempo disponível pelo operador

T_o - tempo meio para executar a tarefa.

A, B, C – coeficientes segundo o tipo de comportamento.

$$T_o = T_{o\,no\,min\,al} * \prod (1 + K_j)$$

K_j – Coeficiente dependente do fator de incidência no comportamento.

Na tabela II.1 estão representados os valores dos coeficientes A, B, C em função do tipo de comportamento.

Tabela II.1.- Coeficientes A, B, C.

Tipo de Comportamento	A	B	C
Destreza	1.2	0.7	0.409
Regras	0.9	0.6	0.601
Conhecimento	0.8	0.5	0.791

Na tabela II.2 estão os valores de K_j em função do PSF. Cada fator de incidência no comportamento do homem está representado por diferentes níveis

A incorporação dos aspectos de conhecimentos estatísticos à Análise de Confiabilidade Humana foi um outro interesse técnico nos meados dos anos 80, levando ao surgimento de outras técnicas estruturadas.

Tabela II.2.- Coeficientes K_j

Fator de incidência no comportamento	Nível	K_j
Experiência (K_1)	1.- Especialista, bem treinado.	-0.22
	2.- Médio, treinamento regular.	0.00
	3.- Novo, treinamento mínimo.	0.44
Nível de estresse (K_2)	1.- Situação de emergência grave.	0.44
	2.- Situação de emergência potencial.	0.28
	3.- Ativo. Não emergência.	0.00
	4.- Baixa atividade, baixa vigilância.	-0.28
Qualidade da interação homem – máquina (K_3)	1.- Excelente.	-0.22
	2.- Boa.	0.00
	3.- Aceitável.	0.44
	4.- Pobre.	0.78
	5.- Extremamente pobre.	0.92

A mais típica das técnicas estruturadas é o Procedimento de Confiabilidade Humana Sistêmica (SHARP) proposto por HANNAMAN [13]. O modelo SHARP adota a Confiabilidade Cognitiva Humana (HCR) e THERP como métodos padrões para avaliação das falhas cognitivas e falhas de procedimento respectivamente.

WHALLEY [15] afirma que o Gerenciamento Probabilístico de Risco (PRA) foi, em 1983, considerado o mais importante método para aumentar a segurança em engenharia. Este Gerenciamento foi também contribuindo para o fato que havia uma necessidade para o estudo contínuo da falha humana. REASON (1977), NORMAN (1981) e SENDERS (1983) reforçaram a teoria relacionando-a às causas das falhas resultantes, enquanto EMBREY [16] explorou o uso de julgamento especializado para manipular um modelo de confiabilidade humana e proporcionar as probabilidades de falha. O modelo de Embrey considera a Probabilidade de Erro Humano (HEP) como uma função dos fatores de incidência humana (PSF) e os efeitos totais de diferentes PSFs podem ser agregados através da decomposição funcional de atributos múltiplos (Multiple Attribute Utility Decomposition). Este modelo é conhecido como SLIM-MAUD (Success Likelihood Index - Multiple Attribute Utility Decomposition) e apresenta o seguinte procedimento:

- i. Seleção de PSFs relevantes para as tarefas.
- ii. Avaliação através da opinião do especialista do nível de importância de cada PSF.

- iii. Julgar cada PSF através da opinião do especialista.
- iv. Cálculo do Índice de Probabilidade de Sucesso (Success Likelihood Index -SLI).
- v. Avaliação da HEP usando como base dados empíricos.(Ver Figura II. 3).
- vi. Avaliação do intervalo de confiança do resultado.

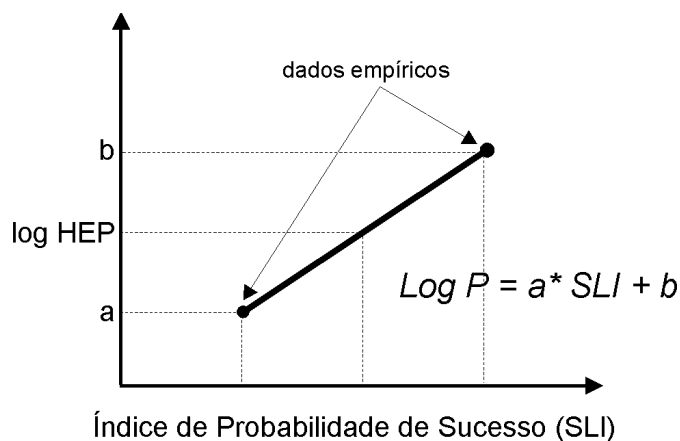


Figura II.3.- Avaliação do HEP a partir do SLI.

Nos métodos da primeira geração, o trabalho humano foi caracterizado através de uma escala de "o fazer" para "o pensar". Algumas tarefas tais como as ações manuais ou dar seguimento ao procedimento requerem muito de “fazer” e pouco de “pensar”; entretanto, em outros casos, como a diagnose, planejar, interpretar e avaliar requerem muito de “pensar” e pouco de “fazer”.

O desenvolvimento da tecnologia moderna mudou a natureza do trabalho humano. Hoje, no projeto de sistemas, aos aspectos ergonômicos convencionais devemos adicionar os aspectos ergonômicos cognitivos. Nas análises de confiabilidade humana a primeira geração foi substituída pela segunda geração dentro de um contexto sensitivo – análise de confiabilidade cognitiva.

As falhas humanas estão presentes nos sistemas cognitivos. Segundo HOLLNAGEL [12], a base para o entendimento do desempenho humano é ter um conhecimento detalhado das ações humanas em um contexto objetivo e na sua imagem subjetiva existente na mente humana. Desta forma, se é capaz de definir, predizer e reconhecer o limiar deste sistema cognitivo num contexto dado, o qual pode levar a erros cognitivos.

Os métodos da segunda geração, tais como ATHEANA (ver Figura II.4), HERMES, MERMOS e CREAM, já consideram os níveis de decisão, os processos de diagnose, as destrezas, os conhecimentos do operário e os fatores organizacionais.

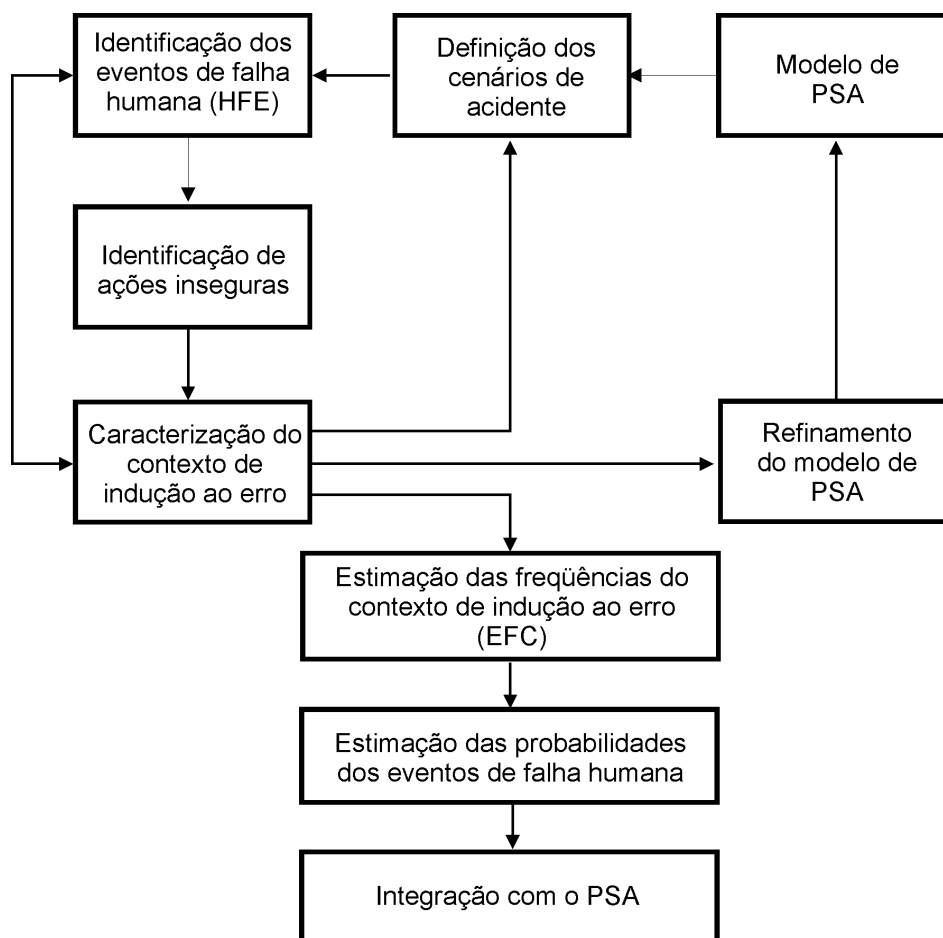


Figura II.4.-Análise de Confiabilidade humana. Método ATHEANA.

As mais notáveis características comuns dos métodos de segunda geração, tipificadas através da ATHEANA (*A TEchnique for Human Error ANALysis*) e CREAM (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*) são as seguintes :

O método ATHEANA começa com uma apresentação de eventos de falha humana (HFEs) que são identificados desde cenários de acidente usando um modelo de Análises Probabilístico de Segurança (PSA). Os HFEs são caracterizados através de ações inseguras (AIs), as quais constituem ações inapropriadas escolhidas pelo operário ou não escolhidas quando necessárias que resultam numa degradação da condição de segurança do sistema. O seguinte passo é para caracterizar o contexto de indução ao erro (EFC) que é o efeito combinado dos fatores de incidência no comportamento

(PSFs) com as condições do sistema que criam uma situação em que o erro humano é provável.

O caminho através do qual é quantificada a probabilidade de falha humana num evento é dado por:

$$P (HFE_{ijr}) = P (EFC_i) * P (AI_j | EFC_i) * P (R | EFC_i | AI_j | E_{ij}) \quad (II.3)$$

onde,

$P (EFC_i)$: probabilidade do contexto induzir ao erro.

$P (AI_j | EFC_i)$: probabilidade de se realizar uma ação insegura no contexto de indução ao erro.

$P (R | EFC_i | AI_j | E_{ij})$: probabilidade de não recuperação no contexto de indução ao erro dada a ocorrência da ação insegura e a existência de uma evidência adicional (E_{ij}) seguindo a ação insegura.

HOLLNAGEL [10] definiu as seguintes características de ATHEANA:

- i. É centrado na identificação do contexto de indução ao erro e dos erros humanos, em particular os erros de comissão que podem ocorrer no contexto de indução ao erro em continuação de um acidente (ao cometer um erro o pessoal pode originar uma situação anormal ou acidente).
- ii. Procedimentos muito detalhados para se conhecer em detalhe a razão pela qual as ações não seguras são associadas a eventos de falha humana. O método identifica detalhadamente os mecanismos de erros através de regras formais e informais (procedimento heurístico). É usado para fazer uma análise retrospectiva (causa – contexto – efeito; efeito – contexto – causa) de um número pequeno de eventos de falha humana.
- iii. É um tipo de PSA orientado onde os eventos de falha humana são tratados de uma forma binária de sucesso ou falha.
- iv. É centrada fundamentalmente em análises de identificação de erros humanos pós-acidentes.

O CREAM é um método de análise tanto retrospectivo quanto prospectivo. A análise prospectiva ajuda a prever como será o desempenho humano indo desde as causas até os efeitos. A análise retrospectiva faz uma análise dos eventos desde o efeito até as causas.

Este método, quando usado para prever o desempenho humano, apresenta as seguintes características (ver Figura II.5):

- i. A tarefa é selecionada a partir da Análise Probabilística de Segurança de conseqüências de um evento ou a partir de outra análise similar.
- ii. A tarefa é analisada através de um método de análise hierárquico de tarefas.
- iii. São avaliadas as condições de trabalho, também chamadas de condições de desempenho comum (CPCs – *common performance conditions*) sob as quais é desempenhada a tarefa. Um total de 9 CPCs é usado no CREAM: (a) adequação da organização, (b) condições de trabalho, (c) adequação da interação homem – máquina e do suporte operacional, (d) disponibilidade dos procedimentos, (e) número de objetivos simultâneos, (f) disponibilidade de tempo, (g) horário do dia, (h) adequação da preparação e do treinamento, e (i) qualidade da colaboração do grupo.
- iv. O Perfil de Demandas Cognitivas é construído para identificar as demandas específicas para o conhecimento em termos de um conjunto simplificado de funções cognitivas, ou seja, observação, interpretação, planejamento e execução.
- v. A probabilidade do uso do modo de controle é determinada para cada elemento da tarefa através de uma integração de efeitos dos CPCs específicos para a tarefa dada.

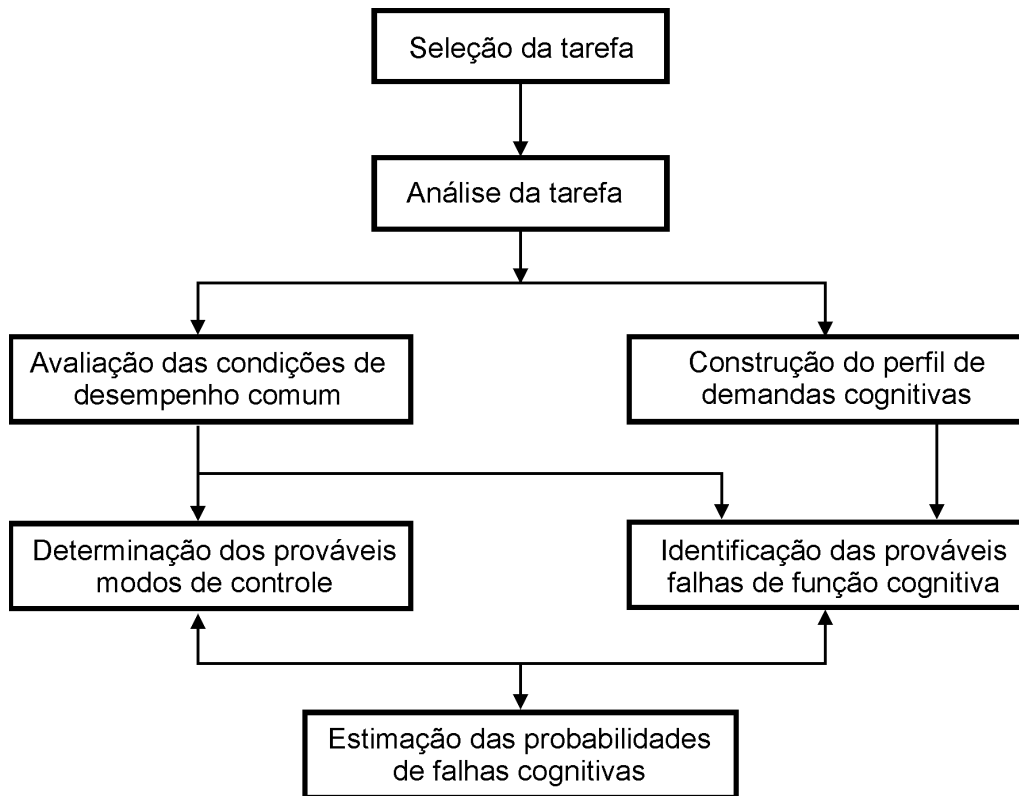


Figura II.5.- Predição do desempenho humano no CREAM.

- vi. A probabilidade de falha da função cognitiva é identificada em termos das 4 funções cognitivas mencionadas em (iv).
- vii. As probabilidades de falhas cognitivas para cada elemento da tarefa e para a tarefa como um todo podem ser estimadas através da probabilidade nominal de falha cognitiva (CFP) para cada probabilidade de falha das funções cognitivas e, em seguida avaliando-se os efeitos dos CPCs sobre os valores CFP nominais.

O CREAM pode ser usado em diferentes análises de sistemas:

- i. Como um método de análise tanto retrospectivo quanto prospectivo, usando uma taxonomia consistente para os modos de erros e as causas dos erros.
- ii. Como parte de um método de projeto para sistemas interativos complexos.
- iii. Como um método de análise de confiabilidade humana em contexto de Análise de Segurança Integrado (ISA) ou Análise Probabilística de Segurança (PSA).

As características fundamentais do CREAM são descritas por KIM [17], como um método que:

- i. Identifica aquelas tarefas ou ações humanas que requerem ou dependem do conhecimento e da experiência humana e que podem ser afetadas pelas variações na confiabilidade cognitiva (*cognitive reliability*).
- ii. Determina as condições (tarefas ou ações) sob as quais a confiabilidade cognitiva (*cognitive reliability*) pode ser reduzida, e onde podem constituir uma fonte de risco. Estas condições são chamadas de condições de desempenho comum (CPCs – *common performance conditions*).
- iii. Avalia as conseqüências do desempenho humano sobre a segurança do sistema usado nos Análises Probabilísticas de Segurança e Risco.
- iv. Desenvolve e especifica modificações que melhorem estas condições (tarefas ou ações), desde que sirvam para aumentar a confiabilidade cognitiva (*cognitive reliability*).

Ao final dos anos 90 o método CREAM constituiu a melhor forma de compreender, avaliar e quantificar a contribuição do fator humano à segurança e risco de uma instalação. Por esta razão, atualmente constitui uma parte importante das PSA, onde se combina o tratamento da confiabilidade de equipamentos e a confiabilidade humana.

A suposição básica dos métodos cognitivos é que o erro humano cognitivo (HE) 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. A especificidade é determinada através de mudanças de parâmetros de caráter único baseados num passado concreto (causas, história), presente (manifestações) e futuro (conseqüências esperadas) do evento.

II.2 Confiabilidade dos Ensaios Não destrutivos.

As pesquisas sobre a confiabilidade dos ensaios não destrutivos começaram em 1960, estabelecendo-se um relacionamento entre os defeitos nas partes planas de uma peça e regras da fratura mecânica. Em meados de 1970 a teoria de análise de confiabilidade dos END foi desenvolvida. Durante a década de 80 foi introduzida a teoria de probabilidade de detecção, usando a distribuição de parâmetros, baseados em trabalhos de comprovação de dados de confiabilidade.

De acordo com a teoria convencional, a confiabilidade do sistema de ensaio não destrutivo pode ser definida como a probabilidade de detecção. Isto significa que os defeitos de tamanho maior que um valor determinado podem ser detectados. Segundo PROVAN [18], Packman foi o pioneiro na pesquisa sobre a confiabilidade ou sensibilidade dos END, fazendo uma análise baseada na teoria da distribuição binomial.

A maioria das técnicas identificadas dos anos 60 até meados dos anos 80 continua a ser empregada até o presente momento.

SILK [19] obteve a curva de probabilidade de detecção de defeitos internos e superficiais (POD) através de análises e comparações com MARSHALL [20]. DIMITRIJEVIC [21] obteve a função entre POD e o tamanho do defeito. O valor de POD foi de 0.933 se o tamanho do defeito era de 4mm. Três itens foram tomados em conta:

- i. Justificativa dos estimados baseados na opinião dos especialistas.
- ii. Combinação de técnicas de END e sua interdependência.
- iii. Desempenho das técnicas de END.

A partir dos trabalhos de Silk, a confiabilidade da inspeção tem sido freqüentemente expressada em termos de probabilidade de detecção (POD). A confiabilidade de uma inspeção começou a ser definida como a probabilidade do inspetor detectar um defeito existente e de dimensiona-lo corretamente. Apesar de parecer simples, esta definição encerrava itens complexos tais como a natureza do defeito, a aparelhagem, os equipamentos, o fator humano, o processamento de dados e a avaliação, entre outros.

Embora a POD seja uma medida de desempenho de um processo de inspeção em um tempo específico, ela reflete a capacidade do procedimento e pode ser somente vista como um processo de medida de confiabilidade se a inspeção está sob controle.

De acordo com os requerimentos do cliente, a formulação da tarefa a executar pelo inspetor será a combinação de duas partes (a e b). A figura II.6 ilustra a tarefa de detecção [22]:

a.- detectar defeitos presentes de uma dimensão pequena ou detectar defeitos, de certo tipo, presentes.

b- confirmar se partes de um componente livre de defeitos está livre de defeitos no momento do ensaio, confirmar que não estão presentes defeitos maiores ou iguais a certas dimensões ou confirmar que defeitos de certo tipo não estão presentes.

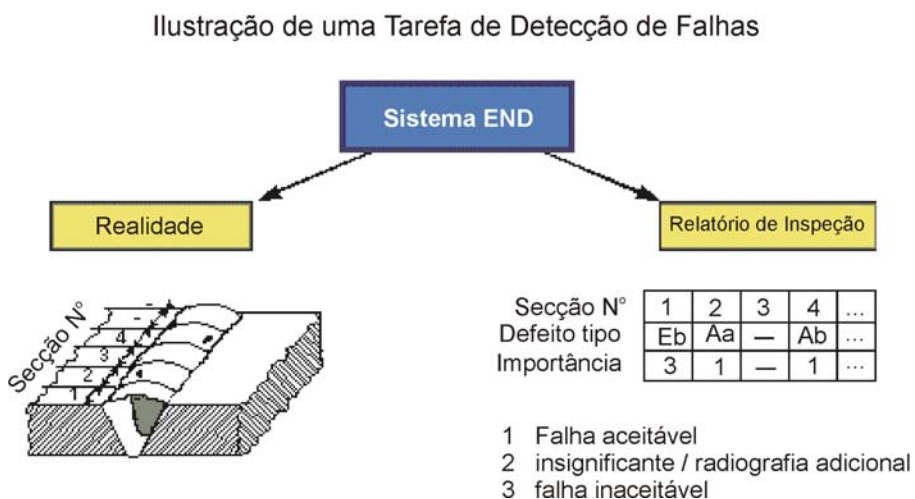


Figura II.6.- Ilustração típica da tarefa de detecção [22].

Existem diferentes enfoques sobre o problema de garantir ou demonstrar a confiabilidade dos END, tais como:

- i) -A aplicação de normas prescritivas estabelecidas,
- ii).- O uso de técnicas de tentativas cegas (*blind trials*) – a probabilidade de detecção do defeito (POD) baseada nos resultados de experimentos, a probabilidade de detecção do defeito (POD “ $\hat{a}$ versus a ”), a probabilidade de detecção do defeito baseada na distribuição quantitativa do sinal, a probabilidade de detecção do defeito POD combinada com o sucesso na indicação correta do tipo de defeito, a probabilidade de

falso alarme (PFA) baseada em falsas indicações durante os experimentos e a PFA baseada na distribuição quantitativa do ruído do sistema END.

iii).- A modelagem e as justificativas técnicas são os enfoques mais conhecidos [23].

Os quatros possíveis diagnósticos de um ensaio não destrutivo são representados na figura II.7.

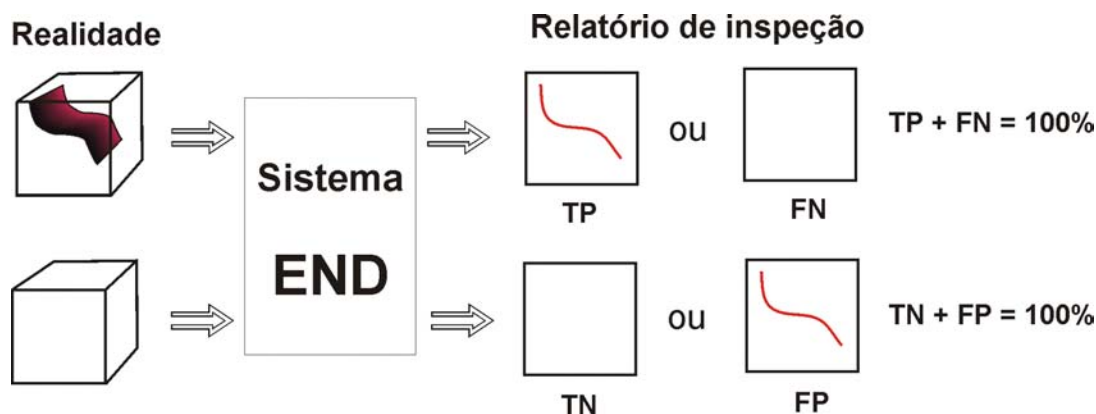


Figura II.7.- Os quatro casos de diagnóstico nos sistemas de END [24].

onde,

TP é a indicação positiva verdadeira,

TN é a indicação negativa verdadeira,

FN é a indicação negativa falsa e

FP é a indicação positiva falsa (alarme falso).

Desta forma, tem-se que $TP + FN = 100\%$ e $TN + FP = 100\%$. Estes quatro casos são os possíveis diagnósticos que respondem à teoria de detecção do sinal [25].

Trabalhos apresentados em programas de pesquisas internacionais [26-29] concluíram que durante o diagnóstico nos sistemas END vários fatores tais como longas horas de trabalho, ambiente de trabalho, capacidade inerente dos inspetores (treinamento, nível de escolaridade, qualificação, experiência), sistema de inspeção aplicado e o tipo de procedimento influíram na confiabilidade dos ensaios realizados.

Nos diferentes fóruns internacionais sobre esta temática, fica claro que não existe uma verdade absoluta sobre como determinar a confiabilidade deste tipo de ensaio e especialmente como quantificar os fatores humanos, embora exista uma variedade de enfoques promissores que constituem um grande número de experiências: Program for Inspection of Steel Components (PISC), Performance Demonstration Initiative (PDI), European Network for Inspection Qualification (ENIQ), Engine Titanium Consortium (ETC) e NORDEST.

O Programma PISC começou em 1974 sob o auspício do *Center of the European Comission / Joint Research Center CEC/JRC*. Teve o objetivo geral de avaliação da capacidade e confiabilidade das técnicas de inspeção e procedimentos para a avaliação não destrutiva dos componentes estruturais. Muitos procedimentos mostraram a boa capacidade de detecção das técnicas de ultra-som e *eddy current* em lugares típicos do gerador de vapor das usinas nucleares. O PISC analisou alguns fatores humanos que influenciam nos resultados da inspeção. Chegou à conclusão que dependendo do ambiente e da motivação, os inspetores mostram variabilidade nos resultados. BIETH et al [30] mostram que esta variabilidade pode reduzir a efetividade da inspeção em 30 % e tem ciclos caracterizados por períodos segundo o turno de trabalho (de manhã, à tarde), segundo o dia da semana (segunda a quarta), e segundo o tempo de trabalho do inspetor .

No 1st European-American Workshop sobre Confiabilidade em END, NOCKEMANN [31] identificou o fator humano como um dos elementos principais que afetam a confiabilidade dos ensaios não destrutivos. A Confiabilidade do ensaio foi definida através de um modelo empírico conceitual. A expressão a seguir foi representada por SERGE CRUTZEN e MATT GOLIS:

$$R \equiv f(IC) - g(AP) - h(HF) \quad (II.4)$$

onde,

- R é a Confiabilidade total do sistema de END.
- $f(IC)$ é uma função da capacidade intrínseca do sistema de END (técnica ou combinação de técnicas), geralmente considerada num limite superior.
- $g(AP)$ é a função do efeito dos parâmetros aplicados (restrições ao acesso, estado da superfície do material inspecionado, etc).

- $h(HF)$ é a função do efeito dos fatores humanos (experiência, treinamento, qualificação, destreza, habilidade, conhecimento, personalidade).

A definição de confiabilidade nos END é apresentada de forma gráfica na figura II.8.

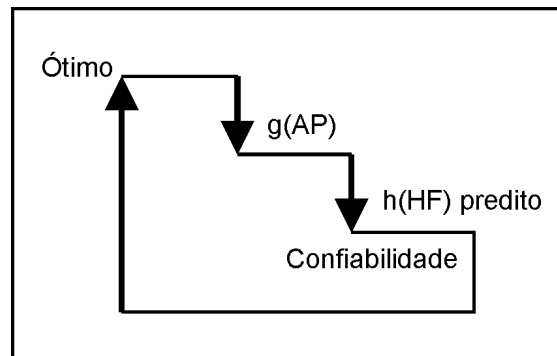


Figura II.8.- Uma representação gráfica do conceito de Confiabilidade nos END [31].

Este modelo conceitual mostra que:

- A confiabilidade de um sistema de inspeção ultra-sônico nunca será maior do que a confiabilidade para um sistema ultra-sônico idealizado.
- A confiabilidade do sistema será reduzida durante a inspeção, devido ao surgimento de desvios (que podem ser consideráveis) das suposições idealizadas, usadas na determinação das capacidades intrínsecas da técnica ultra-sônica. As suposições idealizadas que podem ser afetadas são chamadas de parâmetros aplicados.
- Quando os parâmetros aplicados têm um efeito considerável, a confiabilidade ideal do sistema é reduzida em correspondência com a função g .
- Quando os fatores humanos associados com a inspeção manual são consideráveis, a confiabilidade do sistema será reduzida em correspondência com a função h .

A expressão (II.4) em seu modo geral foi expressa dentro de um enfoque de validação modular (fórmula II.5) feito por NOCKEMANN C.M no mesmo Workshop.

$$R = f(AP, HF) \quad (II.5)$$

MATTEW [32] considerou que ss elementos que contribuem aos parâmetros IC e AP nos ensaios tipo ultra-som (ver Tabela II.3) são o material, o instrumento de

medição, o transdutor, a colocação deste e a natureza da descontinuidade estão relacionados entre os principais elementos de uma inspeção. Outros elementos importantes são o operador treinado e qualificado, a norma técnica, manuais e/ou procedimentos, o acoplante e os blocos de calibração e de referência .

Tabela II.3 Elementos que contribuem aos parâmetros IC e AP.

Elemento	Capacidade Intrínseca (IC)	Parâmetros aplicados (AP)
Material	Homogêneo	Ruído (dispersão)
	Isotrópico	Atenuação (absorção e dispersão)
	Superfície Polida	Rugosidade superficial
	Superfície Plana	Curvatura da superfície
	Impedância acústica ideal	Impedância acústica
	Velocidade acústica	
Instrumento	Nível de ruído elétrico	
	Escala dinâmica	
	Saída do pulso	
	Sinais não filtrados	Emprego de filtros
Transdutor	Tamanho efetivo	
	Comprimento de onda	
	Coeficientes de conversão	
	Impedância acústica	
Descontinuidade	Orientação máxima, Tamanho do ângulo direito, difração limitada planar e polida	Mudanças (material/stress), orientação, tamanho, lisura ou planura.
Colocação do transdutor	Não forçado	Limite do forçamento
	Zona de colocação (cobertura)	Intervalos de exames
	Manejo	Posição do(s) ângulo(s)
	Leitura estática	Acesso à superfície (inerente e externo).

Algumas conclusões específicas resultaram em um consenso para os participantes do 1st European-American Workshop sobre Confiabilidade em END. Foram identificadas de potencial importâncias na confiabilidade dos sistemas de END os seguintes itens:

- Os fatores humanos, o treinamento e o nível de escolaridade.
- Possível redução dos fatores humanos através dos métodos de inspeção automatizados.
- Necessidade de procedimentos claros e detalhados que possam ser estritamente seguidos e validados.
- Aplicabilidade das redes neurais como método heurístico nos sistemas de inspeção.
- Significância da aplicação da calibração para a confiabilidade da inspeção.
- Redução de custos através da aplicação de modelos computadorizados durante a inspeção.
- Necessidade de coleta de dados para estimar a POD e a PFA.

O PISC considera como principal aspecto da confiabilidade a função da capacidade intrínseca do sistema de END ($f(IC)$) e a influencia dos fatores humanos é predita. Em alguns casos a função IC e a função AP são combinadas.

Existem algumas diferencias entre os enfoques usados nos EUA e na Europa:

- nos EUA, no ASME Appendix VIII considera-se que os três elementos da confiabilidade dos ensaios são difíceis de separar.
- na Europa, ENIQ separa os elementos e se dedica primeiro aos aspectos de capacidade e características de aplicação, independentemente da interação humana.

Em março de 1999 [33] a Comissão Européia, no seu Relatório Final, usou as técnicas de tentativas cegas e o resultado de estudos paramétricos executados por instituições independentes. Um raciocínio de avaliação e integração estrutural foi usado para responder às perguntas sobre a probabilidade de detecção do defeito de determinada dimensão, a capacidade de localização do defeito, a capacidade de

classificação do defeito, a precisão da dimensão do defeito, e a probabilidade de alarme falso.

O Relatório considera também que o fator humano pode ser controlado através de um programa de gestão da qualidade que no caso adverso de distração ou motivação o efeito do inspetor pode reduzir a confiabilidade do desempenho total até tão pouco quanto zero . A efetividade da inspeção pode ser mostrada através da expressão II.6.:

$$E = f(IC) - g(AP). \quad (II.6)$$

Atualmente o processo de demonstração estruturada de desempenho é um dos métodos mais efetivos para determinar a Confiabilidade dos END. Para este processo os elementos críticos como o equipamento e o procedimento podem ser "demonstrados" baseados em amostras para verificar a capacidade de detecção das descontinuidades requeridas. Esta informação pode ser utilizada para determinar a POD do equipamento e do procedimento. Aqui é assumido que o inspetor implementa corretamente todos os itens do procedimento e desta forma os elementos do fator humano são isolados.

A demonstração de desempenho para aplicações empíricas é um enfoque onde o uso de amostras de material contendo defeitos conhecidos é a base para o estudo da influência de fatores sobre a detectabilidade tais como a calibração, mudanças do equipamento de inspeção ou os programas de treinamentos dos inspetores [34]. Os programas de ensaios deste tipo são usualmente usados em conjunto com “round – robin” ou outros procedimentos de aquisição de dados interlaboratórios. Este tipo de ensaio é usado para a avaliação tanto quantitativa (dimensionar através da amplitude do sinal) quanto qualitativa da confiabilidade do ensaio (localização e classificação do defeito).

Na prática, os programas de ensaio de “demonstração estruturada de desempenho” são usados principalmente como método qualitativo em termo de tentativa cega, como é indicado na figura II.9, onde a entrada (verdadeira posição do defeito no componente) e a saída (indicação do defeito no relatório) são comparadas e o canal de transferência do sinal é tratado como uma “caixa preta” (Ver Figura II.10).

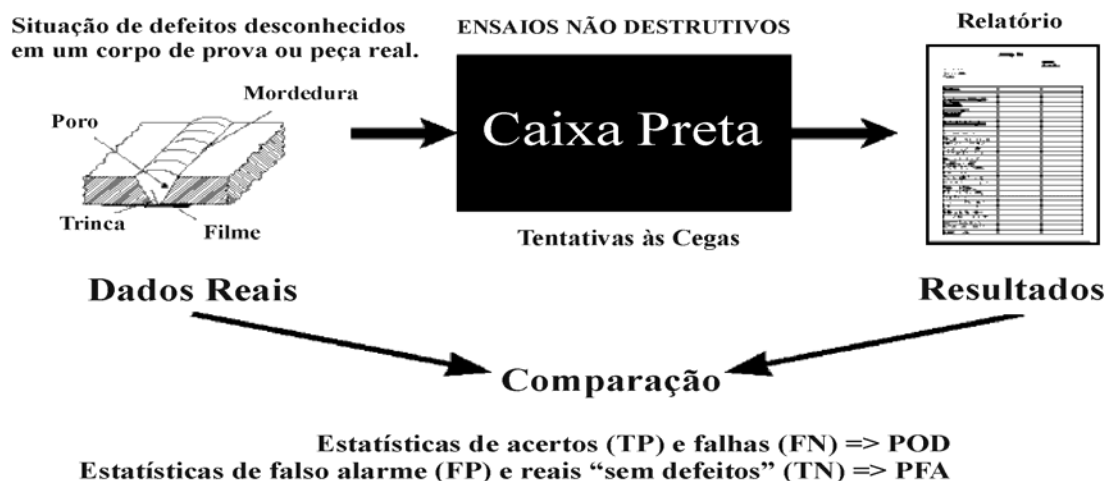


Figura II.9- Princípio de uma avaliação de “demonstração do desempenho” usado na avaliação da confiabilidade dos END.

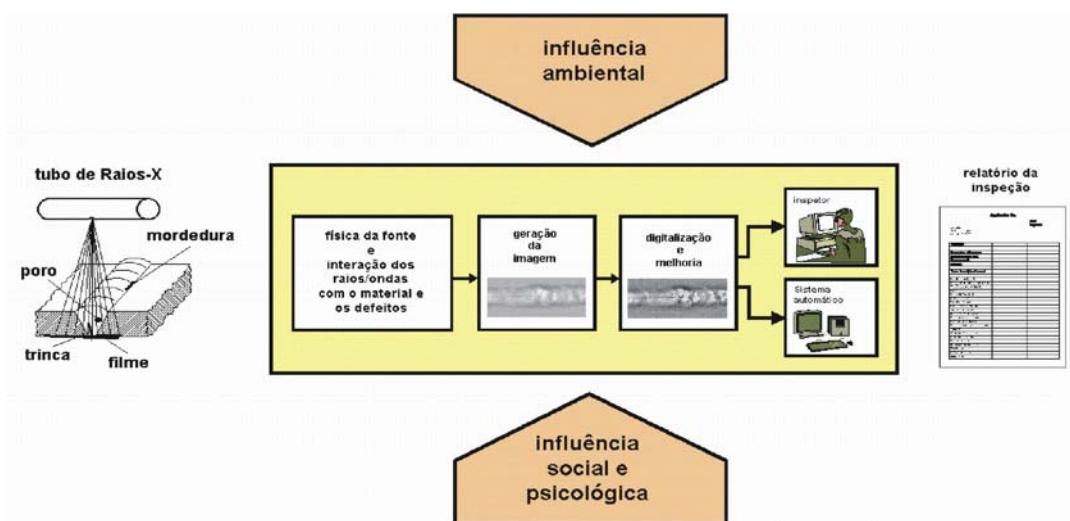


Figura II.10- Canal de transferência do sinal radiográfico.

O programa PISC e o programa PDI do Instituto de Pesquisas de Potência Elétrica (EPRI) têm realizado vários experimentos sob esta filosofia.

A figura II.10 refere-se a um ensaio radiográfico mas serve como exemplo para qualquer técnica de END. Aqui os aspectos sociais e psicológicos atuantes no meio-ambiente durante a avaliação da confiabilidade do ensaio não são considerados.

A capacidade de detecção é usualmente expressa em uma de duas formas: POD como uma função do tamanho do defeito, ou POD como uma função de PFA. Para o primeiro destes formatos uma simples curva representa a relação entre POD e o

tamanho do defeito para determinados parâmetros de inspeção e para um simples limiar de inspeção (por exemplo, reportar todas as indicações maiores que 1mm). O segundo formato usualmente referido às Características de Operação Relativa (*Relative Operating Receiver*, ou ROC) algumas vezes incorpora uma família de curvas (ver figura II.11). Cada uma destas curvas representa uma relação entre POD e PFA, a medida que o limiar de inspeção varia para defeitos de um simples tamanho. Desde o ponto de vista da detecção do sinal, estes dois formatos são diferentes caminhos para expressar a mesma relação entre “sinal”, “ruído” e o limiar de inspeção selecionado. Desta forma, um conjunto de curvas POD, cada uma com diferentes PFA, pode ser transformado em um conjunto de curvas ROC, cada uma para um diferente tamanho do defeito, por exemplo.

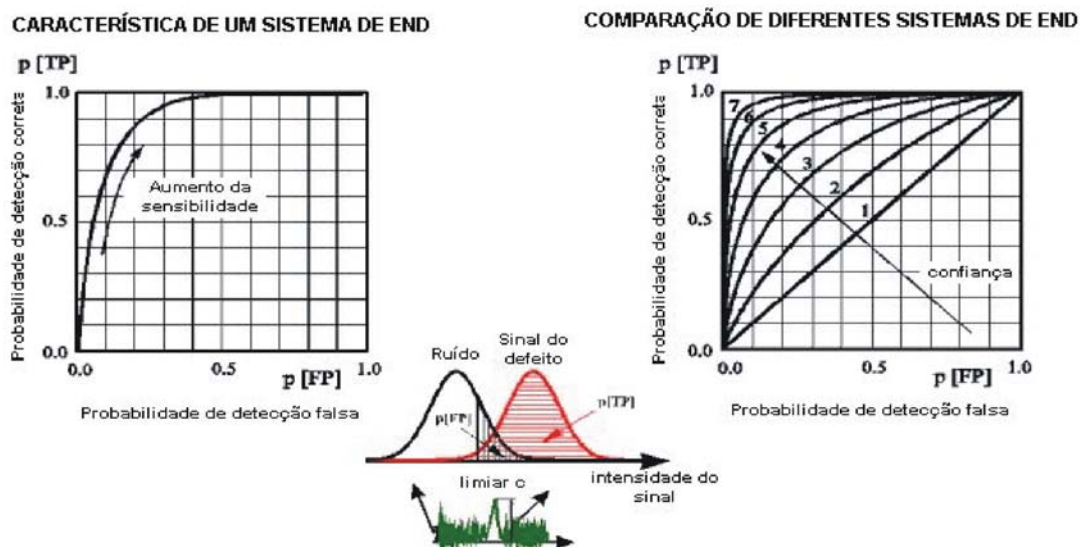


Figura II.11.- ROC (Receiver Operating Characteristic) como uma curva de avaliação da Confiabilidade dos Sistemas END.

Esta simples curva de ROC tem sido usada especialmente nos relatórios dos resultados de demonstração da capacidade para comparar métodos de inspeção ou avaliar os efeitos dos programas de treinamento.

Um método de demonstração do desempenho para aplicações quantitativas é executado através de avaliações da POD conduzidas pelas Forças Aéreas dos EUA para satisfazer os requerimentos do Projeto de Integridade Estrutural de Engenharia (ENSIP- Engine Structural Integrity Program). Amostras que contêm defeitos em superfícies representativas têm sido pesquisadas, inspecionadas e os resultados reportados de forma

qualitativos (peça aprovada ou rejeitada). Os dados são apresentados em formato de curvas POD versus a dimensão ou tamanho do defeito, e limiares de inspeção são ajustados para calcular curvas específicas de valores de POD para defeitos de tamanhos específicos. O mais utilizado é o método “ $\hat{a}$ versus a ” o qual aparece ilustrado na figura II.12.

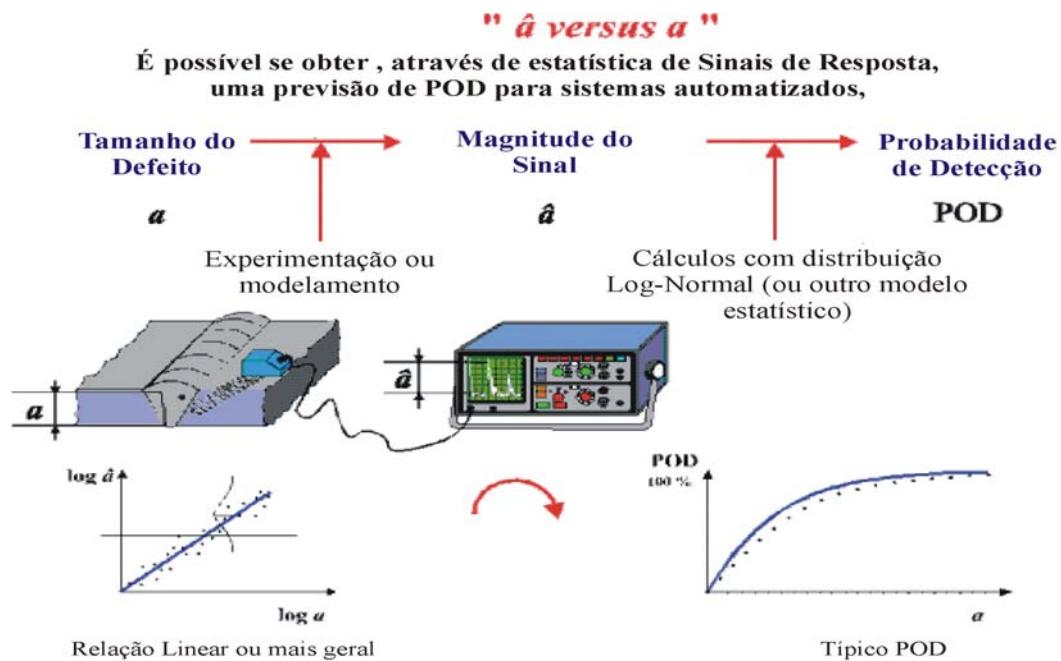


Figura II.12.- Filosofia “ $\hat{a}$ versus a ” para determinar a POD.

Um método prático para a validação dos END tem sido utilizado em casos quando ensaios baseados numa base de dados empírica muito extensa não são possíveis devido ao custo ou por indisponibilidade de amostras de ensaios. Durante uma avaliação controlada o canal de inspeção inteiro é dividido em módulos, desde o módulo que representa a parte física do método até o da aquisição de dados e análises. A contribuição de cada módulo à incerteza total é avaliada através de medições ou de julgamentos de especialistas. Este método é conhecido com o nome de “Validação modular” e se converteu numa base científica para as “Justificativas Técnicas” desenvolvidas empiricamente. Ver Figura II.13.

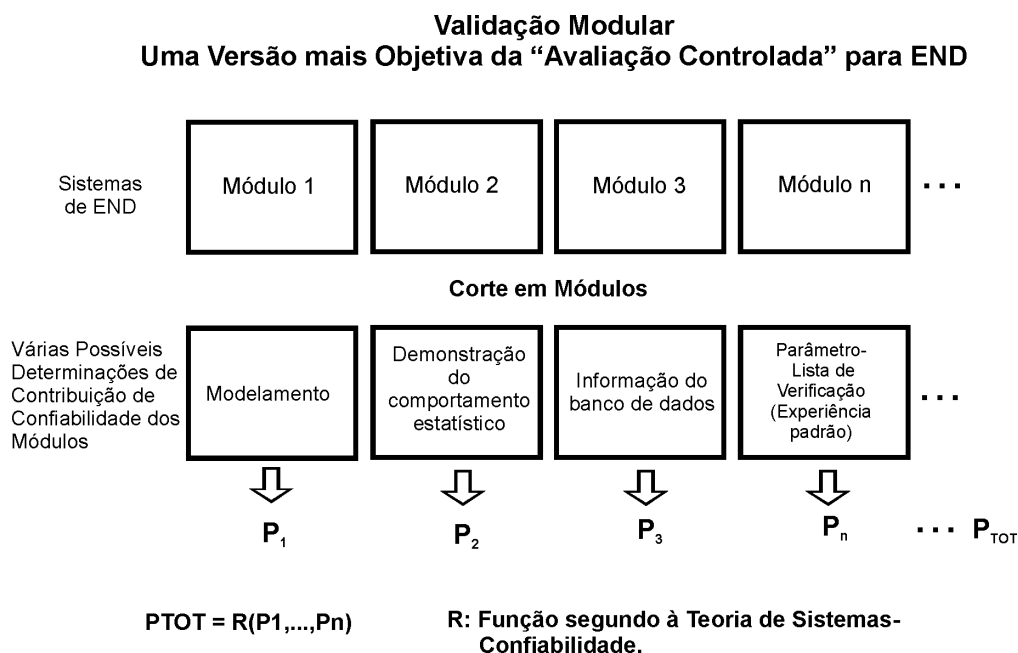


Figura II.13.-Validação Modular da Confiabilidade do sistema END.

Cada módulo aporta uma probabilidade de êxito determinada. Finalmente é calculada a Probabilidade Total do Sistema. Como exemplo a Figura II.14 mostra uma avaliação da confiabilidade do método de inspeção manual. O módulo 1 representa a física do processo radiográfico (interação dos raios X com o tubo dando como resultado um filme). O POD_1 é determinado através do modelo físico. O módulo 2 representa o desempenho da interpretação de sinais pelos inspetores e o POD_2 é a probabilidade de êxito/falha na avaliação dos inspetores numa série de experimentos. A Probabilidade Total é a multiplicação das duas probabilidades.

Segundo as conclusões do 2nd American-European Workshop sobre Confiabilidade em END [34], foi definida a confiabilidade do sistema END como “o grau com que o sistema é capaz de atingir seus propósitos de detecção, caracterização e emitir falsos alarmes”. Enquanto o Sistema de END foi considerado como “os procedimentos, o equipamento e o pessoal que é utilizado no desempenho de uma inspeção END” e o fator humano como *o estado físico e mental, a experiência e treinamento do pessoal, assim como as condições sob as quais o pessoal pode operar e ter influencia na habilidade do sistema END*.

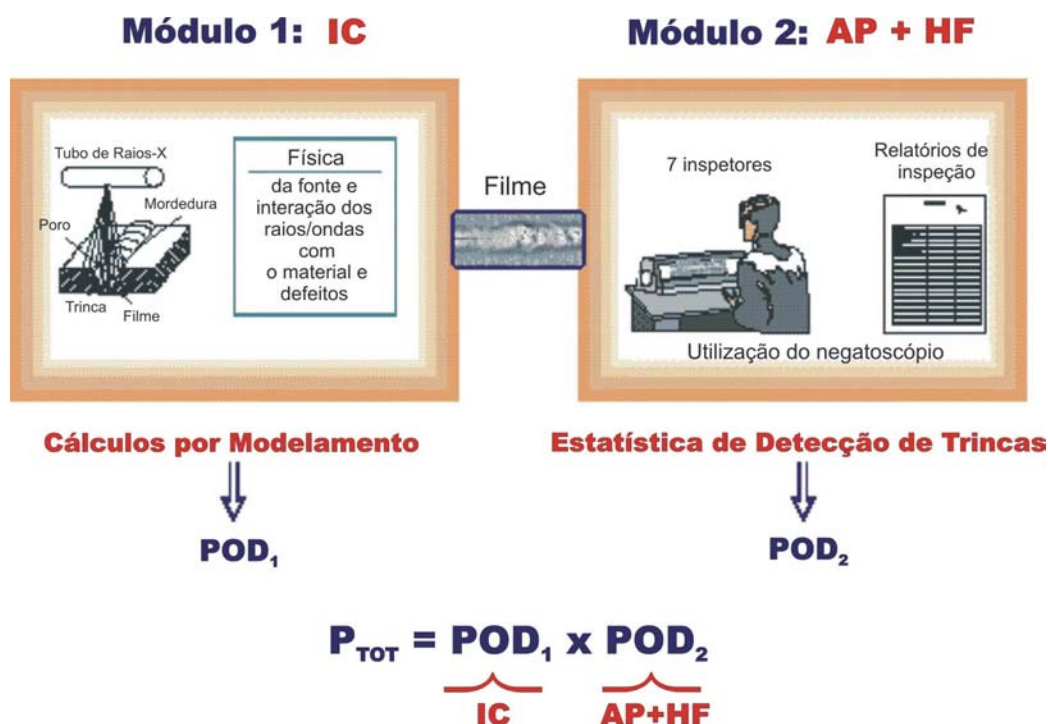


Figura II.14 Esquema de exemplo do enfoque de Validação modular.

Os elementos do fator humano que afetam a confiabilidade dos END de acordo com STEPHENS [35] são mostrados na tabela II.4:

Tabela II.4.- Elementos do fator humano que afetam a confiabilidade dos END.

Fatores físicos e mentais
habilidades motoras, coordenação olhos-mãos, destreza, capacidade da visão, discriminação da cor, campo visual, campo da visão, condições físicas gerais, necessidade de ajoelhar-se, curvar-se, sensações, percepções, memória, tomada de decisão.
Treinamento do pessoal
Nível de escolaridade, qualificação, certificação, experiência.
Condições de operação
Condições de trabalho, meio-ambiente, organização, calor, umidade

O aumento da automação dos procedimentos de inspeção END tem conduzido a um aumento da quantidade de dados adquiridos, que devem ser interpretados em um

tempo reduzido. Além disso, para uma avaliação qualitativa de custo - benefício, os processos de inspeção precisam de técnicas confiáveis de interpretação de dados automatizados. Por isso, nos últimos anos têm sido desenvolvidas algumas técnicas inteligentes que usam algoritmos de classificação automática do defeito, esquemas de reconhecimentos de padrões, sistemas especialistas, sistemas híbridos e outros que fazem uso da lógica *fuzzy*. As redes neurais artificiais são ferramentas potentes usadas também para a classificação do defeitos. Estes métodos permitem aproximar o inspetor de uma melhor interpretação dos sinais, aumentando a confiabilidade da inspeção. Este problema tem sido tratado por CORNWELL, LLATA, BETTAYEB e KUMUDHA [36, 37, 38, 39] entre outros.

As mais novas tendências exprimem o atual estágio das metodologias empregadas em confiabilidade humana, a saber:

- Inclinação em direção à psicologia da falha;
- Utilização da inteligência artificial com o intuito de desenvolver simuladores cognitivos;
- Percepção de necessidade para pesquisas voltadas aos impactos organizacionais e fatores de grupo.

De acordo com BIÈTH [30], embora exista uma ampla gama de pesquisas sobre a POD nos END e sobre a lei de distribuição do tamanho do defeito, os problemas sobre a avaliação da disponibilidade dos sistemas de END ainda não estão resolvidos. Como avaliar o grau do defeito?, Como lidar corretamente com a incerteza do parâmetro “defeito” quando se avalia a confiabilidade das estruturas com diferentes medidas?, Como tratar as incertezas das estruturas com diferentes direções de soldagem?. CHEN [40] no seu trabalho considerou que é possível responder por meio da aplicação de conceitos *fuzzy* à avaliação da qualidade do grau do defeito.

II.3 CONFIABILIDADE HUMANA *FUZZY*

II.3.1 Introdução à Lógica *Fuzzy*.

A maior parte da linguagem natural contém ambigüidades e multiplicidade de sentidos. Em particular, os adjetivos que utilizamos para caracterizar objetos ou situações não nos permitem clareza suficiente, sendo ambíguos em termos de amplitude de significados. Se, por exemplo, dizemos que uma pessoa é alta, não podemos claramente afirmar quem é alto ou quem não é. A ambigüidade de *pessoa idosa* vem do adjetivo *idoso*. Adjetivos são usualmente qualitativos, mas alguns como *alto* ou *idoso* são percebidos em conexão com quantidades de altura ou idade. Especialmente em engenharia, adjetivos que descrevem estados ou condições são, quase sempre, relacionados a quantidades. A maioria dos adjetivos são quantificados por meio de uma dimensão de sentidos como altura, idade ou extensão, mas valores abstratos, tais como um *pequeno número* ou *grande número* também podem ser dimensionados e quantificados.

Muitas de nossas ferramentas para modelagem formal, para raciocinar e utilizar a computação, são *crisp*, determinísticas, e precisas em sua natureza. Por *crisp* queremos significar dicotômico. Na lógica dual convencional, por exemplo, uma afirmação pode ser verdadeira ou falsa e não pode assumir nenhum significado outro como *aproximadamente*. Na teoria dos conjuntos, um elemento pode pertencer ao conjunto ou não; em caso de otimização, uma solução é possível, viável ou não.

O mundo real é muito variado, constantemente sujeito a mudanças. Em outras palavras, é um mundo *fuzzy*: um veículo pode-se deslocar *vagarosamente*, uma pessoa pode estar *um pouco faminta*, o tempo pode estar *parcialmente nublado* ou as probabilidades de *falha humana* podem ser *altas* – exemplos de distinções que as pessoas usam sempre que precisam tomar decisões, ou estimar parâmetros, com as quais os computadores e outros meios de avançada tecnologia não são capazes de lidar.

O conceito de conjunto *fuzzy*, foi introduzido em 1965 por L. A. Zadeh que observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica booleana. Procurando solucionar o problema do tratamento de informações de caráter

impreciso ou vago forneceu um ferramental matemático que deu origem aos Sistemas *Fuzzy*.

Na teoria clássica dos conjuntos, um elemento pertence ou não pertence a um determinado conjunto. Assim, pode-se definir a pertinência de um elemento particular x de um conjunto A em determinado universo U através de uma função característica $f(x)$.

$$f(x) = \begin{cases} x \in A, & f(x) = 1 \\ x \notin A, & f(x) = 0 \end{cases} \quad \forall x \in U \quad (II.7)$$

Os Sistemas *Fuzzy* têm se mostrado mais adequados para tratar imperfeições da informação do que aqueles baseados na teoria das probabilidades. De forma mais objetiva e preliminar, podemos definir como sendo um sistema capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural, e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores hoje em dia.

Uma forma mais ampla de verificar os campos de aplicação da lógica *fuzzy* é procurar dividir os problemas que podem ser abordados em três categorias, tais como Sistema Máquina, Sistema Humano e Sistemas Homem/Máquina.

O primeiro impasse que surge com o Sistema Máquina é o de proporcionar um alto grau de inteligência à máquina. Hoje em dia a inteligência é expressa em termos de proposições na engenharia do conhecimento, onde reconhecimento, julgamento, avaliação e inferência são limitados. Por outro lado, a mente humana possui elementos ilógicos, tais como intuição e inspiração, e isto é virtualmente impossível de expressar através de um formalismo convencional.

A característica especial da *lógica fuzzy* é que resolve incongruências ao contemplar aspectos imprecisos no raciocínio lógico utilizado pelos seres humanos, ou seja, ela representa de uma forma inovadora o manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da teoria da probabilidade. A *lógica fuzzy* provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos. Isto abre as portas para se converter a experiência humana em uma forma compreensível pelos computadores. Assim, a tecnologia possibilitada pelo enfoque *fuzzy* tem um imenso valor prático, tornando possível a inclusão da experiência de especialistas e possibilitando estratégias de tomada de decisão em problemas complexos.

II.3.2 Conjuntos *fuzzy*

Para melhor compreendermos os conjuntos *fuzzy* devemos observar o conceito geral de conjuntos. Tomemos como exemplo a seguinte proposição: “ a água está quente ”. Modelamos esta proposição definindo seus parâmetros. Representamos a temperatura da água pela variável T, a qual chamamos de universo de discurso [41, 42], ou seja, a faixa de valores possíveis desta variável. Definimos então A como sendo o conjunto de elementos do universo de discurso T tal que a condição *quente* seja verdadeira. Este conjunto é chamado de conjunto *crisp* e pode ser definido como:

$$A \subseteq T, \text{ onde } A = \{x \mid x \in [50, 90]\} \quad (\text{II.8})$$

Esta é uma das formas de representar o conjunto *crisp*. Outra forma é definir uma função que retorne sim ou não para a certeza que tenhamos sobre um elemento pertencer ou não ao conjunto A. Ela é chamada de função característica. Uma função χ_A seria :

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{para } x \in A \\ 0, & \text{para } x \notin A \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

ou, mais formalmente, $\chi_A: X \rightarrow \{0,1\}$

Na figura II.15 pode-se ver a representação do conceito *crisp* “quente”. Caso a temperatura esteja entre 50 e 90 graus, tem-se 100% de certeza de que a água está quente; caso contrário, não está.

Esta modelagem tem muitas aplicações e utilidades específicas, contudo para muitos casos sofre de perda e distorção da informação. Neste caso específico, podemos ver que a temperatura de 50°C é considerada quente e que um valor imediatamente inferior a 49.9° não é.

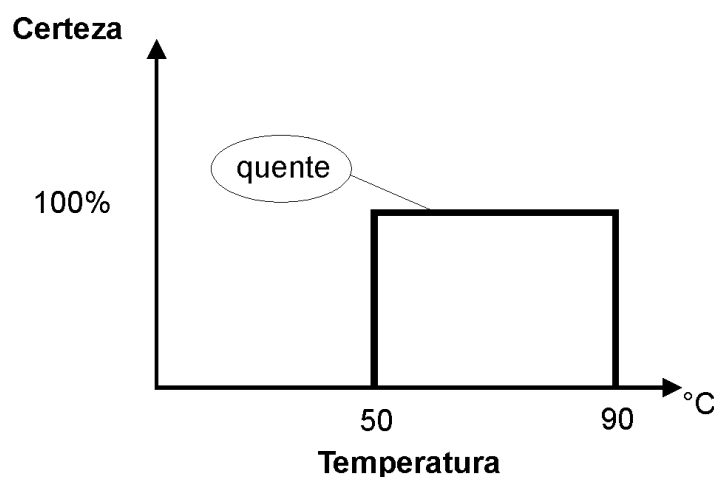


Figura II.15.- Representação do conceito *crisp* “quente”.

Por outro lado, podemos verificar que, dentro do raciocínio humano, as afirmações têm “graus de certeza”. Quando medimos uma temperatura, sabemos que o termo *quente* está associado àquela temperatura através de um grau de relevância.

Um conjunto *fuzzy* é então definido por um grupo de elementos de um universo de discurso X tal que cada elemento pertence ao conjunto com um grau de pertinência [42]. A função característica que associa cada elemento a um grau de relevância ou pertinência é chamada de função de pertinência. Esta função é normalizada assumindo os valores reais no intervalo $[0,1]$ e formalmente descrita por:

$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$, onde A é um subconjunto *fuzzy* e X é um universo de discurso.

Tomando como base o exemplo acima, na Figura II.16 podemos ver uma representação do conjunto *fuzzy quente*. A função de pertinência μ_{quente} associa o quanto a temperatura é considerada relevantemente “quente”. Podemos ter, por exemplo, as temperaturas 40, 50, e 60 com as pertinências 0.2, 0.4 e 0.6 respectivamente.

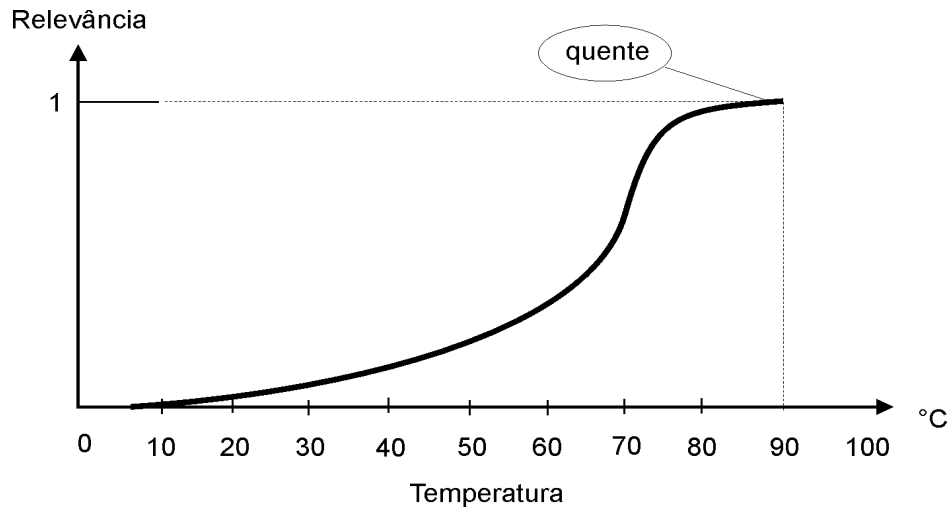


Figura II.16- Conceito *fuzzy* “quente”.

II.3.3 Representação.

Existem muitas formas de representar os conjuntos *fuzzy*. A primeira forma, mais geral, é considerar cada elemento do conjunto *fuzzy* A como um par ordenado $(x, \mu_A(x))$ onde x é um elemento *crisp* do universo de discurso X e $\mu_A(x)$ é valor da pertinência para o elemento x , ou, mais formalmente,

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (\text{II.10})$$

Nesta forma de representação podemos ter conjuntos finitos:

$$A = \{(x, \mu_A(x_1)), (x, \mu_A(x_2)), (x, \mu_A(x_3)), \dots, (x, \mu_A(x_n))\} \quad (\text{II.11})$$

ou no caso de um conjunto não finito,

$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid \mu_A(x) = f(x) \text{ e } x \in X\}$, onde $f(x)$ pode também ser uma função contínua.

Outra forma utilizada é definir diretamente A como sendo a função de mapeamento do universo de discurso X no valor normalizado de pertinência [45]. Nesta forma de representação, o conjunto *fuzzy* se confunde com a sua função de pertinência:

$$A : X \rightarrow [0,1]$$

Tem-se, por exemplo, um conjunto fuzzy A definido pelas curvas do gráfico da Figura II.17:

$$\mathbf{A}(x)=\begin{cases} x-1, & x \in [1,2] \\ 3-x, & x \in [2,3] \\ 0, & \text{de outro modo} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Ainda outra forma utilizada é dispor os pares de valores *crisp* e sua pertinência separados por barras (/).

$$\mathbf{A} = \mu_A(x_1) / x_1 + \mu_A(x_2) / x_2 + \mu_A(x_3) / x_3 + \dots + \mu_A(x_n) / x_n \quad (\text{II.13})$$

Se $\mathbf{A}$ é um conjunto finito e contável, então podemos escrever:

$$\mathbf{A} = \sum \mu_A(x_i) / x_i, \text{ por outro lado, se } \mathbf{A} \text{ é infinito, } \mathbf{A} = \int \mu_A(x) / x \quad (\text{II.14})$$

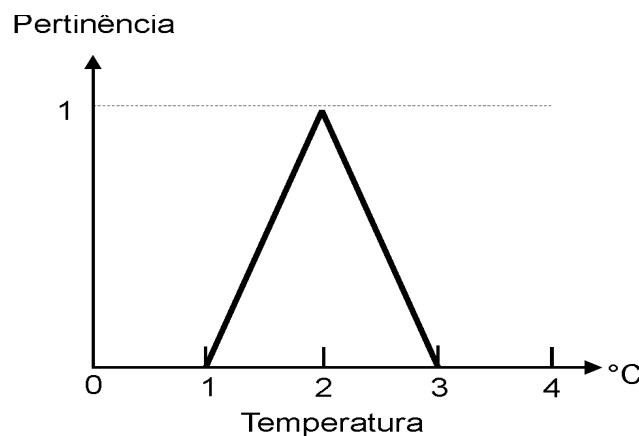


Figura II.17.- Exemplo de representação de um conjunto *fuzzy*.

II.3.4 Características.

Os conjuntos *fuzzy* possuem várias propriedades básicas. Descreve-se aqui as mais fundamentais [41, 42]. O conjunto suporte, ou simplesmente suporte, corresponde ao intervalo pertencente ao universo do discurso X no qual a pertinência ($\mu(x)$) é maior do que zero. Como pode-se ver na Figura II.18 o suporte de um conjunto *fuzzy* $\mathbf{A}$ é formalmente descrito como:

$$\text{supp}(\mathbf{A}) = \{ x \in X \mid \mu_A(x) > 0 \} \quad (\text{II.15})$$

O maior grau de pertinência que um conjunto *fuzzy* pode assumir é chamado de supremum ou altura e é formalmente definido como:

$$h(\mathbf{A}) = \sup A(x), x \quad (\text{II.16})$$

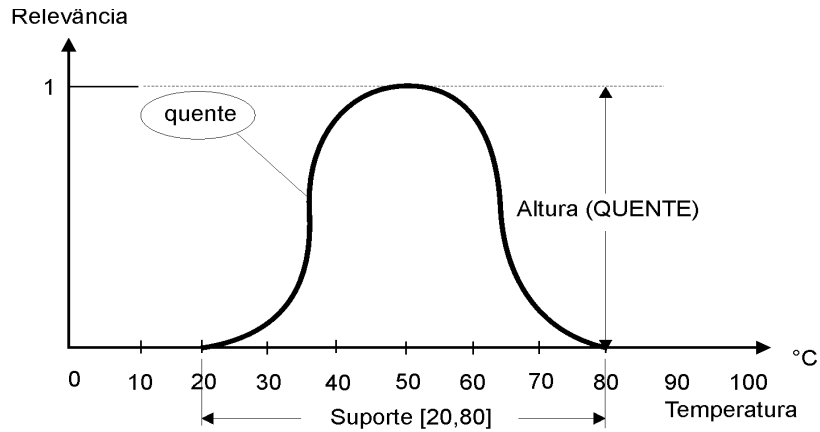


Figura II.18.- Exemplo de suporte e supremum.

Quando o supremum de um conjunto *fuzzy* é igual a 1, o conjunto é dito *normal*.

Os α -cuts fazem parte de outro conceito importante dos conjuntos *fuzzy*. Por vezes torna-se necessário estabelecer limites de relevância mínima para os quais um conceito seja válido [42], valores normalizados que, quando associados a um conjunto *fuzzy*, modificam a sua pertinência. Qualquer valor abaixo de α -cut torna-se zero. Mais formalmente, uma vez aplicado um α -cut num conjunto *fuzzy* $\mathbf{A}$ tem-se:

$$\mathbf{A}_\alpha = \begin{cases} \mu(x), & \text{se } \mu(x) \geq \alpha \\ 0, & \text{se } \mu(x) < \alpha \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Na figura II.19 podemos ver uma representação da aplicação de um α -cut em 0.5 num conjunto *fuzzy* QUENTE. As linhas tracejadas representam o conjunto *fuzzy* original. Uma das importantes propriedades dos α -cut é a alteração do suporte [42]. Na figura II.19 verificamos os dois suportes em contraste.

Várias formas de representação são adaptadas. Em geral utilizam-se subíndices ou superíndices da forma ${}^{\alpha}A$ [41] ou A_{α} [42].

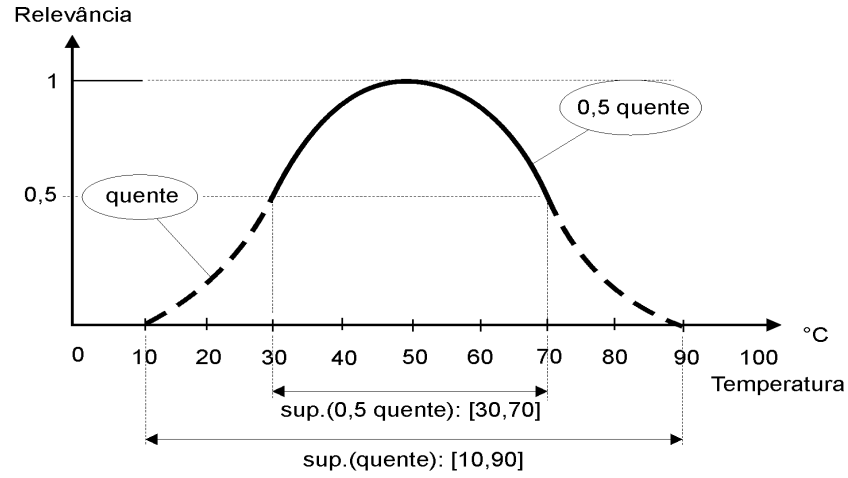


Figura II.19.- Exemplo de *corte-alfa*

A convexidade é um importante conceito para várias questões de consistência matemática. Ele é generalizado dentro da teoria dos conjuntos *fuzzy*, fornecendo base para várias formulações matemáticas bem como interpretações conceituais [42, 43].

Para um conjunto *fuzzy* A_{α} dizemos que, dados $(x_1, x_2) \in X$, $\lambda \in [0, 1]$ e $\alpha \in (0, 1]$, A_{α} é convexo se e somente se, para todo α -cut ,

$$A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min[A(x_1), A(x_2)] \quad (\text{II.18})$$

A extensão deste conceito para os conjuntos *fuzzy* é interpretada da seguinte forma: “A pertinência entre dois elementos de um conjunto *fuzzy* deve ser maior ou igual que a menor pertinência entre estes dois elementos”. De um outro modo, podemos ver a convexidade como a inexistência de máximos locais na função de pertinência.

Uma das necessidades de convexidade pode ser vista de um ponto de vista conceitual. Em alguns casos queremos ter apenas um valor *crisp* para onde a relevância cresça.

A *cardinalidade* de um conjunto *crisp* é definida como o número de elementos pertencentes ao conjunto. No caso dos conjuntos *fuzzy*, cada elemento tem um grau de pertinência associado. Desta forma, a cardinalidade $|A|$, dita escalar, de um conjunto *fuzzy* finito **A** definido sobre X, seria

$$|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x), \text{ para um conjunto infinito, } |A| = \int \mu_A(x) dx \quad (\text{II.19})$$

A cardinalidade escalar é similar à área da curva de pertinência, contudo podemos definir uma cardinalidade relativa ao universo de discurso X. Isto nos proporciona comparar a cardinalidade de conjuntos *fuzzy* independentemente.

A cardinalidade relativa representa a fração de elementos de X que estão em A, ponderados pelo grau de pertinência em A [44].

Utiliza-se a notação $||A||$ [44] para a cardinalidade relativa, onde

$$||A|| = |A| / |X|.$$

Quando o universo é finito é possível medir o grau com que o conjunto *fuzzy* está incluído em outro conjunto *fuzzy*. Se A e B são dois conjuntos *fuzzy* diferentes então o grau de inclusão do conjunto *fuzzy* A em B pode ser determinado através do modelo de KOSKO [45]:

$$S(A,B) = \frac{1}{Card(A)} \left\{ Card(A) - \sum_{x \in X} \max\{0, A(x) - B(x)\} \right\} \quad (\text{II.20})$$

II.3.5.- Operações.

A teoria dos conjuntos *crisp* contém três operações básicas. São as operações de complemento, interseção e união. Ela é baseada nos conceitos de pertinência, ou não, de um elemento aos conjuntos.

A extensão da teoria *fuzzy* destes operadores é disposta de forma a manter a sua consistência semântica [41, 42, 43]. Vários autores propõem conjuntos de funções para realizar estas operações. As operações de interseção e união possuem classes de funções denominadas de *t-norma* e *t-conorma*, respectivamente. Alguns axiomas devem ser

impostos para estas funções. Discutiremos aqui o conceito referente a cada um, especificando a sua forma para cada operação distinta. Usaremos a notação $\psi(A(x), B(x))$ para definir genericamente uma de *t-norma*, $\phi(A(x), B(x))$ para uma *t-conorma*, e $\beta(A(x))$ para o complemento genérico. Os termos $A(x)$ e $B(x)$ retornam o valor de pertinência para algum $x \in X$, onde X é um universo de discurso. Os axiomas de i a v são necessários para caracterização dos operadores. O axioma “vi” é por vezes desejável.

- i. Contorno – As restrições de contorno são relativas a manter a compatibilidade com a teoria dos conjuntos *crisp*. Deve-se garantir que, quando um elemento x pertencer ou não a um conjunto A de forma plena, ou seja, com pertinência $\mu_A=1$ ou $\mu_A=0$, respectivamente, as operações devem obedecer às regras clássicas.

- Axioma 1a - $\psi(A(x), 1) = A(x)$ e $\psi(A(x), 0) = 0$ para todo $x \in X$
- Axioma 1b - $\phi(A(x), 0) = A(x)$ e $\phi(A(x), 1) = 1$ para todo $x \in X$
- Axioma 1c- $\beta(0) = 1$ e $\beta(1) = 0$.

- ii. Monotonicidade – este princípio está relacionado a como a função deve se comportar quando os valores aplicados a ela são incrementados ou decrementados. Uma função deve, por exemplo, ser sempre crescente com o crescimento dos seus valores de entrada ou sempre decrescente com o decrescimento dos valores de entrada. Para o caso das *t-normas*, o axioma vem a partir do cálculo com intervalos. Ele indica que a união ou interseção não cresce acima de seu limite superior de intervalo. Os complementos, por outro lado, devem garantir o decrescimento da função com o crescimento de x .

- Axioma 2a – se $B_1(x) \leq B_2(x)$ implica que, $\psi(A(x), B_1(x)) \leq \psi(A(x), B_2(x))$. Para todo $x \in X$ e igualmente,
- Axioma 2b – se $B_1(x) \leq B_2(x)$ implica que, $\phi(A(x), B_1(x)) \leq \phi(A(x), B_2(x))$. Para todo $x \in X$.

Existem alguns casos onde desejamos maior rigor na monotocidade das funções, em função disto, alguns autores [42,43] sugerem uma monotocidade estrita, considerando também o limite inferior do intervalo:

- Axioma 2 a' – se $A_1(x) \leq A_2(x)$ e $B_1(x) \leq B_2(x)$ implica que, $\psi(A_1(x), B_1(x)) \leq \psi(A_2(x), B_2(x))$. Para todo $x \in X$ e igualmente,
- Axioma 2 b' – se $A_1(x) \leq A_2(x)$ e $B_1(x) \leq B_2(x)$ implica que,

$\varphi(A_1(x), B_1(x)) \leq \varphi(A_2(x), B_2(x))$. Para todo $x \in X$.

- Axioma 2 c – se $A(x) \leq B(x)$ implica que, $\beta(B(x)) \leq \beta(A(x))$. Para todo $x \in X$.

iii.- Comutatividade: Aplica-se somente às *t-normas* e *t-conormas*. Ela garante o princípio básico de operação com conjuntos e a propriedade de simetria.

- Axioma 3a- $\psi(A(x), B(x)) = \psi(B(x), A(x))$, para todo $x \in X$
- Axioma 3b- $\varphi(A(x), B(x)) = \varphi(B(x), A(x))$, para todo $x \in X$

iv.- Associatividade: Aplica-se somente às *t-normas* e *t-conormas*. Ela garante o princípio básico dos conjuntos *fuzzy* e estende a operação com os conjuntos *fuzzy* para mais de dois conjuntos.

- Axioma 4a- $\psi(\psi(A(x), B(x)), C(x)) = \psi(A(x), \psi(B(x), C(x)))$, para todo $x \in X$
- Axioma 4b- $\varphi(\varphi(A(x), B(x)), C(x)) = \varphi(A(x), \varphi(B(x), C(x)))$, para todo $x \in X$

v.- Involução: Este princípio se aplica somente ao operador de complemento. Garante que uma vez aplicado o operador sobre si mesmo, retorna ao valor original.

- Axioma 5a.- $\beta(\beta(A(x))) = A(x)$ para todo $x \in X$

vi.- Idempotência: É um requisito relativo a limites quando a função é aplicada a valores iguais.

- Axioma 6a.- $\psi(A(x), A(x)) = A(x)$ para todo $x \in X$
- Axioma 6b.- $\varphi(A(x), A(x)) = A(x)$ para todo $x \in X$

Os operadores possuem um grupo de funções padrão propostas por Zadeh (1965). Eles são baseados em operadores de máximo e mínimo e atendem a um grupo de restrições padrão, além de ser a única classe de funções idempotentes [41]. Alguns exemplos:

- Padrão:

$$\psi(A(x), B(x)) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

$$\varphi(A(x), B(x)) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

$$\beta(A(x)) = 1 - (\mu_A(x)),$$

- Produto e Soma Algébrica

$$\psi(A(x), B(x)) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$$

$$\varphi(A(x), B(x)) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$$

- Diferença e Soma limitada

$$\psi(A(x), B(x)) = \max(0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1)$$

$$\phi(A(x), B(x)) = \min(1, \mu_A(x) + \mu_B(x))$$

- Interseção e União Robusta

$$\psi(A(x), B(x)) = \begin{cases} \mu_A(x) & \text{quando } \mu_B(x) = 1 \\ \mu_B(x) & \text{quando } \mu_A(x) = 1 \\ 0, & \text{de outro modo} \end{cases}$$

$$\phi(A(x), B(x)) = \begin{cases} \mu_A(x) & \text{quando } \mu_B(x) = 0 \\ \mu_B(x) & \text{quando } \mu_A(x) = 0 \\ 1, & \text{de outro modo} \end{cases}$$

As propriedades básicas dos conjuntos são estendidas para a aplicação dos α -cut permitindo a ampliação das capacidades de manipulação dos conjuntos *fuzzy*.

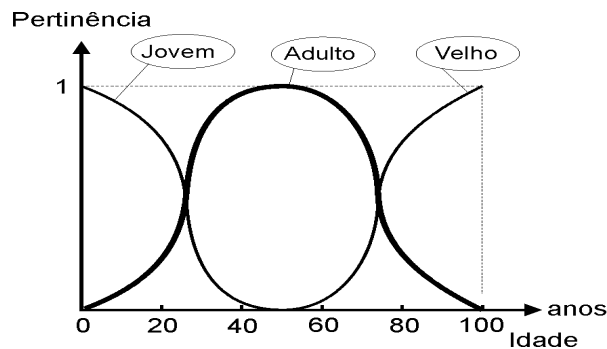
II.3.6 Variáveis lingüísticas

O conceito de variável lingüística é amplamente exposto [41,42] e mesmo formalmente definido por quase todos os autores. A variável lingüística é, em termos mais simples, uma variável cujo domínio, ou valores, são termos da linguagem referentes a um certo contexto [43]. Podemos dizer, por exemplo, que a variável lingüística "Idade" pode assumir os valores "Jovem ", "Adulto "ou "Velho".

Aplicando estes conceitos à teoria *fuzzy*, os valores (Jovem, Adulto, Velho) seriam nomes de conjuntos *fuzzy*, denominados *termos lingüísticos*, os quais estariam associados a um universo de discurso IDADE (Figura II.20). A variável *fuzzy* “Idade”, chamada também de variável base [41,43], tem seus valores classificados pelos conjuntos *fuzzy*. Eles nos permitem melhor adaptar conceitos genéricos às variáveis lingüísticas.

Este processo de classificação é similar a trabalhar com a variável através de intervalos [41]. Contudo, a extensão fornecida pela manipulação *fuzzy* nos dá maior

nível de informação. Uma das razões se deve à relevância em relação aos valores da variável base.



II.20- Exemplo de variável linguística

A flexibilidade fornecida pela função de pertinência nos permite fazer operações com os intervalos mantendo uma maior adequação com os conceitos do mundo real.

Para a construção de uma variável linguística [41,43] de nome V , definida sobre um universo de discurso X , devemos ter um conjunto de termos linguísticos T com gramática de geração g e uma regra semântica m . A gramática g define a sintaxe dos termos linguísticos. Ela pode ser constituída, simplesmente de uma lista de termos, como por exemplo,

$termo := \mathbf{Jovem} \mid \mathbf{Adulto} \mid \mathbf{Velho}$

Ou então regras de formação mais complexas que envolvam modificadores (*hedges*) ou operadores, do tipo,

$termo := \text{Modificador termo} \mid$

$\mathbf{Não termo} \mid$

$\mathbf{Jovem} \mid \mathbf{Adulto} \mid \mathbf{Velho}$

$\text{Modificador} := \mathbf{Muito} \mid \mathbf{Pouco} \mid \mathbf{Razoavelmente}$

Estas regras permitem a formação sintática de termos linguísticos mais complexos como ‘Muito Velho’, ‘Não Jovem’, etc.

A regra semântica m define como os termos lingüísticos estarão associados a seus conjuntos *fuzzy* ou funções de pertinência. Ela assinala o grupo de termos $t \in T$ a um grupo de conjuntos *fuzzy* $\Gamma(X)$, definido sobre um universo de discurso X , da forma:

$$m: T \rightarrow \Gamma(X) \quad (\text{II.21})$$

Para um termo qualquer t associado a uma variável base u , teríamos,

$$m(t) = \{u, \mu_T(u) \mid u \in X\} \quad (\text{II.22})$$

No exemplo da figura II.20 teríamos as regras semânticas representadas pelas funções de pertinência μ_{jovem} , μ_{adulto} , e μ_{velho} , as quais caracterizam os conjuntos nebulosos $\Gamma(X)$. Usa-se definir o conjunto de elementos definidos acima como um quintuplo (V, T, X, g, m) o qual caracteriza a definição formal de uma variável lingüística [41].

II.3.7 Operações de Agregação

Em muitos casos, torna-se necessário combinarmos dois conceitos ou termos lingüísticos diferentes que, de alguma forma, se aplicam parcial ou simultaneamente a um mesmo atributo. Para isto é necessário unificar estes conjuntos em um novo conjunto. Esta operação é chamada de agregação [41, 43] e é definida por uma função de transferência h que combina n conjuntos nebulosos em um único conjunto:

$$h: [0,1]^n \rightarrow [0,1] \quad (\text{II.23})$$

Um conjunto agregado de n conjuntos nebulosos $C = h(A_1, A_2, \dots, A_n)$, é definido por:

$$C = \{(x, \mu_c(x)) \mid \mu_c(x) = h(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x), \dots, \mu_{A_n}(x))\} \quad (\text{II.24})$$

Existem várias funções de transferência propostas na literatura [42] e cada uma delas é mais ou menos adequada ao problema específico tratado. Uma função de agregação deve atender pelo menos 3 dos 5 axiomas [41]:

i.- Axioma 1.- *Condições de contorno*, $h(0,0,0,...,0) = 0$ e $h(1,1,...,1) = 1$

ii.- Axioma 2.- *Crescimento monotônico*. Se para qualquer par de tuplas $\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(x), \dots, \mu_{An}(x)$ e $\mu_{B1}(x), \mu_{B2}(x), \dots, \mu_{Bn}(x)$, tal que $i = 1, 2, \dots, n$, $\mu \in [0, 1]$, se $\mu_{Ai}(x) \leq \mu_{Bi}(x)$, então $h(\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(x), \dots, \mu_{An}(x)) \leq h(\mu_{B1}(x), \mu_{B2}(x), \dots, \mu_{Bn}(x))$.

iii.- Axioma 3.- *Continuidade*. A função de transferência h deve ser contínua, ou seja, variações infinitesimais dos argumentos não pode gerar grandes variações na função.

iv.- Axioma 4- *Simetria*. Garante que para qualquer permutação p em N , $h(A_1, A_2, \dots, A_n) = h(A_{p(1)}, A_{p(2)}, \dots, A_{p(n)})$, desta forma mantemos a igualdade de importância entre os conjuntos *fuzzy*. Em alguns casos, quando isto não é desejado, este axioma pode ser relaxado.

v.- Axioma 5 - *Idempotência*. $h(\mu_A(x), \mu_A(x), \dots, \mu_A(x)) = \mu_A(x)$. Este axioma é uma generalização do axioma 1.

As operações de união e de interseção *fuzzy* são igualmente funções de agregação. Qualquer função h que atenda ao axioma 5 e ao axioma 2, responderá à inequação:

$$\min(\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(x), \dots, \mu_{An}(x)) \leq h(\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(x), \dots, \mu_{An}(x)) \leq \max(\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(x), \dots, \mu_{An}(x)).$$

Desta forma, qualquer função que esteja entre as funções de união e interseção, atende aos critérios axiomáticos. Uma classe de funções que atende o critério de idempotência é a de funções de média, cuja sua forma genérica é:

$$h(\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(x), \mu_{An}(x)) = ((\mu_{A1}^\beta(x) + \mu_{A2}^\beta(x) + \dots + \mu_{An}^\beta(x)) / n)^{\frac{1}{\beta}} \quad (II.25)$$

Podemos ver que quando $\beta=1$, temos a média aritmética, quando $\beta=2$, temos o valor médio quadrático e para $\beta=-1$ temos a média harmônica.

Existe uma outra classe de funções permitindo um maior ajuste entre as funções de máximo e mínimo. São as OWA(Ordered Weighted Average), ou função de média ponderada, que é definida por:

$$h(\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(x), \mu_{An}(x)) = w_1 \mu_{B1}(x) + w_2 \mu_{B2}(x) + \dots + w_n \mu_{Bn}(x). \quad (II.26)$$

onde $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_n$ são a permutação de $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_n$ de forma que $\mathbf{B}_i \geq \mathbf{B}_j$ para qualquer $j > i$ e $i, j = 1, 2, \dots, n$, ou seja, os valores de pertinência são ordenados de forma decrescente. O vetor $w = \langle w_1, w_2, \dots, w_n \rangle$ deve ser tal que,

$$w_i = [0, 1] \text{ e } \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

A OWA pode representar a operação de mínimo, nesse caso $w = \langle 0, 0, \dots, 1 \rangle$ ou a operação de máximo, onde $w = \langle 1, 0, \dots, 0 \rangle$. Para outros casos, OWA tem a possibilidade de realizar uma configuração flexível entre a operação *máx* e *mín*.

II.3.8 Relação fuzzy

Os sistemas e modelos matemáticos estão baseados em relações que mapeiam um conjunto de variáveis de um universo em outro. Estas relações são comumente representadas por funções f da forma:

$$f: X \rightarrow Y, \text{ onde,}$$

X e Y representam dois universos quaisquer. Seja x um elemento do universo X e $y = f(x)$ uma função que mapeia a x em $y \in Y$. A função característica que descreve a relação R representando y seria [45, 46]:

$$\chi_{R(X,Y)} = \begin{cases} 1, & y = f(x) \\ 0, & y \neq f(x) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Devemos agora considerar que tenhamos subconjuntos de X que serão mapeados em subconjuntos de Y , dessa forma:

$$F: P(X) \rightarrow P(Y), \quad (\text{II.28})$$

onde $P(\bullet)$ representa o conjunto potência. Um subconjunto *fuzzy* $\mathbf{A} \subset X$ é mapeado num subconjunto $\mathbf{B} \subset Y$ da forma: $\mathbf{B} = f(\mathbf{A}) = \{y \mid \forall x \in \mathbf{A}, y = f(x)\}$. Em termos mais

gerais, devemos supor que mais de um elemento de Y seja mapeado a partir de um mesmo elemento de X , dessa forma, a função característica de $\mathbf{B}$ seria,

$$\chi_B(y) = \vee_{y=f(x)} \chi_A(x) \quad (\text{II.29})$$

onde $\vee_{y=f(x)}$ representa o valor máximo para todos os valores de x que levem a y . A função característica em conjuntos *crisp* apenas indica se um valor pertence ou não a um conjunto.

II.3.9.- Números *fuzzy*.

Os números *fuzzy* são utilizados para quantificar atributos físicos da realidade. Estes atributos estão por vezes associados à imprecisão ou mesmo conceitos humanos vagos. Em alguns casos, por exemplo um especialista pode dar a temperatura de uma área como sendo “em torno de 25 graus”. O método clássico de tratar com imprecisões físicas é colocar uma faixa de erro no valor. Diz-se que a temperatura é $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Esta manipulação de números por intervalos também é utilizada para operar com números *fuzzy* [42].

A desvantagem para o processo de manipulação por intervalos é que reduz uma parte da informação. Se a temperatura válida é de 10 a 30°C , é inconsistente dizer, para a maioria das aplicações, que a temperatura de 9.99°C é inválida e passa a ser válida 0.01°C depois.

Neste ponto, a teoria *fuzzy* nos permite definir um conjunto *fuzzy* “próximo de” (Figura II.21), que permite expressar o grau de relevância da temperatura com a proximidade de seu valor central, levando assim em conta a informação de imprecisão de uma forma mais adequada.

A curva da Figura II.21 é apenas um caso particular para a representação de um número *fuzzy*. Um número *fuzzy* pode ser visto como uma generalização dos números reais, cuja função de pertinência é uma singularidade no ponto correspondente ao número.

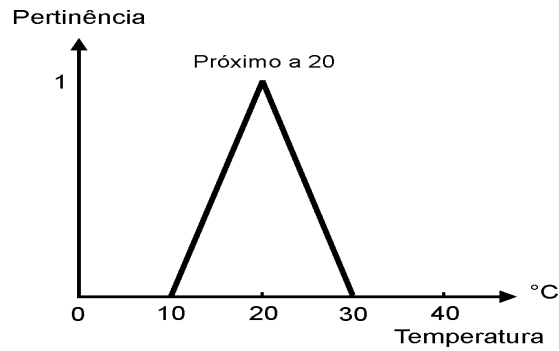


Figura II.21.- Exemplo de número *fuzzy*.

Um valor de intervalo clássico $[a,b]$ pode ser igualmente representado por uma função de pertinência do tipo:

$$\mu = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in [a_1, b] \\ 0, & \text{se } x \notin [a_1, b] \end{cases}$$

Na figura II.22 podemos ver a representação da função característica de um número *crisp*.

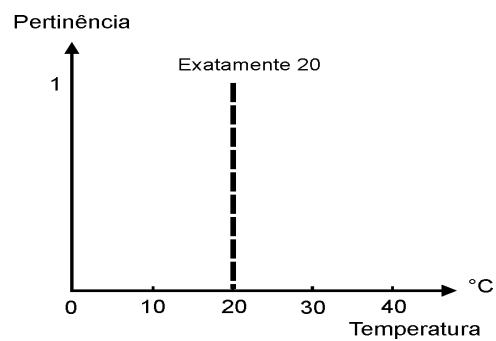


Figura II.22.- Número *crisp*

Esta função pode ser estendida para definir um intervalo *fuzzy* (Figura II.23 e Figura II.24).

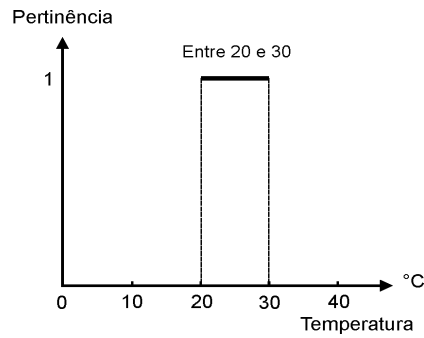


Figura II.23.- Intervalo de valores

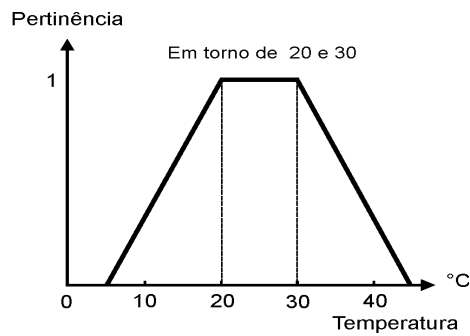


Figura II.24.- Intervalo *fuzzy*.

Vários tipos de curvas são propostas na literatura [41, 42, 43]. Uma classe delas são as curvas “em forma de sino” [42]. Um exemplo pode ser visto na Figura II.25.

Existem vários tipos como a curva *Beta*, *Gaussiana*, e a curva *PI* [41]. Cada curva tem uma característica diferente, como por exemplo, a mudança de ponto de inflexão ou largura. Este tem por finalidade melhor adaptar a curva ao conceito de imprecisão do número. Algumas curvas podem não ser simétricas [42].

Para um conjunto *fuzzy*, A deve ser adequadamente caracterizado como um número *fuzzy*, cuja função de pertinência deve ser dada por $\mu_A : \mathcal{R} \rightarrow [0,1]$, ele deve atender a certas restrições:

i) A deve ser normal, ou seja, $\sup \mu_A = 1$. Isto pode ser facilmente compreendido se considerarmos que um número *fuzzy* é uma generalização dos números *crisp*, ou seja,

deve haver algum valor para o qual o grau de relevância mantenha a propriedade original do número *crisp*.

ii) A deve ser um intervalo fechado e convexo para todo α -cut, $\alpha \in (0,1]$. Esta propriedade impede contradição na interpretação do número *fuzzy*. Ao ser convexo, o conjunto *fuzzy* converge para o mesmo valor com o crescimento da função de pertinência, tanto pela direita, como pela esquerda.

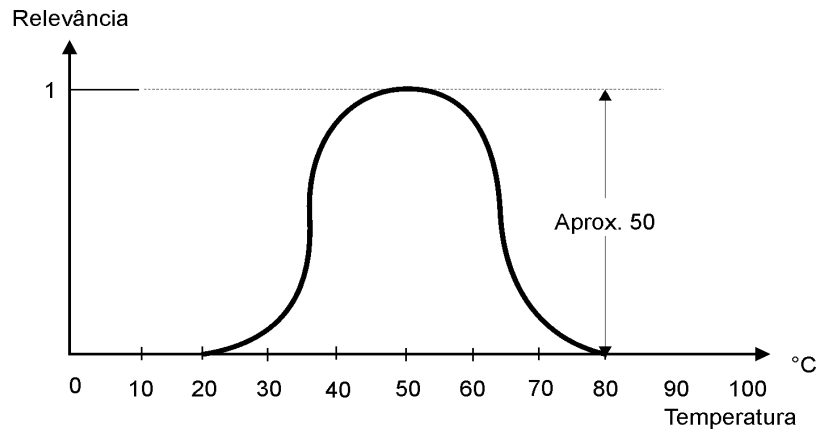


Figura II.25.- Número *fuzzy*.

As funções de pertinência podem ser genericamente definidas como conjuntos tipo L-R [42, 47]. Através da definição das funções como L-R, dizemos que um conjunto A é um número *fuzzy*, se e somente se, existir um intervalo fechado $[a, b] \neq \emptyset$ (restrição (ii)) tal que,

$$\mu_A(x) \begin{cases} 1, & \text{para } x \in [a, b] \\ L(x), & \text{para } x \in [-\infty, a] \\ R(x), & \text{para } x \in [b, \infty] \end{cases}$$

Sendo $\mu=1$ para $x \in [a, b]$, garantimos a restrição (i). As funções L e R, esquerda e direita respectivamente, são ambas monotônicas. Para cada função L crescente, ou R decrescente, a monotonicidade garante a restrição (ii).

Um número *fuzzy* A em R é um número *fuzzy* triangular, se a sua função de pertinência $f_A: R \rightarrow [0,1]$ é igual a:

$$F_A(x) = \begin{cases} (x-a)/(m-a), & a \leq x \leq m, \\ (x-b)/(a-b), & m \leq x \leq b, \\ 0, & \text{de outro modo} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Com $-\infty < a \leq m \leq b < \infty$ na Figura II.26 aparece representado o número *fuzzy* triangular (a,m,b) . O parâmetro “m” representa o grau máximo de pertinência de $F_A(x)$, ou seja, $F_A(x)=1$, esse é o maior valor possível da avaliação feita pelo especialista. Os parâmetros “a” e “b” representam o limite inferior e superior da área de avaliação, a qual representa a nebulosidade (*fuzziness*) da avaliação feita pelo especialista.

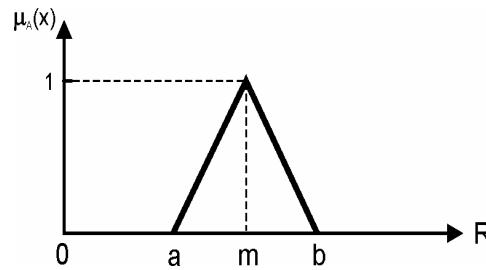


Figura II.26 Função de pertinência

II.3.10.- Aritmética *fuzzy*.

Através da extensão fornecida pela teoria *fuzzy*, podemos incorporar o conceito da incerteza aos números, melhorando assim a representatividade da informação. Para manipular estes números, torna-se necessário estender também as operações com os números. As operações entre conjuntos vistas anteriormente tentavam apenas estender e manter a consistência das operações clássicas entre números. Antes os conjuntos *fuzzy* eram vistos como agregação de elementos associados a uma dada pertinência, aqui eles serão vistos como números *fuzzy*.

Um dos métodos utilizados para estender as operações aritméticas é utilizar a manipulação de intervalos [42] onde, dada uma operação *fuzzy* qualquer

$$* \in \{+, -, *, \div\} \quad (\mathbf{A*B}) = \bigcup_{\alpha \in (0,1)} {}^{\alpha}(\mathbf{A*B}) \text{ onde,}$$

${}^{\alpha}(\mathbf{A*B})$ é definido através de operações com intervalos.

Outra forma de se calcular uma operação aritmética *fuzzy* é através do princípio de extensão. Uma operação aritmética z qualquer entre dois operandos *crisp* x e y pode ser escrita por $z = f(x,y)$. Dados dois conjuntos *fuzzy* $\mathbf{A}$ e $\mathbf{B}$, onde $x \in \mathbf{A}$ e $y \in \mathbf{B}$, a extensão *fuzzy* da função f , pelo princípio da extensão fica:

$$(\mathbf{A}*\mathbf{B})(y) = \{(z, \mu(z)) \mid \mu(z) = \sup_{y=f(x,y)} \{\min[\mu_{\mathbf{A}}(x), \mu_{\mathbf{B}}(x)]\}\}.$$

Este método é muito dificultoso e na prática acabamos usando o primeiro método pelas vantagens computacionais que tem.

II.3.11.- Defuzzificação

O processo de defuzzificação pode ser definido como uma função que associa a cada conjunto *fuzzy* um elemento (do conjunto abrupto subjacente) que o represente. E podemos encarar o valor escolhido como uma espécie de valor esperado traçando uma analogia com as distribuições de probabilidade. Mas como fazer exatamente para obter o valor condensado a partir do conjunto *fuzzy*? Existem alguns métodos bastante utilizados. De acordo com OLIVEIRA [48], o mais comum é o COG (Center of Gravity), que nos fornece um valor correspondente à abscissa do baricentro do gráfico da função de pertinência. A fórmula usada para o cálculo é a seguinte:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^k w_j * r_{ij}}{\sum_{j=1}^k w_j} \quad (\text{III.31})$$

onde w_j são os pesos *fuzzy* dos atributos, r_{ij} é o grau de atendimento de cada atributo à característica avaliada e R_{ij} o grau de atendimento do ambiente (tecnologia, ambiente, inspetor, etc) a um padrão determinado.

II.3.12 Confiabilidade fuzzy

O fator humano como função pessoal pertence ao campo da psicologia. Esta ciência tem ligeiramente mais de 100 anos e tem sido desenvolvida relativamente lenta

em comparação com a tecnologia. Alguns atribuem a noção de "erro humano" a Freud, que não usou o termo "fator humano". Em 1904 Freud publicou um livro desenhando e exemplificando um número de erros humanos. Na época os erros humanos foram considerados embaraçosos ou possivelmente engraçados. A tecnologia não tinha sido desenvolvida tanto para que fosse considerado seriamente o erro humano. Então o erro humano raramente tinha causado um dano maior que um mal - entendido, um equivoco, uma discordância, um estorvo ou simplesmente uma dificuldade. O trabalho de Freud começou a mudar o modo, a maneira, o hábito das pessoas. As pessoas começaram a se observar, a reparar, considerar e estimar como algo imperfeito a capacidade e o potencial que tinham para errar, confundir-se, misturar as coisas, criar confusões, falar coisas inexatas, desacertadas, interpretar mal ou não entender, esquecer, colocar mal ou extraviar, ler ou interpretar mal algo escrito, cometer erros de escrita ou no meio de uma atividade esquecer seu objetivo.

Um erro humano pode ser caracterizado como uma divergência entre uma ação desempenhada e uma ação que deveria ter sido desempenhada, a qual tem um efeito ou consequência que vai além da tolerância requerida pelo sistema com o qual o pessoal interage.

A perspectiva psicológica de estudo do erro é centrada na parte das causas do erro, enquanto na avaliação probabilística de risco o estudo do erro humano está direcionado a conhecer as consequências do erro, ou seja, estudar defeitos causados pelo homem. Para melhorar a confiabilidade de END o enfoque pode ser direcionado às causas e às consequências do erro. RASSMUSSEN em [49] considera que tarefas relativamente simples oferecem muitas oportunidades para provocar erros humanos.

Um número de fatores explica porquê as pesquisas acadêmicas e as mudanças nas atitudes regulatórias têm tido um impacto marginal. JONHSON [50] identificou três mitos que são citados na literatura como barreiras contra as aplicações práticas da análise do erro humano:

- 1.- O erro humano é inevitável. Até os crescentes erros organizacionais contribuem a falhas humanas;
- 2.- O erro humano não é predeziável. Em particular existem condições locais que criam a oportunidade para a fadiga que pode contribuir ao erro humano; e
- 3.- Os programas de análise de erros humanos são muito custosos.

O desempenho humano, a falha humana ou o erro humano é cada vez mais e mais identificado com o mau funcionamento dos sistemas. Isto é devido parcialmente a que alguns sistemas de interação homem – máquina estão sendo desenhados com alta confiabilidade. Por outra parte o erro humano não é a causa de um evento, ele é a consequência de eventos; ele não ocorre acidentalmente, ele ocorre de várias formas e de forma inevitável.

Para os sistemas END a teoria de probabilidades é adotada como uma medida de incerteza de representação de um esquema de falha, onde o critério de falha é claramente definido. YUAN CAI [51] por conveniência chamou a teoria convencional de confiabilidade como *teoria probist*, e os sistemas estudados em um contexto de confiabilidade *probist* os chamaram-se de sistemas *probist*.

Em outros casos, o sistema pode estar parcialmente em falha e parcialmente em sucesso. Nestes casos as probabilidades estimadas podem ser fortemente justificadas particularmente nos casos de falhas raras. Entretanto, afirma-se que o julgamento humano mantém uma posição central em todas as análises de confiabilidade de qualquer sistema complexo técnico, ou seja:

- i. O grau de incerteza com que o erro humano conduz a um resultado não confiável não pode ser expressa claramente, mas é comparativamente fácil expressar estes tipos de incerteza qualitativamente. Quantitativamente, ou seja, microscopicamente é difícil fazer a análise da confiabilidade humana. Sendo assim, é necessário analisar a confiabilidade do ponto de vista macroscópico.
- ii. A relação entre confiabilidade e fatores afetando a confiabilidade não é necessária e suficiente. Sendo assim é difícil expressar claramente este tipo de relação.
- iii. A confiabilidade dos equipamentos e a confiabilidade humana são afetadas por vários motivos, como é o caso do ambiente no qual estes equipamentos são acondicionados para inspeção, as condições ambientais da inspeção, os esgotamentos psicológicos do inspetor, são apenas alguns. Na análise de confiabilidade convencional a taxa de falha humana é ajustada por especialistas baseadas em critérios de julgamento de forma a considerar o efeito de muitos fatores sobre confiabilidade.
- iv. A expressão qualitativa é útil para avaliação da confiabilidade do sistema de inspeção, mas muitos termos vagos são encontrados na expressão. ONISAWA

[52] determinou que este tipo de abordagem só pode ser feito pela metodologia *fuzzy*.

- v. Devemos entender que o tipo de incerteza tratado pela Estatística difere daquele tratado pela Lógica *Fuzzy*. Imprecisão (ou incerteza) associada com a ocorrência futura de algum evento está ligada ao tratamento probabilístico. Imprecisão associada à descrição de sistemas leva ao tratamento *fuzzy*, ou seja, o conhecimento que possuímos a respeito da estrutura interna do objeto em estudo não é suficiente para formularmos equações (convencionais) precisas, por exemplo.
- vi. Na prática, os dados coletados não são suficientes para estimar as taxas de erros. Sendo assim, estas taxas são estimadas baseadas em opiniões de especialistas. Logo estas taxas de erros propostas para avaliação da confiabilidade, são *fuzzy*.
- vii. A determinação do critério de aceitação de descontinuidades, da mesma forma, é estabelecida baseado na opinião de especialistas.

A falha humana resulta das interações homem - trabalho ou homem - ambiente, (dentro do sistema sócio-técnico em que ele atua) que não atendam a determinados padrões esperados. Nesse conceito, estão implícitos três elementos: uma ação humana variável; uma transformação do ambiente (ou máquina) que não atenda a determinados critérios; e um julgamento da ação humana frente a esses critérios. Há muita incerteza intrínseca nas interações que dificulta fazer afirmações certas no momento de julgar uma determinada ação humana. O problema fundamental é que o inspetor tem um modelo mental de como tal sistema deveria atuar e tal modelo está repleto de subjetividade e nuances inerentes ao modo pelo qual pensamos. Este modelo mental ou cognitivo inclui informação recebida, sensação, percepção, memória a curto e longo termo, tomada de decisão e uma ação resultante. Um modelo geral deste processo é mostrado na Figura II.27 [53].

Se o homem for capaz de identificar imediatamente as conseqüências provocadas pelos desvios naturais do seu comportamento, ele pode introduzir as ações corretivas, diminuindo a ocorrência das falhas. Portanto, as falhas dependem da facilidade de percepção das condições inaceitáveis e da reversibilidade do sistema. Essa reversibilidade depende da dinâmica e da linearidade do sistema. Isso quer dizer que as falhas humanas não podem ser estudadas isoladamente das condições onde elas ocorrem.

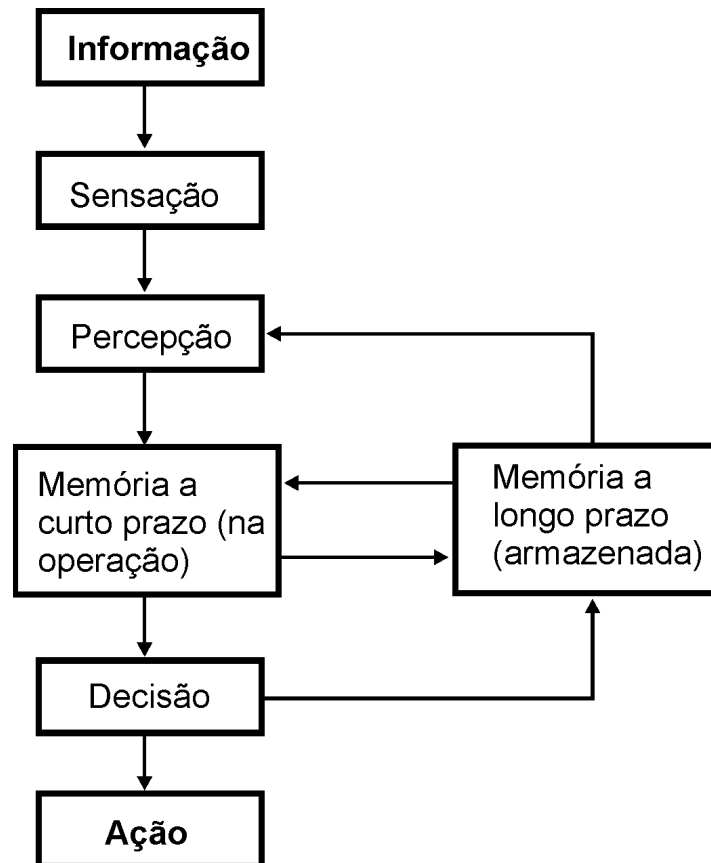


Figura II.27. Componentes do processamento da informação humana

Num ensaio por ultra-som as maiores dificuldades estão presentes nas ações cognitivas de tomada de decisões, ou seja, na localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades. Como demonstra DRURY [54] as funções de busca (refere-se ao sinal e à descontinuidade) e de decisão são as maiores causas de erros.

Uma das maiores percepções de Zadeh foi que a matemática pode ser utilizada para fazer uma ligação entre a linguagem e a inteligência humanas. Muitos conceitos, de fato, podem ser muito mais bem definidos por palavras do que pela matemática, e a *Lógica Fuzzy* e sua expressão nos *Conjuntos Fuzzy* proporcionam uma disciplina que melhor pode construir modelos do mundo real.

Em 1973 o professor ZADEH [55] formulou o que passou a ser chamado de princípio de incompatibilidade: “*À medida que a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade para fazer afirmações precisas e que sejam significativas acerca deste sistema diminui até que um limiar é atingido além do qual precisão e significância (ou relevância) tornam-se quase que características mutuamente exclusivas*”. Este

princípio de Zadeh é muito evidente na análise de confiabilidade humana no sistema de inspeção por ultra-som pela complexidade do mesmo.

É conhecido que na teoria convencional de confiabilidade existem duas suposições fundamentais [51]:

(A) Suposição de probabilidade: O comportamento do sistema pode ser completamente caracterizado em um contexto de medidas de probabilidades. De acordo com a teoria das probabilidades o termo *probabilidade* deve satisfazer as seguintes três premissas:

- (1) Um evento é definido com precisão.
- (2) A repetitividade probabilística é baseada numa coleta de dados sobre o comportamento de um evento.
- (3) Uma grande quantidade de dados coletados estão disponíveis.

(B) Suposição de estado binário: O significado de falha do sistema é definido abruptamente em qualquer momento – estado de funcionamento ou estado defeituoso.

Para muitos sistemas devido às incertezas e imprecisões dos dados, fazer estimações únicas de probabilidades e conseqüências é muito difícil. Por conseguinte nós devemos revisar as duas suposições por [56, 57]:

(B') Suposição de estado *fuzzy*: O significado de falha do sistema não pode ser classificado com precisão através de um caminho razoável e desta forma em um momento determinado o sistema pode ser considerado em estado de funcionamento *fuzzy* ou em estado defeituoso *fuzzy*.

Fica claro então que a teoria *fuzzy* é essencial para análise de confiabilidade, tratamento de incertezas e determinação de variáveis críticas numa inspeção.

III.- MATERIAIS E MÉTODOS.

Este capítulo se inicia com a apresentação dos resultados obtidos nas investigações feitas sobre as avaliações dos inspetores de END durante os exames de requalificação. A partir deste levantamento de dados mostraremos a importância do estudo da confiabilidade humana durante a inspeção não destrutiva por ultra-som. A seguir se faz uma avaliação do comportamento do sistema de ensaio através de especialistas. Com ajuda deles é conformado um modelo que representa o nível de importância que têm 59 fatores que influenciam no desempenho do inspetor, usando a lógica *fuzzy* como ferramenta capaz de determinar o nível de criticidade das variáveis. Finalmente, na seção é apresentado um modelo fuzzy para determinar as probabilidades de falha em que incorre o inspetor quando usa o procedimento de ensaio PR-011 [58].

III.1.- Investigação do problema de confiabilidade humana em ensaios não destrutivos por ultra – som.

Com o objetivo de obter dados que aumentem tanto o nível de conhecimento sobre o comportamento do inspetor brasileiro envolvido nas técnicas de END por ultra-som em empresa de grande porte no Brasil, quanto à confiabilidade destes ensaios, foram realizados dois trabalhos de pesquisa no Centro de Qualificação de Inspetores (PETROBRAS/SEQUI) em São José dos Campos, São Paulo.

O primeiro trabalho diz respeito aos resultados obtidos por 8 inspetores durante o exame de requalificação. Para a aquisição dos dados foram usadas as seguintes variáveis:

a) Características dos inspetores: Todos tinham mais de 5 anos de experiência. Os inspetores A, B, C, D e E eram de nível II e subnível S2 e os inspetores F, G, H eram de nível II e subnível S5 de acordo com o documento complementar à norma ABENDE NA-001 (documento DC-001) [7].

b) Condições do meio-ambiente: No momento em que os inspetores fizeram o exame a temperatura era entre 20°C e 28°C, a umidade no local era de 80 % e o nível de ruído era < 65dB.

c) Características do material de prova: Aço carbono, espessura de 15 mm, diâmetro mínimo 2" ($\varnothing \text{ ext.} \geq 60,3 \text{ mm}$). Junta de Topo entre chapas ($\alpha=30^\circ$ a 80° ; $a=1.6 \pm 0.8 \text{ mm}$; $b=2.4 \pm 0.8 \text{ mm}$; $t=6$ a 25 mm). Ver Figura III.1.

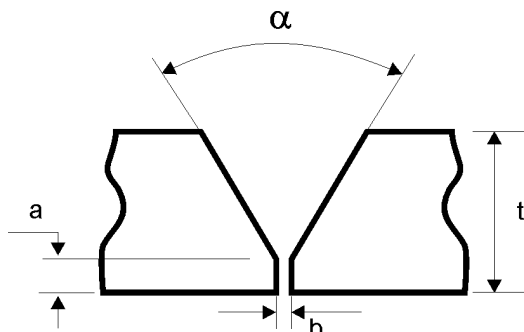


Figura III.1. Junta de Topo entre chapas.

d) Características do examinador: Uma pessoa participou na avaliação da inspeção. Tinha certificado de nível III de acordo com as normas ISO 9712 [6] e EN 473 [59], e um perfeito conhecimento do equipamento usado, assim como possuíam grande experiência na inspeção em soldas e na avaliação dos inspetores.

e) Procedimento utilizado pelos inspetores: Procedimento PR-011 [58] que fixa as condições para a execução do ensaio por ultra-som para a detecção e avaliação de descontinuidades em juntas soldadas de acordo com o SNQC/END.

f) Características do aparelho de ultra-som: Tipo pulso-eco, apresentação tipo "A", capaz de gerar frequências na faixa de 1 a 6 MHz.

g) Características dos cabeçotes: tipo duplo-cristal, cristais com $\varnothing$ de 10 a 30 mm, ângulo do cabeçote 60° e 70° , frequência de 4 MHz.

A norma internacional ISO 9712:1999 estabelece um sistema para a qualificação e certificação de pessoal em END [6]. Esta norma é utilizada pelo examinador para avaliar a execução dos ensaios através dos seguintes itens:

- O inspetor apresentou-se com todo material necessário e adequado para o ensaio e utilizou-o de acordo com o procedimento.
- Sabe verificar a linearidade vertical do aparelho.
- Sabe verificar a linearidade horizontal do aparelho.
- Solicita corretamente as informações sobre a peça a ensaiar.
- Escolhe corretamente o bloco de referência.

- Determina corretamente as perdas por transferência.
- Utiliza a sensibilidade correta para a varredura e avaliação de descontinuidades.
- Utiliza os cabeçotes corretos no ensaio.
- Determina e examina corretamente a área de varredura.
- Utiliza as técnicas de varredura especificadas no procedimento.

Os resultados obtidos por estes 8 inspetores durante o exame de requalificação se encontram na Tabela III.1.

- A tabela III.1 mostra que existem operários experientes e qualificados com nível II de ultra-som no mercado de trabalho que executam ensaios com probabilidades de falso alarme muito elevado.
- À medida que aumenta o número de descontinuidades existentes na peça, aumentam as probabilidades de erro do inspetor.
- Não existe um valor específico de probabilidade de erro na decisão igual para todos os inspetores de um mesmo nível. Isso é devido ao fator humano.

Tabela III.1. Resultados dos exames de requalificação de 8 inspetores de nível II.

Inspetor (subnível)	Avaliação do ensaio (10 itens)	DESCONTINUIDADES			
		Existentes na peça de prova	Relatadas como existentes.	Relatadas inexistentes.	Existentes não relatadas
A (S2)	Satisfatório.	2	2	0	0
B (S2)	Satisfatório.	11	9	6	2
C (S2)	9 de 10 itens Satisfatórios	12	8	12	4
D (S2)	Satisfatório.	6	5	0	1
E (S2)	Satisfatório.	2	2	0	0
F (S5)	Satisfatório.	3	3	0	0
G (S5)	Satisfatório.	2	2	0	0
H (S5)	9 de 10 Satisfatórios.	6	4	0	2

- Ao estabelecer uma relação entre as discontinuidades existentes na peça de prova, as discontinuidades relatadas existentes, as discontinuidades relatadas inexistentes e as discontinuidades não relatadas existentes, observamos que dois inspetores relataram discontinuidades inexistentes e quatro deles não relataram discontinuidades existentes.

Em um segundo trabalho de pesquisa foi observado o comportamento de 11 inspetores de nível II e subnível S2 envolvidos nas técnicas de END por ultra-som. Eles participaram de 4 ensaios, cada um como parte do exame prático específico para a requalificação.

Um exame de qualificação do inspetor nível I ou nível II é um exame administrado por uma instituição nacional certificada ou por um pessoal qualificado autorizado. O mesmo inclui um exame geral e um exame específico para cada nível de competência. O exame geral é formado por um exame teórico e um exame prático. Trata de aspetos gerais, métodos e princípios de aplicação do END tipo ultra-som.

O exame específico é referente a um sistema com componentes, equipamentos, procedimentos e técnicas de ensaio comumente usados numa indústria particular. Este exame envolve a demonstração de conhecimentos referentes ao produto testado e cobre especificações aplicáveis, códigos e critérios de aceitação. Inclui duas partes: um exame teórico específico (ETE) e um exame prático específico (EPE).

Desta forma, baseada também na norma ISO 9712, os examinadores do Centro de Qualificação de Inspetores (SEQUI) aplicam o EPE como parte do Sistema Nacional de Qualificação e Certificação de Pessoal em Ensaio Não Destrutivos (SNQC/END). Durante o EPE são avaliados os seguintes itens:

- Item1: O inspetor solicita corretamente as informações sobre a peça a ensaiar.
- Item2: Escolhe corretamente o bloco de referência.
- Item3: Determina corretamente as perdas por transferência.
- Item4: Utiliza sensibilidade correta para a varredura e avaliação das discontinuidades.
- Item5: Utiliza os cabeçotes corretos no ensaio.
- Item6: Determina e examina corretamente a área de varredura.
- Item7: Utiliza as técnicas de varredura especificadas no procedimento.
- Item8: Encontra as discontinuidades existentes.

- Item9: Não encontra descontinuidades inexistentes.
- Item10: O nível de resposta das descontinuidades está correta.
- Item11: Dimensiona corretamente as descontinuidades encontradas.
- Item12: Localiza corretamente as descontinuidades na direção longitudinal da solda.
- Item13: Localiza corretamente as descontinuidades na direção transversal da solda.
- Item14: Avalia corretamente as reflexões da raiz da solda.
- Item15: Emite corretamente o laudo.
- Item16: Preenche corretamente o relatório.
- Item17: Executa o ensaio dentro do tempo previsto.

Os dados representados nas Tabelas III.2, III.3 e III.4 correspondem à avaliação de cada um dos itens pelo examinador de nível III (S = Satisfatório, N = Não satisfatório, P = Parcialmente Satisfatório, RES = Resultado, A = Aprovado e R = Reprovado).

O método de avaliação de desempenho em cada um dos itens executados pelos inspetores é muito subjetivo; depende da cultura, da visão e do nível de conhecimento do examinador. O resultado do EPE, mesmo tendo uma qualificação quantitativa (entre 0 e 10), é determinado através de uma fórmula em dependência das avaliações qualitativas.

Cada inspetor realizou 4 tipos de ensaios diferentes para um total de 44 ensaios (E1w: primeiro ensaio (chapa de Ø12") do inspetor w; E2w: segundo ensaio (chapa de 16 mm) do inspetor w; E3w: terceiro ensaio (tubo de Ø 8") do inspetor w; E4w: quarto ensaio (tubo de 9 mm) do inspetor w; w = 1..até...11).

Finalmente o inspetor recebe uma qualificação quantitativa (nota entre 0 e 10) e uma qualificação qualitativa (aprovado ou reprovado). Para o ensaio ser aprovado deve obter uma qualificação igual ou maior do que 8.0 pontos.

Nas Tabelas III.2, III.3 e III.4 apresentamos os resultados do exame prático específico.

Tabela III.2.- Resultados do exame prático específico (EPE) dos inspetores 1 a 5.

Inspetor 1					Inspetor 2				Inspetor 3				Inspetor 4				Inspetor 5			
	E11	E21	E31	E41	E12	E22	E 32	E42	E13	E23	E33	E43	E14	E24	E34	E44	E15	E25	E35	E45
X1	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X2	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X3	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	P	P	P	P	S	S	S	S
X4	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X5	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X6	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X7	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X8	S	N	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	S	S	S	N	S	S	N
X9	N	S	S	N	S	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	N	S	N	N
X10	N	N	N	N	N	N	S	N	P	N	N	N	N	P	S	P	N	S	N	N
X11	N	N	N	N	N	N	S	N	P	N	N	N	N	P	S	P	N	S	N	N
X12	N	N	N	N	N	N	S	N	P	N	N	N	N	P	S	P	N	S	N	N
X13	N	N	N	N	N	N	S	N	P	N	N	N	N	P	S	P	N	S	N	N
X14	N	S	S	S	S	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	N	S
X15	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X16	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X17	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
RES	R	R	R	R	R	R	A	A	A	R	R	R	R	A	A	A	R	A	R	R
NOTA	7.6	5.8	4.9	6.4	5.6	2.5	9.8	8.9	9.6	5.4	7.7	5.0	5.6	9.6	10.	9.6	3.8	9.7	6.3	2.7

Tabela III.3.- Resultados do exame prático específico (EPE) dos inspetores 6 a 10.

Inspetor 6					Inspetor 7				Inspetor 8				Inspetor 9				Inspetor 10			
	E16	E26	E36	E46	E17	E27	E 37	E47	E18	E28	E38	E48	E19	E29	E39	E49	E110	E210	E310	E410
X1	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X2	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X3	N	N	N	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X4	P	P	P	P	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X5	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X6	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X7	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X8	N	N	N	N	S	S	S	S	N	N	S	N	S	S	S	S	N	S	N	S
X9	S	S	S	S	S	S	S	N	N	S	N	S	S	S	S	S	S	N	S	S
X10	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	P	S	N	S	N	N	N	N
X11	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	P	S	N	S	N	N	N	N
X12	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	P	S	N	S	N	N	N	N
X13	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	P	S	N	S	N	N	N	N
X14	N	S	S	S	S	S	S	S	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X15	S	S	S	S	S	S	S	S	S	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X16	S	S	S	P	P	P	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X17	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
RES	R	R	R	R	A	A	A	A	R	R	R	R	A	A	A	A	A	R	R	A
NOTA	4.5	4.4	5.0	4.6	9.9	9.7	9.7	8.4	4.0	4.5	6.0	5.3	9.6	9.8	9.2	9.9	9.7	5.5	4.4	9.4

Tabela III.4.- Resultados do exame prático específico (EPE) do inspetor 11.

Inspetor 11				
	E111	E211	E311	E411
X1	S	S	S	S
X2	S	S	S	S
X3	N	N	N	N
X4	N	N	N	N
X5	S	S	S	S
X6	S	S	S	S
X7	S	S	S	S
X8	S	S	S	N
X9	S	S	S	S
X10	N	N	N	N
X11	N	N	N	N
X12	N	N	N	N
X13	N	N	N	N
X14	N	N	N	N
X15	S	S	S	S
X16	S	S	S	S
X17	S	S	S	S
RES	R	R	R	R
NOTA	3.6	3.0	4.3	2.3

Das qualificações obtidas durante a pesquisa num total de 748 avaliações (11 inspetores, 44 ensaios, 17 itens avaliados por ensaio):

- 540 avaliações foram qualificadas de Satisfatório para 72 % do total das avaliações. Ver Figura III.2.
- 27 avaliações de Parcialmente Satisfatório para 4 % do total das avaliações.
- e 181 avaliações de Não Satisfatório para 24 % do total das avaliações.

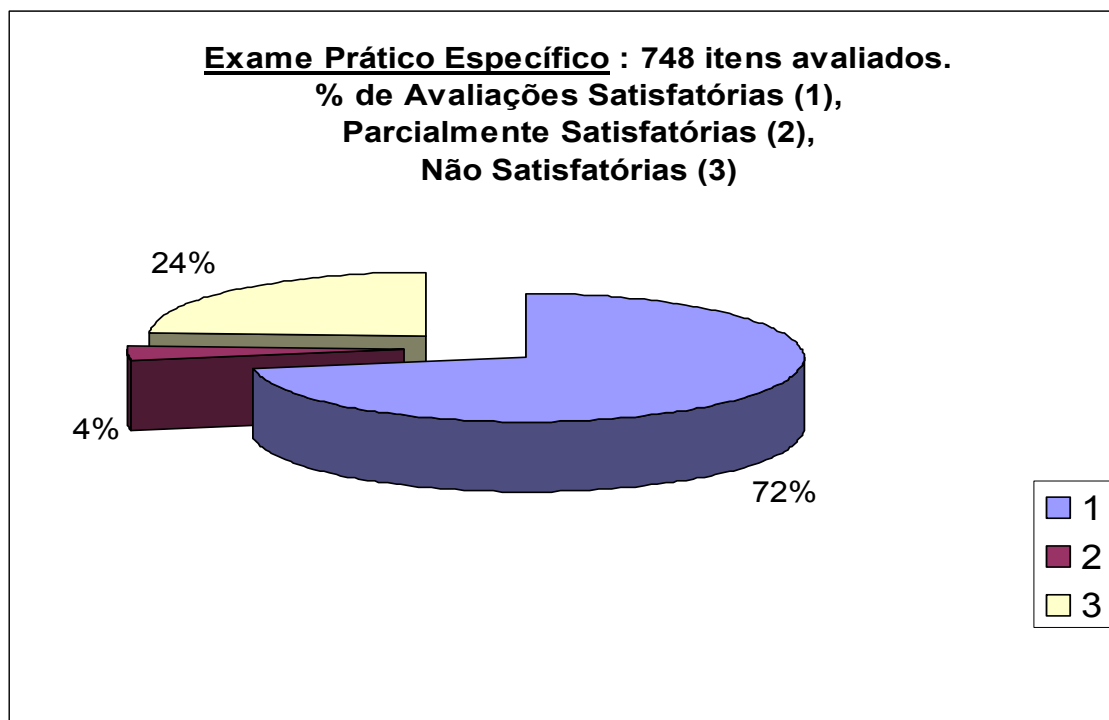


Figura III.2.- Resultados do exame prático específico (11 inspetores, 44 ensaios, 17 itens avaliados por ensaio para um total de 748 itens avaliados).

Destas 181 avaliações Não Satisfatórias:

- 128 avaliações corresponderam aos itens 10, 11, 12 e 13 constituindo 70,7 % das avaliações não satisfatórias. Delas, em 17,67 % dos ensaios, o nível de resposta das descontinuidades dado pelos inspetores foi incorreto (item 10); em 17,67 % dos ensaios os inspetores dimensionaram incorretamente as descontinuidades encontradas (item 11); em 17,67 % dos ensaios os inspetores localizaram incorretamente as descontinuidades na direção longitudinal da solda (item 12) e em 17,67 % dos ensaios os inspetores localizaram incorretamente as descontinuidades na direção transversal da solda (item

13). Qualquer um destes itens tem um peso muito importante na confiabilidade do ensaio porque dependem fundamentalmente do fator humano, ou seja, eles estão relacionados com processos de tomada de decisões.

- 21 avaliações corresponderam ao item 8, o que significa que em 11,6 % dos ensaios os inspetores não encontraram as descontinuidades existentes; 10 avaliações corresponderam ao item 9 o que significa que em 5,52 % dos ensaios os inspetores encontraram descontinuidades inexistentes.

- 9 avaliações corresponderam ao item 14 o que significa que em 4,97 % dos ensaios não avaliaram corretamente as reflexões da raiz da solda; 8 avaliações corresponderam ao item 3 o que significa que em 4,41 % dos ensaios não determinaram corretamente as perdas por transferência; 4 avaliações corresponderam ao item 4 o que significa que em 2,2 % dos ensaios não foi utilizada a sensibilidade correta para a varredura e avaliação das descontinuidades e 1 avaliação correspondeu ao item 15 o que significa que em 0,55 % dos ensaios não foi emitido corretamente o laudo. Ver figuras III.3 e III.4.

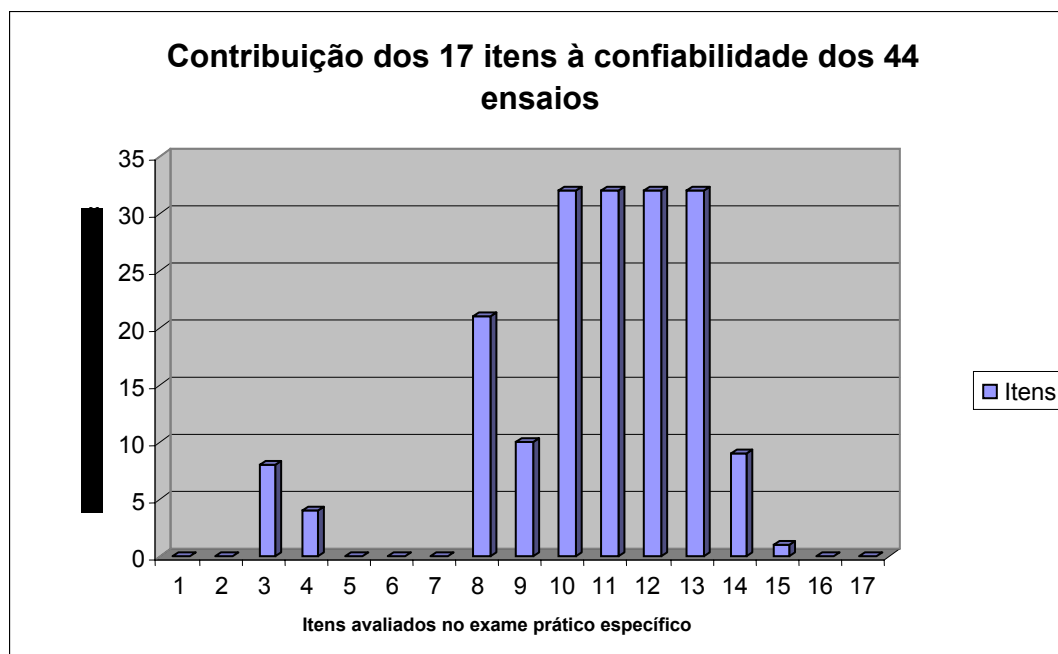


Figura III.3.- Contribuição dos 17 itens à confiabilidade dos 44 ensaios executados por 11 inspetores.

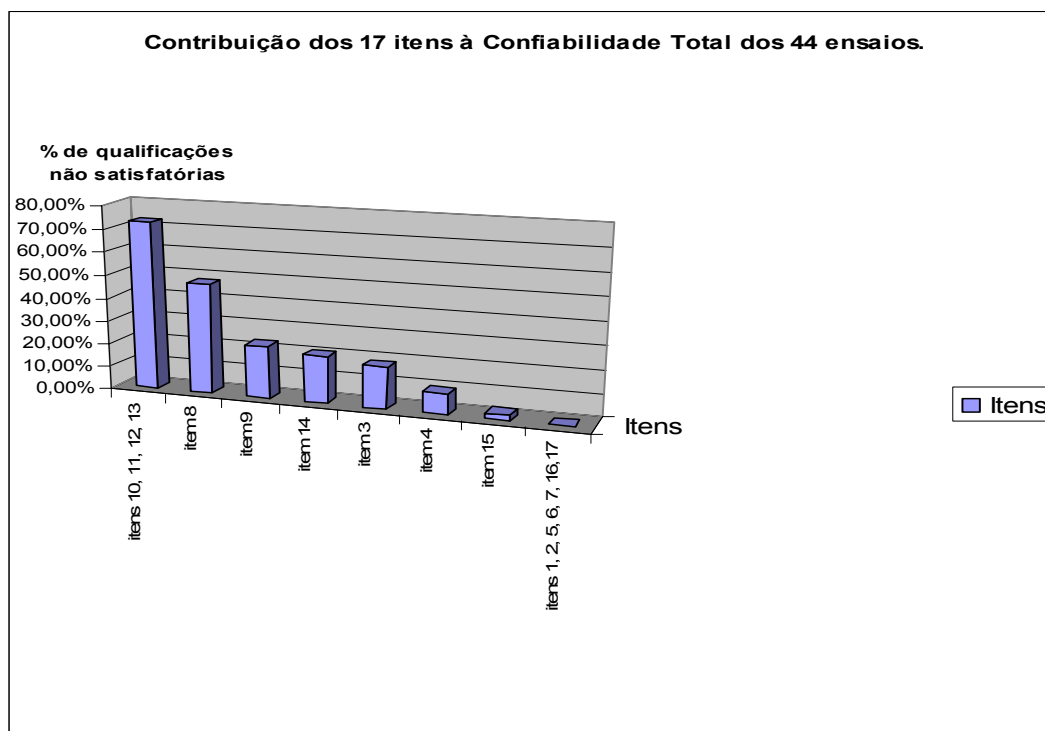


Figura III.4.- Contribuição dos 17 itens à Confiabilidade Total dos 44 ensaios (em %).

O aspecto mais importante deste estudo refere-se aos resultados obtidos nos 44 ensaios realizados pelos 11 inspetores. Deste total:

- 17 ensaios receberam a qualificação de "Aprovado" o que significa 39 % do total de ensaios executados, e;
- 27 ensaios receberam a qualificação de "Reprovado" o que significa 61 % do total de ensaios executados. Ver Figura III.5.

O resultado dá lugar à seguinte questão: se 61 % dos ensaios realizados de um total de 44 feitos num ambiente de "exame de recertificação", onde a necessidade de aprovar está relacionada com a continuidade do inspetor no mercado de trabalho, foram reprovados, quantos ensaios "reprovados" foram realizados por esses inspetores na indústria? Daí a importância da pesquisa sobre a confiabilidade do sistema de ensaio e especificamente sobre a confiabilidade humana.

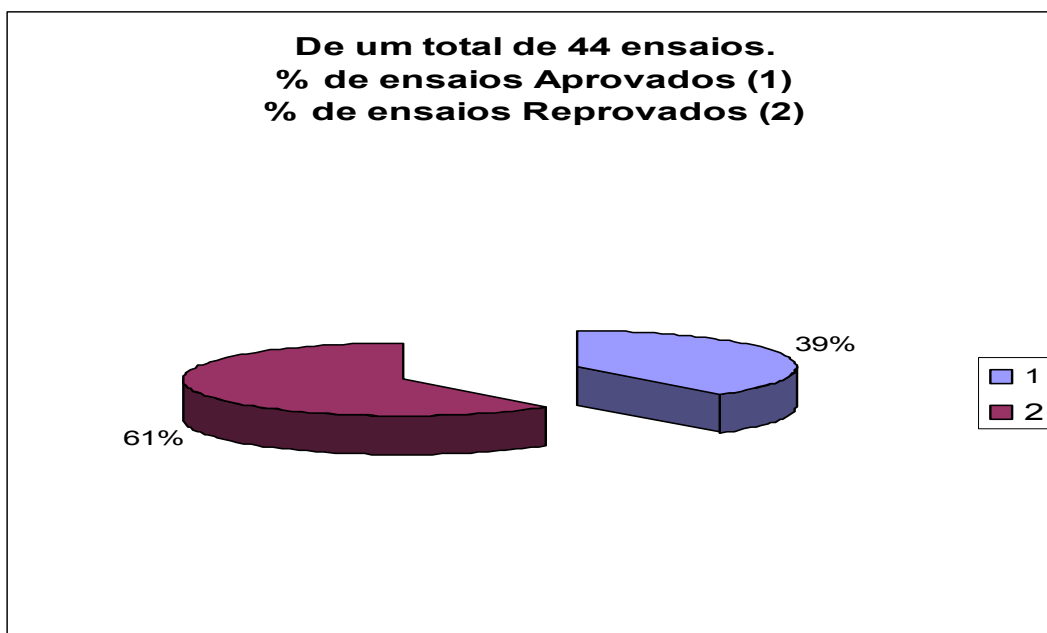


Figura III.5.- Relação de ensaios realizados pelos 11 inspetores, ensaios aprovados e reprovados.

Durante o exame teórico específico (ETE) são avaliados qualitativamente os seguintes itens:

- X18: O inspetor sabe para quais tipos de junta, de material e faixa de espessura se aplica o procedimento.
- X19: Sabe determinar quais os cabeçotes a serem utilizados.
- X20: Sabe escolher corretamente o bloco de referência para a calibração da sensibilidade.
- X21: Sabe como calibrar a sensibilidade para cabeçote normal/duplo cristal.
- X22: Sabe como calibrar a sensibilidade para cabeçote angular.
- X23: Sabe como utilizar as diversas curvas traçadas.
- X24: Sabe como determinar as perdas por transferência.
- X25: Sabe qual o ganho a ser usado para a varredura e avaliação das discontinuidades.
- X26: Sabe quais os acoplantes que podem ser utilizados.
- X27: Sabe determinar corretamente a área de varredura.
- X28: Sabe quais os tipos de varredura a serem utilizados.

X29: Conhece o método de localização de descontinuidades na seção transversal da solda.

X30: Conhece o método de dimensionamento do comprimento das descontinuidades.

X31: Conhece o método de dimensionamento da altura das descontinuidades.

X32: Sabe que precauções e providências tomar quanto à inspeção do metal da base adjacente e solda.

X33: Sabe quais são as condições de superfície requeridas para o ensaio.

X34: Sabe quais as informações que o inspetor deve possuir antes de iniciar o ensaio.

X35: Sabe quais descontinuidades devem ser registradas.

X36: Sabe aplicar corretamente um critério de aceitação.

Na Figura III.6 está representada a distribuição percentual de avaliações satisfatórias, parcialmente satisfatórias e não satisfatórias. Segundo as qualificações obtidas pelos 7 inspetores em cada um dos 19 itens (ver Tabela III.5), de um total de 133 avaliações 87 foram qualificados de Satisfatório (65 %) ; 20 avaliações de Parcialmente Satisfatório, o que constitui 15 %, e 26 avaliações de Não Satisfatório, o que representa 20 % de todas as avaliações. Três inspetores (o 3º, o 4º e o 8º) aprovaram o ETE mas apresentaram dificuldades no momento de fazer o EPE.

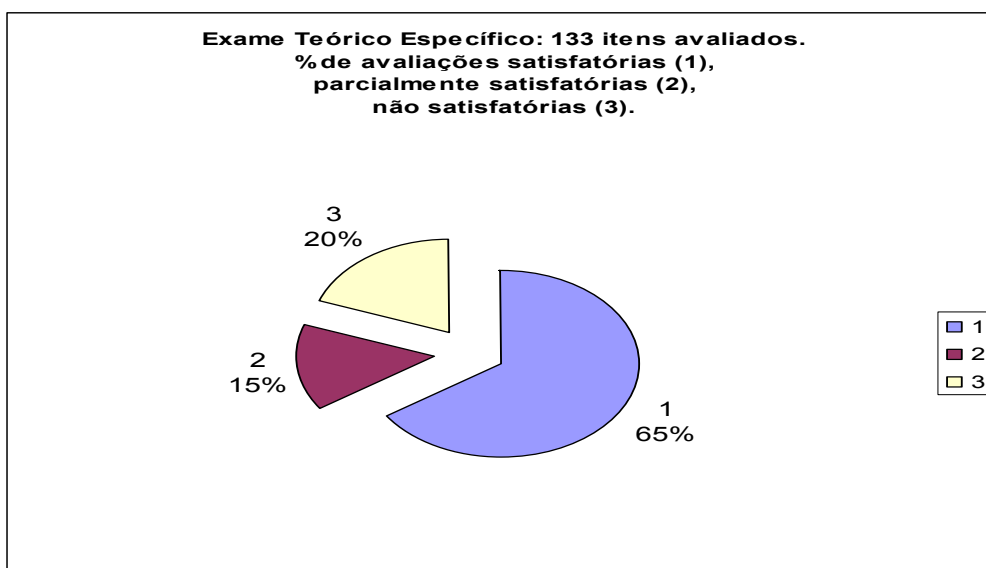


Figura III.6.- Exame Teórico Específico. Distribuição percentual de avaliações satisfatórias, parcialmente satisfatórias e não satisfatórias.

Os dados representados na Tabela III.5 correspondem à avaliação de cada um dos itens pelo examinador de nível III.

Tabela III.5: Resultados do exame teórico específico (ETE) para 7 inspetores.

ETw Xj	ET3	ET4	ET5	ET6	ET8	ET10	ET11
X18	S	S	S	N	S	N	S
X19	S	S	S	N	S	P	P
X20	S	S	S	S	S	S	S
X21	S	P	P	P	S	N	N
X22	S	S	S	S	S	S	N
X23	S	P	N	S	P	S	S
X24	S	S	S	S	S	S	N
X25	S	S	S	S	S	S	S
X26	S	S	S	N	S	S	S
X27	N	S	S	S	S	N	P
X28	N	N	N	P	P	P	P
X29	S	S	S	N	S	S	N
X30	S	N	S	N	S	P	P
X31	N	N	S	N	S	S	N
X32	S	S	P	N	S	S	S
X33	P	S	S	P	S	P	N
X34	P	S	S	P	S	N	P
X35	S	S	S	S	S	S	S
X36	P	S	N	P	S	P	S
RES	A	A	R	R	A	R	R
NOTA	8.5	8.5	7.8	6.5	9.7	7.3	5.4

Onde ETw – exame teórico específico feito pelo inspetor w (w = 3, 4, 5, 6, 8, 10 e 11).

Xj – item avaliado

Conclusão: Os resultados da pesquisa evidenciam que as maiores dificuldades estão presentes na localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades. O problema fundamental é que o inspetor tem um modelo mental de como tal sistema deveria atuar e tal modelo está repleto de subjetividade e nuances inerentes ao modo pelo qual pensamos. Existem também alguns elementos físicos tais como destreza, habilidade, coordenação entre olhos e mãos, capacidade de visão, campo de visão, condições físicas gerais do inspetor, ambiente de trabalho, posição de trabalho e outras habilidades motoras que afetam os resultados do ensaio.

III.2.- Avaliação da Confiabilidade Humana considerando os PSFs.

Avaliar o comportamento de um sistema complexo através de especialistas e de um conjunto básico de atributos não é mais que um processo de tomada de decisões que depende de inúmeros fatores. A tomada de decisão é caracterizada por seleção ou escolha de alternativas as quais estão disponíveis; i.e. elas são descobertas ou criadas com o apoio da cultura existente. Neste caso se deve tomar em conta as limitações da habilidade humana ao mesmo tempo em que se deve introduzir a inteligência humana de uma forma consistente.

Na presente metodologia duas principais suposições serão feitas:

- 1.- Somente os erros humanos são considerados. Todos os outros elementos do sistema de inspeção atuam de maneira satisfatória.
- 2.- A falha do sistema de inspeção resulta devido aos erros humanos. Outro defeito inerente no sistema não é considerado nesta análise.

A metodologia empregada consta de duas partes:

A primeira parte dividida em dez etapas, tem como objetivo utilizar uma versão adaptada do método de avaliação de qualidade proposto em BELCHIOR [60] para levantar o padrão de qualidade do ensaio não destrutivo tipo ultra-som. Este método já foi aplicado com sucesso para avaliação da qualidade do software.

Segundo as normas ISO 9000:2000 [61], qualidade é o grau no qual um conjunto de características inerentes satisfazem requisitos. Atendendo ao conceito de confiabilidade do sistema END como “o grau com que o sistema é capaz de atingir seus propósitos de detecção, caracterização e emitir falsos alarmes”, podemos estabelecer uma relação entre qualidade e confiabilidade, isto é, a partir de um padrão de qualidade determinar o grau de atendimento a este padrão como uma medida de confiabilidade.

Primeira etapa – Identificação do conjunto de atributos de confiabilidade humana a ser considerado (variáveis lingüísticas).

Nesta etapa é definido o conjunto de atributos que influenciam no desempenho do inspetor. É conhecido que estes atributos são os chamados *fatores de incidência no comportamento humano (PSFs)* [9].

Segunda etapa: Escolha de especialistas.

Uma grande quantidade de estudos prévios indicam que em áreas onde é requerida a opinião dos especialistas, o fator mais crítico se refere à seleção dos especialistas, devido a que a confiabilidade e qualidade dos resultados vão refletir a qualidade dos especialistas [62,63,64].

Terceira etapa: Determinar o grau de importância de cada especialista.

Para se ter uma indicação da importância relativa de cada um deles, é utilizado um Questionário de Identificação do Perfil de Especialista (QIPE) (ver Anexo 1) usado em BELCHIOR [60] com o objetivo de avaliar cada especialista e determinar o peso do especialista.

Quarta etapa: Escolha dos termos lingüísticos para avaliar os atributos de confiabilidade humana.

Um apropriado conjunto de termos lingüísticos é escolhido e usado pelos especialistas para descrever suas preferências. HERRERA em [65]. O qualifica como um processo de tomada de decisão onde os termos lingüísticos constituem alternativas a escolher durante a avaliação.

Quinta etapa: Escolher o intervalo numérico mensurável (escala de pesos) $Z[-\infty, \infty]$.

Este intervalo é conhecido como o conjunto referencial para a medição de um atributo particular.

Sexta etapa: Aplicação dos questionários aos especialistas.

Através do questionário, cada atributo de confiabilidade humana será avaliado pelos especialistas os quais através de julgamentos subjetivos expressarão o grau de importância que tem o atributo para a confiabilidade humana durante o ensaio.

Sétima etapa: Tratamento dos dados coletados dos especialistas na avaliação de cada atributo de confiabilidade.

Nesta etapa os prognósticos individuais, para cada atributo, são combinados gerando um consenso dos especialistas. A saída desta etapa é o nível de importância de cada atributo obtido através de uma função de agregação de opiniões.

Oitava etapa: Estabelecer o padrão de qualidade do ensaio.

Estabelecer o padrão de qualidade do ensaio, significa obter o grau de contribuição de cada atributo, que compõe o atributo agregado avaliado (confiabilidade humana); isto é, a matriz de demanda – o que demanda o ensaio (graus de importância de cada um dos 59 atributos) para criar condições de qualidade adequadas na realização de um ensaio confiável.

Nona etapa: Calcular o grau de atendimento ao padrão de qualidade do ensaio como um índice de confiabilidade humana.

Esta etapa tem como objetivo avaliar a confiabilidade humana de diferentes inspetores, tomando como referência o conjunto *fuzzy* “Padrão de Qualidade do ensaio”.

Décima etapa: Determinar o grau de inclusão *fuzzy* de um conjunto *fuzzy* (Padrão de qualidade do ensaio) em outro conjunto *fuzzy* (Desempenho do inspetor).

A segunda parte da metodologia consta de **sete etapas** e é baseada no estudo do procedimento de ultra-som (PR-011) com o objetivo de representar a árvore de falhas *fuzzy* do inspetor por ultra-som e avaliar a possibilidade de erro em que ele incorre quando usa este procedimento.

Primeira etapa: Construção de seqüências de tarefas ou ações humanas durante o ensaio.

Com ajuda do procedimento de ultra-som para inspeção em soldas PR-011 [58], é feito uma análise do mesmo (o mais detalhado possível) para construir a seqüência de tarefas (eventos humanos) que o inspetor executa durante o ensaio.

Segunda etapa: Escolha dos termos lingüísticos para avaliar as probabilidades de falha do inspetor ante cada ação humana, o nível de dependência entre ações humanas, o nível de incerteza da estimação feita pelos nove especialistas e o grau de transtorno que ocasiona uma falha humana, durante a execução de um item, nos itens subseqüentes do procedimento.

Avaliar a taxa de falhas de eventos vagos usando os conceitos de conjuntos *fuzzy* é um enfoque diferente da teoria convencional de construção de árvores de falhas onde os especialistas avaliam a freqüência de ocorrência de eventos numericamente. Através da teoria *fuzzy* é possível traduzir expressões vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos compreensível pelos computadores.

Terceira etapa: Representar as funções de pertinências .

As funções de pertinências para cada uma das expressões lingüísticas vão representar a possibilidade de que um elemento seja membro do conjunto *fuzzy*.

Quarta etapa: Levantamento das opiniões dos nove especialistas em termos lingüísticos sobre as probabilidades de falha do inspetor ante cada ação humana, o nível de dependência entre ações humanas, o nível de incerteza da estimação, e o grau de transtorno que ocasiona uma falha humana, durante a execução de um item, nos itens subseqüentes do procedimento.

Através de dois questionários é possível fazer o levantamento dos dados *fuzzy* sobre estes itens de interesse na construção da árvore de falhas *fuzzy*.

Quinta etapa: Transformar as expressões lingüísticas em números *fuzzy* e agregar as opiniões dos especialistas.

Sexta etapa: Representar a árvore de falha *fuzzy* do inspetor.

A árvore de falha é um método dedutivo, descrito através de uma técnica analítica, onde estão combinados estados indesejados do sistema para determinar o evento indesejado que pode ocorrer. Nesta árvore de falhas são consideradas somente as falhas humanas combinadas numa representação gráfica de forma a caracterizar o evento indesejado pré-definido. Estas falhas denominadas de eventos básicos quando combinados de forma lógica conduzem à ocorrência e determinação do evento topo da árvore de falha. LEWIS [66] considerou outro aspecto importante, o fato da árvore de falha constituir apenas uma técnica qualitativa que pode ser avaliada quantitativamente.

Sétima etapa: Cálculo da probabilidade de erro do inspetor para diferentes eventos topo.

III.2.1 Aplicação da metodologia para avaliação da confiabilidade humana.

Primeira parte: Levantamento do padrão de qualidade do ensaio.

Primeira etapa – Identificação do conjunto de atributos de confiabilidade humana a ser considerado (variáveis lingüísticas).

No ano 1983 foi publicado o Manual de Análise de Confiabilidade Humana com ênfase nas usinas nucleares. Neste manual SWAIN e GUTTMANN [9] descrevem os fatores de incidência no desempenho do operário num sistema de interação homem – máquina. Com apoio destes foi criada uma lista de 59 fatores que são a sua vez atributos de confiabilidade humana. (ver Tabela III.6).

Alguns destes PSFs são externos ao inspetor e outros são internos. Os PSFs externos incluem o ambiente de trabalho, especialmente o desenho do equipamento e os procedimentos escritos ou as instruções orais. Os PSFs internos (fatores psicológicos e fisiológicos) representam as características individuais do inspetor tais como a habilidade, competência, preparo, jeito, suas motivações e outras.

No ensaio não destrutivo por ultra – som, estes fatores criam uma situação em que o erro humano é possível, ou seja a presença ou ausência de aqueles que têm um nível de importância maior para a confiabilidade humana se traduz em quantidade de informação que pode constituir o contexto de indução ao erro , isto é, a causa de uma posterior evidencia de erro humano.

Tabela III.6- Conjunto de 59 atributos de confiabilidade humana.

PSFi	Atributo	PSFi	Atributo
	Fatores externos	PSF ₃₀	Comunicações orais ou escritas.
	Características da situação	PSF ₃₁	Métodos de trabalho.
PSF ₁	Característica arquitetônica.	PSF ₃₂	Políticas da gerência.
PSF ₂	Características ambientais.		Fatores internos
PSF ₃	Temperatura.	PSF ₃₃	Experiência e preparação anterior.
PSF ₄	Umidade.	PSF ₃₄	Prática atual ou treinamento.
PSF ₅	Qualidade do ar.	PSF ₃₅	Variáveis pessoais, inteligência.
PSF ₆	Iluminação.	PSF ₃₆	Motivação, atitude.
PSF ₇	Ruído.	PSF ₃₇	Estado emocional.
PSF ₈	Vibrações.	PSF ₃₈	Atitudes (Influências da família).
PSF ₉	Grau de limpeza em geral.	PSF ₃₉	Identificação com o grupo de trabalho.
PSF ₁₀	Horário de trabalho/descanso		Causa de tensão (fatores psicológicos)
PSF ₁₁	Disponibilidade de equipamento	PSF ₄₀	Aparição repentina da causa psicológica.
PSF ₁₂	Organização de plantões.	PSF ₄₁	Duração da tensão psicológica.
PSF ₁₃	Estrutura da instituição.	PSF ₄₂	Velocidade de trabalho.
PSF ₁₄	Ações dos companheiros.	PSF ₄₃	Carga de trabalho.
PSF ₁₅	Recompensas e reconhecimentos	PSF ₄₄	Risco de trabalho.
	Característica da equipe e tarefa	PSF ₄₅	Ameaça de falhar, de perder o trabalho
PSF ₁₆	Requerimentos de precisão.	PSF ₄₆	Monotonia do trabalho.
PSF ₁₇	Relações controle/display	PSF ₄₇	Períodos longo de vigilância sem ocorrências.
PSF ₁₈	Necessidades de interpretação.	PSF ₄₈	Distrações (devido a ruídos e outros).
PSF ₁₉	Necessidades de decisões.		Fatores fisiológicos
PSF ₂₀	Repetitividade.	PSF ₄₉	Duração da tensão fisiológica.
PSF ₂₁	Complexidade da tarefa.	PSF ₅₀	Fadiga.
PSF ₂₂	Necessidade de memória.	PSF ₅₁	Não comodidade e dor.
PSF ₂₃	Necessidade de efetuar cálculos.	PSF ₅₂	Fome ou sede.
PSF ₂₄	Retroalimentação dos resultados.	PSF ₅₃	Temperatura do inspetor.
PSF ₂₅	Estrutura da equipe e comunicação	PSF ₅₄	Radiações (efeito psicológico).
PSF ₂₆	Interfase homem-máquina.	PSF ₅₅	Acelerações extremas.
PSF ₂₇	Desenho de aparelho.	PSF ₅₆	Constricção de movimentos.
PSF ₂₈	Ferramentas.	PSF ₅₇	Insuficiência de oxigênio.
	Instruções de trabalho ou tarefa	PSF ₅₈	Pressão atmosférica extrema.
PSF ₂₉	Uso dos procedimentos escritos.	PSF ₅₉	Falta de exercício físico.

Como base teórica, considera-se:

$PSF = \{PSF_1, PSF_2, PSF_3, \dots, PSF_n\}$ o conjunto de atributos de confiabilidade humana.

A incerteza dada pela qualidade da interação entre os 59 fatores do desempenho não nos permite falar com certeza absoluta como será a confiabilidade do inspetor, devido a que seu mecanismo cognitivo vai estar mudando por causa da influencia destes fatores.(Ver Figura III.7).

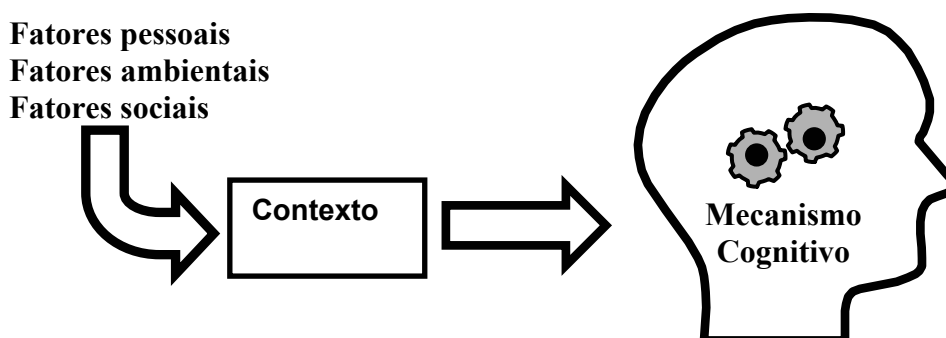


Figura III.7.- Esquema que representa a influencia dos fatores de incidência no comportamento humano (no mecanismo cognitivo do homem).

Segunda etapa: Escolha de especialistas.

A teoria dos conjuntos *fuzzy* permite representar o conhecimento elicitado através de funções de pertinências. É possível construir um modelo *fuzzy* com ajuda de um especialista, mas se formos capazes de elicitar o conhecimento de mais especialistas e ao mesmo tempo que sejam de alto nível de hierarquia, o modelo heurístico ganharia em precisão.

A preparação da lista dos especialistas deve ser baseada em pessoas de alta hierarquia que sejam bem conhecidas pelos seus conhecimentos, experiência e trabalho na área de interesse. Foram escolhidos um total de 9 especialistas, deles 4 são de nível III (nível máximo), 4 de nível II e um sem qualificação mas com elevada experiência como Professor e pesquisador na área de ultra-som. Desta forma definimos o perfil dos especialistas que irão avaliar os atributos. Como base teórica, considera-se:

$E = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_m\}$ o conjunto de especialistas, onde $m = 9$.

Terceira etapa: Determinar o grau de importância de cada especialista.

Estamos em presença de um grupo de especialistas heterogêneos (2 examinadores, 2 Professores, 3 inspetores de campo e 2 pesquisadores) por tal motivo as opiniões deles não podem ser consideradas com a mesma intensidade. Cada opinião vai ter um grau de confiabilidade dada pelo grau relativo de importância do especialista. Os respectivos graus de importância são definidos como um subconjunto $\mu_g(k) \in [0,1]$. O peso relativo em relação aos outros especialistas (média ponderada), é definido por:

$$P_{Ei} = \frac{\sum (\text{escores de cada item para i especialista})}{\sum_{m=1}^9 (\text{t qipe de cada especialista})} \quad (\text{III.1})$$

Como exibe a tabela III.7 e a figura III.8, o especialista I é o de maior importância, devido a que seu peso relativo é de 0,139 e o especialista J é o de menor importância, sendo seu peso relativo de 0,08. Esta avaliação subjetiva da importância de cada especialista é uma forma de diferenciar o peso relativo de cada um deles. O QIPE utilizado é subjetivo e informal, o objetivo dele é tentar diferenciar quantitativamente itens subjetivos.

Tabela III.7- Resultados do QIPE.

Ei / item	Apuração dos resultados do QIPE									pEi
	item 1	item 2	item 3	item 4	item 5	Item 6	item 7	item 8	tqip e	
Esp A	1,4	0,75	0	0	0,9	0,8	1	0,9	5,75	0,0911
Esp B	1	1	1	0,9	0,9	0,8	0,9	1	7,5	0,1188
Esp C	1,5	1	1	1	0,9	0,9	1	1	8,3	0,1315
Esp D	1,7	1	0,75	0,5	1	0,9	1	1	7,85	0,1244
Esp E	1,5	1	0,75	0	1	0,9	0,9	1	7,05	0,1117
Esp F	0,9	1	1	1	0,9	0,6	1	1	7,4	0,1172
Esp G	0,9	0	0,5	0,5	0,9	0,6	1	1	5,4	0,0855
Esp I	2,2	1	1	1	1	0,6	1	1	8,8	0,1394
Esp J	0,9	0	0,75	0	0,9	0,6	0,9	1	5,05	0,0800
									3	
Total	12	6,75	6,75	4,9	8,4	6,7	8,7	8,9	63,1	1

A representação nebulosa dos níveis de importância dos especialistas pode se observar na seguinte figura III.8.

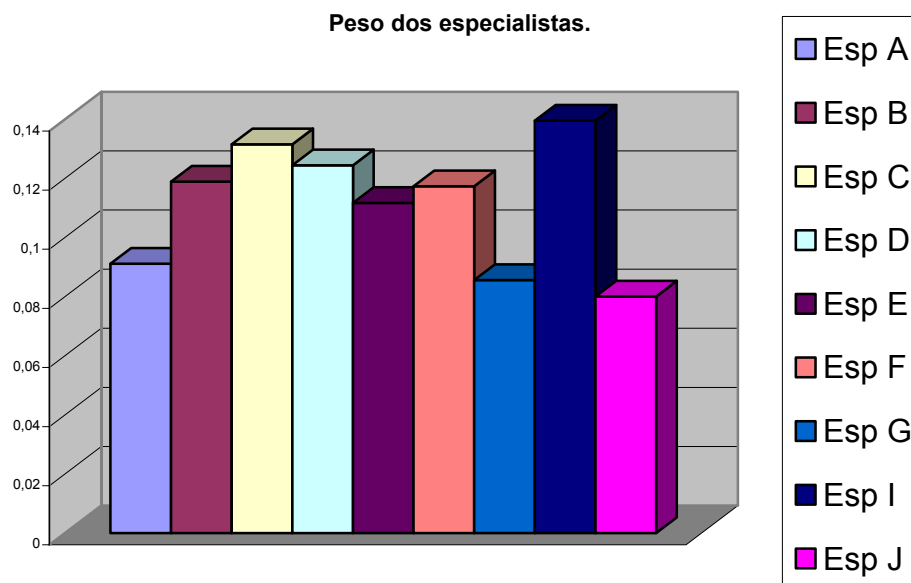


Figura III.8.- Representação dos pesos (nível de importância) dos especialistas.

Quarta etapa: Escolha dos termos lingüísticos para avaliar os atributos de confiabilidade humana .

Segundo HERRERA e VERDEGAY [65], uma variável lingüística está associada a duas regras: uma sintática e uma semântica. Nós precisamos de um conjunto de termos que defina a granulação da incerteza, ou seja, o nível mais fino de distinção entre diferentes qualificações da incerteza, como o qualifica PEDRYCZ [67]. Entretanto, uma vez estabelecido o conjunto de termos lingüísticos, isto deve permanecer constante ao longo de todo o processo de avaliação.

Os atributos foram definidos como *críticos* (aqueles que têm grande influência na confiabilidade humana), *condicionantes* (aqueles que têm influência na confiabilidade humana), *pouco condicionantes* (aqueles que têm pouca influência na confiabilidade humana), e *irrelevantes* (aqueles que não têm nenhuma influência na confiabilidade humana).

Quinta etapa: Escolher o intervalo numérico mensurável (escala de pesos) $Z[-\infty, \infty]$.

Este intervalo é conhecido como o conjunto referencial para a medição de um atributo particular. DUBOIS [68] mostrou a utilidade dos números *fuzzy* para processar informação sob um ambiente *fuzzy*. Em particular o número *fuzzy* triangular tem sido usado por ZIMMERMANN [69] para caracterizar a informação.

Na teoria *fuzzy* cada atributo de confiabilidade humana pode ser visto como uma variável lingüística, relacionada a um conjunto de *termos lingüísticos*, associadas a *funções de pertinência*, em um *conjunto referencial* estabelecido previamente (ver Fig.III.9).

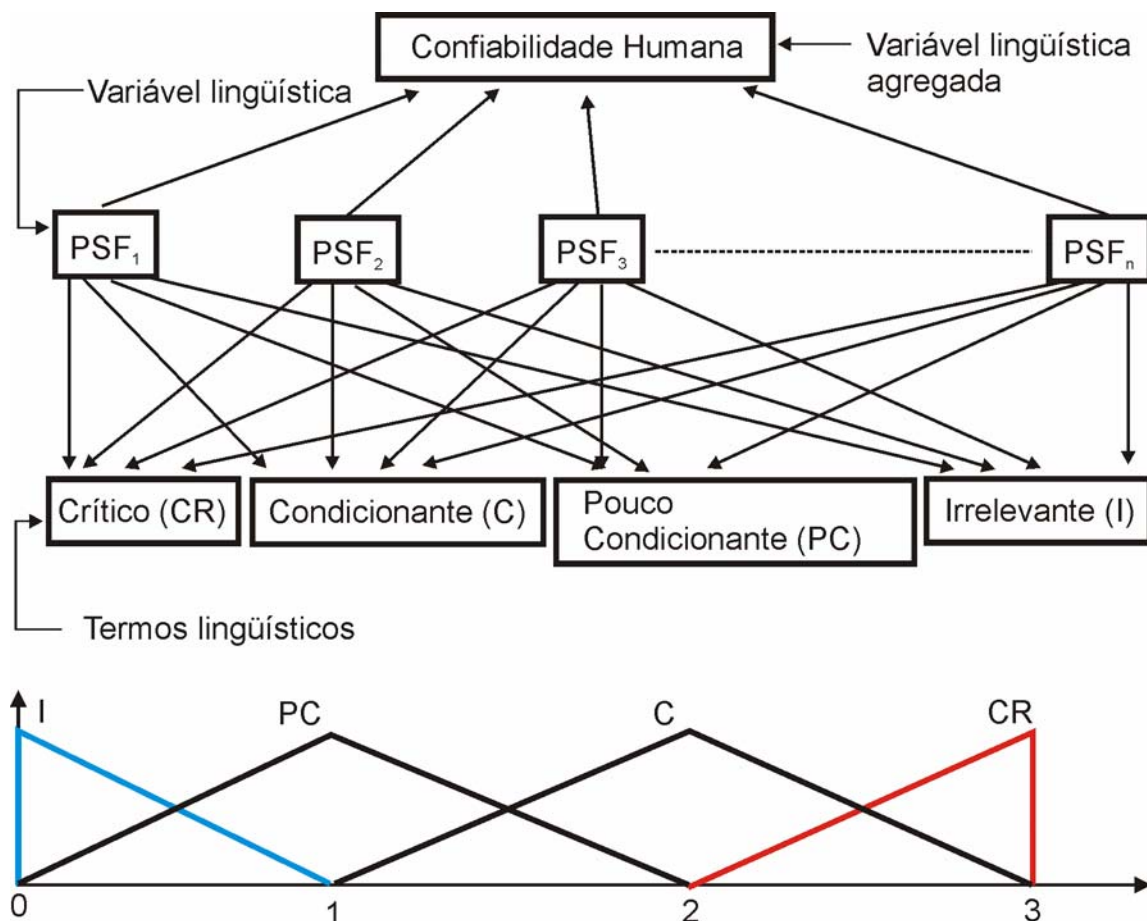


Figura III.9 - A variável lingüística "Performance Shaping Factor".

Os termos lingüísticos T_i , para $i = 0,1,2,3$ serão representados por números *fuzzy* normais triangulares positivos $N(a_i, m_i, b_i)$ do tipo L-R, que denotarão o grau de importância de cada atributo considerado. PEDRYCZ [70] estudou os conjuntos *fuzzy* com funções de pertinência tipo triangular e determinou que eles obedecem aos critérios relevantes de otimização porque ocorre uma equalização da entropia.

Sexta etapa: Aplicação dos questionários aos especialistas.

Um questionário foi elaborado (Anexo 2) e entregue a cada um dos especialistas. É importante que o especialista entenda que o seu critério será usado num trabalho de pesquisa importante e não como uma avaliação de conhecimento. Cada atributo de confiabilidade humana será uma composição de termos lingüísticos, obtidos em um processo de avaliação, feito através do julgamento dos especialistas. Assim sendo, também serão números *fuzzy* (ver Tabela III.8).

Tabela III.8.- Números *fuzzy* normais para termos lingüísticos.

Grau de importância	Simbologia	Termo lingüístico	Número <i>fuzzy</i>
0,0	I	Irrelevante	$N_1=(0,0; 0,0; 1,0)$.
1,0	PC	Pouco Condicionante	$N_2=(0,0; 1,0; 2,0)$.
2,0	C	Condicionante	$N_3=(1,0; 2,0; 3,0)$.
3,0	CR	Crítico	$N_4=(2,0; 3,0; 3,0)$.

Sétima etapa: Tratamento dos dados coletados dos especialistas na avaliação de cada atributo de confiabilidade.

A combinação dos prognósticos individuais é feita a partir de uma função *fuzzy* específica envolvendo um cálculo do grau de concordância entre opiniões, a geração de uma matriz de concordância, a determinação da concordância relativa, o cálculo do coeficiente de consenso dos especialistas e a determinação do valor *fuzzy* de cada PSF. A saída desta etapa é o nível de importância de cada atributo.

Para cada um dos 59 atributos de confiabilidade humana, foi usado o modelo de HSEI-MEI-HSU e CHEN-TUNG-CHEN [71]:

7.1.- Cálculo da área de interseção das opiniões *fuzzy* de cada dois especialistas (matriz de interseção).

$$\text{Área de interseção (AI) das opiniões } fuzzy = \int_x (\min \{ \mu_{\tilde{n}_i}(x), \mu_{\tilde{n}_j}(x) \}) dx \quad (III.2)$$

Tabela III.9.- Matriz de interseção das opiniões *fuzzy*.

Opinião	Fator Crítico.	Fator Condicionante.	Fator Pouco Condicionante.	Fator Irrelevante.
Fator Crítico	1,00	0,25	0	0
Fator Condicionante	0,25	1,00	0,25	0
Fator Pouco Condicionante	0	0,25	1,00	0,25
Fator Irrelevante	0	0	0,25	1,00

7.2.- Cálculo do área total das opiniões *fuzzy* de cada dois especialistas (matriz de área total).

$$\text{Área Total (AT) das opiniões } fuzzy = \int_x (\max \{ \mu_{\tilde{n}_i}(x), \mu_{\tilde{n}_j}(x) \}) dx \quad (III.3)$$

Tabela III.10: Matriz de união das opiniões *fuzzy*.

Opinião	Fator Crítico.	Fator Condicionante.	Fator Pouco Condicionante.	Fator Irrelevante.
Fator Crítico	1,00	1,25	1,50	1,00
Fator Condicionante	1,25	1,00	1,75	1,50
Fator Pouco Condicionante	1,50	1,75	1,00	1,25
Fator Irrelevante	1,00	1,50	1,25	1,00

7.3.- Cálculo da Matriz de Concordância (MC) de opiniões *fuzzy*.

$$MC = \frac{AI}{AT} = \frac{\int_x (\min \{ \mu_{\tilde{n}_i}(x), \mu_{\tilde{n}_j}(x) \}) dx}{\int_x (\max \{ \mu_{\tilde{n}_i}(x), \mu_{\tilde{n}_j}(x) \}) dx} \quad (III.4)$$

Tabela III.11.- Matriz de Concordância das opiniões *fuzzy*.

opin <i>i</i> \ opin <i>j</i>	opin 1	opin 2	opin 3	...	opin n
opin 1	(Ai/At) ₁₁	(Ai/At) ₁₂	(Ai/At) ₁₃	...	(Ai/At) _{1n}
opin 2	(Ai/At) ₂₁	(Ai/At) ₂₂	(Ai/At) ₂₃	...	(Ai/At) _{2n}
opin 3	(Ai/At) ₃₁	(Ai/At) ₃₂	(Ai/At) ₃₃	...	(Ai/At) _{3n}
...					
opin n	(Ai/At) _{n1}	(Ai/At) _{n2}	(Ai/At) _{n3}	...	(Ai/At) _{nn}

7.4.- Cálculo do Coeficiente de Concordância Relativa (CR).

$$CR_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} * [(Ai/At)_{i1}^2 + (Ai/At)_{i2}^2 + (Ai/At)_{i3}^2 + ... + (Ai/At)_{in}^2]} \quad (III.5)$$

7.5.- Cálculo da soma dos coeficientes de concordância relativas.

$$\sum_{i=1}^n CR = CR_1 + CR_2 + CR_3 + ... + CR_n \quad (III.6)$$

7.6.- Cálculo do grau de concordância relativa (GCR_k) de cada especialista.

$$GCR_k = \frac{CR_k}{\sum_{i=1}^n CR_i} \quad (III.7)$$

7.7.- Cálculo do coeficiente de consenso de cada especialista (CCE_k): se calcula levando em conta o peso do especialista PE_k.

$$CCE_k = \frac{GCR_k * PE_k}{\sum_{i=1}^n (GCR_i * PE_i)} \quad (III.8)$$

7.8.- Avaliação do atributo de confiabilidade humana (fator de incidência no comportamento do inspetor).

$$\tilde{N} = \sum_{i=1}^N (CCE_i * \tilde{n}_i) \quad (III.9)$$

onde $\tilde{n}_i$ é o número *fuzzy* (a,m,b) em dependência da avaliação linguística feita pelos especialistas.

EXEMPLO .

Neste exemplo, apresentamos os cálculos de avaliação do atributo de confiabilidade humana: necessidades de interpretação.

Tabela III.12- Representação das opiniões *fuzzy* dos especialistas sobre a influencia do atributo “Necessidades de interpretação” na confiabilidade humana.

Atributo de confiabilidade humana\ Especialista	A	B	C	D	E	F	G	I	J
Necessidades de interpretação	Cr	Cr	C	Cr	C	Cr	Cr	C	Cr

Na Tabela III.13 vemos como as opiniões *fuzzy* dos especialistas são convertidas num formato numérico usando os números *fuzzy* (processo de *fuzzificação*).

Tabela III.13.- Termos lingüísticos usados pelos especialistas na avaliação do atributo “Necessidades de interpretação” levados a um formato numérico usando números *fuzzy* triangulares.

Especialistas avaliadores	Números <i>fuzzy</i> Ñ			Área de Ñ
	a	m	b	
A	2,00	3,00	3,00	0,50
B	2,00	3,00	3,00	0,50
C	1,00	2,00	3,00	1,00
D	2,00	3,00	3,00	0,50
E	1,00	2,00	3,00	1,00
F	2,00	3,00	3,00	0,50
G	2,00	3,00	3,00	0,50
I	1,00	2,00	3,00	1,00
J	2,00	3,00	3,00	0,50

7.1.- Cálculo da área de interseção das opiniões *fuzzy* de cada dois especialistas (matriz de interseção). Ver Figura III.10

$$\text{Área de interseção (AI) das opiniões fuzzy} = \int_x (\min \{ \mu_{\tilde{n}_i}(x), \mu_{\tilde{n}_j}(x) \}) dx$$

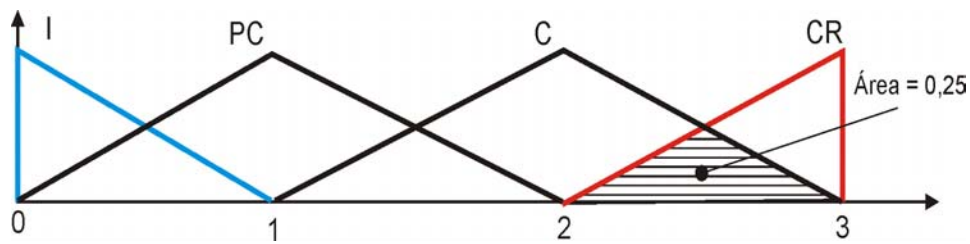


Figura III.10.- Representação da área de interseção de dois opiniões *fuzzy*.

Queda conformada a matriz de interseção de opiniões *fuzzy* da seguinte maneira:

Tabela III.14.- Matriz de interseção das opiniões *fuzzy* dos especialistas sobre a influencia do atributo “Necessidades de interpretação” na confiabilidade do inspetor.

	Cr	Cr	C	Cr	C	Cr	Cr	C	Cr
Cr	1	1	0,25	1	0,25	1	1	0,25	1
Cr	1	1	0,25	1	0,25	1	1	0,25	1
C	0,25	0,25	1	0,25	1	0,25	0,25	1	0,25
Cr	1	1	0,25	1	0,25	1	1	0,25	1
C	0,25	0,25	1	0,25	1	0,25	0,25	1	0,25
Cr	1	1	0,25	1	0,25	1	1	0,25	1
Cr	1	1	0,25	1	0,25	1	1	0,25	1
C	0,25	0,25	1	0,25	1	0,25	0,25	1	0,25
Cr	1	1	0,25	1	0,25	1	1	0,25	1

7. 2.- Cálculo do área total das opiniões *fuzzy* de cada dois especialistas.

$$\text{Área Total (AT) das opiniões fuzzy} = \int_x (\max \{ \mu_{\tilde{n}_i}(x), \mu_{\tilde{n}_j}(x) \}) dx$$

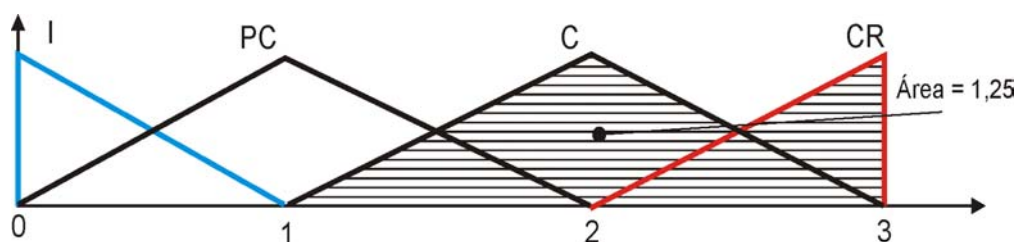


Figura III.11.- Representação da área de união de dois opiniões *fuzzy*.

Queda conformada a matriz de união das opiniões *fuzzy* da maneira como aparece na Tabela III.15.

Tabela III.15.- Matriz de União das opiniões *fuzzy* dos especialistas sobre a influencia do atributo “Necessidade de interpretação” na confiabilidade do inspetor.

	Cr	Cr	C	Cr	C	Cr	Cr	C	Cr
Cr	1	1	1,25	1	1,25	1	1	1,25	1
Cr	1	1	1,25	1	1,25	1	1	1,25	1
C	1,25	1,25	1	1,25	1	1,25	1,25	1	1,25
Cr	1	1	1,25	1	1,25	1	1	1,25	1
C	1,25	1,25	1	1,25	1	1,25	1,25	1	1,25
Cr	1	1	1,25	1	1,25	1	1	1,25	1
Cr	1	1	1,25	1	1,25	1	1	1,25	1
C	1,25	1,25	1	1,25	1	1,25	1,25	1	1,25
Cr	1	1	1,25	1	1,25	1	1	1,25	1

7.3.- Cálculo da Matriz de Concordância (MC) de opiniões *fuzzy*.

$$MC = \frac{AI}{AT} = \frac{\int_x (\min \{ \mu_{\tilde{n}_i}(x), \mu_{\tilde{n}_j}(x) \}) dx}{\int_x (\max \{ \mu_{\tilde{n}_i}(x), \mu_{\tilde{n}_j}(x) \}) dx}$$

Tabela III.16.- Matriz de Concordância entre os especialistas na avaliação da influencia do atributo “Necessidade de interpretação” na confiabilidade do inspetor.

E_j/E_k E_p/E_j		E_A/E_k	E_B/E_k	E_C/E_k	E_D/E_k	E_E/E_k	E_F/E_k	E_G/E_k	E_I/E_k	E_J/E_k
		Cr	Cr	C	Cr	C	Cr	Cr	C	Cr
E_p/E_A	Cr	1	1	0,2	1	0,2	1	1	0,2	1
E_p/E_B	Cr	1	1	0,2	1	0,2	1	1	0,2	1
E_p/E_C	C	0,2	0,2	1	0,2	1	0,2	0,2	1	0,2
E_p/E_D	Cr	1	1	0,2	1	0,2	1	1	0,2	1
E_p/E_E	C	0,2	0,2	1	0,2	1	0,2	0,2	1	0,2
E_p/E_F	Cr	1	1	0,2	1	0,2	1	1	0,2	1
E_p/E_G	Cr	1	1	0,2	1	0,2	1	1	0,2	1
E_p/E_I	C	0,2	0,2	1	0,2	1	0,2	0,2	1	0,2
E_p/E_J	Cr	1	1	0,2	1	0,2	1	1	0,2	1

7.4.- Cálculo do Coeficiente de Concordância Relativa (CR).

Através dos dados obtidos da matriz de concordância, calculou-se a concordância relativa (CR_i) de cada especialista envolvido neste processo, pela média quadrática do grau de concordância entre eles. Ver Tabela III.17. Para o especialista A, por exemplo,

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

$$CR_1 = \sqrt{\frac{1}{9-1} * [(1,00)^2 + (1,00)^2 + (0,2)^2 + (1,00)^2 + (0,2)^2 + (1,00)^2 + (1,00)^2 + (0,2)^2 + (1,00)^2]}$$

$$CR_1 = 0,87$$

7.5.- Cálculo da soma dos coeficientes de concordância relativas.

$$\sum_{i=1}^n CR = CR_1 + CR_2 + CR_3 + \dots + CR_n$$

$$\sum_{i=1}^n CR = 0,87 + 0,87 + 0,63 + 0,87 + 0,63 + 0,87 + 0,87 + 0,63 + 0,87 = 7,15$$

7.6.- Cálculo do grau de concordância relativa (GCR_k) de cada especialista.

O grau da concordância relativa, GCR_i , de cada especialista, em relação aos demais especialistas, foi obtido pela média ponderada de CR_i de cada especialista, mostrado na Tabela III.17. Para o especialista A, por exemplo, tem-se:

$$GCR_k = \frac{CR_k}{\sum_{i=1}^n CR_i} = 0,87 / 7,15 = 0,122$$

7.7.- Cálculo do coeficiente de consenso de cada especialista (CCE_k).

O coeficiente de consenso foi obtido para cada especialista (CCE_i), sendo considerado tanto o grau de concordância relativa GCR_k , quanto o peso do especialista PE_k . Na Tabela III.18 mostramos estes coeficientes. Para o especialista A, por exemplo, tem-se

$$CCE_A = \frac{GCR_k * PE_k}{\sum_{i=1}^n (GCR_i * PE_i)} = (0,122) * (0,091) / 0,109 = 0,102$$

7.8.- Avaliação do peso ou da importância do atributo “Necessidade de interpretação”.
(Ver Tabela III.18)

Tabela III.17.- Concordância relativa, grau de concordância relativa e coeficiente de consenso entre os especialistas na avaliação do atributo “Necessidade de interpretação”.

Especialistas	CR_i	GCR_i	CCE_i
A	0,87464	0,122	0,102
B	0,87464	0,122	0,133
C	0,6364	0,089	0,107
D	0,87464	0,122	0,139
E	0,6364	0,089	0,091
F	0,87464	0,122	0,131
G	0,87464	0,122	0,096
I	0,6364	0,089	0,113
J	0,87464	0,122	0,089

Tabela III.18.- Coeficiente de consenso de cada especialista e a avaliação subjetiva feita por cada um deles representada por números *fuzzy* triangulares (atributo “Necessidade de interpretação”).

CCE_i	Número <i>fuzzy</i> $\tilde{N}_i$		
0,102	2,00	3,00	3,00
0,133	2,00	3,00	3,00
0,107	1,00	2,00	3,00
0,139	2,00	3,00	3,00
0,091	1,00	2,00	3,00
0,131	2,00	3,00	3,00
0,096	2,00	3,00	3,00
0,113	1,00	2,00	3,00
0,089	2,00	3,00	3,00

$\tilde{N} = \sum_{i=1}^N (CCE_i * \tilde{n}_i)$ onde $\tilde{n}_i$ é o número *fuzzy* (a,m,b) em dependência da avaliação lingüística feita pelos especialistas. O resultado da avaliação é dado por $\tilde{N}$ que também é um número *fuzzy* triangular.

$$\begin{aligned} \tilde{N} = & \{[(0,102*2,00)+(0,133*2,00)+(0,107*1,00)+(0,139*2,00)+(0,091*1,00)+ \\ & +(0,131*2,00)+(0,096*2,00)+(0,113*1,00)+(0,089*2,00)]; \\ & [(0,102*3,00)+(0,133*3,00)+(0,107*2,00)+(0,139*3,00)+(0,091*2,00)+(0,131*3,00) + \\ & +(0,096*3,00)+(0,113*2,00)+(0,089*3,00)]; \\ & [(0,102*3,00)+(0,133*3,00)+(0,107*3,00)+(0,139*3,00)+(0,091*3,00)+(0,131*3,00) + \\ & +(0,096*3,00)+(0,113*3,00)+(0,089*3,00)]\}. \end{aligned}$$

$\tilde{N} = (1,68; 2,68; 3,0)$. Este número *fuzzy* triangular é representado na figura III.12.

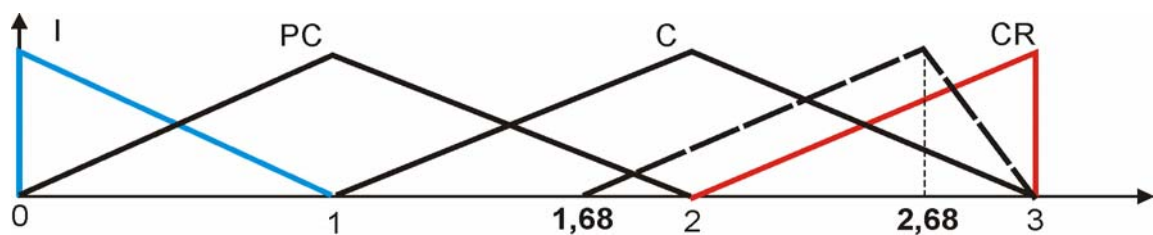


Figura III.12.- Representação da função de pertinência do atributo de confiabilidade humana “Necessidade de interpretação”

Oitava etapa: Estabelecer o padrão de qualidade do ensaio (matriz de demanda).

Para estabelecer o padrão de qualidade do ensaio, calcula-se o peso W_i , isto é, o grau de contribuição de cada atributo, que compõe o atributo agregado avaliado (confiabilidade humana). Ver Tabela III.19.

O peso de cada atributo W_i foi obtido mediante um processo de normalização, dos graus de importância de cada um de seus atributos constituintes, isto é, o valor w_i , que foi calculado através da *defuzzificação* de seu número *fuzzy* $\tilde{N}_i (a_i, m_i, b_i)$ correspondente. Por tanto:

O valor w_i será dado por:

i. $w_i = m_i$, que corresponde ao valor com grau de pertinência igual a 1, isto é, este é o valor nítido (clássico) do atributo de confiabilidade.

ii.- O peso W_i , será dado por:

$$W_i = w_i / \text{maior valor de } m_i$$

Assim obtivemos o grau de importância *fuzzy* de cada atributo, ou seja, um padrão de qualidade para o ensaio não destrutivo por ultra-som, o qual cria as condições de qualidade adequadas na realização de um ensaio confiável. Assim sendo, levantamos um padrão de qualidade para a avaliação dos fatores de incidência no desempenho de um inspetor em ensaios não destrutivos de ultra – som.

Esse padrão pode ser utilizado tanto “a priori” para determinar a viabilidade de se realizar uma medida como “a posteriori” para associar à medida um grau de possibilidade de acerto. Ambas as aplicações estão condicionadas à avaliação dos fatores de incidência no momento da medida e sua comparação com o padrão [72]. Desta forma ordenamos os atributos de confiabilidade humana por níveis de importância formando um ranking geral de importância/necessidade (ver Tabela III.20).

Todos os conjuntos *fuzzy* são considerados normalizados, isto é têm suportes finitos e assumem os valores no intervalo de $[0,1]$.

O conjunto *fuzzy* “Padrão de Qualidade do Ensaio” vai ter uma expressão discreta em um universo finito PSF, onde $PSF = \{PSF_1, PSF_2, PSF_3, \dots, PSF_{59}\}$.

Seja $\tilde{A}$ a representação do conjunto *fuzzy* “Padrão de Qualidade do ensaio” (PQE), então:

$$\tilde{A}(PQE) = \mu_{\tilde{A}}(PSF_1)/PSF_1 + \mu_{\tilde{A}}(PSF_2)/PSF_2 + \dots + \mu_{\tilde{A}}(PSF_{59})/PSF_{59}$$

Tabela III.19.- Representação da avaliação *fuzzy* dos atributos de confiabilidade humana .

PSF	a	m	b	R	PSF	a	m	b	R	PSF	a	m	b	R
Características arquitetônicas.	0,79	1,45	2,31	0,49	Retroalimentação dos resultados.	1,27	2,27	2,80	0,77	Monotonia do trabalho	1,00	1,93	2,79	0,65
Características ambientais	0,87	1,87	2,61	0,63	Estrutura da equipe e comunicação	0,80	1,80	2,67	0,61	Período longo de vigiância	0,99	1,92	2,79	0,65
Temperatura.	1,23	2,23	2,80	0,75	Interfase homem-máquina.	1,15	2,15	2,82	0,73	Distrações (por ruídos , etc)	1,37	2,37	3,0	0,80
Umidade.	0,80	1,80	2,64	0,61	Desenho de aparelho.	0,20	0,90	1,90	0,30	Duração da tensão fisiológica.	1,58	2,58	2,94	0,87
Qualidade do ar.	0,88	1,88	2,63	0,63	Ferramentas.	0,49	1,44	2,19	0,48	Fadiga.	1,84	2,84	3,0	0,96
Iluminação.	0,82	1,73	2,40	0,58	Uso dos procedimentos escritos.	1,94	2,94	3,0	1	Não comodidade e dor.	1,82	2,82	2,94	0,95
Ruido.	1,22	2,22	2,79	0,75	Comunicações orais ou escritas.	1,23	2,23	3,0	0,75	Fome ou sede.	1,22	2,22	2,64	0,75
Vibrações.	1,05	2,05	2,62	0,69	Métodos de trabalho.	1,10	2,10	3,0	0,71	Temperatura do inspetor.	1,53	2,53	2,93	0,86
Grau de limpeza em geral.	0,61	1,54	2,28	0,52	Políticas da gerência.	0,54	1,33	2,18	0,45	Radiações (efeito psicológico).	1,59	2,59	3,0	0,88
Horário de trabalho/descanso	1,41	2,40	3,0	0,81	Experiência e preparação anterior.	1,70	2,70	3,0	0,91	Acelerações extremas.	1,37	2,29	2,75	0,77
Disponibilidade de equipamento	1,70	2,70	3,0	0,91	Prática atual ou treinamento.	1,94	2,94	3,0	1	Construção de movimentos.	1,36	2,36	2,92	0,80
Organização de plantões.	1,21	2,21	2,93	0,75	Variáveis pessoais, inteligência.	1,23	2,22	3,0	0,75	Insuficiência de oxigênio.	1,84	2,84	3,0	0,96
Estrutura da instituição.	0,93	1,93	2,81	0,65	Motivação, atitude.	1,12	2,12	3,0	0,72	Pressão atmosférica extrema.	1,39	2,39	2,79	0,81
Ações dos companheiros.	0,93	1,93	2,81	0,65	Estado emocional.	1,35	2,35	3,0	0,79	Falta de exercício físico.	1,06	2,06	2,94	0,70
Recompensas e reconhecimentos	0,58	1,58	2,45	0,53	Atitudes (Influencias da família).	1,33	2,33	2,93	0,79					
Requerimentos de precisão.	1,36	2,36	2,92	0,80	Identificação com o grupo de trabalho.	0,98	1,85	2,45	0,62	Legenda: PSF.- Performance Shaping Factor (a; m; b).- número <i>fuzzy</i> triangular m.- valor médio do conjunto <i>fuzzy</i> R : nível de importância <i>fuzzy</i> do atributo (normalizado).				
Relações controle/display	1,38	2,38	3,0	0,80	Aparição repentina da causa psicológica.	1,06	2,06	2,94	0,7					
Necessidades de interpretação.	1,68	2,68	3,0	0,91	Duração da tensão psicológica.	1,58	2,58	3,0	0,87					
Necessidades de decisões.	1,85	2,85	3,0	0,96	Velocidade de trabalho.	1,70	2,70	2,93	0,91					
Repetitividade.	1,08	2,08	2,80	0,70	Carga de trabalho.	1,68	2,68	3,0	0,91					
Complexidade da tarefa.	0,56	1,56	2,39	0,53	Risco de trabalho.	1,68	2,68	3,0	0,91					
Necessidade de memória.	0,34	1,12	2,03	0,38	Ameaça de falhar, de perder o trabalho	1,70	2,70	3,0	0,91					

$\tilde{A}(\text{PQE}) = 1,00/\text{Prática atual ou treinamento} + 1,00/\text{Uso dos procedimentos escritos} +$
 $+ 0,969/\text{Necessidades de decisões} + 0,966/\text{Insuficiência de oxigênio} + 0,966/\text{Fadiga} +$
 $+ 0,959/\text{Não comodidade e dor} + 0,918/\text{Velocidade de trabalho} + 0,918/\text{Disponibilidade}$
 $\text{do equipamento} + 0,918/\text{Experiência e preparação anterior} + 0,918/\text{Ameaça de falhar,}$
 $\text{de perder o trabalho} + 0,911/\text{Carga de trabalho} + 0,911/\text{Risco de trabalho} + 0,911/$
 $\text{Necessidade de interpretação} + 0,881/\text{Radiações (efeito psicológico)} + 0,877/\text{Duração}$
 $\text{da tensão fisiológica} + 0,877/\text{Duração da tensão psicológica} + 0,860/\text{Temperatura do}$
 $\text{inspetor} + 0,816/\text{Horário de trabalho(horário de descanso)} + 0,812/\text{Pressão atmosférica}$
 $\text{extrema} + 0,809/\text{Relações controle/display} + 0,806/\text{Distrações (devido a ruídos e}$
 $\text{outros)} + 0,802/\text{Requerimentos de precisão} + 0,802/\text{Construção de movimentos} + 0,799/$
 $\text{Estado emocional} + 0,792/\text{Atitudes (Influencias da família)} + 0,778/\text{Acelerações}$
 $\text{extremas} + \dots + 0,381/\text{Necessidade de memória} + 0,306/\text{Desenho do aparelho}.$

Quanto mais perto esteja de 1 o grau de pertinência do atributo maior será a pertinência dele ao conjunto *fuzzy* “Padrão de Qualidade do Ensaio”, ou seja, maior será a relevância o importância deste atributo para a qualidade e confiabilidade do ensaio.

Algumas características do conjunto *fuzzy* “Padrão de Qualidade do ensaio” podem ser determinadas, por exemplo:

i.)-A cardinalidade do conjunto *fuzzy* “Padrão de Qualidade do Ensaio” por propriedade vai ser a soma das pertinências dos atributos que conformam o conjunto:

$$\text{Card}(\tilde{A}) = \sum_{x \in X} A(x) \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Card}(\tilde{A}) = 1 + 1 + 0,969 + 0,966 + 0,966 + 0,959 + 0,918 + 0,918 + 0,918 + 0,918 + 0,911 + 0,911 + 0,911 + \dots + 0,452 + 0,381 + 0,306 = 44,059.$$

ii.)- A cardinalidade relativa do conjunto *fuzzy* “Padrão de Qualidade do Ensaio” vai ser:

$$\text{Cardinalidade relativa: } \|\tilde{A}\| = \sum_{x \in X} A(x) / \text{quantidade de atributos} = 44,059/59 = 0,74.$$

Tabela III.20- Representação da avaliação *fuzzy* dos atributos de confiabilidade humana .

Atributo	GPM	Normal.	Atributo.	GPM	Normal.	Atributo	GPM	Normal.
Prática atual ou treinamento.	2,94	1	Requerimentos de precisão	2,36	0,802	Estrutura da instituição	1,93	0,656
Uso dos procedimentos .	2,94	1	Construção de movimentos	2,36	0,802	Ações do s companheiros	1,93	0,656
Necessidades de decisões.	2,85	0,969	Estado emocional	2,35	0,799	Períodos longos de vigilância s/o	1,92	0,653
Insuficiência de oxigênio.	2,84	0,966	Atitudes (Influencias da família)	2,33	0,792	Qualidade do ar	1,88	0,639
Fadiga	2,84	0,966	Acelerações extremas	2,29	0,778	Características ambientais	1,87	0,636
Não comodidade e dor.	2,82	0,959	Retroalimentação dos resultados.	2,27	0,772	Identificação com o grupo	1,85	0,629
Velocidade de trabalho.	2,70	0,918	Necessidade de efetuar cálculos.	2,24	0,761	Umidade	1,80	0,612
Disponibilidade do equipamento	2,70	0,918	Temperatura ambiental	2,23	0,758	Estrutura da equipe e comunicação	1,80	0,612
Experiência e preparação.	2,70	0,918	Comunicações orais ou escritas	2,23	0,758	Iluminação	1,73	0,588
Ameaça (falhar, perder o trabalho)	2,70	0,918	Fome ou sede	2,22	0,755	Recompensas e reconhecimentos	1,58	0,537
Carga de trabalho	2,68	0,911	Ruído	2,22	0,755	Complexidade da tarefa	1,56	0,530
Risco de trabalho	2,68	0,911	Variáveis pessoais, inteligência	2,22	0,755	Grau de limpeza em geral	1,54	0,523
Necessidades de interpretação.	2,68	0,911	Organização de plantões	2,21	0,751	Características arquitectônicas	1,45	0,493
Radiações (efeito psicológico).	2,59	0,881	Interfase homem-máquina	2,15	0,731	Ferramentas	1,44	0,489
Duração da tensão fisiológica.	2,58	0,877	Motivação, atitude	2,12	0,721	Políticas da gerência	1,33	0,452
Duração da tensão psicológica.	2,58	0,877	Métodos de trabalho	2,10	0,714	Necessidade de memória	1,12	0,381
Temperatura do inspetor.	2,53	0,860	Repetitividade.	2,08	0,707	Desenho do aparelho	0,90	0,306
Horário de trabalho/descanso.	2,40	0,816	Aparição repentina da causa psicológica	2,06	0,7	Legenda: GPM: Grau de pertinência máximo. Normal.: Normalização		
Pressão atmosférica extrema.	2,39	0,812	Falta de exercício físico	2,06	0,7			
Relações controle/display	2,38	0,809	Vibrações	2,05	0,697			
Distrações (devido a ruídos, etc).	2,37	0,806	Monotonia do trabalho	1,93	0,656			

iii.)- Alguns atributos apresentam o mesmo nível de importância *fuzzy* para o ensaio. Eles tem o mesmo nível de influencia ou relevância na confiabilidade humana. Por exemplo: O atributo “Prática atual do inspetor” tem o mesmo nível de importância para o ensaio quanto o atributo “Uso dos procedimentos escritos”; a sua vez os atributos “Velocidade do trabalho”, “Disponibilidade do equipamento”, “Experiência e preparação anterior” e a “Ameaça de perder o trabalho” têm o mesmo nível de importância para o ensaio.

Segundo o princípio de PARETO [73], o 80% das dificuldades vêm do 20% do problema, ou seja, um pequeno número de questões é responsável por um grande número de problemas. Aplicando Pareto, o 20% de 59 atributos é 11,8; isto significa que 12 atributos representam o maior peso na confiabilidade do ensaio. Aqui apresentamos 13 atributos devido a que o último atributo (PSF₄₄) tem o mesmo grau de importância que o atributo PSF₁₈. Eles são:

PSF₃₄: Prática atual ou treinamento, $\mu(PSF_{34}) = 1$.

PSF₂₉: Requerimentos de usos de procedimentos, $\mu(PSF_{29}) = 1$.

PSF₁₉: Necessidades de decisões, $\mu(PSF_{19}) = 0,969$.

PSF₅₇: Insuficiência de oxigênio, $\mu(PSF_{57}) = 0,965$.

PSF₅₀: Fadiga, $\mu(PSF_{50}) = 0,965$.

PSF₅₁: Não comodidade e dor, $\mu(PSF_{51}) = 0,959$.

PSF₄₂: Velocidade de trabalho, $\mu(PSF_{42}) = 0,918$

PSF₁₁: Disponibilidade e adequação do equipamento, $\mu(PSF_{11}) = 0,918$

PSF₃₃: Experiência e preparação anterior, $\mu(PSF_{33}) = 0,918$

PSF₄₅: Ameaça de falhar, de perder o trabalho, $\mu(PSF_{45}) = 0,918$

PSF₄₃: Carga de trabalho, $\mu(PSF_{43}) = 0,911$

PSF₄₄: Risco de trabalho, $\mu(PSF_{44}) = 0,911$

PSF₁₈: Necessidades de interpretação, $\mu(PSF_{42}) = 0,911$

Em nosso resultado a análise de Pareto é equivalente a fazer um α -cut, sendo $\alpha = 0,9$.

Nona etapa: Calcular o grau de atendimento ao padrão de qualidade do ensaio como um índice de confiabilidade humana.

É possível avaliar a confiabilidade humana de diferentes inspetores tomando como referência o conjunto *fuzzy* : “Padrão de Qualidade do Ensaio”. Para fazer este tipo de avaliação foi feito o seguinte:

1ro.- Foram escolhidos 3 inspetores que trabalham em dois ambientes físicos diferentes. Dois deles trabalham na usina nuclear de Angra II e o outro trabalha numa plataforma da Petrobrás. Os três têm qualificação de nível II.

2do.- Foram escolhidos cinco termos lingüísticos nebulosos para avaliar os graus de atendimento dos atributos de confiabilidade humana em diferentes ambientes físicos: “Ótimo”, “Bom”, “Regular”, “Ruim” e “Péssimo”.

3ro.- Os termos lingüísticos “Ótimo”, “Bom”, “Regular”, “Ruim” e “Péssimo” foram representados por funções de pertinências triangulares, denotando assim o grau de atendimento de cada atributo considerado (ver Figuras desde III.14 até III.18).

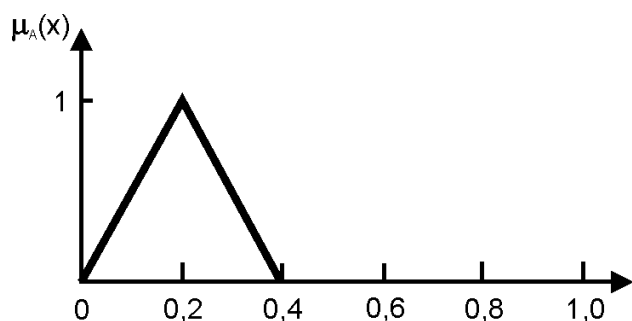


Figura III.14.- Função de pertinência para o termo nebuloso “Péssimo”.

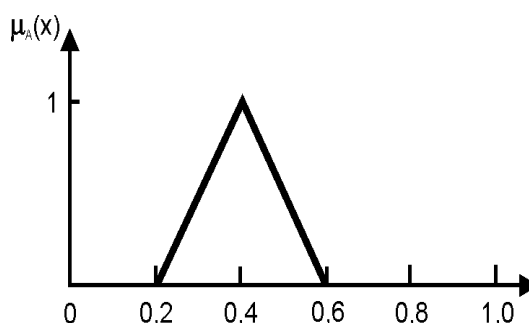


Figura III.15.- Função de pertinência para o termo nebuloso “Ruim”.

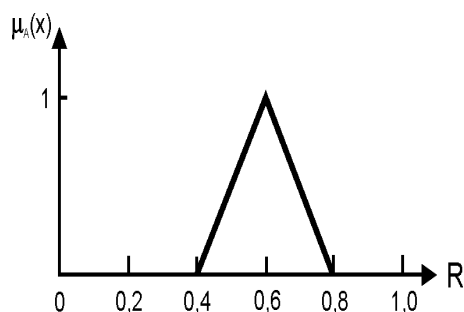


Figura III.16.- Função de pertinência para o termo nebuloso “Regular”.

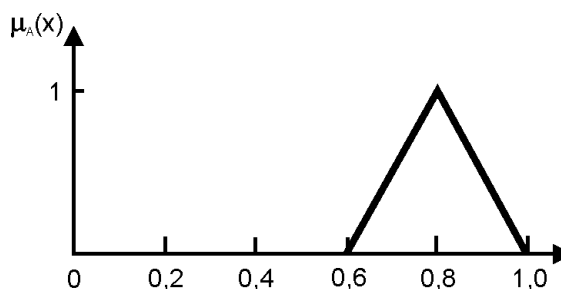


Figura III.17.- Função de pertinência para o termo nebuloso “Bom”.

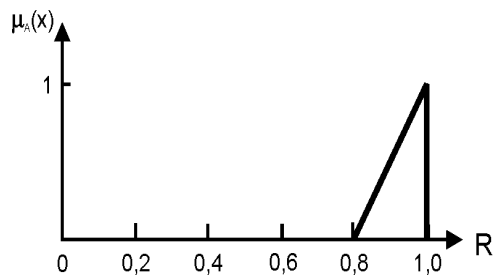


Figura III.18.- Função de pertinência para o termo nebuloso “ Ótimo ”.

Na tabela III.21 aparece representado o grau de pertinência máximo (GPM) para cada um dos termos *fuzzy*.

Tabela III.21.- Valores de pertinência máximo para os diferentes termos *fuzzy*.

Grau de atendimento	Representação	GPM
Ótimo	O	1,0
Bom	B	0,8
Regular	R	0,6
Ruim	RU	0,4
Péssimo	P	0,2

4to.- Foi aplicado um questionário aos três inspetores (ver Anexo 3):

As perguntas são referentes ao grau de comportamento de cada um dos 59 atributos de confiabilidade humana nos seus ambientes físicos, ou seja, o que nos oferece um ambiente específico com relação ao comportamento dos atributos de confiabilidade humana. Uma vez respondido o questionário pelos inspetores foi conformada o vetor *fuzzy* de oferta daqueles ambientes físicos, representado na tabela III.22.

5to.- Tabulação dos valores de pertinência.

Cada termo *fuzzy* (péssimo, ruim, regular, bom e ótimo) vai ser representado por um conjunto *fuzzy*., ele vai ser *fuzzificado* e convertido num formato numérico de fácil entendimento pelo computador, como aparece na tabela III.23.

6to.- Defuzzificação.

O objetivo deste processo é obter-se um único valor numérico discreto que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos da variável lingüística de saída (índice de atendimento ao padrão de qualidade do ensaio, que significa a sua vez um índice de confiabilidade humana).

Utilizando o método COG (Center of Gravity) e a fórmula correspondente (III.31) calculamos R_{ij} , i.e, o grau de atendimento do inspetor ao padrão de qualidade, sendo este um índice de confiabilidade humana.

$$R_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^k w_j * r_{ij}}{\sum_{j=1}^k w_j} \quad (II.31)$$

onde w_j são os pesos *fuzzy* dos atributos, r_{ij} é o grau de atendimento de cada atributo nos ambientes físicos estudados.

Desta forma os resultados obtidos são (Ver Tabela III.24):

$R(\text{inspetor_1}) = 0,742$. Significa que o inspetor 1 atende em 74,2% ao padrão de qualidade do ensaio naquele ambiente físico.

$R(\text{inspetor_2}) = 0,735$. Significa que o inspetor 2 atende em 73,5% ao padrão de qualidade do ensaio naquele ambiente físico.

$R(\text{inspetor_3}) = 0,793$. Significa que o inspetor 3 atende em 79,3% ao padrão de qualidade do ensaio naquele ambiente físico.

Ao comparar, é possível inferir que o inspetor 3 possui o maior grau de desempenho esperado. Ele é quem melhor atende ao padrão de qualidade do ensaio, ou seja, ele é o de melhor índice de confiabilidade humana.

Tabela III.22.- Matriz de Oferta (comportamento dos PSFs em dois ambientes físicos diferentes segundo a opinião de três inspetores).

PSF	In 1	In 2	In 3	PSF	In 1	In 2	In 3	PSF	In 1	In 2	In 3
Características arquitetônicas.	B	B	R	Necessidade de efetuar cálculos.	B	B	O	Ameaça de falhar (perder o trabalho)	RU	B	RU
Características ambientais	B	B	R	Retroalimentação dos resultados.	B	B	R	Monotonia do trabalho	R	P	O
Temperatura.	B	B	R	Estrutura da equipe e comunicação	B	B	B	Período longo de vigilância	RU	RU	RU
Umidade	R	B	B	Interfase homem-máquina	B	B	B	Distrações (por ruídos)	B	B	B
Qualidade do ar.	B	B	R	Desenho de aparelho	O	B	B	Duração da tensão fisiológica.	O	O	B
Iluminação.	B	B	R	Ferramentas.	B	B	B	Fadiga.	O	O	B
Ruido.	RU	RU	R	Uso dos procedimentos escritos.	B	B	R	Não comodidade e dor.	O	O	R
Vibrações.	R	R	B	Comunicações orais ou escritas.	B	B	B	Fome ou sede.	O	O	O
Grau de limpeza em geral.	O	O	B	Métodos de trabalho.	O	B	B	Temperatura do inspetor.	RU	RU	O
Horário de trabalho/descanso	B	B	B	Políticas da gerência.	O	O	B	Radiações (efeito psicológico).	RU	RU	R
Disponibilidade de equipamento	B	B	B	Experiência e preparação anterior.	B	B	B	Acelerações extremas.	RU	RU	O
Organização de plantões.	B	B	R	Prática atual ou treinamento.	R	R	B	Constricção de movimentos.	RU	RU	O
Estrutura da instituição.	B	B	R	Variáveis pessoais, inteligência.	B	B	B	Insuficiência de oxigênio.	RU	RU	O
Ações dos companheiros.	B	B	B	Motivação, atitude.	B	B	O	Pressão atmosférica extrema.	RU	RU	O
Recompensas e reconhecimentos	O	O	B	Estado emocional.	B	B	O	Falta de exercício físico.	RU	RU	RU
Requerimentos de precisão.	B	B	B	Atitudes (Influencias da família).	R	R	B				
Relações controle/display..	B	B	O	Identificação com o grupo de trabalho.	B	B	O	Legenda : In_1, In_2 e In_3 são os inspetores 1, 2 e 3 respectivamente. PSF: Performance Shaping Factors.			
Necessidades de interpretação.	O	B	O	Aparição repentina da causa psicológica.	O	O	O				
Necessidades de decisões.	O	O	B	Duração da tensão psicológica.	O	O	O				
Repetitividade.	R	R	B	Velocidade de trabalho.	B	B	B				
Complexidade da tarefa.	B	B	O	Carga de trabalho.	B	B	R				
Necessidade de memória	B	B	O	Risco de trabalho.	B	B	RU				

Tabela III.23.- Vetor de pertinências dos conjuntos *fuzzy* nos dois ambientes físicos.

PSF	In 1	In 2	In 3	PSF	In 1	In 2	In 3	PSF	In 1	In 2	In 3
Características arquitetônicas.	0,8	0,8	0,6	Necessidade de efetuar cálculos.	0,8	0,8	1,0	Ameaça de falhar (perder o trabalho)	0,4	0,8	0,4
Características ambientais	0,8	0,8	0,6	Retroalimentação dos resultados.	0,8	0,8	0,6	Monotonia do trabalho	0,6	0,2	1,0
Temperatura.	0,8	0,8	0,6	Estrutura da equipe e comunicação	0,8	0,8	0,8	Período longo de vigilância	0,4	0,4	0,4
Umidade	0,6	0,8	0,8	Interfase homem-máquina.	0,8	0,8	0,8	Distrações (por ruídos)	0,8	0,8	0,8
Qualidade do ar.	0,8	0,8	0,6	Desenho de aparelho.	1,0	0,8	0,8	Duração da tensão fisiológica.	1,0	1,0	0,8
Iluminação.	0,8	0,8	0,6	Ferramentas.	0,8	0,8	0,8	Fadiga.	1,0	1,0	0,8
Ruido.	0,4	0,4	0,6	Uso dos procedimentos escritos.	0,8	0,8	0,6	Não comodidade e dor.	1,0	1,0	1,0
Vibrações.	0,6	0,6	0,8	Comunicações orais ou escritas.	0,8	0,8	0,8	Fome ou sede.	1,0	1,0	1,0
Grau de limpeza em geral.	1,0	1,0	0,8	Métodos de trabalho.	1,0	0,8	0,8	Temperatura do inspetor.	0,4	0,4	1,0
Horário de trabalho/descanso	0,8	0,8	0,8	Políticas da gerência.	1,0	1,0	0,8	Radiações (efeito psicológico).	0,4	0,4	0,6
Disponibilidade de equipamento	0,8	0,8	0,8	Experiência e preparação anterior.	0,8	0,8	0,8	Acelerações extremas.	0,4	0,4	1,0
Organização de plantões.	0,8	0,8	0,6	Prática atual ou treinamento.	0,6	0,6	0,8	Constricção de movimentos.	0,4	0,4	1,0
Estrutura da instituição.	0,8	0,8	0,6	Variáveis pessoais, inteligência.	0,8	0,8	0,8	Insuficiência de oxigênio.	0,4	0,4	1,0
Ações dos companheiros.	0,8	0,8	0,8	Motivação, atitude.	0,8	0,8	1,0	Pressão atmosférica extrema.	0,4	0,4	1,0
Recompensas e reconhecimentos	0,2	0,2	0,8	Estado emocional.	0,8	0,8	1,0	Falta de exercício físico.	0,4	0,4	0,4
Requerimentos de precisão.	0,8	0,8	0,8	Atitudes (Influencias da família).	0,6	0,6	0,8				
Relações controle/display..	0,8	0,8	1,0	Identificação com o grupo de trabalho.	0,8	0,8	1,0	Legenda : In_1, In_2 e In_3 são os inspetores 1, 2 e 3 respectivamente. PSF: Performance Shaping Factors			
Necessidades de interpretação.	1,0	0,8	1,0	Aparição repentina da causa psicológica.	1,0	1,0	1,0				
Necessidades de decisões.	1,0	1,0	0,8	Duração da tensão psicológica.	1,0	1,0	1,0				
Repetitividade.	0,6	0,6	0,8	Velocidade de trabalho.	0,8	0,8	0,8				
Complexidade da tarefa.	0,8	0,8	1,0	Carga de trabalho.	0,8	0,8	0,6				
Necessidade de memória	0,8	0,8	1,0	Risco de trabalho.	0,8	0,8	0,4				

Tabela III.24.- Representação dos pesos (P) dos PSFs e dos graus de atendimentos dos inspetores ao padrão de qualidade do ensaio.

PSF	P	In 1	In 2	In 3	PSF	P	In 1	In 2	In 3	PSF	P	In 1	In 2	In 3
Características arquitetônicas.	0,49	0,8	0,8	0,6	Necessidade de efetuar cálculos.	0,76	0,8	0,8	1,0	Ameaça de falhar (perder o trabalho)	0,91	0,4	0,8	0,4
Características ambientais	0,63	0,8	0,8	0,6	Retroalimentação dos resultados.	0,77	0,8	0,8	0,6	Monotonia do trabalho	0,65	0,6	0,2	1,0
Temperatura.	0,75	0,8	0,8	0,6	Estrutura da equipe e comunicação	0,61	0,8	0,8	0,8	Período longo de vigilância	0,65	0,4	0,4	0,4
Umidade.	0,61	0,6	0,8	0,8	Interfase homem-máquina.	0,73	0,8	0,8	0,8	Distrações (por ruídos)	0,80	0,8	0,8	0,8
Qualidade do ar.	0,63	0,8	0,8	0,6	Desenho de aparelho.	0,30	1,0	0,8	0,8	Duração da tensão fisiológica.	0,87	1,0	1,0	0,8
Iluminação.	0,58	0,8	0,8	0,6	Ferramentas.	0,48	0,8	0,8	0,8	Fadiga.	0,96	1,0	1,0	0,8
Ruido.	0,75	0,4	0,4	0,6	Uso dos procedimentos escritos.	1	0,8	0,8	0,6	Não comodidade e dor.	0,95	1,0	1,0	1,0
Vibrações.	0,69	0,6	0,6	0,8	Comunicações orais ou escritas.	0,75	0,8	0,8	0,8	Fome ou sede.	0,75	1,0	1,0	1,0
Grau de limpeza em geral.	0,52	1,0	1,0	0,8	Métodos de trabalho.	0,71	1,0	0,8	0,8	Temperatura do inspetor.	0,86	0,4	0,4	1,0
Horário de trabalho/descanso	0,81	0,8	0,8	0,8	Políticas da gerência.	0,45	1,0	1,0	0,8	Radiações (efeito psicológico).	0,88	0,4	0,4	0,6
Disponibilidade de equipamento	0,91	0,8	0,8	0,8	Experiência e preparação anterior.	0,91	0,8	0,8	0,8	Acelerações extremas.	0,77	0,4	0,4	1,0
Organização de plantões.	0,75	0,8	0,8	0,6	Prática atual ou treinamento.	1	0,6	0,6	0,8	Constricção de movimentos.	0,80	0,4	0,4	1,0
Estrutura da instituição.	0,65	0,8	0,8	0,6	Variáveis pessoais, inteligência.	0,75	0,8	0,8	0,8	Insuficiência de oxigênio.	0,96	0,4	0,4	1,0
Ações dos companheiros.	0,65	0,8	0,8	0,8	Motivação, atitude.	0,72	0,8	0,8	1,0	Pressão atmosférica extrema.	0,81	0,4	0,4	1,0
Recompensas e reconhecimentos	0,53	0,2	0,2	0,8	Estado emocional.	0,79	0,8	0,8	1,0	Falta de exercício físico.	0,70	0,4	0,4	0,4
Requerimentos de precisão.	0,80	0,8	0,8	0,8	Atitudes (Influencias da família).	0,79	0,6	0,6	0,8					
Relações controle/display..	0,80	0,8	0,8	1,0	Identificação com o grupo de trabalho.	0,62	0,8	0,8	1,0	Grau de atendimento	-	0,74	0,73	0,79
Necessidades de interpretação.	0,91	1,0	0,8	1,0	Aparição repentina da causa psicológica.	0,70	1,0	1,0	1,0					
Necessidades de decisões.	0,96	1,0	1,0	0,8	Duração da tensão psicológica.	0,87	1,0	1,0	1,0	Legenda: P: nível de importância (peso normalizado).				
Repetitividade.	0,70	0,6	0,6	0,8	Velocidade de trabalho.	0,91	0,8	0,8	0,8					
Complexidade da tarefa.	0,53	0,8	0,8	1,0	Carga de trabalho.	0,91	0,8	0,8	0,6					
Necessidade de memória	0,38	0,8	0,8	1,0	Risco de trabalho.	0,91	0,8	0,8	0,4					

Décima etapa: Determinar o grau de inclusão de um conjunto *fuzzy* (Padrão de qualidade do ensaio) em outro conjunto *fuzzy* (Desempenho do inspetor).

Se A é o conjunto *fuzzy* que representa o Padrão de Qualidade do ensaio e B é o conjunto *fuzzy* que representa o desempenho do inspetor então o grau de inclusão do conjunto *fuzzy* “Padrão de qualidade do ensaio” no conjunto *fuzzy* “Desempenho do inspetor” será

$$S(A,B) = \frac{1}{Card(A)} \left\{ Card(A) - \sum_{x \in X} \max\{0, A(x) - B(x)\} \right\} \quad (II.20)$$

$$\Rightarrow S(A,B_1) = (1/43,8) * (43,8 - \sum (0,2+0,2+0,169+0,366+0,166+0,159+0,518+0,318+0,118+0,111+0,111+0,111+0,081+0,677+0,077+0,06+0+0+0,209+0,006+0,002+0,002+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0,151+0+0+0+0,107+0+0+0+0+0+0,253+0,039+0,236+0+0+0+0+0+0,13+0,123+0,093+0,089+0,052+0+0)) = 0,8873$$

$$\Rightarrow S(A,B_2) = (1/43,4) * (43,4 - \sum (0,2+0,2+0,169+0,166+0,166+0,159+0,518+0,318+0,118+0,111+0,111+0,111+0,081+0,677+0,077+0,06+0,016+0+0,209+0,006+0,002+0,002+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0,151+0+0+0+0,107+0+0+0+0+0+0,439+0,236+0+0+0+0+0+0,13+0,123+0,093+0,089+0,052+0+0)) = 0,8871$$

$$\Rightarrow S(A,B_3) = (1/46,8) * (46,8 - \sum (0,4+0,4+0,369+0,166+0,366+0,359+0,318+0,118+0,118+0,118+0,111+0,311+0,311+0,081+0,077+0,077+0+0+0,012+0,009+0+0+0+0,199+0+0+0+0+0,158+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0,056+0,256+0,253+0+0,236+0+0+0+0+0+0+0+0+0+0)) = 0,895748$$

Nas Figuras III.19, III.20 e III.21 aparecem os gráficos que representam quão incluído está o padrão de qualidade do ensaio no desempenho dos inspetores 1, 2 e 3 em seus respectivos ambientes físicos.

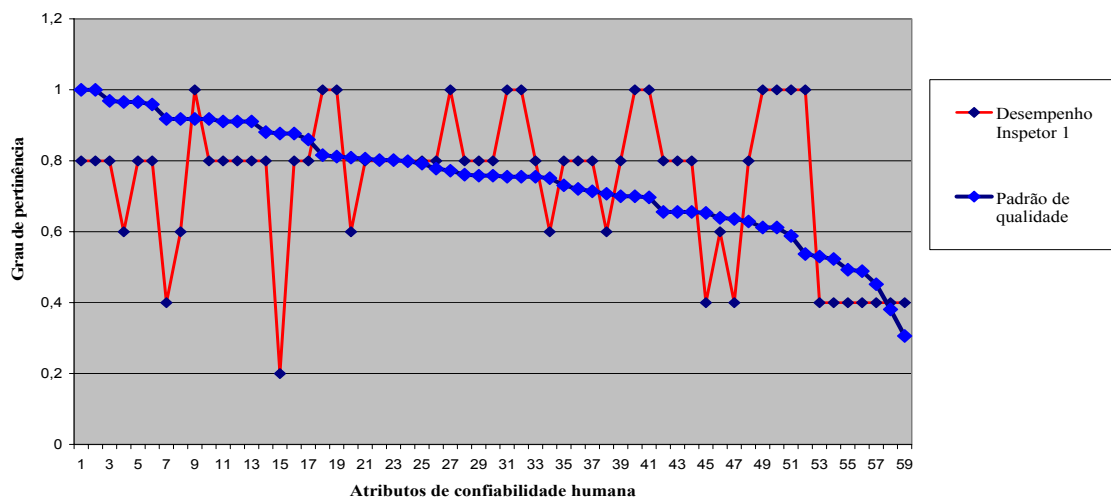


Figura III.19.- Gráfico que representa o grau de inclusão do padrão de qualidade do ensaio no desempenho do Inspetor 1.

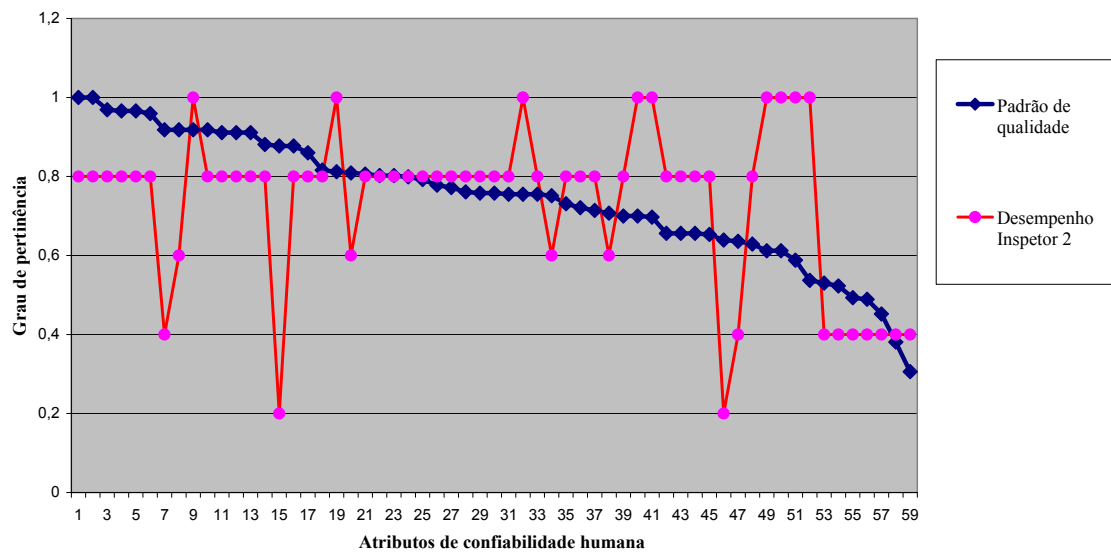


Figura III.20.- Gráfico que representa o grau de inclusão do padrão de qualidade do ensaio no desempenho do Inspetor 2.

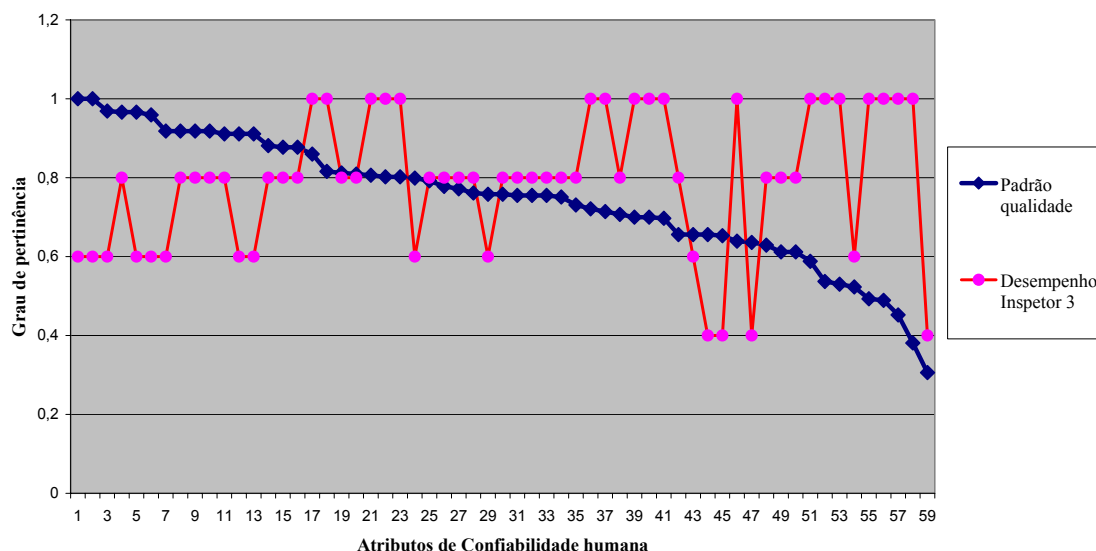


Figura III.21.- Gráfico que representa o grau de inclusão do padrão de qualidade do ensaio no desempenho do inspetor 3.

Conclusão: o padrão de qualidade do ensaio está mais incluído no desempenho do inspetor 3 do que nos outros dois inspetores. Com os resultados obtidos até aqui pode-se concluir que o inspetor 3 é o de melhor grau de desempenho, porque é o que tem as características do padrão de qualidade melhor incluídas nele.(ver Tabela III.25).

Tabela III.25.- Comparação entre os 3 inspetores.

Inspetor	Grau de desempenho	Grau de inclusão do padrão de qualidade no inspetor
In 1.	0,742	0,8873
In 2	0,735	0,8871
In 3	0,793	0,8957

Segunda parte: Estudo do procedimento de ultra-som.

Com ajuda do procedimento PR-011, que fixa as condições exigíveis e práticas recomendadas na realização do ensaio não-destrutivo por meio do ultra-som e se aplica na medição de espessura, inspeção de chapa grossa e inspeção de solda, construímos a sequência de tarefas que a sua vez foi revisada por 4 especialistas.

Primeira etapa: Construção de seqüências de tarefas ou ações humanas (o mais detalhado possível) executadas pelo inspetor durante o ensaio (análise do procedimento de ultra-som).

Procedimento do ensaio por ultra – som

1.- Calibração. Verificar a linearidade vertical do aparelho

- 1.1 Obter um eco
- 1.2 Colocar o eco em 100% (leitura)
- 1.3 Reduzir + 6 dB
- 1.4 Verifica a altura que ficou o eco (leitura)
- 1.5 Reduze + 6 dB
- 1.6 Verifica de novo a altura (leitura)
- 1.7 Reduze + 6 dB
- 1.8 Verifica de novo a altura (leitura)

2.- Calibração. Verificar a linearidade horizontal do aparelho

- 2.1 Colocar um eco na tela
- 2.2 Fazer uma leitura
- 2.3 Colocar um segundo eco na tela.
- 2.4 Fazer uma leitura
- 2.5 Colocar um terceiro eco na tela
- 2.6 Fazer uma leitura
- 2.7 Colocar um quarto eco na tela
- 2.8 Fazer uma leitura
- 2.9 Verificar. Se estiver bom usa, se estiver ruim troca.

3.- Solicitar informações sobre a peça (diâmetro, espessura, material, perfil do chanfro)

4.- Escolher o bloco de referência em função da espessura.

5.- Escolher o cabeçote e o ângulo.

6.- Escolher a frequência.

7.- Preparação da superfície da peça.

- Esmerilhamento
- Escovamento
- Lixamento

8.- Determinar a sensibilidade correta para a varredura e avaliação das descontinuidades.

- 8.1- Posicionar corretamente o cabeçote no bloco
- 8.2- Achar o sinal de 5 pontos no aparelho (leitura)
- 8.3- Marcar os sinais na tela
- 8.4- Traçar as curvas

8.5- Acrescentar o ganho das perdas por transferência $GC=GP+PT$

8.6- Cálculo do ganho por varredura $GK=GC + 6 \text{ dB}$

9.- Determinar as perdas por transferência.

9.1- Pegar o bloco de referência

9.2- Colocar corretamente um cabeçote emissor e um receptor

9.3- Fazer três leituras e achar três pontos

9.4- Traçar uma curva na tela do aparelho

9.5- Posicionar corretamente o cabeçote na peça

9.6- Fazer uma leitura (Ler a diferença entre dois pontos)

9.7- Usar essa diferença

10.- Usar corretamente as técnicas de varredura especificadas no procedimento.

11.- Determinar corretamente a área de varredura.

11.1- Medir a área em função da espessura e do ângulo do cabeçote

11.2- Fazer um cálculo trigonométrico

12.- Examinar corretamente a área de varredura (sobreposição e velocidade).

13.- Localizar as descontinuidades no sentido longitudinal.

13.1- Movimentar o cabeçote até a perda do sinal

13.2- Fazer uma leitura no aparelho

13.3- Fazer uma medição com a trena

13.4- Anotar

14.- Localizar as descontinuidades no sentido transversal

14.1- Saber das marcas de referência zero.

14.2- Maximizar o eco.

14.3- Ler no aparelho a distância do eco = l .

14.4- Multiplicar por $\sin \alpha$ ($d = l * \sin \alpha$)

14.5- Fazer uma medição (distância do ponto focal à referência)

14.6- Fazer uma subtração

14.7- Anotar

15.- Localizar as descontinuidades na profundidade

15.1- Maximizar o eco

15.2- Ler no aparelho l

15.3- Calcular ($2 * \text{eco} - l * \cos \alpha$)

15.4- Anotar

16.- Dimensionar as descontinuidades

. Comprimento

16.1- Movimentar corretamente o cabeçote para os lados até o sinal sumir

16.2- Medir a distância entre os dois extremos.

16.3- Anotar

. Altura

16.4- Traçar um perfil do feixe sônico de 20 dB

16.5-Deslocar o cabeçote pra frente e pra trás até coincidir as bordas das discontinuidades (superior e inferior) com os bordos do feixe (inferior e superior)

16.6- Fazer uma leitura no aparelho

16.7- Mede distância do cabeçote a uma referência

16.8- Fazer uma localização gráfica

16.9- Fazer uma medição direta

16.10- Anotar

17.- Avaliar as reflexões da raiz de solda

17.1- Movimentar corretamente o cabeçote

17.2- Observar o sinal na tela

17.3- Comparar com o perfil do feixe e a figura do chanfro

17.4- Anotar

18.- Emitir o laudo.

18.1- Registrar as discontinuidades

18.2- Compara as medições registradas com os critérios.

19.- Preencher o relatório.

Cada ação humana ou evento terá uma probabilidade de erro determinada e esta pode ser vista como uma *variável lingüística*, relacionada a um conjunto de *termos lingüísticos*, associada a *funções de pertinência*.

Segunda etapa: Escolha de termos lingüísticos para avaliar as probabilidades de falha do inspetor ante cada ação humana, o nível de dependência entre ações humanas, o nível de incerteza da estimação feita pelos 9 especialistas, e o transtorno que ocasiona uma falha humana nos itens ou eventos subseqüentes. Ver Tabelas III.26,III.27, III.28 e III.29.

Tabela III.26.- Números *fuzzy* normais (a; m; b) para termos lingüísticos representando a variável “probabilidade de falha” .

Grau de importância	Simbologia	Termo lingüístico	Número fuzzy
0,0	Zero	Zero	$N_1=(0,0; 0,0; 1,0).$
1,0	QZ	Quase Zero	$N_2=(0,0; 1,0; 2,0).$
2,0	MB	Muito Baixa	$N_3=(1,0; 2,0; 3,0).$
3,0	B	Baixa	$N_4=(2,0; 3,0; 4,0).$
4,0	Mod	Moderada	$N_5=(3,0; 4,0; 5,0).$
5,0	A	Alta	$N_6=(4,0; 5,0; 6,0).$
6,0	MA	Muito Alta	$N_7=(5,0; 6,0; 6,0).$

Tabela III.27.- Números *fuzzy* normais (p; q; r) para termos lingüísticos representando a variável “nível de dependência entre tarefas”.

Grau de importância	Simbologia	Termo lingüístico	Número fuzzy
0,0	Zero	Zero	$N_1=(0,0; 0,0; 1,0)$.
1,0	B	Baixa	$N_2=(0,0; 1,0; 2,0)$.
2,0	Mod	Moderada	$N_3=(1,0; 2,0; 3,0)$.
3,0	A	Alta	$N_4=(2,0; 3,0; 4,0)$.
4,0	C	Completa	$N_5=(3,0; 4,0; 4,0)$.

Tabela III.28.- Números *fuzzy* normais (s; t; u) para termos lingüísticos representando a variável “nível de incerteza na estimação dos especialistas”.

Grau de importância	Simbologia	Termo lingüístico	Número fuzzy
0,0	B	Baixo	$N_1=(0,0; 0,0; 1,0)$.
1,0	Mod	Moderado	$N_2=(0,0; 1,0; 2,0)$.
2,0	MqA	Mais que Alto	$N_3=(1,0; 2,0; 3,0)$.
3,0	A	Alto	$N_4=(2,0; 3,0; 3,0)$.

Tabela III.29.- Graus de pertinência máximo (GPM) e representação *fuzzy* dos diferentes níveis de transtornos.

Grau de transtorno	GPM	Número <i>fuzzy</i> triangular
Transtorno Crítico	1,0	(0,8; 1,0; 1,0)
Transtorno importante	0,8	(0,6 ; 0,8; 1,0)
Algum transtorno	0,6	(0,4, 0,6; 0,8)
Pouco transtorno	0,4	(0,2; 0,4; 0,6)
Nenhum transtorno	0,2	(0,0; 0,2; 0,4)

ONISAWA [74, 75] determinou uma maneira correta de aplicar a metodologia *fuzzy* tratando a probabilidade como um número *fuzzy*. RASSMUSSEN [11] classificou os diferentes tipos de erros em que pode incorrer o homem. Estes erros que foram avaliados pelos especialistas são: erros de omissão (não realizar uma ação ou tarefa requerida pelo sistema) e erros de comissão (execução incorreta de uma tarefa ou ação

requerida pelo sistema ou a realização de uma tarefa ou ação não requerida pelo sistema e que tem a potencialidade para fazer falhar ao sistema, exemplo, erro de cálculo, erro de leitura, erro de medição, erro de sequência, erro de seleção, erro cognitivo (busca, classificação, interpretação, memória).

Os especialistas dão a sua opinião sobre as probabilidades de falha do inspetor em cada ação a realizar. O conceito de erro humano/possibilidade de falha tem-se usado [74] no lugar de erro humano/probabilidade de falha. De fato é tratado o erro humano/possibilidade de falha como um tipo de *probabilidade fuzzy*.

Neste trabalho foram usados sete termos que definem a granulação da incerteza da variável lingüística “probabilidade de falha” : *muito alta (MA), alta (A), moderada (Mod), baixa (B), muito baixa (MB), quase zero(QZ) e zero*; além de quatro termos para expressar o nível de incerteza: *baixo, moderado, mais que alto, e alto*; e cinco termos para representar a dependência entre eventos : *completa (C), alta (A), moderada (Mod), baixa (B) e zero*.

Segundo SHAW e SIMÕES [76], a quantidade de funções de pertinência em um universo de discurso (igual à quantidade de termos *fuzzy*) e seu formato são escolhidos com base na experiência, na natureza do processo, ou em entrevistas com especialistas. De modo geral esta não é uma tarefa trivial. Contudo, um número prático de conjuntos *fuzzy* lingüísticos (funções de pertinência) é algo entre 2 e 7. Quanto maior o número de conjuntos, maior é a precisão, mas a demanda computacional também é mais significativa. Por exemplo, experiências mostraram que uma mudança de 5 conjuntos triangulares para 7 aumenta a precisão em torno de uns 15%, a partir de valores maiores não há melhorias extremamente significativas .

Terceira etapa: As funções de pertinências dos termos *fuzzy* são representadas por números *fuzzy* triangulares do tipo L-R. (ver Figuras III.22 até III.29)

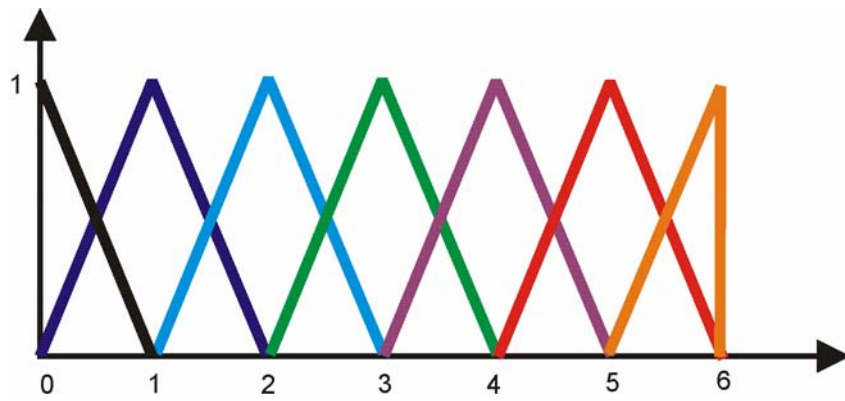


Figura III.22.-Representação das funções de pertinência para a variável linguística “probabilidade de falha”

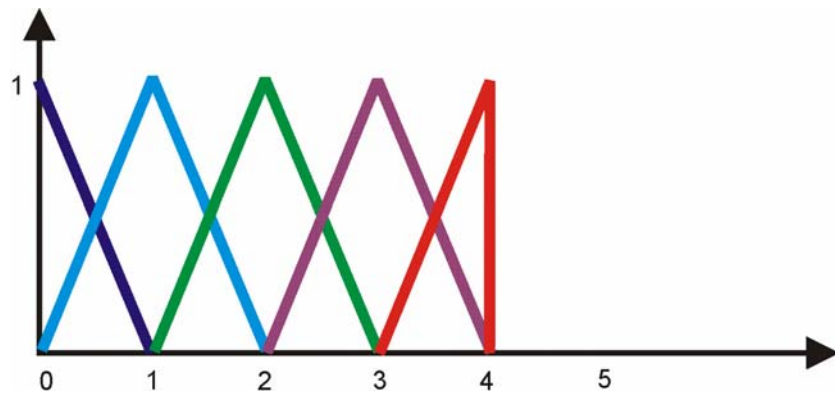


Figura III.23.- Representação das funções de pertinência para a variável linguística “nível de dependência entre tarefas”

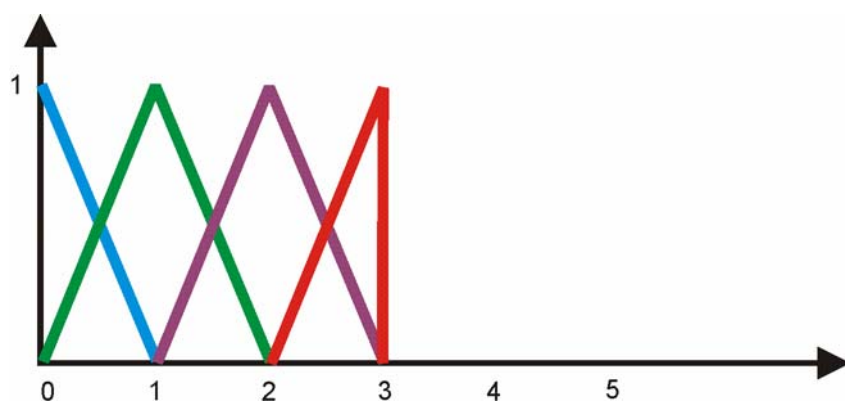


Figura III.24.- Representação das funções de pertinência para a variável linguística “nível de incerteza na estimação dos especialistas”.

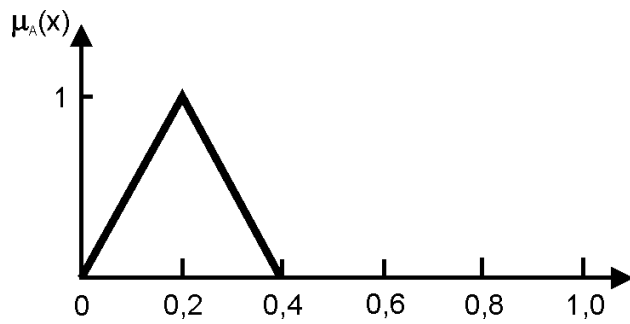


Figura III.25.- Função de pertinência para o termo nebuloso “nenhum transtorno”.

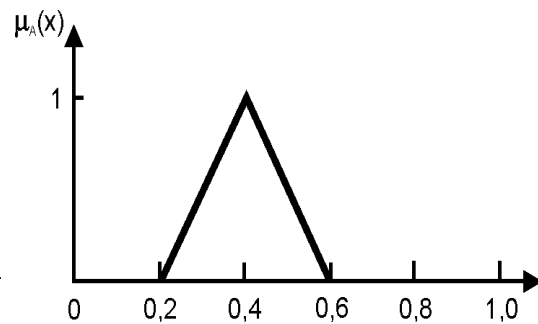


Figura III.26.- Função de pertinência para o termo nebuloso “pouco transtorno”.

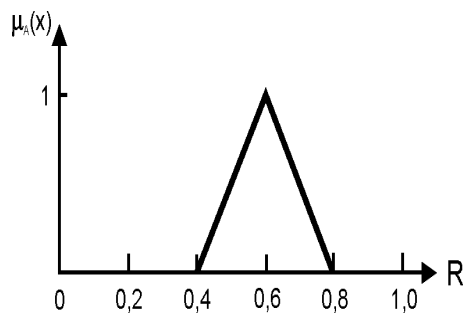


Figura III.27.- Função de pertinência para o termo nebuloso “algum transtorno”.

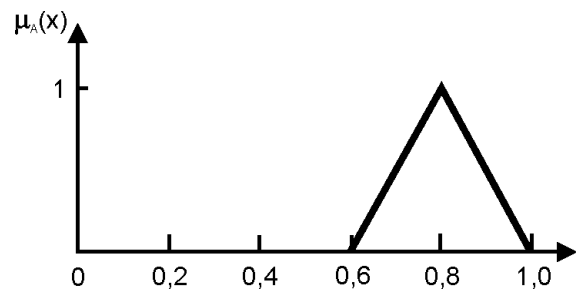


Figura III.28.- Função de pertinência para o termo nebuloso “importante transtorno”.

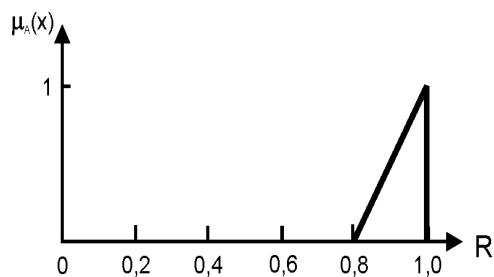


Figura III.29.- Função de pertinência para o termo nebuloso “transtorno crítico”.

Quarta etapa: Foi feito um levantamento de opiniões *fuzzy* com os especialistas, com relação às probabilidades de falha *fuzzy*, ao nível de dependência entre tarefas e ao grau de transtorno que ocasiona uma falha humana nos itens subsequentes. Estas aparecem nos Anexos 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

Na Tabela III.30, como exemplo, é apresentada a avaliação de um especialista.

Tabela III.30.- Avaliação de um especialista quanto às probabilidades de falha do inspetor no momento de executar um item do ensaio e quanto ao nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i). Itens 1 - 19.

Probabilidade de falha humana durante a execução da tarefa										Nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i)									
Itens	Esp A	Itens	Esp A	Itens	Esp A	Itens	Esp A	Itens	Esp A	Itens	Esp A	Itens	Esp A	Itens	Esp A	Itens	Esp A	Itens	Esp A
1.-	MB	3.-	Zero	9.7-	MB	15.-	Mod	17.1-	QZ	1.-	-	3.-	Zero	9.7-	C	15.-	Zero	17.1-	-
1.1	MB	4.-	MB	10.-	Zero	15.1-	QZ	17.2-	QZ	1.1	-	4.-	Mod	10.-	Zero	15.1-	-	17.2-	C
1.2	MB	5.-	QZ	11.-	Zero	15.2-	MB	17.3-	B	1.2	A	5.-	Zero	11.-	Zero	15.2-	A	17.3-	C
1.3	MB	6.-	QZ	11.1	QZ	15.3-	MB	17.4-	QZ	1.3	A	6.-	Zero	11.1	-	15.3-	C	17.4-	C
1.4	MB	7.-	QZ	11.2-	QZ	15.4-	QZ	18.-	QZ	1.4	C	7.-	Zero	11.2-	C	15.4-	C	18.-	C
1.5	MB	8.-	MB	12.-	QZ	16.-	B	18.1-	QZ	1.5	A	8.-	Zero	12.-	C	16.-	Zero	18.1-	-
1.6	MB	8.1-	QZ	13.-	QZ	Comprim	QZ	18.2-	QZ	1.6	C	8.1-	-	13.-	Zero	Comprim	-	18.2-	C
1.7	MB	8.2-	MB	13.1-	B	16.1-	QZ	19.-	QZ	1.7	A	8.2-	A	13.1-	-	16.1-	-	19.-	C
1.8	MB	8.3-	QZ	13.2-	B	16.2-	QZ			1.8	C	8.3-	C	13.2-	A	16.2-	C		
2.-	MB	8.4-	MB	13.3-	B	16.3-	QZ			2.-	Zero	8.4-	C	13.3-	Zero	16.3-	C		
2.1	MB	8.5-	QZ	13.4-	QZ	Altura	A			2.1	-	8.5-	Zero	13.4-	C	Altura	-		
2.2	MB	8.6-	QZ	14.-	Mod	16.4-	A			2.2	A	8.6-	Zero	14.-	Zero	16.4-	C		
2.3	MB	9.-	MB	14.1-	Mod	16.5-	A			2.3	Zero	9.-	C	14.1-	-	16.5-	C		
2.4	MB	9.1-	Zero	14.2-	QZ	16.6-	MB			2.4	A	9.1-	-	14.2-	Zero	16.6-	C		
2.5	MB	9.2-	Zero	14.3-	MB	16.7-	QZ			2.5	Zero	9.2-	A	14.3-	A	16.7-	C		
2.6	MB	9.3-	B	14.4-	MB	16.8-	MB			2.6	A	9.3-	C	14.4-	C	16.8-	C		
2.7	MB	9.4-	QZ	14.5-	A	16.9-	QZ			2.7	Zero	9.4-	C	14.5-	Zero	16.9-	C		
2.8	MB	9.5-	Zero	14.6-	QZ	16.10-	QZ			2.8	A	9.5-	Zero	14.6-	C	16.10-	C		
2.9	MB	9.6-	B	14.7-	QZ	17.-	B			2.9	C	9.6-	A	14.7-	C	17.-	Zero		

Quinta etapa: Transformar as expressões lingüísticas em números *fuzzy* e agregar as opiniões dos especialistas.

Tabela III.31.- Resultado da agregação de avaliações *fuzzy* feitas pelos especialistas sobre itens do procedimento de ultra-som.

Item do procedimento de ultra-som.	Probabilidade de falha <i>fuzzy</i> (a;m;b)			Nível de dependência <i>fuzzy</i> (p;q;r)		
1.- Calibração. Verificar a linearidade horizontal do aparelho.	1,98	2,98	3,98	—	—	—
2.- Calibração. Verificar a linearidade vertical do aparelho.	1,76	2,76	3,76	0	0,03	1,03
3.- Solicitar informações sobre a peça.	2,75	3,66	4,66	0,01	0,09	1,09
4.- Escolher o bloco de referência em função da espessura.	2,10	3,02	4,02	2,6	3,6	3,8
5.- Escolher o cabeçote e o ângulo.	1,41	2,35	3,35	0,82	1,79	2,54
6.- Escolher a frequência.	1,16	2,11	3,11	0,32	1,09	1,98
7.- Preparação da superfície da peça.	1,30	2,24	3,24	0,11	0,94	1,94
8.- Determinar a sensibilidade correta para a varredura.	2,50	3,50	4,50	1,02	1,96	2,73
9.- Determinar as perdas por transferência.	2,33	3,33	4,33	2,1	3,1	3,55
10.- Usar corretamente as técnicas de varredura.	2,59	3,53	4,53	0,1	0,25	1,25
11.- Determinar corretamente a área de varredura.	1,91	2,85	3,86	2,52	3,49	3,88
12.- Examinar corretamente a área de varredura.	1,85	2,85	3,85	2,93	3,93	3,96
13.- Localizar as descontinuidades no sentido longitudinal.	2,86	3,86	4,86	2,02	2,99	3,71
14.- Localizar as descontinuidades no sentido transversal.	3,69	4,69	5,27	0,58	0,87	1,73
15.- Localizar as descontinuidades na profundidade.	3,33	4,33	5,09	2,78	3,76	3,93
16.- Dimensionar as descontinuidades.	3,46	4,46	5,46	2,52	3,49	3,87
17.- Avaliar as reflexões da raiz de solda.	3,61	4,61	5,18	0,04	0,89	1,89
18.- Emitir o laudo.	2,03	3,03	4,03	2,97	3,97	3,98
19.- Preencher o relatório.	2,01	3,01	4,01	2,97	3,97	3,98

Os resultados normalizados aparecem representados na Tabela III.32. Os especialistas também estimaram que o nível de incerteza das avaliações feitas por eles foi baixo.

Tabela III.32.- Representação *fuzzy* normalizada das avaliações feitas pelos especialistas sobre os itens do procedimento.

Item do procedimento de ultrassom	Probabilidade de falha <i>fuzzy</i> (a;m;b)			Nível de dependência <i>fuzzy</i> (p;q;r)		
1.- Calibração. Verificar a linearidade horizontal do aparelho.	0,33	0,497	0,66	—	—	—
2.- Calibração. Verificar a linearidade vertical do aparelho.	0,29	0,46	0,63	0	0,0075	0,2575
3.- Solicitar informações sobre a peça.	0,46	0,61	0,78	0,0025	0,0225	0,2725
4.- Escolher o bloco de referência em função da espessura.	0,35	0,503	0,67	0,65	0,9	0,95
5.- Escolher o cabeçote e o ângulo.	0,24	0,392	0,56	0,205	0,4475	0,635
6.- Escolher a frequência.	0,19	0,352	0,52	0,08	0,2725	0,495
7.- Preparação da superfície da peça.	0,22	0,373	0,54	0,0275	0,235	0,485
8.- Determinar a sensibilidade correta para a varredura.	0,42	0,583	0,75	0,255	0,49	0,6825
9.- Determinar as perdas por transferência.	0,39	0,555	0,72	0,525	0,775	0,8875
10.- Usar corretamente as técnicas de varredura.	0,43	0,588	0,76	0,025	0,0625	0,3125
11.- Determinar corretamente a área de varredura.	0,32	0,475	0,64	0,63	0,8725	0,97
12.- Examinar corretamente a área de varredura.	0,31	0,475	0,64	0,7325	0,9825	0,99
13.- Localizar as descontinuidades no sentido longitudinal.	0,48	0,643	0,81	0,505	0,7475	0,9275
14.- Localizar as descontinuidades no sentido transversal.	0,62	0,782	0,88	0,145	0,2175	0,4325
15.- Localizar as descontinuidades na profundidade.	0,56	0,722	0,85	0,695	0,94	0,9825
16.- Dimensionar as descontinuidades.	0,58	0,743	0,91	0,63	0,8725	0,9675
17.- Avaliar as reflexões da raiz de solda.	0,6	0,768	0,86	0,01	0,2225	0,4725
18.- Emitir o laudo.	0,34	0,505	0,67	0,7425	0,9925	0,995
19.- Preencher o relatório.	0,34	0,502	0,67	0,7425	0,9925	0,995

Para se obter a comparação das probabilidades de falhas *fuzzy* de cada item ou ação humana é necessário ordenar os números *fuzzy* triangulares com relação ao máximo

grau de pertinência no vetor de pertinências . Cada item assume uma posição no ranking final de probabilidades de falhas *fuzzy*. (Ver Tabela III.33).

Tabela III.33.- Ranking dos itens do procedimento com relação às probabilidades de falha *fuzzy* .

Item do procedimento de ultra-som	Ranking
14.- Localizar as descontinuidades no sentido transversal.	1
17.- Avaliar as reflexões da raiz de solda.	0,98
16.- Dimensionar as descontinuidades.	0,95
15.- Localizar as descontinuidades na profundidade.	0,92
13.- Localizar as descontinuidades no sentido longitudinal.	0,82
3.- Solicitar informações sobre a peça.	0,78
10.- Usar corretamente as técnicas de varredura.	0,75
8.- Determinar a sensibilidade correta para a varredura.	0,74
9.- Determinar as perdas por transferência.	0,71
18.- Emitir o laudo.	0,70
4.- Escolher o bloco de referência em função da espessura.	0,64
19.- Preencher o relatório.	0,64
1.- Calibração. Verificar a linearidade horizontal do aparelho.	0,63
12.- Examinar corretamente a área de varredura.	0,60
11.- Determinar corretamente a área de varredura.	0,60
2.- Calibração. Verificar a linearidade vertical do aparelho.	0,58
5.- Escolher o cabeçote e o ângulo.	0,50
7.- Preparação da superfície da peça.	0,47
6.- Escolher a frequência.	0,44

Aplicando PARETO pode-se formular o seguinte: O 20% dos itens com maiores possibilidades de erro humano são responsáveis pelo 80% das falhas do sistema de inspeção, ou seja, os 4 primeiros itens (Localizar as descontinuidades no sentido transversal; Avaliar as reflexões da raiz de solda; Dimensionar as descontinuidades e Localizar as descontinuidades na profundidade) são os que mais aportam às falhas do sistema. Pode-se observar que estes itens estão relacionados com tarefas de busca, classificação e interpretação, isto é, com o mecanismo cognitivo do inspetor.

DONGHAN [77] considera três elementos básicos a considerar durante o tratamento da opinião dos especialistas: como representar a incerteza da informação, como combinar a incerteza da informação obtida de diferentes especialistas e como propagar essa informação através do sistema. De acordo com isto é importante fazer um estudo sobre o grau de transtorno que ocasiona uma falha humana durante o ensaio (propagação da falha através do sistema de inspeção).

Nesta etapa foi elaborado também um questionário (ver Anexo 9), com o objetivo de medir o grau de transtorno que ocasiona a falha humana num item em outros itens subseqüentes do procedimento de ultra-som.

O grau de transtorno pode ser visto como uma *variável lingüística*, relacionado a um conjunto de *termos lingüísticos*, associado a *funções de pertinência*. Os termos que definem a granulação da incerteza da variável lingüística “grau de transtorno” são: *nenhum, pouco, algum, importante e crítico*.

BUCKLEY [78] usou vários métodos para agregar as opiniões individuais, por exemplo, a média, a mediana, o operador **max**, o operador **min** e os operadores misturados. Neste caso as opiniões individuais dos especialistas foram agregadas (operação com os números *fuzzy* triangulares) através da média usando as fórmulas seguintes:

$$a_t = \sum_{j=1}^n a_{ij} / n ; \quad m_t = \sum_{j=1}^n m_{ij} / n ; \quad b_t = \sum_{j=1}^n b_{ij} / n , \quad (III.11)$$

Com ajuda deste modelo obtivemos o grau de transtorno que ocasiona a falha num item nos outros itens subseqüentes (ver Tabelas III.34 e III.35). Quando a falha de um item provoca certo grau de transtorno em outro item subseqüente podemos dizer que existe uma relação entre eles. Como esta relação ou associação pode ser representada como graus de um conjunto de pertinências vamos a estar em presença de um tipo de relação *fuzzy*.

Tabela III.34.- Matriz de relação *fuzzy* correspondente aos graus de transtornos que ocasiona a falha num item nos itens subsequentes (influencia dos itens 1 até 19 nos itens 1 até 10).

Itens	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	(1;1;1)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0,05;0,1;1,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0,25;0,35;0,5)	(0,35;0,5;0,65)	(0;0;0,2)
2	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0,75;0,95;1)	(0,65;0,85;1)	(0;0;0,2)
3	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,55;0,75;0,9)	(0,6;0,8;1)	(0,6;0,8;0,95)	(0,5;0,7;0,85)	(0,25;0,35;0,5)	(0,3;0,45;0,6)	(0,25;0,35;0,55)
4	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,15;0,2;0,4)	(0,15;0,25;0,45)	(0,2;0,25;0,4)	(0,75;0,95;1)	(0,75;0,95;1)	(0,2;0,25;0,4)
5	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,4;0,55;0,7)	(0,3;0,45;0,65)	(0,4;0,5;0,6)	(0,45;0,6;0,7)	(0,4;0,55;0,7)
6	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,2;0,3;0,5)	(0,2;0,3;0,5)	(0,25;0,35;0,55)	(0,1;0,15;0,35)
7	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,3;0,45;0,65)	(0,5;0,7;0,85)	(0,15;0,2;0,4)
8	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,45;0,6;0,7)	(0,05;0,1;0,3)
9	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0;0;0,2)
10	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)
11	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)
12	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)
13	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)
14	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)
15	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)
16	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)
17	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)
18	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)
19	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)

Tabela III.35.- Matriz de relação *fuzzy* correspondente aos graus de transtornos que ocasiona a falha num item nos itens subsequentes (influencia dos itens 1 até 19 nos itens 11 até 19).

	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	(0,05;0,1;0,3)	(0,45;0,6;0,75)	(0,55;0,7;0,8)	(0,75;0,95;1)	(0,8;1;1)	(0,6;0,8;0,9)	(0,7;0,9;1)	(0,55;0,75;0,9)	(0,3;0,4;0,55)
2	(0;0;0,2)	(0,25;0,35;0,5)	(0,2;0,25;0,4)	(0,2;0,25;0,4)	(0,2;0,25;0,4)	(0,7;0,9;0,95)	(0,75;0,95;1)	(0,8;1;1)	(0,35;0,45;0,6)
3	(0,55;0,75;0,9)	(0,25;0,35;0,5)	(0,25;0,35;0,5)	(0,45;0,6;0,7)	(0,45;0,6;0,7)	(0,25;0,35;0,5)	(0,65;0,85;0,95)	(0,6;0,8;0,9)	(0,6;0,8;0,95)
4	(0,2;0,25;0,4)	(0,2;0,25;0,4)	(0,2;0,25;0,4)	(0,2;0,25;0,4)	(0,2;0,25;0,4)	(0,2;0,25;0,4)	(0,4;0,55;0,7)	(0,7;0,9;0,95)	(0,45;0,6;0,75)
5	(0,45;0,6;0,75)	(0,6;0,8;0,9)	(0,5;0,65;0,75)	(0,5;0,65;0,75)	(0,45;0,6;0,75)	(0,5;0,7;0,8)	(0,7;0,9;1)	(0,55;0,75;0,85)	(0,3;0,45;0,6)
6	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0,1;0,15;0,35)	(0,1;0,15;0,35)	(0,1;0,15;0,35)	(0,3;0,4;0,55)	(0,2;0,35;0,55)	(0,3;0,4;0,55)	(0,1;0,2;0,4)
7	(0,15;0,2;0,4)	(0,15;0,25;0,45)	(0,15;0,25;0,45)	(0,25;0,4;0,6)	(0,3;0,45;0,65)	(0,4;0,6;0,8)	(0,25;0,4;0,6)	(0,25;0,4;0,6)	(0,1;0,15;0,35)
8	(0;0;0,2)	(0,35;0,45;0,6)	(0,4;0,55;0,7)	(0,4;0,55;0,7)	(0,45;0,6;0,75)	(0,4;0,55;0,7)	(0,45;0,6;0,8)	(0,7;0,9;0,95)	(0,3;0,4;0,55)
9	(0;0;0,2)	(0,4;0,5;0,6)	(0,15;0,2;0,4)	(0,15;0,2;0,4)	(0,15;0,2;0,4)	(0,4;0,5;0,6)	(0,4;0,55;0,75)	(0,8;1;1)	(0,25;0,35;0,45)
10	(0,25;0,35;0,45)	(0,55;0,75;0,9)	(0,35;0,5;0,7)	(0,45;0,65;0,85)	(0,35;0,5;0,7)	(0,15;0,25;0,45)	(0,3;0,45;0,65)	(0,6;0,8;0,95)	(0,3;0,4;0,55)
11	(1;1;1)	(0,65;0,85;0,9)	(0,45;0,6;0,75)	(0,45;0,6;0,75)	(0,45;0,6;0,75)	(0,25;0,35;0,5)	(0,35;0,5;0,65)	(0,5;0,65;0,8)	(0,4;0,6;0,75)
12	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,8;1;1)	(0,8;1;1)	(0,8;1;1)	(0,25;0,35;0,5)	(0,75;0,95;1)	(0,5;0,65;0,8)	(0,35;0,45;0,6)
13	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0;0;0,2)	(0,05;0,1;0,3)	(0,35;0,5;0,65)	(0,45;0,6;0,75)	(0,7;0,9;1)	(0,45;0,6;0,7)
14	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,25;0,35;0,5)	(0,5;0,7;0,85)	(0,55;0,75;0,85)	(0,75;0,95;1)	(0,45;0,6;0,7)
15	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,4;0,55;0,7)	(0,6;0,8;0,9)	(0,75;0,95;1)	(0,45;0,6;0,7)
16	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,5;0,65;0,75)	(0,75;0,95;1)	(0,55;0,7;0,8)
17	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,8;1;1)	(0,55;0,7;0,8)
18	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)	(0,65;0,85;0,95)
19	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(0;0;0,2)	(1;1;1)

Na Tabela III.36 aparecem representados os números *fuzzy* triangulares (intervalos de possibilidade) com $\alpha\text{-cut} = 0,8$ os quais representam graus de transtornos importantes ou críticos para a confiabilidade do ensaio. Na Tabela por exemplo, T_{3-5} (0,6; 0,8; 1) significa que uma falha no item 3 provoca um grau de transtorno importante com uma função de pertinência triangular de (0,6;0,8;1).

Tabela III.36.- Grau de transtorno *fuzzy* ocasionado pela falha num item.

Item i	Ti-j (Grau de transtorno que provoca uma falha no item i em j).
1	-não provoca transtornos importantes ou críticos em outros itens
2	-não provoca transtornos importantes ou críticos em outros itens
3	-não provoca transtornos importantes ou críticos em outros itens
4	-não provoca transtornos importantes ou críticos em outros itens
5	T_{3-5} (0,6; 0,8; 1)
6	T_{3-6} (0,6; 0,8; 0,95)
7	-não provoca transtornos importantes ou críticos em outros itens
8	T_{2-8} (0,75; 0,95; 1) ; T_{4-8} (0,6; 0,8; 0,9)
9	T_{2-9} (0,65; 0,85; 1) ; T_{3-9} (0,6; 0,8; 0,95) ; T_{4-9} (0,75; 0,95; 1)
10	-não provoca transtornos importantes ou críticos em outros itens
11	-não provoca transtornos importantes ou críticos em outros itens
12	T_{5-12} (0,6; 0,8; 0,9) ; T_{11-12} (0,65; 0,85; 0,9)
13	T_{12-13} (0,8; 1; 1)
14	T_{1-14} (0,75; 0,95; 1) ; T_{12-14} (0,8; 1; 1)
15	T_{1-15} (0,8; 1; 1) ; T_{12-15} (0,8; 1; 1)
16	T_{1-16} (0,6; 0,8; 0,9) ; T_{2-16} (0,7; 0,9; 0,95)
17	T_{1-17} (0,7; 0,9; 1) ; T_{2-17} (0,75; 0,95; 1) ; T_{3-17} (0,65; 0,85; 0,95) T_{5-17} (0,7; 0,9; 1) ; T_{12-17} (0,75; 0,95; 1) ; T_{15-17} (0,6; 0,8; 0,9)
18	T_{2-18} (0,8; 1; 1) ; T_{3-18} (0,6; 0,8; 0,9) ; T_{4-18} (0,7; 0,9; 0,95) T_{8-18} (0,7; 0,9; 0,95) ; T_{9-18} (0,8; 1; 1) ; T_{10-18} (0,6; 0,8; 0,95) T_{13-18} (0,7; 0,9; 1) ; T_{14-18} (0,75; 0,95; 1) ; T_{15-18} (0,75; 0,95; 1) T_{16-18} (0,75; 0,95; 1) ; T_{17-18} (0,8; 1; 1)
19	T_{3-19} (0,6; 0,8; 0,95) ; T_{18-19} (0,75; 0,95; 1)

Com as opiniões dos especialistas agregadas obtivemos uma informação que serve como dado de entrada para a árvore de falhas *fuzzy* a ser construída. Tanto as probabilidades de falha *fuzzy*, quanto o nível de dependência entre tarefas e o grau de transtorno que ocasiona a falha em um item em outros itens, são causas de uma possível falha em qualquer item do procedimento.

Sexta etapa: Construir a árvore de falha *fuzzy* do inspetor.

A árvore de falhas é um diagrama lógico que consiste em um evento topo e uma estrutura delineando os caminhos pelos quais o evento topo pode acontecer. Em nosso caso podemos representar 19 sub eventos topos e um evento topo final que representa a falha total do sistema de ensaio. A árvore de falhas é analisada para determinar que combinações de eventos terminais (chamados *cut set*) são suficientes para causar o evento topo (S) e a possibilidade de ocorrência deste evento.

Nas figuras desde III.37 até III.56 aparecem representadas as possíveis combinações lógicas de eventos (1 até 19) tipo OR que causam uma possível falha no item avaliado. Nas figuras PF representa a probabilidade de falha do item em questão, Dij representa o nível de dependência entre um item e seu antecedente, e, T_{i-j} é o transtorno ocasionado num item j devido a uma falha durante a execução do item i

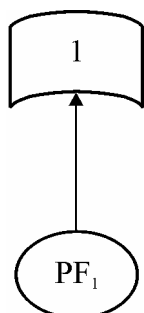


Figura III.37.- Evento que causa falha no item 1.

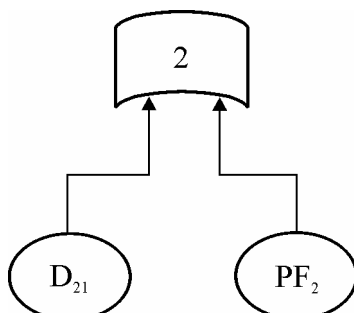


Figura III.38.- Combinações de eventos que causam falha no item 2.

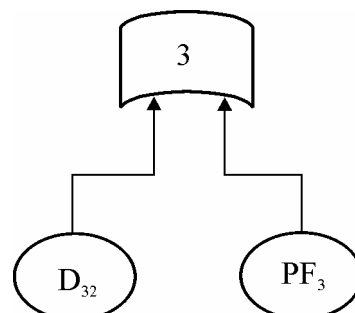


Figura III.39.- Combinações de eventos que causam falha no item 3.

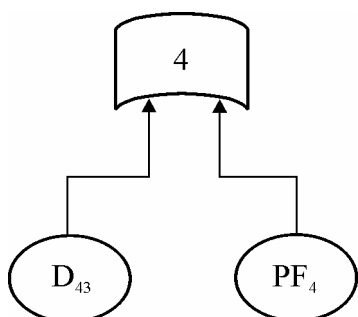


Figura III.40.- Combinações de eventos que causam falha no item 4.

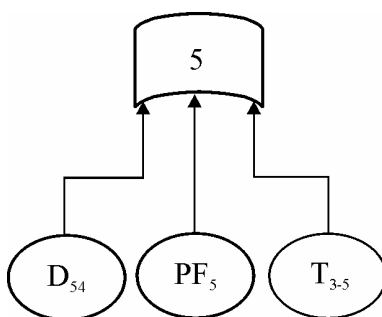


Figura III.41.- Combinações de eventos que causam falha no item 5.

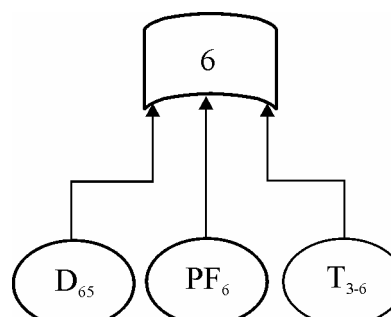


Figura III.42.- Combinações de eventos que causam falha no item 6.

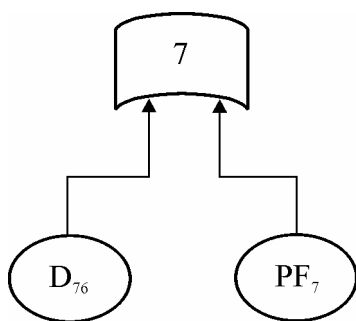


Figura III.43.-
Combinações de eventos
que causam falha no item
7.

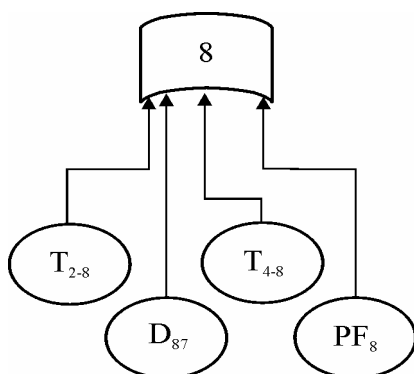


Figura III.44.- Combinações de
eventos que causam falha no
item 8.

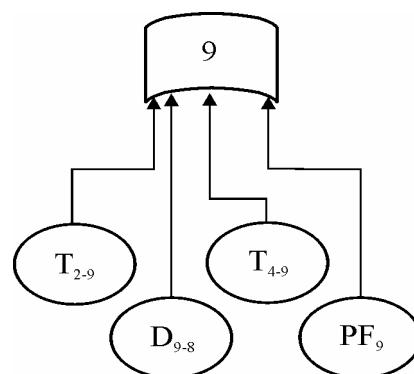


Figura III.45.- Combinações de
eventos que causam falha no
item 9.

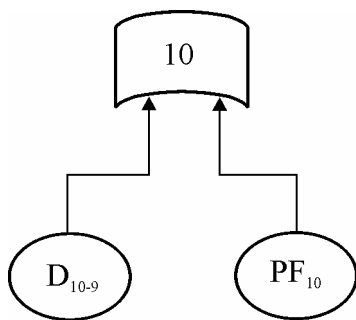


Figura III.46.-
Combinações de eventos
que causam falha no item
10.

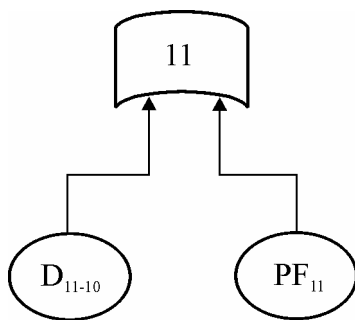


Figura III.47.-Combinações de
eventos que causam falha no
item 11.

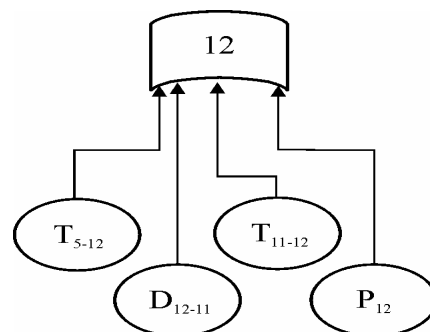


Figura III.48-Combinações de
eventos que causam falha no
item 12.

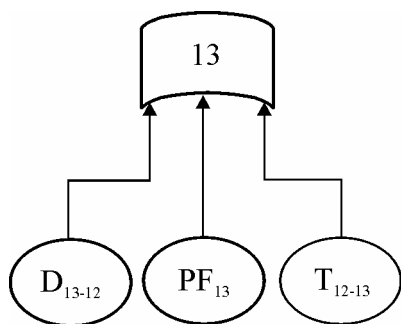


Figura III.49.- Combinações de eventos
que causam falha no item 13.

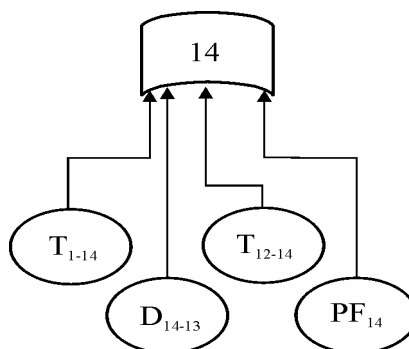


Figura III.50.- Combinações de eventos
que causam falha no item 14.

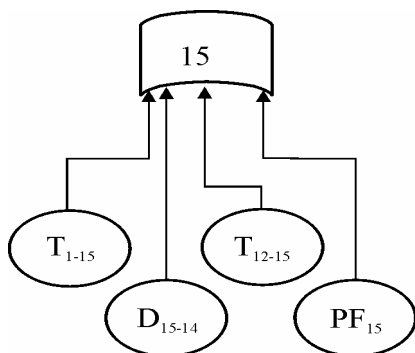


Figura III.51.- Combinações de eventos que causam falha no item 15.

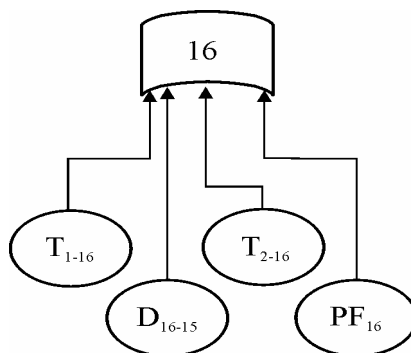


Figura III.52.- Combinações de eventos que causam falha no item 16.

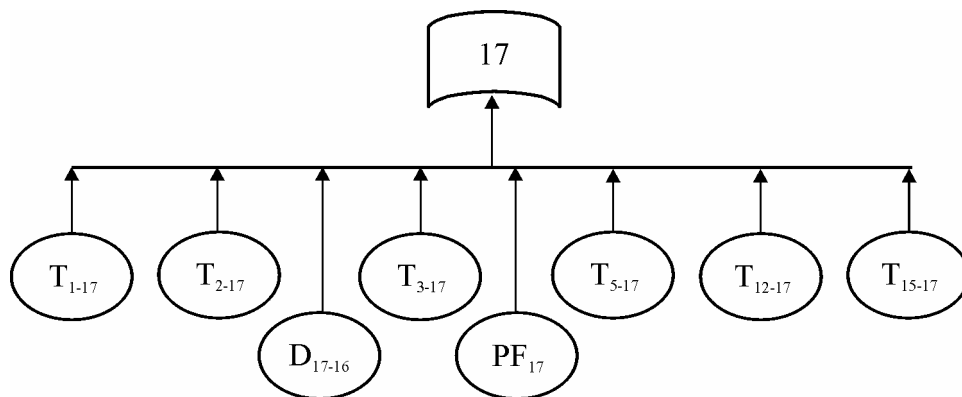


Figura III.53.- Combinações de eventos que causam falha no item 17.

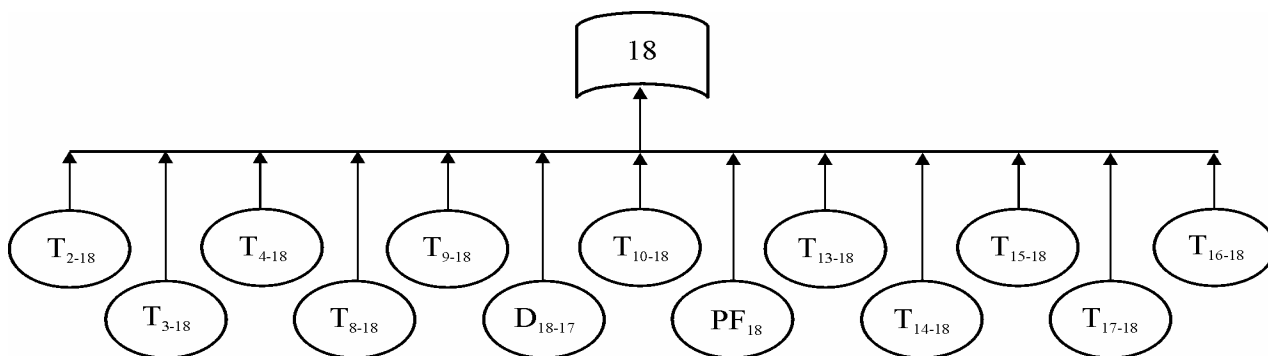


Figura III.54- Combinações de eventos que causam falha no item 18.

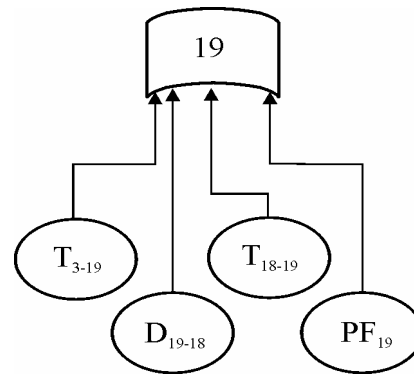


Figura III.55.- Combinações de eventos que causam falha no item 19.

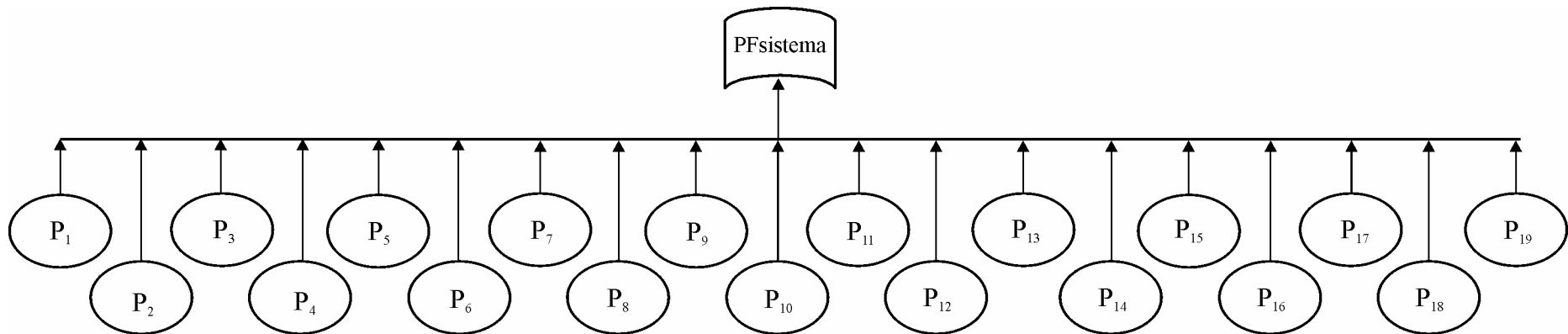


Figura III.56.- Árvore de falha *fuzzy* com estrutura lógica tipo OR representando a combinação de eventos que podem ocasionar possíveis falhas humanas durante o ensaio.

Sétima etapa: Cálculo da probabilidade de falha *fuzzy* do inspetor.

A seqüência de tarefas que executa o inspetor durante o ensaio pode ser considerado como um sistema de operações em série. Em termos de probabilidades de falha, para um sistema em série, temos vários autores tais como KRISHN, SINGER, CHENG e BOWLES [79, 80, 81,82] entre outros que usaram a seguinte expressão:

$$P_{\text{sistema}} = [1 - (1 - P_1) \otimes (1 - P_2) \otimes (1 - P_n)] \quad (\text{III.12})$$

onde, P_1 , P_2 e P_n , são as probabilidades de falha humana durante a execução dos itens 1,2...n.

BOWLES em [82] empregou a equação III.12 e argumenta que pode ser analisada tratando cada uma das probabilidades de falha como uma probabilidade *fuzzy* ou como um valor lingüístico.

De acordo com KAUFMANN e GUPTA em [83] as operações aritméticas *fuzzy* de subtração e multiplicação de números *fuzzy* triangulares podem ser expressadas como segue:

Subtração de números *fuzzy* triangulares:

$$(1, 1, 1) \ominus (a_2, b_2, c_2) = (1-c_2, 1-b_2, 1-a_2) \quad (\text{III.13})$$

Multiplicação de números *fuzzy* triangulares:

$$(a_1, b_1, c_1) \otimes (a_2, b_2, c_2) = (a_1 \otimes a_2, b_1 \otimes b_2, c_1 \otimes c_2) \quad (\text{III.14})$$

O modelo quantitativo da árvore de falha *fuzzy* vai ser:

$$\begin{aligned} P_1 &= (1 - (1 - PF_1)) \\ P_2 &= (1 - (1 - PF_2) * (1 - D_{21})) \\ P_3 &= (1 - (1 - PF_3) * (1 - D_{32})) \\ P_4 &= (1 - (1 - PF_4) * (1 - D_{43})) \\ P_5 &= (1 - (1 - PT_{3-5}) * (1 - PF_5) * (1 - D_{54})) \\ P_6 &= (1 - (1 - PT_{3-6}) * (1 - PF_6) * (1 - D_{65})) \\ P_7 &= (1 - (1 - PF_7) * (1 - D_{76})) \\ P_8 &= (1 - (1 - PT_{2-8}) * (1 - PT_{4-8}) * (1 - PF_8) * (1 - D_{87})) \\ P_9 &= (1 - (1 - PT_{2-9}) * (1 - PT_{4-9}) * (1 - PF_9) * (1 - D_{98})) \\ P_{10} &= (1 - (1 - PF_{10}) * (1 - D_{10-9})) \\ P_{11} &= (1 - (1 - PF_{11}) * (1 - D_{11-10})) \\ P_{12} &= (1 - (1 - PT_{5-12}) * (1 - PT_{11-12}) * (1 - PF_{12}) * (1 - D_{12-11})) \\ P_{13} &= (1 - (1 - PT_{12-13}) * (1 - PF_{13}) * (1 - D_{13-12})) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{14} &= (1 - (1 - PT_{1-14}) * (1 - PT_{12-14}) * (1 - PF_{14}) * (1 - D_{14-13})) \\
P_{15} &= (1 - (1 - PT_{1-15}) * (1 - PT_{12-15}) * (1 - PF_{15}) * (1 - D_{15-14})) \\
P_{16} &= (1 - (1 - PT_{1-16}) * (1 - PT_{2-16}) * (1 - PF_{16}) * (1 - D_{16-15})) \\
P_{17} &= (1 - (1 - PT_{1-17}) * (1 - PT_{2-17}) * (1 - PT_{3-17}) * (1 - PT_{5-17}) * (1 - PT_{12-17}) * (1 - PT_{15-17}) * (1 - PF_{17}) * (1 - D_{17-16})) \\
P_{18} &= (1 - (1 - PT_{2-18}) * (1 - PT_{3-18}) * (1 - PT_{4-18}) * (1 - PT_{8-18}) * (1 - PT_{9-18}) * (1 - PT_{10-18}) * (1 - PT_{13-18}) * (1 - PT_{14-18}) * (1 - PT_{15-18}) * (1 - PT_{16-18}) * (1 - PT_{17-18}) * (1 - PF_{18}) * (1 - D_{18-17})) \\
P_{19} &= (1 - (1 - PT_{3-19}) * (1 - PT_{18-19}) * (1 - PF_{19}) * (1 - D_{19-18}))
\end{aligned}$$

$$P_{\text{sistema}} = (1 - (1 - P_1) * (1 - P_2) * (1 - P_3) * (1 - P_4) * (1 - P_5) * (1 - P_6) * (1 - P_7) * (1 - P_8) * (1 - P_9) * (1 - P_{10}) * (1 - P_{11}) * (1 - P_{12}) * (1 - P_{13}) * (1 - P_{14}) * (1 - P_{15}) * (1 - P_{16}) * (1 - P_{17}) * (1 - P_{18}) * (1 - P_{19})).$$

Sendo que $1 = (1;1;1)$

Os eventos topos mais importantes são os que estão relacionados com a localização das descontinuidades no sentido longitudinal, transversal e na profundidade (detectabilidade) assim como com o dimensionamento das descontinuidades (eventos 13, 14, 15, 16 e 17).

Como resultado dos cálculos obtivemos que,

$$\begin{aligned}
P_{13} &= (0,95;1;1); P_{14} = (0,98;1;1); P_{15} = (0,995;1;1); P_{16} = (0,98;0,99;0,99) \text{ e,} \\
P_{17} &= (0,99;1;1)
\end{aligned}$$

Se conclui que as probabilidades de erro do inspetor durante a execução do ensaio por ultra-som usando o procedimento PR-011 (baseado nas normas ASME – Sec. V, DIN 54120, DIN 54122 e BS-4331) são muito altas e que a incerteza dessa probabilidade é muito baixa pois o gráfico é “singleton”. As probabilidades de falhas destes eventos aparecem representadas nas figuras III.57, III.58, III.59, III.60 e III.61.

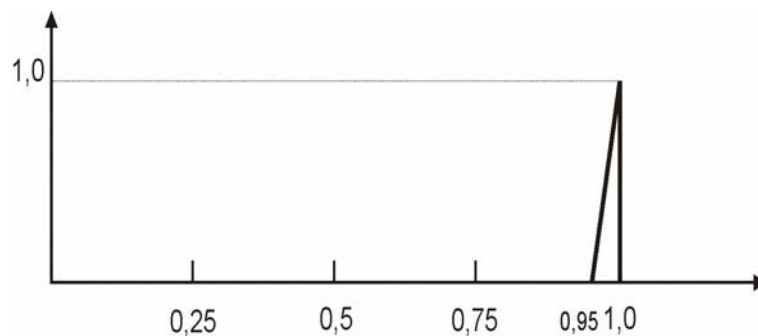


Figura III.57- Probabilidade de falha do evento 13: “Localizar as descontinuidades no sentido longitudinal”.

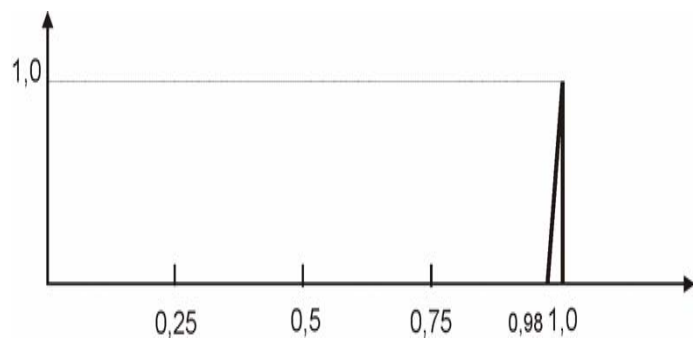


Figura III.58- Probabilidade de falha do evento 14: “Localizar as descontinuidades no sentido transversal”.

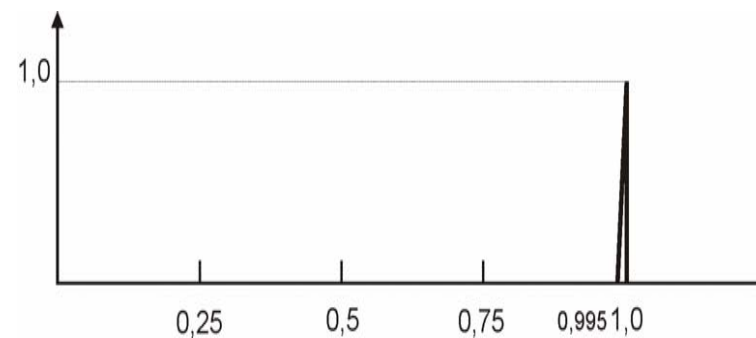


Figura III.59- Probabilidade de falha do evento 15: “Localizar as descontinuidades na profundidade”.

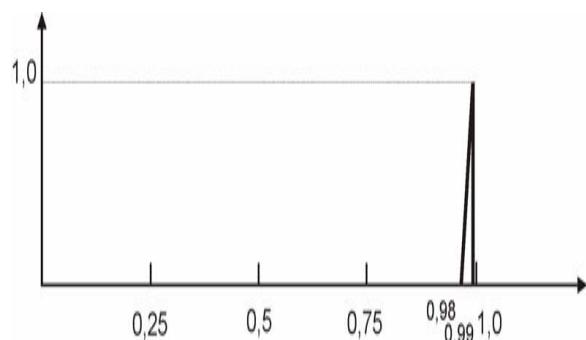


Figura III.60- Probabilidade de falha do evento 16: “Dimensionar as descontinuidades”.

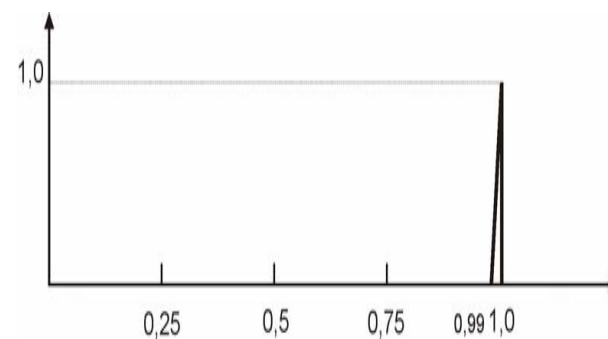


Figura III.61- Probabilidade de falha do evento 17: “Avaliar as reflexões da raiz de solda”.

V.- CONCLUSÕES

Neste trabalho é proposta a utilização de uma metodologia *fuzzy* para a avaliação da confiabilidade humana do inspetor de ensaios não destrutivos do tipo ultra-som. Inicialmente, trata-se dos atributos de confiabilidade humana, os PSFs, enquadrando-os em uma escala de termos lingüísticos. A seguir, faz-se uma proposta para a agregação desses atributos. Propõe-se também, dentro desse modelo, avaliar a confiabilidade humana a partir da criação de um padrão de qualidade do ensaio.

Esse método substitui as interpretações probabilísticas da confiabilidade humana por medidas de possibilidade. Essa abordagem permite tratar de forma matematicamente sólida medidas subjetivas, sujeitas a incertezas, obtidas a partir da opinião pessoal de especialistas no tema. É uma abordagem original e inédita na área de ensaios não destrutivos. Assim, é possível construir a partir do conhecimento elicitado uma árvore de falhas que pode ser analisada em busca de configurações com menor possibilidade de erro.

Durante o exaustivo trabalho de pesquisa bibliográfica do tema, foram pesquisados inúmeros textos sobre *lógica fuzzy* aplicada à confiabilidade de ensaios não destrutivos, não sendo encontrado, nada parecido com o modelo aqui proposto.

As pesquisas mostram que os inspetores podem estar bem treinados para desempenhar ensaios sistemáticos, porém nossos resultados indicam que os processos mentais e cognitivos em tarefas de END (elementos de visão, busca, percepção, classificação, interpretação e tomada de decisão) vão influenciar de forma importante na confiabilidade do ensaio. Por tal motivo propõe-se, que as instituições usem estratégias de treinamento dirigidas fundamentalmente ao uso adequado de procedimentos e ao desenvolvimento do mecanismo cognitivo do inspetor através de testes psicológicos existentes para isto.

A proposta de que os treinamentos, as práticas e mesmo os exames de certificação deveriam acontecer no campo para criar o ambiente mais adequado à realidade (barulho, calor, interação com processos, vibrações, etc) daria mais rigor ao processo de certificação de inspetores.

Em virtude dos resultados obtidos durante o processo de recertificação de alguns inspetores de nível 2, descobrimos que os testes são geralmente mal feitos. Levantamos dados que demonstram a existência de indícios de que a confiabilidade é mais baixa do que a tratada pelos funcionários que vendem seus serviços apoiados num Sistema de Qualidade baseado nas normas ISO 9000 onde os laboratórios , equipamentos e inspetores estão certificados pelas normas vigentes.

Aceitando que o procedimento PR-011 é o melhor existente quando descontadas as falhas humanas cujos efeitos são impossíveis de evitar, então temos que criar salvaguardas tais como repetir mais vezes o procedimento ou escolher diferentes inspetores para refazer o teste.

Observações práticas revelaram a baixa confiabilidade do inspetor durante o ensaio, mas também foi matematicamente demonstrada a baixa confiabilidade da interação inspetor - procedimento PR-011, devido a que as probabilidades de erro do inspetor durante a execução do ensaio por ultra-som usando este procedimento são muito altas e a incerteza dessa probabilidade é muito baixa.

VI.- RECOMENDAÇÕES PARA O TRABALHO FUTURO.

Recomenda-se como continuação desse trabalho, fazer uma análise mais aprofundada nos itens do procedimento do ensaio por ultra-som relacionados com a localização das descontinuidades (no sentido longitudinal, transversal e na profundidade) e o dimensionamento das mesmas, visando prever alterações nas tarefas de modo que as mesmas sejam menos suscetíveis a falha humana.

O QIPE usado nesta tese é um aspecto que deveria se estudar melhor com o objetivo de responder a uma avaliação subjetiva dos especialistas mas consistente.pode ser melhor trabalhado.

O aprofundamento da forma de extração do conhecimento dos especialistas, a partir das técnicas de entrevista mais modernas poderá ser o alvo de futuros trabalhos.

O estudo da probabilidade de erro humano durante a execução do procedimento sob a presença de determinados PSFs, permitirá avaliar melhor a complexidade do sistema de ensaio.

O modelo aqui proposto também pode ser adaptado para aplicação nos processos de seleção e escolha de inspetores.

VI. BIBLIOGRAFIA.

- 1.- SANTIN, J. L., *Ultra-Som. Técnica e Aplicação*. 1ed. Rio de Janeiro, ed. Qualitymark.. 1996.
- 2.- ISSO/IEC GUIA 25., *General Requirements for the competence of calibration and testing laboratories*. 1999.
- 3.- ASME., *Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, Appendix VIII*., 2001.
- 4.- National Transportation Safety Board., *Report #N75B/AAR-98/01*., 1998.
- 5.- National Transportation Safety Board., *Report #NTSB/AAR-90/06*. 1990.
- 6.- ISO 9712:1999, *Nondestructive testing – Qualification and certification of personnel*. 1999
- 7.- DC-001., *Procedimento para a Qualificação e Certificação de pessoal em ensaios não destrutivos. Documento complementar No 1. SEQUI/QDOC. Cód. A 451*, 1990.
- 8.- SANTOS., V., et al., “Resultados de auditoria em Serviços de END durante paradas de manutenção e construções e montagem”. *COTEQ 6ta Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*., 19-21 de Agosto, Bahia Othon Palace, Salvador, Brasil, 2002.
- 9.- SWAIN, A.D., GUTTMANN, H.E., *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications* , NUREG/CR-1278, USNRC, 1983.
- 10.- HOLLNAGEL, E., *Cognitive Reliability and Error Analysis Method – CREAM*, 1 ed., Elsevier Science, Oxford, England. 1998
- 11.- RASMUSSEN, J., *Learning from experience? How? Some research issues in industrial risk management*, Ed. Octares/Enterprises, Marseille, 1990.
- 12.- HOLLNAGEL, E., *Cognitive Reliability and Error Analysis Method*, Elsevier Science, Oxford, England, 1998.
- 13.- FUJITA, Y., “ Human Reliability Analysis: A Human Point of View”, *Reliability Engineering and System Safety*, Ed. Elsevier Applied Science, v.. 38, 1992.
- 14.- SWAIN, A. D., “Human Reliability Analysis: need, status, trends and limitations”. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 29, n. 3, pp. 301-313.
- 15.- WHALLEY, S. P., *The use of Human Reliability in Risk Studies*, ABB Impel Ltd. 1983.

- 16.- EMBREY, D.E., “ Human Error”, *Sigtto Information Paper*, N° 8, 1990.
- 17.-KIM, I.S., “Human reliability analysis in the man-machine interface design review”. *Annals of Nuclear Energy*, v. 28. pp.1069-1081., 2001.
- 18.- PROVAN, J.W., *Probability fracture mechanics and reliability*, Aeronautics Industry Press. 1989.
- 19.- SILK, M.G., “Flaw size distribution in pressure vessels and flaw detection probabilities in NDT”, *British Journal of NDT*, v. 33. n. 10. pp. 491-494, 1996.
- 20.- MARSHALL, W., “*An assessment of the integrity of PWR pressure vessels*”, First report of a study group under the chairmanship of Dr. W. Marshall, London, 1976.
- 21.- DIMITRIJEVIC, V., et al, “Flaw distribution and use of ISI data in PRV integrity valuations”, *ASME PVP-v. .251*. pp.75-80, 1993.
- 22.- NOCKEMANN, C., et al, “*Metric for Reliability Measurement with special focus on Applications Parameters*”, In: 15 th WCNDT Roma , 2000.
- 23.-WAITES, C., et al, “*The Current Status of Performance Demonstration and Evaluation Developments*” In: ECNDT, v. 3. n. 7, Copenhagen 26-29 May 1998.
- 24.- NOCKEMANN, C. M., et al, “*Strategies of Validation in General Testing Compared to Experience in NDE*” In: European–American Workshop Determination of Reliability and Validation Methods of NDE, June 18-20, Berlin, Germany, 1997.
- 25.- NOCKEMANN, C. M., et al, “*Reliability in NDT: Application of the ROC-Method to Radiographic and Ultrasonic Testing*” In: ASNT Fall Conference, Chicago, IL, USA, Paper Summaries, pp 244, 1992.
- 26.-AIEKIEV A I, MIHOVSKI M, “*Human Reliability in Ultrasonic Inspection*” In: 15 th WCNDT Roma 2000.
- 27.- NOCKEMANN, C. M., et al, “*Human Factors: The NDE Reliability of Routine Radiographic Film Evaluation*” , In: 15 th WCNDT, Roma, 2000.
- 28.- HARRIS, D., *Effect of Decision Making on Ultrasonic Examination Performance* , TR-100412, EPRI, 1992.
- 29.- McGARTH, B., *Programme For The Assesment of NDT in Industry*, AEA Technology, 1999.

- 30.- BIÈTH, M et al “*Final results of the PISC III Round Robin Test on Steam Generator Tube Inspection*”, In: First International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Amsterdam, Netherlands, 1998.
- 31.- NOCKEMANN, C. M., “*Basic Ideas of the American-European Workshops 1997 in Berlin and 1999 in Boulder*”, In: 15 th WCNDT, Roma, 2000.
- 32.- MATTEW, J. G., “*Applications Parameters – A definition and Their Role in NDE Reliability*” In 15th WCNDT, Roma, 2000.
- 33.- CRUTZEN, S et al “*Compilation of NDE effectiveness data. Final issue.*”, SINTAP Task 3.4 Final Report, European Commission Joint Research Centre. March, 1999
- 34.- 2nd American-European Workshop on NDE Reliability, in Boulder, Colorado, September 21-24, 1999
- 35.- STEPHENS, H. M., “*NDE Reliability – Human Factors – Basic Considerations*” In 15 th WCNDT, Roma, 2000.
- 36.- CORNWELL, I et al, “Towards automated interpretation of ultrasonic NDT data” *NDT&E International*, v. 32, pp. 101-107., 1999.
- 37.- LLATA, J.R. et al, “Fuzzy expert system with double knowledge base for ultrasonic classification” *Expert Systems with Applications*, v. 20, pp. 347-355., 2001.
- 38.- BETTAYEB, F., “*The Artificial Intelligence in Service of Ultrasonic Inspection Reliability*” In: 15th WCNDT, Roma, 2000
- 39.- KUMUDHA, S. et al, “Application Of Artificial Neural Network And Fuzzy Logic For Nondestructive Testing In Machining”. *Trends in NDE Science & Technology*; Proceedings of the 14th World Conference on Non-Destructive Testing, New Delhi, v.3, pp. 1867 – 1870, 8-13 December 1996.
- 40.- CHEN, G. H., “Study on the application of fuzzy theory to flaw quality category assesment” , *Nondestructive testing*, v. 20. n. 2, pp. 39-40, 1998.
- 41.-COX. E., *The Fuzzy Systems Handbook*. Boston: AP Professional, 1994.
- 42.- KLIR G.G., YUAN, B., *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall; 1995.
- 43- COX, E., *Fuzzy Logic for bussiness and Industry* 1994.

- 44.- COSENZA, C., *Ementa de Lógica Fuzzy, Curso de Introdução à Fuzzy Set Theory*, COPPE/PEP/UFRJ, 2003.
- 45.- KOSKO, B., *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992.
- 46.-ZADEH, L., “Fuzzy Logic” *IEEE Computer*, 1988.
- 47.-ROSS, T.J., *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. New York Cox L and Morris JM, editors McGraw-Hill, Inc 1995.
- 48.- OLIVEIRA, J., et al, *Lógica Difusa. Aspectos práticos e aplicações*. Editora Interciência Ltda. Rio de Janeiro, 1999.
- 49.- RASMUSSEN, J., *Major accident prevention: What is the basic research issue?* In: Safety and Reliability, eds: Lydersen, Hamsen & Sandtorv, Balkema, Rotterdam, n2: pp.739-740, 1998.
- 50.- JONHSON, C., Why human error modelling has failed to help system development. In: *Interacting with Computers*, v. 11, pp. 517-524., 1999.
- 51.- KAI YUAN CAI, *Introduction to Fuzzy Reliability*. 1996
- 52.-ONISAWA, T., An application of fuzzy concepts to modelling of reliability analysis, *Fuzzy Sets and Systems*, v. 37. pp. 87-103, 1990.
- 53.- HARRIS, D., *Effect of Decision Making on Ultrasonic Examination Performance*, TR-100412, EPRI, 1992.
- 54.- DRURY, C. G., Human Factors Good Practices in Fluorescent Penetrant Inspection, *The Human Factors in Aviation Maintenance and Inspection (HFAMI)*, Web Pag. <http://hfskyway.faa.gov/document.htm>, 25 May 2000
- 55.- ZADEH, L., Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes.,*IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, v. SMC-3, pp. 28-44, 1973.
- 56.- KAI YUAN CAI et al, Posbist reliability behaviour of typical systems with two types of failure., *Fuzzy Sets and Systems*, v. 43 , pp.17-32., 1991.
- 57.-KAI YUAN CAI et al, Fuzzy variables as a basis for a theory in fuzzy reliability in the possibility context., *Fuzzy Sets and Systems*, v. 42, pp.. 145-172, 1991.
- 58.- PR-011: *Ultra-som. Inspeção em Soldas. Procedimento SEQUI/QDOC*, 1993.
- 59.- EN 473:1993., *Qualification and Certification of NDT personnel*. 1993.

- 60.-BELCHIOR, A. D., *Um modelo Fuzzy para Avaliação da Qualidade de Software.*, Tese de D.Sc., COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil, 1997.
- 61.- NBR Normas ISO:9000: *Sistema de Gestão da Qualidade. Princípios fundamentais e vocabulário.* 2000
- 62.-MARTINO, J.P., *Technological Forecasting for Decision Making*, Elsevier, New York, 1983.
- 63.-PREBLE, J. F., “The selection of Delphi panels for strategic planning purposes”, *Strategic Management Journal*, v. 5, pp. 157-170, 1984.
- 64.- TAYLOR, JUDD., “Delphi method applied to turismo”, In: Wittis, Moutinho, L Eds, *Tourism Marketing and Management Handbook*, Prentice Hall, New York, pp. 95-99, 1988.
- 65.-HERRERA, F.,VERDEGAY, J. L, “Linguistic Assesments in group decision”, *Proc. of First European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies*, Aachen, pp.941-948, 1993
- 66.- LEWIS, E. E., *Introduction to Reliability Engineering*, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, 1987.
- 67.- PEDRYCZ, W., GOMIDE, F., *An Introduction to Fuzzy Sets. Analysis and Design*, London, England, 1998.
- 68- DUBOIS, D., PRADE, H., Operation on fuzzy numbers, *International Journal of Systems Science*, v. 9, pp. 613-626, 1978.
- 69.- ZIMMERMANN, H. J.,*Fuzzy Set Theory and its application* Kluwer-Nijhoff publishing. Boston-Dordrecht-Lancaster, USA, 1988.
- 70.- PEDRYCZ W, “Why triangular membership functions?”, *Fuzzy Sets and Systems*, v. 64, pp 21 – 30, 1994.
- 71.- HIS-MEI-HSU, CHEN-TUNG-CHEN, “Aggregation of fuzzy opinions under group decision making”. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 79, pp. 279-285., 1996.
- 72.-DOMECH J.M, GUIMARÃES A.S, XEXÉO G.B., “Modelo fuzzy para avaliação da confiabilidade humana do inspetor de ensaio não destrutivo tipo ultra – som”. *3rd Panamerican Congress of NDT*, Rio de Janeiro, Junho 2003.

- 73.- PARETO, .*Vida de Pareto*, Texto retirado do site na Internet <http://erc.msh.org/quality/pstools/pspareto.cfm>, May 2003.
- 74.-ONISAWA, T., “An aproach to human reliability in man-machine system using error possibility”, *Fuzzy Sets and Systems*, 27, pp.87-103, 1988.
- 75.- ONISAWA, T., KRISHNA, B., “Use of Fuzzy Sets Theory” In: *New Trends in System Reliability Evaluation*, ed. K.B. Misra, Elsevier Science Publishers, 1993.
- 76.- SHAW, I. S., SIMÕES M.G., *Controle e Modelagem Fuzzy*, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, FAPESP, 1999.
- 77.-DONGHAN, YU et al, “Combination and evaluation of experts opinions characterized in terms of fuzzy probabilities”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 27, pp.713-726, 2000.
- 78.- BUCKLEY, J. J., “The multiple judge, multiple criteria ranking problem: A fuzzy set approach”, *Fuzzy Sets and Systems*, v.13, pp.25-37, 1984.
- 79.- KRISHN, B.M., GUNTER, G. W., “ A new method for fuzzy fault tree analysis”, *Microelectronic Reliability*, v. 29, n. 2, pp.195-216, 1989.
- 80.- SINGER, D., “Fault Tree Analysis based on fuzzy logic”, *Computers chem. Engng.*, v. 14, n. 3, pp. 259-266, 1990.
- 81.- CHING-HSUE CHENG ., DON-LIN MON., “Fuzzy System Reliability Analysis by interval of confidence”, *Fuzzy Sets and Systems*, v. 56, p. 29-35, 1993.
- 82.- BOWLES, J.,COLON, E.P., “Application of Fuzzy Logic to Reliability Engineering”, *Proceedings of the IEEE*, v. 83, n. 3, pp. 435-449, 1995.
- 83.- KAUFMANN, A., GUPTA, M.M., *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, North-Holland, Amsterdam, 1988.

ANEXOS

ANEXO 1.- Questionário de Identificação do Perfil de especialista (QIPE) para especialistas de ultra-som.

Questão	Itens	Peso
Marque sua experiência na área de ultra-som.	Especialista de nível III Especialista de nível II Especialista de nível I Professor (universitário) na área de ultra-som. Professor (técnico) Pesquisador	1 0,9 0,7 0,8 0,5 0,7
Já participou de eventos ou congressos? De quantos?	Nenhum Entre 1 e 2 Entre 3 e 7 Maior que 7 _____	0 0,3 0,75 1
Já elaborou quantos tipos de procedimentos?	Nenhum Entre 1 e 2 Entre 3 e 7 Maior que 7 _____	0 0,5 0,75 1
Já qualificou quantos procedimentos?	Nenhum Entre 1 e 2 Entre 3 e 7 Maior que 7 _____	0 0,5 0,9 1
Como você classificaria seu entendimento sobre o ensaio por ultra-som?	Excelente Bom Médio Baixo Nenhum	1 0,9 0,6 0,3 0
Marque a opção que melhor classifica seu grau de escolaridade	Inspetor com doutorado ou livre docência Inspetor com mestrado Inspetor com especialização Inspetor com 3er grau universitário Inspetor com 2do grau Especialista não inspetor	1 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5
Tem ministrado cursos? Quantos?	Nenhum Entre 1 e 2 Entre 3 e 7 Maior que 7 _____	0 0,5 0,9 1
Quantos anos de experiência como inspetor?	Nenhum Entre 1 e 5 Entre 5 e 10 Entre 10 e 15 Mais de 15 _____	0 0,3 0,7 0,9 1

ANEXO 2.- Questionário para determinar o nível de importância de cada atributo de confiabilidade.

Prezado inspetor:

O seguinte questionário forma parte de uma pesquisa para determinar o nível de importância de diversos atributos que formam parte da confiabilidade humana durante a execução de um ensaio não destrutivo por ultra – som. A qualidade da pesquisa depende do nível de transparência das opiniões fornecidas pelos especialistas por isso peço para que as opiniões sejam transparentes. Será usada a matemática nebulosa como ferramenta para agregar estados de opiniões de vários especialistas e conformar uma matriz de hierarquização de critérios de confiabilidade humana.

Segundo a opinião do especialista, os atributos serão definidos como *críticos ou valor 3* (aqueles que têm grande influência na confiabilidade humana), *condicionantes ou valor 2* (aqueles que têm influência na confiabilidade humana), *pouco condicionantes ou valor 1* (aqueles que têm pouca influência na confiabilidade humana), e *irrelevantes ou valor 0* (aqueles que não têm nenhuma influência na confiabilidade humana).

Fator	Importância
1.- Fatores externos	
☐ Características da situação	
1.1- Características arquitetônicas do local de ensaio.	
1.2- Características ambientais no local de ensaio.	
1.3- Temperatura no local.	
1.4- Umidade no local.	
1.5- Qualidade do ar no local	
1.6- Iluminação no local	
1.7- Ruído no local	
1.8- Vibrações	
1.9- Grau de limpeza em geral	
1.10- Relação horário de trabalho/ horário de descanso	
1.11- Disponibilidade e adequação do equipamento, ferramentas e	

fornecimentos gerais	
1.12- Organização de plantões e o número de inspetores	
1.13- Estrutura da instituição, autoridade, responsabilidades, e canais de comunicação	
1.14- Ações dos supervisores, companheiros de trabalho e outro pessoal	
1.15- Recompensas, reconhecimentos, estímulos e salário	
❑ Características da equipe e tarefas.	
1.16- Requerimentos de movimentos, velocidade e precisão.	
1.17- Relações controle/display	
1.18- Necessidade de interpretação que se requer durante o ensaio	
1.19- Necessidade de tomada de decisões.	
1.20- Frequência e repetitividade (monotonia) do ensaio.	
1.21- Complexidade do ensaio	
1.22- Necessidade de memória a curta ou longo prazo	
1.23- Necessidade de efetuar cálculos	
1.24- Retroalimentação	
1.25- Comunicação e estrutura da equipe de trabalho	
1.26- Fatores da interfase homem – máquina	
1.27- Desenho do aparelho de ultra – som	
1.28- Ferramentas	
❑ Instruções de trabalho ou tarefa.	
1.29- Uso dos procedimentos escritos	
1.30- Comunicações orais ou escritas	
1.31- Métodos de trabalho	
1.32- Políticas da gerência	
2.- Fatores internos.	
2.1- Nível de experiência e preparação anterior	
2.2- Prática atual ou treinamento	
2.3- Nível de inteligência	
2.4- Estado de motivação ou atitude	
2.5- Estado emocional	
2.6- Influência dos problemas familiares na atitude do inspetor	

2.7- Identificação com o grupo de trabalho	
3.- Causas de tensão.	
☐ Fatores psicológicos.	
3.1- Aparecimento de causas repentinas de tensão	
3.2- Duração da tensão	
3.3- Velocidade de trabalho	
3.4- Carga de trabalho	
3.5- Risco de trabalho	
3.6- Ameaça de falhar ou de perder o trabalho	
3.7- Monotonia do trabalho	
3.8- Períodos longos de ensaios sem achar defeitos	
3.9- Distrações devido a ruídos ou outros	
☐ Fatores fisiológicos.	
3.10- Duração da tensão fisiológica.	
3.11- Fadiga	
3.12- Não comodidade e dor	
3.13- Fome ou sede	
3.14- Temperatura interna do inspetor	
3.15- Radiações no local do ensaio	
3.16- Acelerações extremas no local do ensaio	
3.17- Constrição de movimentos durante o ensaio	
3.18- Insuficiência de oxigênio durante o ensaio	
3.19- Pressão atmosférica extrema durante o ensaio	
3.20- Falta de exercício físico	

ANEXO 3.- Questionário para determinar o comportamento dos atributos de confiabilidade humana.

Prezado inspetor:

O seguinte questionário forma parte de uma pesquisa para determinar o nível de confiabilidade da inspeção por ultra – som em campo. Não tem objetivo administrativo, mas sim científico. A qualidade da pesquisa depende do nível de transparência das opiniões fornecidas pelos inspetores por isso peço para que as opiniões sejam transparentes. Será usada a matemática nebulosa como ferramenta para agregar estados de opiniões de vários inspetores.

Para responder o questionário se deve colocar **O** no caso que seja **ótimo** o comportamento atual do fator, **B** no caso que seja **bom**, **R** no caso que seja **regular**; **RU** no caso que seja **ruim** e **P** no caso que seja **péssimo**. Qualquer pergunta do questionário está relacionada com os locais onde o inspetor faz a inspeção. Algumas, tais como 3.10 até 3.20..estão relacionadas com o próprio inspetor.

Fator	Comportamento
1.- Fatores externos	
☐ Características da situação	
1.1-Como são as características arquitetônicas do local?	
1.2-Como são as características ambientais do local?	
1.3- De forma geral como é a temperatura dos locais?	
1.4- De forma geral como é a umidade nos locais?	
1.5- De forma geral como é a qualidade do ar nos locais?	
1.6- De forma geral como é a iluminação nos locais?	
1.7- De forma geral como é o ruído nos locais?	
1.8- Como são as vibrações nos locais?	
1.9- Como é o grau de limpeza em geral?	
1.10- Como é o comportamento da relação horário de trabalho/horário de descanso?	
1.11- Como é a disponibilidade e adequação do equipamento, ferramentas e fornecimentos gerais?	
1.12- Qual é o comportamento da organização de plantões e o número de inspetores?	
1.13- Como se comportam a estrutura da instituição, a autoridade, as responsabilidades, e os canais de comunicação?	
1.14- Como são as ações dos supervisores, companheiros de trabalho e outro pessoal?	
1.15- Como se comportam as recompensas, os reconhecimentos, os	

estímulos e o salário?	
❑ Características da equipe e tarefas.	
1.16- Toda inspeção requer de movimentos, velocidade e precisão. Como é o comportamento atual destas exigências nos ensaios que você executa?	
1.17- Como é o nível de confortabilidade do equipamento (relações controle/display)?	
1.18- Para você o nível de necessidade de interpretação que se requer durante o ensaio (seja ele alto, moderado ou baixo) é ótimo, bom, regular, ruim ou péssimo para a inspeção?	
1.19- Para você o nível de necessidade de tomada de decisões que se requer durante o ensaio (seja ele alto, moderado ou baixo) é ótimo, bom, regular, ruim ou péssimo para a inspeção?	
1.20- Que comportamento tem a frequência e repetitividade (monotonia) com que faz inspeção?	
1.21- Para você o nível de complexidade dos ensaios que se requer (seja ele alto, moderado ou baixo) é ótimo, bom, regular, ruim ou péssimo para a inspeção?	
1.22- Para você a necessidade de memória a curta ou longo prazo que se requer durante o ensaio (seja ela alta, moderada ou baixa) é ótimo, bom, regular, ruim ou péssimo para a inspeção?	
1.23- Para você o nível de necessidade de efetuar cálculos que se requer durante o ensaio (seja ele alto, moderado ou baixo) é ótimo, bom, regular, ruim ou péssimo para a inspeção?	
1.24- Os resultados das inspeções são usados como retroalimentação para melhoras dos processos de ensaio? Qual é o estado atual de comportamento deste fator?	
1.25- Qual é o estado atual da comunicação e estrutura da equipe de trabalho?	
1.26- Qual é o estado atual dos fatores da interfase homem – máquina (qualidade do equipamento)?	
1.27- Como é o desenho do aparelho de ultra – som usado nos ensaios?	
1.28- Qual é o estado atual das ferramentas que são usadas durante o ensaio?	
❑ Instruções de trabalho ou tarefa.	
1.29- O que você acha do comportamento atual do fator “uso dos procedimentos escritos” ?	
1.30- O que você acha do estado atual das comunicações orais ou escritas?	
1.31- O que você acha dos métodos atuais de trabalho?	
1.32- O que você acha das políticas da gerência?	
2.- Fatores internos.	
2.1- Como você classifica seu nível de experiência e preparação anterior?	
2.2- Como você classifica sua prática atual ou treinamento?	

2.3- Como você classifica seu nível de inteligência?	
2.4- Qual é o seu estado atual de motivação ou atitude?	
2.5- Qual é seu estado emocional atual?	
2.6- O que você acha do comportamento atual do fator “ Influencia dos problemas familiares na sua atitude durante os ensaios” ?	
2.7- Como é a sua identificação com o grupo de trabalho?	
3.- Causas de tensão.	
☐ Fatores psicológicos.	
3.1- Durante os ensaios tem aparecido causas repentinas de tensão que tenham provocado algum desequilíbrio psicológico? Com que frequência? (nenhuma, baixa, moderada, alta, muito alta).	
3.2- De ter acontecido como tem sido a duração da tensão?.	
3.3- A velocidade de trabalho tem uma influência psicológica no inspetor e dessa forma influencia na qualidade do ensaio? Qual é o estado atual de comportamento deste fator?	
3.4- Qual é o estado atual de comportamento da carga de trabalho?	
3.5- O que você acha do risco de trabalho (muito alto, alto, moderado, baixo ou nenhum)?	
3.6- A ameaça de falhar ou de perder o trabalho cria uma situação psicológica que influencia na confiabilidade do ensaio. O que você acha do comportamento desse fator em dependência de se a ameaça é muito alta, alta, moderada, baixa ou nenhuma?	
3.7- A monotonia do trabalho cria um estado psicológico no inspetor que influencia na confiabilidade do ensaio. O que você acha sobre o comportamento do fator “monotonia do trabalho”?	
3.8- Períodos longos de ensaios sem achar defeitos podem criar um estado psicológico no inspetor que influencia na confiabilidade do ensaio. O que você acha do comportamento atual do fator “Períodos longos de execução de ensaios sem achar defeitos”?	
3.9- Durante o ensaio, as distrações devido a ruídos ou outros podem provocar um estado psicológico no inspetor que influencia na confiabilidade do ensaio. Como ocorrem estas distrações (muito freqüentes, freqüentemente, moderadamente freqüente, raramente ou nenhuma freqüência)?	
☐ Fatores fisiológicos.	
3.10- Durante os ensaios pode acontecer um desequilíbrio fisiológico no inspetor devido a diversas causas de tensão. Quanto tempo tem durado esse desequilíbrio fisiológico? (nenhum, baixo, moderado, alto, muito alto)?	
3.11- Durante os ensaios pode acontecer uma fadiga que provoque um desequilíbrio fisiológico no inspetor. Com que frequência ocorre essas fadigas? (muito alta, alta, moderada, baixa, nenhuma).	
3.12- A não comodidade e a dor podem provocar alterações das funções fisiológicas no inspetor. Com que frequência tem executado ensaios com pouca comodidade ou com dor? (muito alta, alta, moderada, baixa, nenhuma).	

3.13- A fome ou sede podem provocar alterações das funções fisiológicas do inspetor. Com que frequência tem executado ensaios com fome ou sede? (muito alta, alta, moderada, baixa, nenhuma).	
3.14- A temperatura interna do inspetor pode provocar alterações das funções fisiológicas nele. Como tem sido o comportamento desse fator durante os ensaios?	
3.15- As radiações no local do ensaio podem provocar alterações das funções fisiológicas do inspetor. O que você acha do comportamento atual desse fator (radiações nos locais) durante os ensaios?	
3.16- Acelerações extremas no local do ensaio podem provocar alterações nas funções fisiológicas do inspetor. O que você acha do comportamento atual desse fator (acelerações extremas nos locais) durante os ensaios?	
3.17- Constrição de movimentos durante o ensaio pode provocar alterações nas funções fisiológicas do inspetor. O que você acha do comportamento atual desse fator (se você tem tido constrição de movimentos durante os ensaios, segundo a frequência com que tenha tido)?	
3.18- Insuficiência de oxigênio durante o ensaio pode provocar alterações nas funções fisiológicas do inspetor. O que você acha do comportamento atual desse fator (se você tem tido insuficiência de oxigênio durante os ensaios, segundo a frequência com que tenha tido)?	
3.19- Pressão atmosférica extrema durante o ensaio pode provocar alterações nas funções fisiológicas do inspetor. O que você acha do comportamento atual desse fator (se você tem executado ensaios sob pressão atmosférica extrema, segundo a frequência com que tenha executado)?	
3.20- Falta de exercício físico pode provocar alterações nas funções fisiológicas do inspetor. O que você acha do comportamento atual desse fator (falta de exercício físico) em você?	

ANEXO 4.- Avaliação dos especialistas quanto às probabilidades de falha do inspetor no momento de executar um item do ensaio e quanto ao nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i). Itens 1 - 2.9.

	Probabilidade de falha humana durante a execução da tarefa									Nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i)								
Itens	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ
1.-	MB	B	B	B	B	QZ	MB	B	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.1	MB	QZ	B	B	B	QZ	Zero	B	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.2	MB	QZ	B	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	A	C	C	A	A	C	C	C	MB
1.3	MB	B	B	Mod	Mod	QZ	Zero	Zero	B	A	Zero	C	A	A	C	C	Zero	MB
1.4	MB	Mod	B	B	B	QZ	MB	MB	B	C	Mod	C	A	A	C	C	C	MB
1.5	MB	B	B	Mod	Mod	QZ	Zero	Zero	B	A	Zero	C	A	A	C	C	Zero	MB
1.6	MB	Mod	B	Mod	Mod	QZ	MB	MB	B	C	Mod	C	A	A	C	C	C	MB
1.7	MB	B	B	Mod	Mod	QZ	Zero	Zero	B	A	Zero	C	A	A	C	C	Zero	MB
1.8	MB	A	B	Mod	Mod	QZ	MB	MB	B	C	Mod	C	A	A	C	C	C	MB
2.-	MB	Mod	Mod	B	B	QZ	QZ	Mod	B	Zero	B	Zero	Zero	Zero	Zero	B	Zero	MB
2.1	MB	QZ	B	B	B	QZ	Zero	QZ	B	-	-	-	-	-	-	-	-	MB
2.2	MB	Mod	B	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	A	C	C	C	A	C	C	C	MB
2.3	MB	MB	B	B	B	QZ	QZ	QZ	B	Zero	Zero	C	A	C	C	C	A	MB
2.4	MB	Mod	B	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	A	C	C	C	A	C	C	C	MB
2.5	MB	MB	B	B	B	QZ	QZ	QZ	B	Zero	Zero	C	A	C	C	C	A	MB
2.6	MB	Mod	B	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	A	C	C	C	A	C	C	C	MB
2.7	MB	MB	B	B	B	QZ	QZ	QZ	B	Zero	Zero	C	A	C	C	C	A	MB
2.8	MB	Mod	B	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	A	C	C	C	A	C	C	C	MB
2.9	MB	Mod	Mod	Mod	Mod	QZ	QZ	MB	B	C	C	C	C	C	C	C	C	MB

Anexo 5.- Avaliação dos especialistas quanto às probabilidades de falha do inspetor no momento de executar um item do ensaio e quanto ao nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i). Itens 3 - 9.6

	Probabilidade de falha humana durante a execução da tarefa									Nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i)								
Itens	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ
3.-	Zero	Mod	Mod	Mod	Mod	Mod	QZ	Mod	B	Zero	Zero	Zero	B	B	Zero	Zero	Zero	Zero
4.-	MB	B	Mod	Mod	Mod	QZ	Zero	B	B	Mod	C	A	C	C	Mod	C	C	MB
5.-	QZ	B	MB	Mod	Mod	QZ	Zero	MB	B	Zero	A	B	C	C	Mod	C	B	QZ
6.-	QZ	B	QZ	Mod	Mod	QZ	Zero	MB	B	Zero	B	Zero	C	C	B	C	B	QZ
7.-	QZ	MB	QZ	B	B	MB	Zero	Mod	B	Zero	Mod	Zero	B	B	Mod	Zero	B	QZ
8.-	MB	Mod	A	A	A	QZ	QZ	B	B	Zero	A	A	B	B	Mod	Zero	C	MB
8.1-	QZ	A	A	A	A	QZ	QZ	B	B	-	-	-	-	-	-	-	-	QZ
8.2-	MB	A	A	A	A	QZ	QZ	B	B	A	A	C	C	C	C	C	C	MB
8.3-	QZ	Mod	B	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	C	C	C	C	C		C	C	QZ
8.4-	MB	Mod	MB	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	MB
8.5-	QZ	Mod	Mod	B	B	QZ	QZ	Mod	B	Zero	Mod	A	C	C	C	C	C	QZ
8.6-	QZ	A	MB	B	B	QZ	QZ	Mod	B	Zero	C	C	C	C	C	C	C	QZ
9.-	MB	Mod	A	A	A	QZ	QZ	MB	B	C	Mod	C	Mod	Mod	Mod	C	C	MB
9.1-	Zero	QZ	Mod	B	B	QZ	Zero	Zero	B	-	-	-	-	-	-	-	-	Zero
9.2-	Zero	Mod	A	Mod	Mod	QZ	Zero	Zero	B	A	Zero	Zero	C	C	C	C	C	Zero
9.3-	B	Mod	A	Mod	Mod	QZ	QZ	Mod	B	C	C	C	A	A	C	C	C	B
9.4-	QZ	Mod	B	Mod	Mod	QZ	QZ	Zero	B	C	C	C	A	A	C	C	C	QZ
9.5-	Zero	Mod	Mod	Mod	Mod	QZ	QZ	Zero	B	Zero	Zero	Zero	Mod	Mod	C	C	C	Zero
9.6-	B	Mod	Mod	Mod	Mod	QZ	QZ	Mod	B	A	C	C	C	C	C	C	C	B

ANEXO 6.- Avaliação dos especialistas quanto às probabilidades de falha do inspetor no momento de executar um item do ensaio e quanto ao nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i). Itens 9.7 – 14.7

	Probabilidade de falha humana durante a execução da tarefa									Nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i)								
Itens	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ
9.7-	MB	QZ	Mod	B	Mod	QZ	B	MB	B	C	C	C	C	C	C	C	C	MB
10.-	Zero	A	Mod	A	A	QZ	QZ	Mod	B	Zero	Zero	Zero	B	B	A	C	Zero	Zero
11.-	Zero	Mod	B	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	Zero	Mod	C	C	C	C	C	A	Zero
11.1	QZ	Mod	B	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	-	-	-	-	-	-	-	-	QZ
11.2-	QZ	Mod	B	Mod	Mod	QZ	QZ	B	B	C	Mod	C	C	C	C	C	C	QZ
12.-	QZ	Mod	B	A	A	QZ	QZ	B	B	C	Mod	C	C	C	C	C	C	QZ
13.-	QZ	Mod	Mod	A	A	A	QZ	Mod	B	Zero	A	A	Mod	Mod	A	C	C	MB
13.1-	B	Mod	Mod	A	A	A	QZ	B	B	-	-	-	-	-	-	C	Zero	MB
13.2-	B	A	B	A	A	A	QZ	B	B	A	C	C	A	A	C	C	C	MB
13.3-	B	A	B	A	A	A	QZ	B	B	Zero	A	C	A	A	C	B	Zero	MB
13.4-	QZ	MB	MB	B	B	QZ	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	-	-	MB
14.-	Mod	Mod	MA	MA	MA	A	QZ	Mod	B	Zero	Mod	Zero	C	C	Mod	C	C	MB
14.1-	Mod	Mod	Mod	A	A	A	QZ	B	B	-	-	-	-	-	-	C	A	MB
14.2-	QZ	Mod	Mod	MA	MA	A	QZ	B	B	Zero	Zero	C	A	A	C	C	C	MB
14.3-	MB	B	B	A	A	A	QZ	Mod	B	A	A	C	C	C	C	C	A	MB
14.4-	MB	B	B	Mod	Mod	Mod	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	MB
14.5-	A	Mod	B	A	MA	A	QZ	B	B	Zero	Zero	C	C	C	C	C	A	MB
14.6-	QZ	B	B	Mod	Mod	Mod	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	MB
14.7-	QZ	MB	B	B	B	QZ	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	MB

ANEXO 7.- Avaliação dos especialistas quanto às probabilidades de falha do inspetor no momento de executar um item do ensaio e quanto ao nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i). Itens 15 – 17.

	Probabilidade de falha humana durante a execução da tarefa									Nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i)								
Itens	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ
15.-	Mod	Mod	A	MA	MA	A	QZ	B	B	Zero	A	C	C	C	A	C	C	Mod
15.1-	QZ	B	B	A	A	A	QZ	Mod	B	-	-	-	-	-	-	-	-	QZ
15.2-	MB	Mod	B	MA	MA	A	QZ	B	B	A	A	C	C	C	C	C	C	MB
15.3-	MB	B	B	Mod	Mod	Mod	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	MB
15.4-	QZ	MB	B	B	B	QZ	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	QZ
16.-	B	A	A	A	A	A	QZ	Mod	B	Zero	A	C	A	A	Mod	C	C	B
Comprim	QZ	Mod	A			Mod	QZ			-	-	-			-			QZ
16.1-	QZ	A	Mod	A	A	A	QZ	Mod	B	-	-	-	-	-	-	-	-	QZ
16.2-	QZ	Mod	B	Mod	Mod	Mod	QZ	MB	B	C	C	C	C	C	C	C	C	QZ
16.3-	QZ	MB	B	B	B	QZ	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	QZ
Altura	A	A	MA	MA	MA	A	QZ		B	-	-	-	Mod	Mod	C	C		A
16.4-	A	A	MA	MA	MA	A	QZ	A	B	C	-	-	C	Mod	C	C	Zero	A
16.5-	A	A	MA	A	A	A	QZ	A	B	C	C	C	C	A	C	C	C	A
16.6-	MB	B	MA	Mod	Mod	Mod	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	MB
16.7-	QZ	Mod		Mod	Mod	Mod	QZ	B	B	C	Mod	C	C	C	C	C	C	QZ
16.8-	MB	A		A	A	Mod	QZ	Mod	B	C	Mod	C	C	C	C	C	C	MB
16.9-	QZ	Mod		Mod	Mod	Mod	QZ	B	B	C	Mod	C	C	C	C	C	C	QZ
16.10-	QZ	QZ		B	B	Mod	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	QZ
17.-	B	A	MA	MA	MA	Mod	QZ	Mod	B	Zero	Mod	A	B	B	A	B	Zero	B

ANEXO 8.- Avaliação dos especialistas quanto às probabilidades de falha do inspetor no momento de executar um item do ensaio e quanto ao nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i). Itens 17.1 – 19.

	Probabilidade de falha humana durante a execução da tarefa									Nível de dependência entre a tarefa (i+1) e a tarefa (i)								
Itens	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ	EspA	EspB	EspC	EspD	EspE	EspF	EspG	EspI	EspJ
17.1-	QZ	A		B	B	QZ	QZ	QZ	B	-	-	-	-	-	-	-	-	QZ
17.2-	QZ	Mod		Mod	Mod	MB	QZ	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	QZ
17.3-	B	A		MA	MA	MB	QZ	Mod	B	C	Mod	C	C	C	C	C	C	B
17.4-	QZ	Mod		B	B	QZ	QZ	QZ	B	C	C	C	C	C	C	C	C	QZ
18.-	QZ	B	Mod	A	A	QZ	QZ	Mod	B	C	C	C	C	C	Mod	C	C	QZ
18.1-	QZ	B		A	A	QZ	QZ	Mod	B	-	-	-	-	-	-	-	-	QZ
18.2-	QZ	Mod		A	A	QZ	QZ	Mod	B	C	A	C	C	C	C	C	C	QZ
19.-.	QZ	Mod	Mod	A	A	QZ	QZ	B	B	C	C	C	C	C	Mod	C	C	QZ

ANEXO 9.-Questionário para determinar o grau de transtorno que ocasiona uma falha humana em um item.

Prezado inspetor:

Com o objetivo de estudar a propagação de erros num ensaio não destrutivo tipo ultra-som, gostaríamos de conhecer a sua opinião em quanto ao grau de transtorno que poderia provocar uma falha humana durante a execução de um item determinado em outros itens ou eventos subsequentes . Por exemplo, um erro durante a execução do item 1 vai provocar um grau de transtorno “ importante ” no item 8 (isto é só um exemplo). Nesse caso na tabela, na interseção das tarefas 1 com a 8 você colocaria o grau 0,8. Para isto é necessário usar os seguintes termos: nenhum transtorno (0,2); pouco transtorno (0,4); algum transtorno (0,6); importante transtorno (0,8) e transtorno crítico (1).

Procedimento de ultra-som	Grau de transtorno provocado nos itens subsequentes																		
Ação, item ou tarefa.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1.- Calibração. Verificar a linearidade horizontal do aparelho.	1	0	0	0	0	0	0	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- Calibração. Verificar a linearidade vertical do aparelho.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- Solicitar informações sobre a peça.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.- Escolher o bloco de referência em função da espessura.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.- Escolher o cabeçote e o ângulo.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.- Escolher a frequência.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- Preparação da superfície da peça.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.- Determinar a sensibilidade correta para a varredura.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Procedimento de ultra-som	Grau de transtorno provocado nos itens subsequentes																		
Ação, item ou tarefa.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
9.- Determinar as perdas por transferência.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.- Usar corretamente as técnicas de varredura.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.- Determinar corretamente a área de varredura.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
12.- Examinar corretamente a área de varredura.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13.- Localizar as descontinuidades no sentido longitudinal.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
14.- Localizar as descontinuidades no sentido transversal.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
15.- Localizar as descontinuidades na profundidade.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
16.- Dimensionar as descontinuidades.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
17.- Avaliar as reflexões da raiz de solda.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
18.- Emitir o laudo.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
19.- Preencher o relatório.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

GLOSARIO SOBRE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS TIPO ULTRA-SOM

FINALIDADE DO ENSAIO

A principal finalidade do ensaio por ultra som é a detecção de descontinuidades internas em materiais ferrosos e não ferrosos, metálicos e não metálicos, através da introdução de um feixe sônico com características compatíveis com a estrutura do material a ser ensaiado. Este feixe sônico se for introduzido numa direção favorável em relação à descontinuidade (interface), se for refletido por esta descontinuidade, será mostrado na tela do aparelho como um pico (eco). Algumas descontinuidades superficiais também podem ser detectadas com este ensaio não destrutivo.

O que é necessário para o ensaio?

- Operador treinado e qualificado
- Norma técnica, manuais e procedimentos
- Um aparelho
- Transdutores
- Acoplante
- Blocos de calibração e de referência
- Material a ser ensaiado

Ondas mecânicas

São aquelas originadas pela deformação de uma região de um meio elástico e que, para se propagarem, necessitam de um meio material. Daí decorre que as ondas mecânicas não se propagam no vácuo. Quando transmitidas ao nosso sentido da audição, são por ele captados como uma impressão fisiológica denominada som.

"Som" é o fenômeno acústico que consiste na propagação de ondas sonoras produzidas por um corpo que vibra em um meio material elástico".

As ondas sonoras propagam-se nos sólidos, líquidos e gases.

Ondas Periódicas

As ondas são periódicas quando se repetem identicamente, em intervalos de tempo iguais.

Ondas Sonoras

A parte da Física que estuda o som, denomina-se acústica; nela são descritos os fenômenos relacionados com as oscilações mecânicas (vibrações) que originam as ondas sonoras ocorrentes, bem como a propagação dessas ondas nos sólidos, líquidos e gases.

As ondas sonoras são ondas periódicas; classificadas em audíveis e inaudíveis, dependendo do número de períodos que ocorram na unidade de tempo (frequência).

Som, Infra-som e Ultra-som

Quando as ondas sonoras têm frequência entre 20 Hz e 20.000 Hz, são audíveis = **SOM**

Quando as ondas sonoras têm frequências inferiores a 20 Hz são inaudíveis = **INFRA-SOM**.

Quando as ondas sonoras têm frequências superiores a 20.000 Hz são também inaudíveis = **ULTRA-SOM**.

Para aplicação nos ensaios de materiais por ultra-som, a faixa de frequência geralmente utilizada está entre 0,5 MHz e 20 MHz.

COMPRIMENTO DA ONDA (λ), que é a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos ou duas zonas de compressão e diluição. $\lambda = V/F$.

Sempre dependerá da frequência e da velocidade.

PERÍODO (T), que é o menor intervalo de tempo de repetição do fenômeno periódico. Pode ser definido também, como o tempo que uma onda completa gasta para percorrer a distância " 2π ";

FREQÜÊNCIA (F), que é o número de períodos por segundo; é, portanto, o inverso do período:

$$F = 1/T$$

A unidade de frequência é o **Hertz (Hz)** que significa "um ciclo por segundo".

Utilizaremos MHz, milhões de ciclos por segundo.

A frequência depende somente do período e não varia ao passar por meios diferentes.

Quanto maior a frequência (F), maior será o número de oscilações (ciclos) por segundo, menor será a distância entre as cristas ou vales, ou zonas de compressão e diluição.

Um transdutor utilizado neste método de ensaio, tem a sua frequência fixa, ou seja, ele é adquirido para ser utilizado em uma determinada frequência. Este transdutor terá sempre a mesma frequência, mesmo que seja utilizado em materiais diferentes. Para

ensaiar materiais com características muito diferentes, teremos que utilizar transdutores de frequências diferentes.

AMPLITUDE (A) que é a elongação máxima, isto é, um ponto de máximo no eixo "Y"

Interferência de Ondas

Interferência é o fenômeno de superposição de duas ou mais ondas.

Num mesmo meio, duas ou mais ondas propagando-se no mesmo sentido ou em sentidos diferentes, quando se superpõem provocam o fenômeno denominado **interferência ondulatória**. A interferência de duas ou mais ondas poderá resultar numa terceira onda (resultante) cuja amplitude poderá ser maior ou menor que a das ondas componentes.

Com relação às ondas emitidas por fontes diferentes, o fenômeno da interferência ocorre também como se cada sistema de ondas estivesse só, isto é, nos pontos de cruzamento, adicionam-se ou subtraem-se geometricamente e esses pontos são sede da onda resultante. A intensidade de uma onda sonora resultante varia de um som forte que se ouve em dado instante para um silêncio quase total, seguido de um som forte e assim por diante. Os sons fortes ocorrem quando as ondas interferem construtivamente reforçando-se umas às outras, e o silêncio ocorre quando há interferência destrutiva e as anulam total ou parcialmente.

Ressonância

Ressonância é o fenômeno pelo qual um corpo vibra ao ser atingido por vibrações produzidas por um outro corpo, quando o período das vibrações do primeiro coincide com o período natural de vibrações do segundo, ou com o período de um dos seus harmônicos, ou seja, quando a frequência de vibração induzida (externa) no corpo coincide com sua frequência natural.

Aplicando-se uma vibração ultra-sônica num corpo a ser ensaiado, dependendo das características acústicas desse corpo, ele entrará em ressonância na medida em que o período da vibração aplicada se aproxime do seu período natural de vibração.

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

A velocidade é uma característica de cada material. Dependerá de muitos fatores, como, tipo de material e liga, tratamento térmico, etc. Cada material apresenta um comportamento em relação à propagação de um feixe sônico de tipos de ondas diferentes. Existindo vários tipos de ondas, teremos também alguns valores diferentes de velocidade.

EFEITO PIEZELÉTRICO E EFEITO LIPPMANN

Efeito piezelétrico

É a designação que recebeu o fenômeno que ocorre com os cristais anisotrópicos, nos quais desenvolvem-se cargas elétricas quando submetidos a deformações mecânicas.

Este fenômeno, manifesta-se da seguinte forma: aplicando-se cargas mecânicas nas duas faces opostas de uma lâmina de cristal de quartzo, ocorre a formação de cargas elétricas de polaridades contrárias nessas faces, isto é, em uma das faces formam-se **cargas positivas** e na outra **cargas negativas**.

Experiências diversas mostraram que as cargas elétricas desenvolvidas na lâmina de cristal, são proporcionais às cargas mecânicas aplicadas.

Efeito lippmann

É a designação que recebeu o fenômeno que ocorre com os cristais anisotrópicos, nos quais observam-se deformações mecânicas quando submetidos a tensões elétricas. É o efeito recíproco do efeito piezelétrico.

Se na lâmina de cristal for aplicada agora uma tensão alternada, ela sofrerá deformações sucessivas passando a vibrar. A lâmina se **contrairá** na primeira metade do ciclo da corrente alternada e se expandirá na outra metade. A frequência de **vibração mecânica** será a mesma da tensão alternada

Como vimos, o dispositivo transforma uma energia em outra, isto é, transforma energia elétrica em energia mecânica. Todos os dispositivos que transformam uma espécie de energia em outra são chamados **transdutores**. No ensaio por ultra-som, o transdutor é conhecido também como cabeçote.

Podem-se produzir vibrações mecânicas desde alguns ciclos por segundo (Hertz) até cerca de 25.000.000 de ciclos por segundo (25 MHz). A faixa de utilização nos ensaios por ultra-Som é de 0,5 MHz a 15 MHz, podendo chegar a 20 MHz em transdutores de aplicações especiais.

ONDAS ULTRA-SÔNICAS

Propagação das ondas ultra-sônicas

O ensaio de materiais por ultra-som é feito mediante uso de ondas ultra-sônicas.

Qualquer onda provoca oscilações das partículas do meio em que se propaga. A passagem da onda ultra-sônica pelo meio de propagação faz com que as partículas que compõem esse meio executem um movimento de oscilação em torno da sua posição de equilíbrio, cuja amplitude irá diminuindo gradativamente em decorrência da perda de energia da onda.

Tipos de ondas ultra-sônicas

Ondas longitudinais (ondas de compressão)

Uma onda é longitudinal quando as partículas do meio em que ela se propaga vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio.

A distância entre duas zonas de compressão e duas de diluição é o comprimento de onda (λ)

Este tipo de onda propaga-se nos sólidos, líquidos e gases.

É a onda de maior velocidade de propagação.

Ondas transversais (ondas de corte ou cisalhamento)

A onda é transversal quando as partículas do meio em que ela se propaga, vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda nesse meio. Nesse caso, os planos de partículas no meio de propagação mantêm à mesma distância uns dos outros.

Não se propagam nos líquidos e nos gases, pois nesses meios não existem ligações mecânicas.

Sua velocidade de propagação é aproximadamente a metade da velocidade da onda longitudinal.

O comprimento de onda (λ) é a distância entre dois **vales ou dois picos**.

Este tipo de onda é utilizado no ensaio com transdutores angulares e de ondas superficiais.

Ondas superficiais

São obtidas após a refração da onda longitudinal. É utilizada em transdutores de ondas superficiais.

Existem três tipos de ondas superficiais, que são: ondas de Rayleigh, ondas de Love e ondas de Lamb.

As ondas de Rayleigh são as mais utilizadas nos ensaios não destrutivos e as demais são utilizadas em casos específicos.

INCIDÊNCIA DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS EM DIFERENTES MEIOS DE PROPAGAÇÃO.

Quando um som ou um ultra-som propaga-se em um meio, poderá ser refletido, absorvido ou atenuado pela distância. Uma característica não é alterada quando uma onda mecânica se propaga, é a frequência.

Notamos no dia-a-dia, que o som retorna na forma de eco quando um barulho é feito e existe uma parede ou outra barreira qualquer que possa refleti-lo e trazê-lo de volta aos nossos ouvidos. No ensaio por ultra-som utilizamos um feixe de ondas ultrasônicas que é transmitido a um material e quando existir uma barreira dentro deste material (descontinuidade), esperamos que as ondas retornem e sejam captadas, mostrando a existência desta descontinuidade. Quando o feixe sônico sai do transdutor e incide em um outro meio, encontra uma barreira, que é chamada de INTERFACE. A descontinuidade dentro do material, será uma interface também. Chamaremos de interface qualquer anteparo ou mudança de meio de propagação.

Quando posicionamos um transdutor de ondas longitudinais sobre uma peça, temos:

- Onda incidente: a que é gerada pelo cristal, caminha dentro do transdutor (MEIO 1) e incide sobre a superfície do material (MEIO 2).

Entre os meios 1 e 2 sempre deverá existir um acoplante, que é um líquido, pasta ou gel, que permitirá a passagem da onda do meio 1 para o meio 2. O ar é um péssimo acoplante.

- Onda refletida: é a onda que encontrou a interface MEIO 1-MEIO 2 e foi refletida, não penetrando no material.

- Onda transmitida: é a onda que passou pela interface.

A quantidade de energia que é refletida ou transmitida depende da IMPEDÂNCIA ACÚSTICA.

Quanto maior a diferença de impedâncias entre os dois meios, maior será a quantidade de energia refletida.

REFLEXÃO E TRANSMISSÃO

INCIDÊNCIA OBLÍQUA DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS (LEIS DE REFLEXÃO)

Um feixe de ondas longitudinais, incidindo obliquamente numa interface "meio 1 - meio 2", terá uma parte refletida (**OLR** - **onda longitudinal refletida**), uma parte transmitida (**OLT** - **onda longitudinal transmitida**) e uma parte refratada (**OLR** - **onda longitudinal refratada** ou **OTT** - **onda transversal transmitida**). A refração ocorre porque a velocidade dos meios é diferente e a onda longitudinal incide num certo ângulo em relação à normal.

Num transdutor angular, o que irá interessar é a onda longitudinal refratada, também chamada de onda transversal transmitida **OTT**. É somente esta onda que utilizaremos num ensaio com ondas transversais.

Transdutores

Os transdutores são responsáveis pela emissão das ondas ultra-sônicas porque dentro deles está localizado o cristal piezelétrico que vibrará quando estimulado por pulsos elétricos vindos de um dispositivo controlador de pulsos, localizado no aparelho de ultra-som. Os pulsos elétricos são levados aos transdutores pelos cabos coaxiais.

Transdutores são acessórios frágeis. Devem ser manuseados com cuidado, evitando as quedas, pancadas e até mesmo batidas mais secas na superfície da peça em ensaio.

São acessórios enquadrados como material de consumo pois, desgastam-se com facilidade se manuseados sem os devidos cuidados. Quando utilizados de maneira correta e cuidadosa, funcionam durante muitos anos sem apresentam problemas sérios. São caros.

Existem no mercado transdutores de várias formas, tamanhos, ângulos e frequências.

Os transdutores são divididos em categorias que são: Transdutores normais, transdutores de duplo cristal (S/E), transdutores angulares, transdutores de ondas superficiais e os especiais, para aplicações específicas.

Transdutores Normais: são aqueles que trabalham com ondas longitudinais no interior das peças. São encontrados em vários diâmetros e frequências. O cristal é circular.

Dentro desta categoria, encontramos os transdutores normais para ensaio por contato direto e os transdutores normais blindados, que são aplicados no ensaio por imersão.

A faixa de diâmetros de cristais mais utilizados, varia de 6,25 a 30,0 mm e é nesta faixa que as normas aeronáuticas recomendam. Existem os transdutores em miniatura com cristais de diâmetros reduzidos, bem como os de diâmetros bem maiores que 30,0.

São utilizados para detectar as descontinuidades cuja área de maior reflexão está paralela à superfície de contato.

São montados com um único cristal, que atua como emissor e receptor.

Os transdutores normais para ensaio por imersão, são encontrados em vários diâmetros e frequências. O que os diferencia dos transdutores para contato direto, é a blindagem necessária para trabalharem submersos e algumas variações na região de saída do feixe, já que não terá existirá contato direto com a superfície da peça.

Transdutores com duplo cristal (S/E ou T/R): são transdutores que trabalham com ondas longitudinais no interior das peças. São encontrados em vários diâmetros e frequências. Os cristais numa pequena inclinação.

O S/E foi projetado para suprir as deficiências do transdutor normal. É um transdutor muito utilizado quando a varredura com um transdutor normal não é possível devido ao campo próximo, comum aos transdutores de apenas um cristal.

* campo próximo é uma região de distúrbios onde as indicações não são confiáveis.

Estes transdutores são montados com dois cristais que funcionam separadamente. Um cristal é o emissor e o outro cristal é o receptor. É como se existissem dois transdutores completamente isolados, dispostos numa mesma carcaça maior.

Possuem contatos e conectores separados para cada cristal e uma blindagem interna que evita que as ondas ultra-sônicas emitidas pelo cristal emissor chegue ao cristal receptor sem passar pela peça.

É bastante utilizado na medição de espessuras e em peças de paredes finas.

Apresentam menor sensibilidade se comparados com os transdutores normais.

Estes transdutores não têm campo próximo mas têm uma zona semelhante à zona morta, que tem de 1 a 3 mm de profundidade. Nesta região nada é detectado, necessitando de um outro ensaio para ensaiar a superfície e subsuperfície.

Não é aplicado no ensaio de grandes espessuras pois seu campo útil é limitado.

Transdutores angulares: são aqueles que trabalham com ondas transversais no interior das peças. São encontrados em vários tamanhos de carcaça e cristais. O cristal deste transdutor é retangular.

Sua construção é bastante similar aos outros, tendo em seu interior os mesmos dispositivos. O que difere é a forma do cristal e seu posicionamento pois, devem ser inclinados num ângulo pré estabelecido, para que quando o feixe encontrar a interface _"transdutor - superfície da peça" (MEIO 1 e- MEIO 2), seja refratado e forme com a normal, o ângulo indicado.

Os transdutores angulares são encontrados na faixa de ângulos de 30° a 80°. Os mais utilizados são os de 45°, 60° e 70°.

Quando recém adquiridos, estes transdutores geralmente apresentam o ângulo muito próximo do indicado em sua carcaça mas com o desgaste da sapata de acrílico, o ângulo poderá aumentar ou diminuir. Exige a constante calibração do ponto de saída do feixe sônico e do ângulo de incidência.

Sua utilização não é tão simples como o transdutor normal pois, o feixe caminha em um ângulo então não existirá um eco de fundo (eco de espessura). Enquanto não houver uma interface para refletir o feixe sônico, ele percorrerá o interior do material até ser totalmente atenuado.

Transdutores de ondas superficiais: são aqueles que trabalham com ondas superficiais. São encontrados em vários tamanhos de carcaça e cristais. O cristal é retangular.

São semelhantes aos transdutores angulares.

O cristal deste transdutor é montado num ângulo de inclinação em relação a normal, que faz com que a onda transversal refratada, seja levada para a superfície (2º ângulo crítico)

FREQÜÊNCIA

Para a detecção de descontinuidades, geralmente são usadas as frequências entre 2,25 e 10 MHz.

Frequências maiores que 10 MHz, permitem maior sensibilidade para a detecção de pequenas descontinuidades mas apresenta baixo poder de penetração.

Frequências altas são afetadas pela própria estrutura metalúrgica do material, ou seja, a granulação, compostos intermetálicos, precipitados ou qualquer outra característica proveniente do processo de fabricação.

Os sinais destes pequenos refletores podem interferir na detecção de pequenas descontinuidades e são conhecidas como "ruído" ou "grama".

Se o tamanho da descontinuidade ou defeito a ser detectado deve ser a primeira consideração a ser feita quando seleciona-se a frequência de ensaio.

Se o objetivo é detectar grandes descontinuidades, pode-se optar por frequências mais baixas, principalmente quando for requerida maior penetração.

ACOPLANTE

Substância líquida ou pastosa, que tem por finalidade, favorecer a transmissão das ondas ultra-sônicas do transdutor para a peça em ensaio, não deixando ar entre os meios 1 e 2.

A escolha do acoplante dependerá das condições superficiais da peça e do tipo de material está sendo ensaiado.

Numa superfície com bom acabamento, bastará uma camada de um óleo fino. Em superfícies com rugosidade excessiva, será necessário um acoplante mais viscoso, podendo até ser necessária a utilização de gel ou graxa.

Os acoplantes típicos são: água, óleo em geral, gel, graxa, vaselina líquida e em pasta ou uma mistura das duas, metilcelulose (não para metais ferrosos) e etc.

Deve-se verificar a compatibilidade entre o acoplante e o material a ser ensaiado. Esse cuidado justifica-se por possíveis reações e ataques, propiciando a corrosão.

Após o término do ensaio, a peça deverá ser totalmente limpa, eliminando-se os resíduos do acoplante.

No ensaio por imersão, a água é o acoplante. Portanto, quando forem ensaiadas peças de material ferroso, deve adicionar à água, aditivos para evitar corrosão da peça em ensaio além de anti-espumante e bactericida.

Características e variáveis do feixe sônico

O feixe sônico não se apresenta uniformemente quando se propaga num meio. Ele é divergente e sua intensidade varia conforme a distância do transdutor.

- A velocidade de propagação e a frequência não são alteradas com a distância.

Quanto mais distante do transdutor, menor será a sua intensidade. Quanto mais distante estiver da linha de 100%, que é a linha de maior pressão sônica, menor será a intensidade.

O feixe sônico perde sua intensidade com a distância e com a divergência e com isso diminui também a amplitude do sinal de recepção.

O feixe sônico é dividido em três zonas distintas que são: zona morta, campo próximo e campo distante.

Zona morta: é a região logo abaixo do transdutor, que não pode ser ensaiada.

Esta zona tem uma profundidade que varia de 1 a 3 mm, dependendo da frequência utilizada. Esta fina faixa de espessura onde encontra-se a zona morta, deverá ser ensaiada posicionando o transdutor na superfície oposta ou por um outro tipo de ensaio. Por exemplo os ensaios por líquido penetrante, partículas magnéticas ou correntes parasitas.

Campo próximo (Zona de Fresnel): é uma região de grande pressão sônica e grande variação na intensidade do feixe sônico, gerando grande turbulência e distúrbios.

Esta região não é confiável. Não é recomendável considerar ou confiar nas indicações obtidas.

Para calcular o campo próximo dos transdutores utiliza-se a seguinte fórmula:

$$N = D^2 \cdot F / 4 \cdot VL$$

Onde:

N = campo próximo

D = diâmetro do cristal do transdutor

F = frequência do transdutor

VL = velocidade longitudinal do material em ensaio

4 = constante

Para calcular o campo próximo dos transdutores angulares utiliza-se a seguinte fórmula:

$$N = D_{eq}^2 \cdot F / 4 \cdot VT$$

Onde:

N = campo próximo

D_{eq}^2 = diâmetro equivalente do cristal do transdutor angular, (que é retangular).

F = frequência do transdutor

VT = velocidade transversal do material em ensaio.

É necessário em primeiro lugar, calcular o diâmetro equivalente já que o cristal dos transdutores angulares é retangular e não circular como nos transdutores normais.

Calculando o diâmetro equivalente:

$$a \cdot b = (\pi \cdot D_{eq}^2) / 4 \Rightarrow D_{eq}^2 = (a \cdot b \cdot 4) / \pi$$

Onde:

D_{eq}^2 = diâmetro equivalente

a = lado menor do cristal

b = lado maior do cristal

$\pi = 3,1416$

4 = constante

Campo distante: inicia-se quando termina o campo próximo.

É nesta região do feixe sônico onde o ensaio é considerado confiável. Verifica-se que é a partir do início do campo distante que começa a divergência do feixe sônico.

DIVERGÊNCIA DO FEIXE SÔNICO

No campo próximo o feixe não apresenta divergência, porém a partir do início do campo distante e a intensidade do feixe sônico decresce com o aumento da distância. Além da distância, a divergência é um outro fator para levar em consideração durante o ensaio pois, dependendo da localização do transdutor em relação à descontinuidade, o sinal correspondente a esta descontinuidade poderá aparecer na tela com amplitude diminuída.

- quanto maior a frequência, menor será a divergência;
- quanto menor o diâmetro do cristal, maior será a divergência.

Os transdutores de baixa frequência possuem a detectabilidade menor que os de alta frequência, e ainda apresentam maior divergência.

É importante considerar e conhecer as características de divergência dos transdutores utilizados pois o feixe pode ser refletido por alguma área da peça que esteja na mesma profundidade de uma descontinuidade. A reflexão de paredes, cantos vivos ou outras

mudanças de geometria, podem interferir nas reflexões de descontinuidades mostradas na tela do aparelho.

ATENUAÇÃO ACÚSTICA

Sabemos que uma das causas da diminuição da pressão sônica é a divergência do feixe, a outra é a atenuação acústica.

Atenuação acústica não é causada pela geometria do campo sônico, é uma característica dos materiais.

A pressão sônica decresce como resultado da atenuação, que é medida em dB/mm.

Dispersão e absorção são as responsáveis pela atenuação acústica.

Dispersão do feixe sônico: ocorre devido ao desvio de partes do feixe por pequenos refletores existentes no interior dos materiais (descontinuidades tais como tamanho de grão, vazios, inclusões etc.), fazendo com que as ondas percam um pouco de energia e se propaguem em todas as direções.

Absorção: Uma parte da energia ultra-sônica é perdida por atrito, transformando-se em calor. Esse "atrito interno" aumenta com a frequência.

APARELHOS DE ULTRA-SOM

São encontrados no mercado, vários tipos e modelos de aparelhos de ultra-som. Com o desenvolvimento da eletrônica e informática, temos aparelhos capazes de fornecer excelentes resultados, com as facilidades de memória para arquivar os dados de calibração e resultados obtidos no ensaio. Podem ser acoplados à impressoras ou computadores, permitindo que os registros do ensaio sejam transferidos para os relatórios, com um maior número de informações, evitando falhas ou esquecimento do operador.

Basicamente os aparelhos de ultra-som apresentam os mesmos controles e ajustes, sendo diferenciados apenas no grau de modernização, com recursos que agilizam o ensaio.

Falaremos sobre os controles e ajustes principais.

Escolha do método (impulso-eco ou duplo cristal/transdutor)

Permite selecionar se o ensaio será feito com um único transdutor ou se serão utilizados dois transdutores ou se será utilizado um transdutor de duplo cristal (S/E).

Ajuste de ganho (dB):

É considerado o mais importante, juntamente com o controle de escala.

Existem dois controles de ganho. Um que permite aumentar ou diminuir o ganho em posições de 10 em 10dB ou de 20 em 20 dB e um outro controle ou ajuste fino que permite aumentar ou diminuir em 1dB ou 2 dB de cada vez.

Tem a função de regular a recepção do sinal de uma reflexão. Compara-se ao controle de volume de um rádio.

Quanto maior for o ganho, maior será a altura do eco na tela do aparelho, que poderá ser aumentado ou diminuído, simplesmente aumentando ou diminuindo o ganho.

Determinará a amplitude de todas as reflexões na tela e permitirá quantificar as reflexões e diferenças entre as amplitudes dos sinais recebidos.

A unidade utilizada neste controle é o decibel (dB). Sempre que for mencionado o ganho, certamente existirá uma quantidade de decibéis.

Durante a calibração do aparelho, é utilizado um ganho de calibração que deverá ser anotado sempre.

Existirá também um outro valor de ganho, que será o ganho operacional, que é a soma do ganho de calibração, o ganho de norma, a correção de transferência e o ganho do operador.

Quando uma descontinuidade for detectada, terá a sua amplitude comparada à amplitude de uma reflexão padronizada, e esta reflexão será avaliada conforme a quantidade de dB acima ou abaixo da reflexão de referência.

Ajuste de escala:

Este controle é o que possibilita posicionar a reflexão de uma determinada espessura ou percurso sônico, na tela horizontal do aparelho, ou seja, a distância percorrida pelo feixe sônico dentro do material.

Se o feixe sônico estiver percorrendo uma espessura de 300 mm e a escala estiver calibrada em 100 mm, não será mostrado o eco desta espessura (eco de fundo), na tela do aparelho.

Dependendo do aparelho, a escala pode chegar a 5 metros, porém o limite maior de escala encontrada nos aparelhos portáteis, não ultrapassa os 2 metros.

Existem dois controles ou ajustes de escala, um deles é chamado de ajuste grosso, que tem as posições de 25, 50, 100, 250, 500, 1500mm, indo até o limite máximo da escala. O outro ajuste existente, o ajuste fino, permite que seja possível estabelecer exatamente a escala desejada, posicionando o eco de fundo ou o eco ou de qualquer outra reflexão, em qualquer local na escala horizontal da tela, permitindo calibrar escalas por exemplo, de 157,0 mm, 975 mm. Este ajuste permite aproximar ou afastar os ecos.

Permite ajustar o aparelho para que possa trabalhar com um ou mais ecos de fundo.

O eixo horizontal da tela geralmente apresenta uma graduação que vai de "0" zero a "10" dez.

Quando temos por exemplo uma espessura de 273 mm e posicionamos na tela do aparelho, o eco inicial em zero e o eco de fundo, que corresponde a espessura de 273 mm em 10, temos aí uma escala de 273 mm.

Ajuste do ponto zero:

É o controle que movimenta os ecos para a direita e esquerda, sem alterar a distância entre eles. Permite posicionar o eco inicial no zero e com o auxílio do ajuste de escala, que afasta ou aproxima os ecos, é possível posicionar os outros ecos de acordo com a calibração utilizada

Ajuste de frequência:

Permite selecionar no aparelho, a frequência do transdutor utilizado.

Nos aparelhos atuais, este ajuste é automático.

Ajuste da Velocidade de Propagação:

Ao ser alterada no aparelho a velocidade de propagação, nota-se claramente na tela que o eco de reflexão, produzido por uma interface, muda de posição na tela, alterando muito pouco a posição do eco inicial.

Com esse ajuste pode-se comparar velocidades de vários materiais.

O aparelho de ultra-som é ajustado para medir o tempo de propagação do som numa determinada distância.

Supressor de ruídos:

Tem a função de um filtro, elimina da tela do aparelho os ecos as pequenas reflexões decorrentes de acoplamento e de estruturas internas de materiais de granulação grosseira (grama).

Deve-se muita atenção na utilização do supressor de ruídos porque se houver pequenas reflexões de descontinuidades muito pequenas, corre-se o risco de eliminá-las da tela.

Blocos de calibração

São blocos utilizados para que se possa verificar as características dos transdutores e fazer a calibração das escalas que serão utilizadas no ensaio.

Devem ser confeccionados ou adquiridos do mesmo material ou de um material ultrasonicamente similar ao material a ser ensaiado. Deve ter suas dimensões calibradas e podem ou não ter descontinuidades naturais ou artificiais. Dois blocos muito

utilizados nas calibrações de escala, características e ângulo de incidência são os blocos conhecidos como bloco **V1** e bloco **V2**.

Blocos de referência

São os blocos específicos para se fazer a comparação entre as reflexões das descontinuidades detectadas ou alguma outra característica específica da peça em ensaio. Podem ser a referência para descontinuidades, estrutura interna do material (atenuação), espessura e etc..

O melhor bloco de referência é feito com uma peça igual a peça a ser ensaiada e se possível contendo as descontinuidades naturais.

Quando são para referência e comparação de reflexão de descontinuidades, possuem furos de fundo plano, com diâmetros padronizados e variados. São utilizados para traçar as curvas de referência.

Ao se detectar uma descontinuidade, é necessário compará-la com alguma referência senão não se terá uma idéia de seu tamanho aproximado. São necessários porque todos os resultados obtidos neste ensaio, devem ser comparados com uma referência calibrada.

Antes de iniciar o ensaio é feita a verificação das condições dos transdutores, calibração da escala e em seguida é traçada a curva de referência.

Os aparelhos devem ser verificados quanto a sua linearidade vertical e linearidade horizontal.

Linearidade vertical

O aparelho deve apresentar linearidade vertical, que deve ser verificada antes de cada ensaio, deve apresentar os ecos em alturas correspondentes com mudanças no controle de decibéis.

Linearidade Horizontal

O aparelho deve ter linearidade horizontal dentro de mais ou menos 2% da escala de distância empregada. A verificação pode ser feita colocando-se no mínimo quatro ecos na tela do aparelho provenientes de um bloco padrão, e verificando-se o posicionamento dos mesmos em relação à faixa de tolerância acima especificada. O bloco V1 pode ser usado, utilizando-se uma escala de 100,0 mm e transdutor na espessura de 25,0 mm. Deve-se conseguir a calibração, posicionando os ecos em: eco inicial "0" - 2,5 - 5 - 7,5 - e 10.

Verificação das características dos transdutores normais

Dependendo de sua frequência, o transdutor apresenta algumas características, tais como a divergência, a detectabilidade e poder de resolução.

Outras características podem ser verificadas num bloco de calibração ou referência.

Os transdutores de maior frequência apresentam maior detectabilidade/sensibilidade que os de frequência menor.

Alguns fabricantes fornecem um sonograma, que é a representação da característica do feixe sônico de vários transdutores em profundidades diferentes, indicando o tamanho da mínima descontinuidade capaz de ser detectada.

Verificação das características dos transdutores angulares

Para os transdutores angulares, as características a serem verificadas são as mesmas que nos normais porém, somam-se outras relacionadas ao ponto de saída do feixe e ao ângulo.

Com o desgaste da sapata, o ponto de saída do feixe sônico será alterado e este ponto precisa ser determinado para que a precisão da localização de uma descontinuidade não seja prejudicada.

Verificação do ponto de saída do feixe sônico:

Para a determinação do ponto de saída, posiciona-se o transdutor voltado para o raio de 100 mm do bloco V1, cultiva-se o eco até ser obtida a maior amplitude. Manter o transdutor nesta posição e utilizar uma marca existente no bloco como referência para traçar na carcaça do transdutor uma marca que coincida com a marca de referência do bloco.

Verificação do ângulo do transdutor:

Com o desgaste da sapata e mudança do ponto de saída do feixe sônico, ocorrerá também a alteração do ângulo.

Saber o ângulo do transdutor é importantíssimo porque para a calcular a localização de uma descontinuidade, será necessário saber o seno, cosseno e tangente deste ângulo.

Para esta verificação utilizam-se os blocos V1 ou V2, procurando onde ele contém a marcação do ângulo correspondente ao ângulo do transdutor, motivo desta verificação.

É raro encontrar um transdutor angular que tenha exatamente o ângulo indicado. Por esse motivo deve-se fazer uma verificação logo no recebimento do transdutor e se o ângulo estiver com desvio de $\pm 2^\circ$, recomenda-se não aceitar o transdutor e exigir a sua substituição.

Determinação da escala para e calibração com transdutores normais

Na tela do aparelho temos um primeiro eco, que chamamos de eco de transmissão. Ele existe mesmo sem um transdutor estar conectado ao cabo coaxial. Quando conectamos o transdutor e o posicionamos na superfície em ensaio, o eco inicial ou também chamado de eco de entrada ficará no mesmo lugar do eco de transmissão, com uma pequena diferença quanto a largura deste eco

A escala dependerá da espessura e de quantos ecos de fundo deseja-se obter.

Determinação da escala para e calibração com transdutores angulares

A calibração com um transdutor angular não é tão simples como a calibração com um transdutor normal pelo fato do feixe sônico não detectar uma espessura e sim uma interface no percurso sônico.

Os fabricantes de aeronaves adotam kits de calibração específicos, geralmente utilizando uma reprodução da peça a ser ensaiada.

Existem blocos que devem ser utilizados por todos aqueles que executam qualquer tipo de ensaio. São os blocos V1 e V2.

Para a calibração da escala para um transdutor angular, o bloco V2 é excelente.

Curva de referência

Como o ensaio por ultra-som baseia-se na comparação das reflexões obtidas das descontinuidades com alguma referência calibrada, traçar uma curva de referência ou utilizar um outro meio similar para a comparação se faz necessário.

As normas, procedimentos e manuais das aeronaves devem indicar o tamanho máximo da descontinuidade aceitável, se pode ou não existir (geralmente as trincas) e a localização aproximada.

Nos casos das curvas traçadas com furos de fundo plano, o critério de aceitação estabelece o quanto a descontinuidade deve ter de reflexão ou amplitude de sinal (eco) em relação a esta curva.

Correção de transferência

Consiste numa correção de ganho (dB) devido a alguma diferença entre o bloco e a peça, por exemplo, o acabamento superficial.

Temperatura

A aparelhagem deve permitir a operação em condições satisfatórias, nas seguintes faixas de temperatura:

- Aparelhos: de 5 a 40° C
- Transdutores: de 5 a 85° C

Temperaturas abaixo ou acima das faixas especificadas são permitidas somente se comprovadas através de testes e técnicas detalhadas, especificações de manuais e normas aplicáveis.

Deve-se manter o aparelho, o transdutor, o bloco de calibração e a peça em ensaio, na mesma temperatura.

Cuidados devem ser tomados para que nenhuma fonte de calor ou refrigeração interfira na calibração ou ensaio.

Vibração

Deve-se evitar que o aparelho e a peça em ensaio, sofram vibrações durante o ensaio.

Determinação da extensão ou área de uma grande descontinuidade

A curva de referência é utilizada para pequenas descontinuidades. Para as grandes, onde é necessário um mapeamento e uma demarcação ou uma descontinuidade linear, onde é necessário medir a sua extensão, utiliza-se os métodos 6 dB, 12 dB e 20 dB.