



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

“INSPEÇÃO DE FEIXES TUBULARES
DE TROCADORES DE CALOR”

RICARDO SCHAYER SABINO

Belo Horizonte-MG, Julho de 2008

RICARDO SCHAYER SABINO

**“INSPEÇÃO DE FEIXES TUBULARES
DE TROCADORES DE CALOR”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Calor e Fluidos

Orientador: Prof. Carlos Alberto Cimini Júnior (UFMG)

Belo Horizonte/MG

Escola de Engenharia da UFMG

2008

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço a toda minha família, especialmente a minha mulher e filhas, não só pela compreensão, como pelo apoio, carinho em todos os momentos e, principalmente, pelo amor incondicional. A minha mãe e meu pai pelo afeto e ajuda motivadora. A minha sogra (in memoriam) e sogro pela amizade. Aos meus irmãos e vó, pela fé.

Agradeço ao meu orientador Cimini pela confiança e paciência. Ao amigo João Mário, pela transmissão de conhecimentos e discussões.

Finalmente, agradeço à equipe de inspeção de equipamentos da refinaria Gabriel Passos, pela oportunidade e pela cumplicidade neste trabalho.

RESUMO

Tomadas de decisão relativas às condições físicas de feixes de trocadores de calor envolvem um importante aspecto de subjetividade relacionado à dificuldade inerente de inspeção destes componentes, causada pelo arranjo complexo de seus tubos e conseqüente falta de acesso visual. Não é incomum, portanto, verificarem-se falhas desses componentes durante a operação de uma planta de processo. O presente trabalho apresenta uma análise crítica do procedimento utilizado usualmente para caracterização e avaliação de feixes tubulares, a partir de resultados de ensaios não-destrutivos. Os resultados da análise realizada pela Gerência de Inspeção de Equipamentos em 30 equipamentos com tubos de aço carbono utilizando-se o ensaio IRIS foram comparados com resultados obtidos pela aplicação de modelos estatísticos: normal, Student, Weibull e valores mínimos extremos. Os parâmetros destes modelos foram estimados pela aplicação do método de máxima verossimilhança e seus ajustes avaliados pelo teste de Anderson-Darling. Foram elaborados testes de hipóteses para avaliação da condição física dos feixes e da necessidade de substituição de seus tubos. Os resultados demonstraram que é usual o sub-dimensionamento das amostras, que o modelo Normal deve ser utilizado com restrições, que o modelo Student não detectou os feixes que deveriam ter seus tubos substituídos e que os modelos Weibull e SEV apresentaram resultados mais conservadores do que os da Gerência de Inspeção de Equipamentos.

Palavras-Chave: análise estatística, dimensionamento de amostras, feixes tubulares, IRIS, distribuição normal, trocadores de calor, distribuição de valores mínimos extremos, Weibull.

ABSTRACT

Decisions making related to the physical conditions of tubular bundles of heat exchangers involves an important subjective aspect due to the intrinsic difficulty of inspection of those components promoted by the complex lay-out of its tubes and consequent lack of visual access. Therefore, it is not unusual to occur failure of those equipments during the campaign of a process plant. This paper presents a critical analysis of common techniques used to represent and evaluate tubular bundles based on non-destructive examinations. The results of the Department of Equipment Inspection's analyses of 30 heat exchangers, with tubes of carbon steel and subjected to IRIS tests, has been compared to results obtained by use of statistical models based on normal, Student, Weibull and smallest extreme value distributions. The parameters of those models have been estimated by the maximum likelihood method and the goodness of fit for each model has been evaluated by the Anderson-Darling test. Hypothesis tests were developed for the evaluation of the physical conditions of the bundles and for the need of replacement of their tubes. The results demonstrate that it is usual to undersize samples, the Normal model can be used with restrictions, the Student model did not detect the bundles with low availability and shall not be used for this kind of analysis, and the Weibull and smallest extreme value models presented more conservative results than the Department of Equipment Inspection's analyses.

Keywords: Statistical analysis, sample sizing, tubular bundles, IRIS, normal distribution, heat exchanger, smallest extreme values, Weibull.

SUMÁRIO

Nomenclatura	ix
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xv
1. Introdução	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Conteúdo do Trabalho	3
2. Objetivo	6
3. Revisão Bibliográfica	7
3.1. Trocadores de calor	7
3.1.1. Trocadores de calor em refinarias de petróleo	7
3.1.2. Classificação de trocadores de calor	10
3.1.3. Projeto de trocadores de calor casco e tubos	12
3.1.4. Mecanismos de falhas em tubos de trocadores de calor	16
3.2. Inspeção de trocadores de calor	18
3.2.1. Inspeção de feixes tubulares em rotina	19
3.2.2. Inspeção de feixes tubulares durante paradas programadas	21
3.2.3. Correntes parasitas	21
3.2.4. IRIS	23

3.2.5.	Outras técnicas de ENDS não-convencionais	27
3.2.6.	Comparação entre as técnicas de ENDS não-convencionais	27
3.3.	Análise de dados provenientes de ensaios IRIS	28
3.3.1.	Determinação do tamanho da amostra	30
3.3.1.1.	Equações para determinação do tamanho da amostra	30
3.3.1.2.	Tabelas para determinação do tamanho da amostra	33
3.3.2.	Distribuições estatísticas	35
3.3.2.1.	Distribuição Normal	36
3.3.2.2.	Distribuição de Student	37
3.3.2.3.	Distribuição Weibull	38
3.3.2.4.	Distribuição de Valores Mínimos Extremos	39
3.3.2.5.	Determinação dos parâmetros das distribuições	40
3.3.2.6.	Testes de aderência	40
3.3.3.	Medidas de posição e dispersão	41
3.3.4.	Teste de hipóteses	42
4.	Metodologia	46
4.1.	Seleção de equipamentos	46
4.2.	Dimensionamento da amostra	47
4.3.	Coleta de dados	49
4.4.	Análise dos dados	50
4.4.1.	Avaliação do feixe pela IE	50
4.4.2.	Crítérios propostos para avaliação do feixe	51

4.4.2.1. Identificação da distribuição estatística	52
4.4.2.2. Critérios para realização do testes de hipóteses	52
4.4.2.3. Análise estratificada por passo	55
5. Resultados e Discussão	56
5.1. Seleção de equipamentos	56
5.2. Dimensionamento da amostra	57
5.3. Coleta de dados	58
5.4. Análise dos dados	60
5.4.1. Avaliação do feixe pela IE	60
5.4.2. Avaliação do feixe segundo os critérios propostos	61
5.4.2.1. Análise de distribuições estatísticas	61
5.4.2.2. Teste de hipóteses	62
5.4.2.3. Análise estratificada por passo	64
6. Conclusões	70
7. Sugestões para trabalhos futuros	72
Referências Bibliográficas	73
Anexos	80

NOMENCLATURA

α – Nível de significância

β – Probabilidade de ocorrência de erros tipo II.

γ – Parâmetro de forma das distribuições Weibull e SEV

η – Parâmetro de escala das distribuições Weibull e SEV

μ – Média da população, parâmetro de posição da distribuição Normal

ν – Número de graus de liberdade da amostra, definido por $n-1$

θ – Fator de posição das distribuições Weibull e SEV

σ – Desvio padrão da população, parâmetro de escala da distribuição Normal

AD – Teste de aderência pelo método de Anderson-Darling

C – Coluna

CCF – Craqueamento catalítico fluidizado

CH2 – Teste de aderência pelo método de Chi-quadrado

DEA – Dietanolamina

$e_{\min\text{-med}}$ – Média amostral

$e_{\min\text{-min}}$ – Espessura mínima detectada pelo ensaio IRIS

$e_{\min\text{-req}}$ – Espessura mínima requerida para operação confiável durante a próxima campanha

e_{nom} – Espessura nominal do tubo

e_{proj} – Espessura de projeto do tubo, calculada pela eq. 3.1.

e_{ref} – espessura mínima de referência

e_{req} – Espessura requerida para operação confiável durante a próxima campanha

$e_{req-pad}$ – Espessura requerida padronizada pela eq. 4.3.

END – Ensaio não-destrutivo

GoF – Testes de aderência ou, em inglês, Goodness-of-fit

H_0 – Hipótese nula

H_1 – Hipótese alternativa

IE – Gerência de inspeção de equipamentos

IRIS – Sistema de inspeção interna rotativo ou, em inglês, “Internal Rotary Inspection System”

KS – Teste de aderência pelo método de Kolmogorov-Smirnov

L – Linha

ME – Margem de erro

MLE – Método da máxima verossimilhança ou, em inglês, “maximum likelihood estimation”

n – Tamanho da amostra

N – Tamanho da população, ou seja, o número de tubos no feixe

n_0 – Estimativa inicial do tamanho da amostra

P_1 – Pressão interna

r – Erro padrão amostral

s – Desvio padrão amostral

R_i – Raio interno do tubo

REGAP – Refinaria Gabriel Passos da empresa PETROBRAS S.A.

S_{adm} – Tensão admissível determinada pelo parágrafo UCS-27 do código ASME.

SEV – Valores Mínimos Extremos

SNP – Sonda não passa, indicativo que não foi possível a realização do ensaio IRIS no tubo selecionado.

T – Taxa de corrosão do feixe

t_{acum} – Tempo de operação que o feixe acumulou até a data da inspeção

t_{camp} – Tempo previsto para a próxima campanha

TCL – Teorema central do limite

T_{max} – taxa de corrosão máxima do feixe

TEMA – Associação dos fabricantes de trocadores de calor tubular ou, em inglês, “Tubular Exchanger Manufactures Association”

\bar{x} – Média da população, ou média aritmética

Z_α – Abscissa da distribuição Normal para qual a área das caudas sob a curva fica limitada ao valor de α

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama simplificado de uma unidade de destilação. Trocadores de calor estão presentes em diversas etapas do processo: 1-pré-aquecimento do petróleo; 2-condensadores de topo; 3-resfriadores de produtos; 4-reguladores do fracionamento; 5- refeedores de fundo. (adaptado de MATAR e HATCH, 2000). 9

Figura 3.2 – Diagrama esquemático de uma unidade de CCF. Trocadores de calor desempenham diversos papéis nesta unidade: 1-pré-aquecimento de carga; 2-condensadores de topo; 3-resfriadores de produtos; 4- reguladores do fracionamento; 5-refervedores de fundo; 6- gerador de vapor. (adaptado de API, 2003a). 10

Figura 3.3 – Tipos de trocadores de calor, de acordo com o tipo de construção: a- bi-tubular; b- casco e tubos; c- trocadores de placas. (adaptado de BEJAN e KRAUS, 2003). 12

Figura 3.4 – Classificação de trocadores de calor casco e tubos de acordo com o arranjo construtivo, segundo a norma TEMA. (adaptado de TEMA, 1998). 13

Figura 3.5 – Vista em corte de um permutador de calor casco e tubos com feixe e tampa flutuante – modelo TEMA AES. (adaptado de SABINO et al, 2007). 14

Figura 3.6 – Detalhe de tubos de aço carbono removidos para inspeção que apresentaram perda de espessura significativa. As letras E e I identificam as superfícies externa e interna dos tubos, respectivamente. (fonte: autor). 17

Figura 3.7 – Detalhe de tubo de aço carbono apresentando corrosão por pits e furo. (fonte: autor). 17

Figura 3.8 – Feixes tubulares típicos. a- vista lateral; b- vista do espelho; c- detalhe da disposição dos tubos com a montagem do espelho. (fonte: autor). 19

Figura 3.9– Representação da sonda utilizada durante o ensaio de correntes parasitas. (adaptada de OLYMPUS, 2006). 22

Figura 3.10 – Desenho esquemático da técnica pulso-eco, onde o mesmo elemento funciona como emissor e receptor da onda sonora. As diversas posições ilustram os diversos estágios que a onda percorre: a- emissão; b- propagação em direção à superfície oposta do material; c- reflexão; d- propagação de retorno; e- recepção. (adaptado de SHULL, 2002). 24

Figura 3.11 – Representação do cabeçote utilizado para execução do ensaio IRIS. a- transdutor; b- espelho inclinado; c- turbina; d- dispositivo centralizador; e- conduíte. (adaptado de MKC, 2008). 25

Figura 3.12 – Realização do ensaio IRIS. a- Inspetor realizando ensaio; b- Imagem de tubo em boas condições; c- Imagem de defeito (furo) detectado pelo ensaio. (fonte: autor). 26

Figura 3.13 – Representação do nível de significância, intervalo de confiança e margem de erro. (fonte: autor). 32

Figura 3.14 – Representação da geometria de uma distribuição Normal. O valores indicados são relativos à área sob a curva limitada pelas cotas (adaptado de JURAN e GODFREY, 1998). 36

Figura 3.15 – Representação das diversas curvas provenientes da função de distribuição Weibull. As mudanças dos parâmetros desta função permite a obtenção de aproximações para diversas outras distribuições, tornando a Weibull uma das funções mais versáteis. (fonte: autor). 38

Figura 3.16 – Representação dos três tipos de teste. A região hachurada representa a área de rejeição de cada teste. (fonte: autor). 43

Figura 3.17 – Representação dos níveis de confiança e regiões críticas em um teste de hipótese. As hachuras representam as regiões críticas - áreas de rejeição de H_0 . (fonte: autor). 44

- Figura 3.18 – Representação do erro tipo II. A curva preta corresponde à distribuição da média amostral para H_0 verdadeiro e a vermelha corresponde à distribuição da média amostral para H_1 verdadeiro. A área vermelha corresponde à probabilidade β . (fonte: autor). 44
- Figura 3.19 – Representação do P-valor. Nas figuras, o p-valor é representado pela área vermelha e a área azul corresponde à α : a- condição de aprovação de H_0 . b- condição de reprovação de H_0 . (fonte: autor). 45
- Figura 4.1 – Demonstração do critério utilizado para definição da necessidade de aumento da amostra. (fonte: autor). 48
- Figura 4.2 – Operador executando limpeza de feixe tubular por hidrojateamento. (fonte: RODRIGUES, 2002). 49
- Figura 5.1 – Exemplos de marcação de tubo para realização do ensaio IRIS. a- 103-E-06. b- 104-E-09B. (fonte: autor). 58
- Figura 5.2 – Histograma dos ajustes obtidos pelo teste de AD para as distribuições Normal, Weibull e SEV. (fonte: autor). 61
- Figura 5.3 – Representação do número de feixes reprovados pela IE e pelo método proposto neste trabalho. (fonte: autor). 63
- Figura 5.4 – Teste de homogeneidade da amostra utilizando um nível de confiança de 95%. Nos casos em que as variâncias se mostraram distintas, porém as médias iguais, foi recomendado o aumento da amostra. (fonte: autor). 64
- Figura 5.5 – Tamanho da amostra para populações estratificadas por passo. (fonte: autor). 65
- Figura 5.6 – Histograma dos ajustes obtidos pelo teste de AD para as distribuições: Normal, Weibull e de SEV, aplicado às amostras estratificadas por passo. (fonte: autor). 66

Figura 5.7 – Histograma dos equipamentos reprovados. Na análise estratificada por passo, a reprovação de um dos passos determinou a substituição dos tubos. (fonte: autor). 67

Figura 5.8 – Intervalos de confiança a 95% para os resultados dos testes de AD. (fonte: autor). 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Espessuras de projeto para tubos de aço carbono com diâmetro nominal de 19mm, agrupadas por faixas de pressão. (Adaptado de PETROBRAS, 2004)	15
Tabela 3.2 – Desempenho na detecção de falhas de acordo com o tipo de material do tubo. (fonte: BIRRING, 2004)	28
Tabela 3.3 – Códigos do tamanho da amostra (adaptada de ABNT, 1985)	34
Tabela 3.4 – Relação entre o código do tamanho da amostra e o plano de inspeção. (adaptada de ABNT, 1985)	35
Tabela 5.1 – Comparação entre as definições de tamanho da amostra	57
Tabela 5.2 – Verificação da necessidade de aumento do tamanho da amostra	59
Tabela 5.3 – Resultado da avaliação dos resultados IRIS realizada pela IE	60
Tabela A.1 – Dados construtivos e operacionais dos equipamentos selecionados para desenvolvimento do estudo	80
Tabela A.2 – Resultados dos ensaios IRIS	84
Tabela A.3 – Testes de aderência – Dados agrupados por feixe	92
Tabela A.4 – Testes de hipóteses – Dados agrupados por feixe	93
Tabela A.5 – Testes de homogeneidade das amostras	94
Tabela A.6 – Testes de aderência – Dados estratificados por passo	95
Tabela A.7 – Testes de hipóteses – Dados estratificados por passo	97

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Considerações Iniciais

Trocadores de calor são equipamentos amplamente utilizados em indústrias, destinados à troca de energia térmica entre dois fluidos. Nas plantas de destilação atmosférica da refinaria Gabriel Passos (REGAP), estes equipamentos correspondem a 70% dos tipos de vasos de pressão existentes.

Uma das funções dos trocadores de calor, além da função básica de troca de energia, é o aumento da eficiência energética de uma planta de processo, como no caso de uma bateria de pré-aquecimento, na qual o petróleo é aquecido por um produto quente que, posteriormente, será enviado para um tanque de armazenamento. Desta forma, o calor, que seria perdido se o produto quente tivesse sido encaminhado diretamente para o tanque, é aproveitado para aquecer o petróleo, diminuindo a energia de liberação necessária no forno aquecedor de carga. Sendo assim, este equipamento se torna extremamente importante na logística operacional de qualquer indústria, uma vez que a otimização do consumo de energia é essencial para o funcionamento economicamente viável e lucrativo, assim como para a preservação do meio ambiente.

O tipo de trocador de calor mais utilizado em indústrias é o de casco e tubos. Nesta concepção, um casco envolve um conjunto de tubos, denominado feixe tubular, por onde circulam fluidos interna e externamente aos tubos. As principais vantagens obtidas por este modelo são a flexibilidade operacional e a facilidade de manutenção.

Os principais componentes deste tipo de trocador de calor, além do casco e do feixe tubular, são as tampas e o carretel. O casco, o carretel e as tampas possuem amplo acesso para inspeção, uma vez que são desmontáveis ou permitem acesso interno,

possibilitando a utilização de métodos convencionais para este serviço, tais como inspeção visual, por partículas magnéticas ou por líquido penetrante. No feixe tubular, entretanto, o acesso para inspeção é limitado, pois a disposição e geometria de seus tubos impedem o acesso visual a estas peças, tornando-se impraticável a utilização de técnicas de inspeção convencionais para avaliação de suas condições físicas.

Com isto, a inspeção de feixes usualmente é realizada em uma amostra de tubos que são removidos e seccionados, de modo que se tenha acesso visual às suas superfícies internas e externas, ou por meio da aplicação de técnicas não convencionais de ensaios não-destrutivos (ENDs), tais como IRIS – *Internal Rotary Inspection System* (Sistema de Inspeção Interna Rotatória), para tubos ferromagnéticos e correntes parasitas para tubos não-ferromagnéticos.

Durante paradas de produção para inspeção e manutenção, os recursos tempo, pessoa e ferramentas devem ser bem aproveitados, de forma a garantir que os serviços sejam realizados com a máxima eficiência, buscando-se uma qualidade ótima em um mínimo de tempo. Sendo assim, na maioria dos casos, torna-se impraticável a inspeção da totalidade dos tubos visualmente ou pela utilização de ENDs.

Uma vez que o conjunto de tubos que compõe o feixe tubular pode ser considerado uma população de elementos que estão inseridos em um mesmo ambiente agressivo, a inspeção de feixes torna-se uma questão intrinsecamente estatística, na qual é necessário selecionar uma amostra de tubos e, a partir de sua análise, inferir dados sobre a população de tubos para tomada de decisões relativa à continuidade operacional deste componente.

Apesar destas características, por falta de padrões e estudos específicos, este serviço é usualmente realizado de forma determinística, não sendo utilizado um tratamento estatístico adequado para inferir respostas das principais questões relacionadas às condições físicas destes componentes, tais como: quando irá ocorrer a falha do feixe ou quando deverá ser realizada uma intervenção para tamponamento ou substituição dos tubos.

Este estudo realiza uma análise crítica das técnicas utilizadas para avaliação de feixes tubulares por meio da comparação entre resultados obtidos pela análise tradicional, que vem sendo realizada durante paradas programadas de unidades, com aqueles obtidos pela análise com os modelos Normal, Student, Valores Mínimos Extremos (SEV) e Weibull. São discutidos, ainda, os critérios para determinação do tamanho da amostra e da homogeneidade da condição física do feixe tubular.

Deste modo, este estudo tem por objetivo aprimorar a metodologia de inspeção de feixes tubulares de trocadores de calor, por meio da implementação de métodos de amostragem padronizados e técnicas estatísticas, possibilitando a redução da subjetividade das análises durante os serviços de inspeção destes componentes e garantindo aumento da sua confiabilidade durante campanhas operacionais.

1.2. Conteúdo do Trabalho

A divisão do trabalho foi planejada da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo foi realizada uma apresentação do equipamento: trocador de calor e do problema relativo à inspeção de feixes tubulares.

- Capítulo 2 – Objetivos

Neste capítulo foram abordados os principais objetivos e a motivação para realização deste projeto.

- Capítulo 3 – Revisão bibliográfica

Este capítulo abordou os principais conceitos e teorias relativas à inspeção de feixes tubulares de trocadores de calor, sendo dividido nas seguintes seções:

- 3.1 – Trocadores de calor

Nesta seção foram abordados os conceitos e teorias principais convencionadas para seleção e projeto de trocadores de calor, sendo dado foco ao componente feixe tubular. Foram abordadas, ainda, as teorias de falhas destes componentes.

- 3.2 – Inspeção de feixes tubulares

Nesta seção foram abordadas as técnicas e métodos empregados para inspeção de feixes tubulares, identificando suas vantagens, desvantagens e restrições.

- 3.3 – Análise estatística de dados provenientes de ensaios IRIS

Nesta seção foram abordadas técnicas de dimensionamento de amostra, identificação das principais distribuições estatísticas utilizadas para representação de dados provenientes de ensaios IRIS e apresentação de testes de aderência para verificação da qualidade do ajuste das distribuições aos dados da amostra.

Foram abordados, ainda, os conceitos e teorias de testes de hipóteses para tomada de decisão baseada em inferências provenientes de dados amostrais, identificando os tipos de erros e a interpretação dos resultados pela utilização do p-valor.

- Capítulo 4 – Metodologia

Nesse capítulo foram descritas as considerações adotadas para aquisição dos dados, tais como: critérios para escolha dos equipamentos a serem estudados, seleção das amostras no campo e procedimento para realização do ensaio por ultra-som utilizando-se a técnica IRIS.

Foram apresentados os critérios e parâmetros utilizados pela Gerência de Inspeção de Equipamentos (IE), da REGAP, para avaliação dos feixes. Sendo apresentados, também, os critérios e parâmetros propostos para realização dos testes de hipóteses adotados para análises estatísticas dos feixes.

- Capítulo 5 – Resultados e Discussão

No capítulo 5, inicialmente, foram apresentados os valores propostos para dimensionamento da amostra e aqueles praticados pela IE, realizando uma comparação entre os valores obtidos pelos diferentes critérios. Foram apresentados os resultados dos ensaios IRIS realizados nos tubos selecionados pela IE.

Os resultados das análises dos feixes pela IE foram apresentados e, em seguida, foi iniciada a abordagem estatística, sendo realizados os testes de aderência das distribuições selecionadas e testes de hipóteses para representação do feixe como um todo. Os resultados obtidos pelos dois critérios, IE e abordagem estatística, foram confrontados de forma a se identificar as coerências e divergências existentes na análise de cada equipamento.

De forma experimental, foi realizada a análise estatística estratificando-se as populações do feixe por passo, sendo aplicada a mesma metodologia utilizada para os dados agrupados por feixe. Os resultados foram novamente confrontados, quando se pôde observar o refinamento da técnica.

- Capítulo 6 – Conclusões

No capítulo 6 foram relatadas as conclusões obtidas e feita uma relação das mesmas com os objetivos propostos.

CAPÍTULO 2

Objetivo

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo comparativo dos métodos utilizados para avaliação das condições físicas de feixes tubulares de trocadores de calor, sendo utilizados, para esta comparação, os resultados obtidos pela técnica tradicionalmente adotada para análise dos dados provenientes de ensaios com aqueles obtidos por meio da utilização dos modelos estatísticos Normal, Student, SEV e Weibull.

Deste modo, procurou-se aprimorar a metodologia para inspeção de feixes tubulares de trocadores de calor, de modo a reduzir a subjetividade envolvida neste serviço pela utilização de técnicas estatísticas.

CAPÍTULO 3

Revisão Bibliográfica

3.1. Trocadores de calor

Trocadores de calor são equipamentos que realizam a troca térmica entre dois fluidos ou entre um fluido e o ambiente (BEJAN & KRAUS, 2003). Esta definição apesar de ampla, usualmente não inclui equipamentos como fornos, caldeiras, torres de resfriamento ou colunas de separação, pois, apesar destes também realizarem troca de calor entre fluidos, possuem queima de combustível (componentes expostos a chamas) ou troca simultânea de calor e massa (GEAQUINTO, 2007).

Desta forma, os trocadores de calor podem ser definidos, de forma mais restritiva, como equipamentos não sujeitos a chamas, onde dois ou mais fluidos realizam troca de calor, sem que ocorra contato direto entre os fluidos, em condições normais de operação.

Trocadores de calor estão presentes em diversos sistemas, tais como o corpo humano, automóveis, computadores, usinas de energia, indústrias em geral e sistemas de aquecimento e resfriamento residenciais (OHADI, 2005).

3.1.1. Trocadores de calor em refinarias de petróleo

A transferência de calor é, talvez, o processo mais importante e mais comum em indústrias químicas e petroquímicas. A viabilidade econômica do funcionamento de uma planta industrial é diretamente relacionada com a eficácia da recuperação do calor (LUDWIG, 2001). Deste modo, trocadores de calor assumem um caráter essencial no processo, uma vez que permitem aumentar esta eficácia por meio do reaproveitamento de calor entre os diversos fluidos empregados no processo.

Como exemplo, pode ser citado uma bateria de pré-aquecimento de uma unidade de destilação atmosférica, na qual o petróleo, antes de entrar no forno aquecedor de carga, passa por uma série de trocadores de calor para ser aquecido por um produto quente

que será enviado para tanques de armazenamento, ou seja, o calor, que seria perdido para o ambiente se o produto chegasse quente aos tanques, é aproveitado para aquecer o petróleo.

Além do caráter econômico, o aumento da eficiência energética significa uma redução do desperdício de energia e combustíveis: prática que vem sendo exigida por órgãos ambientais e pela sociedade, devido aos problemas ambientais causados pelo aumento dos índices de poluição e do aquecimento global.

Em refinarias de petróleo, trocadores de calor são utilizados em diversas etapas do processo (MATAR e HATCH, 2000). Para ilustrar algumas destas aplicações, as Fig. 3.1 e 3.2 apresentam os esquemas típicos de uma unidade de destilação atmosférica e a vácuo e de uma unidade de craqueamento catalítico fluidizado (CCF), respectivamente, que são as unidades básicas de uma refinaria de petróleo, existindo unidades semelhantes em todas as refinarias que atualmente estão em operação no Brasil (PETROBRAS, 2008).

Na unidade de destilação atmosférica ocorre a primeira separação dos derivados de petróleo utilizando-se o princípio físico da destilação, que é baseado nas diferenças de pontos de ebulição/condensação dos diversos produtos, tais como nafta, gasolina, querosene e diesel (MATAR e HATCH, 2000). Neste processo, o petróleo é aquecido em um forno e fracionado em uma torre de pressão atmosférica que possui diversas painéis em diferentes alturas. A temperatura de cada painel determinará o produto que será retirado em cada nível. Em seguida, o produto de fundo dessa torre passa por um outro forno e é fracionado em uma segunda torre, chamada torre à vácuo, por ter pressão manométrica negativa, sendo extraídas outras parcelas de produtos. (PETROBRAS, 2008).

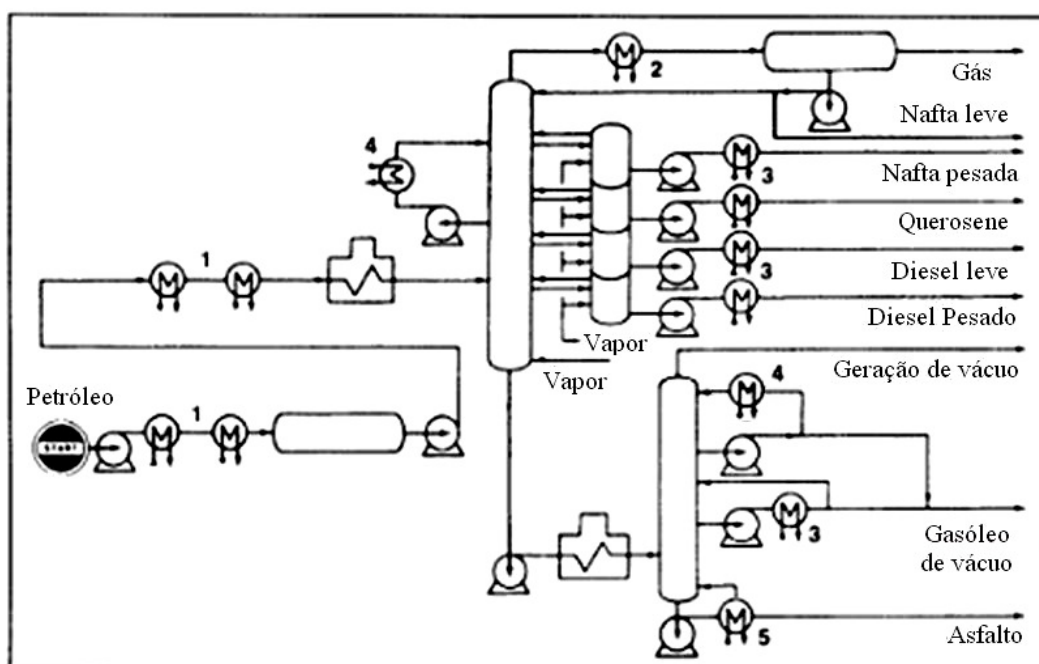


Figura 3.1 – Diagrama simplificado de uma unidade de destilação. Trocadores de calor estão presentes em diversas etapas do processo: 1-pré-aquecimento do petróleo; 2-condensadores de topo; 3-resfriadores de produtos; 4-reguladores do fracionamento; 5- refervedores de fundo. (adaptado de MATAR e HATCH, 2000).

Na unidade de CCF, o produto de fundo da torre de vácuo é fracionado por meio de um processo físico-químico, onde um catalisador é utilizado para quebrar as moléculas de hidrocarbonetos pesados, convertendo-as em gasolina e outros destilados com maior valor comercial. (PETROBRAS, 2008).

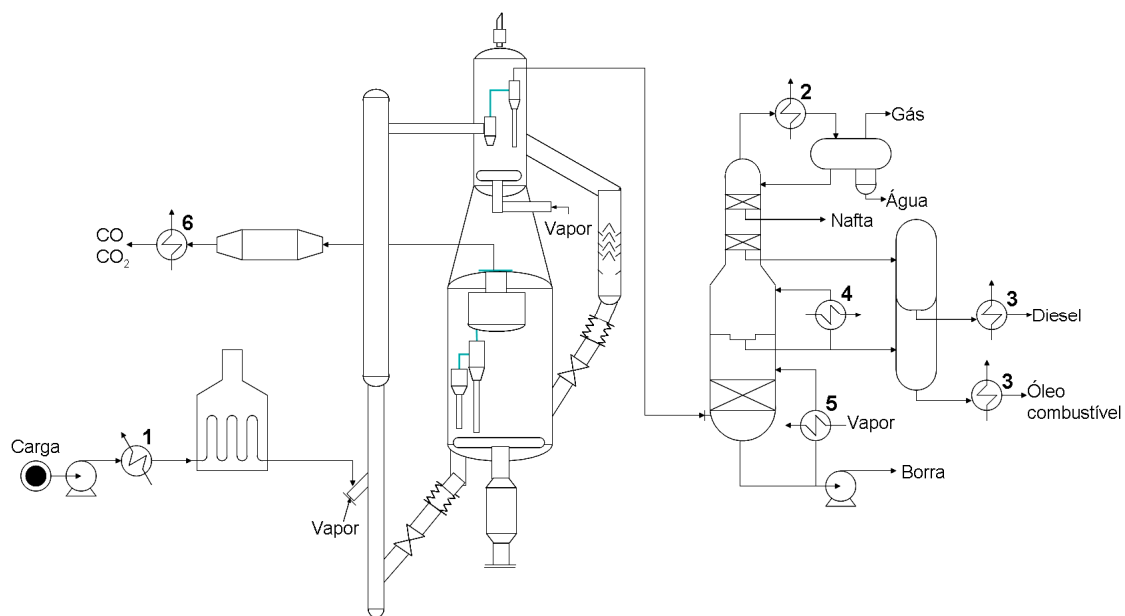


Figura 3.2 – Diagrama esquemático de uma unidade de CCF. Trocadores de calor desempenham diversos papéis nesta unidade: 1-pré-aquecimento de carga; 2-condensadores de topo; 3-resfriadores de produtos; 4-reguladores do fracionamento; 5-refervedores de fundo; 6- gerador de vapor. (adaptado de API, 2003a).

3.1.2. Classificação de trocadores de calor

Trocadores de calor possuem diversas classificações de acordo com o tipo de serviço, construção, mecanismos de transferência de calor, número de fluidos de troca térmica, relação área de troca com seu volume físico e tipo de superfície de troca térmica (SHAH, 1981). No presente estudo, serão abordadas apenas as classificações por tipo de serviço e por tipo de construção, uma vez que são estas classificações que caracterizam o tipo de mecanismos de danos/falhas e que determinam as técnicas utilizadas para a inspeção.

A classificação de acordo com o tipo de serviço realizado pelo equipamento distingue os trocadores de calor como (SHAH, 1981 e TELLES, 1996):

- trocadores de calor, propriamente ditos, quando os dois fluidos são de processo e a troca de energia entre estes fluidos é necessária para a produção;
- aquecedores, quando um fluido de processo é aquecido por outro de utilidades – normalmente vapor d’água;

- resfriadores, quando a função é resfriar um líquido por meio de um fluido de utilidades – usualmente água ou ar;
- condensadores, quando o calor de um fluido precisa ser removido até a sua condensação, parcial ou total;
- vaporizador, quando é necessário vaporizar um líquido;
- refeedores, tipo especial de vaporizador empregado no fundo de torres de separação;
- refrigeradores, equipamento que utiliza fluidos refrigerantes para obter resfriamentos abaixo da temperatura ambiente.

A classificação quanto ao tipo de construção faz referência ao arranjo dos componentes e peças que formam o equipamento, sendo os principais:

- bi-tubulares e multi-tubulares (Fig. 3.3): são equipamentos de construção simples, que evitam problemas de dilatações diferenciais, porém possuem reduzida área de troca térmica e apresentam diversos problemas intrínsecos à sua manutenção.
- casco e tubos (Fig. 3.3): são equipamentos que podem ser considerados evolução do multi-tubular, sendo o tipo de trocadores mais encontrado em indústrias (TELLES, 1996 e SILVEIRA, 2008), sendo constituídos, basicamente, por um casco que envolve um feixe tubular por onde circulam os fluidos externa e internamente aos tubos. Esta classe de equipamentos ainda possui diversas sub-classes construtivas padronizadas pela TEMA – “Tubular Exchanger Manufacturers Association”, que serão apresentadas posteriormente.
- trocadores de placas (Fig. 3.3): neste tipo de equipamento, placas com relevos específicos são posicionadas consecutivamente de forma a criar canais para circulação dos fluidos de troca térmica. Apesar da alta relação área de troca por volume do equipamento, estes trocadores de calor necessitam de materiais especiais e possuem pressões de operação limitadas devido aos problemas de vedação entre suas placas ou tampo plano.

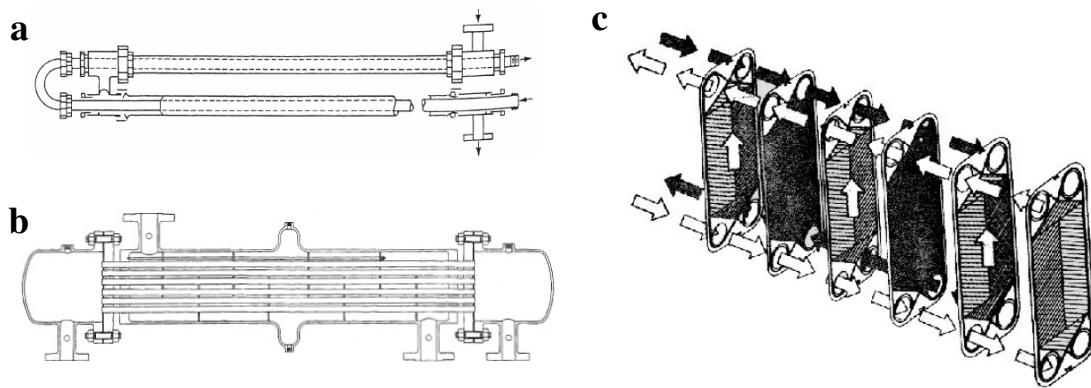


Figura 3.3 – Tipos de trocadores de calor, de acordo com o tipo de construção: a- bi-tubular; b- casco e tubos; c- trocadores de placas. (adaptado de BEJAN e KRAUS, 2003).

Neste trabalho, foram estudados, especificamente, os trocadores do tipo casco e tubos, por serem, como já mencionado, os mais utilizados em indústrias petroquímicas, atualmente. Como exemplo pode ser citado o arranjo das plantas de destilações da REGAP, onde dos 138 trocadores de calor existentes, 97% são do tipo casco e tubos, sendo que em outras indústrias, este percentual pode ser ainda maior (LIEBERMAN e LIEBERMAN, 2003).

3.1.3. Projeto de trocadores de calor casco e tubos

Uma vez que trocadores de calor possuem fluidos sob pressão, seu projeto segue a metodologia adotada para o projeto de vasos de pressão (SHAH e KENNETH, 1999 e BRASIL, 1998). A construção destes equipamentos é regida por diversas normas e códigos (API, 2003b, PETROBRAS, 2001, TEMA, 1988), sendo que para o caso específico de trocadores de calor do tipo casco e tubos, o código da TEMA (LUDWIG, 2001), apresenta papel de destaque, servindo como referência para a maior parte dos projetistas e fabricantes de trocadores de calor em todo o mundo.

O TEMA classifica os trocadores de calor casco e tubos de acordo com o seu arranjo construtivo, Fig. 3.4, e de acordo com a severidade da aplicação, sendo:

- Classe R: aplicações severas, como indústrias de petróleo e petroquímicas;

- Classe C: serviços moderados, são trocadores de calor comerciais nos quais projetos genéricos são utilizados para aplicações em geral;
- Classe B: trocadores de calor de indústrias químicas.

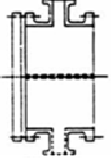
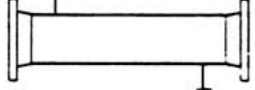
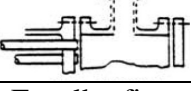
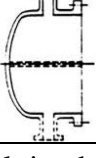
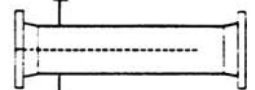
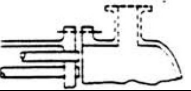
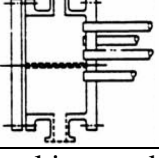
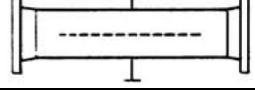
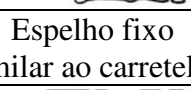
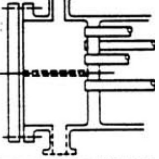
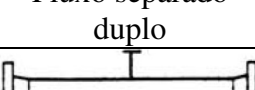
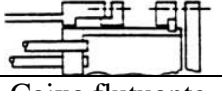
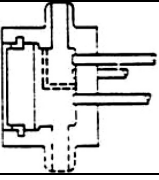
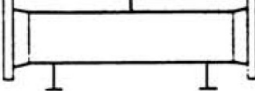
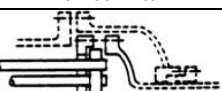
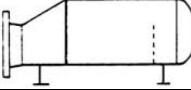
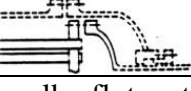
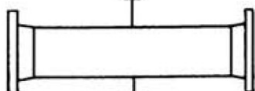
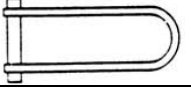

Extremidades frontais		Cascos		Extremidades finais	
A		E		L	
	Carretel e tampa removíveis		Passo único		Espelho fixo Similar ao carretel A
B		F		M	
	Carretel tipo boleado (carretel integral)		Dois passos no casco com chicana longitudinal		Espelho fixo Similar ao carretel B
C		G		N	
	Carretel integrado ao feixe e tampas removíveis		Fluxo separado		Espelho fixo Similar ao carretel N
N		H		P	
	Carretel integrado ao casco e feixe com tampa removível		Fluxo separado duplo		Caixa flutuante com vedação externa
D		J		S	
	Carretel especial para altas pressões		Fluxo dividido		Espelho flutuante com anel bi-partido
		K		T	
			Refervedor		Espelho flutuante com flange
		X		U	
			Fluxo cruzado		Feixe tubular em U
				W	
					Espelho flutuante com vedação no casco

Figura 3.4 – Classificação de trocadores de calor casco e tubos de acordo com o arranjo construtivo, segundo a norma TEMA. (adaptado de TEMA, 1998).

O projeto de trocadores de calor deve ter compromisso com quatro aspectos fundamentais: permitir dilatações térmicas, possuir troca de calor eficiente, facilidade para limpeza e robustez mecânica (LIEBERMAN e LIEBERMAN, 2003). Com base nestes aspectos, dentre os diversos arranjos construtivos, o mais comum é o tipo AES (Fig. 3.5) – constituído por carretel e tampas removíveis, casco de um passe e espelho flutuante com anel bi-partido, sendo que nas unidades de destilação da REGAP, este arranjo chega a representar 77% dos trocadores casco e tubos existentes.

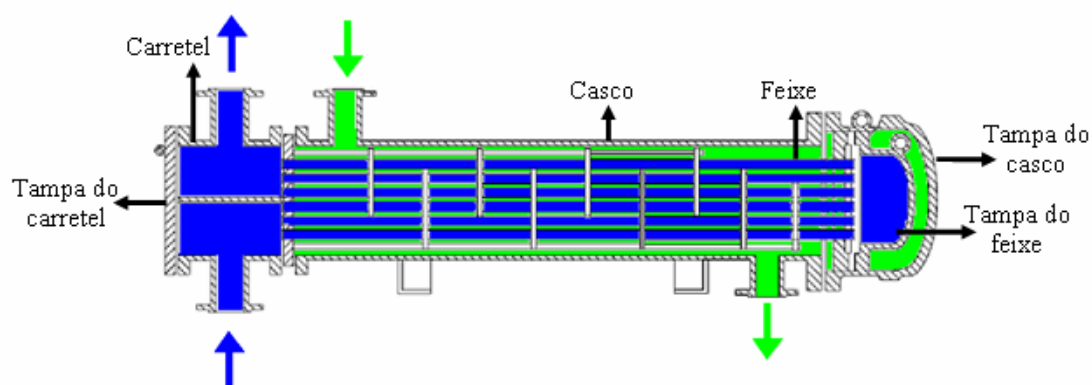


Figura 3.5 – Vista em corte de um trocador de calor casco e tubos com feixe e tampa flutuante – modelo TEMA AES. (adaptado de SABINO et al, 2007).

Os aspectos fundamentais citados anteriormente são atendidos por este arranjo, proporcionando:

- possibilidade de dilatações térmicas de seus tubos, uma vez que a tampa do feixe possui liberdade para se movimentar, não estando fixa à nenhuma parte do casco;
- flexibilidade para aumento do número de passos pelo lado dos tubos, sendo possível alterar o número de passos com pequenas mudanças construtivas no carretel e espelhos, garantindo a eficiência de troca térmica;
- facilidade de limpeza, garantida pelos componentes removíveis;
- robustez mecânica, tendo em vista que o projeto de seu casco é um projeto de vaso de pressão e, por isso, uma ampla faixa de pressão de operação é atendida.

A norma TEMA (TEMA, 1998) cita que o projeto dos componentes de trocadores de calor deve ser norteado pelos requisitos do código ASME VIII, divisão 1. Para os tubos, a espessura mínima de parede deve ser calculada considerando-se a geometria de um casco cilíndrico exposto a pressão interna ou externa, sendo adotado o maior valor entre aqueles obtidos por estas condições (TELLES, 1996). O parágrafo UG-27 (ASME, 2006) especifica a seguinte relação para a espessura de vasos cilíndricos submetidos à pressão interna (supondo tubos sem costura):

$$e_{proj} = \frac{P_i \cdot R_i}{S_{adm} - 0,6 \cdot P_i} \quad (3.1)$$

Onde: e_{proj} é a espessura do vaso ou tubo, R_i é o raio interno do cilindro, P_i é a pressão interna e S_{adm} é a tensão admissível determinada pelo parágrafo UCS-27 desta mesma norma. O parágrafo UG-28 apresenta o cálculo iterativo para vasos submetidos à pressão externa. Estas espessuras podem ser agrupadas por material e faixa de pressão, Tab. 3.1 (PETROBRAS, 2004).

Tabela 3.1 – Espessuras de projeto para tubos de aço carbono com diâmetro nominal de 19mm, agrupadas por faixas de pressão. (Adaptado de PETROBRAS, 2004)

Faixa de pressão (MPa)	e_{proj} (mm)
até 1	0,2
de 1 a 2	0,3
de 2 a 3	0,4
de 3 a 4,6	0,7

As dimensões dos tubos são padronizadas pelo código TEMA, sendo as medidas mais usuais iguais a: comprimento de 6m (20ft), diâmetro externo de 19mm (3/4”) e espessura de parede de 2,1mm (BWG 14). A padronização busca a redução de custos de fabricação e de estoques de peças para manutenção.

O principal material utilizado para confecção dos tubos é o aço carbono (TELLES, 2003), porém em casos específicos, onde existem agentes agressivos ou temperaturas incompatíveis, materiais mais nobres como aços inoxidáveis, latão ou titânio, também

são adotados. Para se ilustrar a hegemonia da utilização do aço carbono, podem ser citados os trocadores de calor casco e tubos das unidades de destilações da REGAP, dos quais 80% são fabricados em aço carbono.

3.1.4. Mecanismos de falhas em tubos de trocadores de calor

Em níveis diferentes, os materiais utilizados em engenharia interagem com o meio a que são expostos. Usualmente, esta interação provoca uma deterioração deste material, causando perda de suas propriedades, desgastes ou falhas (CALLISTER, 2002). Mecanismos de deterioração são diferentes para cada tipo de material e ambiente, porém, em geral, a deterioração causada pela interação material-ambiente com perda das propriedades do primeiro é denominada corrosão (GENTIL, 2007).

Devido aos diversos meios agressivos em refinarias de petróleo, feixes tubulares de trocadores de calor estão sujeitos a diferentes mecanismos de deterioração, sendo as falhas destes elementos caracterizadas por furos, trincas ou rompimentos. Os principais mecanismos de deterioração são (API, 2003a): fragilização pelo revenido, fragilização a 885°F, erosão, fadiga, cavitação, corrosão microbiológica, perda de espessura uniforme ou em pontos localizados, corrosão puntiforme, corrosão ou fragilização cáustica, corrosão seletiva, corrosão galvânica, corrosão sob-tensão, fragilização por hidrogênio, corrosão por ácido clorídrico, corrosão por ácidos politiônicos, entre outros.

O documento API RP 571 apresenta características detalhadas para cada um desses mecanismos, assim como fluxogramas das principais unidades de uma refinaria de petróleo, identificando as regiões passíveis de ocorrência.

Para o caso específico de trocadores de calor com tubos de aço carbono, os principais efeitos causados pelos diversos mecanismos de deterioração são: perda de espessura generalizada ou localizada, Fig. 3.6, e corrosão na forma de pits, Fig. 3.7.

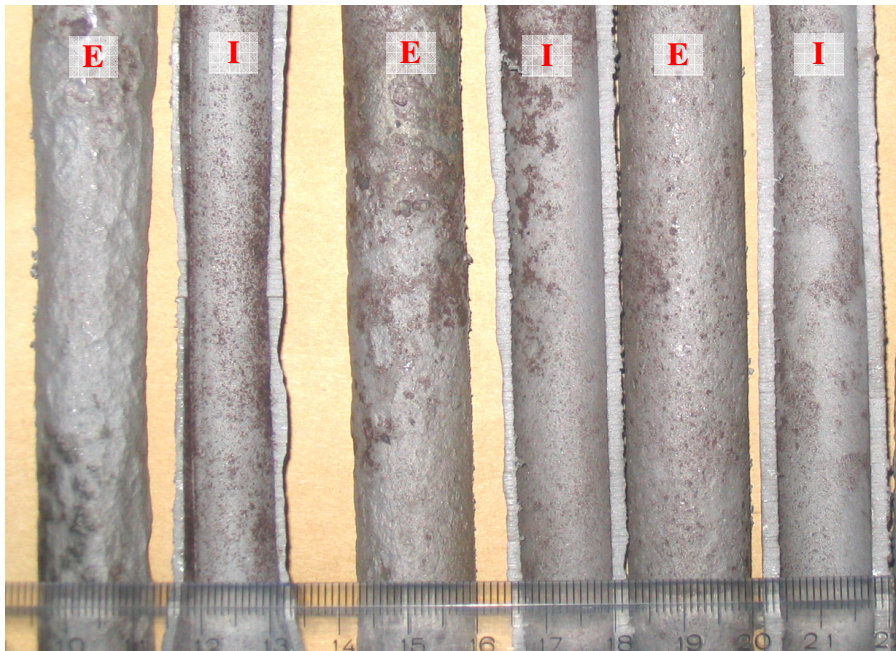


Figura 3.6 – Detalhe de tubos de aço carbono removidos para inspeção que apresentaram perda de espessura significativa. As letras E e I identificam as superfícies externa e interna dos tubos, respectivamente. (fonte: autor)



Figura 3.7 – Detalhe de tubo de aço carbono apresentando corrosão por pits e furo. (fonte: autor)

3.2. Inspeção de trocadores de calor

De uma forma geral, a inspeção de equipamentos tem por objetivo a identificação das condições físicas, identificando o tipo de deterioração que possa estar ocorrendo em seus componentes, bem como as causas e taxas de progressão (API, 2001). Conseqüentemente a inspeção de equipamentos tem como meta assegurar a integridade física, mantendo a disponibilidade e confiabilidade operacional da unidade de processo em níveis de segurança satisfatórios e confortáveis. Desta forma, a inspeção de trocadores de calor é um serviço rotineiro em refinarias de petróleo, uma vez que estes equipamentos, além de estarem presentes em diversas etapas do processo, são fundamentais para o funcionamento das unidades de forma economicamente viável e com aproveitamento máximo de energia.

A inspeção de feixes tubulares possui uma complexidade intrínseca devido ao arranjo dos tubos do feixe, Fig. 3.8, que limita o acesso para inspeção visual ou a aplicação de ENDs convencionais, como medição de espessura por ultra-som ou por radiografia (AL QADEEB, 2005). Deste modo, o serviço de inspeção destes componentes, usualmente, fica limitado à inspeção visual externa e ao teste de percussão (martelamento) dos tubos periféricos. Sendo que, para ser possível realizar uma avaliação da condição interna dos tubos, alguns destes são removidos e seccionados para análise.

Existem ainda diversas técnicas de ENDs não-convencionais desenvolvidas para melhorar a aquisição de dados para caracterização da condição física do feixe e que permitem aumentar a eficácia e a velocidade da inspeção. (API, 2001, PETROBRAS, 2007 e BIRRING, 2001).

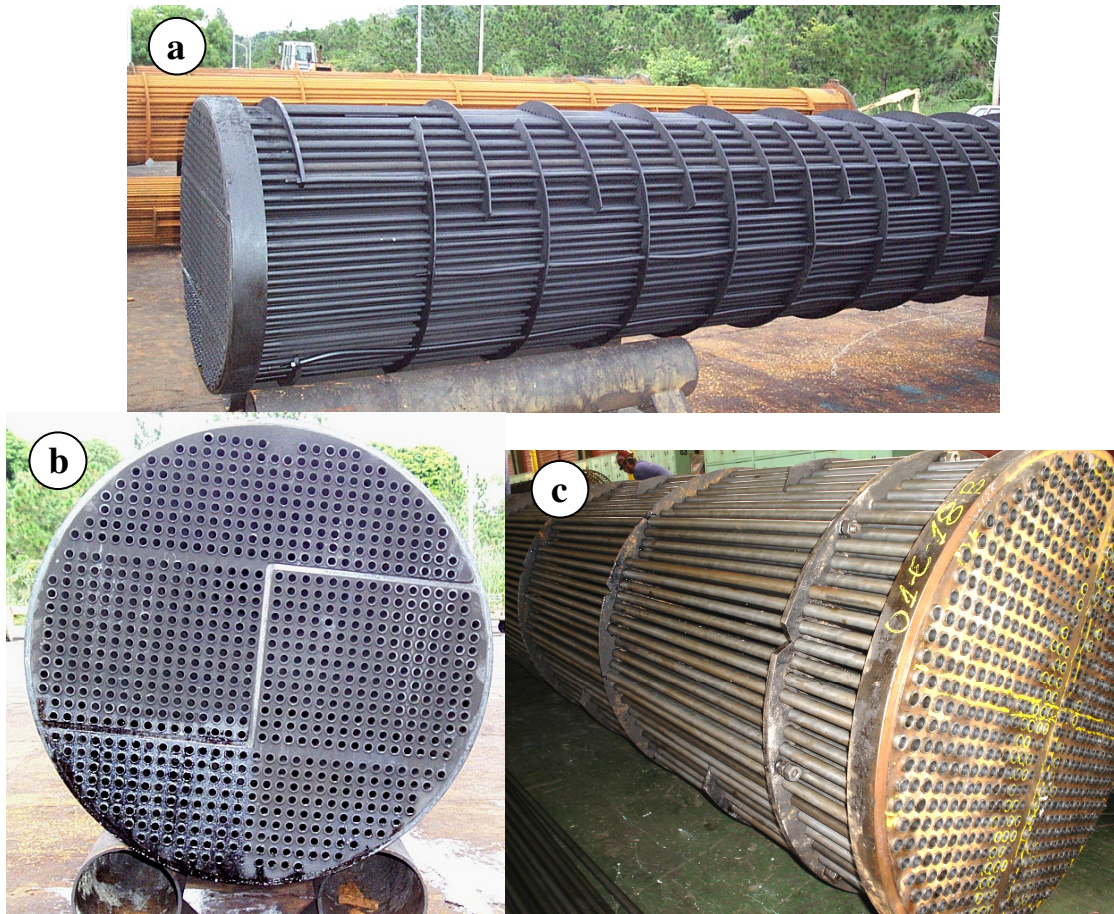


Figura 3.8 – Feixes tubulares típicos. a- vista lateral; b- vista do espelho; c- detalhe da disposição dos tubos com a montagem do espelho. (fonte: autor)

3.2.1. Inspeção de feixes tubulares em rotina

Usualmente, durante manutenções de rotina, ou seja, fora do período de paradas programadas de produção, a inspeção de feixes tubulares é limitada à inspeção visual externa, teste de percussão dos tubos periféricos e remoção de tubos para seccionamento e posterior análise visual e dimensional (API, 2001).

Esta limitação ocorre por não ser comum a liberação simultânea de vários trocadores de calor para inspeção e manutenção durante a rotina das refinarias de petróleo. A baixa demanda, e conseqüente ociosidade, de serviços de ENDs não-convencionais específicos, torna inviável a disposição de equipamentos e mão-de-obra especializada para execução destes ensaios nestas ocasiões.

Os serviços de inspeção de feixes tubulares são padronizados, dentro da Petrobras, pela norma N-2511, que, em sua revisão C, exige apenas a inspeção visual dos tubos, citando a possibilidade de utilização de ENDS, quando o profissional de inspeção julgar necessário, e recomendando a remoção de pelo menos um tubo por passe para complementação ou substituição dos ENDS.

A análise de tubos removidos é um procedimento que fornece uma excelente confiabilidade dos dados, uma vez que a inspeção é realizada por ensaio visual direto e análise dimensional com auxílio de relógio comparador, permitindo a mensuração de perdas de espessuras de modo preciso e identificação das características morfológicas dos processos de deterioração atuantes (API, 2001).

Em contra partida, uma amostragem de tamanho representativo se torna impraticável, uma vez que, é comum a utilização de tubos com comprimento de 6m, nos quais a preparação integral das superfícies e posterior análise é um processo que demandaria um tempo consideravelmente alto, tornando a tarefa lenta e ineficiente. Deste modo, o tempo para definição da condição física real dos tubos causaria atraso no retorno do equipamento à operação.

A N-2511, procurando otimizar o processo de preparação e análise, determina que cada tubo removido deve ser dividido em três partes de 400mm cada, sendo uma da região central do tubo e as outras duas das extremidades. Este procedimento, apesar de reduzir consideravelmente o tempo de preparação e análise, ainda não possibilita uma amostragem representativa para uma análise estatística, uma vez que, tipicamente, o tempo disponível é suficiente para preparação e análise de apenas oito tubos, sem que sejam gerados maiores impactos no prazo previsto para parada.

Com isto, o serviço de inspeção de feixes tubulares fora de paradas programadas, contando apenas com a avaliação visual externa, martelamento dos tubos periféricos e remoção de amostras para inspeção visual e dimensional, ainda guarda alto nível de subjetividade, dependendo diretamente da experiência do profissional de inspeção, para que um julgamento mais acertado seja realizado em relação a real condição do feixe (API, 2001).

3.2.2. Inspeção de feixes tubulares durante paradas programadas

Durante paradas programadas de produção de uma determinada unidade de uma refinaria de petróleo, os equipamentos são liberados para inspeção e manutenção simultaneamente. Nestas ocasiões, o lucro cessante exige que o tempo de parada seja otimizado, de forma que todas as tarefas programadas sejam realizadas, com a qualidade prevista, no menor prazo possível. A liberação simultânea de diversos equipamentos promove um aumento da demanda de mão-de-obra, sendo elaborados contratos específicos de prestação de serviços, de forma que as diversas frentes não fiquem ociosas.

Desta forma, ao contrário da situação observada durante a rotina operacional, o aumento da demanda possibilita, de forma economicamente viável, a alocação de uma infra-estrutura adequada para realização de ENDs não-convencionais em feixes tubulares de trocadores de calor. A realização destes ensaios tem, como objetivo principal, o aumento da velocidade na aquisição de dados que servirão como base para inferência da condição física real dos tubos do feixe, causando uma redução no tempo necessário para definição da necessidade de reparos nos tubos e, conseqüentemente, no tempo de manutenção destes componentes.

Diversas técnicas de ENDs não-convencionais utilizados especificamente para inspeção de tubos de troca térmica foram desenvolvidas e estão em constante evolução, sendo, as de maior evidência, as técnicas de correntes parasitas e IRIS.

3.2.3. Correntes parasitas

O ensaio de correntes parasitas, ou *Eddy Current test*, é baseado no princípio de indução de campos magnéticos por meio da passagem de uma corrente elétrica alternada por uma bobina. Conforme descoberto por Faraday em 1831, quando uma corrente elétrica alternada passa por uma bobina, um campo magnético é induzido na região interna e ao redor dessa bobina. Se uma peça de metal é disposta próxima destas regiões, uma corrente secundária, denominada corrente parasita (*eddy current*) é induzida nesta peça, modificando as características do campo magnético (ASM, 1997). Esta modificação provoca uma variação na impedância da bobina, sendo possível

relacionar a intensidade desta variação com diversas características da peça de metal, tais como espessura, material ou temperatura (ASM, 1997 e OLYMPUS, 2006).

O ensaio de correntes parasitas para inspeção de tubos de trocadores de calor consiste, basicamente, na medição da variação de impedância de uma bobina que ocorre sempre que o campo magnético interage com o tubo sendo testado (BIRRING, 2001), devido às variações de sua espessura ou à presença de descontinuidades, como furos ou trincas.

A realização do ensaio é feita por meio da inserção de uma sonda, composta por duas bobinas – sendo uma de indução e outra de detecção, Fig. 3.9, no interior do tubo (SHULL, 2002). A calibração da sonda é realizada com um tubo padrão do mesmo material dos tubos do feixe, porém possuindo variações de espessura e descontinuidades padronizadas (PETROBRAS, 1987), de modo que sinais obtidos durante a inspeção do tubo padrão irão servir como referência para os sinais eventualmente obtidos no tubo a ser testado (BOOGARD, 1978 e AFONSO et al, 1988).

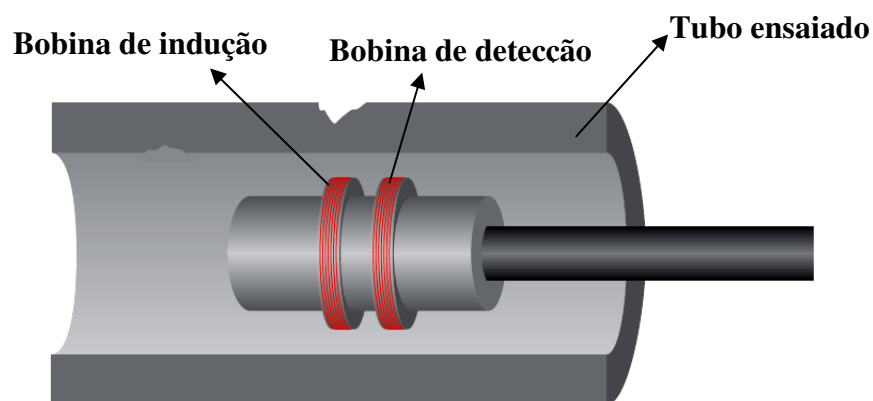


Figura 3.9– Representação da sonda utilizada durante o ensaio de correntes parasitas. (adaptada de OLYMPUS, 2006).

A técnica de correntes parasitas possui como principal vantagem a alta velocidade de execução, sendo possível realizar a inspeção integral de tubos de 6m de comprimento em menos de quarenta segundos (BIRRING, 2001 e CARNEVAL, 2002). Além disso, não é necessário realizar uma preparação rigorosa da superfície dos tubos, uma vez

que não é necessário o contato entre a sonda e o tubo analisado (SHULL, 2002). Contudo, a interpretação dos resultados não é trivial, exigindo profissionais especializados. A principal desvantagem deste ensaio é ser limitado à inspeção de tubos de materiais não ferromagnéticos, como aço inoxidável austenítico, latão, titânio e outras ligas (AL QADEEB, 2005, BIRRING, 2001 e BIRRING, 2004).

3.2.4. IRIS

O ensaio IRIS – *Internal Rotary Inspection System*, ou sistema de inspeção interna rotativo, é uma aplicação da técnica pulso-eco de ultra-som por meio da utilização de um cabeçote especial (AL QADEEB, 2005). Este ensaio foi desenvolvido, inicialmente, por técnicos e engenheiros da Shell no ano de 1979, sendo introduzido no Brasil no ano de 1992 (MADUREIRA et al, 2004 e OLIVEIRA e CARNEVAL, 1993).

A técnica pulso-eco de ultra-som é baseada no princípio de reflexão de ondas sonoras. (SANTIN, 2003 e MADUREIRA et al, 2004) Nesta técnica, um cristal é excitado por uma corrente elétrica e, por meio das suas propriedades piezelétricas, gera um pulso com frequência característica. Este pulso propaga pelo material do tubo em análise, na forma de onda sonora (ultra-som), até atingir a superfície oposta do tubo, Fig. 3.10, onde, aproximadamente, toda energia do pulso é refletida devido à diferença de impedância acústica entre o material ensaiado e o ar (MADUREIRA et al, 2004).

O eco criado pela reflexão, propaga de volta ao cristal, excitando-o mecanicamente e gerando um sinal elétrico. O tempo entre a geração da onda sonora e seu retorno ao cristal é registrado. Sendo conhecida a velocidade do som no material, a distância percorrida pela onda é calculada e, conseqüentemente, a espessura do material é definida.

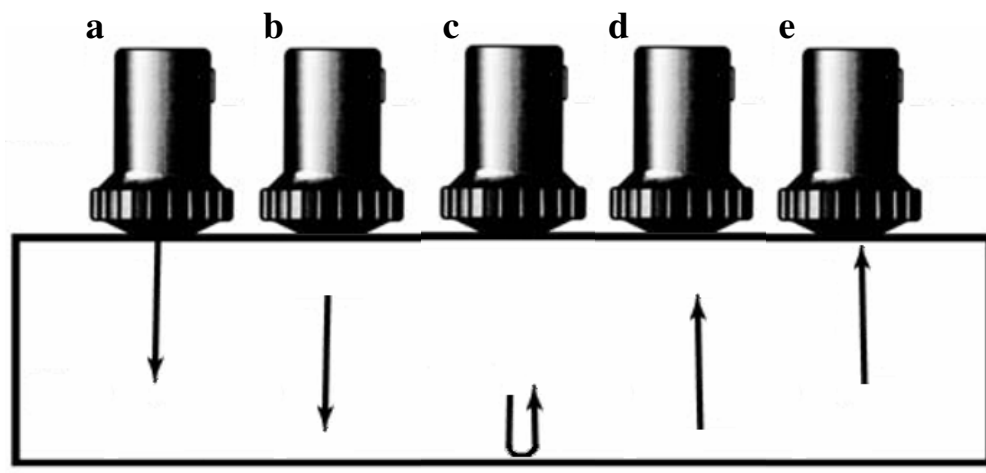


Figura 3.10 – Desenho esquemático da técnica pulso-eco, onde o mesmo elemento funciona como emissor e receptor da onda sonora. As diversas posições ilustram os diversos estágios que a onda percorre: a- emissão; b- propagação em direção à superfície oposta do material; c- reflexão; d- propagação de retorno; e- recepção. (adaptado de SHULL, 2002).

A técnica IRIS consiste em uma aplicação da técnica pulso-eco pela utilização de uma sonda especial, Fig. 3.11, composta por (OLIVEIRA e CARNEVAL, 1993):

- a. transdutor (cristal piezelétrico), que servirá como emissor e receptor das ondas ultra-sônicas;
- b. espelho posicionado a 45° em relação à superfície emissora do cristal, de tal forma que os pulsos ultra-sônicos sejam refletidos e incidam perpendicularmente na superfície interna do tubo;
- c. turbina, que promoverá a rotação do espelho;
- d. dispositivo centralizador, que evitará choques dos demais componentes com a parede do tubo e permitirá que a distância do transdutor ao tubo permaneça a mesma por toda circunferência, facilitando a interpretação dos resultados;
- e. conduíte, que permitirá a movimentação da sonda e proteção dos cabos de condução de sinal.

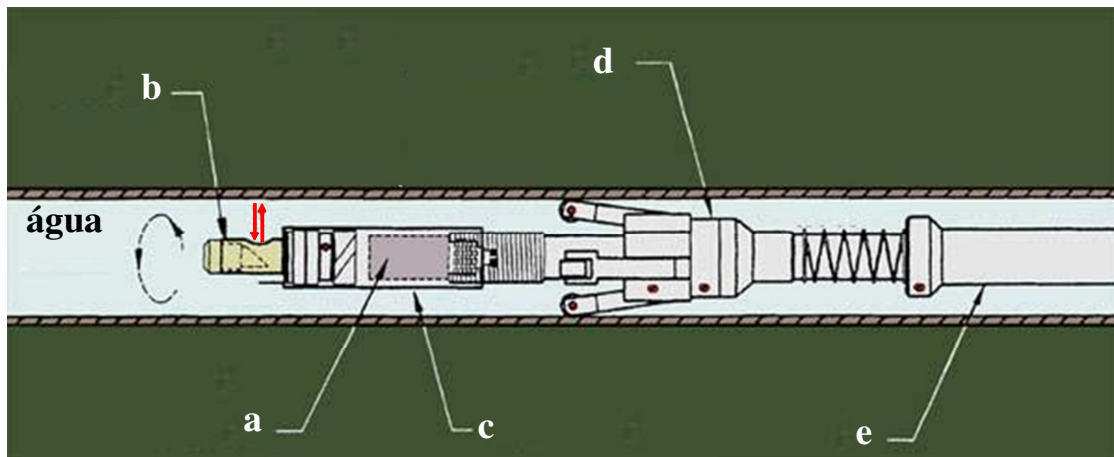


Figura 3.11 – Representação do cabeçote utilizado para execução do ensaio IRIS.
a- transdutor; b- espelho inclinado; c- turbina; d- dispositivo centralizador; e- conduíte.
(adaptado de MKC, 2008)

O acoplamento do cristal com o tubo é necessário para que a transmissão dos pulsos ultra-sônicos seja eficiente (MADUREIRA et al, 2004), sendo realizado com água corrente, que também é utilizada para acionar a turbina, fazendo com que o espelho gire a uma velocidade de, aproximadamente, 1800rpm.

A realização do ensaio é feita por meio da movimentação do cabeçote no interior do tubo, sendo que o avanço do cabeçote na direção longitudinal é realizado manualmente por toda a extensão do tubo. Uma imagem planificada das espessuras do tubo ao longo de sua circunferência é gerada, Fig. 3.12, sendo possível medir a espessura do tubo em qualquer ponto desta imagem. Os equipamentos utilizados atualmente para realização deste ensaio permitem a gravação da imagem, possibilitando melhor registro da inspeção.

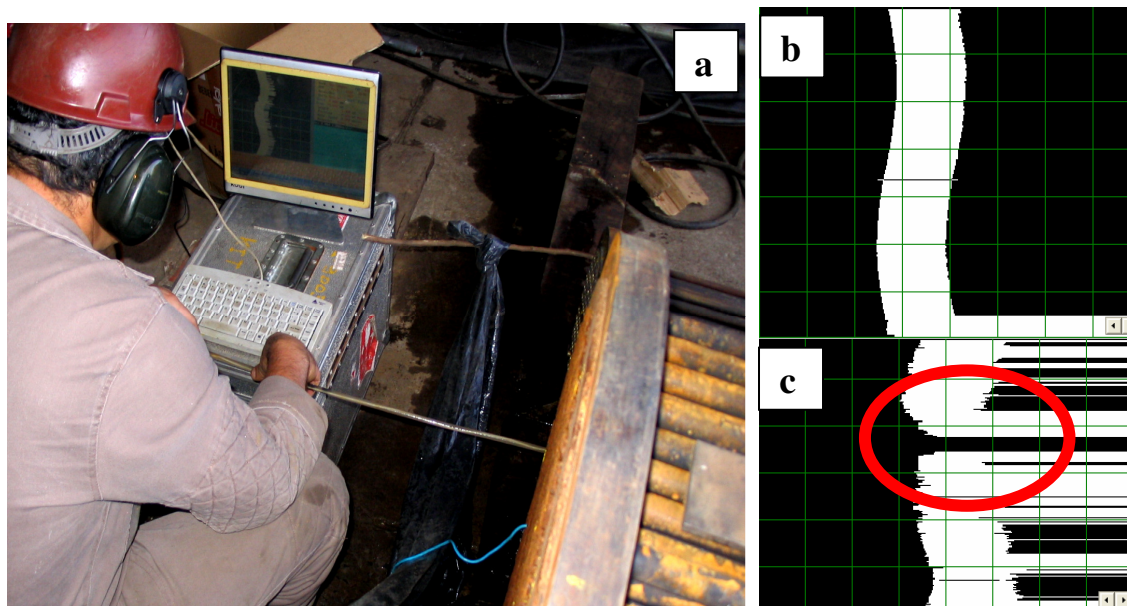


Figura 3.12 – Realização do ensaio IRIS. a- Inspetor realizando ensaio; b- Imagem de tubo em boas condições; c- Imagem de defeito (furo) detectado pelo ensaio. (fonte: autor).

As principais vantagens deste ensaio são: detecção de corrosão, abrasão e furos; liberdade de aplicação em uma ampla faixa de diâmetros, materiais e espessuras; tem como resultado a medida da espessura mínima do tubo ensaiado, com precisão de até 0,1mm, possibilitando quantificar a vida útil dos tubos; e seus resultados são de fácil interpretação. (AL QADEEB, 2005)

O IRIS possui as desvantagens de: exigir uma rigorosa limpeza interna do tubo, uma vez que a confiabilidade do ensaio estará diretamente associada com o acoplamento do transdutor à superfície; e, não apresentar boa sensibilidade a trincas ou pequenos furos, uma vez que, de acordo com a orientação destas discontinuidades, a área de reflexão proporcionada pela suas superfícies não permitirá o retorno de energia suficiente para a detecção (AL QADEEB, 2005).

A principal aplicação do IRIS é no ensaio de tubos de aço carbono e de outros materiais ferromagnéticos, porém também é comum a sua utilização em tubos de materiais não-magnéticos (AL QADEEB, 2005). Como a técnica é baseada na

medição de espessura por ultra-som, adota-se como padrão de resposta do ensaio a espessura mínima observada no tubo ensaiado.

Apesar de este ensaio possuir uma velocidade bem inferior à do ensaio de correntes parasitas, aproximadamente 75mm/s – ou um tubo a cada oitenta segundos, não existem restrições quanto ao tipo do material do tubo a ser inspecionado, sendo o ensaio mais indicado para a inspeção de tubos em aço carbono (AL QADEEB, 2005 e BIRRING, 2004).

3.2.5. Outras técnicas de ENDs não convencionais

Existem, ainda, outras técnicas de ENDs não-convencionais que estão em constante evolução, apresentando um aumento contínuo de aplicação dentro de empresas brasileiras, tais como a técnica de fuga de fluxo magnético, laser óptico e campo remoto (AL QADEEB, 2005). Dentre estas técnicas, a de campo remoto merece destaque por vir ganhando espaço continuamente no mercado de ENDs.

A técnica de campo remoto consiste em uma adaptação da de correntes parasitas, de forma a permitir sua aplicação em materiais magnéticos. Esta técnica ainda possui algumas limitações em relação à detecção de perda de espessura, porém apresenta uma melhora significativa na velocidade do ensaio de tubos magnéticos, além de não exigir uma preparação tão rigorosa quanto aquela necessária para a realização do IRIS (AL QADEEB, 2005). Atualmente, pelos ganhos de velocidade, sua utilização principal tem sido como avaliações preliminares dos tubos, definindo quais apresentam problemas relevantes e devem ser inspecionados pela técnica IRIS (FIGUEREDO, 2003 e BIRRING, 2004).

3.2.6. Comparação entre as técnicas de ENDs não convencionais

O trabalho de BIRRING, 2004 apresenta uma série de comparações entre os diversos ENDs não convencionais, de acordo com o material a ser inspecionado e o tipo de descontinuidade. Os principais resultados estão mostrados na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Desempenho na detecção de falhas de acordo com o tipo de material do tubo. (fonte: BIRRING, 2004)

Material	Correntes parasitas	Campo remoto	IRIS
Aço inoxidável austenítico	91%	-	28%
Aço carbono	-	67%	83%

Estes resultados confirmam que a técnica IRIS é a mais indicada para inspeção de tubos de trocadores de calor fabricados em aço carbono.

3.3. Análise de dados provenientes de ensaios IRIS

A inspeção de feixes tubulares inclui etapas intrinsecamente estatísticas, uma vez que, devido à impossibilidade de se fazer uma inspeção total, envolve a escolha de uma amostra de tubos do feixe e a análise e interpretação dos dados provenientes dos ensaios realizados nesta amostra (JURAN e GODFREY, 1998). A amostragem realizada irá fornecer os parâmetros necessários para inferir as características do feixe, como um todo, definindo a sua condição física dentro de certos limites de confiança pré-determinados.

Este procedimento de inferência requer cuidados específicos para validação da amostra, de modo que o risco desta não representar a população com fidelidade seja quantificado e mantido dentro de patamares aceitáveis. (MONTGOMERY e RUNGER, 2003)

As etapas para realização de uma inferência estatística com qualidade são (COCHRAN, 1977):

- a. Definir de forma clara e concisa como a integridade física do feixe será avaliada, evitando cálculos desnecessários – conforme citado anteriormente, a falha de tubos de aço carbono é causada, principalmente, pela perda de espessura ou pela formação de pits. Nestas duas situações, a consequência destes mecanismos é a promoção de um furo no tubo com contaminação dos fluidos. Sendo assim, as questões a serem respondidas são:
 - O feixe encontra-se em condições satisfatórias?

- A espessura dos tubos do feixe é suficiente para que não existam furos?
 - Qual a probabilidade dos tubos furarem durante a próxima campanha?
- b. Definir a população de onde deverá ser extraída a amostra – no caso em estudo, a população é o conjunto de tubos do feixe tubular.
 - c. Definir quais dados deverão ser coletados – a característica que representa a condição física do tubo é sua espessura mínima, obtida pela utilização do ensaio IRIS.
 - d. Definir os níveis de precisão desejados – a inferência realizada a partir da análise de uma amostra sempre está sujeita a incertezas, uma vez que apenas parte da população é analisada. Estas incertezas podem ser reduzidas por meio do aumento do tamanho da amostra ou pela utilização de instrumentos de medição mais precisos.
 - e. Definir o método de medição – neste estudo, o ensaio IRIS foi selecionado como método de medição por ser o mais indicado para uso em tubos de aço carbono, que é o material mais utilizado para confecção de feixes, conforme citado anteriormente.
 - f. Determinar o tamanho da amostra – uma vez que o método de medição foi definido, a determinação do tamanho da amostra é fundamental para controle dos níveis de precisão desejados. Técnicas de dimensionamento do tamanho da amostra serão apresentadas no item 3.3.1.
 - g. Coletar os dados – devem ser definidos procedimentos e padrões a serem seguidos, de forma que os resultados sejam rastreáveis e possuam repetibilidade e reprodutibilidade. O capítulo 4 abordará a metodologia adotada neste estudo.
 - h. Analisar dos dados – as técnicas que serão utilizadas para análise dos dados devem ser definidas, incluindo qual distribuição estatística poderá ser utilizada para modelar a população, quais medidas de posição e dispersão serão utilizadas para representação da população e quais testes deverão ser formulados para que as questões definidas na primeira etapa possam ser

respondidas. Estas técnicas serão apresentadas nos itens 3.3.2, 3.3.3 e 3.3.4 respectivamente.

3.3.1. Determinação do tamanho da amostra

Durante a realização de uma amostragem, a definição do tamanho da amostra é sempre uma etapa crítica. Se a amostra for muito grande, recursos, como tempo e investimento, serão desperdiçados. Por outro lado, se a amostra for muito pequena, a precisão e utilidade dos resultados serão reduzidas. (COCHRAN, 1977)

O tamanho ideal da amostra só poderia ser determinado se a variabilidade das espessuras dos tubos fosse conhecida. Pois, caso a variabilidade seja pequena, a amostragem de poucos tubos forneceria boas estimativas sobre a população, porém, se a variabilidade for grande, a quantidade de tubos necessários para obter boas estimativas aumentaria consideravelmente. (BARRINGER, 2004)

Deste modo, o tamanho ideal da amostra nunca será determinado com exatidão, uma vez que este só poderia ser conhecido caso a população tivesse seus parâmetros conhecidos. Como a amostragem é realizada para definição destes parâmetros, a determinação do tamanho da amostra é uma prática iterativa.

As duas maneiras mais usuais de se determinar um tamanho razoável para a amostra, que servirá como referência inicial, são:

- utilização de equações formuladas para balancear a margem de erro assumida e o nível de confiança desejado (COCHRAN, 1977 e BARTLETT et al, 2001);
- utilização de tabelas de planos de amostragem padronizados (ABNT, 1985).

3.3.1.1. Equações para determinação do tamanho da amostra

A equação utilizada para determinação do tamanho da amostra formulada por COCHRAN, 1977, BARTLETT et al, 2001 e LAPPONI, 2005 requer a definição de dois parâmetros essenciais: o nível de significância e a margem de erro aceitável.

Para que as questões propostas na primeira etapa da análise sejam respondidas, são formuladas hipóteses relativas à população, que serão comparadas por meio de testes de hipóteses (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Os procedimentos para elaboração de testes de hipóteses serão abordados no item 3.3.3.

A probabilidade de se rejeitar uma hipótese inicial, que seja verdadeira de fato, é denominada nível de significância (α). (LAPPONI, 2005)

A margem de erro (ME) é a precisão esperada na estimativa da medida que caracterizará o feixe, sendo definida como a metade do intervalo de confiança ao redor da média amostral (Fig. 3.13) (JURAN e GODFREY, 1998). Por exemplo, é desejável que a medida de espessura obtida pelo IRIS seja $\pm 0,1\text{mm}$ (BBL, 2005) (intervalo de confiança de $0,2\text{mm}$ ao redor da média amostral), sendo a ME definida, então, como $0,1\text{mm}$. A definição de margem de erro assume a hipótese de que os dados estão distribuídos de forma simétrica.

A ME está relacionada com o produto de Z_{α} , que corresponde à abscissa da distribuição Normal para qual a área das caudas sob a curva fica limitada ao valor de α , Fig. 3.13 (MONTGOMERY e RUNGER, 2003), e o erro padrão amostral (r), (LAPPONI, 2005):

$$r = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

Onde s é o desvio padrão amostral e n o tamanho da amostra. Inicialmente, s é definido a partir de valores históricos, uma vez que o desvio padrão amostral será determinado a partir dos dados da amostra.

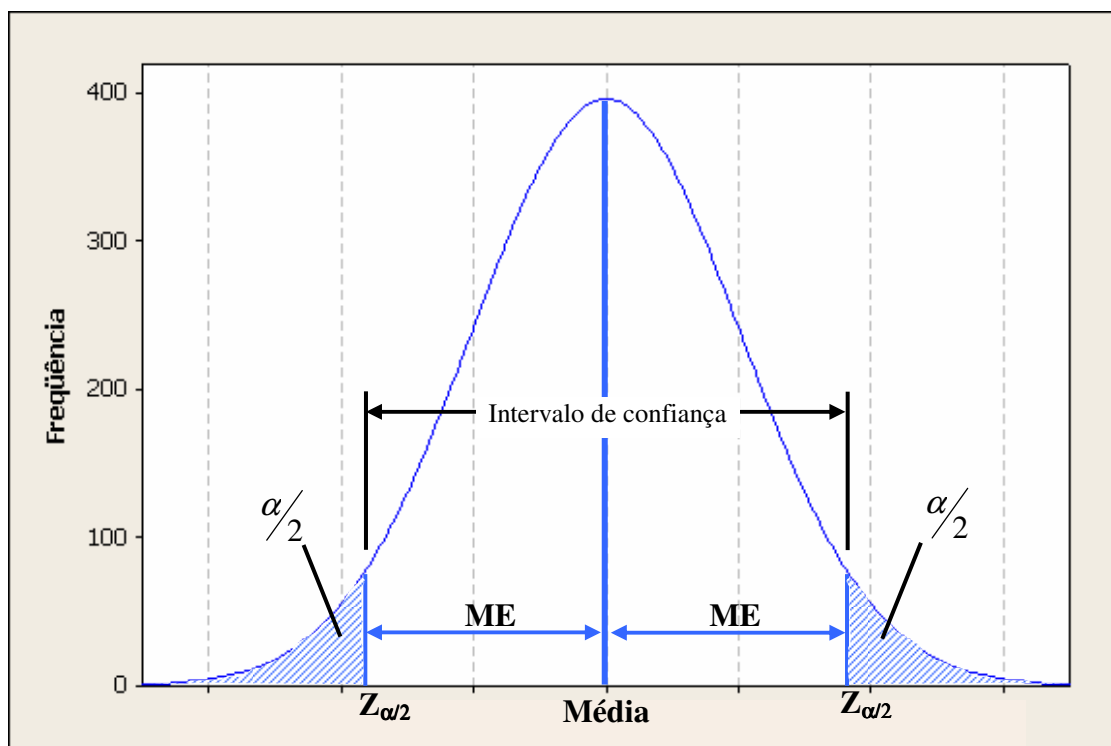


Figura 3.13 – Representação do nível de significância, intervalo de confiança e margem de erro. (fonte: autor).

A fórmula apresentada por COCHRAN, 1977, BARTLETT et al, 2001 e LAPPONI, 2005 para dimensionamento da amostra para o estudo de uma característica contínua, como a medida de espessura, é:

$$n_o = \left(\frac{Z_\alpha \cdot s}{ME} \right)^2 \left/ \left[1 + \frac{1}{N} \left(\frac{Z_\alpha \cdot s}{ME} \right)^2 \right] \right. \quad (3.3)$$

Onde n_o é uma estimativa inicial do tamanho da amostra e N é o tamanho da população, ou seja, o número de tubos no feixe.

Para utilização da Eq. 3.3, são admitidas as hipóteses de que a amostragem é realizada de forma aleatória e de que a variável considerada (no caso, espessura mínima do tubo) pode ser representada por uma distribuição Normal. Deste modo, é recomendado que o valor de n seja o maior valor entre: o valor obtido pela Eq.3.3, 30 unidades ou 5% de N – Eq. 3.4. Esta recomendação visa fornecer subsídios para utilização do

teorema do limite central, que será abordado no item 3.3.2.1 (LAPPONI, 2005 e SABINO et al, 2007).

$$n = \text{Máximo} \{ n_0 ; 30 ; 5\% \text{ de } N \} \quad (3.4)$$

3.3.1.2. Tabelas para determinação do tamanho da amostra

A norma ABNT NBR 5429 apresenta planos e procedimentos de amostragem para inspeção por variáveis. A inspeção pode ser classificada por variáveis ou por atributos, de acordo com o tipo de medida avaliada. A inspeção por atributos refere-se à associação de características aos resultados amostrais, como, por exemplo, a qualificação do tubo como bom ou não, de acordo com um critério estabelecido (ISO, 2001). Por sua vez, a inspeção por variáveis utiliza uma escala contínua de medição, como, por exemplo, a medição de espessuras por meio do ensaio IRIS.

A ABNT NBR 5429 define o tamanho da amostra relacionando o tamanho da população com níveis de inspeção e com o tipo de plano de amostragem.

Os níveis de inspeção representam a precisão da decisão a ser tomada com a análise dos dados, podendo variar entre I, II e III, de acordo com o aumento da precisão desejada (Tab. 3.3) (ABNT, 1985). Por exemplo, o nível de inspeção I definirá um plano de amostragem com menor precisão do que um definido pelo nível III. A norma ABNT recomenda a utilização do nível II, a não ser que existam indícios, como variabilidade histórica elevada ou reduzida, que exijam a adoção de outro nível.

A relação entre o tamanho da população e os níveis gerais de inspeção gera um código, Tab. 3.3, que será associado ao tipo de plano de amostragem para definir o tamanho da amostra. Os tipos de plano de amostragem são classificados pelo regime adotado – atenuado, normal ou severo; e de acordo com o nível de conhecimento da variabilidade:

- plano de amostragem para variabilidade conhecida;
- plano de amostragem para variabilidade desconhecida e estimada pelo método do desvio-padrão;

- plano de amostragem para variabilidade desconhecida e estimada pelo método da amplitude.

A NBR 5429 recomenda que o plano de amostragem seja do tipo normal, para variabilidade desconhecida e estimada pelo método do desvio-padrão. A Tab. 3.4 reproduz a relação entre o tipo de plano de inspeção e o código definido pela relação entre o tamanho da população e o nível de inspeção, para o regime normal.

A NBR 5429 adota a hipótese da amostragem ter sido realizada de forma aleatória e da variável considerada possuir uma distribuição Normal.

Tabela 3.3 – Códigos do tamanho da amostra (adaptada de ABNT, 1985)

Tamanho da população	Níveis de inspeção		
	I	II	III
2 a 8	B	B	B
9 a 15	B	B	C
16 a 25	B	C	D
26 a 50	C	D	E
51 a 90	C	E	F
91 a 150	D	F	G
151 a 280	F	G	H
281 a 500	F	H	J
501 a 1200	G	J	K
1201 a 3200	H	K	L
3201 a 10000	J	L	M
10001 a 35000	K	M	N
35001 a 150000	L	N	P
150001 a 500000	M	P	Q
500001 e acima	N	Q	R

Tabela 3.4 – Relação entre o código do tamanho da amostra e o plano de inspeção.

(adaptada de ABNT, 1985).

Código do tamanho da amostra	Regime atenuado			Regime normal ou severo		
	Variância conhecida	Variância desconhecida		Variância conhecida	Variância desconhecida	
		Método da amplitude	Método do desvio padrão		Método da amplitude	Método do desvio padrão
B	2	3	3	2	3	3
C	2	3	3	3	4	4
D	2	3	3	4	6	6
E	3	4	4	6	10	9
F	4	6	6	9	15	13
G	6	10	9	11	25	18
H	9	15	13	13	30	25
J	11	25	18	18	50	40
K	13	30	25	25	70	60
L	18	50	40	35	110	95
M	25	70	60	40	140	120
N	35	110	95	45	175	150
P	40	140	120	50	230	200
Q	45	175	150	60	285	250
R	50	230	200	70	340	300

3.3.2. Distribuições estatísticas

A análise de dados de uma amostra é realizada com base em suas propriedades estatísticas e probabilísticas, representadas por um modelo estatístico que é caracterizado por uma função de distribuição de frequências. Embora exista um grande número de modelos potenciais, apenas alguns são utilizados rotineiramente, por possuírem características matemáticas desejáveis ou por se relacionarem particularmente bem com uma situação específica. (EVANS et al, 2000).

Ao considerar que os dados de uma amostra seguem uma distribuição de frequências específica, sérios riscos são assumidos, pois, se esta consideração estiver errada, os resultados da análise podem ser inválidos (ROMEU, 2003). Deste modo, devem existir evidências históricas ou razões teóricas para admitir que uma determinada amostra foi extraída de uma população descrita por uma distribuição estatística em particular. (NIST/SEMATECH, 2007).

As principais distribuições utilizadas para análise de dados provenientes de ensaio IRIS são: Normal (SABINO et al, 2007), Student, Weibull e SEV (VIVANCO, 1994, BARRINGER, 2001, TWI, 2002 e ASTM, 2004).

3.3.2.1. Distribuição Normal

A distribuição normal ou gaussiana é a mais utilizada em processos estatísticos em geral. A Eq. 3.5 expressa a função densidade de probabilidade desta distribuição (EVANS et al, 2000)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.5)$$

Onde, os parâmetros que definem a distribuição são: média da população (μ - parâmetro de posição) e desvio padrão da população (σ - parâmetro de escala).

A distribuição Normal possui a propriedade de acumular 68,3% de sua área ao redor de 1σ , 95,5% ao redor de 2σ e 99,7% ao redor de 3σ , Fig. 3.14.

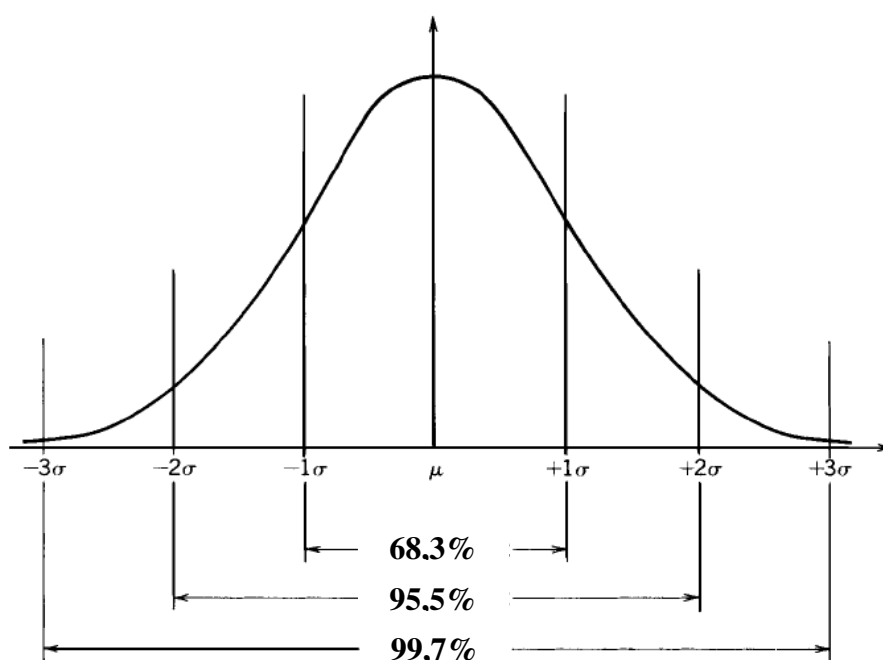


Figura 3.14 – Representação geométrica de uma distribuição Normal. Os valores indicados são relativos à área sob a curva limitada pelas cotas (adaptado de JURAN e GODFREY, 1998).

A utilização da distribuição Normal é embasada pelo teorema central do limite (TCL), que determina que as médias das amostras de uma população qualquer se distribuem de forma Normal ao redor da média real da população, para amostras de grande tamanho, independente de qual seja a distribuição original que represente a população. Este teorema determina, ainda, que a dispersão destas médias se dará de acordo com a razão entre o desvio padrão da população e a raiz quadrada do tamanho da amostra. (LAPPONI, 2005 e SOONG, 2004).

3.3.2.2. Distribuição de Student

A distribuição de Student, também conhecida como distribuição t, é tradicionalmente utilizada em procedimentos amostrais, por ser mais aberta e possuir caudas mais altas do que a distribuição normal e, deste modo, maior frequência associada a valores extremos. Quando o número de elementos na amostra é superior a 31, esta distribuição se aproxima da distribuição normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 1$. (LAPPONI, 2005).

A distribuição de Student é representada pela seguinte função de densidade (EVANS et al, 2000):

$$f(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{\nu}}\right) + \frac{1}{\pi} \left(\frac{x \cdot \sqrt{\nu}}{x^2 + \nu}\right) \cdot \sum_{j=0}^k \frac{a_j}{\left(1 + \frac{x^2}{\nu}\right)^j} \quad (3.6)$$

Onde: ν é o número de graus de liberdade da amostra – definido por $n-1$ e k é definido pelas relações 3.7 e 3.8:

$$\nu \text{ par: } \begin{cases} k = (\nu - 3)/2 \\ a_j = \left(2j / (2j + 1)\right) \cdot a_{j-1} \\ a_0 = 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\nu \text{ ímpar: } \begin{cases} k = (\nu - 2)/2 \\ a_j = \left((2j - 1) / 2j\right) \cdot a_{j-1} \\ a_0 = 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

3.3.2.3. Distribuição Weibull

A distribuição de Weibull é representada pela seguinte função de densidade (RELIASOFT, 2007):

$$f(x) = \frac{\theta}{\eta} \cdot \left(\frac{x - \gamma}{\eta} \right)^{\theta-1} \cdot \exp\left(- \left(\frac{x - \gamma}{\eta} \right)^{\theta} \right) \quad (3.9)$$

Onde os parâmetros que definem a distribuição são: η é o parâmetro de escala, θ é o parâmetro de forma e γ é o fator de posição.

As curvas geradas pela Eq. 3.9 variam de acordo com o valor de cada parâmetro, Fig. 3.15. Sendo o parâmetro θ o mais significativo: quando $\theta=1$, a distribuição Weibull se reduz à distribuição Exponencial, e quando $\theta \approx 3,5$, a distribuição Weibull se aproxima da distribuição Normal. Devido a essa capacidade de se aproximar de uma ampla faixa de distribuições, a função Weibull é considerada uma função ajustável, sendo utilizada em diversas ocasiões (JURAN e GODFREY, 1998).

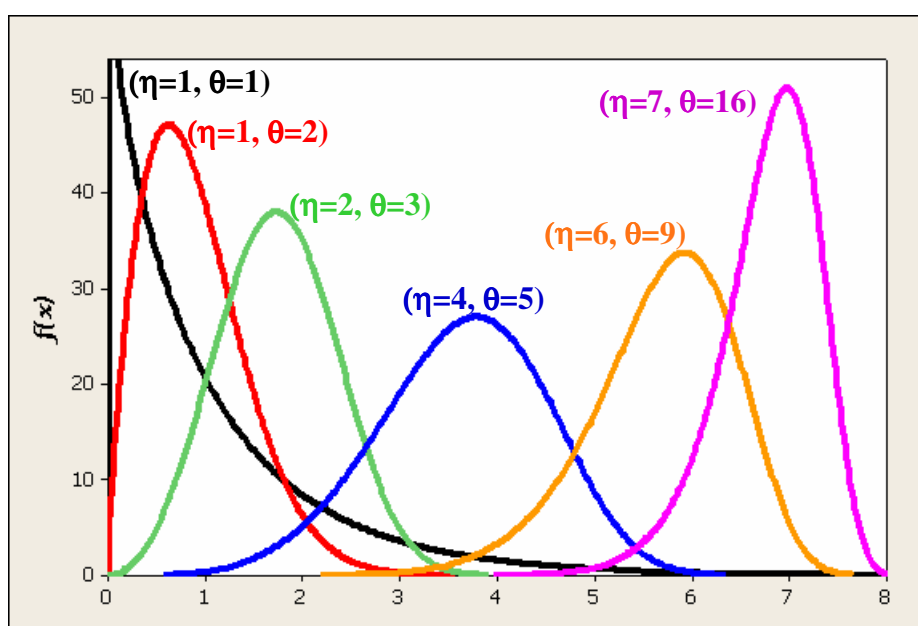


Figura 3.15 – Representação das diversas curvas provenientes da função de distribuição Weibull. As mudanças dos parâmetros desta função permitem a obtenção de aproximações para diversas outras distribuições, tornando a Weibull uma das funções mais versáteis. (fonte: autor).

3.3.2.4. Distribuição de Valores Mínimos Extremos

A distribuição de valores extremos do tipo I, ou distribuição Gumbel, é utilizada frequentemente para análise de dados referentes à corrosão (VIVANCO, 1994, BARRINGER, 2001, TWI, 2002 e ASTM, 2004). Esta distribuição possui duas formas, sendo uma baseada em valores mínimos extremos (*smallest extreme value* – SEV) e a outra em valores máximos extremos (NIST/SEMATECH, 2007). Como o ensaio IRIS apresenta como resultado a espessura mínima do tubo, a SEV é uma das distribuições recomendadas para analisar os dados provenientes desta inspeção (TWI, 2002 e ASTM, 2004).

A função de densidade desta distribuição é expressa pela Eq. 3.10 (RELIASOFT, 2007), onde η é o parâmetro de escala e γ é o de posição.

$$f(x) = \frac{1}{\eta} \exp\left(\frac{x - \gamma}{\eta} - \exp\left(\frac{x - \gamma}{\eta}\right)\right) \quad (3.10)$$

A distribuição de SEV é assimétrica à direita e, como a distribuição Normal, não possui parâmetro de forma, ou seja, sua geometria básica não varia, ao contrário do comportamento apresentado pela distribuição Weibull.

3.3.2.5. Determinação dos parâmetros das distribuições

A determinação dos parâmetros das distribuições estatísticas pode ser realizada pelo método de mínimos quadrados ou pelo método da máxima verossimilhança (MLE – *maximum likelihood estimation*), sendo este último mais preciso e flexível (NIST/SEMATECH, 2007), fornecendo uma abordagem estatística formal e direta para o ajuste de distribuições (JURAN e GODFREY, 1998).

O MLE consiste na criação de uma função de verossimilhança dos dados amostrados, ou seja, uma função que representará a probabilidade dos dados amostrados poderem ser obtidos a partir do modelo estatístico assumido (distribuição). Os valores dos parâmetros desta função que maximizam esta probabilidade serão adotados para definir a função da distribuição assumida. (NIST/SEMATECH, 2007).

Atualmente, a maior parte dos aplicativos para análise de dados, tais como Minitab[®], SPSS[®] e BestFit[®], possuem ferramentas que possibilitam o cálculo dos parâmetros das distribuições estatísticas pelo MLE.

3.3.2.6. Testes de aderência

Existem duas abordagens principais para avaliar se a adoção de uma determinada distribuição é razoável para representação de uma população a partir do conjunto de dados em análise (ROMEU, 2003): métodos empíricos e métodos numéricos.

Os métodos empíricos se baseiam em papéis de probabilidade, onde a comparação do ajuste dos pontos é realizada visualmente e a escolha da melhor distribuição à que os dados se ajustam é realizada de forma intuitiva. (ROMEU, 2005).

Os métodos numéricos, denominados testes de aderência (ou GoF – *Goodness-of-fit*), são baseados em análises estatísticas. Seus resultados são quantificáveis e mais confiáveis do que aqueles apresentados por métodos empíricos (EVANS et al, 2000).

Os GoFs testam as seguintes hipóteses:

- H_0 : Os dados amostrados são provenientes da distribuição estatística adotada;
- H_1 : Os dados amostrados não são provenientes da distribuição estatística adotada.

Os valores de referência para rejeição ou não da hipótese H_0 , denominados valores críticos, dependem do método utilizado para realização do teste de aderência, sendo os mais usuais o teste de Chi-quadrado (CH2), o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) e o teste de Anderson-Darling (AD). (NIST/SEMATECH, 2007)

O teste de CH2 é utilizado para dados de atributos, ou seja, dados dicotômicos. O teste de KS é aplicado a dados contínuos, tendendo a ser mais sensível na região central da distribuição do que em suas caudas, sendo que os parâmetros que definem a distribuição que representará a população devem ser conhecidos – ou seja, estes parâmetros não podem ser determinados a partir dos dados amostrais, devendo ser determinados por simulação ou histórico. (NIST/SEMATECH, 2007)

O teste de AD é derivado do teste de KS, atribuindo um peso maior às caudas. O valor crítico deste teste depende de qual distribuição está sendo analisada, fornecendo uma maior sensibilidade ao teste (EVANS et al, 1989 e NIST/SEMATECH, 2007). Porém, usualmente, um nível de significância de $\alpha=0,01$ pode ser adotado para este teste com boas aproximações (EVANS et al, 1989 e LEOTTI et al, 2005).

3.3.3. Medidas de posição e dispersão

Existem diversas medidas utilizadas para representação de uma população de forma simplificada. Usualmente, medidas de posição e dispersão são estimadas a partir de dados amostrais e servem como referências para que noções das características da população possam ser conhecidas com menor quantidade de dados (PINTO e VICTER, 2005).

As medidas de posição servem para caracterizar a população em relação à magnitude da variável analisada a partir de dados amostrais, ou seja, são medidas usadas como referência do módulo (ou posição) do valor da variável em análise, como exemplos, podem ser citadas (PINTO e VICTER, 2005, MONTGOMERY e RUNGER, 2003 e LAPPONI, 2005):

- Média, ou média aritmética (\bar{x}): é definida pela Eq. 3.12, onde x_i é o valor da medida de índice i :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.12)$$

- Mediana: é definida pelo valor central obtido após a ordenação dos dados. A mediana possui menor sensibilidade a dados extremos e por isso não será utilizada nesse trabalho.
- Moda: é definida pela medida que aparece com maior frequência na população ou amostra.

As medidas de dispersão, por sua vez, representam a variabilidade das medidas amostrais, podendo ser citadas como exemplo (MONTGOMERY e RUNGER, 2003 e LAPPONI, 2005):

- Amplitude: É definida pela diferença entre a máxima e a mínima medida da amostra.
- Desvio padrão (s): É definido pela Eq. 3.12 e representa a dispersão dos elementos da amostra ao redor de \bar{x} , ou seja, valores pequenos de s indicam que as medidas da amostra estão relativamente próximas à \bar{x} .

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.12)$$

3.3.4. Teste de hipóteses

Hipóteses estatísticas são afirmativas propostas relativas à população. Os testes de hipóteses são formulados com o objetivo de evitar que causas específicas sejam atribuídas à variação normal dos dados amostrais (JURAN e GODFREY, 1998). Ou seja, com teste de hipóteses, procura-se identificar se as inferências realizadas a partir da amostra possuem desvios significativos dos valores de referência.

Para formulação do teste, duas hipóteses devem ser formuladas (LAPPONI, 2005):

- Hipótese nula (H_0) – é a hipótese para qual devem ser obtidas evidências para rejeição ou não.
- Hipótese alternativa (H_1) – é a hipótese para qual devem ser obtidas evidências para aceitação ou não. Esta hipótese determina a região de rejeição de H_0 .

As hipóteses descrevem estados mutuamente excludentes, pois não podem ser aceitas ou rejeitadas ao mesmo tempo.

Para aceitação ou rejeição das hipóteses, as estimativas realizadas com os dados oriundos da amostra são confrontadas com valores críticos provenientes do modelo estatístico adotado para representação da população. Deste modo, é definida uma área de aceitação e outra de rejeição dentro da curva de distribuição adotada para representação da população (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

A área de rejeição pode estar dividida em uma ou nas duas caudas da distribuição, sendo estes testes denominados unilateral ou bilateral, respectivamente (Fig. 3.16). O

teste unilateral pode ser: à direita, caso a área de rejeição esteja localizada na cauda direita da curva; ou, à esquerda, caso a área de rejeição esteja localizada na cauda esquerda. No teste bilateral, a área de rejeição é dividida igualmente nas duas caudas da distribuição de frequências (PINTO e VICTER, 2005).

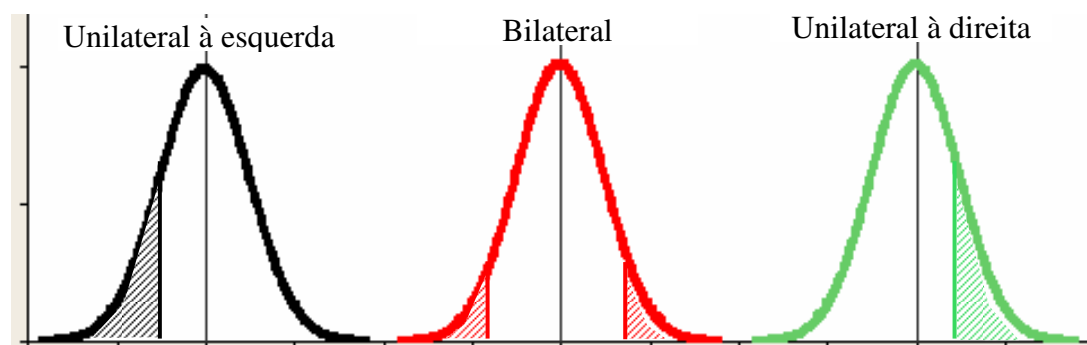


Figura 3.16 – Representação dos três tipos de teste. A região hachurada representa a área de rejeição de cada teste. (fonte: autor)

É possível a ocorrência de dois tipos de erro nesta análise (JURAN e GODFREY, 1998, MONTGOMERY e RUNGER, 2003 e LAPPONI, 2005):

- **Rejeitar H_0 quando está hipótese é, de fato, verdadeira:** Este erro é definido como erro tipo I, e a sua probabilidade de ocorrência é denominada α (Fig. 3.17) conforme citado no item 3.3.1. Este erro também é conhecido por nível de significância, “erro- α ”, falso positivo ou tamanho do teste. O complemento do nível de significância é denominado coeficiente de confiança ($1-\alpha$).
- **Falhar em rejeitar H_0 quando está hipótese é, de fato, falsa:** Ou seja, aceitar H_1 quando está hipótese é, de fato, falsa. Este erro é definido como Erro tipo II, e sua probabilidade de ocorrência é denominada por β (Fig. 3.18). Este erro também é conhecido por falso negativo ou erro- β . O complemento de β é denominado poder do teste ($1-\beta$).

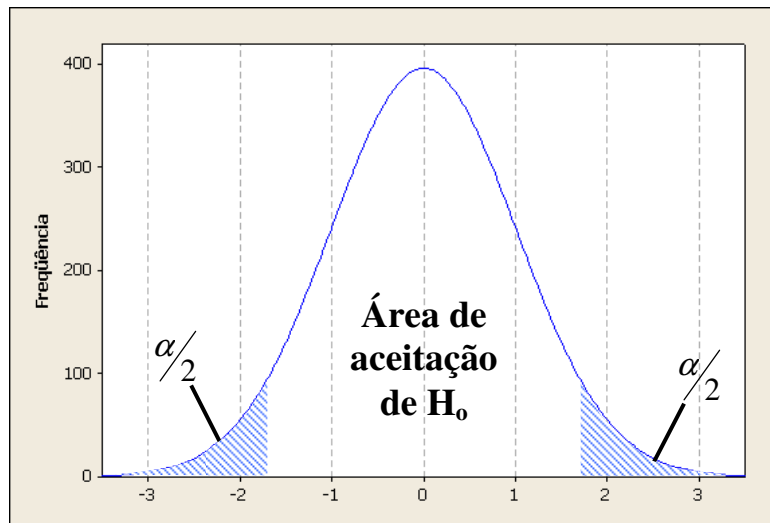


Figura 3.17 – Representação dos níveis de confiança e regiões críticas em um teste de hipótese. As hachuras representam as regiões críticas - áreas de rejeição de H₀.
(fonte: autor).

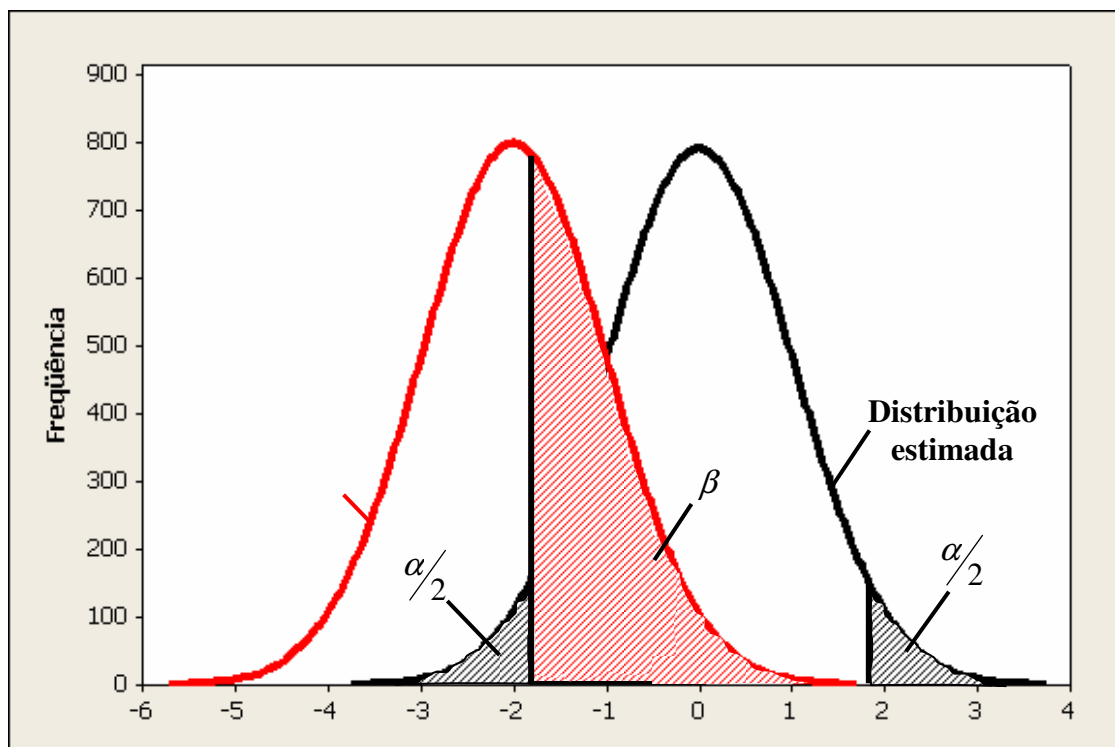


Figura 3.18 – Representação do erro tipo II. A curva preta corresponde à distribuição da média amostral para H₀ verdadeiro e a vermelha corresponde à distribuição da média amostral para H₁ verdadeiro. A área vermelha corresponde à probabilidade β .
(fonte: autor).

A determinação do valor de α a ser utilizado no teste de hipóteses deverá ser realizada de acordo com a criticidade do equipamento avaliado, sendo este valor menor para equipamentos mais críticos e maior para equipamentos menos críticos. (SABINO et al, 2007). A criticidade do equipamento deve levar em conta a consequência da falha do equipamento e possibilidade de liberação para manutenção sem redução de carga processada ou parada completa da unidade.

O poder do teste dependerá: da diferença entre o parâmetro definido na hipótese nula e seu valor real, do valor adotado para α e do tamanho da amostra. Como o valor real do parâmetro utilizado na hipótese nula, usualmente, não é conhecido, o poder do teste não é estipulado a princípio. (LAPPONI, 2005)

O p-valor auxilia na interpretação dos resultados do teste de hipóteses. Este parâmetro representa o nível de significância obtido com os dados amostrais. Quando o p-valor for maior do que α , então não existirão evidências para rejeição de H_0 (Fig. 3.19). Porém, quando p-valor for menor do que α , então H_0 deverá ser rejeitado e a diferença entre o p-valor e α indicará quão forte foi a evidência que levou à rejeição da hipótese nula. (LAPPONI, 2005).

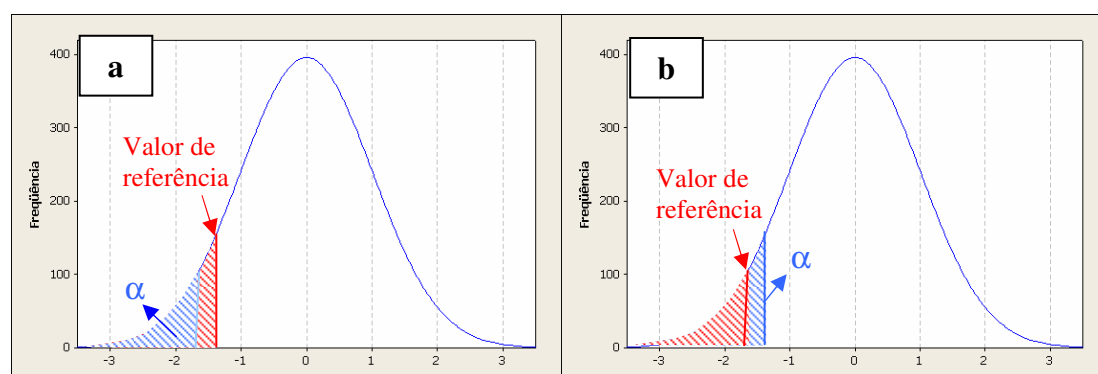


Figura 3.19 – Representação do P-valor. Nas figuras, o p-valor é representado pela área vermelha e a área azul corresponde à α : a- condição de aprovação de H_0 .

b- condição de reprovação de H_0 . (fonte: autor).

CAPÍTULO 4

Metodologia

O estudo proposto tem o objetivo de aprimorar a metodologia utilizada para inspeção de feixes de trocadores de calor, por meio da adoção de uma abordagem estatística. Deste modo, pretende-se reduzir a subjetividade envolvida neste tipo de serviço, definindo-se critérios para representação da condição real do feixe de forma mais confiável e criando subsídio para que a decisão de retornar com o feixe à operação seja embasada por dados numéricos, com incertezas quantificadas e associadas à complexidade operacional do equipamento.

Uma vez que diversos trabalhos de inspeção de feixes de trocadores de calor vêm sendo realizados com a utilização da técnica IRIS durante paradas programadas na REGAP, foi proposta uma análise crítica de alguns dos serviços que foram realizados durante a parada programada da unidade de CCF em maio de 2006, por meio da comparação dos resultados obtidos pela IE com aqueles obtidos por uma abordagem com maior fundamentação estatística.

Esta análise crítica contemplou as seguintes etapas:

1. Seleção dos equipamentos;
2. Dimensionamento da amostra;
3. Coleta de dados;
4. Análise dos dados;
5. Análise dos dados estratificados por passo.

4.1. Seleção de equipamentos

Os equipamentos selecionados para participarem da análise crítica foram escolhidos segundo os seguintes critérios:

- equipamento liberado durante a parada programada da CCF de maio de 2006, ocasião em que a técnica IRIS foi utilizada em todos os feixes que saíram para manutenção e inspeção.
- material dos tubos do feixe em aço carbono: critério adotado em função desta ser a classe de material mais utilizada na fabricação de tubos para trocadores de calor e na qual o ensaio apresenta maior acurácia.
- tubos com diâmetro nominal de 19mm (3/4”) e espessura de parede de 2,1mm (BWG 14): critério adotado para aumentar a padronização da amostra, de forma a minimizar as variações promovidas por sondas e calibrações distintas necessárias para inspeção de diferentes diâmetros ou espessuras.

4.2. Dimensionamento da amostra

O critério adotado para dimensionamento da amostra pela IE, inicialmente, foi selecionar a quantidade de tubos relativa ao maior valor entre o 5% do total de tubos do feixe ou 30 elementos. Sendo que, após a avaliação dos resultados, a IE definiu a necessidade de aumento do número de tubos amostrados de acordo com a experiência dos técnicos e engenheiros responsáveis pelos equipamentos – critério subjetivo.

O valor adotado inicialmente pela IE foi comparado com os valores recomendados pela norma ABNT NBR 5429, Tab. 3.4, e com o resultado da Eq. 3.4, onde os critérios definidos pelo IE são contemplados.

Para utilização da Eq. 3.4, foram adotados os seguintes critérios para definição de suas variáveis:

- margem de erro (ME): adotou-se o valor de 0,1mm para ME. Este valor foi definido em função da tolerância prevista pelo procedimento utilizado para realização do ensaio IRIS (BBL, 2005);
- desvio padrão amostral (s): adotou-se, inicialmente, o valor de 0,2mm baseado em dados históricos de resultados de ensaios IRIS realizados na REGAP.

- nível de significância (α): adotou-se, inicialmente, o valor de 0,05, sendo $Z_{0,05}$ igual a 1,96 (BARTLETT et al, 2001).

O critério adotado para definição da necessidade de aumento da amostra foi:

- ocorrências de medidas fora do limite de três desvios padrões amostrais (s), conforme Fig. 4.1;
- ocorrências de s maior do que 0,2mm.

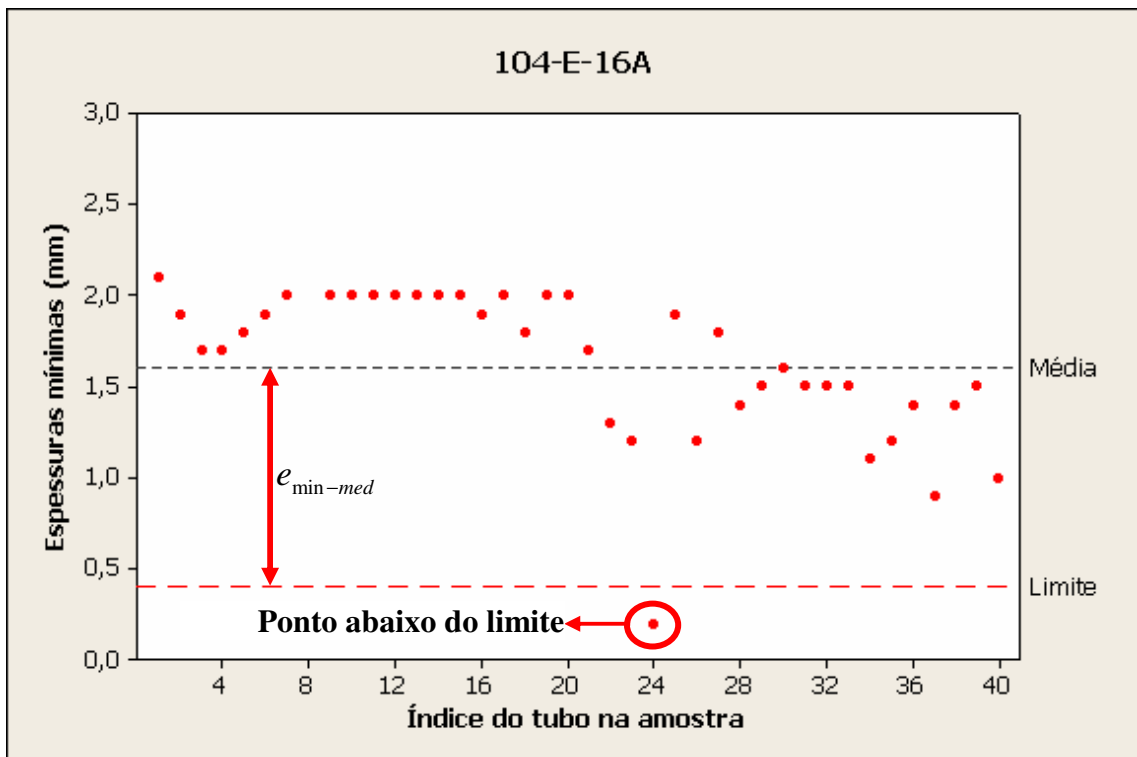


Figura 4.1 – Demonstração do critério utilizado para definição da necessidade de aumento da amostra. (fonte: autor)

O número de tubos a serem inspecionados para aumento da amostra, caso necessário, foi definido pelos seguintes critérios:

- no caso em que o desvio padrão amostral foi maior do que a referência inicial de 0,2mm, o aumento da amostragem foi definido pela diferença entre os resultados da Eq. 3.3 calculada com o novo s e com o s inicial (0,2mm).

- no caso em que existiam medidas fora do limite de três desvios padrões, foi definido que os tubos ao redor daquele com esta medida deveriam ser inspecionados.

A hipótese dos resultados do ensaio IRIS (espessuras mínimas) seguirem a distribuição Normal é adotada sem maiores restrições, a princípio, uma vez que este valor serve apenas como referência para o tamanho da amostra, sendo possível realizar um aumento da amostragem, caso sejam observadas anomalias.

4.3. Coleta de dados

Após a definição do tamanho da amostra, os tubos a serem ensaiados foram indicados no campo de forma aleatória pela IE, sendo limpos por hidrojateamento com pressão de 30.000psig (aproximadamente 206,8MPa), Fig. 4.2.



Figura 4.2 – Operador executando limpeza de feixe tubular por hidrojateamento.

(fonte: RODRIGUES, 2002)

O ensaio IRIS foi realizado por empresa contratada, nos tubos indicados, seguindo o procedimento IT-30.02.001-Rev. 3 (BBL, 2005), que atende as exigências da N-2690 (PETROBRAS, 2002) e define os critérios e requisitos para realização do ensaio, dentre os quais:

- treinamento e qualificação dos inspetores;

- faixas aplicáveis de diâmetros de tubos, estando coberto o diâmetro de 19mm;
- materiais aplicáveis de confecção dos tubos, estando cobertos tubos em aço carbono;
- informações mínimas e formato do relatório do ensaio;
- aparelhos e acessórios aplicáveis e necessários, sendo definido o uso de transdutor com 15MHz, dispositivo centralizador do tipo pequeno (tubos de diâmetro interno de até 24mm) e turbina pequena (tubos com diâmetro interno entre 12,6 e 38mm);
- condição requerida para superfície a ser ensaiada;
- tipo e qualidade do fluido acoplante, no caso: água;
- procedimentos para calibração do aparelho, sendo definido a tolerância de leitura como $\pm 0,1$ mm em relação à medida nominal do tubo padrão calibrado;
- procedimentos para realização do ensaio, sendo definida a velocidade máxima de varredura como 2,5m/min.

Após a realização dos ensaios, os resultados foram enviados diretamente para o IE para análise.

4.4. Análise dos dados

4.4.1. Critérios para avaliação do feixe pela IE

A IE determinou a possibilidade de o feixe permanecer em operação por meio de um teste aplicado ao conjunto dos resultados IRIS de cada feixe, sendo adotada a seguinte prática:

1. Cálculo da taxa de corrosão do feixe (T), Eq. 4.1;

$$T = \frac{e_{nom} - e_{min-min}}{t_{acum}} \quad (4.1)$$

Onde e_{nom} é a espessura nominal, $e_{min-min}$ é a espessura mínima detectada pelo ensaio IRIS, no feixe em questão, e t_{acum} é o tempo de operação que o feixe acumulou até a data da inspeção.

2. Cálculo da espessura requerida para operação confiável durante a próxima campanha (e_{req}), Eq. 4.2:

$$e_{req} = T \cdot t_{camp} + e_{proj} \quad (4.2)$$

Onde t_{camp} é o tempo previsto para a próxima campanha.

3. Cálculo da espessura requerida padronizada ($e_{req-pad}$), Eq. 4.3:

$$e_{req-pad} = \frac{e_{min-med} - e_{req}}{s / \sqrt{n}} \quad (4.3)$$

4. Teste preliminar, com base nas seguintes hipóteses:

- $H_0: e_{req-pad} \leq 0$

- $H_1: e_{req-pad} > 0$

Para este teste, foi realizado o cálculo do p-valor da distribuição Student relativo à $e_{req-pad}$, sendo este comparado com um valor α de 5%. Nos casos onde p-valor foi maior do que α , o feixe foi retubulado.

5. Teste final pela comparação dos valores $e_{min-min}$ com e_{req} . Quando $e_{min-min}$ foi menor do que e_{req} , o feixe foi retubulado. Caso contrário, foi considerado que não existiam evidências suficientes para substituição dos tubos e o feixe voltou à operação.

4.4.2. Critérios propostos para avaliação do feixe

O estudo proposto neste trabalho possui uma abordagem estatística mais detalhada do que aquela utilizada pela IE, de modo a refinar a análise e aumentar a exatidão das decisões, reduzindo a subjetividade dos critérios e definindo o nível de confiança da decisão. A metodologia proposta consistiu basicamente de duas etapas:

- Identificação da distribuição;
- Realização de teste de hipóteses.

4.4.2.1. Identificação da distribuição estatística

A identificação da distribuição que melhor representa as espessuras mínimas do feixe, com base nos dados amostrais, foi definida com o auxílio do software Minitab[®], que permite a realização de testes de aderência, pelo método de AD, para diversos modelos estatísticos, dentre os quais: Normal, Weibul e SEV. O ajuste do modelo de Student foi associado ao ajuste do modelo Normal, uma vez que as duas distribuições possuem similaridades, conforme item 3.3.2.2.

Os parâmetros das distribuições foram estimados pelo MLE, com auxílio do aplicativo Minitab[®], sendo calculado o valor relativo ao teste de AD e seu p-valor. Sendo que apenas os ajustes com p-valores superiores a 1% foram considerados satisfatórios, ou seja, adotou-se um nível de confiança de 99% nos testes de aderência.

O teste de aderência foi realizado para todos os equipamentos selecionados, identificando-se a distribuição que apresentou o melhor ajuste para cada equipamento com maior frequência, sendo esta denominada como distribuição característica.

4.4.2.2. Critérios para realização do teste de hipóteses

Os testes de hipótese foram formulados com base na seguinte questão: O feixe analisado apresenta-se em condições de retornar à operação?

Esta questão remete a duas hipóteses básicas:

- I. O feixe apresenta-se em condições de retornar à operação.
- II. O feixe não se apresenta em condições de retornar à operação.

A definição de qual destas hipóteses será H_0 ou H_1 é fundamental, uma vez que o controle das probabilidades de ocorrência dos erros de análise está diretamente associado a esta escolha.

Como a probabilidade de ocorrência do tipo I (α) é determinada antes da realização da análise, ou seja, durante a formulação do experimento, a hipótese nula foi definida

como aquela que possui o potencial de produzir um erro tipo I crítico, ou seja, com maior possibilidade de perdas. Deste modo, a possibilidade de ocorrência deste tipo de erro é controlada.

A probabilidade de ocorrência do erro tipo II (β) é definida indiretamente, por isso sua probabilidade de ocorrência poderá ser maior do que α . Este trabalho não teve como escopo a estimação do valor de β .

As seguintes situações foram comparadas para definição das hipóteses nula e alternativa:

- caso 1:
 - H_0 : O feixe apresenta-se em condições de retornar à operação com segurança;
 - H_1 : O feixe não se apresenta em condições de retornar à operação.
- caso 2:
 - H_0 : O feixe não se apresenta em condições de retornar à operação;
 - H_1 : O feixe apresenta-se em condições de retornar à operação com segurança.

No primeiro caso, o erro tipo I significa que um feixe, em condições de retornar à operação, será substituído, ou seja, será criado um custo de manutenção pré-maturo ou desnecessário. Para o segundo caso, o erro tipo I significa que um feixe que não está em condições de continuar operando irá retornar à operação, sendo criada uma condição insegura, onde a probabilidade de falha do feixe durante a campanha é muito superior à aceitável. Deste modo, por ser considerada a condição mais crítica, o caso 2 foi adotado na definição da hipótese nula e alternativa.

Para realização do teste de hipóteses, as seguintes etapas foram definidas:

1. Cálculo da espessura mínima de referência (e_{ref}), de forma a considerar a pior condição existente no feixe, sendo definida como o menor valor entre:
 - Espessura mínima detectada pelo ensaio IRIS ($e_{min-min}$);

- Valor definido pela diferença entre $e_{\min\text{-med}}$ e três desvios padrões (s).

Observação: A adoção do critério da diferença de três s em relação à média garante que 99,9% dos tubos do feixe estarão sendo considerados, caso as espessuras sigam a distribuição Normal.

2. Cálculo da taxa de corrosão máxima do feixe (T_{\max})(Eq. 4.4).

$$T_{\max} = \frac{e_{\text{nom}} - e_{\text{ref}}}{t_{\text{acum}}} \quad (4.4)$$

3. Cálculo da espessura mínima requerida para operação confiável durante a próxima campanha ($e_{\min\text{-req}}$)(Eq. 4.5):

$$e_{\min\text{-req}} = T_{\max} \cdot t_{\text{camp}} + e_{\text{proj}} \quad (4.5)$$

4. Definição numérica das hipóteses:

$$- H_0: e_{\min\text{-req}} \leq \mu$$

$$- H_1: e_{\min\text{-req}} > \mu$$

O valor de μ serve de referência, apesar de este ter sido estimado a partir de dados amostrais – é admitido que os parâmetros estimados para cada modelo descrevam a distribuição da população de espessuras mínimas do feixe e , deste modo, o teste é realizado com base no p-valor relativo ao $e_{\min\text{-req}}$ calculado para cada modelo.

5. Cálculo do p-valor relativo à $e_{\min\text{-req}}$ para a distribuição que apresentou melhor resultado no teste de aderência e para a distribuição característica.

Obs.: De forma experimental, foram calculados os p-valores relativos às distribuições Normal, Student, Weibull e SEV para todos os equipamentos, de modo que os resultados dos testes para cada modelo pudessem ser comparados.

6. Definição do α característico para cada equipamento. Como a falha de cada equipamento possui diferentes impactos na operação da unidade de processo, a possibilidade de liberação do equipamento para manutenção durante a campanha

foi definida como fator crítico para determinação do alfa, sendo assumido α como:

- 0,05 para feixes que são liberáveis durante campanha, sem transtornos operacionais, ou seja, sem redução da carga processada;
- 0,01 para feixes que são liberáveis durante campanha, com transtornos operacionais, ou seja, com redução de até 50% da carga processada;
- 0,001 para feixes que não são liberáveis em campanha ou que são liberáveis com muitos transtornos operacionais, sendo necessária a redução de, pelo menos, 50% da carga processada.

7. Teste das hipóteses pela comparação do p-valor com o α característico do equipamento:

- nos casos onde o p-valor foi menor do que α , o teste indica a rejeição de H_0 e, deste modo, o feixe deveria retornar à operação;
- nos casos onde o p-valor foi maior do que α , não existem evidências de que H_0 deva ser rejeitada e, deste modo, o feixe deveria ser retubulado.

4.4.2.3. Análise estratificada por passo

Uma vez que a corrosão é fortemente influenciada pela temperatura, a existência de diferentes taxas para cada passo de um trocador de calor pode ser esperada, porém esta questão não foi considerada na análise pela IE ou pela abordagem anterior, uma vez que os dados são considerados como provenientes de uma mesma população. Deste modo, de forma experimental, os dados do ensaio IRIS foram separados por passo e foi realizada nova avaliação dos resultados.

Inicialmente, foram realizados testes para verificação da homogeneidade da amostra, ou seja, foi verificado se existiam evidências de que os passos deveriam ser tratados como duas populações distintas. Estes testes consistiram no teste F das variâncias e no teste T

para duas médias supondo variâncias iguais ou distintas, de acordo com o resultado do teste F.

Após a realização do teste F, foi analisado o tamanho da amostra, desconsiderando-se o critério de 30 elementos. Esta ação foi necessária para que os equipamentos tivessem tubos suficientes para análise – uma vez que a amostragem inicial considerava as espessuras do feixe como uma população única.

Foram realizados testes de aderências para os resultados de cada passo, seguindo os critérios do item 4.4.2.1, e testes de hipóteses, conforme critérios do item 4.4.2.2.

CAPÍTULO 5

Resultados e discussão

5.1. Seleção de equipamentos

Seguindo os critérios definidos no capítulo anterior:

- Equipamento liberado durante a parada programada do CCF-2 da REGAP.
- Material dos tubos do feixe de aço carbono.
- Tubos com diâmetro nominal de 19mm (3/4”) e espessura de parede de 2,1mm (BWG 14).

Foram selecionados 30 equipamentos para participarem deste estudo, conforme lista abaixo:

- 103-E-06 – Resfriador de diesel;
- 103-E-07A e B – Pré-aquecedores de carga com nafta;
- 103-E-09A e B – Resfriadores de óleo combustível;
- 103-E-10 – Pré-aquecedor de carga com nafta;
- 103-E-11A e B – Resfriadores de nafta;
- 103-E-12A, B, C, D, E e F – Condensadores de topo;
- 104-E-09A e B – Resfriadores de produto não-tratado;
- 104-E-10 – Aquecedor de nafta não-estabilizada;
- 104-E-11 – Aquecedor de nafta não-estabilizada;
- 104-E-12A e B – Refervedores de fundo;
- 104-E-14A, B, C e D – Condensadores de topo;
- 104-E-16A e B – Resfriadore de nafta;

- 109-E-101A e B – Resfriadores de reagente químico: dietanolamina (DEA);
- 109-E-103 – DEA x DEA;
- 109-E-105 – Condensador de topo.

Os dados construtivos e operacionais destes equipamentos encontram-se na Tab. A.1, em anexo.

5.2. Dimensionamento da amostra

Os valores escolhidos para dimensionamento da amostra pelo IE foram comparados com aqueles recomendados pela metodologia proposta no item 4.2 (Tab. 5.1). Uma vez que o IE não utilizou o critério estabelecido pela ABNT (Tab. 3.4.), 14 equipamentos (37%) tiveram menos tubos ensaiados do que aquele recomendado pela metodologia do item 4.2.

Tabela 5.1 – Comparação entre as definições de tamanho da amostra.

Equipamento:	N	n definido pelo IE	n _o Eq. 3.3	5% de N	Código Tab. 3.3	n Tab. 3.4	n proposto item 4.2
103-E-06	166	30	14	8	G	18	30
103-E-07A/B	474	30	15	24	H	25	30
103-E-09A/B	140	30	14	7	F	13	30
103-E-10	64	30	12	3	E	9	30
103-E-11AB	104	30	13	5	F	13	30
103-E-12A...F	758	38	15	38	J	40	40
104-E-09A/B	144	30	14	7	F	13	30
104-E-10	220	30	14	11	G	18	30
104-E-11	344	30	15	17	H	25	30
104-E-12A/B	220	30	14	11	G	18	30
104-E-14A...D	736	37	15	37	J	40	40
104-E-16A/B	630	32	15	32	J	40	40
109-E-101A/B	576	30	15	29	J	40	40
109-E-103	496	30	15	25	H	25	30
109-E-105	400	30	15	20	H	25	30

Nota: Os equipamentos destacados em vermelho na Tab. 5.1 são aqueles cujo n definido pelo IE foi inferior ao n proposto pelo item 4.2.

5.3. Coleta de dados

A seleção dos tubos no campo foi realizada, de forma aleatória, conforme exemplos na Fig. 5.1. Os resultados destes ensaios estão expressos na Tab. A.2, em anexo.

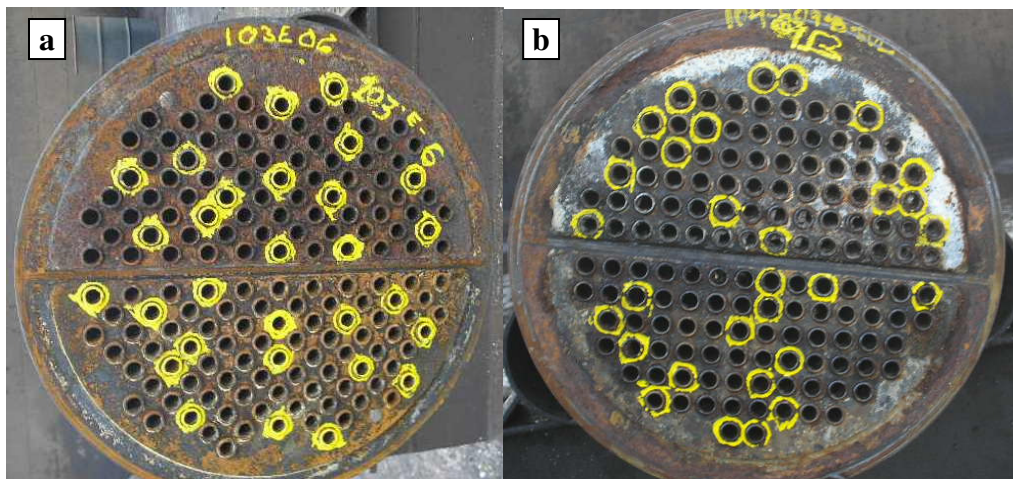


Figura 5.1 – Exemplos de marcação de tubo para realização do ensaio IRIS.

a- 103-E-06. b- 104-E-09B. (fonte: autor).

O IE determinou o aumento da amostragem dos seguintes equipamentos:

- 103-E-12D – Aumento de 7 tubos no passo 2;
- 104-E-11 – Aumento de 18 tubos no passo 2;
- 104-E-14B – Aumento de 14 tubos no passo 2;
- 104-E-16A – Aumento de 4 tubos no passo 1 e 42 tubos no passo 2;
- 109-E-103 – Aumento de 26 tubos no passo 1 e 13 tubos no passo 2.

O número de tubos a serem inspecionados durante o aumento da amostragem foi determinado pela experiência do pessoal envolvido com a inspeção, não sendo adotados critérios numéricos. Os resultados dos tubos amostrados com o aumento das amostras estão destacados de vermelho na Tab. A.2.

A análise do tamanho da amostra, conforme proposto no item 4.2, indicou a necessidade de aumento da amostragem em oito feixes, Tab. 5.2.

Tabela 5.2 – Verificação da necessidade de aumento do tamanho da amostra

Equipamento	s	Medidas abaixo do limite de 3s	Aumento da amostra pelo item 4.2		Aumento da amostra pela IE	
			ID	n° de tubos	ID	n° de tubos
103-E-06	0,2	0	NÃO	0	NÃO	0
103-E-07A	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
103-E-07B	0,2	0	NÃO	0	NÃO	0
103-E-09A	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
103-E-09B	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
103-E-10	0,5	0	SIM	25	NÃO	0
103-E-11A	0,2	1	SIM	8	NÃO	0
103-E-11B	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
103-E-12A	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
103-E-12B	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
103-E-12C	0,1	1	SIM	8	NÃO	0
103-E-12D	0,1	0	NÃO	0	SIM	7
103-E-12E	0,2	0	NÃO	0	NÃO	0
103-E-12F	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
104-E-09A	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
104-E-09B	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
104-E-10	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
104-E-11	0,2	2	SIM	16	SIM	18
104-E-12A	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
104-E-12B	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
104-E-14A	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
104-E-14B	0,3	1	SIM	18	SIM	14
104-E-14C	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
104-E-14D	0,2	1	SIM	8	NÃO	0
104-E-16A	0,4	1	SIM	45	SIM	46
104-E-16B	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0
109-E-101A	0,2	0	NÃO	0	NÃO	0
109-E-101B	0,2	0	NÃO	0	NÃO	0
109-E-103	0,3	0	SIM	9	SIM	39
109-E-105	0,1	0	NÃO	0	NÃO	0

Nota: Os equipamentos destacados na cor vermelha são aqueles nos quais a análise do tamanho da amostra indicou o aumento da amostragem.

5.4. Análise dos dados

5.4.1. Avaliação do feixe pela IE

A Tab. 5.3 apresenta os resultados da avaliação, pela IE, dos dados provenientes dos ensaios IRIS, onde pode ser observado que dois feixes foram reprovados no teste preliminar e seis foram reprovados no teste final.

Tabela 5.3 – Resultado da avaliação dos resultados IRIS realizada pela IE

Equipamento	$e_{\min-\min}$	e_{proj}	e_{req}	$e_{\text{req-pad}}$	p-valor ¹	Teste preliminar ²	Teste final ³
103-E-06	1,2	0,2	0,7	22,9	0,000	OK	OK
103-E-07A	1,6	0,3	0,6	63,7	0,000	OK	OK
103-E-07B	1,6	0,3	0,6	49,3	0,000	OK	OK
103-E-09A	1,7	0,2	0,7	78,9	0,000	OK	OK
103-E-09B	1,6	0,2	0,8	72,7	0,000	OK	OK
103-E-10	0	0,3	0,8	1,0	0,175	Retub.	Retub.
103-E-11A	1,2	0,2	0,6	44,3	0,000	OK	OK
103-E-11B	1,5	0,2	0,5	55,7	0,000	OK	OK
103-E-12A	1,6	0,2	0,8	53,5	0,000	OK	OK
103-E-12B	1,5	0,2	0,9	51,6	0,000	OK	OK
103-E-12C	1,3	0,2	1,1	29,9	0,000	OK	OK
103-E-12D	1,4	0,2	0,6	47,8	0,000	OK	OK
103-E-12E	1,1	0,2	1,7	1,4	0,078	Retub.	Retub.
103-E-12F	1,2	0,2	1,2	13,7	0,000	OK	Retub.
104-E-09A	1,7	0,2	0,4	84,1	0,000	OK	OK
104-E-09B	1,3	0,2	1,1	23,8	0,000	OK	OK
104-E-10	1,7	0,3	0,5	127,3	0,000	OK	OK
104-E-11	1,2	0,3	1,3	22,4	0,000	OK	Retub.
104-E-12A	1,7	0,3	0,5	96,9	0,000	OK	OK
104-E-12B	1,8	0,3	0,6	145,0	0,000	OK	OK
104-E-14A	1,6	0,2	0,5	80,2	0,000	OK	OK
104-E-14B	0,3	0,2	1,1	17,3	0,000	OK	Retub.
104-E-14C	1,7	0,2	0,4	99,2	0,000	OK	OK
104-E-14D	1,2	0,2	0,7	39,6	0,000	OK	OK
104-E-16A	0,2	0,2	1,3	4,2	0,000	OK	Retub.
104-E-16B	1,6	0,2	0,5	74,0	0,000	OK	OK
109-E-101A	1	0,2	0,8	19,2	0,000	OK	OK
109-E-101B	1,3	0,2	0,7	31,0	0,000	OK	OK
109-E-103	1,2	0,4	0,9	24,0	0,000	OK	OK
109-E-105	1,4	0,2	1,0	33,6	0,000	OK	OK

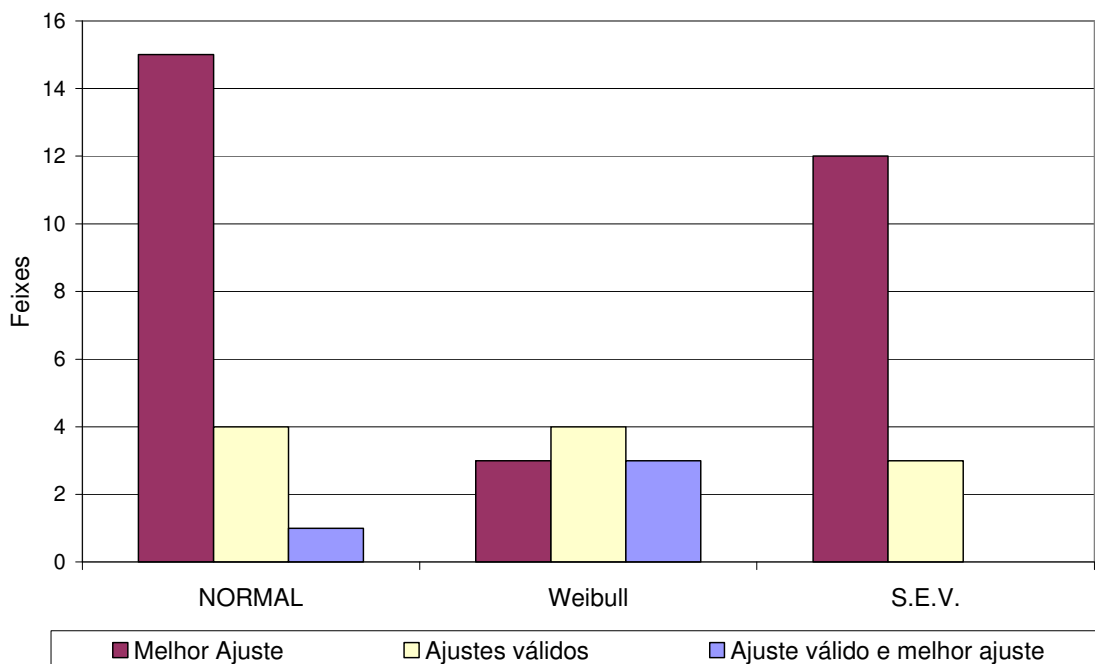
Notas referentes à Tab. 5.3:

- 1- P-valor referente ao valor de $e_{req-pad}$ para distribuição de Student com graus de liberdade igual ao número de medidas válidas menos uma unidade.
- 2- Comparação do p-valor com o α crítico adotado pela IE (5%), quando o p-valor foi maior do que α a retubulação foi determinante.
- 3- Comparação da e_{req} com a $e_{min-min}$, quando e_{req} foi maior do que $e_{min-min}$ a retubulação foi determinante.
- 4- Os equipamentos destacados em vermelhos são aqueles que tiveram os feixes reprovados pela análise da IE.

5.4.2. Avaliação do feixe segundo os critérios propostos

5.4.2.1. Análise de distribuições estatísticas

De acordo com a proposta do item 4.4.2.1, os ajustes das distribuições Normal, Weibull e SEV, foram avaliados pelo teste de AD, por meio do aplicativo Minitab[®]. Os resultados destes testes estão expressos na Tab. A.3, em anexo, sendo que a Fig. 5.2 apresenta resumidamente estes resultados.



Nota: A coluna “Melhor ajuste” refere-se aos valores mínimos do teste de AD.

Figura 5.2 – Histograma dos ajustes obtidos pelo teste de AD para as distribuições Normal, Weibull e SEV. (fonte: autor).

Dos 30 equipamentos avaliados, 15 apresentaram o melhor ajuste pela distribuição normal, 12 pela distribuição SEV e 3 pela distribuição Weibull. Apesar deste resultado, apenas 4 equipamentos: 103-E-06, 104-E-16A, 109-E-101A e 109-E-101B; apresentaram ajustes razoáveis, ou seja, p-valores relativos ao teste de AD superiores à 1%. Entre estes equipamentos, 3 apresentaram melhor ajuste pela distribuição Weibull e 1 pela Normal.

Deste modo, apesar de, inicialmente, a maior parte dos feixes apresentarem melhor ajuste pela distribuição Normal, a Weibull apresentou o maior número de ajustes confiáveis, sendo adotada como distribuição característica para representação dos passos.

Contudo, a quantidade de ajustes dentro do nível de confiança determinado (1%) é baixo, sendo observado em apenas 13% dos equipamentos estudados. Deste modo, analisando o feixe como um todo, não é possível concluir qual é a melhor distribuição que representa os resultados do ensaio IRIS, a partir dos dados disponíveis.

5.4.2.2. Teste de hipóteses

Seguindo a metodologia proposta pelo item 4.4.2.2, realizou-se, de forma experimental, o teste para as 4 populações sugeridas: Normal, Student, Weibull e SEV. Os parâmetros das populações foram definidos pelo MLE, com o auxílio do aplicativo Minitab[®], sendo que a definição do p-valor para a espessura crítica ($e_{\min-ref}$) também foi realizada com a utilização deste aplicativo.

Os resultados dos testes de hipóteses estão expressos de forma resumida na Fig. 5.3 e de forma detalhada na Tab. A.4, em anexo. Pode ser observado que o resultado dos testes pela representação com a distribuição Normal não obteve consenso em relação às decisões relativas aos feixes dos 104-E-11 e 104-E-14C (reprovados pela IE e aprovados por esta análise) e 109-E-103 (aprovado pelo IE e reprovado por esta análise).

As modelagens com as distribuições Weibull e SEV, por sua vez, tiveram consenso em relação aos feixes reprovados pela IE, sendo mais conservadoras, inclusive, uma vez

que reprovaram outros feixes que haviam sido aprovados pelo IE, a saber: 103-E-06, 104-E-09B, 109-E-101A, 109-E-101B (apenas a SEV), 109-E-103 e 109-E-105.

O modelo proposto com a distribuição Student não apresentou bons resultados, reprovando apenas o 103-E-10. Este comportamento foi atribuído ao fato do dados provenientes do ensaio IRIS serem dados extremos e esta distribuição é mais robusta a estas informações do que as demais utilizadas, ou seja, menos sensível à este tipo de informação.

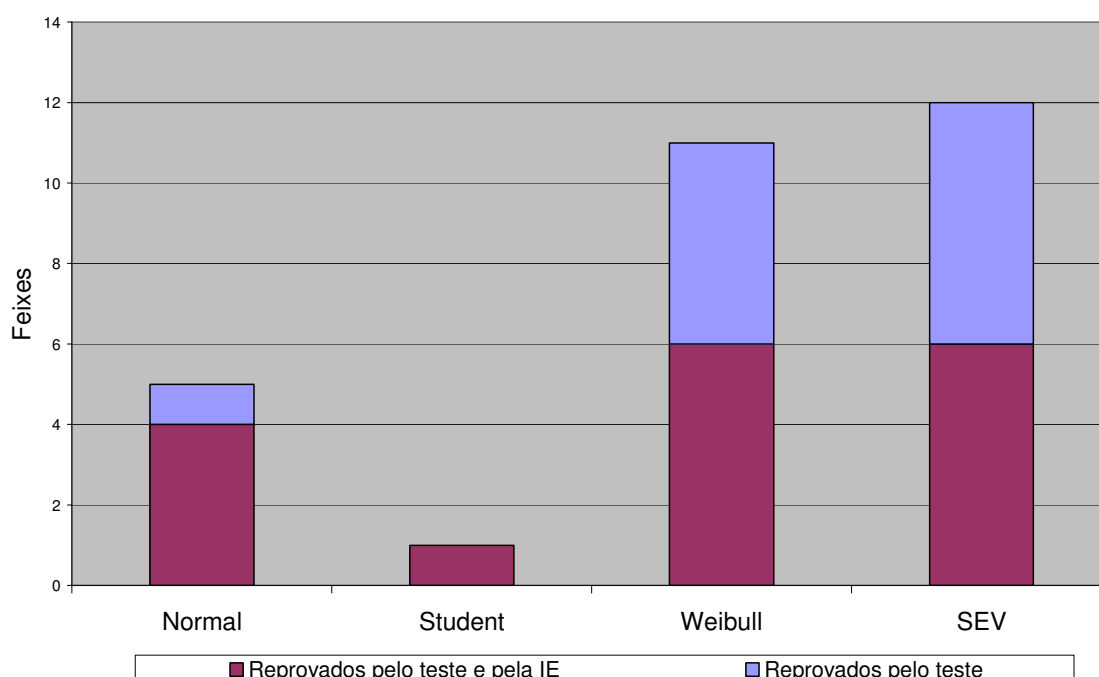


Figura 5.3 – Representação do número de feixes reprovados pela IE e pelo método proposto neste trabalho. (fonte: autor)

Apesar da distribuição característica assumida (Weibull) ter consenso com a decisão tomada pelo IE, poucas distribuições apresentaram ajustes com níveis de confiança satisfatórios. Deste modo, a análise pode estar sujeita a erros não previstos no modelo e a comparação entre a IE e o método proposto permanece com nível de subjetividade considerável.

5.4.2.3. Análise estratificada por passo

De modo a se reduzir o grau de subjetividade e conseguir melhor ajuste das distribuições, foi realizada a análise estatística de forma estratificada, separando-se os dados por passo dos feixes, conforme proposto pelo item 4.4.2.3.

Inicialmente, para avaliação dos passos, foi realizado um teste de homogeneidade, de forma a se confirmar se existiam evidências que indicassem que a população de cada passo deveria ser representada de forma distinta.

A Fig. 5.4 apresenta resumidamente os resultados destes testes, sendo que a Tab.A.5 apresenta o seu desenvolvimento detalhado. É possível observar que, dos 30 equipamentos avaliados, 15 apresentam evidências de existirem diferenças significativas entre as populações de tubos dos seus passos, exigindo uma análise estratificada.

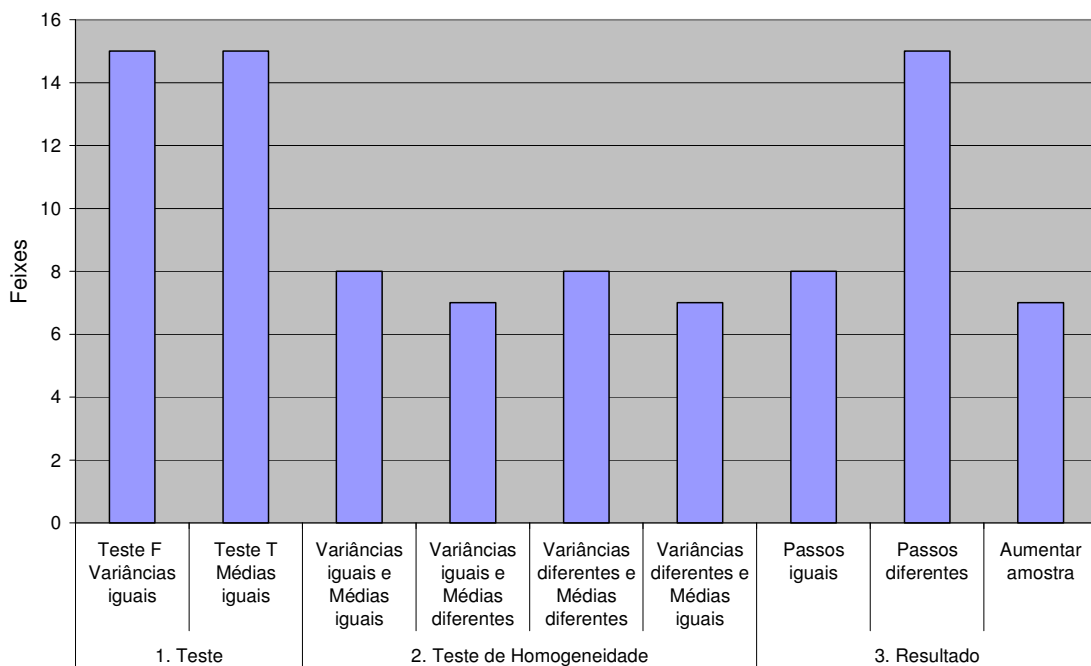
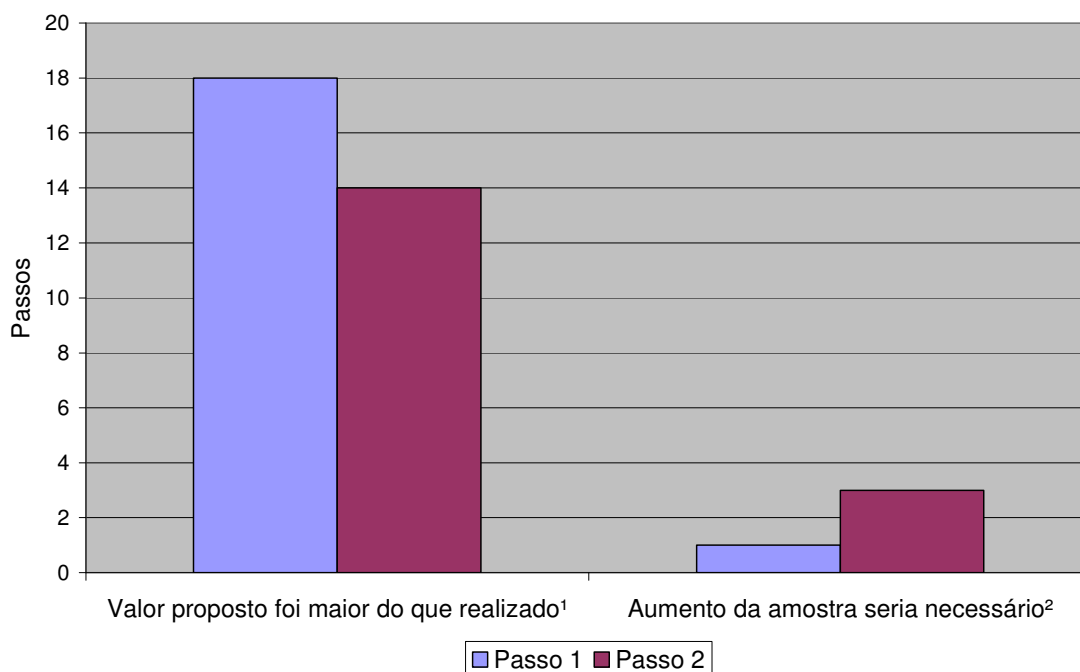


Figura 5.4 – Teste de homogeneidade da amostra utilizando um nível de confiança de 95%. Nos casos em que as variâncias se mostraram distintas, porém as médias iguais, foi recomendado o aumento da amostra. (fonte: autor).

Deste modo, a análise por passo é recomendada, uma vez que 50% dos equipamentos exigiram este tipo de abordagem e porque servirá como um ajuste fino para os equipamentos que não apresentaram evidências quanto à distinção das populações dos tubos de seus passos.

Foi realizada a verificação do tamanho da amostra relativo aos passos, quando tratados como populações estratificadas. Os resultados desta verificação são mostrados na Fig. 5.5. O critério da ABNT (Tab. 3.4) exigiu uma amostragem maior em 18 passos (30%) e, apesar disso, apenas 4 passos exigiram um aumento de amostragem, segundo os critérios do item 4.2.



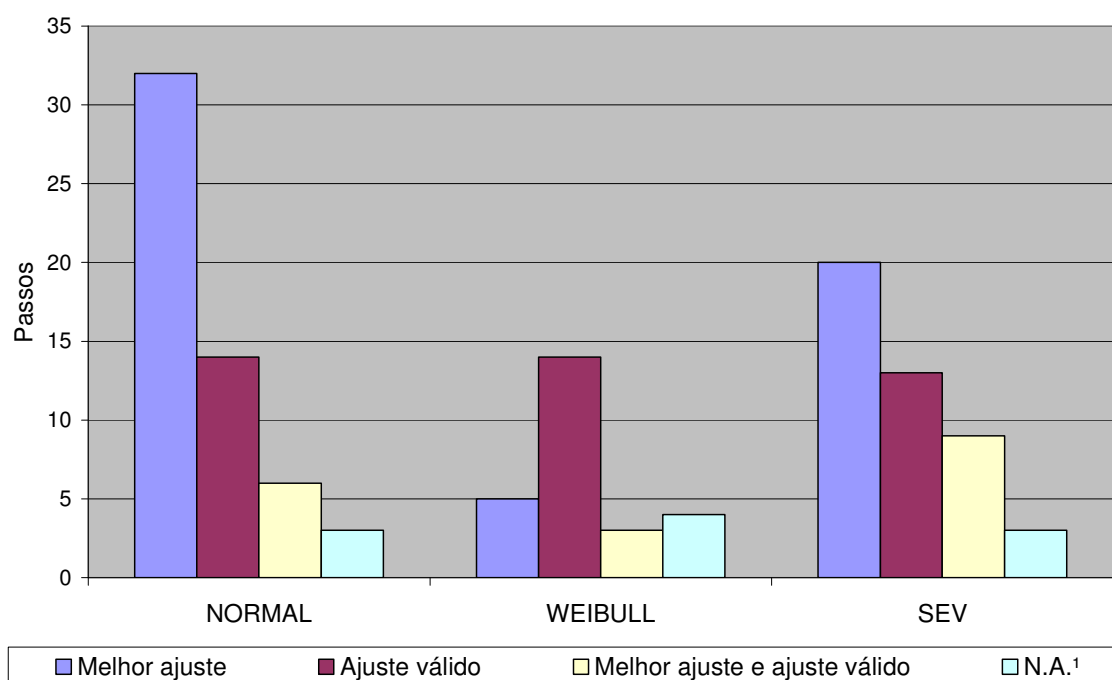
- **Nota 1:** Critérios: Tab. 3.4 e Eq. 3.5, desconsiderando-se o critério de mínimo de 30 tubos na amostra.
- **Nota 2:** Critérios definidos no item 4.2 para aumento da amostra

Figura 5.5 – Tamanho da amostra para populações estratificadas por passo.

(fonte: autor)

O resultado da análise dos ajustes das distribuições: Normal, Weibull e SEV, foi apresentado de forma resumida na Fig. 5.6 e de forma integral na Tab. A.6. A distribuição Student não foi considerada nesta etapa do trabalho por não ter apresentado bons resultados para tratamento de dados extremos.

É possível observar que, apesar da distribuição Normal apresentar o melhor ajuste para a maioria dos passos, a distribuição SEV apresentou maior número de passos com ajustes válidos e menores valor de AD, sendo assumida como distribuição característica para a representação estratificada por passos.



Nota 1: A coluna N.A. representa os passos que não permitiram a definição de parâmetros para estimação das distribuições.

Figura 5.6 – Histograma dos ajustes obtidos pelo teste de AD para as distribuições: Normal, Weibull e de SEV, aplicado às amostras estratificadas por passo. (fonte: autor).
 Duas observações se fazem necessárias em relação à análise do ajuste das distribuições por passo:

1. Alguns passos não possibilitaram ajustes em nenhuma das distribuições propostas por não apresentarem variabilidade em seus dados – coluna N.A. da Fig. 5.6. Esta ocorrência demonstra uma deficiência do ensaio IRIS, que não possui uma técnica automática de registro de espessuras, sendo necessário que o operador atue para detecção da menor espessura. Contudo, os passos que

apresentaram $s=0$, também apresentaram espessura mínima igual, ou próxima, à sua espessura nominal, evidenciando sua boa condição.

2. A análise dos ajustes realizada para os dados sem a estratificação demonstrou que o ajuste seria possível com confiabilidade suficiente em apenas 4 equipamentos, sendo que, pela análise dos dados estratificados por passo, 13 equipamentos apresentaram pelo menos um passo com ajuste adequado – Tab. A.6.

Os resultados dos testes de hipóteses aplicados aos dados estratificados por passo estão apresentados de forma simplificada na Fig. 5.7 e de forma completa na Tab. A.7.

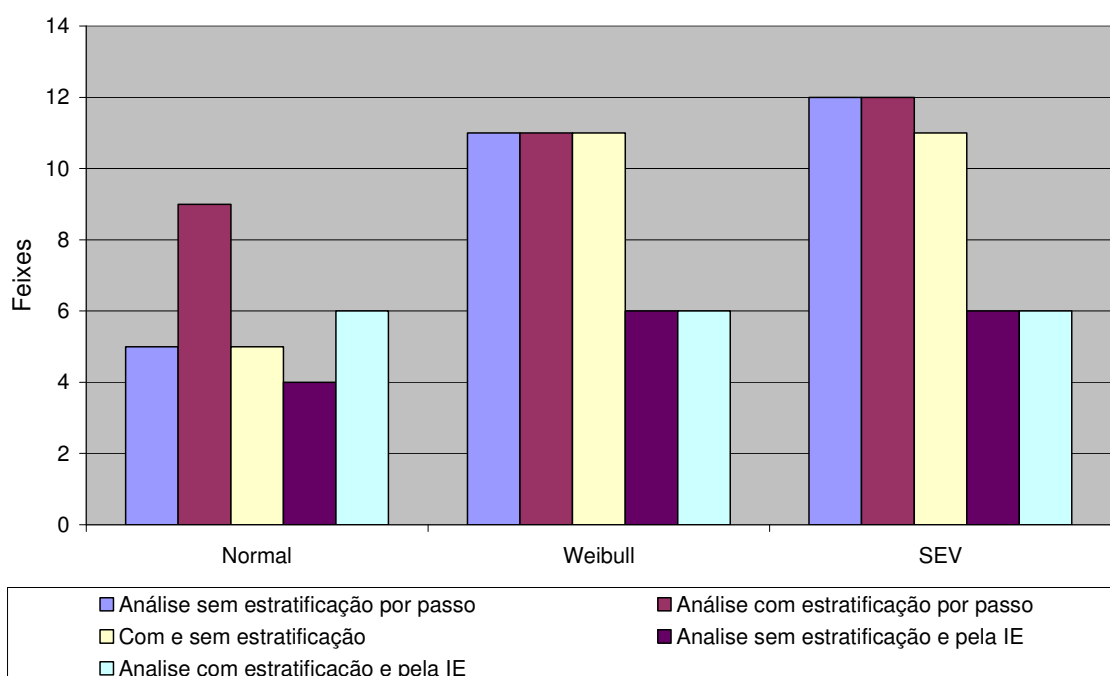


Figura 5.7 – Histograma dos equipamentos reprovados. Na análise estratificada por passo, a reprovação de um dos passos determinou a substituição dos tubos.

O resultado da análise estratificada por passo demonstrou coerência com a análise do feixe como um todo, apresentando maior precisão em seus resultados, uma vez que as distribuições apresentaram, em geral, melhores ajustes aos dados provenientes do ensaio IRIS, Fig. 5.8. É interessante observar que, além de melhorar o ajuste, é demonstrado

que a estratificação por passos reduziu a variabilidade dos ajustes, reduzindo o valor de AD dos ajustes, ou seja, melhorando a qualidade dos testes.

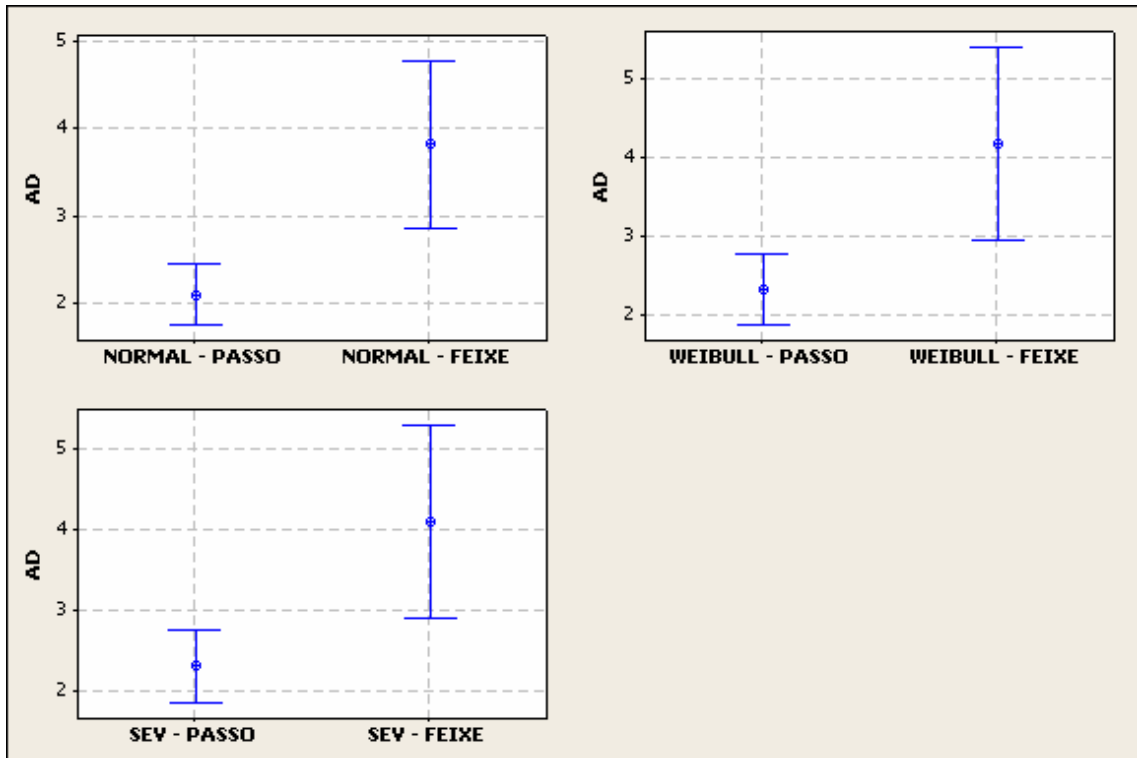


Figura 5.8 – Intervalos de confiança a 95% para os resultados dos testes de AD.

(fonte: autor)

A estratificação por passo permitiu identificar os passos críticos de cada equipamento, sendo que, de forma conservativa, foi adotado que a reprovação de um dos passos do feixe como determinante para substituição de todos os tubos do feixe.

A análise dos dados estratificados por passo pela distribuição Normal cobriu todos os equipamentos reprovados pela análise do IE e pela análise sem estratificação, tendo reprovado, inclusive, os feixes dos 103-E-06 e 104-E-09B – que haviam sido aprovados pela IE e pela análise sem estratificação. Estes resultados são interessantes, pois confirmam os resultados observados pelas análises com as distribuições Weibull e SEV para estes equipamentos e alertam que o tratamento dos dados sem a estratificação é menos representativo, uma vez que passos em boas condições melhoram a condição geral do feixe, possibilitando a aceitação de passos com baixa confiabilidade.

As análises pela distribuição Weibull com e sem estratificação por passos apresentaram o mesmo resultado, demonstrando que esta distribuição, apesar de não apresentar os melhores ajustes para os casos analisados, representa bem dados extremos. Como os ajustes por passo apresentaram menores valores para o teste de AD, ou seja, apresentaram maior precisão para representação das populações, a estratificação por passo é recomendável.

As análises pela distribuição de SEV apresentaram coerência na maior parte das análises com e sem estratificação, porém ocorreram divergências nos resultados de dois feixes: 103-E-07B e 109-E-101B, sendo o primeiro reprovado apenas pela análise com estratificação por passos e o último apenas na análise sem estratificação.

No primeiro caso, a divergência foi atribuída à falta de variabilidade dos dados provenientes do passo 2, o que levou à uma redução da variabilidade do feixe como um todo e sua aprovação na análise sem estratificação. O passo 1 deste equipamento, por sua vez, apresentou p-valor superior ao α proposto, de forma que a análise estratificada por passo levou à rejeição deste feixe.

No segundo caso, os passo do 109-E-101B não apresentaram diferenças significativas entre si, sendo os dois passos considerados como uma mesma população segundo o teste de homogeneidade. Deste modo, a análise estratificada e conseqüente alteração dos valores de referência levaram à aprovação dos passos. Esta divergência observada destaca a necessidade de um tamanho de amostra adequado para que boas inferências possam ser realizadas.

CAPÍTULO 6

Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo das técnicas utilizadas para avaliação de feixes tubulares de trocadores de calor por meio da análise estatística de resultados provenientes de ensaio IRIS. Foram utilizados os modelos de distribuição Normal, Student, Weibull e Valores Mínimos Extremos (SEV) para representação das espessuras mínimas do feixe.

O trabalho consistiu na análise crítica dos resultados da inspeção de 30 equipamentos realizada durante parada programada de uma unidade de craqueamento catalítico. Os resultados obtidos por técnicas e critérios usualmente empregados na inspeção de trocadores de calor foram comparados com aqueles obtidos pelos critérios e técnicas estatísticas propostas.

A representação dos feixes pela distribuição Normal, apesar de ser frequentemente utilizada devido à facilidade de cálculo de seus parâmetros e adequações ao Teorema Central do Limite, pode levar à conclusões equivocadas, uma vez que os resultados do ensaio IRIS são espessuras mínimas, isto é, dados extremos e que se ajustam com melhor precisão a distribuições assimétricas. Contudo, vale ressaltar que a população normal se mostrou adequada para representação de alguns casos, especialmente na análise com estratificação por passos.

A representação dos feixes pela distribuição Student não se mostrou adequada, uma vez que esta distribuição tem pouca sensibilidade a dados extremos, dando maior peso às medidas centrais. Sendo assim, conforme era esperado, a análise pelo modelo desta distribuição aprovou feixes com baixa confiabilidade e que foram reprovados pela análise do IE e demais modelos.

A representação dos feixes pela distribuição Weibull e SEV confirmaram os resultados da análise realizada pela IE e identificaram outros feixes com baixa confiabilidade que não haviam sido detectados pelas técnicas usuais utilizadas pela IE.

A estratificação dos dados por passo permitiu melhores ajustes das distribuições, permitindo maior precisão nas decisões dos testes de hipóteses relativos à substituição dos tubos do feixe ou não. O modelo SEV teve papel de destaque, apresentando os melhores ajustes aceitáveis para a condição de análise estratificada por passo.

Contudo, uma vez que o planejamento da inspeção não adotou os critérios propostos para dimensionamento da amostra, a amostragem se mostrou menor do que a recomendada na maior parte dos casos, quando da análise estratificada por passo. Este fato sugere uma redução no poder dos testes de hipóteses, ou seja, um aumento na possibilidade de ocorrências de erro tipo II na análise do feixe.

As técnicas estatísticas apresentadas mostraram grande potencial para quantificação da confiabilidade do feixe e redução da subjetividade da análise. Apesar disso, a experiência dos profissionais envolvidos e análise crítica dos dados e resultados das análises sempre serão fatores chaves para o serviço de inspeção de feixes tubulares.

CAPÍTULO 7

Sugestões para Trabalhos Futuros

De acordo com as conclusões apresentadas no capítulo 6, recomenda-se a realização dos seguintes trabalhos futuros:

- Realização de nova análise por meio da aplicação dos critérios de dimensionamento da amostra direcionados para os passos individualmente, possibilitando a confirmação das tendências observadas.
- Realização de inspeção em 100% dos tubos em uma amostra de 3 equipamentos. Os dados coletados permitirão a simulação de diferentes amostras, variando-se o tamanho e a posição dos dados coletados, de forma a confirmar a validade dos ajustes de cada modelo.
- Associar a metodologia de inspeção baseada em risco para quantificação do risco de falha e auxílio no dimensionamento da amostra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, 1985, NBR 5429 – Planos de Amostragem e Procedimentos na Inspeção por Variáveis, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

Afonso, E. M., Cobucci, J. C. e Carneval, R. O., 1988, Monitoração da Vida Remanescente de Tubos de Trocadores de Calor por Correntes Parasitas, In: 10ª Mesa Redonda de Materiais, Inspeção de Equipamentos e Controle de Corrosão, Petrobras – CENPES, Rio de Janeiro.

Al-Qadeeb, F. E., 2005, Tubing Inspection Using Multiple NDT Techniques, In: 3º MENDT, Manama. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/p18.pdf>. Acessado em 01 de junho de 2008.

API, 2001, API RP 572 – Inspection of Pressure Vessels (Towers, Drums, Reactors, Heat Exchangers, and Condensers), 2ª ed., American Petroleum Institute, Washington.

API, 2003a, API RP 571 – Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, 1ª ed, American Petroleum Institute, Washington.

API, 2003b, API STD 660 – Shell-and-Tube Heat Exchangers for General Refinery Services, 7ª ed, American Petroleum Institute, Washington.

ASM, 1997, ASM Handbook Vol. 17 – Nondestructive Evaluation and Quality Control, 9ª ed., ASM, Ohio.

ASME, 2006, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 1, American Society of Mechanical Engineers, New York.

ASTM, 2004, G16 – Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data, ASTM International, Pennsylvania.

Barringer, P., 2001, Problem of the Month – March 2001 – Heat Exchanger IRIS Wall Thickness and Gumbel Smallest Distributions, Barringer & Associates Inc., disponível em: <http://www.barringer1.com/mar01prb.htm>, acessado em 01 de junho de 2008.

Barringer, P., 2004, How Many Heat Exchanger Tubes Should I Inspect?, Barringer & Associates Inc., disponível em: <http://www.barringer1.com/mar04prb.htm>, acessado em 01 de junho de 2008.

Bartlett, J. E., Kotrlik, J. W., Higgins, C. C., 2001, Organizational Research: Determining Appropriate Sample Size in Survey Research, In: Information Technology, Learning, and Performance Journal, Vol. 19 nº 1, disponível em: <http://www.osra.org/itlpj/bartlettkotrlikhiggins.pdf>, acessado em 01 de junho de 2008.

BBL, 2005, IT 30.02.001 – Instrução de Trabalho: Ensaio IRIS em Caldeiras e Trocadores de Calor, Rev. 3, Betim.

Birring, A., 2001, Selection of NDT Techniques for Heat Exchanger Tubing, In: Materials Evaluation, Vol. 9 nº 3, The American Society For Nondestructive Testing, Ohio. Também disponível em: <http://www.nde.com/paper54.htm>, acessado em 01 de junho de 2008.

Birring, A., 2004, Eddy Current Testing vs. Ultrasonic IRIS for Inspection of Heat Exchanger Tubing, disponível em <http://www.nde.com/ECT%20vs%20IRIS.pdf>, acessado em 01 de junho de 2008.

Bejan, A. e Kraus, A. D., 2003, Heat Transfer Handbook, John Wiley & Sons Inc., New York.

Boogaard, J., 1978, Measurement of Heat-Exchanger Tube Thickness, NDT International, Pennsylvania.

Brasil, 1998, Ministério do Trabalho e Emprego, NR 13 – Caldeiras e Vasos de Pressão. Disponível em: http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_13.asp, Acesso em 01 de junho de 2008.

Callister, W. D., 2002, *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 5ª ed., LTC, Rio de Janeiro.

Carneval, R. O., 2002, *Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Dados para Agilizar o Emprego do Ensaio de Correntes Parasitas em Trocadores de Calor*, In: 6ª Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos – COTEQ e XXI Congresso Nacional de Ensaio Não-destrutivos, ABENDE, Salvador.

Cochran, W. G., 1977, *Sampling Techniques*, John Wiley & Sons Inc., New York.

Evans, J. W., Johnson, R. A. e Green, D. W., 1989, *Two and Three-Parameter Weibull Goodness-of-fit*, United States Department of Agriculture, disponível em: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fplrp493.pdf>, acessado em 01 de junho de 2008.

Evans, M., Hastings, N. e Peacock, B., 2000, *Statistical Distributions*, 3ª ed, John Wiley & Sons Inc., New York.

Figueredo, M. A., 2003, *Inspeção de Tubos de Trocadores de Calor e de Caldeiras com as Técnicas IRIS e Campo Remoto Conjugadas*, In: 6ª Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos – COTEQ e XXI Congresso Nacional de Ensaio Não-destrutivos, ABENDE, Salvador.

Geaquinto, R. H., 2007, *Descrição Geral de Permutadores de Calor*, Rio de Janeiro (Apostila da disciplina Trocadores de Calor, Curso de Formação de Engenheiros de Equipamentos, Universidade Petrobras).

Gentil, V., 2007, *Corrosão*, 5ª ed., LTC, Rio de Janeiro.

ISO, 2001, *ISO STD 2859-1:1999 – Sampling Procedures for Inspection by Attributes – Part 1: Sampling Schemes Indexed by Acceptance Quality Limit (AQL) for Lot-by-Lot Inspection*, 2ª ed, International Organization for Standardization – ISO, Switzerland.

Juran, J. M. e Godfrey, A. B., 1998, Juran's Quality Handbook, 5ª ed., McGraw-Hill, New York.

Lapponi, C., 2005, Estatística Usando o Excel, 4ª ed., Elsevier, Rio de Janeiro.

Leotti, V. B., Birck, A. R. e Riboldi, J., 2005, Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer-Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação. In: 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO) e 50ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS), Londrina.

Lieberman, N. P. e Lieberman, E. T., 2003, Working Guide to Process Equipment, 2ª ed., McGraw-Hill, New York.

Ludwig, E. E., 2001, Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Vol. 3, 3ª ed, GPP, Texas.

Madureira, C., Servciuc, N. e Birchall, M., 2004, Ensaio IRIS: Uma Ferramenta para Avaliação da Integridade Estrutural e Avaliação da Vida Útil de Trocadores de Calor e Caldeiras, disponível em www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/ensayoiris.pdf, acessado em 01 de junho de 2008.

Matar, S. e Hatch, L. F., 2000, Chemistry of Petrochemical Processes, 2ª ed, GPP, Massachusetts.

MKC, 2008, Contém informações institucionais, técnicas, notícias, publicações e serviços. Disponível em <http://www.mkc-china.com/products/iris/iris.htm>, acessado em 01 de junho de 2008.

Montgomery, D. C. e Runger, G. C., 2003, Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros, 2ª ed., LTC, Rio de Janeiro.

NIST/Sematech, 2007, NIST/Sematech e-Handbook of Statistical Methods, disponível em: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, acessado em 01 de junho de 2008.

Ohadi, M. M., 2005, Heat Exchangers. In: Dorf, R. C. (Ed.), 2005, The Engineering Handbook, 2ª ed, CRC, Florida.

Oliveira, R. V. e Carneval, R. O., 1993, Inspeção de Tubos Ferromagnéticos de Permutadores de Calor, In: 15ª Mesa Redonda de Materiais, Inspeção de Equipamentos e Controle de Corrosão, Petrobras – CENPES, Rio de Janeiro.

Olympus, 2006, Tube Inspection Probe Catalog 2006-2007. Disponível em: http://www.olympusndt.com/data/File/rd-tech-probes/Tube_Probe.en.pdf, Acessado em 01 de junho de 2008.

Petrobras, 1987, N-2254 – Inspeção de Tubos Não-Ferromagnéticos por Correntes Parasitas, Comissão de Normas Técnicas da Petrobras, Rio de Janeiro.

Petrobras, 2001, N-466 – Projeto Mecânico de Trocador de Calor Casco e Tubo, Rev. G, Comissão de Normas Técnicas da Petrobras, Rio de Janeiro.

Petrobras, 2002, N-2690 – Ensaio não-destrutivo IRIS, Comissão de Normas Técnicas da Petrobras, Rio de Janeiro.

Petrobras, 2004, PT-INSPEÇÃO-005/04 – Definição de espessuras mínimas de tubos de trocadores de calor, REPAR/IE, Araucária.

Petrobras, 2007, N-2511 – Inspeção em Serviço de Trocadores de Calor, Rev. C, Comissão de Normas Técnicas da Petrobras, Rio de Janeiro.

Petrobras, 2008, Petróleo Brasileiro S.A. Contém informações institucionais, técnicas, notícias, publicações e serviços. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br>. Acesso em 01 junho 2008.

Pinto, J. M. e Victor, P. A., 2005, Estatística Básica, Belo Horizonte. (Apostila da disciplina Estatística Básica, Curso de pós-graduação em engenharia mecânica, UFMG).

Reliasoft, 2007, Life Data Analysis Reference, disponível em: <http://www.weibull.com/lifedatawebcontents.htm>, acessado em 01 de junho de 2008.

Rodrigues, J. M., 2002, Hidrojateamento: Eficiência Técnica e Grande Risco Aliado à Segurança Máxima. In: 6º Conferência sobre Tecnologia de Materiais. Disponível em: <http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE029.PDF>, acessado em 01 de junho de 2008.

Romeu, J. L., 2003, Anderson-Darling: A Goodness of Fit Test for Small Samples Assumptions, Selected Topics in Assurance Related Technologies Vol. 10 nº 5, disponível em: http://src.alionscience.com/pdf/A_DTest.pdf, acessado em 01 de junho de 2008.

Romeu, J. L., 2005, Empirical Assessment of Normal and Lognormal Distribution Assumptions, Selected Topics in Assurance Related Technologies Vol. 9 nº 6, disponível em: <http://rac.alionscience.com/pdf/NLDIST.pdf>, acessado em 01 de junho de 2008.

Sabino, R. S., Alvisi, P. P., Werneck, H. S., Cimini Jr., C. A., Pinto, J. M., 2007, Inspection of Tubular Heat Exchanger Bundles: A Statistical Approach. In: 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasília.

Santin, J. L., 2003, Ultra-som: Técnica e Aplicação, 2ª ed., Artes Gráficas e Editora Unificado, Paraná.

Shah, R. K., 1981, Classification of Heat Exchanger. In: Heat Exchangers: Kakac, S., Bergles, A. E. e Mavinger, F. (Eds.), 1981, Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design, Hemisphere Publishing, New York.

Shah, R. K. e Kenneth, J. B., 1999, Heat Exchangers. In: Kreith, F. (Ed.), 1999, Mechanical Engineering Handbook, CRC, Boca Raton.

Shull, P. J., 2002, Eddy Current, In: Shull, P. J. (Ed.), 2002, Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques and Applications, Marcel Dekker Inc., New York.

Silveira, L. T., 2008, Permutadores de Calor, Rio de Janeiro (Apostila da disciplina Trocadores de Calor, Curso de Formação de Engenheiros de Equipamentos, Universidade Petrobras).

Soong, T. T., 2004, Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers, John Wiley & Sons Inc., New York.

Telles, P. C., 1996, Vasos de Pressão, 2ª ed., LTC, Rio de Janeiro.

Telles, P. C., 2003, Materiais para Equipamentos de Processo, 6ª ed., Interciência, Rio de Janeiro.

TEMA, 1998, Standards, 7ª ed, Tubular Exchanger Manufactures Association, New York.

TWI, 2002, Guidelines for Use of Statistics for Analysis of Sample Inspection of Corrosion, Health and Safety Executive Books, United Kingdom.

Vivanco, M. J., 1994, Análise de Valores Extremos no Tratamento Estatístico da Corrosão de Equipamentos, UNICAMP, Campinas.

ANEXOS

Tabela A.1 – Dados construtivos e operacionais dos equipamentos selecionados para desenvolvimento do estudo.

Equipamento	103-E-06	103-E-07A	103-E-07B
Serviço	Resfriador de diesel	Pré-aquecedor de carga	Pré-aquecedor de carga
Fluido interno ¹	Água de refrigeração	Nafta	Nafta
Fluido externo ¹	Diesel	Carga CCF (gasóleo)	Carga CCF (gasóleo)
P₁ (kPa)	700	1050	1050
Liverável em campanha?	Não	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,2	0,3	0,3
t_{acum} (anos)	8,6	8,6	8,6
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	166 (83, 83)	474 (237, 237)	474 (237,237)
Equipamento	103-E-09A	103-E-09B	103-E-10
Serviço	Resfriador de óleo combustível	Resfriador de óleo combustível	Pré-aquecedor de carga
Fluido interno ¹	Água de refrigeração	Água de refrigeração	Nafta
Fluido externo ¹	Óleo combustível	Óleo combustível	Carga CCF (gasóleo)
P₁ (kPa)	670	670	1000
Liverável em campanha?	Não	Não	Sim, mas com transtorno operacional
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,2	0,2	0,3
t_{acum} (anos)	4,4	4,4	22,8
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	140 (70, 70)	140 (70, 70)	64 (32, 32)

Nota 1: Em relação aos tubos

Nota 2: Número de tubos do feixe (Número de tubos por passo)

Tabela A.1 (continuação) – Dados construtivos e operacionais dos equipamentos selecionados para desenvolvimento do estudo

Equipamento	103-E-11A	103-E-11B	103-E-12A
Serviço	Resfriador de nafta	Resfriador de nafta	Condensador de topo
Fluido interno ¹	Água de refrigeração	Água de refrigeração	Água de refrigeração
Fluido externo ¹	Nafta	Nafta	Nafta + gases
P_i (kPa)	670	670	670
Livrável em campanha?	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,2	0,2	0,2
t_{acum} (anos)	11,4	8,6	4,5
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	104 (52, 52)	104 (52, 52)	758 (379, 379)
Equipamento	103-E-12B	103-E-12C	103-E-12D
Serviço	Condensador de topo	Condensador de topo	Condensador de topo
Fluido interno ¹	Água de refrigeração	Água de refrigeração	Água de refrigeração
Fluido externo ¹	Nafta + gases	Nafta + gases	Nafta + gases
P_i (kPa)	670	670	670
Livrável em campanha?	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,2	0,2	0,2
t_{acum} (anos)	4,4	4,3	8,8
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	758 (379, 379)	758 (379, 379)	758 (379, 379)
Equipamento	103-E-12E	103-E-12F	104-E-09A
Serviço	Condensador de topo	Condensador de topo	Resfriador de produto
Fluido interno ¹	Água de refrigeração	Água de refrigeração	Água de refrigeração
Fluido externo ¹	Nafta + gases	Nafta + gases	Produto
P_i (kPa)	670	670	670
Livrável em campanha?	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional	Não
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,2	0,2	0,2
t_{acum} (anos)	3,4	4,3	8,6
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	758 (379, 379)	758 (379, 379)	144 (72, 72)

Tabela A.1 (continuação) – Dados construtivos e operacionais dos equipamentos selecionados para desenvolvimento do estudo

Equipamento	104-E-09B	104-E-10	104-E-11
Serviço	Resfriador de produto	Aquecedor de nafta	Aquecedor de nafta
Fluido interno ¹	Água de refrigeração	Nafta	Nafta
Fluido externo ¹	Produto	Nafta	Nafta
P_i (kPa)	670	1200	1410
Livrável em campanha?	Não	Não	Não
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,2	0,3	0,3
t_{acum} (anos)	4,4	12,8	4,4
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	144 (72, 72)	220 (110, 110)	344 (172, 172)
Equipamento	104-E-12A	104-E-12B	104-E-14A
Serviço	Refervedor	Refervedor	Condensador de topo
Fluido interno ¹	Produto	Produto	Água de refrigeração
Fluido externo ¹	Nafta	Nafta	GLP
P_i (kPa)	1020	1020	670
Livrável em campanha?	Não	Não	Sim, mas com transtorno operacional
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,3	0,3	0,2
t_{acum} (anos)	8,6	4,4	9,6
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	220 (110, 110)	220 (110, 110)	736 (368, 368)
Equipamento	104-E-14B	104-E-14C	104-E-14D
Serviço	Condensador de topo	Condensador de topo	Condensador de topo
Fluido interno ¹	Água de refrigeração	Água de refrigeração	Água de refrigeração
Fluido externo ¹	GLP	GLP	GLP
P_i (kPa)	670	670	670
Livrável em campanha?	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,2	0,2	0,2
t_{acum} (anos)	9,6	8,6	8,6
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	736 (368, 368)	736 (368, 368)	736 (368, 368)

Tabela A.1 (conclusão) – Dados construtivos e operacionais dos equipamentos selecionados para desenvolvimento do estudo

Equipamento	104-E-16A	104-E-16B	109-E-101A
Serviço	Resfriador de nafta	Resfriador de nafta	Resfriador de DEA
Fluido interno ¹	Água de refrigeração	Água de refrigeração	Água de refrigeração
Fluido externo ¹	Nafta	Nafta	DEA
P_i (kPa)	670	670	690
Livrável em campanha?	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional	Sim, mas com transtorno operacional
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,2	0,2	0,2
t_{acum} (anos)	8,6	8,6	8,6
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	630 (311, 319)	630 (311, 319)	576 (288, 288)
Equipamento	109-E-101B	109-E-103	109-E-105
Serviço	Resfriador de DEA	DEA x DEA	Condensador de topo
Fluido interno ¹	Água de refrigeração	DEA	Água de refrigeração
Fluido externo ¹	DEA	DEA	DEA + amina
P_i (kPa)	690	2370	670
Livrável em campanha?	Sim, mas com transtorno operacional	Não	Não
e_{nom} (mm)	2,1	2,1	2,1
e_{proj} (mm)	0,2	0,4	0,2
t_{acum} (anos)	8,6	8,6	4,4
t_{camp} (anos)	5,0	5,0	5,0
N²	576 (288, 288)	492 (246, 246)	400 (200, 200)

Nota 1: Em relação aos tubos

Nota 2: Número de tubos do feixe (Número de tubos por passo)

Tabela A.2 – Resultados dos ensaios IRIS

103-E-06					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	1,7	11	4	1,4
2	3	1,8	11	5	1,6
3	7	1,8	12	1	1,7
4	1	1,4	12	9	SNP
5	2	1,5	13	8	SNP
6	5	1,8	14	4	1,3
6	8	2,1	14	7	SNP
7	1	1,6	15	1	1,7
7	8	1,8	15	5	1,4
8	4	1,7	15	9	1,2
8	6	1,8	16	7	SNP
9	2	1,6	17	3	1,5
9	9	1,7	19	3	1,4
10	8	1,7	20	1	1,6
10	11	1,8	20	2	1,9

103-E-07A					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	2	2,0	12	13	1,8
3	13	2,0	12	24	2,0
3	18	2,0	13	4	2,0
4	4	SNP	13	10	2,0
5	21	2,0	13	17	1,9
6	9	2,0	14	25	1,9
6	17	2,0	15	22	1,6
8	4	2,0	16	5	1,8
8	6	2,0	16	11	1,9
9	23	1,9	16	17	1,8
10	8	2,0	17	2	2,0
11	1	2,0	19	12	2,0
11	18	2,0	19	17	1,8
			19	21	SNP
			20	3	2,0
			22	3	1,8
			22	11	1,7

103-E-07B					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	3	1,8	12	23	2,0
2	8	1,6	13	12	2,0
2	13	2,0	14	4	2,0
3	7	2,0	14	20	2,0
4	16	2,0	15	1	2,0
5	12	2,7	15	17	2,0
6	7	2,0	16	14	2,0
6	17	2,0	17	17	2,0
7	4	2,0	18	21	2,0
8	17	2,0	19	9	2,0
9	6	2,0	20	1	2,0
10	13	2,0	20	15	2,0
11	2	2,0	21	1	2,0
11	16	1,9	21	11	2,0
11	25	1,9	22	1	2,0

103-E-09A					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	2,0	7	4	2,0
1	4	2,0	7	7	2,0
1	8	2,0	7	12	1,9
2	6	2,0	8	3	2,0
2	8	2,0	8	9	2,0
3	2	1,9	8	11	2,0
3	5	2,0	9	5	2,0
4	6	2,0	9	12	1,7
4	11	1,9	10	1	1,7
5	1	2,0	10	4	1,9
5	8	2,0	10	10	1,8
5	14	2,0	11	6	2,0
6	4	2,0	11	10	1,8
6	9	2,0	12	4	2,0
6	11	2,0	12	8	2,0

Tabela A.2 (continuação) – Resultados dos ensaios IRIS

103-E-09B					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	3	1,8	7	1	1,9
1	6	1,9	7	3	1,9
2	1	1,8	7	8	1,9
2	9	2,0	8	11	1,8
3	4	1,6	8	14	1,7
3	7	1,9	9	1	1,9
4	3	1,8	9	4	1,8
4	11	1,8	9	8	1,9
5	1	1,8	9	12	1,9
5	2	1,9	10	2	1,9
5	6	1,7	10	10	1,9
5	10	1,9	11	5	1,9
6	3	1,9	11	8	1,9
6	9	1,9	12	1	1,9
6	14	1,9	12	5	1,9

103-E-10					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	0,0	5	1	1,0
1	3	0,5	5	3	0,6
1	5	0,5	5	5	0,5
2	2	SNP	5	7	0,7
2	3	0,7	6	2	1,0
2	5	SNP	6	4	0,8
2	6	0,3	6	6	0,7
2	8	0,7	6	7	0,7
3	1	SNP	7	1	1,1
3	4	0,8	7	2	0,8
3	6	SNP	7	5	1,0
3	7	2,3	7	9	1,1
4	2	1,1	8	2	1,5
4	6	0,4	8	3	1,9
4	8	0,8	8	5	0,6

103-E-11A					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	2,0	6	5	1,9
1	5	1,2	6	10	1,9
1	7	1,8	7	1	1,9
2	5	1,9	7	4	2,0
2	7	1,6	7	7	2,0
2	10	1,9	7	12	1,9
3	3	1,9	8	1	2,0
3	6	1,9	8	4	1,9
3	8	1,9	8	7	1,9
4	1	1,9	9	2	1,9
4	10	2,0	9	6	1,9
4	12	1,9	9	10	1,9
5	2	2,0	10	2	1,6
5	5	1,9	10	4	1,9
5	8	1,9	10	8	1,8

103-E-11B					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	1,7	6	5	1,9
1	4	1,8	6	9	1,9
2	1	1,9	7	2	1,8
2	4	1,8	7	4	1,9
2	8	1,7	7	7	1,7
2	10	1,5	7	12	1,6
3	2	1,8	8	3	1,8
3	5	1,6	8	5	1,9
3	9	1,8	8	8	1,9
4	1	1,6	8	10	1,9
4	4	1,7	9	1	1,9
4	9	1,8	9	5	1,9
5	3	1,7	9	9	1,9
5	7	1,8	10	5	2,0
5	12	1,8	10	1	2,0

Tabela A.2 (continuação) – Resultados dos ensaios IRIS

103-E-12A					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	1,6	16	12	1,7
1	7	1,8	17	17	1,9
2	13	1,8	18	8	2,0
3	12	1,9	18	28	2,0
4	7	2,0	19	21	1,7
5	15	1,8	20	12	1,7
6	8	2,0	21	4	1,9
7	3	2,0	21	18	2,0
7	12	1,6	22	22	1,8
8	21	2,0	23	13	2,0
9	11	2,0	24	7	2,0
10	17	1,9	24	18	1,7
11	20	2,0	25	16	2,0
11	25	2,0	26	21	1,8
12	9	2,0	27	5	1,8
12	16	2,0	28	8	1,9
13	13	2,0	29	10	1,9
14	5	2,0	30	5	2,0
15	16	1,7	30	11	2,0

103-E-12B					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	7	1,6	16	16	SNP
2	11	1,7	16	27	1,8
3	6	1,8	17	10	1,8
4	2	1,8	18	4	1,8
4	18	1,8	18	17	1,6
5	16	SNP	19	22	1,7
6	4	1,8	20	1	1,8
6	8	1,9	20	13	1,5
7	16	1,6	21	6	1,8
8	5	1,6	21	25	1,8
9	24	1,6	22	20	1,8
10	17	1,8	23	10	1,6
11	4	1,8	24	27	1,8
11	10	1,8	25	21	1,8
12	24	1,7	26	7	1,8
13	6	1,8	27	12	1,9
14	15	1,8	28	16	1,8
15	3	1,8	29	1	1,8
15	22	1,8	30	3	1,5
			30	9	1,8

103-E-12C					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	1,7	16	8	1,7
2	7	1,8	17	10	2,0
2	15	1,9	17	28	1,9
3	7	1,8	18	18	1,7
4	11	1,8	19	5	1,9
5	7	1,9	20	23	1,4
5	21	2,0	21	20	1,9
6	18	1,9	21	28	1,9
7	27	2,0	22	13	1,8
8	6	1,8	23	8	2,0
8	24	1,8	23	23	1,9
9	12	1,9	24	17	1,3
10	6	1,8	25	4	1,9
10	26	1,8	25	13	1,8
11	24	1,8	26	21	1,8
12	7	1,8	27	13	1,9
13	10	2,0	28	8	2,0
14	3	2,0	29	10	1,9
15	7	1,9	30	11	1,9

103-E-12D								
Passo 1			Passo 2					
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	9	1,8	16	27	1,9	24	2	1,4
2	3	1,9	16	28	1,9	25	22	1,8
3	15	1,8	16	31	SNP	27	18	1,7
4	11	1,9	17	12	1,5	27	19	1,6
4	13	1,9	17	13	1,8	28	5	1,8
5	6	1,9	18	7	1,9	30	1	1,7
5	14	1,9	18	19	1,6	30	11	SNP
6	6	1,9	18	26	1,8			
7	2	1,9	19	1	SNP			
7	10	1,9	19	26	1,8			
8	18	SNP	20	4	1,6			
9	5	SNP	21	11	1,8			
10	12	1,9	22	3	1,8			
11	7	1,5	21	19	1,8			
12	27	SNP	21	20	1,5			
13	5	SNP	22	5	1,8			
14	22	SNP	22	7	1,8			
15	2	1,9	22	8	1,5			
15	15	1,8	22	9	SNP			

Tabela A.2 (continuação) – Resultados dos ensaios IRIS

103-E-12E					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	8	1,8	16	8	1,7
2	15	1,8	16	27	1,7
3	4	1,7	17	14	1,7
3	11	1,8	18	19	1,7
4	10	1,8	18	27	1,8
5	18	1,8	19	4	1,7
6	4	1,8	19	11	1,5
7	12	1,8	20	18	1,6
8	19	1,8	21	7	1,3
9	9	1,5	22	21	1,6
10	5	1,8	23	10	1,7
10	25	1,3	24	17	1,1
11	17	1,6	25	7	1,6
12	8	1,8	26	2	1,4
12	22	1,8	26	13	1,5
13	14	1,8	27	19	1,5
14	25	1,8	28	6	1,4
15	4	1,6	29	9	1,3
15	29	1,7	30	1	1,4

103-E-12F					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	5	1,8	16	14	1,6
2	9	1,8	16	27	1,6
3	7	1,8	17	10	1,6
4	15	1,6	18	22	1,4
5	6	1,7	19	20	1,4
6	20	1,4	19	27	1,4
7	16	1,6	20	8	1,6
7	27	1,6	21	17	1,3
8	7	1,3	22	5	1,6
9	24	1,6	23	18	1,4
10	11	1,5	24	11	1,6
11	20	1,4	25	22	1,5
12	9	1,6	26	4	1,7
12	29	1,7	26	17	1,7
13	6	1,7	27	9	1,6
13	28	1,7	27	20	1,6
14	23	1,6	28	12	1,2
15	3	1,7	29	7	1,7
15	31	1,7	30	11	1,5

104-E-09A					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	2,0	8	1	1,9
2	5	2,0	8	9	1,9
2	8	2,0	8	11	1,8
3	3	2,0	9	1	2,0
3	5	2,0	9	11	1,9
3	9	2,0	10	6	1,7
4	6	2,0	10	11	1,9
4	9	2,0	11	7	1,7
5	1	2,0	11	12	1,8
5	6	2,0	12	3	1,9
6	4	2,0	12	7	1,9
6	5	2,0	13	3	1,9
7	7	2,0	13	8	1,8
7	10	2,0	14	1	SNP
7	13	2,0	14	2	SNP

104-E-09B					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	1,6	8	8	1,8
1	2	1,8	8	10	1,8
2	1	1,8	8	14	1,6
2	8	1,7	9	3	1,8
3	1	1,6	9	8	1,3
3	3	1,6	10	1	1,3
4	3	1,7	10	6	1,8
4	12	1,6	11	2	1,8
5	1	1,8	11	8	1,8
5	11	1,8	12	3	1,8
5	12	1,8	12	6	1,8
6	6	1,7	13	1	1,8
6	14	1,8	13	6	1,8
7	1	1,6	14	1	1,7
7	8	1,7	14	2	1,8

Tabela A.2 (continuação) – Resultados dos ensaios IRIS

104-E-10					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	8	1,9	8	3	1,9
2	5	1,8	8	12	1,8
2	14	1,9	9	5	1,8
3	4	1,9	9	8	1,9
3	9	1,9	9	14	1,9
4	1	1,9	10	1	1,9
4	13	1,7	10	10	1,9
5	5	1,9	11	8	1,9
5	7	1,9	11	14	1,9
5	11	1,9	12	4	1,9
6	11	1,9	12	12	1,9
6	16	1,8	13	8	1,9
7	4	1,9	13	14	1,8
7	13	1,8	14	5	1,9
7	18	1,9	14	8	1,7

104-E-11								
Passo 1			Passo 2					
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	5	2,0	10	5	2,0	15	7	2,0
1	9	2,0	11	1	2,0	15	12	1,8
1	13	2,0	11	9	2,0	16	4	2,0
2	8	2,0	11	18	2,0	16	6	2,0
3	15	2,0	12	12	2,0	16	1	2,0
4	6	2,0	13	4	2,0	16	8	2,0
5	5	2,0	13	19	2,0	16	9	2,0
5	12	2,0	14	7	2,0	16	13	1,9
6	17	2,0	14	14	2,0	16	15	2,0
7	4	2,0	15	15	2,0	16	18	2,0
7	12	2,0	16	2	2,0	17	1	2,0
8	8	2,0	16	11	2,0	17	3	1,7
8	21	2,0	17	5	2,0	17	8	2,0
9	1	2,0	18	7	1,2	17	10	2,0
9	15	2,0	18	14	1,6	17	13	1,4
			18	6	1,5	17	15	1,6
			18	8	1,6			

104-E-12A					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	6	2,0	8	5	2,0
1	8	2,1	8	12	1,7
2	5	2,0	9	2	2,0
2	11	2,1	9	3	2,0
3	3	2,0	9	9	2,0
3	9	2,0	10	3	2,0
4	3	2,0	10	12	1,9
4	11	1,8	11	6	2,0
4	15	2,0	11	14	2,0
5	6	2,0	12	2	2,0
5	13	2,0	12	12	2,0
6	5	2,0	13	5	2,0
6	12	2,0	13	13	1,8
7	2	2,0	14	2	2,0
7	17	2,0	14	9	1,9

104-E-12B					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	3	2,0	8	1	2,0
1	9	2,0	8	11	2,0
2	6	2,0	8	18	2,0
2	14	2,0	9	7	2,0
3	1	1,9	9	16	1,9
3	10	1,9	10	4	2,0
4	5	2,0	10	13	1,9
4	15	2,0	11	8	2,0
5	2	2,0	11	16	2,0
5	11	2,0	12	3	2,0
6	6	1,8	12	11	1,9
6	16	2,0	13	6	2,0
7	2	2,0	13	14	2,0
7	11	2,0	14	4	2,0
7	18	2,0	14	10	2,0

Tabela A.2 (continuação) – Resultados dos ensaios IRIS

104-E-14A					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	4	2,0	15	6	1,7
2	15	2,0	15	18	1,9
2	18	1,9	16	22	2,0
3	5	1,9	17	2	1,9
5	22	2,0	18	15	1,8
6	4	1,9	18	25	1,9
6	13	1,9	19	28	1,9
8	16	1,8	20	12	1,6
9	1	1,8	21	3	1,9
9	10	1,9	21	22	1,9
9	28	1,9	22	6	1,9
11	19	1,9	22	17	1,8
12	4	1,9	23	19	1,7
12	10	1,9	23	25	1,8
12	14	1,9	25	5	1,8
12	23	1,9	25	7	1,9
13	1	1,9	26	10	1,6
13	27	2,0	27	19	1,6
			28	12	1,9

104-E-14B								
Passo 1			Passo 2					
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	3	1,8	15	7	1,9	27	18	1,8
2	10	1,7	16	19	1,9	28	9	1,8
3	18	2,0	17	5	2,0	18	24	1,8
4	16	1,6	17	9	1,9	21	23	1,8
5	5	1,7	17	30	1,6	24	20	1,9
5	23	1,8	19	11	1,9	24	21	1,9
6	4	1,8	20	26	1,5	24	22	1,5
7	18	1,8	21	15	1,9	25	17	1,7
8	3	1,9	21	27	2,0	25	19	1,8
8	11	1,7	22	5	2,0	25	21	1,9
9	29	1,9	23	17	2,0	25	23	1,7
10	4	1,9	24	4	1,9	26	18	1,3
10	16	1,7	24	25	1,9	26	19	1,8
10	25	1,9	25	7	2,0	26	20	1,7
12	24	1,9	25	20	0,3			
13	11	1,9	26	6	1,6			
13	1	1,9	27	7	1,5			
14	15	1,8	27	11	1,8			

104-E-14C					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
2	9	2,0	15	9	2,0
4	3	2,0	15	25	1,8
4	15	2,0	16	4	2,0
5	7	2,0	16	14	1,8
6	13	2,0	17	31	1,8
7	3	2,0	18	7	2,0
8	24	2,0	19	9	1,8
8	29	2,0	19	17	1,9
9	13	2,0	20	1	2,0
10	1	2,0	20	27	2,0
10	20	2,0	21	20	2,0
11	17	2,0	22	13	2,0
12	9	2,0	23	3	2,0
12	25	1,8	23	17	1,8
12	30	1,8	24	25	1,9
12	31	2,0	25	13	1,9
13	20	1,8	26	5	1,9
14	30	1,7	27	18	2,0
			28	5	2,0

104-E-14D					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	12	2,0	15	12	2,0
2	16	2,0	15	30	2,0
3	12	1,8	16	1	2,0
5	5	2,0	17	4	2,0
5	20	2,0	17	13	2,0
6	11	2,0	17	25	2,0
6	17	2,0	20	8	2,0
8	4	2,0	20	19	2,0
8	10	2,0	21	10	2,0
9	19	2,0	22	2	1,7
11	7	2,0	22	26	2,0
11	24	2,0	23	18	1,8
12	16	2,0	24	8	2,0
13	3	2,0	24	23	1,8
13	11	2,0	25	10	1,5
14	1	2,0	26	16	1,6
			27	18	1,2
			28	2	1,8
			28	7	1,8

Tabela A.2 (continuação) – Resultados dos ensaios IRIS

104-E-16A											
Passo 1			Passo 2								
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)	L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	1	2,1	14	2	1,7	14	10	0,7	19	17	1,7
2	6	1,9	14	11	1,3	14	27	1,4	20	8	1,6
1	12	1,7	14	16	1,2	14	28	1,4	21	4	1,7
3	11	1,7	15	28	0,2	14	29	1,4	21	9	1,2
4	10	1,8	16	13	1,9	15	27	1,0	22	3	1,5
5	19	1,9	16	24	1,2	15	29	0,6	22	4	1,7
6	5	2,0	17	6	1,8	16	5	1,4	22	15	1,3
6	25	SNP	18	16	1,4	16	10	1,5	22	17	1,3
7	9	2,0	18	21	1,5	16	14	1,6	23	3	1,3
8	17	2,0	19	10	1,6	16	27	1,1	23	10	1,4
8	24	2,0	19	26	1,5	16	28	1,1	23	12	1,5
9	2	2,0	20	3	1,5	16	29	1,6	23	13	1,4
9	7	2,0	21	17	1,5	17	12	1,2	24	2	1,1
10	14	2,0	22	11	1,1	18	3	1,5	25	4	1,6
11	5	2,0	23	5	1,2	18	14	0,6	25	8	1,3
11	28	1,9	23	21	1,4	18	18	1,4	25	11	0,9
12	23	2,0	24	16	0,9	18	20	1,0	27	1	SNP
13	1	1,8	26	7	1,4	19	11	1,6	27	6	1,6
13	13	2,0	25	5	1,5	19	14	1,6			
13	19	2,0	27	8	1,0	19	16	1,4			

104-E-16B					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	4	2,0	14	1	2,0
1	12	1,8	14	9	2,0
2	1	1,8	14	21	2,0
2	5	1,7	15	5	2,0
3	11	2,0	15	15	2,0
4	16	2,0	16	20	2,0
5	5	2,0	16	26	2,0
6	11	2,0	17	6	2,0
8	1	1,8	18	14	2,0
8	24	2,0	18	25	2,0
9	9	1,9	19	18	2,0
9	13	2,0	20	2	2,0
11	4	2,0	21	8	1,8
12	11	2,0	22	3	1,7
12	22	2,0	23	13	1,8
12	28	2,0	24	5	2,0
13	21	2,0	25	7	1,6
13	23	1,7	26	7	2,0
			27	6	SNP

109-E-101A					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	2	1,4	14	14	1,3
2	11	1,8	15	22	1,6
3	5	1,6	15	26	1,6
4	13	1,1	16	7	1,6
5	4	1,7	17	15	1,7
6	7	1,4	18	25	1,5
6	17	1,5	19	10	1,7
7	12	1,6	20	21	1,4
8	2	1,4	21	6	1,7
8	6	1,4	22	15	1,4
8	22	1,4	23	3	1,7
9	20	1,3	24	15	1,8
10	6	1,5	25	10	1,6
11	20	1,0	26	4	1,6
12	13	1,5	14	14	1,3
13	20	1,3			

Tabela A.2 (conclusão) – Resultados dos ensaios IRIS

109-E-101B					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	5	1,5	14	25	1,8
2	12	1,3	15	4	1,7
3	5	1,6	15	17	1,5
4	11	1,6	16	11	1,7
5	18	1,3	17	19	1,4
6	4	1,6	18	6	1,5
7	12	1,8	18	24	1,7
8	18	1,8	19	14	1,5
9	10	1,6	20	6	1,4
9	24	1,8	21	20	1,6
10	4	1,8	22	12	1,7
11	7	1,7	23	8	1,4
11	21	1,8	24	10	1,6
12	16	2,0	25	4	1,8
13	4	1,5	26	7	1,6

109-E-105					
Passo 1			Passo 2		
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	9	1,9	11	1	1,7
2	8	1,7	11	11	1,6
3	4	1,7	11	24	1,8
3	14	1,8	12	6	1,5
4	11	1,8	12	16	1,8
5	2	1,8	14	9	1,8
5	7	1,7	14	17	1,6
5	18	1,7	15	1	1,7
6	14	1,8	15	5	1,4
6	22	1,8	15	19	1,6
7	9	1,8	17	3	1,5
7	16	1,8	17	15	1,8
8	6	1,8	18	6	1,8
8	12	1,8	19	9	1,8
9	20	1,7	19	16	1,7
			20	12	1,5

109-E-103											
Passo 1						Passo 2					
L	C	e (mm)	L	C	e (mm)	L	C	e (mm)	L	C	e (mm)
1	8	1,2	7	7	1,5	14	18	2,0	21	6	1,9
2	11	1,2	8	2	1,5	14	2	1,9	22	14	2,0
2	3	1,4	8	3	1,8	14	21	1,9	22	17	1,7
3	1	SNP	8	4	1,7	14	25	1,8	22	8	1,6
3	16	1,6	9	15	1,6	14	6	1,9	23	1	1,4
3	17	1,4	9	25	1,7	15	10	1,9	23	7	2,0
3	7	1,2	9	7	1,4	16	16	2,0	24	2	1,8
3	9	1,2	9	9	1,5	16	5	2,0	24	8	2,0
4	13	1,2	10	11	1,6	17	19	1,8			
4	15	1,4	10	20	1,6	17	21	2,0			
5	1	1,5	10	22	1,7	17	23	1,7			
5	13	1,3	11	15	1,7	18	12	2,0			
5	20	1,4	11	2	1,7	19	13	2,0			
5	7	1,5	11	21	1,8	19	17	2,0			
6	11	1,4	11	24	1,7	19	20	1,7			
6	4	1,6	11	7	1,7	19	8	2,0			
7	11	1,5	12	23	1,8	20	21	1,8			
7	18	1,4	12	9	1,8	20	3	2,0			
7	20	1,6	13	15	1,7	21	12	2,0			
7	23	1,5				21	4	1,9			

Tabela A.3 – Testes de aderência – Dados agrupados por feixe

EQUIPAMENTO	NORMAL AD	NORMAL P-VALOR	WEIBULL AD	WEIBULL P-VALOR	SEV AD	SEV P-VALOR
103-E-06	0,572	0,124	0,539	0,171	0,659	0,08
103-E-07A	3,416	<0,005	4,108	<0,01	4,142	<0,01
103-E-07B	7,269	<0,005	7,878	<0,01	8,168	<0,01
103-E-09A	5,688	<0,005	6,776	<0,01	6,805	<0,01
103-E-09B	3,675	<0,005	3,534	<0,01	3,477	<0,01
103-E-10	1,122	0,005	N.A.	N.A.	2,363	<0,01
103-E-11A	4,706	<0,005	3,632	<0,01	3,451	<0,01
103-E-11B	1,157	<0,005	1,043	<0,01	1,041	<0,01
103-E-12A	3,263	<0,005	3,772	<0,01	3,8	<0,01
103-E-12B	5,031	<0,005	4,834	<0,01	4,693	<0,01
103-E-12C	2,601	<0,005	1,771	<0,01	1,729	<0,01
103-E-12D	2,895	<0,005	2,656	<0,01	2,544	<0,01
103-E-12E	2,114	<0,005	2,114	<0,01	2,06	<0,01
103-E-12F	1,532	<0,005	1,239	<0,01	1,199	<0,01
104-E-09A	3,134	<0,005	3,65	<0,01	3,673	<0,01
104-E-09B	3,469	<0,005	3,702	<0,01	3,714	<0,01
104-E-10	5,733	<0,005	7,183	<0,01	7,217	<0,01
104-E-11	11,606	<0,005	13,957	<0,01	14,092	<0,01
104-E-12A	5,684	<0,005	5,307	<0,01	5,253	<0,01
104-E-12B	7,025	<0,005	8,907	<0,01	8,934	<0,01
104-E-14A	3,454	<0,005	2,966	<0,01	2,914	<0,01
104-E-14B	4,416	<0,005	2,545	<0,01	1,628	<0,01
104-E-14C	5,75	<0,005	6,893	<0,01	6,918	<0,01
104-E-14D	6,527	<0,005	7,773	<0,01	7,92	<0,01
104-E-16A	0,863	0,025	0,848	0,027	1,105	<0,01
104-E-16B	6,658	<0,005	8,202	<0,01	8,26	<0,01
109-E-101A	0,665	0,074	0,564	0,148	0,581	0,132
109-E-101B	0,61	0,102	0,656	0,082	0,759	0,044
109-E-103	1,326	<0,005	1,348	<0,01	1,486	<0,01
109-E-105	2,431	<0,005	2,251	<0,01	2,173	<0,01

Nota 1: Os valores mínimos apresentados pelo teste de AD para cada equipamento estão destacados na cor vermelha.

Nota 2: Os P-valores superiores ao limite de 1% estão destacados na cor azul.

Nota 3: Valores obtidos com o uso do aplicativo Minitab®.

Tabela A.4 – Testes de hipóteses – Dados agrupados por feixe

Equipamentos	e_{ref} (mm)	T_{max} (mm/ano)	$e_{min-req}$ (mm)	α	P-valor			
					Normal	Student	Weibull	SEV
103-E-06	1,0	0,12	0,8	0,001	0,000	0,000	0,022	0,040
103-E-07A	1,6	0,06	0,6	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
103-E-07B	1,5	0,07	0,6	0,010	0,000	0,000	0,000	0,006
103-E-09A	1,7	0,10	0,7	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
103-E-09B	1,6	0,11	0,8	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
103-E-10	0,0	0,09	0,8	0,010	0,426	0,175	N.A.	0,619
103-E-11A	1,2	0,08	0,6	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
103-E-11B	1,4	0,08	0,6	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
103-E-12A	1,5	0,13	0,9	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
103-E-12B	1,4	0,15	1,0	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
103-E-12C	1,3	0,19	1,1	0,010	0,000	0,000	0,005	0,009
103-E-12D	1,3	0,09	0,6	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
103-E-12E	1,1	0,30	1,7	0,010	0,673	0,004	1,000	1,000
103-E-12F	1,1	0,22	1,3	0,010	0,045	0,000	0,586	0,585
104-E-09A	1,6	0,05	0,5	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
104-E-09B	1,3	0,18	1,1	0,001	0,000	0,000	0,010	0,014
104-E-10	1,7	0,03	0,5	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
104-E-11	1,2	0,21	1,3	0,001	0,001	0,000	0,003	0,003
104-E-12A	1,7	0,05	0,5	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
104-E-12B	1,8	0,07	0,6	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
104-E-14A	1,5	0,06	0,5	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
104-E-14B	0,3	0,19	1,1	0,010	0,007	0,000	0,053	0,037
104-E-14C	1,7	0,05	0,5	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
104-E-14D	1,2	0,10	0,7	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
104-E-16A	0,2	0,22	1,3	0,010	0,315	0,000	0,610	0,562
104-E-16B	1,6	0,06	0,5	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
109-E-101A	0,9	0,13	0,9	0,010	0,000	0,000	0,052	0,061
109-E-101B	1,1	0,11	0,8	0,010	0,000	0,000	0,008	0,019
109-E-103	0,9	0,14	1,1	0,001	0,013	0,000	0,045	0,057
109-E-105	1,4	0,17	1,0	0,001	0,000	0,000	0,004	0,005

Nota 1: Os feixes reprovados (P-valor inferior a α) estão destacados pela cor vermelha.

Nota 2: Os feixes reprovados pelo IE foram destacados pelo sombreamento das células da planilha.

Tabela A.5 – Testes de homogeneidade das amostras

Equipamentos	P-valor teste F	P-valor teste T	Passos iguais	Passos diferentes	Aumentar amostra
103-E-06	0,188	0,009	0	1	0
103-E-07A	0,000	0,002	0	1	0
103-E-07B	0,000	0,910	0	0	1
103-E-09A	0,000	0,046	0	1	0
103-E-09B	0,034	0,273	0	0	1
103-E-10	0,044	0,348	0	0	1
103-E-11A	0,004	0,431	0	0	1
103-E-11B	0,500	0,002	0	1	0
103-E-12A	0,262	0,714	1	0	0
103-E-12B	0,202	0,939	1	0	0
103-E-12C	0,002	0,385	0	0	1
103-E-12D	0,085	0,007	0	1	0
103-E-12E	0,112	0,001	0	1	0
103-E-12F	0,488	0,045	0	1	0
104-E-09A	0,000	0,000	0	1	0
104-E-09B	0,007	0,897	0	0	1
104-E-10	0,500	1,000	1	0	0
104-E-11	0,000	0,005	0	1	0
104-E-12A	0,111	0,120	1	0	0
104-E-12B	0,095	0,724	1	0	0
104-E-14A	0,002	0,005	0	1	0
104-E-14B	0,000	0,281	0	0	1
104-E-14C	0,306	0,443	1	0	0
104-E-14D	0,000	0,018	0	1	0
104-E-16A	0,000	0,000	0	1	0
104-E-16B	0,342	0,781	1	0	0
109-E-101A	0,097	0,024	0	1	0
109-E-101B	0,104	0,397	1	0	0
109-E-103	0,088	0,000	0	1	0
109-E-105	0,001	0,007	0	1	0
TOTAL			8	15	7
Percentual			27%	50%	23%

Nota 1: Os p-valores inferiores a 5% estão destacados com a cor vermelha.

Nota 2: Valores obtidos com o uso do aplicativo Minitab®.

Tabela A.6 – Testes de aderência – Dados estratificados por passo

Equipamento	Passo	Normal AD	Normal P-Valor	Weibull AD	Weibull P-Valor	SEV AD	SEV P-Valor
103-E-06	1	0,729	0,045	0,937	0,015	1,094	<0,010
	2	0,233	0,734	0,305	>0,250	0,381	>0,250
103-E-07A	1	4,009	<0,005	4,871	<0,010	4,871	<0,010
	2	0,874	0,019	1,06	<0,010	1,087	<0,010
103-E-07B	1	2,449	<0,005	2,809	<0,010	3,052	<0,010
	2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
103-E-09A	1	4,506	<0,005	5,548	<0,010	5,548	<0,010
	2	1,879	<0,005	2,248	<0,010	2,254	<0,010
103-E-09B	1	1,028	0,007	0,943	0,014	0,937	0,015
	2	3,446	<0,005	4,337	<0,010	4,353	<0,010
103-E-10	1	0,821	0,023	N.A.		1,385	<0,010
	2	0,732	0,044	0,649	0,081	1,301	<0,010
103-E-11A	1	2,453	<0,005	1,965	<0,010	1,773	<0,010
	2	2,089	<0,005	1,887	<0,010	1,883	<0,010
103-E-11B	1	0,935	0,013	0,871	0,021	0,859	0,023
	2	1,537	<0,005	1,359	<0,010	1,339	<0,010
103-E-12A	1	2,172	<0,005	2,543	<0,010	2,552	<0,010
	2	1,382	<0,005	1,553	<0,010	1,558	<0,010
103-E-12B	1	2,258	<0,005	2,102	<0,010	2,041	<0,010
	2	2,99	<0,005	2,956	<0,010	2,859	<0,010
103-E-12C	1	1,408	<0,005	1,56	<0,010	1,597	<0,010
	2	1,928	<0,005	1,4	<0,010	1,242	<0,010
103-E-12D	1	2,744	<0,005	2,935	<0,010	2,939	<0,010
	2	1,431	<0,005	1,329	<0,010	1,263	<0,010
103-E-12E	1	3,055	<0,005	3,531	<0,010	3,553	<0,010
	2	0,631	0,085	0,613	0,098	0,596	0,113
103-E-12F	1	0,839	0,025	0,683	0,068	0,666	0,075
	2	1,005	0,009	0,939	0,015	0,904	0,019
104-E-09A	1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2	1,067	0,005	1,005	<0,010	0,997	<0,010
104-E-09B	1	1,293	<0,005	1,453	<0,010	1,465	<0,010
	2	3,157	<0,005	3,621	<0,010	3,584	<0,010
104-E-10	1	2,826	<0,005	3,592	<0,010	3,608	<0,010
	2	2,826	<0,005	3,592	<0,010	3,608	<0,010

Tabela A.6 (conclusão) – Testes de aderência – Dados estratificados por passo

Equipamento	Passo	Normal AD	Normal P-Valor	Weibull AD	Weibull P-Valor	SEV AD	SEV P-Valor
104-E-11	1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2	6,169	<0,005	7,41	<0,010	7,495	<0,010
104-E-12A	1	3,07	<0,005	3,042	<0,010	3,045	<0,010
	2	2,812	<0,005	3,388	<0,010	3,402	<0,010
104-E-12B	1	3,446	<0,005	4,338	<0,010	4,353	<0,010
	2	3,863	<0,005	4,791	<0,010	4,791	<0,010
104-E-14A	1	2,323	<0,005	2,544	<0,010	2,571	<0,010
	2	1,417	<0,005	1,302	<0,010	1,251	<0,010
104-E-14B	1	0,89	0,018	0,879	0,021	0,878	0,021
	2	2,998	<0,005	2,063	<0,010	1,156	<0,010
104-E-14C	1	4,078	<0,005	5,128	<0,010	5,149	<0,010
	2	2,131	<0,005	2,473	<0,010	2,482	<0,010
104-E-14D	1	5,599	<0,005	6,719	<0,010	6,719	<0,010
	2	2,098	<0,005	2,362	<0,010	2,395	<0,010
104-E-16A	1	1,99	<0,005	1,872	<0,010	1,814	<0,010
	2	1,482	<0,005	1,083	<0,010	0,476	0,237
104-E-16B	1	2,85	<0,005	3,503	<0,010	3,521	<0,010
	2	3,884	<0,005	4,867	<0,010	4,904	<0,010
109-E-101A	1	0,406	0,31	0,386	>0,250	0,458	0,243
	2	0,638	0,076	0,525	0,177	0,501	0,201
109-E-101B	1	0,519	0,157	0,505	0,198	0,531	0,173
	2	0,495	0,182	0,518	0,185	0,532	0,171
109-E-103	1	1,026	0,009	0,922	0,018	0,92	0,018
	2	2,125	<0,005	2,227	<0,010	2,23	<0,010
109-E-105	1	1,859	<0,005	1,716	<0,010	1,721	<0,010
	2	0,844	0,023	1,003	<0,010	1,023	<0,010

Nota 1: Os valores mínimos apresentados pelo teste de AD para cada equipamento estão destacados na cor vermelha.

Nota 2: Os P-valores superiores ao limite de 1% estão destacados na cor azul.

Nota 3: Valores obtidos com o uso do aplicativo Minitab®.

Tabela A.7 – Testes de hipóteses – Dados estratificados por passo

Equipamentos	Passo	e_{ref} (mm)	T_{max} (mm/ano)	$e_{min-req}$ (mm)	α	P-valor		
						Normal	Weibull	SEV
103-E-06	1	1,2	0,10	0,7	0,001	0,0000	0,0000	0,0015
	2	0,9	0,14	0,9	0,001	0,0011	0,0083	0,0245
103-E-07A	1	1,9	0,02	0,4	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,5	0,07	0,7	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
103-E-07B	1	1,3	0,09	0,8	0,010	0,0000	0,0005	0,0115
	2	2,0	0,01	0,4	0,010	N.A.	N.A.	N.A.
103-E-09A	1	1,9	0,05	0,5	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,6	0,12	0,8	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
103-E-09B	1	1,5	0,13	0,8	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,7	0,09	0,7	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
103-E-10	1	-1,0	0,14	1,0	0,010	0,6670	N.A.	0,5976
	2	-0,2	0,10	0,8	0,010	0,3627	0,3810	0,3750
103-E-11A	1	1,2	0,08	0,6	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,6	0,04	0,4	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
103-E-11B	1	1,4	0,08	0,6	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,6	0,06	0,5	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
103-E-12A	1	1,5	0,14	0,9	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,5	0,13	0,9	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
103-E-12B	1	1,5	0,15	0,9	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,4	0,16	1,0	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
103-E-12C	1	1,6	0,12	0,8	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,3	0,20	1,2	0,010	0,0004	0,0006	0,0016
103-E-12D	1	1,5	0,07	0,5	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,3	0,09	0,7	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
103-E-12E	1	1,3	0,24	1,4	0,010	0,0077	0,0034	0,0040
	2	1,0	0,33	1,9	0,010	0,9595	0,9917	0,9961
103-E-12F	1	1,2	0,21	1,3	0,010	0,0047	0,0122	0,0187
	2	1,1	0,23	1,4	0,010	0,1361	0,1138	0,1177
104-E-09A	1	2,0	0,01	0,3	0,001	N.A.	N.A.	N.A.
	2	1,6	0,06	0,5	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
104-E-09B	1	1,4	0,15	1,0	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,2	0,21	1,3	0,001	0,0051	0,0014	0,0019
104-E-10	1	1,7	0,03	0,5	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,7	0,03	0,5	0,001	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela A.7 (conclusão) – Testes de hipóteses – Dados estratificados por passo

Equipamentos	Passo	e _{ref} (mm)	T _{max} (mm/ano)	e _{min-req} (mm)	α	P-valor		
						Normal	Weibull	SEV
104-E-11	1	2,0	0,03	0,4	0,001	N.A.	N.A.	N.A.
	2	1,2	0,21	1,3	0,001	0,0051	0,0021	0,0028
104-E-12A	1	1,8	0,04	0,5	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,7	0,05	0,5	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
104-E-12B	1	1,8	0,07	0,7	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,9	0,06	0,6	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
104-E-14A	1	1,7	0,04	0,4	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,5	0,07	0,5	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
104-E-14B	1	1,5	0,06	0,5	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	0,3	0,19	1,1	0,010	0,0267	0,0135	0,0106
104-E-14C	1	1,7	0,05	0,5	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,7	0,05	0,5	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
104-E-14D	1	1,8	0,04	0,4	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,2	0,11	0,7	0,010	0,0000	0,0000	0,0001
104-E-16A	1	1,6	0,06	0,5	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	0,2	0,22	1,3	0,010	0,4636	0,4355	0,3859
104-E-16B	1	1,6	0,06	0,5	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,6	0,06	0,5	0,010	0,0000	0,0000	0,0000
109-E-101A	1	0,8	0,15	0,9	0,010	0,0080	0,0185	0,0376
	2	1,2	0,11	0,7	0,010	0,0000	0,0000	0,0003
109-E-101B	1	1,1	0,12	0,8	0,010	0,0000	0,0005	0,0044
	2	1,2	0,11	0,7	0,010	0,0000	0,0000	0,0005
109-E-103	1	0,9	0,14	1,1	0,001	0,0143	0,0263	0,0411
	2	1,4	0,08	0,8	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
109-E-105	1	1,6	0,12	0,8	0,001	0,0000	0,0000	0,0000
	2	1,3	0,20	1,2	0,001	0,0002	0,0024	0,0053

Nota 1: Os feixes reprovados (P-valor inferior a α) estão destacados pela cor vermelha.

Nota 2: Os feixes reprovados pelo IE foram destacados pelo sombreamento das células da planilha.