

NORMA  
BRASILEIRA

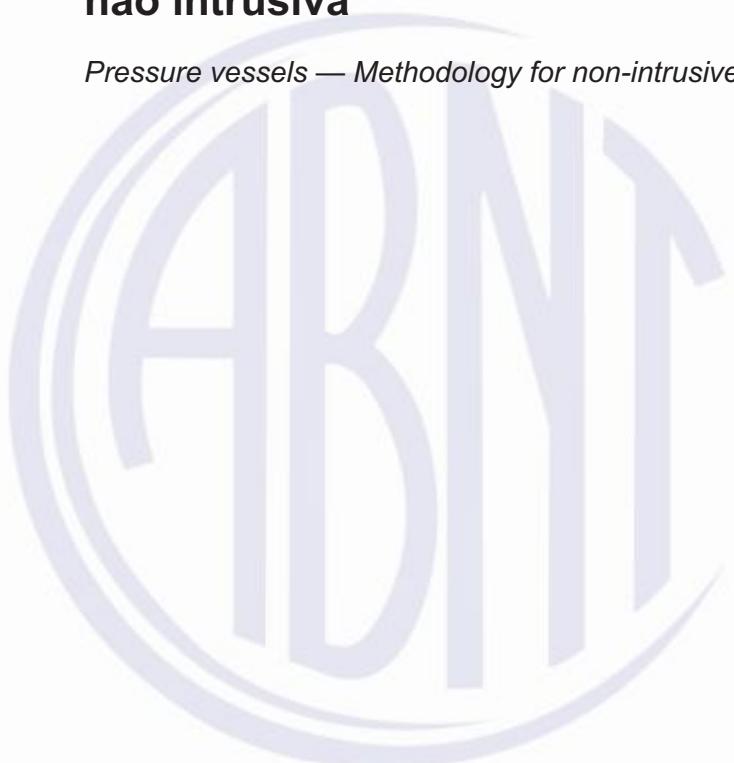
ABNT NBR  
16455

Primeira edição  
24.06.2016

---

**Vasos de pressão — Metodologia para inspeção  
não intrusiva**

*Pressure vessels — Methodology for non-intrusive inspection*



ICS 23.020.30

ISBN 978-85-07-06336-0



ASSOCIAÇÃO  
BRASILEIRA  
DE NORMAS  
TÉCNICAS

Número de referência  
ABNT NBR 16455:2016  
156 páginas

**ABNT NBR 16455:2016**



© ABNT 2016

Todos os direitos reservados. A menos que especificado de outro modo, nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida ou utilizada por qualquer meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia e microfilme, sem permissão por escrito da ABNT.

ABNT

Av.Treze de Maio, 13 - 28º andar

20031-901 - Rio de Janeiro - RJ

Tel.: + 55 21 3974-2300

Fax: + 55 21 3974-2346

[abnt@abnt.org.br](mailto:abnt@abnt.org.br)

[www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br)

Sumário	Página
<b>Prefácio .....</b>	<b>x</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>xi</b>
<b>1 Escopo .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Referências normativas .....</b>	<b>1</b>
<b>3 Termos e definições .....</b>	<b>1</b>
<b>4 Princípios gerais .....</b>	<b>4</b>
<b>5 Análise de integridade .....</b>	<b>5</b>
<b>5.1 Avaliação geral .....</b>	<b>5</b>
<b>5.2 Perfil do equipamento .....</b>	<b>6</b>
<b>5.3 Inspeção baseada em risco (IBR) .....</b>	<b>7</b>
<b>5.4 Avaliação do risco de corrosão (ARC) .....</b>	<b>7</b>
<b>5.4.1 Geral .....</b>	<b>7</b>
<b>5.4.2 Tipos de avaliação de risco de corrosão .....</b>	<b>7</b>
<b>5.5 Avaliação da integridade estrutural .....</b>	<b>9</b>
<b>5.6 Experiência operacional .....</b>	<b>9</b>
<b>6 Processo decisório .....</b>	<b>9</b>
<b>6.1 Introdução .....</b>	<b>9</b>
<b>6.2 Seleção preliminar .....</b>	<b>10</b>
<b>6.2.1 Geral .....</b>	<b>10</b>
<b>6.2.2 Adequação do vaso de pressão a INI .....</b>	<b>10</b>
<b>6.2.3 Inspeção e histórico do vaso de pressão .....</b>	<b>11</b>
<b>6.2.4 Projeto do vaso de pressão .....</b>	<b>11</b>
<b>6.2.5 Vasos de pressão similares com histórico de serviço .....</b>	<b>11</b>
<b>6.2.6 Agendamento da parada .....</b>	<b>11</b>
<b>6.3 Processo decisório de alto nível .....</b>	<b>11</b>
<b>6.3.1 Geral .....</b>	<b>11</b>
<b>6.3.2 Fatores do processo decisório de alto nível .....</b>	<b>12</b>
<b>6.3.3 Recomendação da INI .....</b>	<b>17</b>
<b>6.3.4 Utilização da INI para postergação de uma IVI .....</b>	<b>17</b>
<b>6.4 Registros da decisão da INI .....</b>	<b>17</b>
<b>6.5 Exemplos .....</b>	<b>17</b>
<b>7 Planejamento da inspeção .....</b>	<b>17</b>
<b>7.1 Objetivo e premissas .....</b>	<b>17</b>
<b>7.2 Grupo de planejamento .....</b>	<b>19</b>
<b>7.3 Tipo de estratégia de inspeção .....</b>	<b>20</b>
<b>7.3.1 Geral .....</b>	<b>20</b>
<b>7.3.2 Inspeção tipo A .....</b>	<b>21</b>
<b>7.3.3 Inspeção tipo B .....</b>	<b>22</b>
<b>7.3.4 Inspeção tipo C .....</b>	<b>22</b>
<b>7.3.5 Seleção do tipo de inspeção .....</b>	<b>22</b>
<b>7.3.6 Tipo de inspeção resultante .....</b>	<b>26</b>

## ABNT NBR 16455:2016

7.4	Definição das zonas do vaso .....	26
7.4.1	Identificação das zonas .....	26
7.4.2	Processo para a definição das zonas .....	27
7.4.3	Exemplo .....	28
7.5	Definição do tipo de degradação.....	28
7.6	Efetividade da inspeção .....	29
7.6.1	Geral .....	29
7.6.2	Graduação da inspeção.....	29
7.6.3	Resistência à degradação existente.....	31
7.6.4	Consequências da falha .....	31
7.7	Efetividade requerida para a inspeção.....	32
7.8	Cobertura .....	32
7.9	Seleção do método e técnicas de END .....	33
7.9.1	Capacidade de detecção do método e técnicas de END.....	33
7.9.2	Fluxograma para seleção do método de END .....	33
7.9.3	Critério de seleção do método de inspeção .....	49
7.9.4	Métodos estatísticos .....	50
7.10	Preparação da documentação da inspeção .....	50
7.11	Revisão do plano de inspeção.....	53
8	Atividades de inspeção no campo .....	53
8.1	Preparação para a inspeção.....	53
8.1.1	Responsabilidades individuais.....	53
8.1.2	Tarefas de preparação .....	54
8.2	Execução da inspeção.....	56
8.3	Tratamento de não conformidades.....	56
8.4	Registro dos resultados .....	57
8.5	Desmobilização .....	59
9	Avaliação da inspeção .....	59
9.1	Introdução.....	59
9.2	Itens de conformidade para serem verificados .....	61
9.3	Método de END .....	62
9.3.1	Introdução.....	62
9.3.2	Inspeção tipo A.....	62
9.3.3	Inspeção tipo B.....	62
9.3.4	Inspeção tipo C.....	62
9.4	Procedimento .....	63
9.4.1	Inspeção tipo A.....	63
9.4.2	Inspeção tipo B.....	63
9.4.3	Inspeção tipo C.....	63
9.5	Qualidade dos dados .....	63
9.5.1	Inspeção tipo A.....	63
9.5.2	Inspeção tipo B.....	63
9.5.3	Inspeção tipo C.....	64

<b>9.6</b>	<b>Localização .....</b>	<b>64</b>
<b>9.6.1</b>	<b>Inspeção tipo A.....</b>	<b>64</b>
<b>9.6.2</b>	<b>Inspeção tipo B.....</b>	<b>64</b>
<b>9.6.3</b>	<b>Inspeção tipo C.....</b>	<b>64</b>
<b>9.7</b>	<b>Cobertura .....</b>	<b>64</b>
<b>9.7.1</b>	<b>Inspeção tipo A.....</b>	<b>64</b>
<b>9.7.2</b>	<b>Inspeção tipo B.....</b>	<b>65</b>
<b>9.7.3</b>	<b>Inspeção tipo C.....</b>	<b>65</b>
<b>9.8</b>	<b>Níveis de conformidade.....</b>	<b>65</b>
<b>9.8.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>65</b>
<b>9.8.2</b>	<b>Inspeção tipo A.....</b>	<b>65</b>
<b>9.8.3</b>	<b>Inspeção tipo B.....</b>	<b>66</b>
<b>9.8.4</b>	<b>Inspeção tipo C.....</b>	<b>66</b>
<b>9.9</b>	<b>Não conformidade crítica .....</b>	<b>68</b>
<b>9.10</b>	<b>Indicações e descontinuidades reportáveis.....</b>	<b>69</b>
<b>9.10.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>69</b>
<b>9.10.2</b>	<b>Inspeção tipo A.....</b>	<b>69</b>
<b>9.10.3</b>	<b>Inspeção tipo B.....</b>	<b>69</b>
<b>9.10.4</b>	<b>Inspeção tipo C.....</b>	<b>70</b>
<b>9.11</b>	<b>Exemplos .....</b>	<b>70</b>
<b>10</b>	<b>Intervalo de inspeção.....</b>	<b>70</b>
<b>10.1</b>	<b>Discussão .....</b>	<b>70</b>
<b>10.2</b>	<b>Ajuste dos intervalos por meio da comparação com a IVI.....</b>	<b>70</b>
<b>10.3</b>	<b>Intervalos de acordo com não conformidade de inspeção tipo A.....</b>	<b>71</b>
<b>10.4</b>	<b>Intervalos de acordo com não conformidade de inspeção tipo B.....</b>	<b>72</b>
<b>10.5</b>	<b>Intervalos de acordo com não conformidade de inspeção tipo C.....</b>	<b>73</b>
<b>10.6</b>	<b>Intervalos validados.....</b>	<b>75</b>
<b>10.7</b>	<b>Abordagem detalhada.....</b>	<b>75</b>
<b>10.8</b>	<b>Exemplos .....</b>	<b>76</b>
<b>11</b>	<b>Aplicação daINI para fins de postergação da inspeção interna .....</b>	<b>76</b>
<b>11.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>76</b>
<b>11.2</b>	<b>Situações nas quais aINI é avaliada como não aplicável.....</b>	<b>77</b>
<b>11.2.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>77</b>
<b>11.2.2</b>	<b>Ausência de inspeção prévia .....</b>	<b>77</b>
<b>11.2.3</b>	<b>Fluxograma determina queINI não é apropriada.....</b>	<b>79</b>
<b>11.3</b>	<b>Requisitos de inspeção revisados para casos onde aINI seja aceitável .....</b>	<b>81</b>
<b>11.3.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>81</b>
<b>11.3.2</b>	<b>Revisões do escopo de trabalho naINI .....</b>	<b>81</b>
<b>11.4</b>	<b>Caso especial de postergação daIVI .....</b>	<b>83</b>
<b>11.5</b>	<b>Avaliação daINI como justificativa à postergação daIVI .....</b>	<b>84</b>
<b>11.6</b>	<b>Restrições à postergação.....</b>	<b>84</b>
<b>11.7</b>	<b>Requisitos legais.....</b>	<b>84</b>
<b>Anexo A</b>	<b>(informativo) Revisão dos métodos deEND não intrusivos.....</b>	<b>85</b>

## ABNT NBR 16455:2016

A.1	Geral .....	85
A.2	Ensaio por ultrassom.....	85
A.2.1	Ensaio por ultrassom convencional.....	85
A.2.2	Ultrassom por imagem .....	86
A.2.2.1	Introdução.....	86
A.2.2.2	Ultrassom por imagem automatizado .....	86
A.2.2.3	Mapeamento de espessura (corrosão) por ultrassom.....	86
A.2.3	<i>Time of flight diffraction</i> (TOFD) .....	87
A.2.4	Inspeção com ondas superficiais tipo <i>creep</i> (CHIME – <i>Creeping head wave inspection method</i> ) .....	87
A.2.5	M-SKIP.....	88
A.2.6	Ultrassom à distância ( <i>long range ultrasonics</i> ) .....	88
A.2.6.1	LORUS.....	88
A.2.6.2	Ondas guiadas.....	89
A.2.6.3	Transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT – <i>electromagnetic acoustic transducers</i> ).....	90
A.3	Ensaio de correntes parasitas .....	91
A.3.1	Introdução.....	91
A.3.2	Ensaio de correntes parasitas pulsadas.....	91
A.3.3	Correntes parasitas de baixa frequência saturadas ( <i>Saturated low frequency eddy current – SLOFEC</i> ) .....	92
A.4	Inspeção por líquidos penetrantes.....	92
A.5	Inspeção por partículas magnéticas .....	93
A.6	Ensaio por vazamento de fluxo magnético ( <i>magnetic flux leakage</i> ).....	93
A.7	Termografia .....	94
A.8	Radiografia.....	94
A.9	Imagen por retroespalhamento ( <i>backscatter compton's imaging</i> ) .....	96
A.10	Emissão acústica (EA).....	97
A.11	Inspeção visual remota.....	98
A.12	Sherografia .....	99
A.13	Efetividade dos métodos e técnicas de inspeção.....	99
Anexo B (informativo)	Abordagem estatística para a INI .....	110
B.1	Geral .....	110
B.1.1	Prefácio .....	110
B.1.2	Símbolos e abreviaturas.....	110
B.2	Bases estatísticas para um programa de inspeção.....	111
B.2.1	Introdução.....	111
B.2.2	Probabilidade de falha .....	111
B.2.3	Considerações práticas.....	115
B.3	Teorema de Bayes .....	117
B.4	Análise estatística do valor extremo .....	118
B.4.1	Introdução.....	118
B.4.2	Obtenção dos dados .....	120

<b>B.4.3</b>	<b>Processamento dos dados.....</b>	<b>121</b>
<b>B.4.4</b>	<b>Influência da pintura .....</b>	<b>125</b>
<b>B.5</b>	<b>Influência do tamanho da amostra.....</b>	<b>125</b>
<b>B.5.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>125</b>
<b>B.5.2</b>	<b>Métodos de análise .....</b>	<b>126</b>
<b>B.5.2.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>126</b>
<b>B.5.2.2</b>	<b>Avaliação simples .....</b>	<b>126</b>
<b>B.5.2.3</b>	<b>Distribuição binomial.....</b>	<b>127</b>
<b>B.5.2.4</b>	<b>Distribuição de Poisson .....</b>	<b>127</b>
<b>Anexo C (informativo) Exemplos do processo decisório.....</b>		<b>130</b>
<b>C.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>130</b>
<b>C.2</b>	<b>Permutador de calor .....</b>	<b>130</b>
<b>C.3</b>	<b>Vaso receptor de gás .....</b>	<b>131</b>
<b>C.4</b>	<b>Vaso separador.....</b>	<b>132</b>
<b>C.5</b>	<b>Vaso absorvedor .....</b>	<b>133</b>
<b>Anexo D (informativo) Exemplo de identificação das zonas .....</b>		<b>137</b>
<b>D.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>137</b>
<b>D.2</b>	<b>Identificação das zonas .....</b>	<b>137</b>
<b>Anexo E (informativo) Exemplos de avaliação da inspeção .....</b>		<b>139</b>
<b>E.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>139</b>
<b>E.2</b>	<b>Inspeção tipo A.....</b>	<b>139</b>
<b>E.2.1</b>	<b>Exemplo 1 .....</b>	<b>139</b>
<b>E.2.2</b>	<b>Exemplo 2 .....</b>	<b>139</b>
<b>E.2.3</b>	<b>Exemplo 3 .....</b>	<b>139</b>
<b>E.3</b>	<b>Inspeção tipo B.....</b>	<b>140</b>
<b>E.4</b>	<b>Inspeção tipo C.....</b>	<b>143</b>
<b>E.4.1</b>	<b>Exemplo 1 .....</b>	<b>143</b>
<b>E.4.2</b>	<b>Exemplo 2 .....</b>	<b>143</b>
<b>E.4.3</b>	<b>Exemplo 3 .....</b>	<b>143</b>
<b>Anexo F (informativo) Exemplos de validação de intervalos de inspeção.....</b>		<b>144</b>
<b>F.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>144</b>
<b>F.2</b>	<b>Falta de cobertura em uma inspeção tipo A.....</b>	<b>144</b>
<b>F.3</b>	<b>POD reduzida em uma inspeção tipo A.....</b>	<b>146</b>
<b>F.4</b>	<b>Falta de cobertura em uma inspeção tipo C.....</b>	<b>147</b>
<b>F.5</b>	<b>Qualidade da inspeção prejudicada em uma Inspeção tipo C – Caso 1 .....</b>	<b>149</b>
<b>F.6</b>	<b>Qualidade da inspeção prejudicada em uma inspeção tipo C – Caso 2.....</b>	<b>151</b>
<b>F.7</b>	<b>Qualidade da inspeção prejudicada em uma inspeção tipo C – Caso 3.....</b>	<b>151</b>
<b>Anexo G (informativo) Exemplos de postergação do prazo de inspeção .....</b>		<b>152</b>
<b>G.1</b>	<b>Exemplo de situação onde a INI é avaliada como não aplicável .....</b>	<b>152</b>
<b>G.2</b>	<b>Exemplos de situação onde a INI é avaliada como aceitável .....</b>	<b>153</b>
<b>G.2.1</b>	<b>Exemplo 1 .....</b>	<b>153</b>
<b>G.2.2</b>	<b>Exemplo 2 .....</b>	<b>153</b>
<b>Bibliografia.....</b>		<b>155</b>

## ABNT NBR 16455:2016

**Figuras**

<b>Figura 1 – Vista geral do procedimentoINI.....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 2 – Procedimento de seleção daINI .....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 3 – Fluxograma de decisão de alto nível.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 4 – Fluxograma do planejamento da inspeção.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 5 – Seleção do tipo de inspeção .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 6 – Fluxograma de efetividade da inspeção .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 7 – Fluxograma de medição de espessura por ultrassom .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 8 – Fluxograma para mapeamento de corrosão por ultrassom manual .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 9 – Fluxograma para ultrassom pulso-eco com cabeçote angular .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 10 – Fluxograma para TOFD .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 11 – Fluxograma para LORUS .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 12 – Fluxograma para CHIME .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 13 – Fluxograma para ultrassom a longa distância – Ondas guiadas .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 14 – Fluxograma de vazamento de fluxo magnético .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 15 – Fluxograma para correntes parasitas pulsadas.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 16 – Fluxograma para SLOFEC .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 17 – Fluxograma para termografia passiva .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 18 – Fluxograma para radiografia convencional .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 19 – Projeto da estrutura básica de um vaso de pressão .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 20 – Visão geral de aplicação das Seções 9 e 10 .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 21 – Visualização da avaliação para postergação daIVI.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 22 – Abordagem de postergação daIVI para uma inspeção tipo B.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura B.1 – Efeito doEND com POD = 1 na distribuição probabilística.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura B.2 – Efeito doEND com POD &lt; 1 na distribuição probabilística.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura B.3 – Efeito do intervalo de inspeção e POD na probabilidade de falha.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura B.4 – Categorias da corrosão.....</b>	<b>119</b>
<b>Figura B.5 – Distribuição de Gauss ou Normal .....</b>	<b>120</b>
<b>Figura B.6 – Histograma de resultados do exame por ultrassom (profundidade máxima dos alvéolos) .....</b>	<b>121</b>
<b>Figura B.7 – Função de densidade provável .....</b>	<b>123</b>
<b>Figura B.8 – Função de distribuição cumulativa.....</b>	<b>123</b>
<b>Figura B.9 – Verificação da função Gumbel.....</b>	<b>124</b>
<b>Figura B.10 – Comparação de CDF com a função de Gumbel.....</b>	<b>125</b>
<b>Figura B.11 – Probabilidade de detectar um defeito conforme o percentual de cobertura de uma solda defeituosa – Utilizando distribuição simples .....</b>	<b>128</b>
<b>Figura B.12 – Probabilidade de detectar um defeito conforme o percentual de cobertura de uma solda defeituosa – Utilizando o modelo de distribuição binomial.....</b>	<b>128</b>
<b>Figura B.13 – Probabilidade de detectar um defeito conforme o percentual de cobertura de uma solda defeituosa – Utilizando o modelo da distribuição de Poisson .....</b>	<b>129</b>
<b>Figura D.1 – Exemplo de zonas do vaso .....</b>	<b>138</b>
<b>Figura E.1 – Efeitos dos erros de medição na estimativa da espessura mínima.....</b>	<b>140</b>
<b>Figura E.2 – Efeitos dos erros de medição na estimativa da taxa de corrosão .....</b>	<b>141</b>

<b>Figura E.3 – Efeito da cobertura na estimativa da espessura mínima.....</b>	<b>142</b>
<b>Figura E.4 – Efeito da cobertura na estimativa do tempo para uma condição-limite .....</b>	<b>142</b>
<b>Figura F.1 – Áreas de cobertura do mapeamento da corrosão e de ultrassom convencional com cabeçote angular para detecção de perdas de espessura localizada .....</b>	<b>145</b>
<b>Figura F.2 – Estruturas acima do vaso dificultando o acesso .....</b>	<b>145</b>
<b>Figura F.3 – Empolamento e degradação do revestimento interno (de acordo com a última IVI) .....</b>	<b>147</b>
<b>Figura F.4 – Áreas de cobertura do separador conforme definido no plano de INI .....</b>	<b>148</b>
<b>Figura F.5 – Áreas onde não foi possível a inspeção via CHIME.....</b>	<b>148</b>
<b>Figura F.6 – Áreas com corrosão ou com más condições superficiais afetando a inspeção por CHIME .....</b>	<b>149</b>
<b>Figura F.7 – Dados de CHIME típicos de regiões com boas condições superficiais.....</b>	<b>150</b>
<b>Figura F.8 – Varreduras típicas cuja qualidade dos dados foi afetada pela condição superficial do material .....</b>	<b>150</b>
<b>Tabelas</b>	
<b>Tabela 1 – Definição dos tipos de inspeção .....</b>	<b>21</b>
<b>Tabela 2 – Exemplos de estratégias de inspeção graduados pelo processo.....</b>	<b>23</b>
<b>Tabela 3 – Exemplo de matriz usada para definir combinações entre componentes e defeitos.....</b>	<b>29</b>
<b>Tabela 4 – Resumo das medidas cabíveis para definir ações, com base no tipo de inspeção, para mitigar os desvios .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 5 – Categorias de não conformidades para inspeção tipo A .....</b>	<b>66</b>
<b>Tabela 6 – Categorias de não conformidades para inspeção tipo C .....</b>	<b>67</b>
<b>Tabela 7 – Opções de postergação da IVI a partir da recategorização .....</b>	<b>80</b>
<b>Tabela A.1 – Efetividade dos métodos de END não intrusivos por tipo de descontinuidade..</b>	<b>100</b>
<b>Tabela A.2 – Efetividade dos métodos de END não intrusivos .....</b>	<b>103</b>
<b>Tabela B.1 – Intervalos de inspeção de acordo com a criticidade e o grau .....</b>	<b>116</b>
<b>Tabela B.2 – Exemplo de dados para análise estatística de valor extremo.....</b>	<b>122</b>
<b>Tabela B.3 – Dados para extração da equação para avaliações simples .....</b>	<b>127</b>

## ABNT NBR 16455:2016

### Prefácio

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas pelas partes interessadas no tema objeto da normalização.

Os Documentos Técnicos ABNT são elaborados conforme as regras da Diretiva ABNT, Parte 2.

A ABNT chama a atenção para que, apesar de ter sido solicitada manifestação sobre eventuais direitos de patentes durante a Consulta Nacional, estes podem ocorrer e devem ser comunicados à ABNT a qualquer momento (Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996).

Ressalta-se que Normas Brasileiras podem ser objeto de citação em Regulamentos Técnicos. Nestes casos, os Órgãos responsáveis pelos Regulamentos Técnicos podem determinar outras datas para exigência dos requisitos desta Norma, independentemente de sua data de entrada em vigor.

A ABNT NBR 16455 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos (ABNT/CB-004), pela Comissão de Estudo de Caldeiras e Vasos de Pressão (CE-004:011.007). O Projeto circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 12, de 15.12.2015 a 12.02.2016.

O Escopo em inglês desta Norma Brasileira é o seguinte:

### Scope

*This Standard establishes a non-intrusive inspection methodology to allow postpone or replace the internal inspection of pressure vessels.*

*This Standard applies to welded pressure vessels constructed from metals, and related items, fittings and connections associated with them.*

*This Standard does not apply to power and heat boilers.*

## Introdução

Vasos de pressão e sistemas pressurizados estão sujeitos a inspeções periódicas estabelecidas pela legislação vigente, como forma de permitir sua operação contínua de forma segura e confiável. Tradicionalmente este requisito vem sendo cumprido por meio de inspeção visual interna (IVI), que pode implicar em custos muito altos associados com a parada de vasos de pressão e sistemas pressurizados, acarretando perda de produção, e preparação para acesso seguro. Esses custos adicionais podem ser muito maiores que os custos apenas da inspeção. Os trabalhos para preparar o vaso para inspeção interna, bem como para colocá-lo de volta em operação, podem prejudicar seu desempenho futuro. Finalmente, e não menos importante, o acesso de trabalhadores ao interior do vaso pode ser perigoso. Por todas essas razões, existem vantagens significativas se a inspeção puder ser executada pela parte externa do vaso sem necessidade de abri-lo, isto é, de forma não invasiva. Entretanto, deve-se ponderar entre os benefícios obtidos com a não abertura do vaso e a obtenção das informações necessárias para garantir a continuidade operacional de forma confiável e segura.

Embora pareça a opção mais lógica, a inspeção não intrusiva (INI) representa uma forma nova de inspeção comparada com a inspeção visual interna, onde a maioria dos engenheiros responsáveis pelo seu planejamento ainda necessitam ganhar experiência no seu uso e aumentar a confiança na sua aplicação. Adicionalmente, existe uma vasta gama de técnicas de inspeção disponíveis, cada qual com suas capacidades de detecção e limitações específicas.

Essas dificuldades foram reconhecidas pela indústria e levaram ao desenvolvimento de documentos que orientam os inspetores a planejar e justificar o uso da INI. Esta Norma tem a intenção de juntar esses documentos em uma publicação única e fornecer uma base consistente e lógica para todas as etapas do processo de INI.

Esta Norma é principalmente dedicada aos responsáveis pelo planejamento, implantação e aprovação da inspeção de vasos de pressão. Esta Norma aplica-se à inspeção de vasos metálicos soldados, bem como de seus acessórios e conexões. Pode ser igualmente aplicável a vasos de pressão metálicos forjados ou conformados sem solda, bem como tanques de armazenamento e tubulações de grande diâmetro.

Esta Norma abrange os seguintes aspectos:

- a) a metodologia não determina o tempo de campanha do vaso de pressão, nem fornece informações para a definição da data da sua próxima inspeção, a não ser quando o escopo da INI não for totalmente atingido ou quando ela for usada para fins de postergação de uma inspeção corriqueira;
- b) não são levados em consideração aspectos econômicos em relação a diferentes metodologias;
- c) não são considerados possíveis requisitos legais que possam limitar ou proibir o uso de técnicas não invasivas; o usuário deve garantir o cumprimento dos respectivos requisitos legais;
- d) não é considerado o impacto de mecanismos de deterioração externa, uma vez que as inspeções externas são intrinsecamente não invasivas e, portanto, seguem metodologias convencionais.

Esta Norma fornece requisitos para:

- a) determinar se a INI é, em princípio, apropriada como alternativa à IVI ou como método para sua postergação;

## ABNT NBR 16455:2016

- b) obter dados necessários ao planejamento daINI;
- c) definir os requisitos deINI aplicáveis;
- d) selecionar os métodos que atendam aos requisitos;
- e) avaliar os resultados da inspeção;
- f) definir os documentos necessários.

Os conceitos desta Norma também podem ser adaptados para serem aplicados a vasos fabricados com outros materiais, além de outros itens da planta, como tanques de armazenamento e dutos de grandes diâmetros, ou seja, itens que retêm pressão.

Esta Norma não objetiva cobrir todos os aspectos do planejamento daINI, mas sim oferecer um guia estruturado das etapas críticas do processo.



## Vasos de pressão — Metodologia para inspeção não intrusiva

### 1 Escopo

Esta Norma estabelece uma metodologia de inspeção não intrusiva (INI) para permitir postergar ou substituir a inspeção interna de vasos de pressão.

Esta Norma se aplica aos vasos de pressão soldados, construídos a partir de metais, e aos componentes, acessórios e conexões a eles associados.

Esta Norma não se aplica às caldeiras e aquecedores.

### 2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação deste documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR NM ISO 9712:2014, *Ensaios não destrutivos – Qualificação e certificação de pessoal em END (ISO 9712:2012, IDT)*

API 579/ASME FFS-1, *Recommended practice: Fitness for service American Petroleum Institute*

*ASME Code, Section VIII, Division 1 – Rules for construction of pressure vessels*

BS 7910, *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*

### 3 Termos e definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os seguintes termos e definições.

#### 3.1

##### **alteração**

qualquer mudança em um item de projeto ou em parâmetros operacionais que afetam a capacidade de reter pressão de um item de um vaso de pressão

#### 3.2

##### **área**

região específica na qual ocorre a inspeção

**NOTA** Em muitas situações, esta área apresenta uma característica específica (por exemplo, solda), com interesse particular.

#### 3.3

##### **avaliação do risco de corrosão**

##### **ARC**

estabelecimento da suscetibilidade da estrutura sob investigação a todos os mecanismos de degradação em serviço que possam estar presentes

**NOTA** A ARC não está restrita apenas aos mecanismos de degradação relacionados ao processo corrosivo isoladamente, mas também àqueles que aceleram o processo.

## ABNT NBR 16455:2016

### 3.4

#### **certificação**

procedimento usado para demonstrar a qualificação do pessoal que executa um determinado método de END, em um determinado nível, aplicado a um determinado setor industrial, e tendo como consequência a emissão de um certificado, emitido por uma entidade responsável

### 3.5

#### **cobertura**

proporção da estrutura ou região de interesse que está sob inspeção

NOTA A cobertura é igual à divisão da área inspecionada pela área total de interesse.

### 3.6

#### **competência**

capacidade de executar uma determinada tarefa com base em educação, treinamento, qualificação e experiência segundo objetivos estabelecidos

NOTA Para alcançar um nível de competência apropriado, pode ser necessário um grupo de pessoas e não apenas um indivíduo.

### 3.7

#### **componente**

parte, item ou área específica a ser inspecionada, como por exemplo, solda, bocal etc.

### 3.8

#### **criticidade**

avalia a probabilidade de ocorrência de degradação com a consequência de dano associado a esta, em função do risco associado ao equipamento inspecionado

### 3.9

#### **defeito**

manifestação física do mecanismo de degradação em termos de trinca, alvéolo, perda de espessura, entre outros, que não atende a um código, norma ou especificação

### 3.10

#### **documentação da inspeção**

conjunto completo de documentos (procedimentos, desenhos, normas, entre outros) relacionados à inspeção a ser executada

### 3.11

#### **efetividade**

medida qualitativa da probabilidade de detecção de descontinuidades, considerando a cobertura

NOTA 1 Efetividade =  $f$  (POD, cobertura).

NOTA 2 Três categorias de efetividade são estabelecidas (alta, média e baixa) por comparação com o POD da inspeção visual. Alta significa maior que o POD, média é similar ao POD e baixa, menor do que o POD.

### 3.12

#### **ensaio não destrutivo**

#### **END**

qualquer tipo de ensaio aplicado a um material que não altere de forma permanente suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais

NOTA Os ensaios não destrutivos implicam um dano imperceptível ou nulo.

**3.13**

**falha**

defeito que implica no não atendimento às condições específicas de serviço do equipamento

**3.14**

**empresa de inspeção**

organização responsável pelo desempenho da inspeção não destrutiva

NOTA Por exemplo, empresa prestadora de serviços de END.

**3.15**

**gerente da inspeção**

representante da empresa com responsabilidade total sobre a inspeção da instalação

**3.16 inspeção baseada em risco**

**IBR**

processo de planejamento dos requisitos de inspeção com base na determinação do risco (probabilidade de falha relativa e consequência da falha associada)

**3.17**

**inspeção não intrusiva**

inspeção não invasiva

**INI**

toda e qualquer inspeção realizada pela parte externa do vaso sem necessidade de sua abertura, e que pode ser executada quando este estiver em operação ou durante uma parada de manutenção

**3.18**

**inspeção visual interna**

**IVI**

inclui o ensaio visual detalhado de toda a superfície de material metálico e, onde aplicável, os ensaios de partículas magnéticas ou de líquidos penetrantes dos cordões de solda

NOTA No contexto desta Norma, o termo IVI não considera a inspeção visual geral ou global (não detalhada).

**3.19**

**mecanismo de degradação ou dano**

mecanismo que afeta a integridade do vaso ou tubulação, por exemplo, erosão, fadiga, fluênciac, fratura frágil, perda de espessura, entre outros

**3.20**

**método da inspeção**

forma específica de aplicar o método e técnica de END, por exemplo, pulso-eco, TOFD, parede dupla – vista simples, entre outros

**3.21**

**inspetor de END**

pessoa qualificada em END que executa a inspeção

NOTA No Brasil, é também conhecido como operador de END e técnico de END.

## ABNT NBR 16455:2016

### 3.22

#### **probabilidade de detecção**

#### **POD**

probabilidade de detectar e dimensionar uma descontinuidade definida na área coberta pelo método de inspeção

### 3.23

#### **procedimento**

documento com a descrição de todos os parâmetros essenciais e precauções a serem observados quando da aplicação de um método de END para um ensaio específico, seguindo uma norma, código ou especificação estabelecidos

### 3.24

#### **qualificação**

evidência de treinamento, conhecimento profissional, habilidade e experiência prática, bem como capacidade física, para que um indivíduo esteja apto a executar de forma satisfatória um END, satisfazendo aos requisitos da ABNT NBR NM/ISO 9712

### 3.25

#### **supervisor de inspeção**

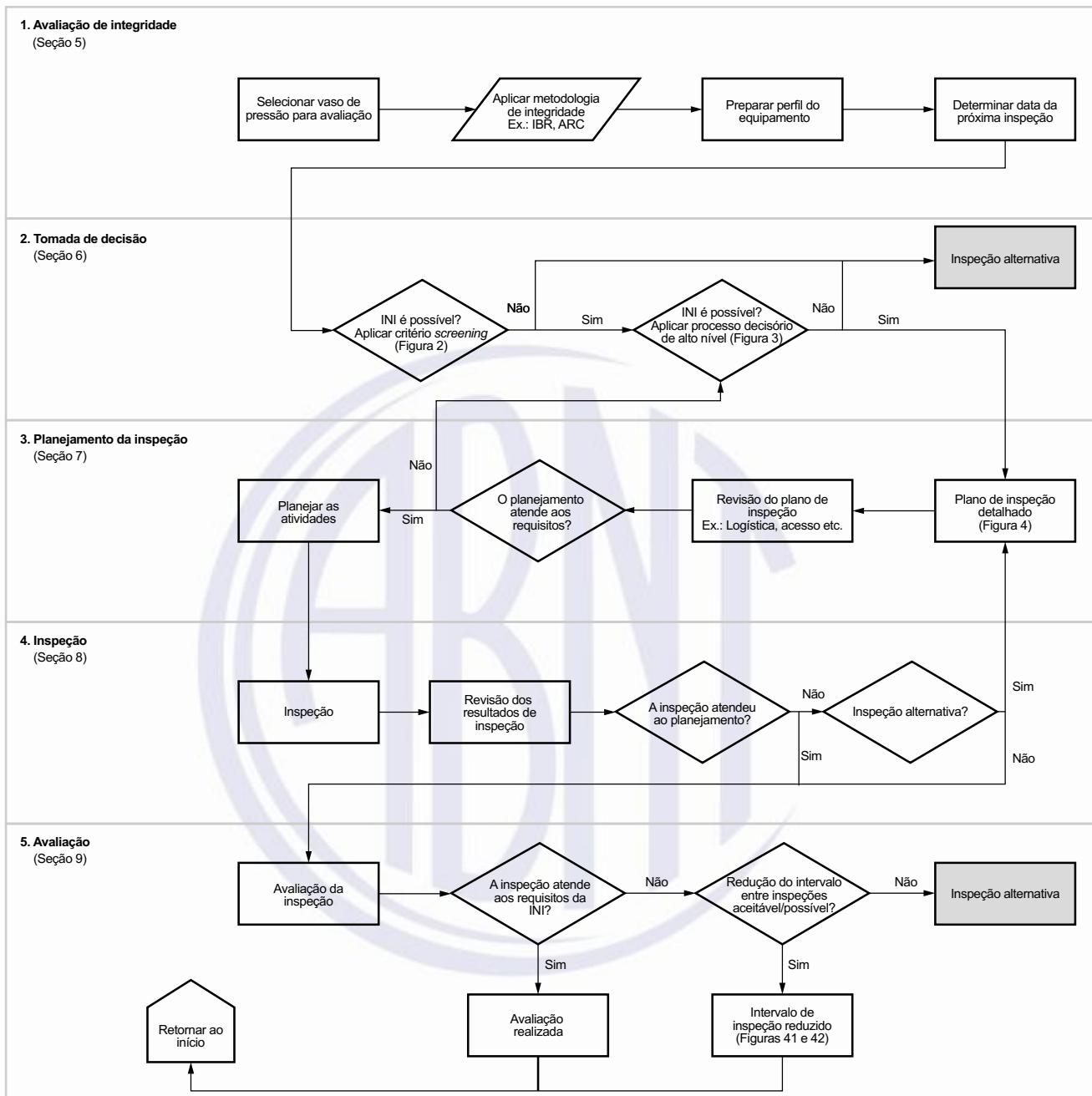
líder do grupo de inspeção com responsabilidade na coordenação e supervisão da inspeção

## 4 Princípios gerais

Esta Norma estabelece uma avaliação sistemática para cada item do equipamento submetido à INI. Esse é um processo em etapas que deve considerar sequencialmente o seguinte:

- a) quando e onde a inspeção é necessária;
- b) se a INI é apropriada para fins de substituição da IVI;
- c) o plano de inspeção;
- d) quais métodos de inspeção são adequados;
- e) os recursos durante a inspeção;
- f) se a inspeção realizada é adequada;
- g) ações a serem tomadas quando a inspeção realizada não cumprir os requisitos;
- h) abordagem para utilização da INI para fins de postergação da IVI.

A Figura 1 apresenta em forma de diagrama como a metodologia INI deve ser aplicada.



**Figura 1 – Vista geral do procedimento INI**

A utilização da INI requer uma mudança na política de inspeção, uma vez que as metodologias não intrusivas tendem a ser mais elaboradas que a IVI. Como consequência, o planejamento dessa inspeção deve ser muito mais detalhado (ver Seção 7).

## 5 Análise de integridade

### 5.1 Avaliação geral

Esta Seção tem por objetivo oferecer uma visão geral dos vários requisitos necessários ao planejamento de uma INI.

## 5.2 Perfil do equipamento

A primeira etapa no processo de planejamento da INI consiste em uma revisão detalhada do equipamento. A intenção é assegurar que os responsáveis pelo planejamento da inspeção tenham um conhecimento profundo do projeto, das condições de operação, e dos possíveis mecanismos de deterioração que possam afetar o equipamento em serviço. Esse conhecimento deve ser agregado ao prontuário do equipamento na forma de documentação formal, que permita rastrear os parâmetros que levaram a elegibilidade da INI. As informações que devem constar nessa documentação são as seguintes:

- a) identificação e detalhes de projeto: número de série do vaso e TAG, se houver, desenhos gerais, materiais, variáveis de projeto, como pressão, temperatura, sobre-espessura de corrosão, regime cíclico, entre outros;
- b) tipo de vaso e função: separador, permutador de calor, tanque de armazenamento, vaso de purga, reator etc.;
- c) detalhes de operação e serviço: fluidos de processo e possíveis contaminantes, temperaturas e pressões de operação, variações de temperatura e pressão, transientes, desvios em relação ao padrão operacional e sistemas de isolamento;
- d) desenhos detalhados: número e tipo de soldas; soldas longitudinais e circunferenciais do casco; soldas nos tamos superior e inferior; bocais; bocas de visita; detalhes de construção, incluindo selas, suportes, saias de apoio, flanges, chapas de reforços, isolamento etc.;
- e) alterações e reparos: alterações na forma original do vaso de pressão, assim como defeitos removidos e danos reparados, devem ser registrados em documentação apropriada;
- f) resultados de inspeções anteriores: detalhes de defeitos e áreas deterioradas previamente conhecidas e registradas, métodos de END e área de cobertura;
- g) experiência geral: histórico de possíveis defeitos, mecanismos de deterioração e falhas identificados em vasos similares (se existentes);
- h) informações complementares: informação dos cupons de corrosão e outros que indiquem a presença de deterioração;
- i) acessibilidade: acesso geral e suas limitações, como por exemplo:
  - exigências de andaime para acesso a determinados vasos podem vir explicitadas em folhas de dados ou apontadas nos desenhos ou nos isométricos dos vasos de pressão;
  - ocorrência de fatores anormais que impeçam o acesso externo satisfatório ou a construção de um andaime apropriado, o que normalmente implica no aumento dos custos da INI.
  - restrições para radiações ionizantes;
  - profissionais certificados em acesso por corda;
- j) possíveis mecanismos de falhas e deterioração: localização de possíveis defeitos e deteriorações, suas dimensões e morfologia.

As subseções a seguir, descrevem suscintamente algumas das técnicas consolidadas para obtenção dessas informações.

### 5.3 Inspeção baseada em risco (IBR)

O processo de IBR considera a probabilidade de falha do equipamento e a consequência desta falha para a determinação de uma matriz de risco. Baseado nessa matriz de risco, devem ser determinadas a frequência e a extensão da inspeção. Uma análise da IBR eficaz depende de um bom conhecimento dos mecanismos de deterioração e suas taxas de crescimento, histórico de inspeção, condições operacionais etc. Cabe ressaltar que muito do conhecimento que subsidia a IBR é o mesmo requerido para justificar e planejar a INI.

### 5.4 Avaliação do risco de corrosão (ARC)

#### 5.4.1 Geral

AARC é uma revisão formal dos mecanismos de deterioração aos quais um equipamento em particular pode estar suscetível, em conjunto com a determinação antecipada de suas intensidade.

A ARC deve considerar no mínimo os seguintes parâmetros:

- a) tipo de corrosão: uniforme, localizada ou alveolar;
- b) erosão;
- c) perda ou dano no *clad* ou *lining*;
- d) trincas: sob *clad* ou *lining*, em soldas, próximas a bocais ou outras aberturas, em acessórios internos;
- e) corrosão sob tensão em metal-base;
- f) fragilização por hidrogênio (empolamento, trinca em degraus);
- g) falhas em selos, juntas do flange, faces do flange;
- h) falhas em internos (normalmente não detectáveis pela INI).

**NOTA** Diferentes tipos de defeitos, com morfologias não usuais, podem ocorrer (como corrosão microbiológica), influenciando a seleção e a capacidade dos métodos de END aplicados à INI.

#### 5.4.2 Tipos de avaliação de risco de corrosão

A ARC deve ser feita nos mais diferentes níveis de acordo com o histórico operacional do vaso de pressão. Devido a sua importância, devem-se definir quais os tipos de ARC que foram adotados.

Os tipos de ARC a seguir devem ser usados no processo decisório da INI (ver Seção 6):

- a) ARC tipo 1;
- b) ARC tipo 2;
- c) ARC tipo 3;
- d) ARC tipo 4.

**ABNT NBR 16455:2016****5.4.2.1 ARC tipo 1**

Consiste de uma avaliação básica que considera inicialmente os resultados existentes de inspeções anteriores e os mecanismos de deterioração esperados. Deve ser baseada na experiência e histórico prévios com outros equipamentos similares.

Esse tipo de avaliação busca o mínimo exigível para planejamento de uma IBR. Deve ser realizada e analisada por pessoal competente em diversas disciplinas, incluindo, por exemplo, inspetores de equipamentos, engenheiros e técnicos de metalurgia, materiais e de processamento.

**5.4.2.2 ARC tipo 2**

Deve ser uma avaliação mais detalhada que oferece considerações documentadas sobre pelo menos os seguintes tópicos:

- a) condições do vaso, baseadas em inspeções anteriores;
- b) histórico de alterações e reparos;
- c) composição do fluido de processo e condições operacionais;
- d) monitoramento da corrosão;
- e) mudanças em qualquer fator citado nas alíneas anteriores que possam afetar os requisitos de inspeção;
- f) mecanismos de deterioração;
- g) evolução dos mecanismos de deterioração considerados preocupantes (ou pelo menos estimativas relacionadas à severidade, como por exemplo, valor de probabilidade relacionado à criticidade);
- h) localização onde cada tipo de deterioração provavelmente possa ocorrer.

A avaliação deve considerar os resultados de inspeções anteriores e previsões teóricas. Essas previsões teóricas devem estar baseadas nas informações do processo e dos materiais.

**5.4.2.3 ARC tipo 3**

Consiste em uma avaliação ampla que inclui um estudo teórico aprofundado, baseado nas informações do processo e dos materiais. Os seguintes aspectos devem ser considerados:

- a) mecanismos de deterioração;
- b) evolução dos mecanismos de deterioração considerados preocupantes;
- c) localização onde cada tipo de deterioração possa acontecer;
- d) condições anormais que possam levar à aceleração da deterioração;
- e) possibilidade para uma identificação incorreta ou omissão dos mecanismos de deterioração.

A avaliação do tipo 3 é realizada em detalhes em um vaso pelo conhecimento de suas variáveis específicas.

#### 5.4.2.4 ARC tipo 4

A avaliação do tipo 4 deve atender às exigências da avaliação do tipo 3 no que diz respeito ao estudo teórico, porém deve incluir considerações sobre os resultados de pelo menos uma inspeção em serviço do vaso de pressão considerado. Interpretações e correlações entre a deterioração prevista e as condições encontradas pela inspeção também devem ser levadas em consideração.

### 5.5 Avaliação da integridade estrutural

Deve-se conhecer a capacidade do equipamento resistir aos danos estruturais causados pela deterioração. O grau de conhecimento pode ser definido:

- de forma simplificada, por meio do conhecimento das condições operacionais e da corrosão permitíveis em projeto;
- de forma mais precisa, por meio de um maior conhecimento do processo de avaliação da adequação ao uso (por exemplo, usando a API 579/ASME FFS-1), para obtenção de informações, como dimensões críticas de trincas.

**NOTA** Essas informações fornecem ao supervisor da inspeção evidências do quanto resistente é um equipamento ao mecanismo de deterioração, o que, na verdade, influencia na efetividade requerida para a inspeção, visando à prevenção de falhas durante a campanha do equipamento.

### 5.6 Experiência operacional

Históricos de inspeções contendo tipos e dimensões de defeitos encontrados em serviço (ou até mesmo sua ausência), baseados na experiência operacional do equipamento ou de outros similares, com a mesma função ou serviço similar, podem ser utilizados para fornecer subsídios para as avaliações teóricas descritas em 5.4 e 5.5 se as inspeções realizadas forem apropriadas para o mecanismo de deterioração previsto.

## 6 Processo decisório

### 6.1 Introdução

Após o estudo da integridade do equipamento e da obtenção das informações da última inspeção realizada, deve-se determinar:

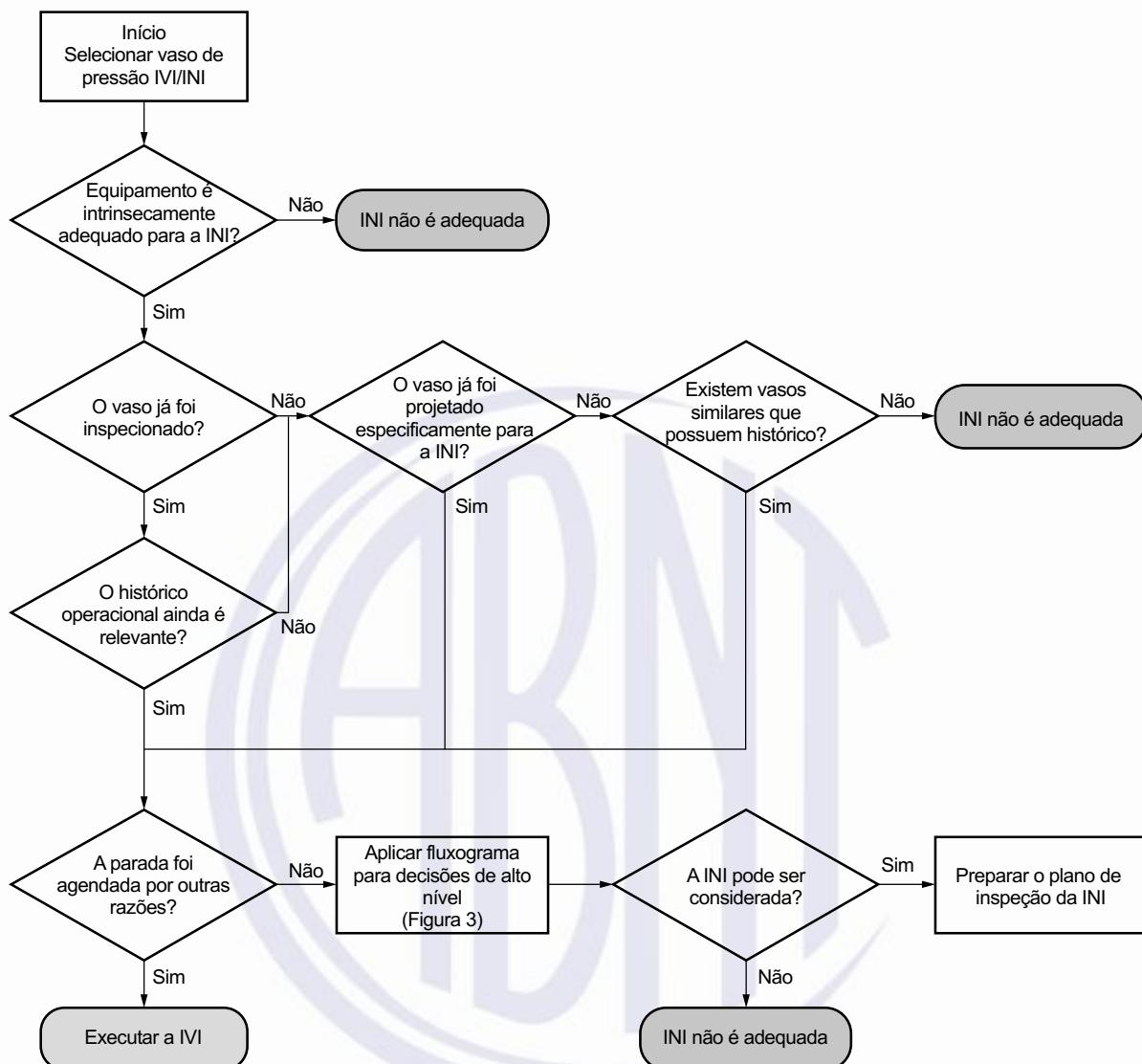
- se o equipamento pode ser submetido à INI como alternativa à IVI, ou;
- se a IVI pode ser postergada.

**NOTA** Esse processo decisório é o segundo estágio do processo de planejamento da INI (ver Figura 1).

O processo para a tomada de decisão de aplicar ou não a INI consiste de dois estágios, mostrados na Figura 2:

- seleção preliminar (ver 6.2);
- processo decisório de alto nível (ver 6.3).

## ABNT NBR 16455:2016

**Figura 2 – Procedimento de seleção da INI****6.2 Seleção preliminar****6.2.1 Geral**

Este primeiro estágio deve ser usado para identificar com rapidez os vasos que não podem ser submetidos à INI, ou que não possuem informações preliminares suficientes para sua aplicação.

O processo de seleção preliminar é baseado nas respostas do usuário do equipamento a cada uma das questões descritas em 6.2.2 a 6.2.6.

**6.2.2 Adequação do vaso de pressão a INI**

Deve-se determinar se não existe nenhum impedimento óbvio para a submissão do equipamento à INI, avaliando fatores como:

- a) inexistência de acesso exterior ao vaso;

- b) temperaturas extremas da superfície;
- c) barreiras geométricas e restrições de acesso;
- d) necessidade da inspeção de acessórios internos.

### **6.2.3 Inspeção e histórico do vaso de pressão**

Com excessão de 6.2.4 e 6.2.5, vasos sem histórico prévio de inspeções em serviço ou onde este não é mais relevante (devido, por exemplo, a mudanças nas condições de operação ou outras alterações), não podem ser considerados elegíveis para a INI.

### **6.2.4 Projeto do vaso de pressão**

Se o vaso for projetado especificamente para a INI, a INI pode ser considerada desde a entrada em operação do vaso, ou mesmo quando as condições do vaso tenham sido alteradas, desde que mantidas as premissas de projeto.

### **6.2.5 Vasos de pressão similares com histórico de serviço**

**6.2.5.1** Vasos são considerados similares quando apresentam essencialmente a mesma função, geometria, projeto, materiais e construção.

**6.2.5.2** A operação para ser considerada similar deve possuir essencialmente produtos com a mesma formulação, frações e fases, tipos de processos, vazão e temperaturas.

**6.2.5.3** A classificação de vasos como similares deve ser justificada formalmente.

**6.2.5.4** A resposta a esta pergunta deve ser afirmativa se as condições a seguir forem verdadeiras:

- a) os vaso são substancialmente os mesmos em termos de projeto, geometria, construção e condições de serviço (por exemplo, normalmente vazio ou cheio) e;
- b) não apresentem condições que possam acarretar alterações no tipo, distribuição e taxa de deterioração.

### **6.2.6 Agendamento da parada**

**6.2.6.1** Independentemente da realização da INI, se o vaso for aberto por outras razões, deve-se aproveitar a oportunidade para realizar uma IVI.

**6.2.6.2** Caso se pretenda realizar a INI juntamente com a IVI, não existe a necessidade de justificativa adicional.

## **6.3 Processo decisório de alto nível**

### **6.3.1 Geral**

O processo decisório de alto nível deve ser utilizado para determinar se a INI é, em princípio, adequada. Este processo, utilizado para decidir se existe informação suficiente para planejar a INI e qual o nível de eficiência requerida, deve avaliar quão confiáveis são:

- a) as previsões sobre os tipos de defeitos em potencial e suas localizações;

## ABNT NBR 16455:2016

- b) a eficiência das inspeções anteriores; e
- c) a taxa de deterioração e sua severidade conhecida ou esperada.

A tomada de decisão deve ser feita utilizando o fluxograma mostrado na Figura 3. Esse fluxograma permite definir se a INI é em princípio apropriada, baseado nas categorias selecionadas para cada um dos três fatores e respectivos critérios para categorização descritos em 6.3.2.

### 6.3.2 Fatores do processo decisório de alto nível

#### 6.3.2.1 Confiança na capacidade de prever os tipos e localizações dos mecanismos de deterioração ou danos

##### 6.3.2.1.1 Geral

A confiança na capacidade de prever os tipos de localização dos mecanismos de deterioração deve ser quantificada em categorias de confiança alta, média ou baixa (ver Figura 3).

A definição da categoria de confiança é baseada no entendimento de todos os mecanismos de deterioração presentes, e consequentemente na especificação de métodos capazes de identificar os defeitos associados a esses mecanismos.

A habilidade de prever os diversos mecanismos de deterioração depende de vários fatores. Devem ser utilizadas evidências das seguintes fontes para a sua avaliação:

- a) teórica: a natureza dos sistemas de gestão de integridade utilizados;
- b) prática: informações disponíveis de vasos iguais ou similares, com mesma função ou similar (ver 6.2.5).

**NOTA** Ao se usar a informação prática como base na previsão de tipos e localização dos processos de deterioração, é importante que os resultados da inspeção anterior tenham sido analisados em detalhes, desde o planejamento até a inspeção atual e que no mínimo uma análise ARC tipo 1 seja realizada. A credibilidade da evidência está diretamente ligada à quantidade de informações disponíveis, como número de vasos, inspeções prévias etc.

##### 6.3.2.1.2 Categoria de confiança alta

A categoria de confiança pode ser classificada como alta:

- a) se uma avaliação completa permitir uma previsão confiável dos mecanismos de deterioração em potencial e a localização preferencial onde atuam, considerando:
  - 1) que essa avaliação faz parte da atividade de gestão da integridade dentro da qual o planejamento da inspeção é conduzido;
  - 2) que a avaliação de integridade inclui no mínimo para cada vaso de pressão, considerações documentadas sobre:
    - a condição do vaso baseada em inspeções anteriores;
    - o histórico de alterações metalúrgicas, modificações e reparos do vaso;
    - a composição do fluido e condições operacionais;

- o monitoramento da corrosão;
  - os tipos de deterioração, locais preferenciais e taxas;
  - as mudanças em quaisquer fatores citados anteriormente que possam afetar os requisitos de inspeção.
- 3) que o plano de gestão da integridade assegure que os fatores definidos em 2) sejam avaliados por uma equipe de indivíduos competentes, com formação em áreas de conhecimento, como inspeção, materiais, metalurgia, processamento e engenharia;
- 4) que uma ARC tipo 4, conforme descrita em 5.4.2.4, foi executada;
- b) se o usuário tiver uma larga experiência com vasos de pressão com funções iguais ou similares de processo, considerando:
- 1) que o histórico de inspeções contendo os tipos de defeitos existentes está disponível;
  - 2) que uma revisão detalhada dos resultados de inspeções anteriores foi realizada e que estes foram considerados na previsão do tipo e localização dos defeitos esperados na inspeção atual;
  - 3) que existe a disponibilidade de dados de pelo menos oito inspeções no total e não menos que duas inspeções para o vaso de pressão com mais tempo de operação utilizado na avaliação;
  - 4) que pelo menos uma destas inspeções tenha sido uma inspeção visual detalhada (interna ou externa, dependendo do tipo de deterioração);
  - 5) que uma ARC do tipo 1 deva ter sido realizada.

Mudanças nas condições operacionais do vaso ocorridas depois da realização da inspeção anterior neste não permitem a sua classificação como de alta confiabilidade, exceto quando essas condições forem mais brandas que as originais.

### **6.3.2.1.3 Categoria de confiança média**

A categoria de confiança pode ser definida como média

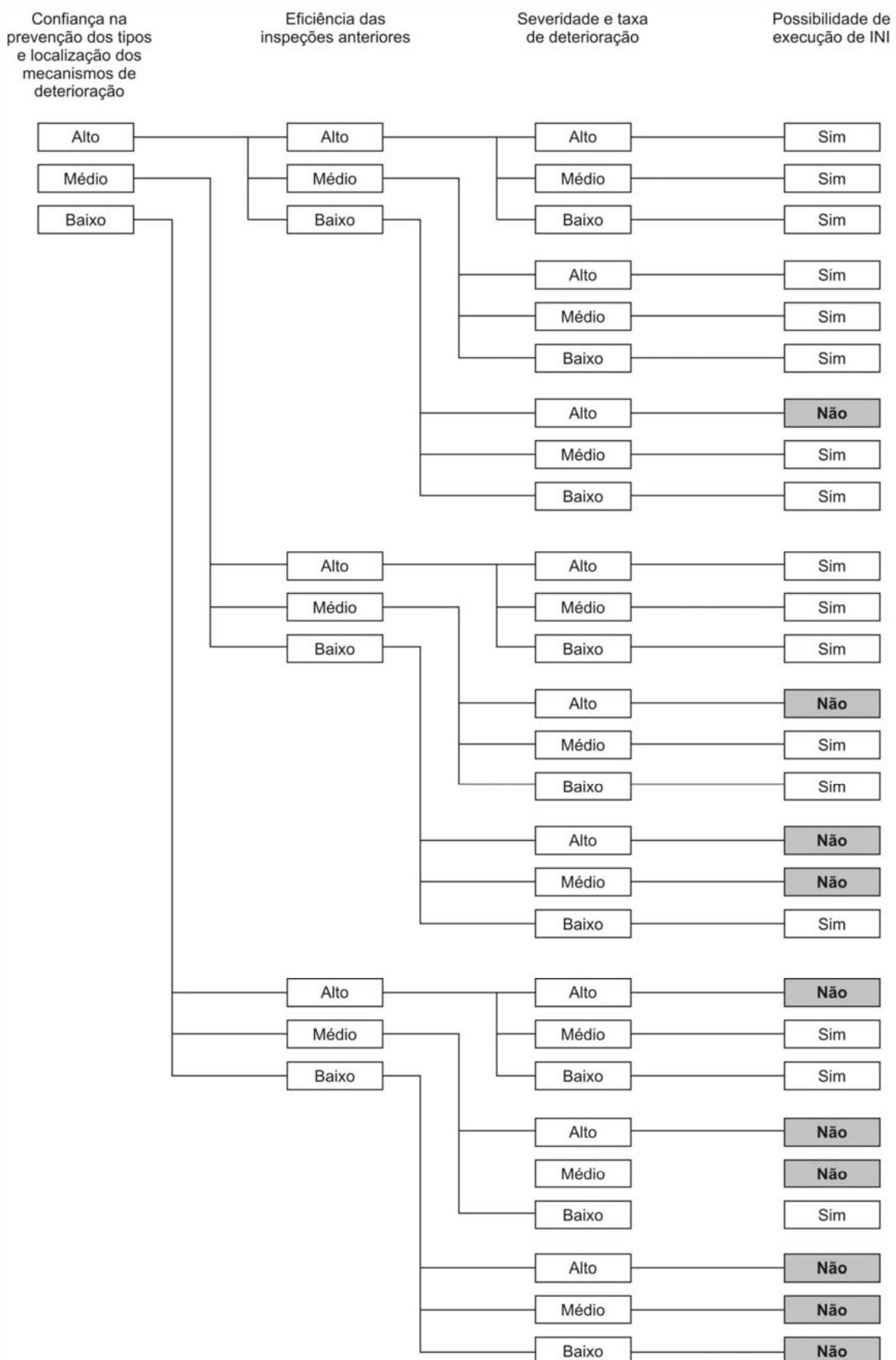
- a) se a avaliação completa dos potenciais mecanismos de deterioração for adequada para a determinação dos mecanismos considerados relevantes e dos locais preferenciais para sua ocorrência, considerando:
- 1) que essa avaliação faz parte das atividades da gestão da integridade, onde o planejamento da inspeção é conduzido;
  - 2) que a avaliação inclui no mínimo para cada vaso de pressão, considerações documentadas sobre:
    - a condição do vaso, baseada em inspeções anteriores, se realizadas;
    - o histórico de alterações metalúrgicas, modificações e de reparos do vaso;
    - a composição do fluido e as condições operacionais;

## ABNT NBR 16455:2016

- o monitoramento da corrosão;
  - os tipos de deterioração, locais preferenciais e taxas;
  - as mudanças em quaisquer fatores citados anteriormente que possam afetar os requisitos de inspeção.
- 3) que plano o gestão da integridade deve assegurar que os fatores descritos em 2) sejam avaliados por uma equipe de indivíduos competentes com formação em áreas de conhecimento, como inspeção, materiais, metalurgia, processamento e engenharia;
- 4) que uma ARC do tipo 2 deve ter sido realizada;
- b) se para o vaso de pressão ou outros vasos sob condições de operação similares, for atestado
- 1) que apresentam históricos operacionais;
  - 2) que apresentem histórico de no mínimo quatro inspeções no total, sendo ao menos uma para o vaso com mais tempo em operação;
  - 3) que foi executada uma revisão completa dos resultados de todas as inspeções prévias;
  - 4) que estes resultados foram considerados na previsão do tipo e localização de defeitos que possam ser esperados nesta inspeção;
  - 5) que foi feita uma ARC no mínimo do tipo 1.

### 6.3.2.1.4 Categoria de confiança baixa

A categoria de confiança deve ser definida como baixa quando não for possível a inclusão nas categorias de confiança alta e média.

**Figura 3 – Fluxograma de decisão de alto nível**

## ABNT NBR 16455:2016

### 6.3.2.2 Avaliação da efetividade das inspeções prévias

A avaliação da efetividade das inspeções prévias tem como finalidade qualificar a capacidade da INI de prever todos os tipos de defeitos relevantes, e consequente a definição da eficiência dos métodos de END utilizados na detecção destes, de modo a permitir uma gestão adequada da probabilidade de falha do vaso.

A avaliação deve ser feita comparando a efetividade da INI realizada com a de uma inspeção visual interna convencional detalhada, complementada, quando aplicável, com uma inspeção por partícula magnética (PM) ou líquido penetrante (LP).

Baseada nos resultados obtidos, a efetividade das inspeções prévias pode ser classificada em uma das seguintes categorias:

- a) alta: a inspeção realizada apresenta uma probabilidade na detecção de defeitos superior à inspeção visual interna;
- b) média: a inspeção realizada possui uma probabilidade na detecção de defeitos similar à apresentada pela inspeção visual interna;
- c) baixa: a inspeção realizada possui uma probabilidade na detecção de defeitos inferior à apresentada pela inspeção visual interna.

A comparação dos resultados entre a inspeção realizada e a inspeção visual externa deve considerar:

- a) a probabilidade de detecção dos métodos de END utilizados no que diz respeito aos tipos de defeitos, que é dado pela efetividade atribuída a cada método, para cada tipo de descontinuidade;
- b) a cobertura da inspeção e sua relação com a localização dos defeitos de interesse.

**NOTA 1** O conhecimento dos prováveis defeitos de interesse e onde estes podem ocorrer é importante para determinar a efetividade do processo.

**NOTA 2** O conhecimento de que os defeitos só ocorrem em uma região do vaso totalmente inspecionada com um método de Alta efetividade, implica que a inspeção pode ser classificada como de Alta efetividade.

**NOTA 3** A falta de conhecimento ou experiência que permita prever defeitos que possam existir, mesmo considerada uma inspeção de grande cobertura usando apenas um método de END (que seja capaz de detectar apenas um tipo de defeito), pode resultar em uma baixa efetividade.

**NOTA 4** Considerar o resultado de inspeções anteriores em vasos similares, com funções similares, para a determinação da categoria em questão.

### 6.3.2.3 Severidade e taxa de deterioração

A avaliação da severidade e da taxa de deterioração deve ser feita de acordo com as seguintes categorias:

- a) alta: os mecanismos de deterioração e suas taxas são tais que falhas do vaso ou rejeições baseadas nos resultados da inspeção possam ser razoavelmente esperadas pelo resto da vida da planta;
- b) média: os mecanismos de deterioração e suas taxas são tais que podem ser observáveis durante o tempo de vida da planta, porém não se constituem em uma ameaça à integridade do vaso durante esse período;
- c) baixa: não há nenhum mecanismo de deterioração esperado ou a deterioração é superficial.

As categorias devem ser definidas considerando a zona mais afetada do vaso.

### 6.3.3 Recomendação da INI

A recomendação de aplicação ou não da INI deve ser obtida da Figura 3, após terem sido definidas as categorias para os fatores citados em 6.3.2.

### 6.3.4 Utilização da INI para postergação de uma IVI

O fluxograma de suporte à decisão incluso na Figura 3 se aplica aos casos onde a INI é planejada para substituir uma IVI. Em certas circunstâncias, é possível que a INI possa ser utilizada para a postergação de uma IVI, mesmo que isto não seja considerado factível pelo fluxograma da Figura 3. Os requisitos que norteiam a utilização da INI como justificativa para a postergação de uma IVI são descritos na Seção 11.

## 6.4 Registros da decisão da INI

Deve ser emitido um relatório rastreável com todos os fatores considerados na tomada de decisão definida nesta Norma, contendo no mínimo:

- a) notificação de qualquer mudança ocorrida no processo que possa afetar o tipo ou a taxa de deterioração;
- b) relatórios de inspeções anteriores;
- c) justificativa de aceitação segundo o critério de seleção da Figura 2;
- d) lista de vasos considerados similares ao inspecionado e uma justificativa de que os mecanismos de degradação esperados são os mesmos;
- e) justificativa para seleção das categorias consideradas para:
  - a confiança na capacidade de prever os tipos e localização dos mecanismos de deterioração;
  - a efetividade das inspeções anteriores;
  - a severidade e a taxa de deterioração.

## 6.5 Exemplos

O Anexo C contém vários exemplos de aplicação do processo de decisão descrito na Seção 6.

## 7 Planejamento da inspeção

### 7.1 Objetivo e premissas

**7.1.1** Esta Seção fornece os requisitos de como determinar o planejamento mais efetivo da INI para um vaso de pressão, de forma a estabelecer o equilíbrio adequado entre a integridade do vaso e os custos e tempo de inspeção (ver Figura 4).

**NOTA** Esclarece a questão de como definir o balanço conveniente entre os métodos de END de alta sensibilidade, mas relativamente lentos (e consequentemente caros), e os métodos mais rápidos (*screening*), que são geralmente menos custosos.

**ABNT NBR 16455:2016**

**7.1.2** O principal objetivo do planejamento da inspeção é estabelecer uma estratégia economicamente sustentável que forneça um nível de confiabilidade satisfatório para a operação segura e confiável do vaso de pressão até a próxima inspeção.

**NOTA** Requer a análise de um amplo leque de disciplinas, desde o detalhamento dos aspectos técnicos relativos aos impactos das condições de operação do vaso na sua degradação até o orçamento financeiro planejado para o mesmo, além da satisfação dos requisitos da legislação ambiental e de segurança.

**7.1.3** O planejamento da INI do vaso define que partes deste devem ser inspecionadas, que métodos e técnicas de END devem ser utilizados, e qual a extensão do vaso deve ser coberta por estes métodos de END.

**7.1.4** O planejamento da inspeção deve definir pelo menos o seguinte:

- a) época de realização da inspeção;
- b) método(s) e técnica(s) de END a ser(em) empregado(s);
- c) regiões do vaso a serem inspecionadas;
- d) lista resumida das empresas de inspeção habilitadas para os métodos definidos;
- e) qualificações necessárias para os inspetores;
- f) requisitos específicos dos relatórios;
- g) requisitos para o pessoal de operação da planta (por exemplo, parada obrigatória);
- h) requisitos para o pessoal de manutenção (por exemplo, montagem de andaimes, acesso por corda);
- i) requisitos para o pessoal de segurança, medicina e saúde (SMS) (aprovação dos equipamentos e do pessoal).

**7.1.5** O planejamento da inspeção (ver Figura 4) deve considerar os seguintes pontos:

- a) se a inspeção será realizada com o equipamento operando ou fora de operação;
- b) temperatura do equipamento durante a inspeção;
- c) se a inspeção é o caminho crítico da parada;
- d) se a inspeção está sendo realizada por uma razão especial (parada de emergência);
- e) requisitos necessários para comparar resultados com inspeções anteriores;
- f) limitações de tempo e de custo.

**7.1.6** O detalhamento do planejamento da inspeção deve ser sistematizado e deve ser consistente com os critérios de engenharia aplicáveis ao vaso.

**7.1.7** Os principais elementos de um planejamento da inspeção são os seguintes:

a) identificação e seleção do grupo de planejamento:

o grupo que planeja, prepara e executa a inspeção deve ter competência comprovada em uma vasta gama disciplinar. Esses requisitos devem ser identificados e as pessoas apropriadas devem ser selecionadas;

b) definição da estratégia de inspeção:

deve-se definir se a inspeção pretende confirmar a inexistência de degradação, ou definir a dimensão ou extensão de um mecanismo de dano ativo conhecido;

c) definição de zonas do vaso a inspecionar:

o vaso pode ser tratado totalmente ou subdividido em partes, cada qual representando uma combinação particular dependente da geometria, material, probabilidade de ocorrência de dano etc.;

d) seleção do método e técnica de END e cobertura:

seleção do(s) método(s) e técnica(s) de END apropriado(s) e cobertura de cada uma das zonas definidas.

## 7.2 Grupo de planejamento

**7.2.1** O planejamento da inspeção deve ser conduzido por um grupo de pessoas com especialidades em diferentes áreas, para garantir a efetividade da inspeção. Uma abordagem multidisciplinar é requerida de forma a envolver experiências apropriadas em engenharia, materiais, processo, operação, e END.

**7.2.2** O grupo básico requerido para alcançar os requisitos da INI deve consistir de pessoas com competência nas seguintes áreas:

- a) conhecimentos gerais de construção de vasos de pressão e sistemas, materiais usados na fabricação e seu processamento, processos de fabricação etc.;
- b) tecnologia de corrosão e de materiais;
- c) conhecimentos específicos dos sistemas a serem inspecionados, histórico operacional e conhecimentos gerais (das práticas de trabalho e histórico do sistema, requisitos de segurança, e condições favoráveis no momento da inspeção);
- d) END;
- e) coordenação deste tipo de processo.

**NOTA** Os membros do grupo de trabalho podem ter proficiência em mais de uma das especialidades citadas; não é necessário que o grupo possua um especialista para cada uma das áreas citadas.

**7.2.3** Um dos membros do grupo de trabalho deve ser indicado como o responsável pelo processo de planejamento como um todo.

## ABNT NBR 16455:2016

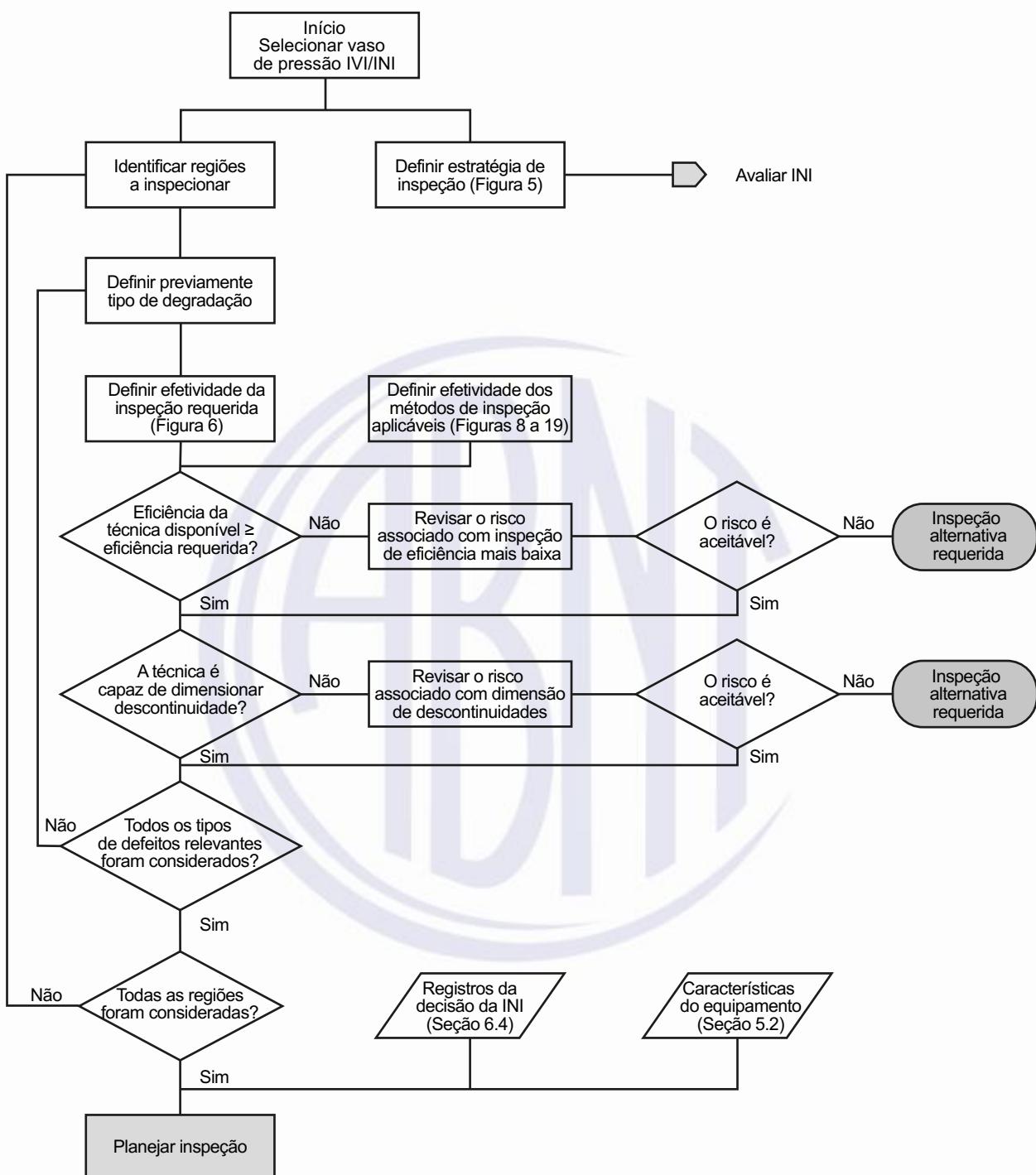


Figura 4 – Fluxograma do planejamento da inspeção

## 7.3 Tipo de estratégia de inspeção

## 7.3.1 Geral

Os tipos de estratégia de inspeção devem ser classificados de acordo com os requisitos da Tabela 1.

**Tabela 1 – Definição dos tipos de inspeção**

<b>Tipo</b>	<b>Definição</b>
A	Não esperada a ocorrência do mecanismo de degradação. Inspeção requerida para confirmar a não existência do mecanismo de degradação.
B	Esperada a ocorrência do mecanismo de degradação com progressão baixa ou média. Localização do dano pode ser prevista. Não se espera que o mecanismo de dano impacte (antecipando parada não programada) na integridade do vaso (tipicamente em pelo menos dois períodos de parada total). Inspeção requerida para confirmar as definições de risco de corrosão previstas.
C	Esperada a ocorrência da degradação com progressão média ou alta. Localização da degradação não pode ser antecipada. Pode impactar de forma moderada a integridade do vaso (período de duas paradas). Inspeção requerida para confirmar inexistência de descontinuidades com tamanho crítico.

Os seguintes aspectos devem ser considerados na definição do tipo de estratégia de inspeção:

- a) mecanismo de dano:
  - natureza da degradação, redução de espessura global ou trincamento;
  - localização da degradação, ataque preferencial ou aleatoriamente localizado;
- b) potencial para comprometer a integridade (resistência ao mecanismo de dano previsto no projeto):
  - tolerância ao processo corrosivo;
  - tamanho crítico de trinca;
- c) grau de confiabilidade, de acordo com o desempenho da inspeção.

Qualquer programa de inspeção previsto deve identificar e localizar com algum grau de segurança os possíveis mecanismos de danos não previstos que possam levar à falha do componente.

Os aspectos a serem considerados se baseiam no conhecimento de que os mecanismos de degradação, determinados pela análise de risco da corrosão (ARC) ou pela evidencia histórica, que afetam a segurança e potencial de comprometimento da integridade, possam ser cobertos pela definição de onde e como inspecionar. Essas definições devem considerar também as condições de operação futura do componente, e não somente as observadas no passado.

Deve ser analisado o impacto nos objetivos da inspeção de qualquer mudança que o plano de inspeção possa ter.

Os três tipos de inspeção aplicáveis são discutidos nas próximas subseções. Ver 7.3.5 para uma diretriz sobre a escolha do tipo a ser adotado para um item em particular.

### 7.3.2 Inspeção tipo A

O objetivo principal da inspeção do tipo A é confirmar a inexistência de um processo ativo de degradação. Se algum tipo de degradação for encontrado devem ser adotadas mudanças na estratégia da inspeção.

## ABNT NBR 16455:2016

A inspeção do tipo A deve ser aplicada nas seguintes situações:

- a) quando existe uma baixa probabilidade de degradação baseada no histórico das inspeções anteriores e/ou da análise de risco de corrosão; ou
- b) quando a degradação está presente com tendência a ser generalizada; ou
- c) quando existe uma alta probabilidade de que a área degradada possa ser identificada; ou
- d) quando se pretende fazer uma varredura generalizada (*general screening*), utilizando um método de END, para a detecção de mecanismos de danos não esperados.

### 7.3.3 Inspeção tipo B

A inspeção tipo B deve ser aplicada quando há algum processo de degradação esperado, mas este não compromete a integridade a médio prazo do item a ser inspecionado.

NOTA 1 Médio prazo é, neste caso, adotado como sendo um período equivalente a pelo menos dois intervalos de inspeção.

NOTA 2 Para este tipo de inspeção, é utilizada uma cobertura de baixa a moderada.

A finalidade deste tipo de inspeção é fornecer informações suficientes para permitir uma demonstração quantificada do grau de confiabilidade requerido. Se os resultados da inspeção não permitem essa conclusão, então ações posteriores devem ser tomadas.

### 7.3.4 Inspeção tipo C

A inspeção do tipo C, cujo propósito é permitir que qualquer defeito com potencial para comprometer a integridade do item a ser inspecionado será prontamente detectado, deve ser aplicada nas seguintes situações:

- a) quando há uma probabilidade razoavelmente alta de degradação presente; ou
- b) quando a degradação é severa; ou
- c) quando a degradação não tem localização preferencial de ocorrência.

NOTA 1 A inspeção do tipo C é geralmente aplicada com cobertura moderada ou alta.

Caso estes defeitos sejam encontrados, deve-se tomar novas medidas a fim de dimensionar com precisão o tamanho dos defeitos, para permitir que uma avaliação de integridade possa ser realizada.

NOTA 2 Essa inspeção mais detalhada, específica para cada tipo de defeito, foge ao escopo da INI. O propósito principal da INI é identificar e localizar esses defeitos.

### 7.3.5 Seleção do tipo de inspeção

#### 7.3.5.1 Geral

A seleção do tipo de inspeção deve ser feita de acordo com o procedimento descrito no fluxograma mostrado na Figura 5. Este procedimento define o tipo da inspeção mais adequada considerando a probabilidade, extensão e a taxa de degradação esperada para um determinado mecanismo de dano (baseado na análise do risco de corrosão).

A seleção do tipo de inspeção é única para um mecanismo de degradação particular, e pode variar de uma localização para a outra. A Tabela 2 mostra um exemplo de como avaliar a perda de parede por corrosão generalizada e o trincamento localizado por corrosão sob tensão em diversos locais de um mesmo vaso de pressão.

**Tabela 2 – Exemplos de estratégias de inspeção graduados pelo processo**

Localização	Mecanismo de dano	Tipo de inspeção	Comentário
Acima do nível de fluido	Perda de parede generalizada	Tipo A	Baixa probabilidade, generalizada em extensão e taxa de corrosão prevista média
	Trincamento localizado	Tipo A	Baixa probabilidade, localizada e preferencialmente ocorrendo nas soldas, taxa de corrosão prevista média
Parede do vaso abaixo do nível de fluido	Perda de parede generalizada	Tipo B	Alta probabilidade, generalizada em extensão e taxa de corrosão prevista média
	Trincamento localizado	Tipo B	Média probabilidade, localizada e ocorrendo preferencialmente nas soldas, taxa de corrosão prevista média
Bocais e conexões	Perda de parede generalizada	Tipo B	Alta probabilidade, generalizada em extensão e taxa de corrosão prevista média
	Trincamento localizado	Tipo C	Alta probabilidade, localizada e ocorrendo preferencialmente nas soldas, taxa de corrosão prevista alta

## ABNT NBR 16455:2016

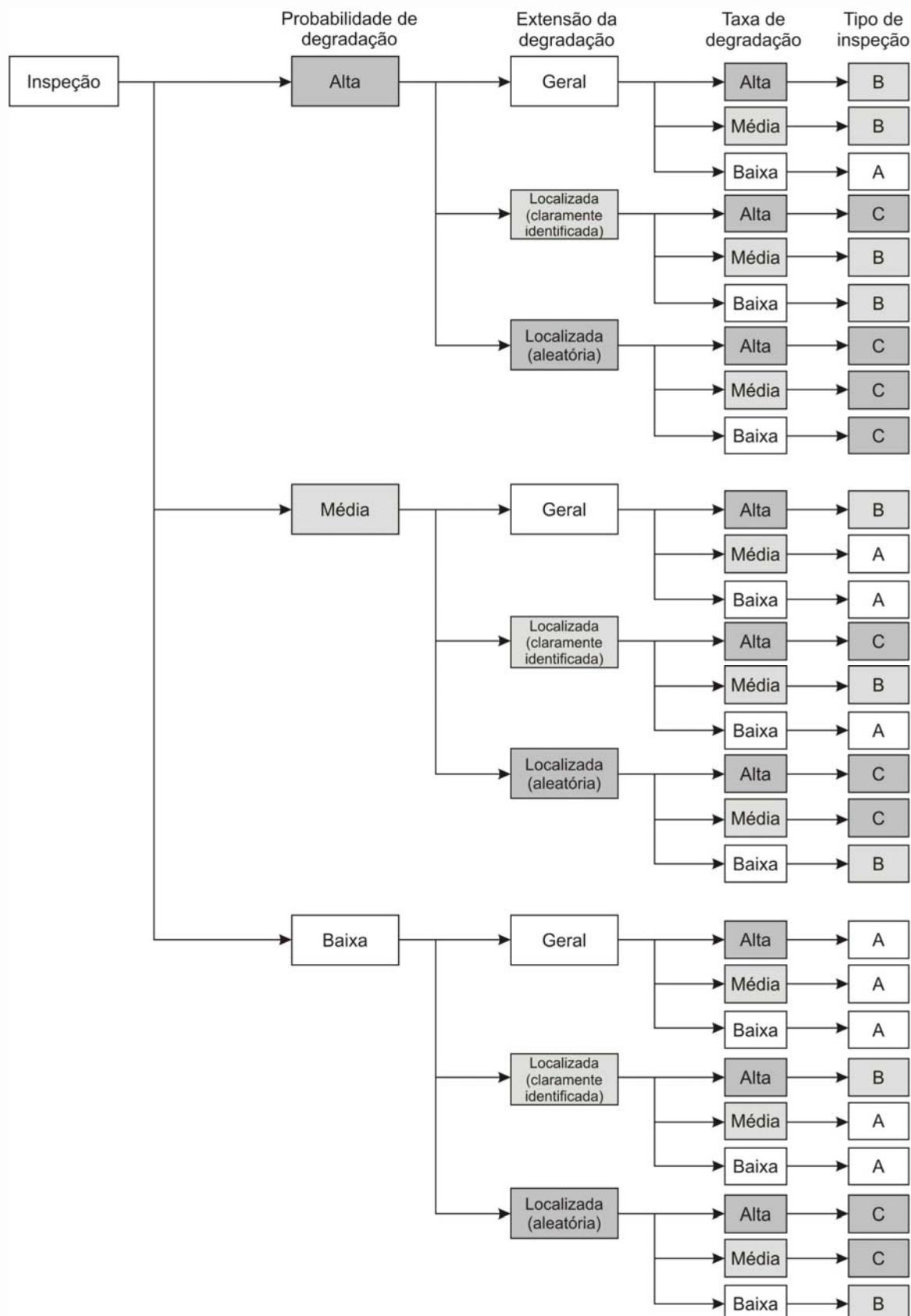


Figura 5 – Seleção do tipo de inspeção

### **7.3.5.2 Probabilidade de ocorrência do mecanismo de dano/degradação**

A probabilidade de ocorrência de um mecanismo de dano em um componente deve ser quantificada em categorias, como a seguir:

- a) alta: a inspeção anterior mostrou que o mecanismo de degradação pode ocorrer, ou o estudo de risco de corrosão indicou que o mecanismo ocorrerá durante o restante do tempo de vida da planta;
- b) média: o estudo de risco de corrosão mostrou que o mecanismo de dano pode ocorrer durante a vida do equipamento, mas o histórico de inspeção até agora não mostrou evidência de degradação;
- c) baixa: nenhuma degradação esperada ou a degradação é superficial.

A avaliação deve considerar a pior localização no componente e ter em conta qualquer histórico de inspeção anterior e estudos de risco de corrosão.

### **7.3.5.3 Extensão da degradação**

**7.3.5.3.1** A extensão da degradação, para os propósitos de seleção do tipo da inspeção, deve ser definida como:

- a) generalizada;
- b) claramente identificável;
- c) aleatória.

**7.3.5.3.2** A extensão de degradação generalizada engloba:

- a) a corrosão e a erosão, onde a perda de espessura de parede é uniforme ou varia pouco ao longo da área sob consideração;
- b) descontinuidades do tipo trinca, quando são numerosas e muito próximasumas das outras na área considerada.

**7.3.5.3.3** A extensão de degradação claramente identificável é representativa de uma degradação localizada e considera:

- a) a corrosão e erosão onde a perda de espessura de parede é localizada ou irregular ao longo da área sob consideração;
- b) alvéolos ou trincas localizadas, que são isolados e não interagem com os defeitos circunvizinhos.

**NOTA** A principal característica é que a provável localização da trinca é bem conhecida e previsível, por exemplo, na raiz da solda, e a inspeção pode ser direcionada para essa localização.

**7.3.5.3.4** A extensão de degradação aleatória também é representativa de uma degradação generalizada onde podem ocorrer as situações descritas em 7.3.5.3.3, porém pode ocorrer em qualquer lugar sem preferência particular.

## ABNT NBR 16455:2016

### 7.3.5.4 Taxa de degradação

A taxa de degradação, para os propósitos de seleção do tipo da inspeção, deve ser classificada nas seguintes categorias:

- a) alta: a taxa de degradação prevista é tal que a falha do equipamento ou sua rejeição, baseada em resultados da inspeção, pode ocorrer durante a vida remanescente do equipamento;
- b) média: a taxa de degradação estimada é tal que poderia ser observada dentro da vida estimada do equipamento, mas sem comprometimento da integridade nesse período;
- c) baixa: nenhuma degradação é esperada ou a degradação é superficial.

### 7.3.6 Tipo de inspeção resultante

O tipo de inspeção resultante é selecionado no fluxograma (ver Figura 5). Como em todos os aspectos do processo de avaliação, o resultado assim obtido deve ser validado à luz do bom senso da engenharia e, se necessário, ajustado com a geração de um registro do processo decisório.

## 7.4 Definição das zonas do vaso

### 7.4.1 Identificação das zonas

**7.4.1.1** Para avaliação pela INI, o vaso de pressão deve ser dividido em zonas que representem as diferentes combinações de probabilidade e resistência à degradação, e facilidade de inspeção. Fatores como geometria, material, probabilidade e tipos de degradação, e resultados de inspeções anteriores devem ser todos considerados na definição dessas diferentes zonas.

NOTA A divisão do vaso em zonas se deve ao fato de ser quase impraticável executar INI em toda a superfície do vaso.

**7.4.1.2** A divisão do vaso em zonas deve ser utilizada para decidir quais partes (zonas) devem ser inspecionadas, por qual método de END, e quais podem ser sujeitas à inspeção por amostragem.

NOTA No caso de inspeção por amostragem de uma zona pode ser possível usar o resultado para fazer previsões acerca da condição de regiões não inspecionadas dessa zona, mas o resultado pode fornecer pouca ou nenhuma informação acerca da condição das demais zonas.

**7.4.1.3** Cada zona individual deve ser homogênea, de forma que qualquer parte selecionada da mesma seja representativa das partes restantes em termos de probabilidade de degradação, tipo possível de degradação, resistência à degradação e o(os) método(s) de END que pode(m) ser aplicado(s).

**7.4.1.4** Zonas que são fisicamente separadas, mas com características similares, podem ser consideradas como uma só para os propósitos de amostragem.

**7.4.1.5** O método de END e sua amostragem, se cabível, devem ser determinados individualmente para cada zona.

**7.4.1.6** Exemplos de características que podem ser consideradas quando o vaso é dividido em zonas incluem:

- a) soldas longitudinais;

- b) soldas circunferenciais;
- c) soldas de acessórios;
- d) soldas de bocais;
- e) metal base com pequena probabilidade de corrosão e erosão;
- f) metal base com media probabilidade de corrosão e erosão;
- g) metal base com a maior probabilidade de corrosão e erosão (naquele vaso específico);
- h) regiões corroídas conhecidas na chapa;
- i) suportes internos com impacto na integridade.

Estes são apenas exemplos, na prática as zonas devem ser determinadas considerando detalhes de projeto, função, condições operacionais e histórico do vaso.

#### **7.4.2 Processo para a definição das zonas**

##### **7.4.2.1 Geral**

De forma a simplificar o processo de definição de zonas de inspeção diferenciadas, é recomendado que os aspectos de projeto, condição operacional e histórico de inspeção sejam considerados separadamente.

##### **7.4.2.2 Fatores de projeto e fabricação**

O vaso deve ser dividido em diferentes zonas (categorias) baseadas em condições de carregamento e resistência a defeitos. Exemplos incluem, mas não estão limitados às chapas do casco, costado e tampos, bocais (diferentes tipos de projeto de bocais podem necessitar tratamento separado), conexões com penetração, bocas de visita, soldas longitudinais, soldas circunferenciais, apêndices, suportes e componentes internos. Partes separadas fisicamente podem ser inclusas na mesma zona, como bocais e cordões de solda, em função de aspectos como processo de soldagem e geometria.

##### **7.4.2.3 Fatores operacionais**

O vaso deve ser dividido em diferentes zonas, refletindo a extensão na qual diferentes condições operacionais ou de processo possam afetar diferentemente a cada uma delas. As considerações incluem, mas não estão limitadas aos fluidos de serviço, locais de entradas e saídas de produtos, localizações de fases mistas de fluidos, altas taxas de fluxo ou turbulência, vapor e condensação, borbulhamento e cavitación, ciclo de pressão, carregamento, temperatura, atmosfera oxidante, ou conteúdo agressivo abrasivo.

A definição das zonas em função de fatores operacionais requer o conhecimento detalhado das características operacionais, natureza química dos fluidos, metalurgia etc.

Atenção deve ser dada ao histórico do vaso, à experiência com tipos semelhantes de vasos de pressão operando sob condições amplamente semelhantes, e ao conhecimento genérico e experiência de como o material do vaso se comporta sob estas condições operacionais específicas (processamento, temperatura etc.).

## ABNT NBR 16455:2016

### 7.4.2.4 Fatores relativos a inspeções anteriores

O vaso deve ser dividido em diferentes zonas correspondentes à efetividade e resultados de inspeções anteriores. Exemplos incluem, mas não estão limitados às regiões onde inspeções anteriores em serviço foram realizadas, regiões sujeitas à inspeção visual interna, regiões sujeitas a medições de espessura por ultrassom, regiões nas quais se reportou a presença de defeitos ou degradação etc.

**NOTA** Outras subdivisões em zonas podem ser necessárias, como nos casos de regiões cobertas por revestimento resistente à chama, de regiões com superfície com acesso limitado à inspeção pela presença de tubulações adjacentes etc.

### 7.4.3 Exemplo

O Anexo D apresenta um exemplo que ilustra a identificação de zonas.

## 7.5 Definição do tipo de degradação

Os tipos de degradação devem ser definidos de acordo com a morfologia do defeito associada. Na maioria dos casos, os defeitos podem ser categorizados em um ou mais dos tipos a seguir:

- a) redução generalizada de espessura da parede: cobre corrosão ou erosão, onde a perda de espessura de parede é uniforme ou variar pouco ao longo da área considerada;
- b) redução localizada de espessura: abrange a corrosão ou erosão onde a perda de espessura de parede é localizada ou irregular ao longo da área sob consideração;
- c) trinca localizada: cobre falhas do tipo trinca que são tipicamente isoladas e não interagem com defeitos circunvizinhos (uma trinca de fadiga, iniciada em uma região de concentração de tensões, deve tipicamente ser considerada uma trinca localizada);
- d) trincamento generalizado: cobre defeitos do tipo trincas numerosas e proximamente espaçadas na região sob consideração.

A avaliação deve considerar que diferentes mecanismos de dano resultam em defeitos com diferentes defectibilidades pelos END.

**NOTA 1** A morfologia do defeito é o aspecto que mais influencia a escolha do método e técnica de END a ser aplicado.

**NOTA 2** Para os propósitos desta Norma, perda localizada de espessura de parede inclui os alvéolos.

**NOTA 3** Além dos tipos citados, em algumas situações pode ser necessária adicionar novas categorias, como para alguns tipos de defeitos menos comuns, como fissurações laminares e empolamentos.

A Tabela 3 contém, a título de ilustração, uma matriz com componentes do vaso e os defeitos a eles associados. Dependendo dos requisitos de cobertura, existem componentes que não necessitam de inspeção.

**Tabela 3 – Exemplo de matriz usada para definir combinações entre componentes e defeitos**

<b>Componente do vaso</b>	<b>Tipo de defeito</b>			
	<b>Perda de espessura localizada</b>	<b>Perda de espessura generalizada</b>	<b>Trincamento localizado</b>	<b>Trincamento generalizado</b>
Posicionado no bocal B1				
Cordões de solda do casco				
Chapa do casco				
Chapas de acessórios				

## 7.6 Efetividade da inspeção

### 7.6.1 Geral

O nível de efetividade da inspeção, que indica o quanto crítica é a inspeção, deve ser definido para cada uma das zonas do vaso (ver 7.4), considerando:

- a) grau da inspeção, avaliado conforme 7.6.2;
- b) tolerância à degradação atual, avaliada conforme 7.6.3;
- c) consequência da falha, avaliada conforme 7.6.4.

NOTA Algumas zonas podem não necessitar de inspeção.

O fluxograma mostrado na Figura 6 fornece o critério para determinar a efetividade de inspeção requerida, tendo em conta para cada zona se a degradação foi previamente detectada, a probabilidade de ocorrência de degradação (utilizando os princípios de graduação da inspeção), a resistência à degradação e a consequência de falha do vaso. A efetividade de inspeção requerida para uma localização em particular é obtida diretamente no fluxograma.

### 7.6.2 Graduação da inspeção

**7.6.2.1** O grau de inspeção do item deve ser graduado entre 0 e 3, baseado nos resultados das inspeções anteriormente realizadas, e na taxa e previsibilidade da deterioração.

NOTA O termo item utilizado nesta subseção pode ser um equipamento, uma determinada zona de um equipamento ou um acessório ou parte de um equipamento.

## ABNT NBR 16455:2016

Grau da inspeção (IP12 / IP13)	Tolerância à degradação atual	Efetividade mínima da inspeção		
		Baixa	Média	Alta
Grau 0	Baixa	Alta	Alta	Alta
Grau 1	Média	Alta	Alta	Alta
Grau 2	Alta	Média	Alta	Alta
Grau 3	Baixa	Alta	Alta	Alta
	Média	Média	Alta	Alta
	Alta	Média	Média	Alta
	Baixa	Média	Alta	Alta
	Média	Baixa	Média	Alta
	Alta	Baixa	Média	Média
	Baixa	Média	Média	Alta
	Média	Baixa	Média	Média
	Alta	Baixa	Baixa	Média

**Figura 6 – Fluxograma de efetividade da inspeção**

**7.6.2.2** Deve ser atribuído o grau 0 a um item nas seguintes situações:

- quando não há evidência histórica que suporte o julgamento;
- a taxa de deterioração é alta;
- a taxa de deterioração é imprevisível;
- o item foi recentemente instalado em um sistema.

**NOTA** O termo sistema pode ser uma planta, um equipamento ou parte de um equipamento.

**7.6.2.3** Deve ser atribuído o grau 1 a um item:

- o qual existe pelo menos uma inspeção prévia de grau 0; e
- que apresenta uma taxa moderada de deterioração que seja previsível.

**7.6.2.4** Deve ser atribuído o grau 2 a um item:

- que tenha pelo menos uma inspeção prévia de grau 0 ou grau 1; e
- que apresente uma taxa de deterioração previsível.

### **7.6.2.5** Deve ser atribuído o grau 3 a um item:

- a) que tenha pelo menos uma inspeção de grau 0 mais uma inspeção de grau 1 ou grau 2, e que apresente baixa taxa de deterioração e que esta seja previsível; ou
- b) que tenha uma taxa de deterioração desprezível em um serviço com ambiente estável.

### **7.6.3 Resistência à degradação existente**

#### **7.6.3.1** A resistência à degradação existente deve ser quantificada como baixa, média ou alta.

#### **7.6.3.2** Na falta de outro critério, as seguintes definições podem ser aplicadas:

- a) baixa: a degradação conhecida ou previsível e sua taxa na zona sob consideração são tais que a falha do vaso (se medidas mitigadoras não forem tomadas) pode razoavelmente ocorrer dentro da vida estimada para este;
- b) média: a degradação conhecida ou previsível e sua taxa na zona sob consideração são tais que os defeitos no vaso podem ser observados dentro da vida estimada para ele, mas não comprometem a sua integridade ou requerem medidas corretivas;
- c) alta: não há degradação esperada ou o grau de degradação é superficial.

### **7.6.4 Consequências da falha**

#### **7.6.4.1** A determinação da consequência da falha deve considerar separadamente as consequências na saúde, segurança e no meio ambiente, das de cunho financeiro e no negócio. A graduação deve ser feita considerando a consequência mais crítica.

**7.6.4.2** A consequência de falha do vaso deve ser considerada para determinar se o nível de inspeção é conveniente para cada zona. Dois vasos com projeto e regime operacional similares podem sofrer processo de degradação similar; entretanto, se uma situação de falha de um dos vasos resultar na interrupção da operação da planta por um extenso período para que o reparo seja providenciado, enquanto que para o outro a falha praticamente não provoca a interrupção da produção, fica claro que a inspeção do primeiro vaso deve ser mais rigorosa que a do segundo.

**7.6.4.3** A graduação das consequências é determinada como parte da metodologia de definição dos riscos e é classificada como alta, média ou baixa para os propósitos desta Norma.

**7.6.4.4** Os seguintes critérios devem ser utilizados para definir a graduação das consequências na saúde, segurança e no meio ambiente:

- a) alta: ocorrência de fatalidades ou graves sequelas requerendo tratamento hospitalar, ou grande vazamento de material perigoso ou poluente;
- b) média: ocorrência de sequelas que requerem tratamento hospitalar, ou vazamento de material perigoso ou poluente, mas sem consequências maiores para o local do acidente;
- c) baixa: ocorrência de danos pessoais menores com recuperação total, ou vazamento mínimo de produtos perigosos ou poluentes.

**7.6.4.5** Na ausência de outro critério, as seguintes definições se aplicam para a graduação das consequências devidas à interrupção do negócio e de cunho financeiras:

- a) alta: interrupção por longo período de tempo das atividades ou com altos custos de reparo ou reposição;

## ABNT NBR 16455:2016

- b) média: vários dias de interrupção das atividades ou custos de reparo ou reposição significantes;
- c) baixa: menos que um dia de interrupção das atividades na planta ou custos baixos de reparo ou reposição.

### 7.7 Efetividade requerida para a inspeção

A efetividade de inspeção requerida para a zona sob análise é definida como uma medida qualitativa da probabilidade de detecção dos defeitos (POD), tendo em conta a cobertura do método de inspeção. Para efeitos desta Norma, é assumida uma distribuição uniforme de defeitos, ou seja, a efetividade da inspeção é função da POD e da cobertura do método de inspeção.

A efetividade da inspeção requerida deve ser classificada em categorias como alta, média ou baixa. A definição da categoria deve ser feita tomando como referência a efetividade obtida pela inspeção visual.

**NOTA 1** Alta efetividade significa uma maior efetividade do que a inspeção visual, a média é similar à da inspeção visual e a baixa é menor do que a da inspeção visual.

Essas categorias são definidas a seguir:

- a) baixa: a inspeção é realizada em um número discreto de localizações ao longo da zona [verificações pontuais (*spot checks*)];

**NOTA 2** Por exemplo, medições de espessura por ultrassom manual, em distâncias de 500 mm, são mais apropriadas para monitorar a perda de espessura generalizada da parede do que para processos de corrosão ou erosão mais localizados, onde espaçamentos menores são recomendáveis.

- b) média: inspeção em 100 % da área planejada empregando um método que apresente eficiência média (>70 % de probabilidade de detecção), ou inspeção por amostragem utilizando um método com maior eficiência (> 90 % de probabilidade de detecção);
- c) alta: inspeção em 100 % da área planejada empregando um método com alta eficiência, isto é, que apresenta uma probabilidade de detecção maior do que 90 % para a degradação ou falha do objeto da inspeção.

A área de interesse da zona inspecionada deve ser suficiente para permitir uma extraçãoção confiável dos resultados para as partes não inspecionadas dessa zona.

Os requisitos de inspeção para uma zona devem ser aumentados se falhas ou degradações forem detectadas durante a sua execução.

### 7.8 Cobertura

A cobertura da inspeção está diretamente relacionada com a confiança em um determinado END para apontar os tipos e as localizações das degradações previstas com a confiabilidade determinada na Figura 3.

Uma alta confiança no método de END justifica uma cobertura parcial. Uma confiança média implica em cobertura parcial ampliada, incluindo uma cobertura exploratória. Uma baixa confiança requer uma cobertura global.

As categorias de cobertura de inspeção estão definidas a seguir:

- a) parcial: a inspeção deve estar restrita aos locais onde uma degradação potencial for prevista;

- b) parcial ampliada mais exploratória: devem ser inspecionados os locais onde uma degradação potencial for prevista; adicionalmente, outras áreas onde não seja previsível a presença de defeitos também podem ser inspecionadas;
- c) global: toda a área ou componente do vaso sob observação deve ser inspecionada.

A área inspecionada deve ser suficiente para permitir o embasamento para uma extrapolação das considerações obtidas para as demais áreas da zona analisada. Isto vai depender do tipo de degradação estimado. Onde a perda de espessura estimada for generalizada, são suficientes medições de espessura pontuais para rapidamente avaliar o estado dessa zona. Entretanto, quando se espera redução de espessura localizada, uma varredura mais apurada é necessária para garantir o mesmo grau de confiabilidade.

## 7.9 Seleção do método e técnicas de END

### 7.9.1 Capacidade de detecção do método e técnicas de END

O propósito do planejamento da inspeção é garantir que os métodos e técnicas apropriados sejam empregados no contexto correto (localização do defeito, tipo de degradação, e extensão prevista para o dano), de forma a garantir a integridade do equipamento entre inspeções sucessivas. Uma descrição geral dos principais métodos de END disponíveis para INI de vasos de pressão e sua capacidade de detecção são apresentadas no Anexo A.

A natureza da degradação esperada para cada zona costuma variar, assim como a efetividade requerida para a inspeção. É importante considerar a aplicação de um método e técnica de END específico para a zona considerada.

### 7.9.2 Fluxograma para seleção do método de END

#### 7.9.2.1 Introdução

Os fluxogramas mostrados nas Figuras 8 a 19 devem ser utilizados para selecionar o método de END mais adequado para uma dada aplicação.

A capacidade de cada método é classificada em comparação com a IVI, estando relacionada ao tipo de degradação. Para cada método de END mostrado nos fluxogramas, devem ser considerados os seguintes fatores:

- a) capacidade de detectar defeitos (POD);
- b) capacidade de quantificar os defeitos ou determinar a espessura de parede remanescente.

A capacidade de detectar defeitos deve ser classificada como alta, média ou baixa, conforme os requisitos a seguir:

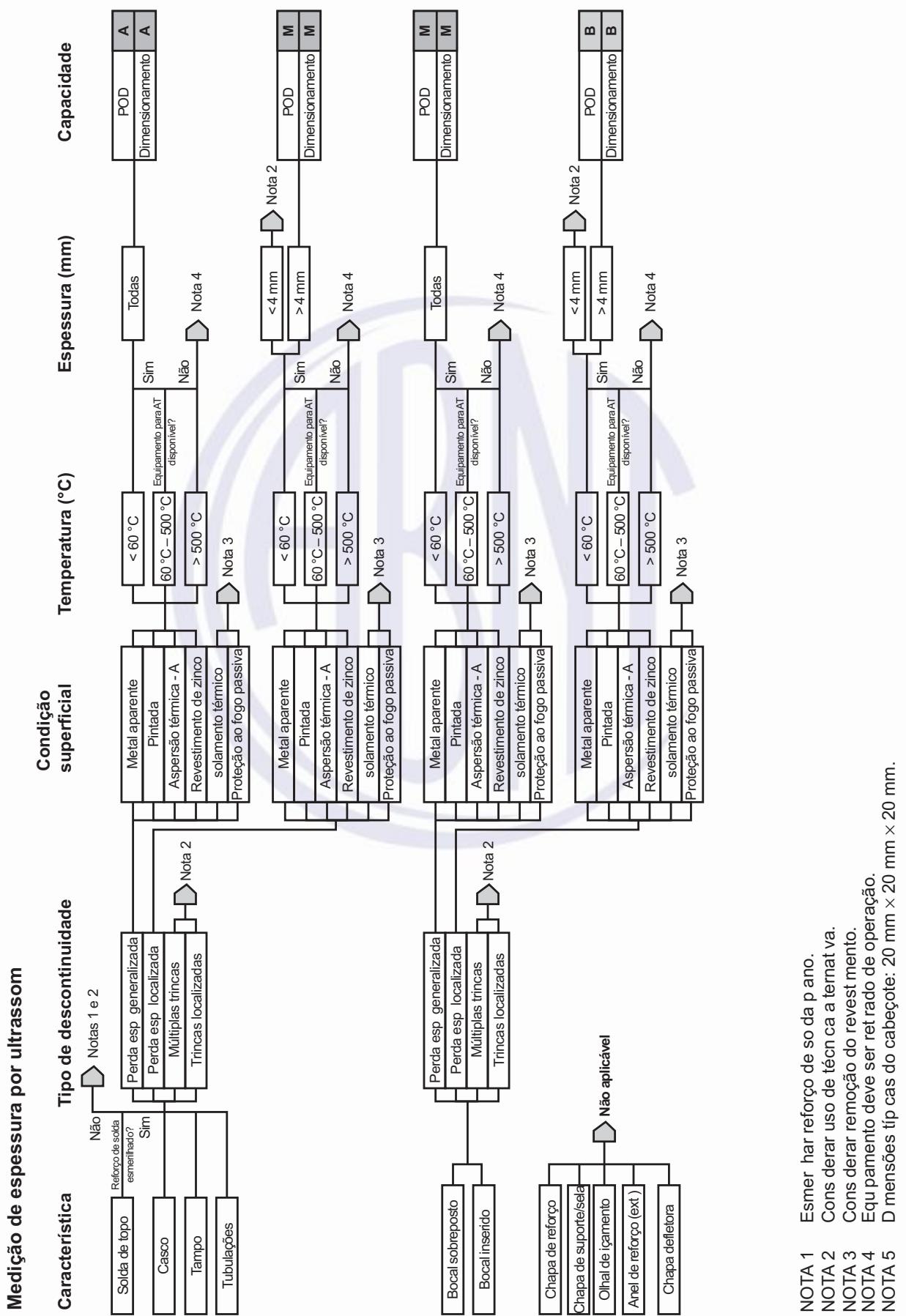
- a) alta: o método apresenta, na condição sobre consideração, uma maior probabilidade de detecção do tipo de defeito do que da inspeção visual interna;
- b) média: o método apresenta na condição sobre consideração, uma probabilidade de detecção bastante similar ao da inspeção visual interna;
- c) baixa: o método apresenta, na condição sobre consideração, uma menor probabilidade de detecção do defeito do que a da inspeção visual interna.

## ABNT NBR 16455:2016

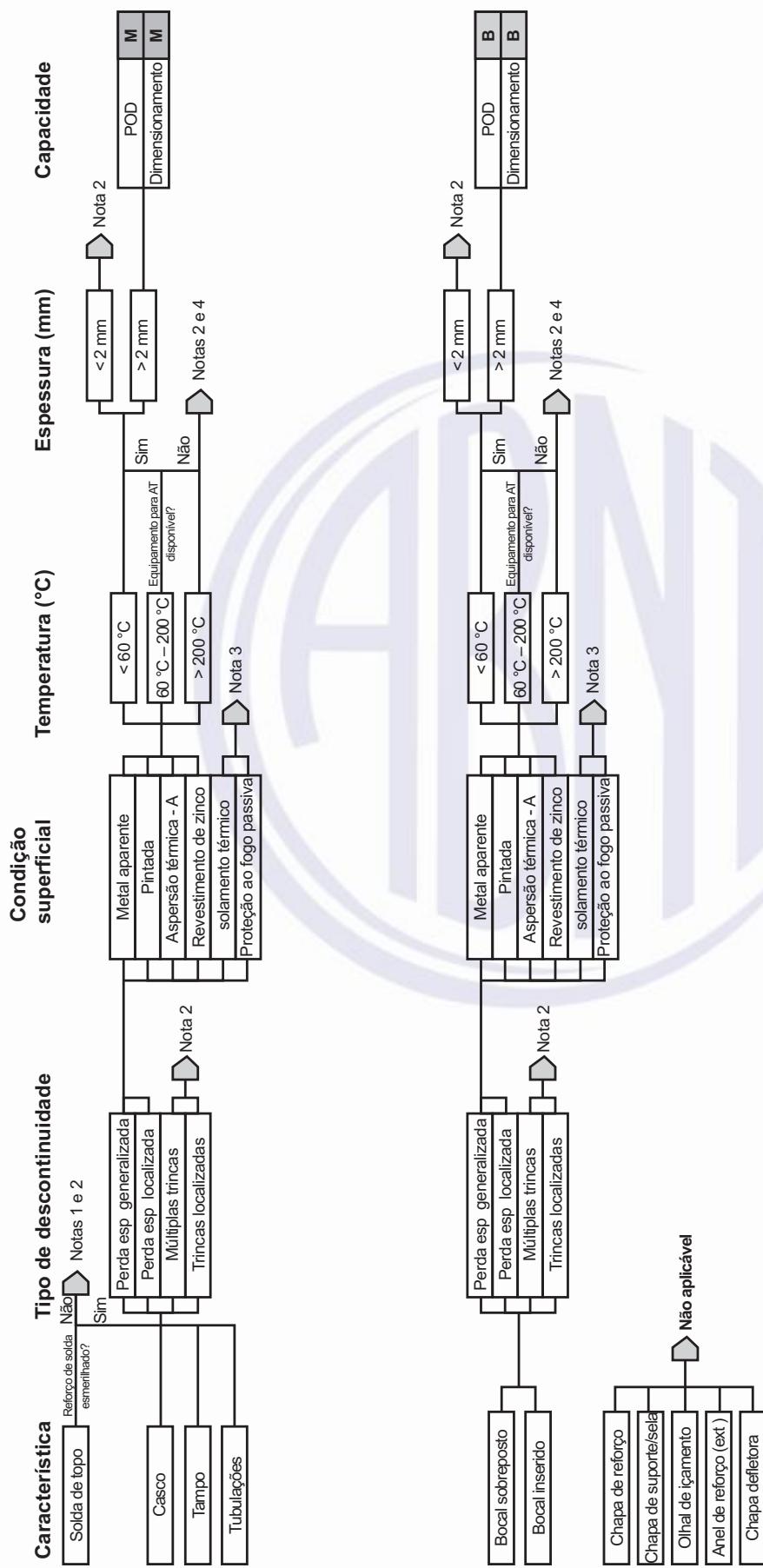
A capacidade de quantificar os defeitos ou determinar a espessura remanescente deve ser classificada conforme os requisitos a seguir:

- a) alta: o método e técnica é capaz de prover uma informação precisa com respeito à dimensão do defeito ou espessura remanescente da parede;
- b) média: o método e técnica é capaz de fornecer algo como uma informação semiquantitativa ou comparativa do tamanho do defeito ou da perda de parede;
- c) baixa: o método e técnica é capaz de fornecer apenas uma informação limitada, geralmente apenas qualitativa, com relação à dimensão do defeito ou espessura remanescente.



**Figura 7 – Fluxograma de medição de espessura por ultrassom**

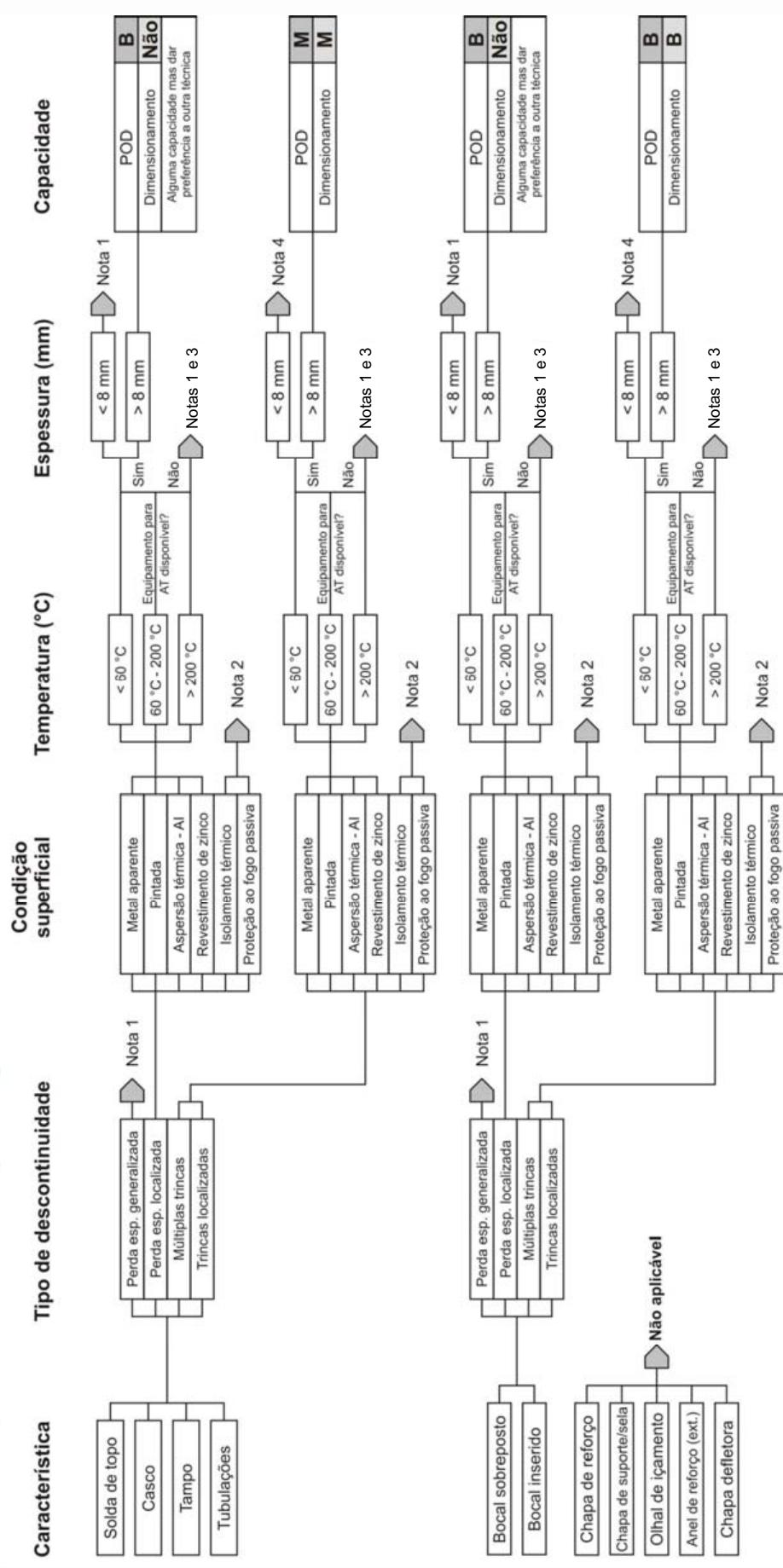
Mapeamento de corrosão por ultrassom manual



**NOTA 1** Esmer har reforço de so da pano.  
**NOTA 2** Cons derar uso de técn ca a terrat va.  
**NOTA 3** Cons derar remoção do revestimento.  
**NOTA 4** Equipamento deve ser retrado de operação.  
**NOTA 5** D mensões tip cas do equipamento:  
- Escaner mecanico: 300 mm x 300 mm x 50 mm;  
- Cabecote e nd cador de pos cão: 20 mm x 20 mm x 20 mm e 100 mm x 100 mm x 100 mm

**Figura 8 – Fluxograma para mapeamento de corrosão por ultrassom manual**

## Ultrassom pulso-eco com cabeçote angular



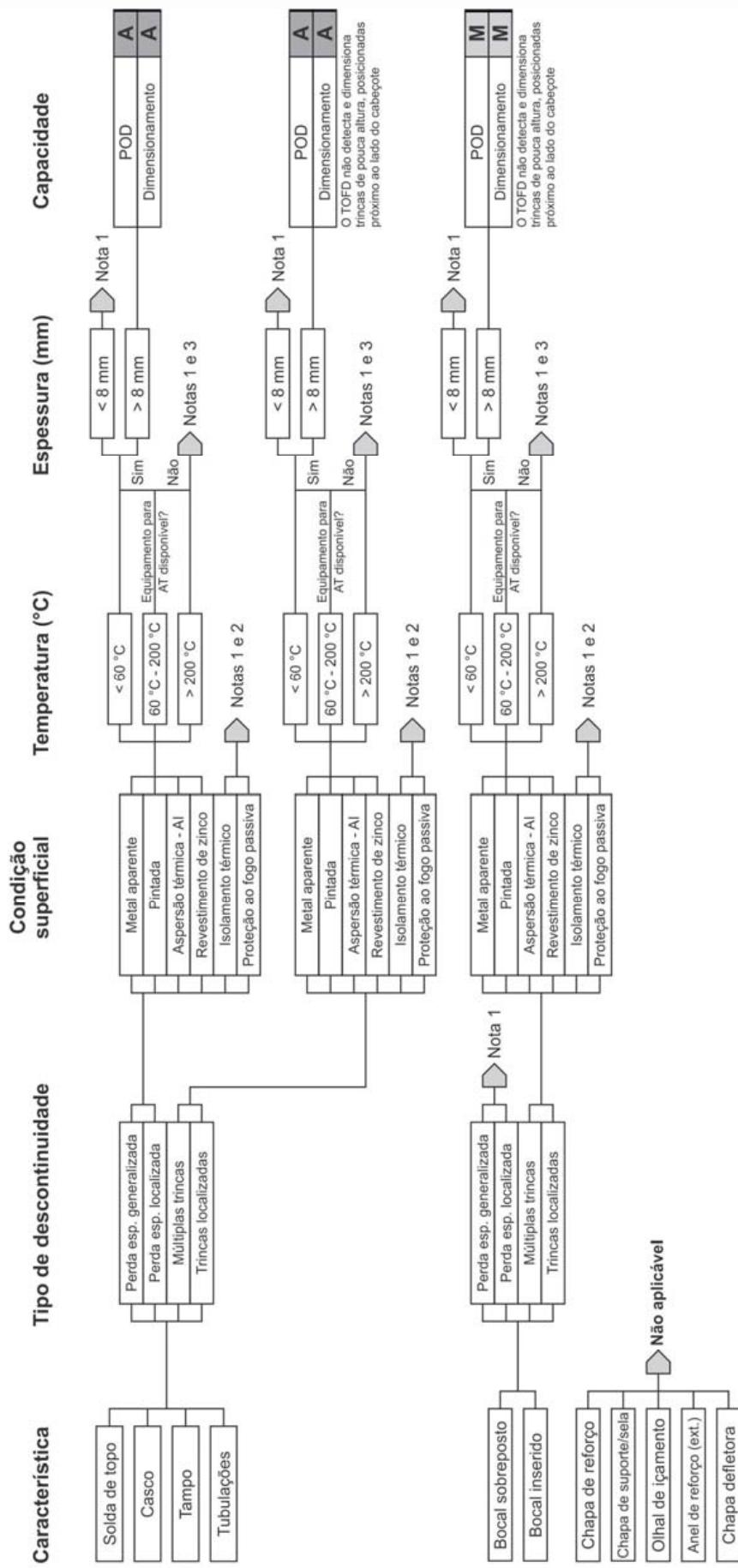
- NOTA 1 Considerar uso de técnica alternativa.  
 NOTA 2 Considerar remoção do revestimento.  
 NOTA 3 Considerar que o equipamento deve ser retirado de operação.  
 NOTA 4 Considerar realização de inspeção interna.  
 NOTA 5 Dimensões típicas do cabeçote: 20 mm x 20 mm x 20 mm.

**Figura 9 – Fluxograma para ultrassom pulso-eco com cabeçote angular**

## ABNT NBR 16455:2016

## TOFD - Time of Flight Diffraction

38



- NOTA 1 Considerar uso de técnica alternativa.  
 NOTA 2 Considerar remoção do revestimento.  
 NOTA 3 Considerar parada de produção para inspecionar.  
 NOTA 4 A técnica TOFD necessita que dois cabeçotes sejam posicionados em cada lado do volume a inspecionar. A separação depende da espessura. Tamanho típico do cabeçote: 20 mm x 20 mm x 50 mm (altura).

Figura 10 – Fluxograma para TOFD

## Ultrassom a média distância (LORUS)

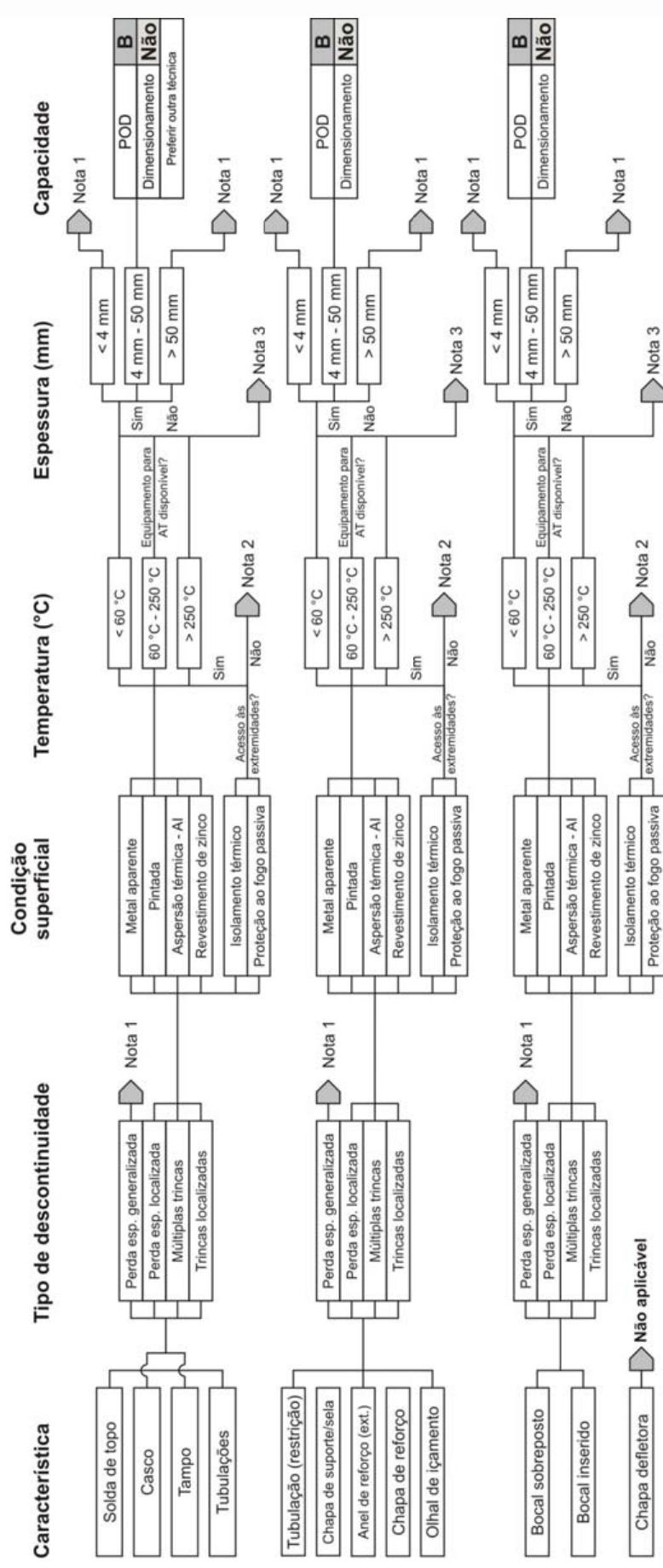
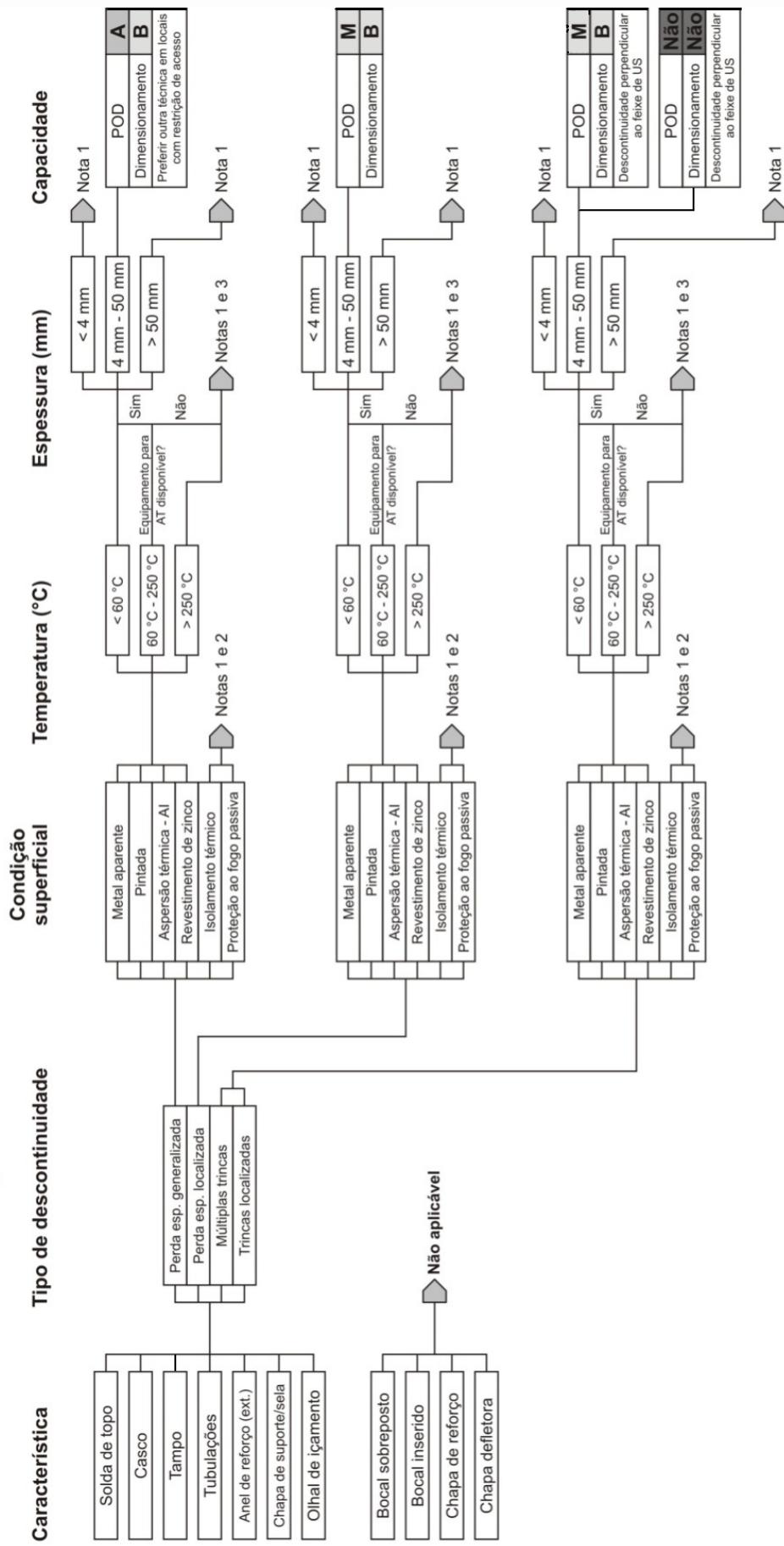


Figura 11 – Fluxograma para LORUS

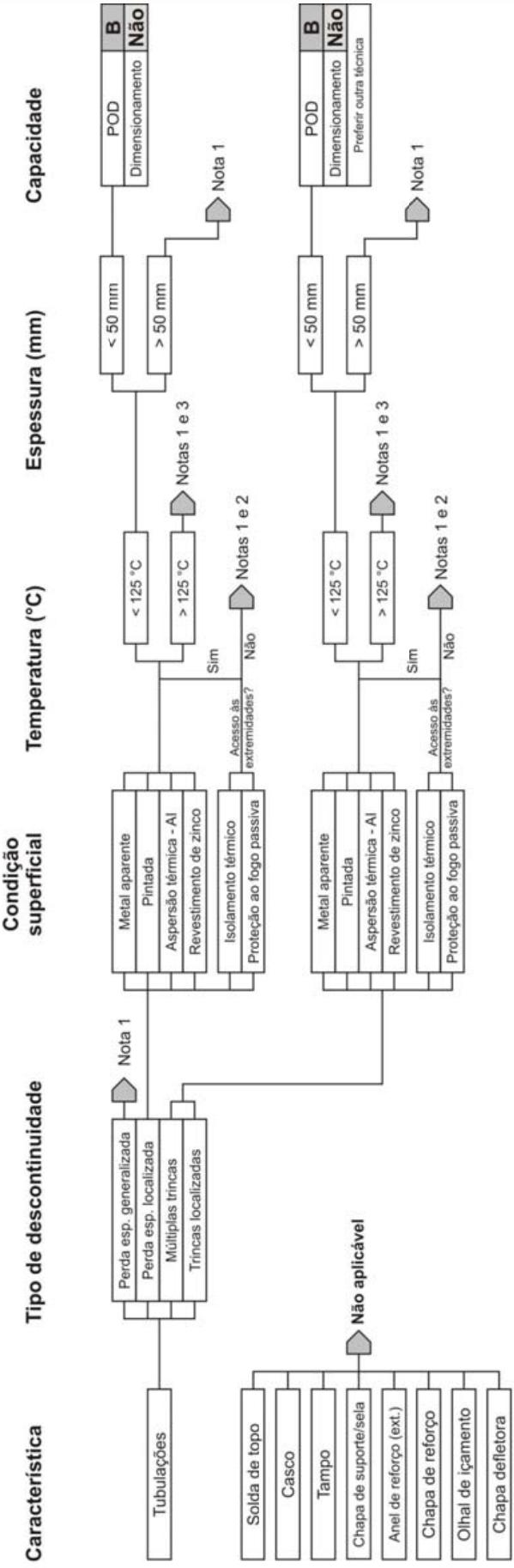
## ABNT NBR 16455:2016

**Ultrassom a média distância (CHIME)**

- NOTA 1 Considerar uso de técnica alternativa.  
 NOTA 2 Considerar remoção do revestimento.  
 NOTA 3 Considerar retirada de equipamento de operação para inspeção.  
 NOTA 4 Tamanho típico da sonda: 25 mm x 100 mm x 100 mm.  
 NOTA 5 A técnica CHIME requer pelos menos dois cabeçotes afastados de até 1 m.

**Figura 12 – Fluxograma para CHIME**

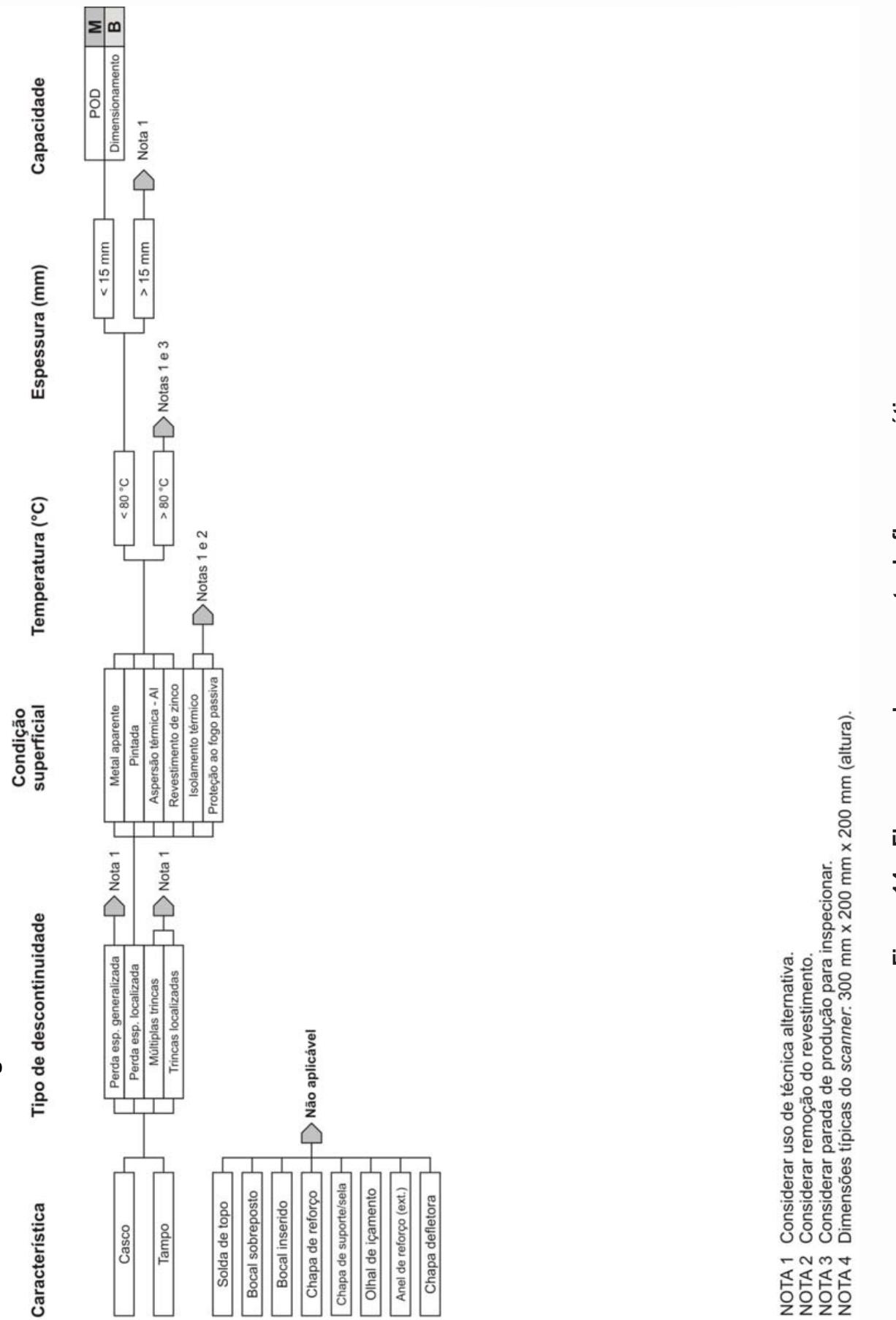
## Ultrassom a longa distância - Ondas guiadas (LRUT - Guided Wave)



- NOTA 1 Considerar uso de técnica alternativa.  
 NOTA 2 Considerar remoção do revestimento.  
 NOTA 3 Considerar que equipamento deve ser retirado de operação.  
 NOTA 4 De modo geral, requer um anel com cãebçote 500 mm de comprimento e 50 mm de altura.

**Figura 13 – Fluxograma para ultrassom a longa distância – Ondas guiadas**

## ABNT NBR 16455:2016

**Vazamento de fluxo magnético****Figura 14 – Fluxograma de vazamento de fluxo magnético**

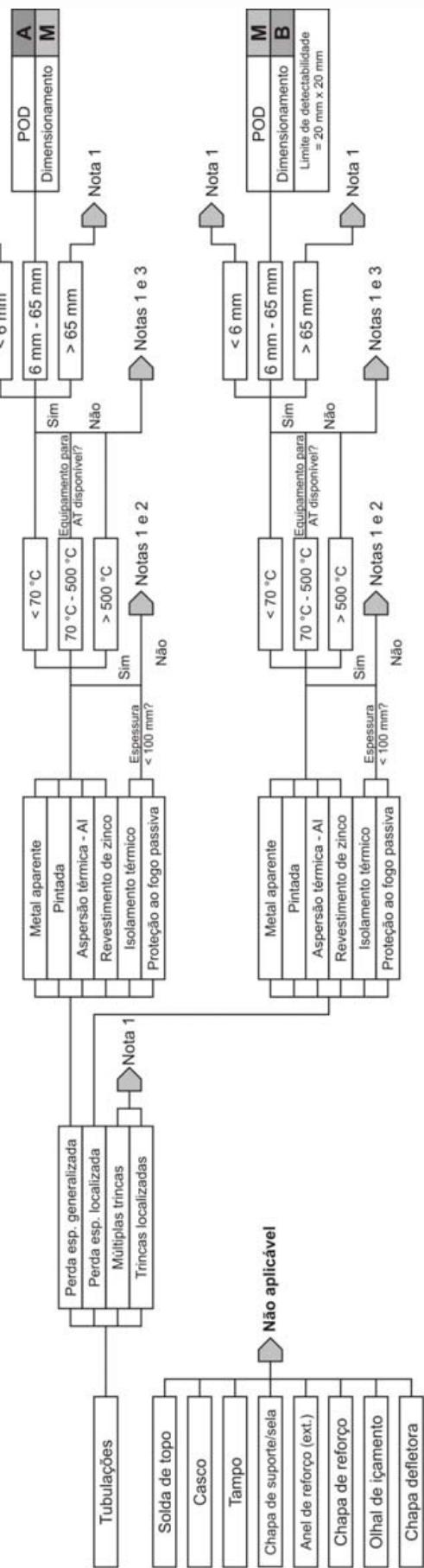
## Correntes parasitas pulsadas (PEC - Pulsed Eddy Current)

### Característica

#### Condição superficial

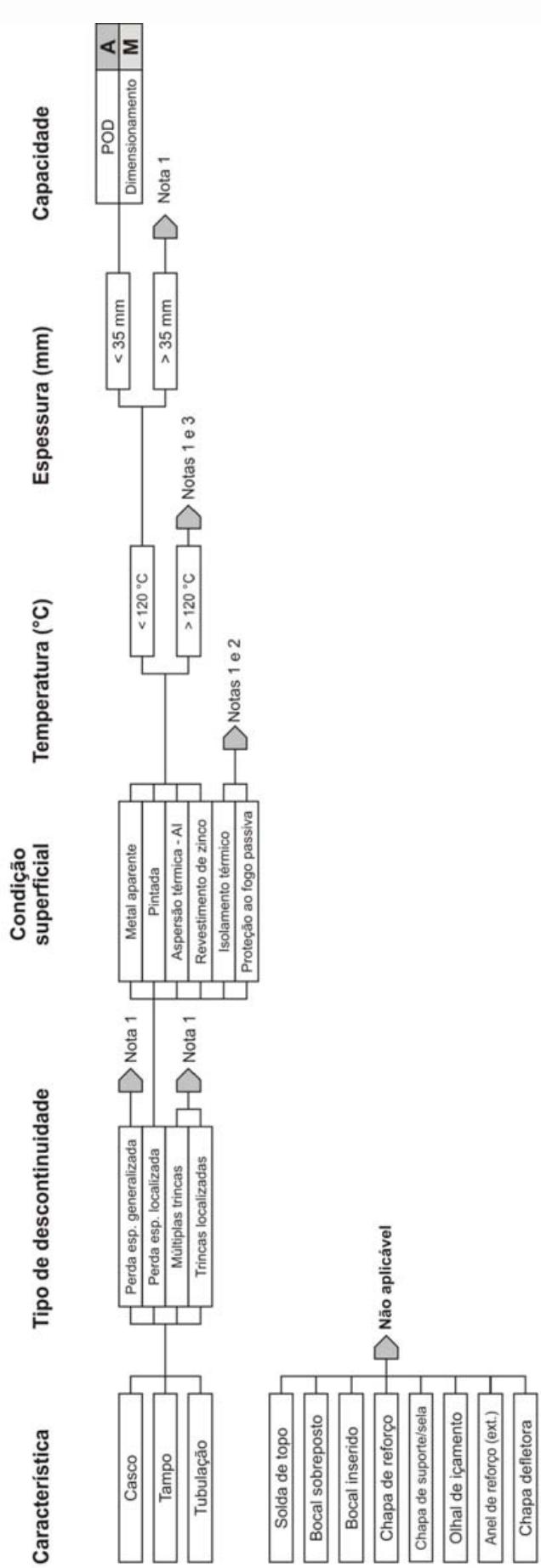
#### Espessura (mm)

#### Capacidade



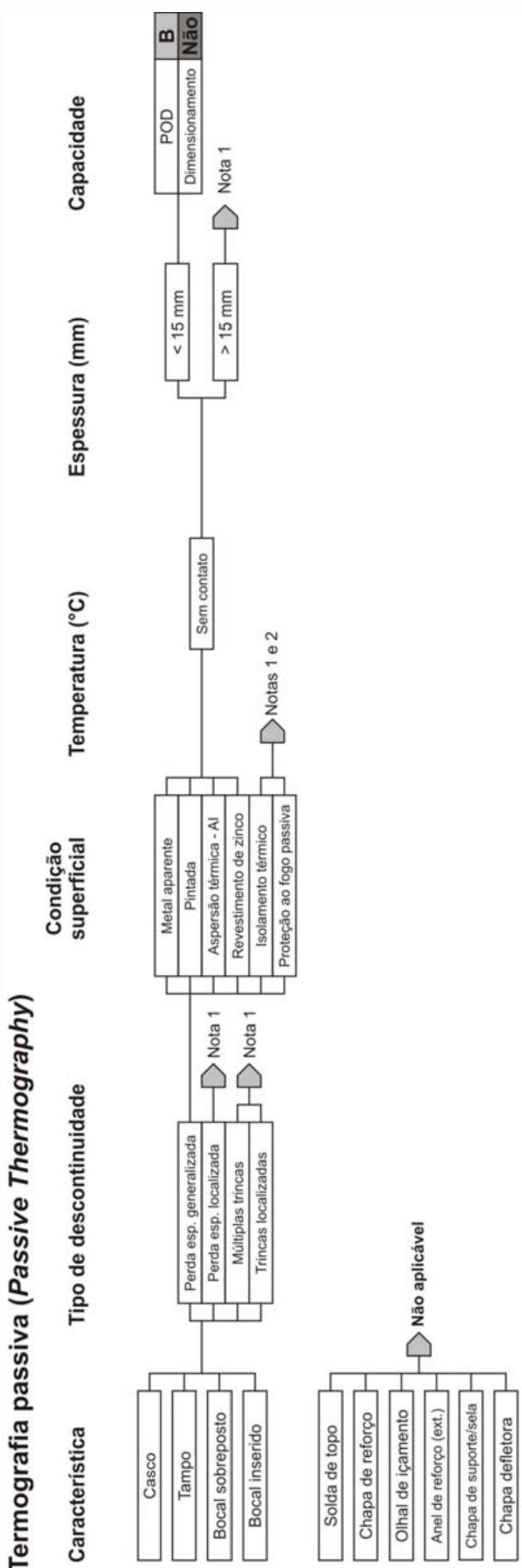
**Figura 15 – Fluxograma para correntes parasitas pulsadas**

## Correntes parasitas de baixa frequência com saturação magnética (SLOFEC - Saturation Low Frequency Eddy Current)



- NOTA 1 Considerar uso de técnica alternativa.  
 NOTA 2 Considerar remoção do revestimento.  
 NOTA 3 Considerar parada de produção para inspecionar.  
 NOTA 4 Escanear com múltiplos sensores, com dimensão típica de 150 mm x 150 mm x 200 mm.

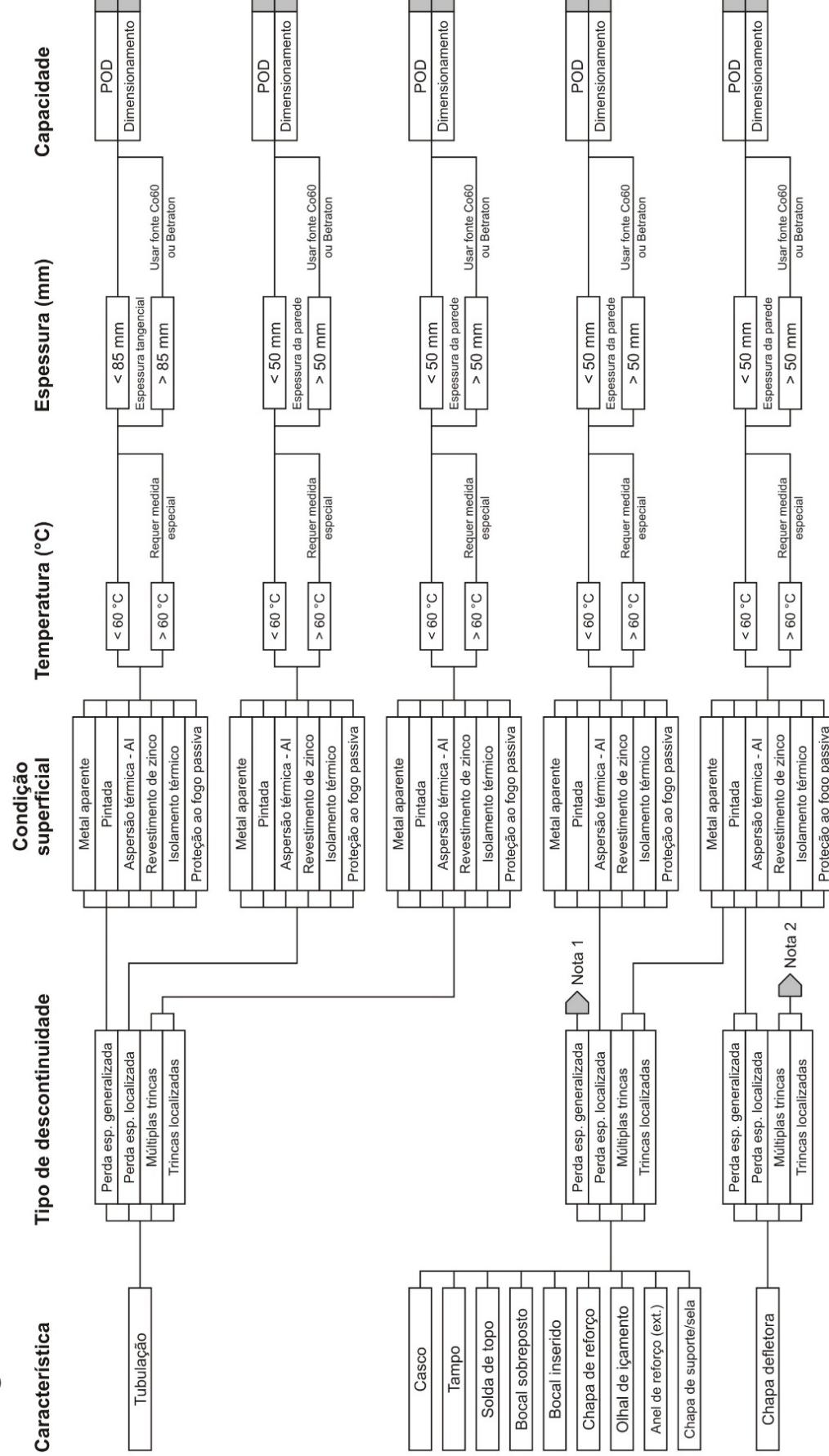
**Figura 16 – Fluxograma para SLOFEC**



- NOTA 1** Considerar uso de técnica alternativa.
- NOTA 2** Considerar remoção do revestimento.
- NOTA 3** Para uso como técnica INI requer transiente do processo.
- NOTA 4** Geralmente usada para monitorar efetividade de isolamento térmico.

Figura 17 – Fluxograma para termografia passiva

## ABNT NBR 16455:2016

**Radiografia convencional**

NOTA 1 Considerar ultrassom, medição de espessura ou técnica pulso-eco.

NOTA 2 Considerar inspeção visual interna.

NOTA 3 Requer acesso a ambos os lados do equipamento.

NOTA 4 Tipicamente requer fonte com 100 mm x 100 mm e 250 mm de altura.

NOTA 5 A radiografia não é geralmente usada para INI de vasos devido ao grande tempo de exposição necessário.

**Figura 18 – Fluxograma para radiografia convencional**

### 7.9.2.2 Critério de seleção

Ao selecionar um método e técnica apropriados para uma aplicação específica, deve-se assegurar que a capacidade do método [POD (probabilidade de detecção) / dimensionamento] é compatível com a efetividade mínima requerida para a inspeção, conforme indicado no fluxograma da Figura 6.

De forma a selecionar o método que atinja o nível de efetividade mínimo requerido, deve-se consultar cada um dos fluxogramas mostrados nas Figuras de 8 a 19, considerando cada fator, sequencialmente, na seguinte ordem:

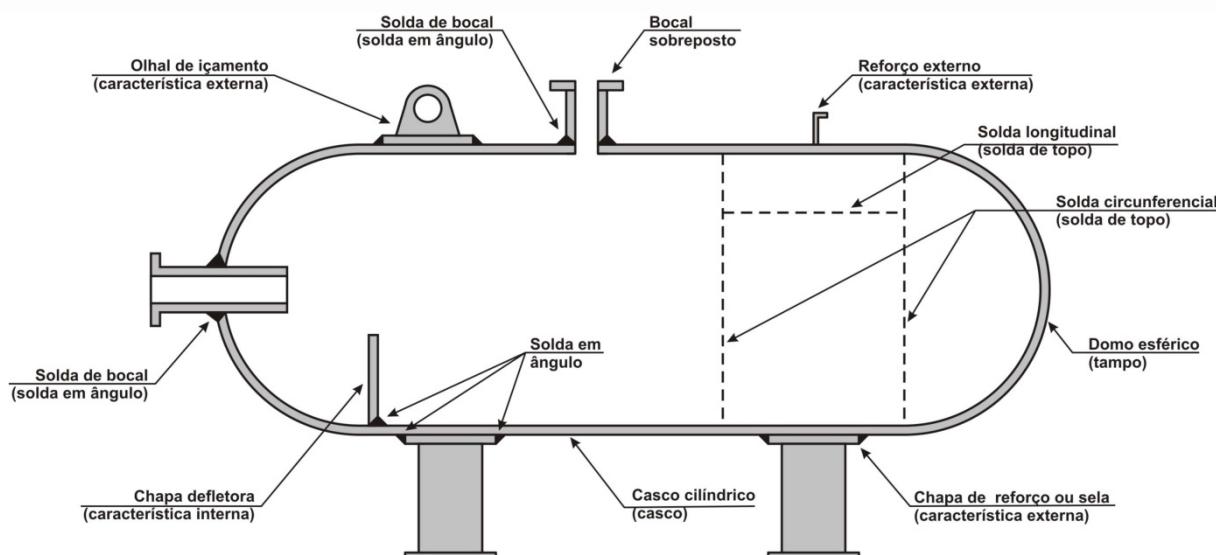
- 1) componente do vaso;
- 2) tipo de descontinuidade;
- 3) condição superficial;
- 4) temperatura;
- 5) espessura;
- 6) acesso.

#### 7.9.2.2.1 Componentes do vaso

Os componentes considerados para a seleção de um método de END, pelos fluxogramas mostrados nas Figuras de 8 a 19, estão limitados àqueles incluídos no esquema de vaso de pressão mostrado na Figura 7:

- a) soldas de topo circunferenciais e longitudinais;
- b) casco cilíndrico e tampo esférico;
- c) bocais sobrepostos ou inseridos;
- d) chapa de reforço de bocais (não mostrado na Figura 7);
- e) chapa de suporte da sela (externa);
- f) chapa deflectora (interna);
- g) olhal de içamento (externo);
- h) reforço externo.

Vários componentes são externos ao vaso (chapa de reforço, chapa suporte da sela, olhal de içamento e reforço externo). O método de END indicado para estes componentes deve ser aquele apto a avaliar as condições do interior do vaso nas proximidades destes componentes.



**Figura 19 – Projeto da estrutura básica de um vaso de pressão**

#### 7.9.2.2.2 Tipo de descontinuidade

Os seguintes tipos de descontinuidades devem ser consideradas para a seleção do método e técnica de END:

- perda generalizada da espessura de parede (corrosão/erosão generalizada);
- corrosão/erosão localizada (corrosão alveolar);
- trincamento múltiplo (trincas de corrosão sob tensão);
- trinca isolada (trincas de fadiga em soldas).

#### 7.9.2.2.3 Revestimento da superfície interna

Os possíveis revestimentos internos que devem ser utilizados para a seleção de um método de END pelos fluxogramas mostrados nas Figuras de 8 a 19 estão limitadas aos seguintes:

- metal-base;
- pintura;
- revestimento de alumínio aplicado termicamente ou a chama;
- zinco;
- isolante térmico;
- proteção contra fogo passiva.

Para superfícies sem revestimento (metal-base), deve-se assumir em todos os casos, exceto quando se estiver considerando a exclusão de fluxo magnético, que a superfície exposta é suficientemente suave e contínua para uma adequada transmissão ultrassônica por meio de cabeçotes convencionais.

Em superfícies pintadas, deve-se considerar, exceto para exclusão de fluxo magnético, que a espessura da película de tinta é menor do que 2 mm e que está em boas condições (suficientemente suave e contínua), de forma que seja possível uma adequada transmissão ultrassônica empregando cabeçotes convencionais.

**NOTA** As superfícies sem revestimento (metal-base) sempre requerem em ambiente corrosivo alguma limpeza antes de estarem prontas para inspeção ultrassônica.

#### **7.9.2.2.4 Temperatura**

A temperatura a ser utilizada para a seleção de um método de END pelos fluxogramas mostrados nas Figuras de 8 a 19 é a temperatura externa do componente do vaso sob inspeção.

NOTA Esta também é a temperatura a qual o equipamento de END está exposto durante o ensaio.

#### **7.9.2.2.5 Espessura**

A espessura a ser utilizada para a seleção de um método de END pelos fluxogramas mostrados nas Figuras de 8 a 19 é a espessura característica do vaso ou do componente do vaso a ser inspecionado.

#### **7.9.2.2.6 Acesso**

O requisito de acesso é especificado como sendo o comprimento mínimo requerido (dimensão paralela à superfície sobre inspeção) versus a altura mínima requerida (dimensão perpendicular à inspeção sendo inspecionada).

### **7.9.3 Critério de seleção do método de inspeção**

**7.9.3.1** Devem-se utilizar os fluxogramas mostrados nas Figuras de 8 a 19 até que se encontre um método de END que tenha uma efetividade maior ou igual à efetividade requerida definida em 7.7.

**7.9.3.2** Adicionalmente a 7.9.3.1, deve-se considerar a compatibilidade com inspeções realizadas previamente.

**7.9.3.3** A ordem na qual os fluxogramas são consultados ou se todos eles devem ser consultados em todas as ocasiões não é definido por esta Norma.

NOTA 1 A necessidade de acompanhar a progressão de qualquer degradação torna indispensável à comparação dos resultados da inspeção corrente com os resultados das inspeções anteriores (se houverem).

NOTA 2 O uso de diferentes métodos de END pode dificultar a comparação dos resultados (particularmente quando se está mudando de inspeção invasiva para não invasiva). Os impactos destas mudanças podem ser minimizados com os devidos cuidados de especificar o critério de registro e o formato de apresentação dos resultados.

NOTA 3 Os fluxogramas refletem a efetividade típica do método descrito e não consideram melhorias no desempenho decorrentes do uso de equipamentos especiais, ou diferentes do padrão, ou pela aplicação de técnicas avançadas não convencionais.

NOTA 4 Em situações nas quais a capacidade do método de END é comprometida por fatores não considerados no fluxograma como orientação não esperada dos defeitos, mascaramento por outros etc., os resultados dos fluxogramas servem apenas como referência.

**7.9.3.4** Não sendo possível definir um método que alcance o requisito mínimo, deve-se avaliar o risco de não inspecionar, ou analisar as implicações de utilizar um método de END com efetividade reduzida para o mecanismo de dano presente no vaso (ver Figura 2). A justificativa de que o risco é aceitável deve ser consistente e o processo de revisão deve ser plenamente documentado, devendo considerar no mínimo:

- a) a probabilidade dos defeitos com potencial para causar a falha da característica (componente) em consideração;
- b) os resultados de inspeções prévias realizadas na característica em consideração;

## ABNT NBR 16455:2016

- c) o tipo e a extensão da inspeção realizada em outras regiões onde a degradação possa ser considerada similar àquela da característica do vaso;
- d) as consequências potenciais dos modos de falha associados com os tipos de descontinuidades esperadas na característica do vaso em consideração.

**7.9.3.5** Se for possível identificar um método de END que satisfaça o critério de eficiência, deve-se verificar se este tem a capacidade de dimensionar qualquer defeito encontrado durante a inspeção.

**NOTA** Esse aspecto não afeta a decisão de realizar ou não a INI, mas permite a identificação prévia do procedimento a ser adotado caso defeitos sejam encontrados.

**7.9.3.6** O processo de seleção do método deve ser repetido para cada tipo de degradação, inicialmente para a zona em consideração, e depois para as demais, até que o plano de inspeção seja estabelecido para o equipamento completo.

**NOTA** A efetividade da inspeção anterior, de acordo com o fluxograma de decisão de alto nível mostrado na Figura 3, tem uma influência direta nos requisitos da INI que está sendo planejada, e pode determinar se esta é recomendada para o caso em consideração. No planejamento para a presente inspeção, devem-se considerar as implicações potenciais da provável efetividade a ser alcançada vir a influenciar nos requisitos para inspeções futuras.

### 7.9.4 Métodos estatísticos

Em alguns casos, o processo de planejamento da inspeção deve considerar o estabelecimento dos riscos e as probabilidades de falha de uma forma mais quantitativa, além do impacto da inspeção na mitigação desses riscos. Em particular, em algumas indústrias, há o requisito de demonstrar que a exposição ao risco permanece abaixo de um valor de referência estabelecido, tipicamente quantificado em unidades de probabilidade, por exemplo, número de falhas a cada dez anos. Nesses casos é necessário considerar a probabilidade estatística de que a inspeção executada pode encontrar qualquer degradação presente, e que a mais significativa precisa ser detectada e dimensionada. A inspeção pode apenas reduzir a probabilidade da falha, não a sua consequência. Para um vaso onde a consequência da falha é alta, a inspeção tem a missão de manter a sua probabilidade de ocorrência em níveis baixos. Se a probabilidade de falha prevista (sem inspeção) for alta, então deve haver uma alta confiabilidade na capacidade e efetividade do método de END para detectar (e corretamente classificar) defeitos ou degradações prejudiciais à integridade do vaso.

**NOTA** Orientações quanto ao uso de métodos estatísticos para planejar a atividade e avaliar os resultados da inspeção são apresentadas no Anexo B.

## 7.10 Preparação da documentação da inspeção

**7.10.1** A documentação completa do planejamento da inspeção é um pacote completo, na forma de papel ou mídia magnética, contendo toda a documentação necessária para realizar a inspeção.

**7.10.2** A documentação completa do planejamento da inspeção deve ser preparada por um Órgão de Inspeção, próprio ou terceirizado, que tenha a responsabilidade de gerenciar o desempenho da inspeção, em conjunto com o dono da planta, previamente à realização da inspeção.

**7.10.3** A documentação completa do planejamento da inspeção deve ser baseada nos requisitos do plano de inspeção do vaso de pressão (responsável por definir a estratégia geral da inspeção, ver 7.3). O Órgão de Inspeção deve rever o plano e compilar (como parte da documentação do plano de inspeção) todos os documentos requeridos.

**7.10.4** O conteúdo da documentação completa do planejamento da inspeção deve incluir:

- a) perfil do equipamento: contendo os detalhes do projeto do equipamento, de sua operação, e o histórico de inspeções anteriores, como descrito em 5.2, incluindo:
  - identificação e projeto;
  - tipo de vaso e função;
  - operação e detalhes de serviço;
  - desenhos detalhados do vaso;
  - modificações e reparos;
  - resultados de inspeções prévias;
  - experiência geral;
  - informações complementares;
  - acessibilidade;
  - limitações de segurança;
  - mecanismos de degradação esperados;
  - taxas e extensão da degradação já existente;
- b) registro da decisão de se usar a INI: contendo detalhes da decisão confirmando se a INI é apropriada para o equipamento (ver 6.4) incluindo:
  - descrição de qualquer mudança ocorrida no processo que possa afetar a natureza e a taxa da degradação;
  - relatórios de inspeção (se não inclusos no perfil do equipamento);
  - justificativa de aceitação do critério de varredura;
  - lista de vasos considerados semelhantes àquele sob consideração e justificativa de que o processo de degradação esperado seja o mesmo;
  - justificativa da seleção da categoria por:
    - confiança na capacidade de prever tipos e localizações das degradações
    - efetividade de inspeções prévias;
    - severidade e taxa da degradação;
- c) plano de inspeção, contendo as seguintes informações:
  - detalhes da estratégia de inspeção e objetivos, incluindo o processo de decisão associado;
  - sistema de referência de coordenadas e zeros;

**ABNT NBR 16455:2016**

- lista completa das zonas dos equipamentos consideradas e seus tipos de descontinuidades associadas, com justificativa para cada componente não considerado para inspeção;
- efetividade da inspeção, incluindo o processo de decisão associado;
- procedimentos e planilhas de resultados para cada método de END, contendo:
  - procedimentos de inspeção escritos ou aprovados por um profissional certificado em END;
  - detalhes das normas e padrões empregados e extensão da preparação da superfície;
  - especificação da temperatura na qual o END deve ser realizado, junto com as condições operacionais (se a planta estiver em operação);
- cobertura requerida para o END;
- critério de aceitação e de registro bem como formato, contendo:
  - limites bem definidos ou dimensões acima das quais indicações (interpretadas como defeitos) serão reportadas;
  - definição dos critérios de avaliação, sempre que possível;
  - o critério de registro e o formato devem ser especificados em detalhes; o formato deve facilitar a repetitividade da inspeção por END e facilitar a comparação entre resultados de inspeções passadas, presentes e futuras;
  - critério de registro das descontinuidades;

**NOTA** Quando não for possível definir um nível de registro (como mapa de corrosão, medição de espessuras), é recomendado que se defina qualquer condição de interesse particular (por exemplo, evidência de perda de espessura).

- d) declaração da escolha do método: documento que registra a escolha do método, summarizando a estratégia de inspeção, informando qualquer área onde o planejamento não foi possível e descrevendo ou justificando ações remediadoras; é recomendado também que sejam incluídos os seguintes registros:
  - requisitos de treinamento, qualificação e certificação para o pessoal de END;
  - nomes dos componentes do grupo de inspetores de END (cópias dos certificados);
  - registros de qualquer trabalho de preparação para a inspeção e requisitos de treinamento e qualificação onde é previsto o uso de métodos de END especializados, não cobertos pelos esquemas padronizados de certificação;
- e) programa de inspeção: um esboço do programa de inspeção deve ser incluído para permitir o planejamento detalhado dos recursos; também deve incluir avisos sobre quaisquer atividades paralelas que possam ter impacto sobre a programação ou o desempenho da inspeção.

A documentação completa do planejamento da inspeção deve ser formalmente emitida e tratada como um documento controlado. Documentos relevantes produzidos no curso da inspeção devem ser incorporados à documentação completa do planejamento da inspeção. Quando completada a inspeção, a documentação completa do planejamento da inspeção, incluindo, os resultados da inspeção e sua análise, tornam-se parte do registro de histórico do vaso.

## 7.11 Revisão do plano de inspeção

**7.11.1** O plano de inspeção, que faz parte do planejamento, forma a base para a maioria das atividades subsequentes, sendo importante que seja revisado antes de sua implementação. No mínimo o processo de revisão deve considerar o seguinte:

- a) se todos os defeitos identificados no processo de ARC foram considerados;
- b) se os locais com degradação potencial foram considerados ;
- c) se o plano de inspeção é consistente com os tipos de END identificados como aplicáveis;
- d) se o plano de inspeção é consistente com os resultados da(s) inspeção(ções) anterior(res);
- e) se o plano de inspeção inclui:
  - método e técnica de END;
  - cobertura;
  - procedimentos;
  - equipamentos;
  - resolução;
  - se existe algum contratempo em termos de acesso, remoção de isolamento, ou presença de restrições físicas;
  - requisitos de relatórios.

**7.11.2** O processo deve obrigatoricamente indicar qualquer zona onde a efetividade da inspeção foi reduzida para permitir a sua realização por metodologia não intrusiva. O impacto no risco de acidentes na planta e os intervalos de inspeção subsequentes devem ser considerados.

**7.11.3** O plano de inspeção deve estar disponível para o pessoal de apoio com a antecedência necessária para permitir a verificação de possíveis dificuldades de acesso às zonas de interesse.

**7.11.4** Todas as evidências relativas à qualificação do pessoal executante dos END, assim como os procedimentos utilizados, devem estar disponíveis em documentação auditável e rastreável.

**7.11.5** Registros detalhados do processo de revisão devem ser armazenados e incorporados na documentação completa do planejamento da inspeção.

## 8 Atividades de inspeção no campo

### 8.1 Preparação para a inspeção

#### 8.1.1 Responsabilidades individuais

A preparação da inspeção requer a contribuição de cada um dos seguintes membros da equipe de inspeção:

- a) gerente de inspeção (representante da direção): responsável por garantir que todas as partes envolvidas no processo estejam comprometidas e de posse de todas as informações relevantes;

## ABNT NBR 16455:2016

- b) supervisor de inspeção (o líder no campo do Grupo de END): deve ser o elo entre todas as partes envolvidas, garantindo uma boa comunicação; deve coordenar todas as tarefas do plano de inspeção e orientar o grupo de inspeção sobre estas. O supervisor de inspeção deve ser qualificado pelo menos como nível 2 de acordo com a ABNT NBR NM ISO 9712, ou equivalente, nos métodos de END que forem empregados durante a inspeção. Quando os métodos empregados não possuírem esquema normalizado de qualificação, o supervisor de inspeção deve ter experiência comprovada no uso desses métodos;
- c) outros membros do grupo de inspeção: devem ser qualificados de acordo com a ABNT NBR NM ISO 9712, ou equivalente. Para a inspeção em campo, deve ser exigido no mínimo a qualificação no nível 2, combinada com experiência comprovada onde aplicações especiais sejam necessárias.

### 8.1.2 Tarefas de preparação

#### 8.1.2.1 A preparação para inspeção deve incluir os seguintes itens:

- a) programação e planejamento;
- b) seleção da equipe de inspeção;
- c) avaliação do acesso;
- d) recursos necessários para os trabalhos;
- e) análise da condição superficial;
- f) aspectos de segurança;
- g) mobilização das equipes de trabalho;
- h) reunião de abertura.

#### 8.1.2.2 A etapa de programação e planejamento deve prever, no mínimo:

- a) fornecimento dos recursos adequados para atingir o escopo de trabalho;
- b) coordenação das atividades paralelas que podem impactar na inspeção;
- c) avaliação e soluções de contorno para quaisquer restrições para trabalhar na área (trabalhos perigosos em paralelo, restrições de tempo, uso de aparelhos a prova de explosão).

**8.1.2.3** A equipe de inspeção deve ser selecionada de forma a se ter pessoal com qualificação e experiência necessários, compatível com os trabalhos a serem realizados. Quaisquer requisitos adicionais de formação e treinamento específicos para um trabalho devem ser considerados e tratados. Para a INI, esta formação e treinamento específicos podem ser necessários no caso de métodos especializados que não sejam normalizados. Provas de competência em END (como, Nível 2 de acordo com ABNT NBR NM ISO 9712) não são necessariamente provas de competência em um método especializado. Nestes casos, uma formação complementar adequada e, ocasionalmente, um exame podem ser necessários.

**NOTA** No caso de andaimes e acesso por corda, verificar regulamentação vigente.

**8.1.2.4** A área a ser inspecionada deve estar acessível para a aplicação do método de END. Isto inclui recursos de acesso (andaimes) adequados ao alcance de toda área a inspecionar, e com área livre que permita a movimentação do pessoal e dos dispositivos de inspeção envolvidos. Pontos de alimentação elétrica devem estar disponíveis, onde necessário.

**8.1.2.5** A remoção do isolamento térmico deve ser prevista, onde necessária, para a execução da inspeção.

**8.1.2.6** Deve ser avaliada a necessidade de se empregar os seguintes recursos, que devem estar disponíveis no início dos trabalhos:

- a) recursos de comunicação adequados;
- b) área reservada para edição de relatórios, com recursos de informática;
- c) área para armazenamento de aparelhos de inspeção, com previsão para carga de baterias;
- d) proteção contra intempéries que possam prejudicar a inspeção (chuvas, ventos etc.);
- e) proteção adequada para aparelhos e pessoal;
- f) a área a inspecionar deve estar suficientemente limpa e seca;
- g) equipamentos de proteção do inspetor adequados ao trabalho em superfícies quentes.

**8.1.2.7** A condição superficial requerida para inspeção deve ser verificada pelo supervisor de inspeção no local e, se não estiver satisfatória, deve ser reportada ao gerente de inspeção e ao responsável pela operação da planta. Ações corretivas, se necessárias, devem ser aprovadas pelo responsável ou operador da planta, bem como a necessidade do uso de preparação superficial com remoção de material ou adoção de revestimentos.

**NOTA** A condição superficial representa um aspecto crítico para os END, tendo influência marcante na confiabilidade e qualidade da inspeção.

**8.1.2.8** Os seguintes aspectos de segurança devem ser verificados e tratados:

- a) os membros do grupo de inspeção devem ser devidamente qualificados quanto aos aspectos de segurança; o treinamento no local da inspeção normalmente é um requisito mandatório;
- b) liberação formal para a execução do serviço (permissão de trabalho), considerando se a área está devidamente segura e se existem requisitos de segurança que os aparelhos de inspeção devem atender (a maioria dos aparelhos de END não é intrinsecamente segura);
- c) verificar qualquer restrição médica ao trabalho do pessoal.

**8.1.2.9** A mobilização da equipe de inspeção e dos equipamentos a serem utilizados deve garantir que:

- a) os aparelhos foram previamente verificados antes do envio para o local de trabalho;
- b) foi preparada uma lista de verificação, contendo todos os itens indispensáveis à realização da inspeção (ferramentas, recursos para editar relatório, marcadores, medidores, peças de reposição, recursos de informática).

**8.1.2.10** Deve ser realizada uma reunião de abertura entre todas as partes envolvidas na inspeção. Esta reunião deve ocorrer antes do início da inspeção, de forma a estabelecer canais de comunicação claros e desimpedidos entre elas, e compreender os objetivos e requisitos do trabalho a ser realizado.

O grupo de inspeção deve ser familiarizado com as atividades, procedimentos, componentes, aspectos de segurança, entre outros, por meio de uma reunião realizada sempre antes do início dos serviços.

## ABNT NBR 16455:2016

Áreas de degradação previamente conhecidas devem ser identificadas e quantificadas para o operador dos END antes do início da inspeção (mudanças na extensão da área degradada são tão importantes quanto a presença de novas áreas degradadas).

A atividade de cada membro da equipe de inspeção deve ser claramente definida.

### 8.2 Execução da inspeção

O gerente de inspeção deve coordenar as permissões de trabalho e funcionar como elo entre o pessoal de operação da planta e a equipe de inspeção.

O gerente de inspeção deve controlar o progresso do programa de inspeção e tomar medidas cabíveis quando necessário.

Os inspetores de END devem cumprir o escopo de trabalho previamente agendado, e informar ao supervisor qualquer anormalidade observada.

A equipe de inspeção deve trabalhar de forma organizada, tanto durante a execução dos ensaios, como após a mesma, e nas etapas de desmobilização e elaboração do relatório.

Durante a execução dos ensaios de campo, a responsabilidade de garantir que o planejamento está sendo executado é primordialmente da responsável pela execução dos END (companhia prestadora de serviços de inspeção ou equipe própria). Este deve evidenciar, com a máxima brevidade possível, a ocorrência de problemas, que podem incluir:

- a) problemas de acesso à região a inspecionar;
- b) isolamentos térmicos não removidos;
- c) condição superficial inadequada para realização do ensaio;
- d) baixa sensibilidade da técnica de END ou ruído excessivo devido a condições inconvenientes do material sob inspeção;
- e) aparelhos de END com defeitos;
- f) modificações no procedimento ou método empregado.

Os itens de execução do trabalho devem ser verificados pela equipe com relação ao que foi planejado em termos de método, localização e cobertura. Discussões no decorrer da inspeção devem incluir considerações quanto à qualidade dos dados obtidos e se são considerados aceitáveis, de modo a permitir a adoção de medidas corretivas enquanto a equipe de inspeção ainda estiver na unidade.

A equipe de inspeção deve produzir, sempre que possível, relatórios à medida que as inspeções vão sendo executadas. Os relatórios devem conter no mínimo os itens de trabalho executados de acordo com o planejamento, qualquer anomalia detectada e toda mudança com relação ao que foi previamente planejado.

### 8.3 Tratamento de não conformidades

**8.3.1** Os problemas devem ser reportados ao gerente da equipe de inspeção tão logo ocorram. Desvios do planejamento original devem ser identificados antes ou durante a execução da inspeção, de modo a permitir que sejam identificados prontamente as suas consequências e que possíveis alternativas sejam imediatamente tomadas.

**8.3.2** Os requisitos da Seção 9 devem ser aplicados para gerenciar as conformidades durante a etapa de análise da inspeção. Toda oportunidade deve ser aproveitada para modificar qualquer inspeção que não possa atender ao planejamento, empregando um método diferente ou o mesmo em uma diferente localização. A Tabela 4 resume qual a metodologia a adotar.

**NOTA** A compreensão do tipo de estratégia a ser adotada para uma inspeção em particular (ver 7.3) é importante nesse estágio, visto que permite o seu melhoramento ou mudança durante a sua implementação.

**8.3.3** A documentação gerada durante o transcorrer da inspeção deve fazer parte da documentação completa do planejamento da inspeção.

**8.3.4** Indicações potencialmente associadas com deteriorações em serviço devem ser reportadas ao gerente da equipe de inspeção com a maior brevidade possível. Estes fatos podem redundar em inspeções adicionais ou uma forma de realização diferente do planejado (ver Seção 10).

**Tabela 4 – Resumo das medidas cabíveis para definir ações, com base no tipo de inspeção, para mitigar os desvios**

<b>Desvio</b>	<b>Tipo de inspeção</b>		
	<b>Tipo A</b>	<b>Tipo B</b>	<b>Tipo</b>
Área não inspecionada, por exemplo, por problemas de acesso	Substituir por área sujeita a condições de uso semelhantes	Substituir por área sujeita a condições de uso semelhantes	Tentar contornar os problemas de acesso. Caso seja impossível, indicar como não conformidade para ser analisada após o encerramento da inspeção
Desempenho sofrível da técnica, por exemplo, procedimento não seguido, calibração incorreta, condição superficial deficiente etc.	Tentativa para corrigir e refazer a inspeção que foi afetada. Em caso de insucesso, considerar substituir por método alternativo com efetividade semelhante	Tentativa para corrigir e refazer a inspeção que foi afetada. Em caso de insucesso, considerar: (i) substituir por método alternativo com efetividade semelhante ou (ii) análise dos dados para verificar se os resultados são aceitáveis	Tentativa para corrigir e refazer a inspeção que foi afetada. Em caso de insucesso considerar: (i) substituir por método alternativo com efetividade semelhante ou (ii) realizar estudo aprofundado para definir a efetividade mínima requerida

## 8.4 Registro dos resultados

**8.4.1** A forma de reportar os resultados dos END deve ser especificada pelo gerente da equipe de Inspeção e definida no plano de trabalho.

**8.4.2** O critério de registro e o formato devem ser especificados em detalhes. O formato deve facilitar a repetitividade da inspeção e a comparação de seus resultados com os de outras já realizadas ou que venham a ser feitas. Formulários-padrões pré-definidos devem ser utilizados para otimizar a repetitividade.

**ABNT NBR 16455:2016**

**8.4.3** As seguintes informações, quando aplicáveis, devem ser incluídas nos relatórios:

- a) número de relatório único;
- b) cliente;
- c) nome e número do contrato;
- d) data(s) de realização dos END;
- e) breve descrição do componente ensaiado;
- f) dimensões características do componente ensaiado;
- g) número do desenho;
- h) condição superficial;
- i) material;
- j) especificações dos aparelhos de END;
- k) número de referência e identificação do componente ensaiado;
- l) resultado da inspeção, incluindo croquis quando apropriado;
- m) número do procedimento de inspeção, incluindo sua data;
- n) norma ou critério de aceitação, incluindo a data de sua criação;
- o) limitações do ensaio ou qualquer detalhe relevante;
- p) clara identificação da amostra onde apenas uma inspeção por amostragem foi requerida;

**NOTA** Por exemplo, onde todo um componente de um grupo de componentes similares for ensaiado, um número de identificação único deve ser reportado; quando apenas uma parte de um componente foi ensaiada, deve ser reportado o tamanho e a localização da amostragem com relação a um ponto de referência – *datum*.

- q) nome do inspetor, assinatura e data do relatório;
- r) detalhes da certificação do inspetor;
- s) aprovação do supervisor e do gerente da inspeção;
- t) aprovação do cliente, se requerido;
- u) qualquer outra informação requerida pelo procedimento aprovado.

**NOTA** Como alternativa, o formato do relatório pode ser implementado como um programa de computador especialmente desenvolvido para tal, particularmente quando informações estatísticas repetitivas devem ser registradas e analisadas. Estes programas de computador devem ser projetados para realçar rapidamente medidas relevantes.

**8.4.4** O supervisor de inspeção deve verificar os relatórios e o gerente de inspeção deve avaliar os resultados o mais rápido possível, de forma a garantir um alerta rápido de qualquer uma das seguintes situações e permitir mais tempo para tomar as medidas necessárias:

- a) qualquer descontinuidade relevante nova;
- b) qualquer mudança significativa no resultado da inspeção;
- c) qualquer acontecimento que tenha restringido a inspeção;
- d) restrições no desempenho da inspeção (POD, POS) de acordo com o procedimento;
- e) aplicação incorreta do procedimento;
- f) necessidade de inspeção suplementar.

**8.4.5** Os relatórios de inspeção devem ser revistos e aprovados pelo supervisor e pelo gerente de inspeção. Os relatórios aprovados devem ser anexados à documentação completa do planejamento da inspeção. Finalmente, a documentação completa do planejamento da inspeção deve ser arquivada e estar disponível para acessos futuros antes e durante a próxima inspeção.

## 8.5 Desmobilização

**8.5.1** O supervisor de inspeção deve verificar se todas as partes envolvidas na inspeção estão conscientes do seu encerramento e de acordo com os resultados obtidos.

**8.5.2** O supervisor de inspeção deve realizar uma reunião de encerramento com a presença de todos os envolvidos na inspeção, com o intuito de oferecer uma oportunidade para retroalimentação das experiências vividas, lições aprendidas, e principalmente gerar recomendações para futuras inspeções. Qualquer destas recomendações deve estar documentada e arquivada apropriadamente, de forma a ser facilmente recuperada para consideração na etapa de planejamento de futuras inspeções.

**8.5.3** Todos os aparelhos utilizados na inspeção devem ser verificados antes de sua embalagem e remessa.

# 9 Avaliação da inspeção

## 9.1 Introdução

Esta Seção apresenta orientações sobre a forma de avaliar a INI, abrangendo principalmente as ações a serem tomadas ao final da inspeção, sobre a possibilidade de justificativa de não conformidades e ações a serem tomadas após a identificação de não conformidades críticas.

Esta Seção também deve ser aplicada para avaliar as mudanças a serem feitas na fase de planejamento e durante a inspeção em si.

O plano de inspeção gerado a partir dos requisitos desta Norma define uma série de itens de trabalho, cada um especificando pelo menos a técnica de inspeção a ser utilizada, os locais de inspeção e a cobertura (mais detalhes podem ser fornecidos, se necessário). Estes itens de trabalho formam a base do processo de avaliação. Cada grupo de itens de trabalho deve incluir todos os itens que apresentem em comum: técnica, região de degradação e tipo de recursos.

**NOTA** Por exemplo, se o escopo de trabalho for o mapeamento da corrosão da região em contato com a água do casco de um vaso, todas as áreas de inspeção dentro desta região devem ser tratadas como

**ABNT NBR 16455:2016**

grupos de itens de trabalho. Da mesma forma, bocais com possibilidade de degradação semelhante devem ser considerados como um grupo, caso sejam inspecionados por uma técnica em comum.

Para cada grupo de itens de trabalho, um nível de conformidade de inspeção deve ser definido de acordo com os seguintes critérios:

- a) nível 1: cumprimento de 100 % dos requisitos. Para os casos de substituição total da IVI, a inspeção pode ser utilizada como suporte à reprogramação. Para os casos em que a INI fundamentar a postergação da IVI, esta pode ser utilizada como suporte na programação do novo período para a próxima inspeção;
- b) nível 2: pequena diferença entre o que foi alcançado e o planejado. Este caso é considerado não impactante na eficácia geral da inspeção, ou seja, os requisitos são efetivamente cumpridos e nenhum acompanhamento é necessário. No caso de uma substituição completa da IVI, a inspeção pode ser utilizada para dar suporte à reprogramação. Para os casos em que a INI fundamentar a postergação da IVI, esta pode ser utilizada como suporte na programação do novo período para a próxima inspeção;
- c) nível 3: redução significativa entre o que foi alcançado e o planejado. Significa que o intervalo planejado não pode ser justificado sem o tratamento das não conformidades. São necessárias investigações adicionais e o intervalo admissível deve ser determinado de acordo com as orientações apresentadas na Seção 10. Salvo indicação contrária na Seção 10, a inspeção não pode ser usada como apoio à reprogramação;
- d) nível 4: resultado da inspeção realizada significativamente abaixo dos objetivos propostos e não podendo ser utilizado como suporte à operação contínua. Devem ser tomadas ações adicionais a fim de promover a garantia da integridade. Salvo indicação contrária conforme sequência de avaliação mais detalhada em 10.7, a inspeção não pode ser utilizada como suporte à reprogramação.

O nível a ser aplicado deve ser determinado por meio da análise dos fatores definido em 9.3 a 9.10.

Um esquema do processo de avaliação de não conformidades e determinação de intervalos de inspeção subsequentes é apresentado na Figura 20.

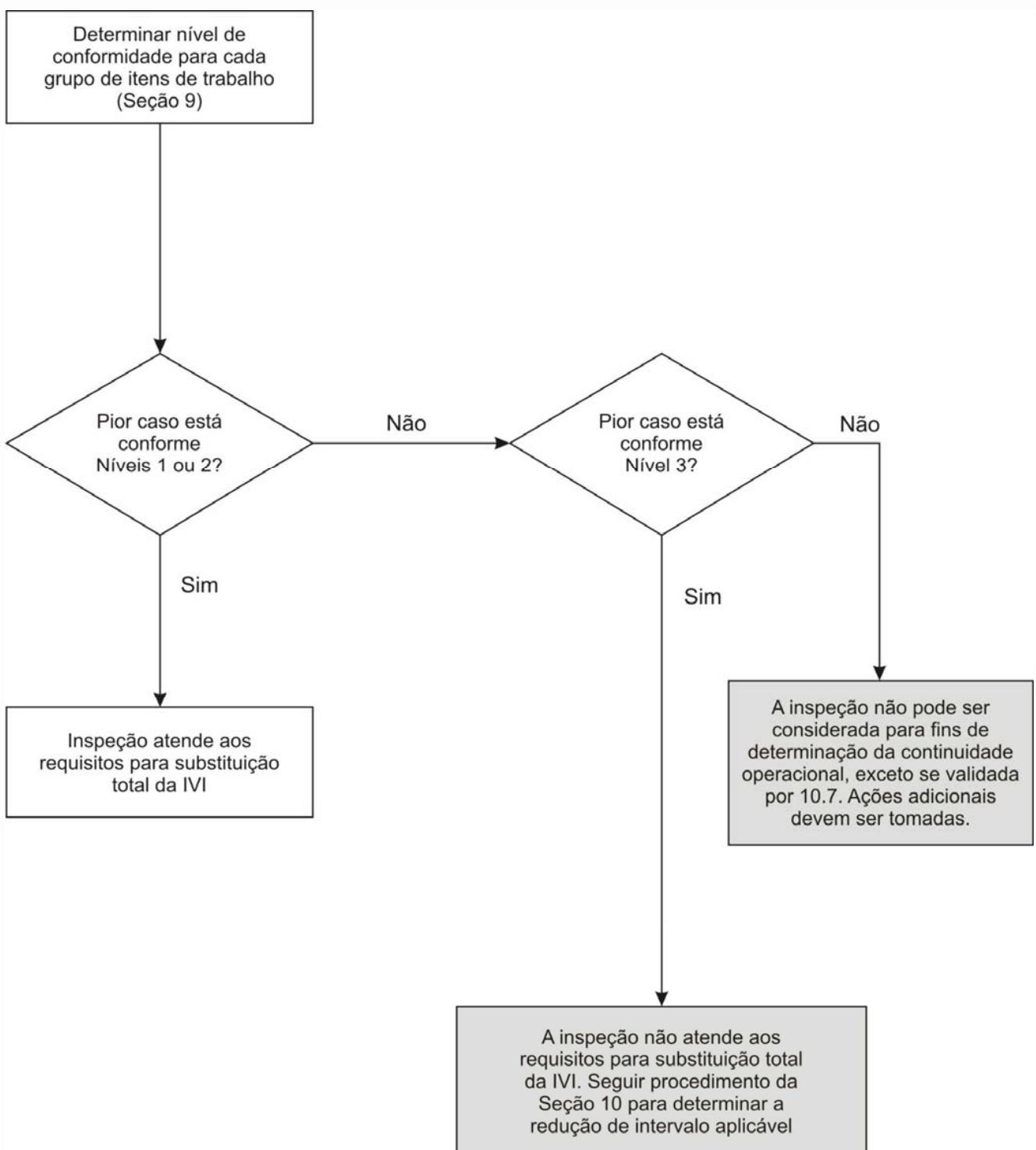


Figura 20 – Visão geral de aplicação das Seções 9 e 10

## 9.2 Itens de conformidade para serem verificados

A entrega do relatório de inspeção deve ser realizada após uma revisão minuciosa. Esta revisão deve incluir considerações no plano de inspeção para os seguintes itens de cada trabalho:

- método;

## ABNT NBR 16455:2016

- b) procedimento;
- c) qualidade dos dados;
- d) localização;
- e) cobertura (extensão).

### 9.3 Método de END

#### 9.3.1 Introdução

Ao avaliar se um método alternativo de END é aceitável para uma determinada inspeção, deve-se considerar a natureza da degradação esperada, a sensibilidade deste novo ensaio para detecção e se a caracterização pode ser comparada com o método originalmente especificado.

#### 9.3.2 Inspeção tipo A

**9.3.2.1** Se o método aplicado tiver a POD adequada para o tipo de defeito considerado, definido como possível na ARC, o método pode ser considerado aceitável, em conformidade com os níveis 1 e 2.

**9.3.2.2** Se o método aplicado tiver a POD pior do que a especificada, este deve ser considerado como inaceitável para substituição da IVI. Nestes casos, as orientações da Seção 10 devem ser seguidas para determinação do nível de conformidade aplicável.

**NOTA** O sucesso da inspeção tipo A depende se o método de END utilizado tem sensibilidade suficiente para detectar sinais de início de degradação.

#### 9.3.3 Inspeção tipo B

**9.3.3.1** Para inspeções tipo B, o método de END deve ser capaz de caracterizar qualquer degradação presente, para permitir que seja feita uma avaliação da adequação ao uso (*fitness for service*), baseada em uma análise estatística adequada quanto ao nível de cobertura atingido.

**9.3.3.2** Desde que os dados obtidos com um novo método sejam suficientes para demonstrar que o vaso está adequado para operação, na maioria dos casos esta degradação pode ser considerada como aceitável, isto é, níveis de conformidade 1 e 2. Existe uma exceção, quando a técnica e o modo de execução são tais que tendem a superestimar sistematicamente a espessura de parede. Esta possibilidade deve ser considerada com cuidado, e feita uma análise estatística dos dados.

#### 9.3.4 Inspeção tipo C

**9.3.4.1** Para inspeção tipo C, é requerido que o método seja capaz de fornecer uma alta probabilidade de detecção da degradação, e com certa margem definida, critérios de aceitação para adequação ao uso (*fitness for service*). A detecção é o requisito principal e a precisão no dimensionamento não é necessária, ou seja, técnicas visuais (*screening techniques*) podem ser consideradas.

**9.3.4.2** Mudanças da técnica proposta são aceitáveis desde que a probabilidade de detecção não seja significativamente reduzida na determinação da profundidade da degradação.

**NOTA** Deve-se notar que mesmo que uma técnica visual possa atender os requisitos técnicos, considerações de ordem prática podem ditar a escolha de outra que a supere, por exemplo, a utilização de uma técnica com capacidade tanto de identificar como de dimensionar com precisão a degradação pode ser a melhor solução em certos casos, uma vez que elimina a necessidade de inspeção complementar.

## 9.4 Procedimento

### 9.4.1 Inspeção tipo A

**9.4.1.1** Divergências no procedimento que não impactem negativamente a POD do END para pequenos defeitos podem ser aceitáveis.

**9.4.1.2** Se a POD for afetada negativamente por divergências no procedimento, devem ser aplicados os requisitos descritos na Seção 10.

### 9.4.2 Inspeção tipo B

**9.4.2.1** Uma redução no desempenho do END é frequentemente tolerável em uma inspeção tipo B, desde que não afete a validade da análise estatística.

**9.4.2.2** Mudanças no procedimento que resultem em uma situação onde exista uma superestimação sistêmica da espessura de parede ou uma subestimação no comprimento da trinca não são aceitáveis, pois afetam a validade da aproximação estatística.

**NOTA** No caso das inspeções tipo B, espera-se que os defeitos identificados sejam significativamente menores que o tamanho crítico e o seu dimensionamento preciso não seja totalmente necessário.

### 9.4.3 Inspeção tipo C

**9.4.3.1** Para inspeção do tipo C, se o procedimento utilizado afetar alguns parâmetros de desempenho, incluindo a POD, o procedimento pode ser aceitável se os desvios no procedimento não afetarem de forma severa a POD para defeitos com grandes dimensões (na aproximação da avaliação da adequação ao uso).

**9.4.3.2** Se ocorrer um impacto negativo na POD para este tamanho de defeito, as diferenças normalmente devem ser consideradas inaceitáveis. Nestes casos, devem ser seguidas as orientações apresentadas na Seção 10.

## 9.5 Qualidade dos dados

### 9.5.1 Inspeção tipo A

**9.5.1.1** Ênfase deve ser dada na capacidade de detecção de sinais de degradação relativamente menores. A redução na qualidade dos dados, que não impactam negativamente na POD para defeitos pequenos (dos tipos que são possivelmente identificados na ARC), normalmente é aceitável.

**9.5.1.2** Se a POD para tais defeitos for afetada negativamente, as diferenças não podem ser usualmente aceitáveis. Em certos casos, deve-se seguir uma análise mais detalhada e, se possível, justificar estas diferenças no procedimento (ver Seção 10).

### 9.5.2 Inspeção tipo B

**9.5.2.1** Ênfase deve ser dada na capacidade de detecção de sinais de degradação relativamente menores que o tamanho crítico, sem a necessidade de seu dimensionamento. Uma redução na qualidade dos dados é tolerável em uma inspeção tipo B, desde que esta não afete a validade da análise estatística.

**9.5.2.2** Mudanças no procedimento que resultem em uma forte superestimação sistêmica da espessura de parede ou uma subestimação no comprimento da trinca não podem ser aceitas, pois afetam a validade da aproximação estatística.

## ABNT NBR 16455:2016

### 9.5.3 Inspeção tipo C

**9.5.3.1** Se a qualidade dos dados não afetar com grande intensidade a POD para defeitos com grandes dimensões (próxima da tolerância da adequação ao uso), a inspeção pode ser aceita.

**9.5.3.2** Se ocorrer um impacto negativo na POD para este tamanho de defeito, as diferenças normalmente devem ser consideradas inaceitáveis. Nestas situações devem ser seguidas as orientações apresentadas na Seção 10.

## 9.6 Localização

### 9.6.1 Inspeção tipo A

**9.6.1.1** Os locais selecionados para uma inspeção do tipo A devem ser representativos das piores regiões em diferentes zonas do vaso.

**9.6.1.2** Se um local de inspeção for modificado (por exemplo, devido a restrições de acesso) para outro, sujeito a condições similares de processo e potencial de degradação, essa alteração normalmente deve ser considerada aceitável, ou seja, em conformidade com os níveis 1 e 2.

**9.6.1.3** Se as condições deste novo local forem potencialmente diferentes daquelas do local especificado, então a mudança deve ser considerada inaceitável. Nestas situações devem ser seguidas as orientações apresentadas na Seção 10.

### 9.6.2 Inspeção tipo B

**9.6.2.1** Os locais selecionados para inspeção do tipo B devem ser representativos das piores regiões em diferentes zonas dos vasos, com o objetivo de obter dados suficientes (estatisticamente) em cada uma das mesmas para estimar o pior dano potencial em áreas não inspecionadas.

**9.6.2.2** Se o local para inspeção for modificado (devido a restrições de acesso, por exemplo) para outro sujeito a condições de processo e degradação potenciais similares, normalmente essa alternativa deve ser considerada aceitável.

**9.6.2.3** Se as condições da nova região forem potencialmente diferentes da original, a mudança é inaceitável e deve ser justificada mediante análise estatística que prove serem suficientes os dados coletados na região afetada.

### 9.6.3 Inspeção tipo C

Para inspeção do tipo C não há margem para substituição da região de inspeção.

## 9.7 Cobertura

### 9.7.1 Inspeção tipo A

**9.7.1.1** Desvios pontuais que propiciem uma pequena redução da cobertura (menor que 25 %) são aceitáveis.

**NOTA** A cobertura da inspeção do tipo A deve permitir uma amostragem suficiente da pior entre as diferentes regiões do vaso, de forma a obter um alto nível de confiança de que, caso haja algum tipo de degradação presente, ela será detectada.

**9.7.1.2** Se a cobertura for reduzida ao ponto de não existirem dados de inspeção de uma região ou componente de interesse, então esse desvio é inaceitável. Nesse caso, deve ser seguido o disposto na Seção 10.

### **9.7.2 Inspeção tipo B**

**9.7.2.1** A redução na área de cobertura que não afete a análise estatística ou que não dificulte a demonstração à aceitabilidade da condição do item sob inspeção pode ser aceita.

**9.7.2.2** A cobertura da inspeção tipo B deve ser adequada para obter (estatisticamente) dados suficientes de cada região que permitam uma estimativa da pior falha potencial em áreas não inspecionadas. Os efeitos de uma cobertura reduzida normalmente influem diretamente na análise estatística, tornando-se mais difícil demonstrar a aceitabilidade da condição do item sob inspeção.

**9.7.2.3** Situações nas quais a área de cobertura for reduzida até o ponto de não existirem dados de inspeção de uma região específica ou componente de interesse são inaceitáveis. Nesses casos, deve ser aplicado o disposto na Seção 10.

### **9.7.3 Inspeção tipo C**

A aceitação de reduções de cobertura devem ser fundamentadas por uma análise mais detalhada (ver Seção 10).

## **9.8 Níveis de conformidade**

### **9.8.1 Geral**

O nível de conformidade deve considerar:

- a) a maneira e extensão nas quais algum requisito da inspeção ou pequenas diferenças na sua aplicação não atinjam o especificado no plano de trabalho;
- b) em uma perspectiva da integridade, as possíveis implicações das não conformidades.

Os parâmetros para a identificação do nível de conformidade são fornecidos em 9.8.2 a 9.8.4.

### **9.8.2 Inspeção tipo A**

**9.8.2.1** A Tabela 5 deve ser usada como um ponto inicial para a determinação dos níveis de conformidade aplicáveis aos diferentes elementos do plano de trabalho. A análise considera o que é alcançado em comparação com o previsto para cada grupo.

**9.8.2.2** A POD na Tabela 5 se refere ao atingido em comparação ao planejado, para cada grupo de itens de trabalho, e deve refletir a desempenho médio, exceto nos casos onde há uma variação significativa em um grupo de itens de trabalho. Nesses casos, deve ser considerado o pior desempenho para cada item de trabalho em particular.

**9.8.2.3** O usuário deve definir a situação mais razoável, como por exemplo, no caso onde a POD especificada for obtida na maior parte de uma área sob inspeção, ficando abaixo apenas em uma pequena extensão da mesma. Nesse caso, é preferível tratar essa pequena área como perda de cobertura.

**Tabela 5 – Categorias de não conformidades para inspeção tipo A**

<b>Nível de conformidade</b>	<b>POD</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Localização</b>
N1	Como prevista	Como prevista	Como prevista
N2	$\geq 90\%$ do prevista	$\geq 75\%$ da prevista	Inspeção de $\geq 75\%$ da prevista
N3	$50\% \leq \text{prevista} < 90\%$	$50\% \leq \text{prevista} < 75\%$	Inspeção entre 50 % e 75 % da prevista
N4	< 50 % da prevista	< 50 % da prevista	Inspeção de < 50 % do prevista

**9.8.2.4** A cobertura na Tabela 5 refere-se ao total atingido, relativo ao planejado, para o agrupamento de itens de trabalho em consideração, e não pode considerar a localização de itens de trabalho individuais. A cobertura deve ser analisada em bases da dimensão física (atingida *versus* planejada), como a área ou comprimento.

**9.8.2.5** A localização da Tabela 5 refere-se ao número específico de locais ou de componentes, parte de um agrupamento de itens de trabalho. Cobre itens específicos como grades de varredura, soldas, bocais, faces de flanges etc.

### **9.8.3 Inspeção tipo B**

**9.8.3.1** A aceitação para inspeções tipo B depende da análise estatística dos resultados da inspeção. A análise integral da aceitabilidade do resultado da inspeção pode ser feita apenas se os resultados dessa análise estiverem disponíveis.

**9.8.3.1.1** O nível de conformidade da inspeção deve ser adotado como 4 se pelo menos uma das seguintes situações ocorrer:

- a) a técnica de END subdimensiona sistematicamente a degradação;
- b) uma ou mais zonas de corrosão não foram cobertas.

**9.8.3.2** Deve-se atribuir o nível de conformidade 3 ou 4, quando não for possível demonstrar por análise uma condição aceitável (a qual considera geralmente a situação ao final do intervalo de inspeção subsequente).

**9.8.3.3** A atribuição do nível de conformidade 3 ou 4 depende da possibilidade de justificar ou não a inspeção como suporte à postergação da IVI.

### **9.8.4 Inspeção tipo C**

**9.8.4.1** A Tabela 6 deve ser usada como uma orientação inicial para determinar o nível de conformidade aplicável a cada agrupamento de itens de trabalho.

**9.8.4.2** A Tabela 6 deve ser usada apenas como uma aproximação inicial, o usuário deve aplicar conceitos de engenharia para definir a categoria mais apropriada.

**9.8.4.3** As condições relacionadas na Tabela 6 referentes à POD e à cobertura devem ser consideradas individualmente. Se ambos os parâmetros forem simultaneamente afetados, ações devem ser adotadas para aumentar o nível de conformidade.

**Tabela 6 – Categorias de não conformidades para inspeção tipo C**

Nível de conformidade	POD	Cobertura	Localização
N1	Como prevista	Como prevista	Como prevista
N2	$\geq 75\%$ da prevista	$\geq 90\%$ da prevista	Inspeção de $\geq 90\%$ da prevista
N3	$50\% \leq \text{prevista} < 75\%$	$50\% \leq \text{prevista} < 90\%$	Inspeção entre 50 % e 90 % da prevista
N4	$< 50\%$ da prevista	$< 50\%$ da prevista	Inspeção de $< 50\%$ do prevista

**EXEMPLO** Um caso onde a POD é de aproximadamente 75 % da esperada (N2) e a cobertura é 90 % da esperada (N2), deve ser adotado inicialmente o nível 3 de conformidade ao invés do nível 2 de conformidade.

**9.8.4.4** Os efeitos das não conformidades com respeito à localização da área para cobertura devem ser também considerados no ajuste do nível de conformidade, quando tanto a POD como a cobertura forem afetadas.

**9.8.4.5** A aplicabilidade da categoria atribuída de acordo com a Tabela 6 deve considerar os objetivos específicos do plano de inspeção e os fatores como a capacidade do método de END que compense uma menor POD para defeitos pequenos com uma maior capacidade de cobrir rapidamente grandes áreas, as não conformidades associada à cobertura etc.

**9.8.4.6** As não conformidades associadas à área cobertura são as de maior impacto e considerações devem ser feitas para avaliar seus impactos, como:

- a) redução localizada na cobertura devido aos problemas de acesso, como bocais ou tubulação restringindo acesso à área de interesse (em muitas circunstâncias isso é aceitável por já estar previsto);

**NOTA 1** A gravidade de defeitos por corrosão pode ser estimada de maneira relativamente simples pelo estabelecimento da perda de espessura de parede aceitável para a área não inspecionada. Se a perda de metal nas vizinhanças, ou regiões similares, estiver com folga, dentro de limites aceitáveis, então é razoável admitir que é improvável que perdas de espessura inaceitáveis ocorreram em áreas não inspecionadas; por outro lado, se a perda de espessura metálica medida estiver no limite da aceitável, é mais difícil justificar a aceitação das áreas não inspecionadas. Esta hipótese deve considerar as conclusões da análise de corrosão, como por exemplo, o tipo de defeito de ocorrência provável. É, por exemplo, menos usual a aceitação quando a corrosão microbiológica bem localizada estiver presente.

- b) revisão da análise de corrosão inicial, por meio de uma análise mais profunda da corrosão existente no vaso de forma a reduzir parte do conservadorismo inicial e permitir a aceitação da não conformidade.

**NOTA 2** Reduções significativas na cobertura para áreas em particular são normalmente inaceitáveis. A justificativa nesse caso é baseada fundamentalmente na revisão da análise da corrosão. Isto implicaria na reavaliação da possível natureza da degradação à luz dos novos resultados que estão disponíveis.

Ainda que o desempenho da inspeção deva se constituir em uma preocupação menor do que a relacionada à cobertura nesse tipo de inspeção, este deve continuar sendo considerado. Existem certos requisitos mínimos usualmente relacionados com a dimensão tolerável de defeitos que devem ser atendidos. Se o sistema de inspeção ou sua implementação for tal que esses requisitos não sejam atingidos, então a única maneira de demonstrar a sua aceitabilidade é refinar a definição das dimensões de defeitos toleráveis.

## 9.9 Não conformidade crítica

**9.9.1** Não conformidades classificadas como críticas, níveis 3 e 4, implicam que a INI não pode ser usada para substituir ou postergar a IVI originalmente programada.

**9.9.2** Quando a inspeção apresentar uma não conformidade crítica, isto é, claramente não atingir os objetivos da inspeção, algumas ações são requeridas para realinhar a situação. Cada caso deve ser analisado individualmente, mas em uma consideração ampla, as seguintes opções, dependendo se o objetivo da INI for substituir ou postergar a IVI, devem ser consideradas:

- a) repetir tão logo quanto possível a inspeção dos itens relacionados com as não conformidades, focando nos problemas aplicáveis a elas;
- b) executar inspeção visual interna tão logo quanto possível;
- c) repetir total ou parcialmente o escopo de trabalho de INI em um intervalo menor que aquele que seria normalmente aplicado, focando nos problemas relacionados às não conformidades críticas;
- d) providenciar inspeção visual interna em um período de tempo menor que o que seria normal;
- e) aplicar inspeção alternativa em um curto período de tempo;
- f) providenciar monitoração regular da espessura de parede em áreas localizadas;
- g) evidenciar que o processo de acúmulo de danos está sobre controle e que as condições que levariam à corrosão acelerada não estão presentes (monitorar níveis de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ou empregar cupons de corrosão, por exemplo);
- h) considerar o uso de INI para fins de postergação da IVI apenas se o intervalo de inspeção permitível, determinado de acordo com a Seção 10, for adequado.

**9.9.3** Quando o objetivo planejado for substituir a IVI, a análise das não conformidades de acordo com o prescrito na Seção 10 deve permitir a continuidade da operação do vaso, mas por um intervalo de tempo mais curto, o que caracterizaria uma postergação de prazo.

**NOTA** A Seção 10 fornece um procedimento detalhado para a avaliação do impacto das não conformidades. É possível, em alguns casos, revisar o nível de conformidade seguindo os parâmetros propostos na Seção 10.

**9.9.4** Uma vez que os níveis de conformidade tenham sido estabelecidos, as seguintes restrições se aplicam à forma de como os resultados da inspeção podem ser usados:

- a) nível 3:
  - a inspeção não pode ser usada para justificar uma nova graduação de conformidade;
  - informações da inspeção sobre zonas não conformes não são usadas para atualizar taxas de corrosão, susceptibilidade do item ao dano, entre outros, no plano de IBR;
  - a efetividade da inspeção deve ser declarada baixa em avaliações futuras para execução de INI;

b) nível 4:

- a inspeção não pode ser usada para justificar uma nova graduação de conformidade;
- informações da inspeção sobre zonas não conformes não são usadas para atualizar taxas de corrosão, susceptibilidade do item ao dano, entre outros, no plano de IBR;
- esta inspeção não pode ser considerada para planejamento de futura INI.

## **9.10 Indicações e descontinuidades reportáveis**

### **9.10.1 Geral**

Ações específicas são necessárias quando forem encontradas descontinuidades. O tipo de inspeção fornece uma boa base para definir os princípios que governam a natureza da ação que deve ser tomada quando são encontradas descontinuidades.

**NOTA** De forma geral, os procedimentos relativos a descontinuidades são bem cobertos por normas referentes à adequação ao uso, como API 579 e BS 7910, assim como procedimentos internos não são escopo desta Norma.

### **9.10.2 Inspeção tipo A**

Se uma degradação, além de um valor considerado pequeno, for encontrada, deve-se procurar conhecer o motivo desta ocorrência.

**NOTA 1** Geralmente nestes casos pode existir um problema no processo levando a uma corrosão maior do que a esperada, ou uma indicação de deficiência na estimativa da corrosão anteriormente obtida, em função do material do vaso ter sido mal especificado para o meio corrosivo.

**NOTA 2** O conhecimento do motivo que causa a degradação normalmente depende de um maior conhecimento da natureza, dimensão e localização da degradação do que o fornecido pela INI inicial. Visto que essa inspeção tipicamente tem cobertura limitada, é importante, considerando aspectos de integridade, garantir que uma degradação maior não está presente nas áreas inspecionadas.

Na maioria das ocasiões em que são detectados defeitos na inspeção tipo A, uma inspeção adicional deve ser executada em curto espaço de tempo. Essa nova inspeção deve aumentar a cobertura e fornecer informação detalhada sobre a degradação.

**NOTA 3** Em muitos casos, essa exigência é atendida com maior eficiência pela inspeção visual interna.

### **9.10.3 Inspeção tipo B**

Uma situação inaceitável na inspeção tipo B é quando a probabilidade de falha (tipicamente baseada na existência de possível degradação nas áreas não inspecionadas) é considerada excessiva. Essa situação deve ser administrada de várias formas, como descrito a seguir:

- a) inspeção adicional (empregando o mesmo método) em mais áreas (aumentar cobertura) com consequente aumento da quantidade de dados (e redução das áreas sem a existência de cobertura);
- b) inspeção da mesma área (manter cobertura), porém com método de menor variabilidade inherente na medição de espessura remanescente. Isto reduz o valor estimado para a dimensão do pior defeito;

## ABNT NBR 16455:2016

- c) inspeção com INI ou IVI com cobertura de 100 % de forma a identificar diretamente a dimensão do pior defeito;
- d) análise adicional mais sofisticada de dados incluindo correlação de resultados de diferentes regiões.

**NOTA** Na maioria dos casos, as duas primeiras opções mostram-se mais econômicas.

### 9.10.4 Inspeção tipo C

Quando defeitos não superficiais forem encontrados em uma inspeção tipo C, deve-se executar um estudo de adequação ao uso em serviço específico. Este é o caso quando a informação fornecida pela INI inicial por si só não for suficiente para dar suporte ao estudo de adequação ao uso, e uma inspeção com foco em uma caracterização mais abrangente dos defeitos for necessária. Essa inspeção pode ser INI ou IVI dependendo das circunstâncias. Ajustes no plano podem ser executados empregando os resultados do estudo de adequação ao uso como base.

## 9.11 Exemplos

O Anexo E contém exemplos de avaliação para cada um dos tipos de inspeção definidos nesta Seção.

## 10 Intervalo de inspeção

### 10.1 Discussão

**10.1.1** Esta Seção descreve os tipos de ação que podem ser considerados aceitáveis para justificar toda a não conformidade considerada não aceitável (ver Seção 9).

**NOTA** Esta Norma não requer avaliações muito aprofundadas sobre a análise de risco de corrosão (ARC) e análise de integridade do equipamento antes que a INI seja considerada aceitável. Esta Norma adota uma abordagem pragmática de acordo com o nível de conhecimento e informação que tipicamente está associado a equipamentos pressurizados em operação, consequentemente, onde os requisitos de inspeção tenham sido determinados de forma conservadora.

**10.1.2** Podem ser utilizadas duas abordagens para demonstrar que a inspeção realizada pode ser considerada aceitável:

- a) por meio da comparação dos resultados da INI com os resultados da IVI;
- b) por meio de uma avaliação estatística quantitativa (ou semiquantitativa) da probabilidade de falha (ver 10.4).

### 10.2 Ajuste dos intervalos por meio da comparação com a IVI

**10.2.1** Esta Seção apresenta uma abordagem pragmática para avaliação do próximo intervalo de inspeção, com base na eficácia da inspeção, quando comparada à IVI.

**10.2.1.1** Os requisitos desta Seção têm como objetivo assegurar que a INI, realizada para substituição da IVI, apresente resultados de qualidade igual ou superior (em termos de detecção da degradação de interesse) aos obtidos com a IVI.

**10.2.1.2** Exceções, como quando a IVI apresenta grandes limitações e nitidamente não se apresenta como uma referência adequada para a INI, devem ser tratadas com uma abordagem quantitativa (ver 10.1 e 10.7).

**10.2.2** Não conformidades que indiquem o não atendimento ao objetivo descrito em 10.2.1 requerem a aplicação de ações que visem garantir a segurança da integridade (ver 9.9).

**10.2.3** Em alguns casos, a opção mais indicada para o tratamento de uma não conformidade é a redução do intervalo da próxima inspeção definido na análise de IBR (este intervalo é definido como  $I_{IBR}$ ).

**10.2.4** Os requisitos desta Seção foram previstos para situações em que se aplica um único intervalo de inspeção a fim de determinar a condição interna do vaso de pressão. No entanto, não exclui as situações em que o operador se utiliza de diferentes intervalos de inspeção para diferentes zonas do equipamento.

**10.2.5** Para avaliar a redução de intervalo, devem ser considerados os impactos das não conformidades, assim como, deve ser demonstrado que a probabilidade de falha ao final do intervalo reduzido é menor do que a probabilidade de falha ao final do intervalo original, determinado por meio de IBR, assumindo a realização da IVI.

**10.2.5.1** Alternativamente, respeitando os objetivos da INI, algumas simplificações (necessariamente conservadoras) podem ser assumidas para que sejam determinados os impactos das mudanças na eficácia da inspeção frente a diferentes cenários.

**10.2.5.2** As avaliações devem ser conduzidas a partir das não conformidades mais graves, a princípio, definidas pelo nível de conformidade. Nos casos em que houver mais de um grupo de itens de trabalho com não conformidades críticas, cada caso deve ser avaliado, sendo assumido como intervalo aquele que se apresentar menor.

### 10.3 Intervalos de acordo com não conformidade de inspeção tipo A

**10.3.1** Sempre que a POD for menor que a prevista, levando-se em conta o critério de aceitação dos defeitos, caracteriza-se uma não conformidade.

**10.3.2** Para não conformidades, com nível de conformidade 3 (ver 9.8.2), o intervalo admissível até a próxima inspeção deve ser reduzido de forma linear em relação à POD pretendida (considerando que a cobertura seja realizada conforme o planejado), de acordo com a seguinte equação:

$$I_{admissível} = I_{IBR} \times (2,5P_r - 1,25) \times C_r \quad (1)$$

onde

$I_{admissível}$  é o intervalo admissível até a próxima inspeção;

$I_{IBR}$  é o intervalo definido pela IBR;

$P_r$  é a POD estimada obtida para a inspeção, em relação ao que foi pretendido;

$C_r$  é a cobertura, na zona em que se aplica a não conformidade, em relação à cobertura planejada.

## ABNT NBR 16455:2016

O valor máximo permitido para  $l_{admissível}$  é igual a  $l_{IBR}$ . Além disso, a cobertura mínima permitida (em relação à planejada) normalmente deve ser de até 50 %. Coberturas menores que 50 % acarretam em resultados de inspeção insuficientes para avaliar a condição do material, sendo na maioria dos casos a inspeção atribuída ao nível de conformidade 4. Nestes casos, outras ações devem ser tomadas, não sendo suficiente a diminuição do intervalo.

**10.3.3** Em casos de falta de cobertura, o intervalo determinado em 10.3.2 deve ser revisado por meio do ajuste de  $C_r$ , considerando os seguintes pontos:

- a) deve ser feita uma comparação entre o grau de corrosão esperado na zona da não conformidade e o das áreas inspecionadas, e o material deve apresentar-se em boas condições:
  - quando a falta de cobertura estiver localizada em uma região onde se espera maiores degradações do que em outras áreas, deve ser realizada uma redução em  $C_r$ ;
  - quando a falta de cobertura estiver em uma zona menos suscetível à degradação do que nas outras áreas inspecionadas, a  $C_r$  pode ser aumentada (desde que os resultados da inspeção não mostrem sinais de degradação nessas áreas);

NOTA Nestes casos, a avaliação da cobertura pode ser feita com base em todas as zonas que apresentem corrosão maior ou igual do que a da zona em consideração, desde que a falta de cobertura não seja menor que 50 % do pretendido para a zona em questão.
- b) a falta de cobertura está relacionada a algum local específico do equipamento que possa acarretar um aumento da suscetibilidade à degradação quando comparado a outros locais inspecionados dentro desta mesma região de processo:
  - quando estiver claro que a cobertura deixou de abranger algum ponto específico, como por exemplo, a região adjacente a um bocal, e nenhuma outra região que represente esta particularidade tenha sido inspecionada, então deve ser reduzida a  $C_r$  para um valor proporcional e equivalente à cobertura realizada;
  - quando outras regiões, submetidas a condições similares daquela não coberta, tenham sido inspecionadas, então a  $C_r$  pode ser aumentada;
- c) avaliação sobre a probabilidade de ocorrência de degradação ativa na região não coberta:
  - em casos em que a avaliação seja muito deficiente e se tenha confiança nela por meio da combinação de uma análise de risco da corrosão (ARC) detalhada e do histórico de inspeção, então a  $C_r$  pode ser aumentada;
  - em casos que não há nenhuma evidência histórica robusta que determine a probabilidade de degradação, isto é, equipamentos com histórico de inspeção limitado ou que tenham sofrido mudanças nas condições de operação, deve ser feita uma redução da  $C_r$  para um valor proporcional e equivalente à cobertura realizada.

## 10.4 Intervalos de acordo com não conformidade de inspeção tipo B

**10.4.1** A vida remanescente, estimada a partir da análise dos resultados da INI para uma Inspeção tipo B, deve ser pelo menos o dobro do intervalo que normalmente é utilizado em uma IVI.

**10.4.1.1** O intervalo máximo permitido é determinado da seguinte forma:

$$I_{\text{admissível}} = \frac{V_r}{2} \quad (2)$$

onde

$I_{\text{admissível}}$  é o intervalo admissível até a próxima inspeção;

$V_r$  é a vida remanescente.

**10.4.1.2** A inspeção não atende aos requisitos quando os resultados demonstram que a vida remanescente é inferior ao dobro do intervalo planejado.

**10.4.1.3** Em muitos casos, o aumento da cobertura pode acarretar um aumento da vida remanescente. Pode-se considerar também uma inspeção adicional com melhor qualidade de dados ou a aplicação de técnicas de análise mais rigorosas (que reduzem o conservadorismo).

**10.4.2** A natureza dos dados de inspeção deve ser considerada na avaliação quantificada de uma inspeção do tipo B. Por exemplo, em uma não conformidade cujo mapeamento da corrosão foi substituído por medição de espessura por ultrassom convencional, realizada de forma manual, exige-se uma avaliação detalhada da cobertura real obtida (esta pode ser inferior a 20 % da área de varredura) e do potencial subdimensionamento da degradação (que pode ocorrer caso haja muitos *pites* de pequeno diâmetro).

## 10.5 Intervalos de acordo com não conformidade de inspeção tipo C

**10.5.1** Coberturas entre 50 % e 90 % da planejada devem ser consideradas não conformidades nível 3, e, a menos que ações sejam tomadas, o intervalo de inspeção deve ser reduzido em relação ao intervalo associado a uma IVI.

**10.5.2** O intervalo deve ser reduzido de forma linear de acordo com a relação entre a cobertura obtida e a planejada, de modo a obter-se intervalo de zero para cobertura menor ou igual a 50 % da planejada e intervalo cheio para coberturas maiores que 90 % da planejada.

**10.5.2.1** Nos casos em que a redução da POD for similar em todas as áreas inspecionadas dentro de uma região em particular, o intervalo admissível pode ser estimado, a princípio, da seguinte forma:

$$I_{\text{admissível}} = I_{\text{IBR}} \times (2,5C_r - 1,25) \times P_r \quad (3)$$

onde

$I_{\text{admissível}}$  é o intervalo admissível até a próxima inspeção;

$I_{\text{IBR}}$  é o intervalo definido pela IBR;

$P_r$  é a POD estimada para a inspeção realizada, em relação à POD planejada;

$C_r$  é a cobertura da região em consideração, em relação à cobertura planejada para esta região.

NOTA 1 O intervalo também pode ser ajustado pela POD da inspeção realizada em relação àquela planejada.

## ABNT NBR 16455:2016

**NOTA 2** O valor máximo permitido para  $I_{admissível}$  é  $I_{IBR}$ . A POD mínima permitida é normalmente de 50 % da planejada. Para valores de POD menores que este, o risco relativo a não detecção de degradações é tipicamente próximo de níveis inaceitáveis e, na maioria dos casos, a inspeção é caracterizada com o nível de conformidade 4 (cujas ações a serem tomadas vão além da mudança de intervalo).

**10.5.3** Nos casos em que a redução da POD for localizada em uma área específica dentro de uma determinada região, duas opções de abordagem são recomendadas:

- considera-se que as áreas com POD reduzida sejam áreas não cobertas e recalcula-se a  $C_r$  novamente; o intervalo admissível é determinado com  $P_r$  igual a 1;
- considera-se que a cobertura em cada uma das áreas com POD reduzida deve ser proporcionalmente reduzida pela razão entre a POD obtida e a planejada; o valor de  $C_r$  deve ser então recalculado.

**NOTA** A primeira opção é mais conservativa, porém é suficiente para realizar uma avaliação cuja POD reduzida é limitada a pequenas áreas.

**10.5.4** O intervalo determinado deve ser revisado, considerando-se:

- caso de redução local de cobertura ou de POD: deve-se levar em consideração, para a determinação do intervalo, se as áreas afetadas apresentam maior suscetibilidade à degradação, como por exemplo, em regiões próximas a grandes componentes estruturais (onde a probabilidade de dano no revestimento é maior). Se este for o caso, o intervalo deve ser reduzido em relação ao intervalo previamente determinado;
- suscetibilidade ao dano do revestimento e subsequente corrosão nas áreas com falta de cobertura: os intervalos determinados pela equação supracitada são apropriados quando a perda de cobertura é predominante em regiões de alta suscetibilidade, como por exemplo, em regiões com mudança de geometria ou expostas a líquidos. Quando a perda de cobertura for predominante em regiões de baixa suscetibilidade, ou seja, em chapas contínuas expostas às atmosferas gasosas e secas, o intervalo pode ser aumentado em comparação àquele determinado pela equação. O valor do acréscimo deve ser definido em função da cobertura obtida nas áreas de alta suscetibilidade e da vida remanescente no caso de dano do revestimento. O acréscimo máximo de intervalo não pode exceder um quarto do intervalo da IVI;
- tempo em serviço do revestimento: em geral, quanto maior o tempo em serviço do revestimento, maior a sua probabilidade de falha. Se o revestimento estiver em serviço a mais de 10 anos o intervalo admissível deve ser diminuído, a menos que se tenha uma forte evidência que indique que seja improvável a degradação do revestimento ao longo do tempo em operação;
- tempo desde a inspeção mais recente que englobe a avaliação do revestimento: se o tempo for maior do que 5 anos, o intervalo deve ser reduzido em relação ao determinado pela Equação (3), especialmente se a perda de cobertura for predominantemente nas áreas de alta susceptibilidade à degradação;
- histórico de reparos no revestimento: se existirem reparos conhecidos em quaisquer das áreas com falta de cobertura, o intervalo deve ser reduzido em relação ao intervalo determinado, especialmente se as regiões com falta de cobertura forem predominantemente de alta susceptibilidade.

## 10.6 Intervalos validados

**10.6.1** Qualquer intervalo de inspeção, determinado de acordo com as recomendações de 10.3 a 10.5, deve ser revisado por pessoal competente de forma a se assegurar que todos os fatos relevantes sejam levados em consideração na implantação do intervalo revisado.

**10.6.2** Embora os intervalos obtidos na aplicação desta Norma sejam expressos em percentuais dos intervalos específicos da IVI, os intervalos admissíveis não são implementados desta forma. Os intervalos admissíveis devem ser considerados apenas como guia na decisão final, uma vez que outros fatores relativos aos requisitos de planejamento e à sincronização dos serviços podem influenciar no resultado. Por exemplo, no caso de um intervalo determinado de 32 meses, é razoável que se admita um intervalo de 36 meses (3 anos) para a inspeção. A variação de intervalo deve ser avaliada na revisão do tipo de não conformidade.

**10.6.3** Os resultados do processo de revisão e qualquer correção do intervalo de inspeção devem ser gravados e mantidos para fins de auditoria de controle de qualidade.

## 10.7 Abordagem detalhada

**10.7.1** Quando não for possível justificar uma não conformidade com base na comparação com a IVI, uma avaliação quantitativa ou semiquantitativa deve ser utilizada para este fim. Essas avaliações abrangem três principais áreas:

- a) engenharia da corrosão;
- b) desempenho da inspeção;
- c) integridade estrutural.

**10.7.2** A redução do escopo de trabalho de inspeção deve ser justificada de acordo com uma detalhada análise de risco da corrosão (ARC) e avaliação de integridade, que devem considerar os piores tamanhos de defeitos esperados e sua distribuição, as taxas de crescimento e o tamanho dos defeitos admissíveis.

**10.7.2.1** A revisão do processo de corrosão, geralmente o ponto inicial para a avaliação, deve considerar alguns dos seguintes itens:

- a) características de processo (reações químicas, temperaturas, pressões, pontos de orvalho);
- b) materiais;
- c) tipos de degradação (corrosão por pites, corrosão generalizada);
- d) locais de degradação;
- e) taxas de degradação;
- f) efeitos dos controles aplicados incluindo inibidores;
- g) atividades de monitoração;
- h) histórico de manutenção e inspeção.

**NOTA** O objetivo do estudo da corrosão é fornecer uma visualização dos prováveis tipos de degradação, sua localização, sua distribuição e as piores amplitudes de defeito desde a situação atual até a próxima inspeção.

## ABNT NBR 16455:2016

**10.7.3** Normalmente é necessária uma avaliação do desempenho da inspeção em relação aos tipos de defeitos identificados na análise dos dados de inspeção. Deve-se considerar a probabilidade de detecção de defeitos dentro de faixas de tamanho e distribuição, incluindo, quando possível, considerações sobre a área de cobertura e distribuição espacial dos defeitos (por exemplo, degradação localizada ou aleatoriamente distribuída). Entretanto, a ênfase é distinta conforme o tipo de inspeção e, independentemente do caso, as seguintes considerações se aplicam:

- em uma inspeção do tipo A, o ponto-chave está na capacidade em detectar indícios preliminares de degradação; portanto, a probabilidade de detecção deve estar relacionada com a descoberta de sinais da degradação suficientes para concluir que esta está de fato presente (uma vez que isso é o que desencadeará ações futuras);
- em uma inspeção do tipo B, existe uma menor ênfase diretamente na POD; entretanto, continua sendo essencial que o sistema de inspeção não superestime a espessura da parede; por este motivo, é importante que se tenha conhecimento da morfologia da superfície interna e qualquer limitação que possa prejudicar a definição da espessura de parede e seu registro (por exemplo, a dependência da taxa de varredura);
- em uma inspeção do tipo C, a principal preocupação, normalmente, é a capacidade de detectar grandes defeitos; nestas inspeções, os defeitos são potencialmente isolados; portanto a POD deve estar mais relacionada à detecção de defeitos isolados e menos à detecção de sinais de degradação em uma população de descontinuidades.

**10.7.4** A avaliação da integridade fornece informações de corrosão e de inspeção que permitem estimar a probabilidade de não serem detectados defeitos com potencial de ameaçar a integridade do vaso.

**NOTA** A avaliação da integridade se baseia na estimativa dos tamanhos de defeitos admissíveis (conforme definido por avaliação de adequação ao uso) e na comparação com os tamanhos de defeitos que podem não ter sido detectados na inspeção.

**10.7.5** O resultado final da avaliação deve ser uma estimativa dos resultados da inspeção realizada para aquele nível de segurança. Caso este não seja considerado aceitável, ações futuras (geralmente inspeção adicional) devem ser realizadas para o tratamento da não conformidade.

## 10.8 Exemplos

O Anexo F contém vários exemplos de aplicação do processo de decisão descrito nesta Seção.

# 11 Aplicação daINI para fins de postergação da inspeção interna

## 11.1 Introdução

**11.1.1** Esta Norma foi originalmente elaborada para situações em que a INI é uma alternativa efetiva à IVI.

**11.1.2** Esta Norma também permite avaliar se a aplicação da INI pode ser utilizada como suporte para a postergação da IVI, nas seguintes situações:

- quando o objetivo é utilizar a INI como alternativa a IVI, porém a avaliação realizada por meio desta Norma indica que essa substituição não é apropriada;

- b) quando a INI é avaliada como uma alternativa apropriada para a IVI, porém os requisitos necessários para a postergação dessa última podem ser reduzidos quando comparados aos requisitos necessários para sua substituição total.

**11.1.3** Esta Seção apresenta um método de como lidar com as situações em 11.1.2. Uma visualização da aplicação desta Seção é apresentada na Figura 21.

## **11.2 Situações nas quais a INI é avaliada como não aplicável**

### **11.2.1 Introdução**

Esta Norma trata dos seguintes casos em que a INI é avaliada como não aplicável, de acordo com os requisitos da Seção 6, mas ainda assim pode ser adequada como apoio à postergação ou não da IVI com um intervalo menor:

- a) na ausência de histórico de inspeção e inexistência de vasos similares com histórico de inspeção;
- b) quando o fluxograma da Figura 3 determinar que a INI é inapropriada.

### **11.2.2 Ausência de inspeção prévia**

A abordagem para a postergação deve seguir as recomendações apresentadas em 11.4 (casos especiais para adiamento).

**NOTA** Ao menos uma inspeção prévia no vaso em questão ou em outro vaso similar é essencial antes que a INI seja justificada. Em geral, a expectativa é que haja algum histórico de inspeção relevante para o item em consideração ou então que possa ser proveniente de outro vaso similar.

## ABNT NBR 16455:2016

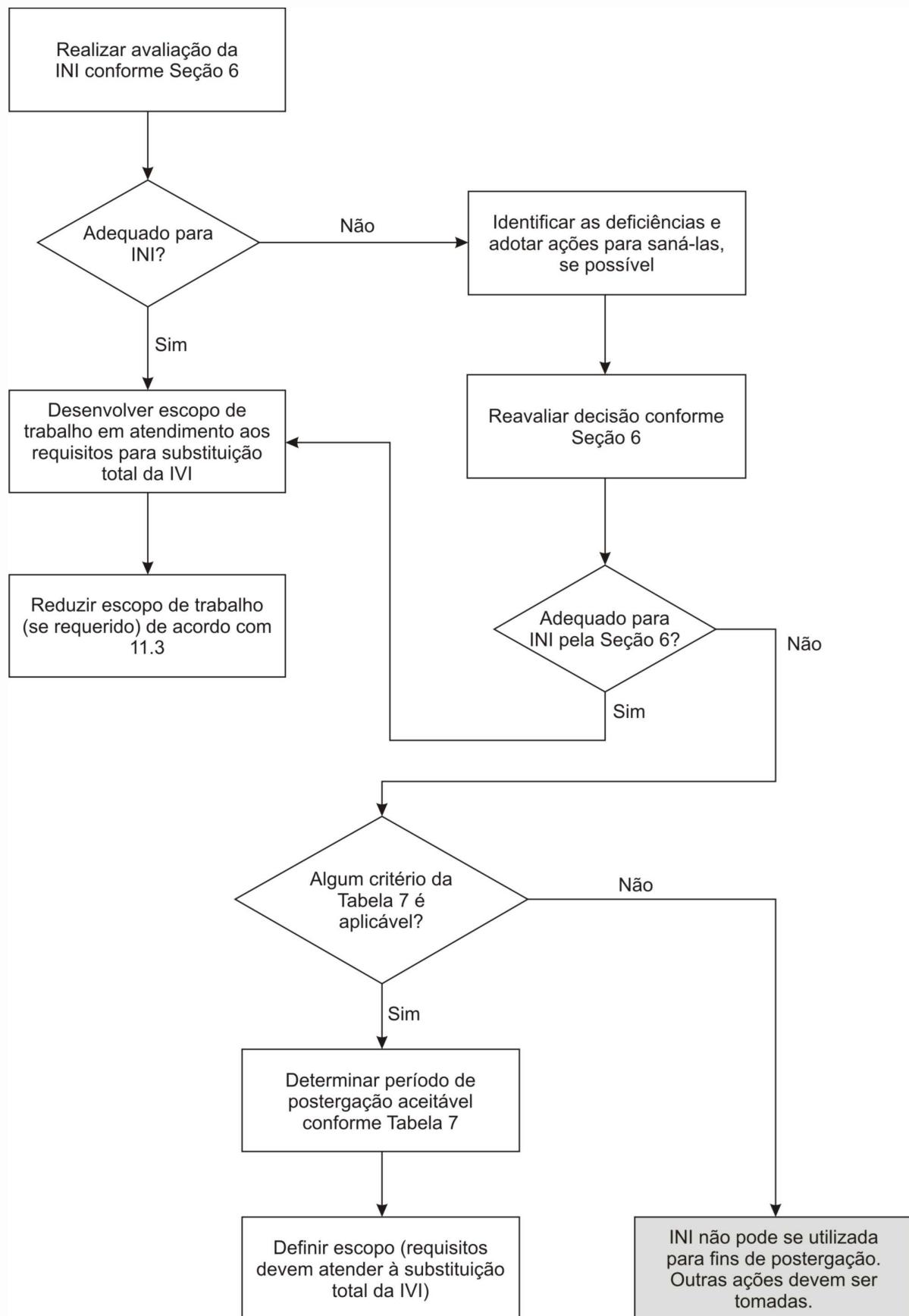


Figura 21 – Visualização da avaliação para postergação da IVI

### 11.2.3 Fluxograma determina que INI não é apropriada

**11.2.3.1** A INI não pode ser usada para a postergação da IVI quando ocorrerem as seguintes condições simultaneamente:

- a confiança na capacidade de predizer o tipo e a localização da degradação é baixa;
- a INI não pode ser aplicada de acordo com o fluxograma da Figura 3.

**11.2.3.2** Nas demais situações, existem duas maneiras para justificar a INI como opção de postergação da IVI:

- recategorização da confiança na capacidade de predizer o tipo e a localização da degradação de baixo para média ou alta. Deve ser considerado também que a severidade da taxa de degradação deve ser revisada conforme uma avaliação mais detalhada do risco de corrosão;

NOTA A nova avaliação (recategorização) requer maior compreensão da avaliação do risco da corrosão.

- a INI pode ser justificada por meio de abordagem detalhada descrita em 11.4.

**11.2.3.3** Os requisitos para a INI utilizados na postergação da IVI devem ser determinados da mesma forma como se o vaso fosse submetido ao processo de INI como substituição à IVI (ver Seção 7).

**11.2.3.4** Para os casos em que se deu a recategorização da confiança da capacidade de predizer o tipo e a localização da degradação, existem quatro cenários para os quais a INI não é recomendada, de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 3. As opções que permitem a postergação da IVI para estes casos são mostradas na Tabela 7.

**11.2.3.4.1** Em caso de postergação da IVI, deve-se justificar a decisão tomada, principalmente em situações onde a severidade e a taxa de degradação são caracterizadas como altas. A justificativa deve demonstrar que o intervalo de inspeção a partir da inspeção mais recente (a qual uma efetividade média ou alta tenha sido aplicada) até o final do período de postergação não pode exceder 75 % do tempo despendido para atingir uma condição limite, considerando:

- a perda máxima de espessura determinada pela inspeção prévia;
- o pior caso de taxa de corrosão.

**11.2.3.4.2** O pior caso de taxa de corrosão pode ser determinado por meio da avaliação de risco da corrosão (ACR). O tempo para uma condição-limite também pode ser verificado conforme a inspeção planejada, utilizando os dados atuais obtidos. O tempo de postergação permitido não pode exceder 50 % deste período. Isto significa que o tempo de postergação planejado deve ser reduzido em alguns casos.

NOTA A condição-limite aqui pode ser obtida como 90 % da espessura mínima requerida (EMR), como determinado pelo código de projeto aplicável. Esta condição está baseada na consideração de perda de espessura generalizada utilizando os princípios de adequação ao serviço (*fitness for service*) (FFS) definidos em API 579/AME FFS-1, Parte 4, que visa garantir um fator de resistência remanescente de pelo menos 90 %.

**Tabela 7 – Opções de postergação da IVI a partir da recategorização**

Cenário	Confiança na capacidade de prever o tipo e a localização da degradação	Efetividade da inspeção prévia	Severidade e taxa de degradação	Opção de postergação da IVI
1	Alta	Baixa	Alta	Até 50 % do intervalo de inspeção programado, porém com a justificativa baseada na pior taxa de corrosão desde a inspeção mais recente cuja efetividade obtida tenha sido média ou alta
2	Média	Média	Alta	Até 50 % do intervalo de inspeção programado, porém com a justificativa baseada na pior taxa de corrosão verificada desde a última inspeção
3	Média	Baixa	Alta	Até 25 % do intervalo de inspeção programado, porém com a justificativa baseada na pior taxa de corrosão verificada desde a inspeção mais recente cuja efetividade obtida tenha sido média ou alta
4	Média	Baixa	Média	Até 50 % do intervalo de inspeção programado, porém com a justificativa baseada na pior taxa de corrosão desde a inspeção mais recente cuja efetividade obtida tenha sido média ou alta

**11.2.3.4.3** Quando a avaliação de risco de corrosão (ARC) indicar que a perda de espessura é localizada e esta for confirmada por pelo menos uma inspeção (na qual a efetividade seja considerada média ou alta), a situação-limite deve ser baseada em uma avaliação conforme o API 579/ASME FFS-1, Parte 5, nível 1, para perda de espessura localizada. O tamanho da região com a perda de espessura utilizada para definição da condição-limite deve considerar os dados de inspeção disponíveis, porém esta não pode ser menor que 100 mm ou cinco vezes a espessura nominal da parede, o que for menor.

**11.2.3.5** Em situações nas quais a vida remanescente for determinada por mecanismo do tipo trincamento, como fadiga, corrosão sob tensão, ou fragilização pelo hidrogênio, a postergação pode ser considerada como em 11.2.3.3, para o caso de severidade e a taxa de degradação média.

Se a severidade e a taxa de degradação forem classificadas como altas, a postergação somente pode ser justificada com base em considerações especiais descritas em 11.4 (ver exemplo em Anexo G, G.1).

## 11.3 Requisitos de inspeção revisados para casos onde a INI seja aceitável

### 11.3.1 Introdução

Esta Subseção apresenta como o escopo da INI, anteriormente focado na substituição a IVI, pode ser modificado de modo a atender a uma postergação da IVI.

### 11.3.2 Revisões do escopo de trabalho na INI

A revisão do escopo de trabalho deve ser tratada da mesma forma que uma inspeção não conforme, de acordo com a Seção 10. Isto significa que as alterações do escopo de trabalho devem ser tais que, na pior das hipóteses, um grau de conformidade nível 3 seja atingido em relação ao escopo definido para uma substituição total da IVI.

O escopo de trabalho revisado pode ser considerado aceitável para justificar a postergação caso o período desta seja menor que o intervalo de inspeção interna permitido, determinado de acordo com a Seção 10.

#### 11.3.2.1 Inspeção do tipo A

No caso de uma inspeção tipo A, uma redução de cobertura normalmente causa menos impacto na efetividade da inspeção do que uma redução na capacidade de detecção. Isto significa que em uma revisão de escopo de trabalho, uma redução de cobertura deve ser considerada antes que uma alteração de técnica de inspeção ou outros parâmetros que possam impactar na capacidade de detecção. Os pontos a seguir devem ser considerados na avaliação de redução de cobertura:

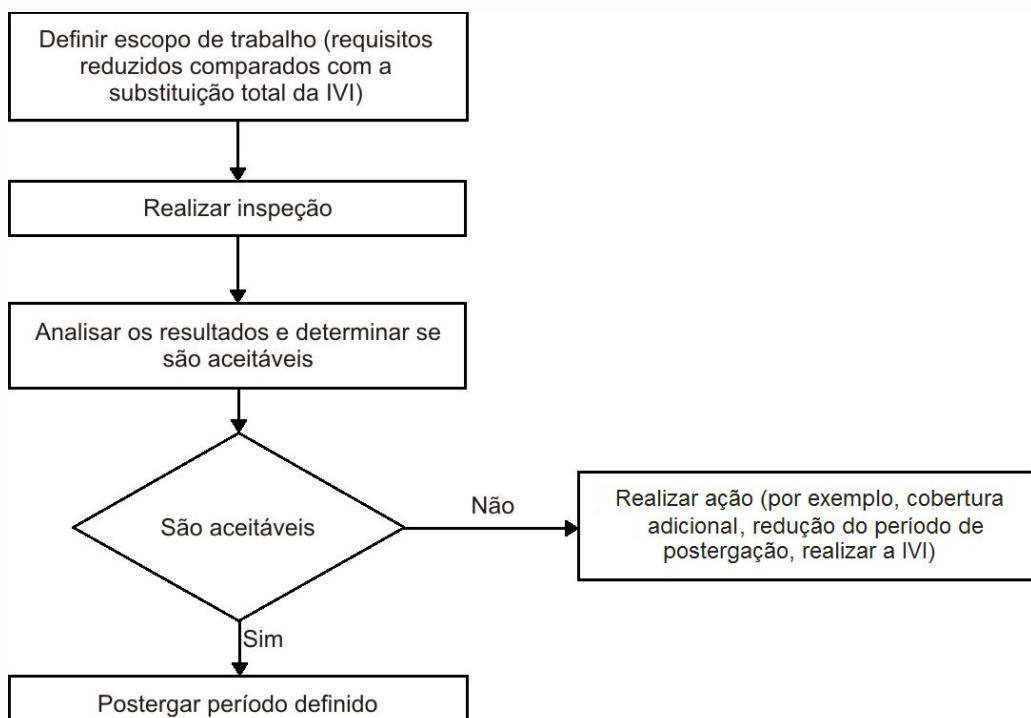
- a) a cobertura deve sempre abranger o material em cada uma das diferentes zonas de degradação do vaso;
- b) a cobertura não pode ser reduzida em regiões adjacentes a componentes nos quais se espera uma degradação mais acentuada, por exemplo, regiões adjacentes a bocais onde um mecanismo de erosão possa estar ativo;
- c) a cobertura deve manter-se de acordo com a suscetibilidade avaliada, por exemplo, maior cobertura em zonas de contato com água e de grande umidade quando comparada a zonas gasosas e secas;
- d) em determinadas situações, podem ser obtidas reduções de cobertura em chapas por meio da redução das áreas de varredura individuais, isto é, mantendo os mesmos locais, mas diminuindo a cobertura local.

Esta abordagem deve ser adotada com cautela. Entretanto, as varreduras individuais podem ser suficientes para fornecer uma amostragem confiável da área a ser considerada. A aplicação deste artifício somente é recomendada em casos onde é evidente a ausência de potenciais variações locais dentro da zona a ser inspecionada.

#### 11.3.2.2 Inspeção do tipo B

Para uma inspeção tipo B, a possibilidade de postergação é obtida com base em uma análise detalhada dos resultados da inspeção, isto é, esta somente pode ser devidamente alcançada caso a inspeção tenha sido finalizada. O processo está resumido na Figura 22.

## ABNT NBR 16455:2016

**Figura 22 – Abordagem de postergação da IVI para uma inspeção tipo B**

Reduções de cobertura e no desempenho da técnica impactam no intervalo aceitável a partir da inspeção. Não é possível determinar uma orientação específica a respeito disto, uma vez que cada situação é distinta. Entretanto, aplicam-se os princípios a seguir:

- alterações no desempenho da técnica que levem ao subdimensionamento de defeitos ou da degradação não podem ser permitidas;

**EXEMPLO** Em casos onde a análise de risco de corrosão (ARC) indique potencial para ocorrência de alvéolos de pequeno diâmetro, um maior incremento da varredura no mapeamento da corrosão somente pode ser permitido mediante a revisão dos potenciais efeitos de erros de dimensionamento.

- no caso das alterações na inspeção que levam a um aumento da variação das medidas (que vão causar uma redução do intervalo permitido) devem ser quantificadas as diferenças quando o método de inspeção for alterado para outro que disponha de informação existente. O principal parâmetro a ser considerado é o desvio-padrão associado ao erro da medida. O impacto no intervalo que deve ser validado, decorrente do aumento do desvio padrão associado ao erro da medida, pode ser significativo quando considerada a gama de equipamentos e ajustes disponíveis. Deve-se ter cautela na adoção de mudanças que possam afetar a variância das medidas e, quando necessário, o impacto destas deve ser analisado por meio de estudos de simulação, antes que o escopo de trabalho seja validado;
- reduções de cobertura devem ser realizadas com cautela, principalmente quando a cobertura inicial é relativamente baixa e são esperados níveis razoáveis de degradação. Nestes casos, estudos com simulações podem ajudar na identificação da redução máxima de cobertura que seja ainda aceitável para análise dos resultados quando a inspeção for concluída.

**NOTA** Reduções na cobertura acarretam a redução no intervalo de inspeção permitido. O tamanho da redução de intervalo não é proporcional (linear) à redução da cobertura. Os efeitos de uma redução proporcional específica na cobertura são mais significativos quando o nível de cobertura original for menor. Isto é, reduzir a cobertura de 30 % para 15 % resulta em uma maior redução do intervalo de inspeção quando comparado a uma diminuição da cobertura de 60 % para 30 %.

### 11.3.2.3 Inspeção do tipo C

Para uma inspeção tipo C, a redução na capacidade de detecção, considerada a margem de degradação aceitável, normalmente confere um impacto menor que reduções de cobertura. Isto significa que revisões do escopo de trabalho que reduzam a cobertura devem ser analisadas com cautela. Se o tempo despendido para a inspeção for um gargalo para a redução do escopo de trabalho, é preferível que se aceite uma redução de desempenho, associada às técnicas ou ajustes mais rápidos, como por exemplo, aumento na velocidade de varredura no mapeamento da corrosão, em detrimento a uma possível redução de cobertura (ver exemplo em Anexo G, G.2.).

- a) quando são propostas alterações na técnica ou ajustes, deve ser realizada uma avaliação detalhada do impacto sobre a capacidade de detecção, para o tipo de degradação e profundidades de interesse;
- b) caso a opção seja por redução de cobertura, deve ser dada preferência a áreas onde a suscetibilidade à degradação seja considerada menor, levando em conta as condições do processo e a probabilidade de falha do revestimento; no entanto, a cobertura a ser definida deve garantir que todas as áreas que sofram degradação sejam incluídas;
- c) no caso da ocorrência de reparos no revestimento, a cobertura deve abranger todas as áreas submetidas a reparos.

## 11.4 Caso especial de postergação da IVI

**11.4.1** Esta Subseção deve ser aplicada quando uma abordagem mais detalhada deve ser usada no intuito de tornar a postergação da IVI aceitável, com requisitos que podem variar de acordo com cada caso específico. A abordagem para a avaliação, no entanto, deve considerar os requisitos de 11.4.2 a 11.4.5.

**11.4.2** A revisão e a análise detalhadas dos potenciais mecanismos de degradação normalmente incluem uma avaliação de risco da corrosão (ARC) rigorosa, além de um profundo estudo de processo, controle e monitoração da corrosão e das propriedades dos materiais envolvidos. Os seguintes tópicos devem ser avaliados:

- a) tipos de degradação;
- b) taxas de crescimento para cada tipo de degradação envolvida;
- c) os locais onde cada tipo de degradação seja suscetível de ocorrer;
- d) condições adversas que podem levar à degradação acelerada;
- e) potencial para identificação incorreta ou omissão dos mecanismos de degradação.

**11.4.2.1** O estudo deve levar em consideração o histórico de inspeção da parte do equipamento em questão, assim como, os históricos e as experiências com outras partes do equipamento que podem ser de relevância.

**11.4.2.2** A abordagem para a avaliação de risco da corrosão deve atender à exigência de um ARC tipo 4 (ver 5.4 para a definição de níveis de ARC), onde há histórico de inspeção disponível ou ARC tipo 3, onde não há histórico disponível.

## ABNT NBR 16455:2016

**11.4.3** A avaliação da integridade estrutural para identificar os limites dimensionais permitidos para a potencial degradação deve ter como objetivo a determinação de limites para combinações de profundidade e extensão de defeitos. Estes limites devem ser utilizados como base para definir os critérios de aceitação e garantir que a inspeção apresente alta probabilidade de detecção e dimensionamento de defeitos com potencial para crescer até uma condição limite, dentro do intervalo de inspeção considerado. A avaliação deve ser conservadora na definição critérios de aceitação, sendo, portanto aceitável a utilização de abordagens simplificadas (conforme API 579/ASME FSS-1, níveis 1 e 2) para avaliar as condições limite.

**11.4.4** Os critérios de aceitação e abordagem devem ser definidos com base nas dimensões determinadas na avaliação da integridade estrutural. A estratégia de inspeção, as técnicas, a cobertura e os locais devem ser definidos com base nos resultados das avaliações da degradação e da integridade. Em alguns casos pode ser necessária a validação da estratégia de inspeção.

**11.4.5** A avaliação detalhada dos resultados da inspeção deve ser feita para demonstrar que a probabilidade de falha ao final do período de adiamento encontra-se dentro de um limite aceitável. A validação do intervalo de postergação só é possível depois que os resultados forem obtidos

### 11.5 Avaliação da INI como justificativa à postergação da IVI

Depois de concluída a inspeção conforme o escopo de trabalho revisto, deve ser realizada uma avaliação de acordo com a Seção 9, e todas as não conformidades devem ser tratadas de acordo com a Seção 10, consideradas, porém duas mudanças importantes:

- a) o intervalo atribuído na IBR (/IBR) é substituído pelo intervalo validado para a postergação;
- b) não é permitida reprogramação com base em uma inspeção realizada para postergação.

### 11.6 Restrições à postergação

A INI em geral só deve ser utilizada para suportar um único período de postergação, ou seja, não é a intenção desta Norma permitir períodos sequenciais de postergação. Isto só é considerado aceitável em circunstâncias excepcionais e mediante justificativa detalhada (ver 11.4).

### 11.7 Requisitos legais

**11.7.1** Esta Norma não pode ser utilizada para permitir a isenção de requisitos legais aplicáveis à postergação de inspeções programadas.

**11.7.2** Todos os requisitos legais aplicáveis devem ser analisados antes de planejar o uso da INI como apoio a uma postergação.

**NOTA 1** É prática normal a elaboração de um estudo no intuito de avaliar os riscos associados à postergação e de identificar as ações a serem implementadas no intuito de mitigar os riscos, de modo que estes não sejam significativamente maiores do que aqueles associados à operação após uma inspeção interna realizada na data de vencimento.

**NOTA 2** Em muitos casos, a inspeção não intrusiva pode ser usada como ferramenta para mitigação e a abordagem descrita nesta Norma pode ser usada como evidência em casos de postergação.

## Anexo A (informativo)

### Revisão dos métodos de END não intrusivos

#### A.1 Geral

Esta revisão fornece uma descrição breve dos princípios, capacidades e limitações dos métodos de END que podem ser considerados como não invasivos, incluindo:

- a) ensaio por ultrassom;
- b) ensaio por correntes parasitas;
- c) ensaio por líquidos penetrantes;
- d) inspeção por partículas magnéticas;
- e) ensaio de vazamento de fluxo;
- f) termografia;
- g) radiografia;
- h) *backscatter ou compton imaging*;
- i) emissão acústica;
- j) inspeção visual remota;
- k) sherografia.

#### A.2 Ensaio por ultrassom

##### A.2.1 Ensaio por ultrassom convencional

O ensaio ultrassônico convencional se baseia na geração de feixes ultrassônicos por meio de cabeçotes que contêm um elemento piezoelétrico, que é excitado por um pulso elétrico. O elemento piezoelétrico vibra e gera ondas mecânicas com frequência de vibração tipicamente na faixa de 1 MHz a 10 MHz. A onda sonora se propaga no material e a presença de descontinuidades faz com que esta seja refletida de volta para o transdutor ou para outro transdutor receptor.

Transdutores ultrassônicos convencionais podem gerar uma variedade de feixes com diferentes ângulos de incidência, o que fornece cobertura suficiente para a inspeção de toda a espessura da peça.

A inspeção ultrassônica pode ser empregada para a monitoração de corrosão por medição de espessura da parede da peça. Pode também detectar e dimensionar alvéolos.

## ABNT NBR 16455:2016

Acabamentos superficiais ruins, grandes espessuras de tinta ou inspeções em temperaturas altas ou baixas podem causar problemas para o ultrassom (embora transdutores apropriados possam ser empregados em condições específicas, como por exemplo, transdutores especialmente projetados para trabalho em altas temperaturas utilizados para inspecionar superfícies quentes).

### A.2.2 Ultrassom por imagem

#### A.2.2.1 Introdução

Sistemas de ultrassom por imagem podem ser utilizados para aumentar a confiança na detecção e dimensionamento de defeitos

#### A.2.2.2 Ultrassom por imagem automatizado

Sistemas de ultrassom por imagem combinam a tecnologia eletrônica de microprocessadores com os métodos de ensaio não destrutivos, e podem executar inspeção de vasos e tubulações a partir da superfície externa dos mesmos. Espessuras de parede de até 600 mm podem ser inspecionadas tanto para detectar defeitos originados na fabricação como em serviço (trincas, reduções de espessura ou delaminações no *clad*) em uma única varredura. Os sinais de radiofrequência (RF) completos são coletados e uma repetitividade confiável é obtida. Exames múltiplos permitem que a análise seja feita durante o processo de inspeção.

As aplicações possíveis incluem detecção e monitoração de processos de corrosão e erosão, detecção e dimensionamento de trincas de fadiga, empolamento por hidrogênio (*blistering*), trincamento pelo hidrogênio em degraus (*stepwise cracking*) e trincamento pelo hidrogênio orientado por tensão.

#### A.2.2.3 Mapeamento de espessura (corrosão) por ultrassom

Nos sistemas de mapeamento de espessura de parede, um transdutor é conectado a um computador, de forma que o valor de espessura para cada ponto de medição possa ser registrado. O transdutor é utilizado para se fazer a varredura manual da superfície e os valores de leitura obtidos são armazenados no disco rígido. Depois de terminada a varredura, os dados são plotados na forma de um gráfico contendo as espessuras da parede. Cada valor de espessura pode ser relacionado a um código de cores e as reduções da espessura por corrosão ou erosão são mais facilmente identificadas quando comparadas a uma inspeção manual. Reprodutibilidades altas (tipicamente na faixa de 0,3 mm de redução de espessura) permitem a monitoração precisa e o cálculo das taxas de corrosão.

O mapeamento de espessura de parede pode ser realizado na inspeção em serviço até temperaturas de 250 °C, utilizando-se cabeçotes e acoplantes especiais para altas temperaturas. Reduções de espessura, corrosão alveolar, perdas de espessura por erosão, corrosão induzida pelo hidrogênio e ataque pelo hidrogênio a quente podem ser detectados e visualizados.

Recentemente, houve avanços significativos na tecnologia de mapeamento de corrosão, os quais aumentaram enormemente as velocidades de varredura e reduziram os níveis de ruído, permitindo a detecção confiável de pequenos defeitos de característica alveolar. Esses sistemas são baseados em dispositivos de varredura automática de grande velocidade (*crawlers*), os quais se adaptam bem para varreduras de áreas grandes e sem obstruções, como seções entre bocais do costado de vasos de pressão.

Para a INI de vasos, o mapeamento de corrosão é amplamente utilizado para detecção e dimensionamento de corrosão e erosão internas (tanto para redução de espessura localizada como generalizada).

### A.2.3 Time of flight diffraction (TOFD)

O *Time of flight diffraction* (TOFD) é um método avançado de inspeção por ultrassom que pode simultaneamente detectar e dimensionar descontinuidades. O dimensionamento de descontinuidades é baseado em medições de tempos de chegada de sinais na direção da parede do equipamento, sendo inherentemente mais preciso que os métodos baseados na amplitude do sinal. Com o TOFD, a precisão no dimensionamento de descontinuidades na direção da parede é tipicamente de 1 mm ou até melhor.

O ensaio de TOFD fornece assinaturas reproduzíveis dos resultados, o que o torna adequado para a monitoração da condição de integridade do equipamento. Descontinuidades oriundas do processo de fabricação podem ser monitoradas e descontinuidades originadas em serviço podem ser detectadas e monitoradas quanto à sua progressão. Para a execução do ensaio, necessita-se apenas de acesso pela parte externa do equipamento a ser inspecionado. O TOFD pode ser aplicado em superfícies quentes de até 200 °C, utilizando transdutores especiais. O ensaio também permite a inspeção de soldas de vasos de pressão de parede grossa (até 300 mm de espessura). A inspeção de bocais e soldas de flanges (geometria complexa) pode ser realizada a partir de uma modelagem numérica prévia para ajudar no planejamento da inspeção e interpretação dos resultados.

Para aplicações de INI, o TOFD é frequentemente usado para a inspeção de soldas que possam apresentar descontinuidades, como erosão e/ou corrosão na raiz da solda, trincamento, falta de fusão etc. Recentemente, tem-se aplicado o TOFD na INI como método de varredura rápida para detecção e dimensionamento de perda de espessura por corrosão alveolar na parede oposta, como alternativa ao método convencional de mapeamento de corrosão.

### A.2.4 Inspeção com ondas superficiais tipo creep (CHIME – Creeping head wave inspection method)

O método para a inspeção com ondas superficiais tipo *creep* (CHIME – *Creeping head wave inspection method*) consiste na transmissão de um sinal ultrassônico entre dois cabeçotes posicionados afastados entre si (a uma distância de até um metro), varrendo-se uma superfície paralela (ou aproximadamente paralela).

O cabeçote transmissor emite um pulso ultrassônico que produz uma onda do tipo *creep* que se propaga por meio das duas superfícies de parede. Ao mesmo tempo são geradas ondas internas de ângulo crítico (ondas transversais) entre as duas superfícies. Como resultado, o volume completo de material entre os dois cabeçotes é coberto. A cobertura é obtida com pouca atenuação, permitindo que os cabeçotes transmissor e receptor estejam relativamente afastados, quando comparado a uma inspeção tradicional.

Tem-se conseguido inspecionar espessuras de parede até 40 mm com frequência operacional-padrão de 2 MHz e largura de inspeção (distância entre os dois cabeçotes) de até 1 m. As varreduras CHIME podem fornecer informações sobre a espessura de parede do equipamento (pela medição do intervalo de tempo entre picos sucessivos) ou qualquer defeito que venha a alterar localmente sua espessura de parede.

Defeitos provocados por corrosão ou trincamento reduzem a amplitude dos sinais CHIME e podem alterar os tempos de chegada dos picos, independentemente da sua localização entre o transmissor e o receptor.

O método apresenta tolerância para condições superficiais típicas de equipamentos em serviço e para a maioria dos revestimentos. Ele é sensível à presença de corrosão superficial externa e interna,

## ABNT NBR 16455:2016

fornecendo uma estimativa da extensão da área corroída e da espessura nominal entre as áreas corroídas. Alguma informação aproximada da extensão do defeito ao longo da superfície também pode ser obtida, por meio da medida da perda de sinal produzido.

O método CHIME foi testado em amostras contendo corrosão generalizada, corrosão localizada, trinca de corrosão sob tensão e trinca por hidrogênio. Os resultados demonstraram uma razoável tolerância às condições superficiais, como rugosidades grosseiras e pequenas espessuras de revestimento.

Para aplicações de INI, o CHIME é mais frequentemente aplicado em partes do equipamento não acessíveis aos métodos ultrassônicos convencionais, devido à geometria, como suportes e abraçadeiras de tubulações. O método também tem potencial para a varredura rápida de corrosão alveolar em grandes áreas do costado de vasos.

### A.2.5 M-SKIP

O método M-SKIP é uma nova técnica de inspeção por ultrassom de médio alcance desenvolvida dentro do programa do HOIS a partir de 2005. O método apresenta algumas similaridades em relação ao CHIME, porém fornece informações mais quantificadas em relação à espessura de parede e à perda de espessura por meio da análise dos tempos de chegada dos sinais.

O M-SKIP é uma variação do conhecido método TOFD, porém se baseia na utilização de cabeçotes angulares de ondas transversais, separados por distâncias requeridas para a inspeção de amplos suportes e abraçadeiras de tubulações. Os sinais percorrem a distância entre os cabeçotes onde normalmente sobrem inúmeras reflexões, ou saltos (*skips*), entre as superfícies interna e externa do componente.

Medidas de tempo de chegada dos diferentes saltos (*skip signals*) podem ser usadas para determinar a espessura média de parede entre os cabeçotes. Para áreas com perdas de espessura tanto na superfície interna como externa, os tempos de chegada de sinal são influenciados pela reflexão e dispersão devido à presença de defeitos, sendo estes reduzidos em relação à espessura nominal. Medidas das diferenças dos tempos de chegada entre os sinais de perda de espessura e os saltos (*skip signals*) permitem a determinação da profundidade máxima da perda de espessura, assumindo-se que o número de reflexões a partir da área com perda de espessura seja conhecido. Se este número de reflexões não for conhecido, pressupõe-se que uma simples reflexão no defeito proporcionará uma estimativa conservadora do valor real da perda de espessura.

Atualmente, o M-SKIP tem sido aplicado em chapas e tubos de aço-carbono com espessuras de parede variando entre 7 mm e 35 mm, com distâncias entre cabeçotes de até 1 m. As frequências típicas dos cabeçotes são entre 3 MHz e 5 MHz.

O M-SKIP tem sido aplicado em componentes de aço-carbono contendo corrosão generalizada e localizada. Para INI, o M-SKIP é aplicável em seções de componentes não acessíveis aos métodos ultrassônicos convencionais, devido à geometria, como suportes e abraçadeiras de tubulações. O método também apresenta potencial para a varredura rápida de corrosão alveolar em grandes áreas do costado de vasos e longas distâncias de sistemas de tubulação.

### A.2.6 Ultrassom à distância (*long range ultrasonics*)

#### A.2.6.1 LORUS

O princípio do método consiste no uso de um cabeçote angular de alta sensibilidade de forma que múltiplos passos ultrassônicos façam uma varredura completa da espessura de parede do componente

ensaiado. Qualquer mudança na espessura da tubulação, tanto na superfície externa como na interna, provocará a reflexão de parte do feixe ultrassônico de volta para o transdutor. Distâncias de inspeção maiores que 1 m podem ser obtidas. A amplitude da resposta proporciona uma indicação da severidade do defeito, embora não seja possível medir precisamente a redução de espessura provocada pela corrosão, ou mesmo indicar se a corrosão é externa ou interna. A superfície inspecionada deve estar isenta de sujeira ou depósitos de modo a permitir o acoplamento necessário do transdutor no local de inspeção. O método é empregado para detectar corrosão em locais com acesso limitado, como: regiões com isolamento e sobre abraçadeiras (com algumas restrições), rodapés de fundo de tanques de armazenamento ou debaixo de chapas de reforço. A interpretação dos sinais de saída é de suma importância, uma vez que os sinais que chegam no transdutor contêm também sinais que são provenientes de soldas, suportes e outros componentes geométricos, e estes podem se sobrepor aos sinais de áreas corroídas.

O *long range ultra sonics* (LORUS – ultrassom à distância) apresenta os resultados da inspeção em mapas de cores de alta resolução (a partir de imagens em 3D: superior, lateral e frontal) e as áreas corroídas são relacionadas em função da posição angular e extensão, com uma precisão de localização de  $\pm 10$  mm. O sistema LORUS pode ser utilizado em componentes com espessuras entre 6 mm e 25 mm. O sistema possibilita inspeção sobre tinta bem aderida. A presença de corrosão severa pode prejudicar a detecção de corrosão a grandes distâncias do cabeçote.

Foram realizados ensaios para investigar a capacidade do sistema LORUS na detecção de corrosão interna de vasos em regiões localizadas sobre chapas de reforço de bocais (que não podem ser detectados por ultrassom convencional com cabeçote normal). Um dos corpos de prova era um bocal soldado em uma chapa quadrada, contendo uma chapa de reforço de 90 mm de largura (direção radial). No corpo de prova foram induzidos nove defeitos que simulavam pontos de corrosão localizados em diversos pontos sob a chapa de reforço. O segundo corpo de prova, com geometria simplificada, foi fabricado a partir de uma chapa plana contendo quatro defeitos simulando pontos de corrosão. Todos os quinze defeitos foram detectados.

#### A.2.6.2 Ondas guiadas

As ondas de Lamb são ondas guiadas ou planas, que são conduzidas em chapas ou em tubos cuja espessura é de mesma ordem que o comprimento de onda do som que está se propagando nestas. O movimento da onda envolve ambas as superfícies da chapa ou do tubo, se comportam como um guia de onda acústico, permitindo a propagação de diversos modos de ondas de Lamb, cujas velocidades dependem da espessura da chapa e do comprimento de onda.

Esse método normalmente é aplicado usando-se um anel de transdutores acústicos que é fixado ao redor da circunferência externa do tubo. O método é do tipo pulso-eco e o arranjo de cabeçotes é configurado de forma que o ensaio seja realizado em uma das direções ao longo do tubo e depois em outra. Grandes distâncias (de 30 m a 50 m ou até mais) do tubo podem ser inspecionadas em ambos os sentidos a partir de um único ponto de fixação do anel. Entretanto, alguns tipos de revestimentos da tubulação (especialmente os macios, como betume ou fitas embrorrachadas) podem atenuar fortemente as ondas de Lamb e reduzir a extensão de aplicação do método.

Defeitos do tipo de perda de espessura de parede são detectados pela reflexão das ondas geradas. Para permitir a detecção, a redução de espessura deve ser tal que implique em redução da seção transversal do tubo entre 2 % e 5 % (isto varia dependendo do equipamento utilizado e das condições gerais do tubo inspecionado). A amplitude dos ecos dos defeitos detectados fornece alguma informação sobre a sua dimensão, mas não a redução de espessura máxima.

A capacidade de detecção de defeitos em regiões próximas ou no interior de acessórios de tubulação

## ABNT NBR 16455:2016

(como por exemplo, sob suportes) depende do equipamento utilizado e das habilidades do inspetor. Em alguns casos a capacidade de detecção pode ser prejudicada pela presença destes acessórios, devendo o usuário seguir as recomendações do fabricante.

Para aplicações em INI, a inspeção por ondas guiadas (ou ondas de Lamb) é normalmente empregada como um método visual (*screening*) rápido para inspeção de longos trechos retos de tubulação, embora avanços recentes permitam a inspeção de trechos curvos. Técnicas de ondas guiadas também têm sido utilizadas para inspeções rápidas de corrosão em tubulações cladeadas e com isolamento, sendo que os resultados têm apresentado boa correlação com investigações subsequentes.

Ondas de Lamb também podem ser geradas em chapas planas ou com grandes curvaturas, porém estes métodos dependem ainda de desenvolvimento quando comparados aos alcançados na inspeção de tubulações. Outros avanços têm sido utilizados para a monitoração de tubulações localizadas em áreas de risco.

### A.2.6.3 Transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT – *electromagnetic acoustic transducers*)

Os transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT) são dispositivos relativamente novos, utilizados para gerar e receber ondas ultrassônicas, oferecendo certas vantagens quando comparados aos cabeçotes convencionais (piezoeletricos). Por outro lado, os EMAT apresentam sensibilidade bastante inferior que os transdutores convencionais, sendo ainda bem caros.

Um EMAT consiste de uma bobina plana (*pancake*) pela qual circula uma corrente elétrica com frequência de rádio e um imã que produz um campo magnético estacionário. A corrente com frequência de rádio induz correntes parasitas na superfície do material e sua interação com o campo magnético resulta em forças de Lorentz ou forças magnéticas (predominantemente magnetoestritivas) que provocam a vibração da superfície de acordo com a corrente de frequência de rádio aplicada. Ondas ultrassônicas são então geradas na superfície do material e se propagam na direção perpendicular à superfície. Estas ondas podem ser detectadas após reflexão a partir de um defeito, por exemplo, pelo mesmo transdutor ou por outro diferente, funcionando de forma recíproca. Dependendo da direção do campo magnético, o EMAT pode gerar ondas de cisalhamento (polarizadas radialmente, horizontalmente ou verticalmente), de compressão ou ondas de Rayleigh.

O ultrassom EMAT não requer contato físico, uma vez que não há necessidade de fluido acoplante, podendo ser utilizado em superfícies rugosas, com carepa ou sobre pintura, embora qualquer afastamento (*lift-off*) entre o cabeçote e a peça reduza a sensibilidade do ensaio.

Cabeçotes EMAT estão atualmente disponíveis por grandes fabricantes de transdutores ultrassônicos para utilização com aparelhos de ultrassom convencionais. Entretanto, esses cabeçotes destinam-se à aplicações especiais, como medição de espessura em componentes de aço-carbono contendo camadas de magnetita formadas pela operação em altas temperaturas. A presença desta camada de magnetita aumenta significativamente as capacidades geração e detecção de ondas ultrassônicas, devido ao efeito magnetoestritivo. Para todos outros componentes de aço, sem essa camada, os EMAT ainda são objetos de pesquisa.

Os cabeçotes EMAT podem operar em metais quentes, uma vez que esses cabeçotes são facilmente mantidos em temperaturas abaixo de 100 °C mediante refrigeração com água. Podem ser usados até 700 °C, se o contato com amostra for momentâneo e até 460 °C se o contato for permanente. Espessuras entre 2 mm e 150 mm ou maiores podem ser inspecionadas. Os EMAT podem ser usados para medir espessuras em altas temperaturas com precisão de  $\pm 0,5$  mm. Os EMAT podem também ser usados em superfícies em baixa temperatura (até temperaturas de nitrogênio líquido).

Entretanto, quando o EMAT for usado como transmissor, podem ocorrer problemas devido a sua baixa sensibilidade. Uma forma desenvolvida recentemente para resolver esse problema é utilizar um *laser* para gerar ondas ultrassônicas e um EMAT como receptor; os métodos EMAT-LASER ou EMAT-EMAT são bem mais caros quando comparados aos métodos tradicionais, mas provaram ser eficientes para certas aplicações específicas.

EMAT foram utilizados para medir a espessura de paredes de garrafas de aço galvanizado em sua temperatura normal de operação acima de 450 °C. Esses recipientes normalmente são fabricados em aço com até 50 mm de espessura. O estudo indica que é possível medir a espessura de aço com precisão de  $\pm 0,5$  mm.

Atualmente, os EMAT não têm sido utilizados de forma ampla em aplicações de INI.

### A.3 Ensaio de correntes parasitas

#### A.3.1 Introdução

O ensaio de correntes parasitas é baseado na indução de correntes elétricas no material a ser inspecionado e observação da interação entre essas correntes e o material.

O ensaio de correntes parasitas convencional não se aplica a inspeção volumétrica de vasos, uma vez que a profundidade de penetração do ensaio é menor que 1 mm para materiais ferríticos e de alguns milímetros para materiais austeníticos. Ensaios de correntes parasitas avançados podem aumentar significativamente a penetração conforme descrito nesta Seção.

#### A.3.2 Ensaio de correntes parasitas pulsadas

No método de correntes parasitas pulsadas, aplica-se um pulso de corrente elétrica curto na bobina. O pulso de correntes parasitas propaga-se no material como uma onda de energia eletromagnética altamente atenuada, com velocidade de fase dependendo do material e da frequência de excitação. Para medição de espessura de parede, uma bobina de detecção deve ser posicionada próxima à transmissora com adequado escudo de proteção (*shielding*). Devido à alta dispersão na propagação da onda, mudanças na forma do pulso ocorrem ao longo da distância percorrida no material. Pela medição dos parâmetros de amplitude ao longo tempo do pulso recebido e comparando-os com o tempo de ocorrência de certos sinais com características típicas obtidas nos ensaios realizados na calibração por meio de um computador, pode-se estimar a profundidade de defeitos presentes no material. Uma mudança na espessura de parede indica a presença de corrosão ou erosão. O cabeçote não precisa estar em contato com a peça, portanto, pode ser aplicado sobre isolamento, e também sobre revestimentos espessos ou camadas de depósitos, desde que não sejam condutivos ou magnéticos.

Esse método pode ser utilizado para inspeção em serviço, possui boa repetitividade ( $\pm 0,1$  mm), é robusto e transportável, opera em uma ampla faixa de condições climáticas, pode ser empregado em componentes a temperaturas de -100 °C a 500 °C (acima desta temperatura, o uso do sistema é proibido devido à redução da permeabilidade magnética), permite medição em qualquer material não condutor e não magnético até espessuras de 100 mm (em condições favoráveis até 150 mm). *Clad* de material ferrítico até pequenas espessuras (no momento até 0,8 mm) não influencia a sua precisão e o transdutor pode estar afastado até 30 m da base eletrônica do sistema.

Entretanto, o equipamento típico é limitado à inspeção de espessuras de parede de 40 mm e diâmetros de tubulação acima de 100 mm. Detecta-se apenas corrosão generalizada ou erosão em áreas relativamente grandes. Não são detectados pequenos alvéolos isolados, e pode ser influenciado pela presença de grandes massas metálicas nas proximidades da região ensaiada.

## ABNT NBR 16455:2016

### A.3.3 Correntes parasitas de baixa frequência saturadas (*Saturated low frequency eddy current – SLOFEC*)

Este ensaio é baseado no método de correntes parasitas empregando magnetização por corrente contínua (CC). Um *yoke* de magnetização é utilizado para gerar um intenso campo magnético no material sob ensaio. Um sensor de correntes parasitas detecta perdas metálicas devido à concentração de campo magnético nesses locais.

Utilizando-se a bobina de ensaio no modo diferencial, podem-se detectar perdas de espessura localizadas, como corrosão alveolar. Perdas de espessura uniforme podem ser medidas pela utilização do sistema no modo absoluto.

O sistema de correntes parasitas saturadas (SLOFEC) pode apresentar um desempenho melhorado para algumas aplicações cujo método de campo de fuga convencional (MFL) é normalmente usado, por exemplo, em inspeção de fundo de tanques e de tubulações.

Uma das vantagens do ensaio de SLOFEC quando comparado ao ensaio de campo de fluxo clássico (MFL) é a máxima espessura de parede que pode ser inspecionada (10 mm a 15 mm para o ensaio de MFL e 30 mm a 35 mm para o ensaio de SLOFEC). Estudos recentes sugerem que o ensaio de SLOFEC apresenta sensibilidade maior para detecção de pequenos alvéolos quando comparado ao ensaio de MFL. Os dados do ensaio de SLOFEC são armazenados de forma digital, sendo que a análise das características do sinal permite identificar a localização de defeitos do tipo de perda de espessura (parede interna ou externa). O ensaio fornece informações básicas sobre a extensão da perda de espessura, porém os dados são menos quantitativos que aqueles obtidos de ensaios ultrassônicos de mapeamento de corrosão.

Para a INI, o ensaio de SLOFEC tem potencial considerável para a rápida detecção (*screening*) de processos corrosivos em vasos de pressão e tubulações.

### A.4 Inspeção por líquidos penetrantes

Ensaios por líquidos penetrantes são métodos baratos e de fácil aplicação empregados para detectar defeitos superficiais como trincas, dobras e porosidades. Grandes áreas podem ser inspecionadas, porém o ensaio é um processo lento em termos de aplicação e indicação de defeitos.

O princípio do método por líquidos penetrantes é o seguinte: inicialmente, as superfícies a serem examinadas devem ser limpas para remoção de carepas, desengraxadas e secas. O líquido penetrante escolhido (solução de penetrantes coloridos ou fluorescentes em meio oleoso líquido) é aplicado à superfície da peça e dado tempo para que este penetre nos defeitos. O excesso de penetrante é removido (por água, solvente, água e detergente ou emulsificador). Um revelador é então aplicado. Quando da presença de um defeito, após um período de tempo, o penetrante é sugado pelo revelador exatamente na posição da existência deste, provocando uma marca local em contraste com o revelador. A superfície é examinada durante todo o processo de revelação, sobre condições de iluminação adequadas. Finalmente, a superfície é limpa para prevenir a ocorrência de corrosão.

A sensibilidade da inspeção com líquidos penetrantes pode ser muito alta e é possível detectar trincas superficiais muito pequenas com aberturas de aproximadamente 1 µm.

A inspeção por líquidos penetrantes é aplicável apenas quando há acesso à superfície do componente, e consequentemente não é um método de INI.

## A.5 Inspeção por partículas magnéticas

A inspeção por partículas magnéticas é utilizada para detecção de descontinuidades superficiais ou subsuperficiais em materiais ferromagnéticos. PM é um dos métodos eletromagnéticos mais utilizados na indústria devido a sua facilidade de aplicação e por fornecer uma indicação visual direta de trincas abertas para superfície.

O método envolve a magnetização do componente na região inspecionada ou como um todo, pela aplicação de um imã permanente, eletroímã ou passagem de corrente. Um campo magnético é produzido no material. O campo magnético se distorce pela presença de defeitos, provocando uma fuga (vazamento) local do fluxo magnético.

Partículas ferromagnéticas, na forma de um pó seco, ou emulsionadas em um líquido (partículas visíveis à luz normal ou ultravioleta visíveis com iluminação fluorescente) são espalhadas na superfície da peça para revelar o campo de fuga. As partículas são atraídas pelo campo magnético e se acumulam na vizinhança do defeito, tornando o mesmo visível.

O ângulo mínimo entre o campo magnético e a orientação do defeito detectável é 30°. A sensibilidade ótima é alcançada quando o campo magnético é perpendicular à orientação do defeito. Portanto, os defeitos devem estar orientados entre 30° e 90° em relação ao campo magnético para serem detectados. Dessa forma, o campo magnético deve ser aplicado em duas direções ortogonais entre si. A inspeção por partículas magnéticas pode ser aplicada apenas em superfícies acessíveis do componente, e, portanto, não é um método de INI.

## A.6 Ensaio por vazamento de fluxo magnético (*magnetic flux leakage*)

A peça a ser inspecionada é localmente magnetizada e dependendo do valor da densidade de fluxo induzido, podem ser detectadas fugas de fluxo magnético devido à presença de defeitos localizados tanto próximos à superfície como afastados. A detecção se dá pela voltagem induzida em um sensor do tipo bobina detectora (*pickup coil*) ou elemento de efeito *Hall* posicionado na superfície da peça e transversalmente ao campo. O método não é limitado a defeitos superficiais ou subsuperficiais, embora a detecção de defeitos internos dependa de níveis altos de magnetização. A resposta do detector pode ser amplificada, filtrada, digitalizada etc., e armazenada para produzir sistemas automatizados de inspeção. Detectores com múltiplos elementos e cabeçotes específicos podem ser empregados de forma a permitir velocidades de inspeção bastante altas.

Este método apresenta aplicação crescente na indústria petroquímica por fornecer inspeções com grande velocidade na chaparia de fundo de tanques de armazenamento bem como em tubulações de aço carbono. Estes sistemas empregam tanto imãs permanentes como eletroímãs para obter condições próximas da saturação magnética nas regiões sob inspeção. Adicionalmente, o uso de conjuntos de bobinas indutivas ou de sensores de efeito *Hall* permite a detecção de campos de fuga anômalos causados pela presença de corrosão em ambos os lados da chapa. Muitos desses sistemas possuem nível de rejeição ajustável para detecção de corrosão em tempo real, enquanto que alguns sistemas mais avançados em eletrônica e processamento de sinal são capazes de produzir mapeamentos de corrosão semelhantes àqueles apresentados em sistemas de ensaios ultrassônicos por C-Scan.

A espessura máxima inspecionável encontra-se na faixa de 10 mm a 15 mm e alguma informação a respeito do valor da redução de espessura pode ser obtida, porém o ensaio de fuga campo magnético é menos quantitativo que os métodos ultrassônicos de mapeamento da corrosão.

O ensaio de MFL pode ser utilizado para INI. Dispositivos escaladores têm sido desenvolvidos para a inspeção de paredes verticais semelhantes àqueles mais convencionais, usados para inspeção de fundo de tanque.

## A.7 Termografia

A termografia é baseada na medição da distribuição de calor na superfície da peça. O efeito de defeitos na condutividade térmica e emissividade de materiais ensaiados podem ser analisados pelo método termográfico.

A termografia passiva investiga a distribuição de calor de uma estrutura por meio de uma câmera infravermelha especial capaz de identificar regiões quentes, que podem, por exemplo, ser devido às perdas de espessura de parede em um vaso ou tubulação contendo produtos quentes, ou falha localizada do isolamento térmico.

Um método alternativo conhecido como termografia transiente ou termografia pulsada consiste na indução de um pulso de calor em um componente, causado pelo aumento repentino da temperatura da superfície do componente em uma região específica, empregando uma fonte de calor (por exemplo, por meio de um bulbo de *flash* fotográfico). Foi desenvolvida pelo programa HOIS, uma fonte alternativa de calor empregando aquecimento por indução para permitir a inspeção mais efetiva de componentes de aço mais espessos.

O pulso de calor difunde para dentro do material. A razão na qual a frente de aquecimento é posteriormente dissipada depende da estrutura e da quantidade de defeitos abaixo da superfície. A temperatura superficial da estrutura é monitorada usando uma câmera infravermelha. Anomalias na distribuição de temperatura revelam a presença de defeitos ou mudanças locais na condutividade térmica devido, por exemplo, às falhas no isolamento térmico. O método torna-se mais conveniente com a utilização de gravador de vídeo ou computador para armazenar as rápidas mudanças no perfil de temperatura depois que a estrutura é aquecida. Desse modo, defeitos existentes em materiais condutores que têm apenas um efeito transitório na distribuição de temperatura podem ser detectados. A determinação das dimensões dos defeitos é normalmente obtida pela aplicação de uma segunda técnica não destrutiva, uma vez que a termografia pode estimar as dimensões de defeitos apenas em materiais com baixas espessuras.

Um novo método conhecido como termografia por tentativa e erro (*lock-in*) tem sido reportado por ser consideravelmente mais rápido, mais preciso e capaz de penetrar mais no material que o ensaio termográfico convencional. Emprega-se uma fonte modulada para energizar o material inspecionado. Entretanto, este método ainda é limitado para a detecção de defeitos localizados a poucos milímetros abaixo da superfície do material. Atualmente, ensaios têm sido realizados com frequências que permitem profundidade de penetração na ordem de 10 mm.

A termografia transiente pode ser empregada como um método rápido, sem necessidade de contato físico para detecção de defeitos ou vazios subsuperficiais. Entretanto, torna-se menos efetivo na detecção de defeitos à medida que a profundidade aumenta. Normalmente, para a detecção de um defeito, a largura desta deve ser maior que sua profundidade abaixo da superfície inspecionada. Ensaios de laboratório com aquecimento por indução, desenvolvidos pelo programa HOIS, mostraram a detecção de defeitos (com diâmetros de 15 mm a 30 mm) a profundidades de 10 mm. Defeitos menores podem ser detectados a menores profundidades.

## A.8 Radiografia

A inspeção radiográfica é uma técnica de inspeção baseada na aplicação de radiação ionizante – tanto radiação eletromagnética com comprimento de onda pequeno (raios X e raios gama), como radiação por nêutrons. A radiografia é baseada na absorção diferencial da radiação pelo material sob inspeção. Ao passar por meio do material, uma parcela da radiação é atenuada a depender da

espessura e da densidade deste. A radiação não absorvida que passa pela peça sob inspeção pode ser registrada em um meio formador de imagem, como filme radiográfico ou placas digitais usadas na radiografia computadorizada. De forma geral, a radiografia pode detectar apenas componentes que apresentem espessuras consideráveis (perda de material) na direção paralela ao feixe de radiação. Trincas estreitas em seções espessas podem não ser detectadas se não estiverem favoravelmente orientadas em relação ao feixe de radiação.

O ensaio radiográfico realizado em serviço normalmente emprega fonte de radiação com isótopo gama, principalmente o Irídio 192. Porém, o isótopo de Selênio 75, de baixa energia, também é utilizado para obter imagens de alto contraste em componentes de pequena espessura de parede. Para espessuras maiores que 85 mm, o Cobalto 60 pode ser usado, porém maiores preocupações com aspectos de segurança devem ser tomados. A fonte de maior energia disponível para aplicações em serviço é o Betatron (acelerador nuclear).

Uma das técnicas radiográficas para inspecionar tubulações de grandes diâmetros, ou mesmo pequenos vasos, é a de parede dupla vista simples (PDVS), onde apenas a seção de parede que está mais afastada da fonte de radiação contribui para a formação da imagem radiográfica, embora a radiação passe pelas duas paredes. Esse efeito é obtido posicionando-se a fonte bem próxima a uma parede. A técnica PDVS não é aplicável aos vasos com diâmetro maior que 1,5 m ou quando dispositivos internos obstruem o feixe de radiação. Também a presença de produtos líquidos no interior do vaso restringe a aplicação da radiografia devido ao aumento na atenuação no meio líquido. Para componentes contendo água, a atenuação adicional é equivalente a um acréscimo de espessura penetrada de aço igual ao diâmetro interno do vaso dividido por sete.

Métodos alternativos para inspeção de tubos de menor diâmetro e bocais de vasos incluem a técnica de parede dupla vista dupla (PDVD), onde ambas as paredes contribuem para formação da imagem radiográfica. Também não menos importante é o método tangencial que fornece uma imagem em verdadeira grandeza da parede do tubo, permitindo o dimensionamento direto na imagem de qualquer perda de parede (desde que seja usado um método de calibração considerando a distância de formação da imagem).

À medida que a temperatura de superfície do equipamento aumenta, aumentam também as dificuldades para a obtenção da imagem, uma vez que o filme radiográfico não pode entrar em contato com superfícies acima de aproximadamente 40 °C. O filme, nesse caso, precisa ser isolado termicamente. A introdução do isolamento aumenta a distância entre o equipamento e o filme, podendo provocar o aumento na penumbra da imagem (tornando seu contorno menos distinto). Normalmente este efeito é pequeno, porém pode se tornar relevante à medida que a espessura do isolamento aumenta.

O uso de fontes colimadas, que permitem reduções drásticas de área controlada, permite ainda a execução do ensaio sem a necessidade de parada operacional da planta, ou de realização do mesmo em períodos noturnos quando da diminuição das atividades.

Na radiografia computadorizada, os filmes convencionais (acetatos) são substituídos por placas digitais, que são expostas de uma forma similar ao filme convencional, mas são, posteriormente à exposição, escaneados a laser e a imagem digital resultante é apresentada em um monitor de computador. Vários aprimoramentos de imagem e rotinas de análise podem ser implementados no computador. Devido à maior sensibilidade das placas digitalizadoras em relação aos filmes convencionais, a radiografia computadorizada pode requerer tempos menores de exposição, e consequentemente implicar em menores tempos de inspeção.

**ABNT NBR 16455:2016**

Os métodos de análise computacional facilitam enormemente as medidas de perdas de espessura, por meio da técnica tangencial. Embora não seja uma técnica tão bem estabelecida, a análise dos tons de cinza também pode ser usada para estimar a espessura na direção paralela ao feixe de radiação, desde que métodos de calibração apropriados sejam empregados.

### A.9 Imagem por retroespalhamento (*backscatter compton's imaging*)

A tomografia por espalhamento de Compton é uma técnica que utiliza fótons de raios X ou gama espalhados internamente no componente sob inspeção. A fonte emite um feixe finamente colimado no material e um detector também colimado permite a medição do número de fótons que são espalhados. O sinal detectado é composto pelos fótons isoladamente espalhados no volume definido pela interseção do feixe incidente e do ângulo sólido de recepção do colimador de detecção. A quantidade de radiação espalhada é diretamente relacionada com a densidade eletrônica do material, que por sua vez é bem correlacionada com a densidade física do material. A maior vantagem que a imagem por retroespalhamento apresenta é que pode ser aplicada com acesso a apenas um dos lados do equipamento.

A técnica pode fornecer informações mesmo se o objeto for extremamente denso, ou não permita a transmissão de raios X por meio dele, ou ainda quando não houver acesso ao lado oposto. O ensaio pode ser executado na presença de revestimentos de proteção, e devido ao fato de que a fonte e o detector são posicionados no mesmo lado da peça, grandes componentes cheios (com óleo, por exemplo) podem ser inspecionados a velocidades muito maiores do que as empregadas com a radiografia por transmissão. A imagem por retroespalhamento de Compton é um método sem contato e, portanto, pode ser utilizado em temperaturas elevadas.

Para a obtenção da imagem de Compton espalhada, uma imagem tridimensional é construída ponto a ponto. O tempo necessário para obter uma imagem de um volume em particular do objeto de interesse é uma função da dimensão deste volume. As velocidades de escaneamento variam inversamente com o quadrado do volume de inspeção. Se o objetivo da inspeção for a detecção de grandes vazios, maiores velocidades de escaneamento são possíveis, implicando em menores tempos de inspeção, e consequentemente menor resolução espacial. Um arranjo de detectores é normalmente utilizado para cobrir a espessura completa da amostra atravessada pelo feixe incidente, para cada posição da fonte. Um estudo de viabilidade do uso da imagem retroespalhada de Compton com tomografia de raios gama para inspeção submarina offshore mostrou que o uso de fonte de 10 Ci de 60 Co pode proporcionar uma taxa de escaneamento de cerca de  $35 \text{ cm}^2/\text{min}$ . O estudo mostrou que esse método é capaz de detectar defeitos volumétricos de 5 mm posicionados a 32 mm de profundidade a partir da superfície do aço. Portanto, este método pode ser uma ferramenta atrativa para detecção de corrosão e/ou erosão na superfície interna de vasos. Entretanto, é um método caro e deve ser adaptado para aplicações particulares.

O maior aspecto negativo dos sistemas de imagem espalhada de Compton é o alto custo de investimento e as baixíssimas velocidades de escaneamento, limitando sua aplicação para componentes de maior valor agregado.

A técnica não é uma ferramenta de INI reconhecida na indústria de petróleo e gás, mas existe potencial para aplicações como para detecção de corrosão sob isolamento.

## A.10 Emissão acústica (EA)

Emissões acústicas são pulsos de energia de deformação elástica, liberados espontaneamente durante a deformação dos materiais. Quando um corpo repentinamente deformar-se localmente e aliviar tensões locais, um pulso de energia é emitido.

A EA pode ser liberada por uma série de razões, como deformação plástica, nucleação ou propagação de trincas, mas também por corrosão, mudanças de fase e impacto. Fatores externos, como impactos mecânicos, atrito, vibração mecânica ou operações de soldagem, também podem produzir emissão acústica.

Essas emissões se propagam por meio da peça e são detectadas pelos sensores posicionados na sua superfície, sendo a energia recebida pelos sensores convertida em sinais elétricos. Esses sinais são amplificados, armazenados, processados e visualizados. A inspeção por emissão acústica é um ensaio não direcional, uma vez que as emissões propagam-se em frentes de ondas esféricas. Portanto, um sensor localizado em qualquer posição próxima da fonte de emissão acústica pode detectá-la. Um grande volume da estrutura pode ser monitorado de uma só vez, não sendo necessário examinar regiões específicas.

Considerando que o acesso requerido é mínimo, defeitos ativos localizados em áreas inacessíveis a ensaios não destrutivos mais tradicionais podem ser detectados por EA. A posição da fonte de emissão acústica pode ser obtida por meio da triangulação dos vários transdutores posicionados em locais distintos sobre a superfície da área a ser ensaiada, monitorando o tempo de chegada dos sinais a eles. Devido à alta velocidade de propagação do som e do pequeno espaçamento entre os transdutores, a resolução em tempo deve ser de  $10^{-6}$  s para permitir precisão de localização da fonte em centímetros. Na maioria dos casos, os requisitos de inspeção são tais que os resultados de inspeção devem estar disponíveis imediatamente após sua realização. Dessa forma, a maioria dos sistemas emprega computadores para mostrar os resultados do ensaio.

A inspeção em serviço de vasos de pressão pode ser realizada durante um ensaio de pressão periódico, durante ciclos de pressão normal ou continuamente durante a operação normal do equipamento. Quando o vaso for pressurizado a pressões menores daquela na qual foi anteriormente submetido, pouca ou nenhuma emissão acústica ocorre. Portanto, nas pressurizações seguintes nenhuma emissão acústica será gerada a menos que uma trinca tenha se propagado em serviço por corrosão ou fadiga. Durante a pressurização, a tensão na trinca é modificada e produz emissão acústica. A detecção de corrosão sob tensão em serviço tem sido reportada como uma aplicação fácil e direta do método, devido à grande quantidade de emissão acústica gerada por esse tipo de defeito. Entretanto, o sucesso depende do material ensaiado em particular. Alguns materiais não produzem emissões acústicas detectáveis até o ponto próximo da fratura. Mecanismos lentos e contínuos de crescimento de trincas, assim como regiões ativas com corrosão não são detectáveis por si só, uma vez que um escoamento da estrutura não ocorre, porém podem ser detectados por meio do crescimento da zona plástica associada.

As principais vantagens do método são: cobertura de grandes áreas, detecção de defeitos em propagação e sua localização, inspeção de áreas inacessíveis, possibilidade de realizar inspeção em serviço (mesmo em altas temperaturas), e ser uma técnica não invasiva.

Entretanto, nem todos os defeitos produzem emissões acústicas detectáveis. Os métodos de carregamento devem ser analisados para garantir que promovam a detecção do crescimento da trinca. Muitos fatores podem mascarar os sinais de emissão acústica (geometria, material, tipo de fabricação, ruídos). O dimensionamento dos defeitos não é possível. Sensores especiais devem ser empregados em altas temperaturas (existem sensores de alta temperatura que operam até 260 °C).

## A.11 Inspeção visual remota

A inspeção visual remota realizada com boroscópios convencionais, boroscópios com fibra ótica e videoscópios é um método muito útil que pode fornecer informações da condição de integridade de tubos, turbinas, trocadores de calor e outros equipamentos críticos, sem a necessidade de operações demoradas e onerosas de desmontagem.

Um boroscópio é um dispositivo ótico tubular longo que permite a inspeção de superfícies internas de tubos estreitos ou compartimentos difíceis de acessar.

Boroscópios rígidos são geralmente limitados a aplicações onde exista um caminho reto entre o observador e a área a ser observada – uma varredura orbital permite ao usuário a visualização de defeitos em ângulos de 360°. O comprimento e diâmetro das sondas podem ser ajustados para obter resultados otimizados. Tamanhos típicos variam de 0,15 m até 30 m de comprimento e de 0,9 mm a 70 mm de diâmetro. A amplificação típica varia de 3 a 4 vezes, embora existam equipamentos que dispõem de aumentos de até 50 vezes.

Boroscópios flexíveis são utilizados quando não há um caminho reto até o ponto a ser observado. Existem dois tipos de boroscópios flexíveis que são: fibroscópios flexíveis e videoscópios com sensor de imagem CCD na extremidade. Os boroscópios de fibra ótica flexíveis transmitem os dados da imagem por meio de fios de fibra ótica, cada um dos quais compõe os elementos da figura da imagem final. Controles de articulação permitem ao usuário manipular a extremidade do boroscópio no interior do equipamento. Revestimentos protetivos permitem ao boroscópio operar quando imersos em líquidos. Estes se encontram disponíveis em diâmetros de 1,4 mm a 13 mm e comprimentos de até 12 m.

Boroscópios rígidos e flexíveis encontram-se disponíveis em uma grande variedade de modelos padronizados e customizados. Vários fatores podem influenciar na seleção de um boroscópio para uma dada aplicação, como focalização, iluminação, amplificação, comprimento inspecionável, direção de visão e condição ambiente.

Boroscópios podem ser fabricados para suportar diversas condições ambientais. Endoscópios rígidos-padrão podem operar em temperaturas variando de –30 °C até 150 °C, suportando até 6 bar de pressão. Endoscópios flexíveis operam em temperaturas de até 80 °C suportando pressões de 2 bar a 3 bar. Boroscópios podem ser fabricados sob medida, a fim de dispor de especificações diversas, como comprimento (até 18 m), diâmetro (mínimo de 10 mm), sistema de iluminação e revestimento protetivo, que permitam ao sistema ser utilizado em altas temperaturas (até 1 600 °C). Entretanto, o preço do sistema é diretamente relacionado com estes opcionais e pode crescer rapidamente com o aumento do desempenho ótico desejado.

Boroscópios fornecem um meio de verificar defeitos em serviço em uma grande variedade de equipamentos, e permitem a definição do aspecto geométrico da corrosão e do seu aspecto superficial, como por exemplo, em trocadores de calor.

Videoscópios são similares aos boroscópios de fibra ótica. A inspeção por meio de videoscópios implica na transmissão de imagens coloridas ou preto e branco para um monitor de imagens. A vantagem desses últimos é o alcance a distância. Devido à atenuação da luz, os boroscópios de fibra ótica têm limitação na distância de alcance, sendo que alguns videoscópios alcançam distâncias de até 30 m até o ponto de inspeção. Outras vantagens dos videoscópios sobre os boroscópios de fibra ótica são: os monitores empregados podem minimizar a fadiga ocular, não aparece um reticulado de fundo em figuras irregulares distorcidas e a formação eletrônica da imagem permite aprimorá-la e integrá-las em sistemas automáticos de interpretação. Geralmente, os videoscópios apresentam resolução superior. As câmeras de vídeo são mais sensíveis à temperatura e normalmente operam entre 0 °C e 45 °C.

## A.12 Sherografia

A sherografia consiste em um sistema de interferometria a laser sem contato usado para detectar regiões com concentração de tensões, causadas por anomalias nos materiais.

O método é sensível aos deslocamentos da superfície fora do plano de um objeto submetido a carregamento. Um feixe de *laser* é usado para iluminar coerentemente a amostra. A luz refletida da amostra é coletada por lentes fotográficas e transformada em uma imagem de interferometria sherográfica nos sensores de uma câmera CCD. A interferometria sherográfica produz uma imagem dupla no CCD. A segunda imagem apresenta-se deslocada da primeira. A interferometria registrada pela câmera CCD é indicativa de movimento na direção da câmera em um intervalo da distância sherográfica da imagem ou da inclinação da superfície da amostra. Os dados gerados pela técnica são apresentados na forma de imagem de infringência (*fringe pattern*) produzidos pela comparação dos dois estados da amostra ensaiada, uma antes e outra após a carga ser aplicada.

A sherografia pode ser aplicada a uma variedade de materiais, incluindo aço, alumínio, plástico e compósito. A sherografia é um método não destrutivo remoto, sem contato e muito rápido.

A sherografia pode ser utilizada em condições adversas, como alta temperatura, presença de radiação nuclear e plasma. A sherografia a *laser* é muito sensível às pequenas mudanças na tensão superficial causadas pela presença de defeitos subsuperficiais. Ela pode indicar mudanças de tensão de até 0,1 microstrain. Entretanto, a sherografia não é empregada como um método de INI pela indústria de óleo e gás.

## A.13 Efetividade dos métodos e técnicas de inspeção

A Tabela A.1 indica a efetividade dos métodos e técnicas de END, apresentados neste Anexo, em função do tipo de descontinuidade.

A Tabela A.2 apresenta as condições para as quais os métodos de END apresentados neste Anexo são efetivos.

## ABNT NBR 16455:2016

**Tabela A.1 – Efetividade dos métodos de END não intrusivos por tipo de descontinuidade**

Tipo de descontinuidade	Método de inspeção	Efetividade da inspeção (baixa, média, alta)	
		Detecção	Dim. <sup>a</sup> na espessura
Perda de espessura generalizada			
	US pulso-eco 0° onda de compressão	A	A
	Mapeamento por US (C-Scan)	A	A
	US EMAT	M	M
	<i>Phased array</i>	A	A
	M-SKIP	A	A
	Correntes parasitas pulsadas	A	M
	Radiografia com filme	M	B
	Radiografia computadorizada (tangencial em tubos)	M	M
	Vazamento de fluxo magnético	B	- <sup>b</sup>
	SLOFEC	B	- <sup>b</sup>
Perda de espessura localizada, corrosão alveolar			
	US pulso-eco 0° onda de compressão	A	M
	Mapeamento por US (C-Scan)	A	A
	US TOFD	A	A
	<i>Phased array</i>	A	A
	M-skip	A	M
	Radiografia com filme	A	B
	Imagem por retroespalhamento	A	B
	Radiografia computadorizada (parede dupla com análise computadorizada dos níveis de cinza da imagem)	A	M
	Vazamento de fluxo magnético	M	B
	US CHIME	A	B
	Termografia pulsada	M	B
	US a distância (onda de Lamb)	M	A
	Sherografia	B	- <sup>b</sup>
	SLOFEC	A	- <sup>b</sup>

**Tabela A.1** (continuação)

<b>Tipo de descontinuidade</b>	<b>Método de inspeção</b>	<b>Efetividade da inspeção (baixa, média, alta)</b>	
		<b>Detecção</b>	<b>Dim.<sup>a</sup> na espessura</b>
Trincas abertas para a superfície			
	Correntes parasitas ACFM (inspeção apenas da superfície)	M	M
	<i>Phased array</i>	A	A
	Líquidos penetrantes (inspeção apenas da superfície)	A	- b
	Inspeção por partículas magnéticas (inspeção apenas da superfície)	A	- b
	US pulso-eco ondas transversais (parede oposta e de acesso)	A	M
	US TOFD (parede oposta e de acesso)	A	A
	Ondas guiadas	M	- b
	Emissão acústica (parede oposta e de acesso)	M	- b
Trincas internas			
	US pulso-eco ondas transversais	A	M
	US TOFD	A	A
	<i>Phased array</i>	A	M
	Radiografia com filme	M	- b
	Radiografia computadorizada	M	- b
	Emissão acústica	M	- b
Vazios volumétricos internos			
	US pulso-eco 0° onda de compressão	M	- b
	US pulso-eco ondas transversais	A	B
	US TOFD	A	A
	<i>Phased array</i>	A	B
	Radiografia com filme	A	B
	Sherografia	B	- b
	Termografia pulsada	M	B
	Radiografia computadorizada	A	M

**Tabela A.1** (continuação)

Tipo de descontinuidade	Método de inspeção	Efetividade da inspeção (baixa, média, alta)	
		Detecção	Dim. <sup>a</sup> na espessura
Anomalias	Termografia	M	B
Erosão na raiz da solda	US TOFD	A	A
	US pulso-eco onda transversal	M	M
	US pulso-eco 0° onda de compressão (se o reforço de solda for removido)	A	M
	Mapeamento por US (C-Scan) (se o reforço de solda for removido)	A	A
	Termografia pulsada	M	B
	Radiografia com filme (método de dupla parede)	M	B
	Radiografia computadorizada (tangencial aos tubos)	A	M

<sup>a</sup> Dimensionamento<sup>b</sup> Não aplicável

**Tabela A.2 – Efetividade dos métodos de END não intrusivos**

Método de END	Espessura de parede mm	Materia a	Fixa de temp	Acabamento superficial	Sens b dade menor descontu dade detectáve	Prec são / Repet b dade	Produt v dade <sup>b</sup>	Matur dade do método <sup>c</sup>	Loca do defe to <sup>d</sup>	T po de defe to <sup>e</sup>	Componente do vaso na qual é ap cáve f	Restri ção de acesso <sup>g</sup>	Limita ções / comentar os Requisitos de ensa o
1 US pulso-eco onda transversal	6 a 300	Capacidade reduzida pra soldadas austenícas e duplex	Aé 250 °C usando cabeçotes especiais	Revestimento uniforme de até 1,5 mm	1 mm a 5 mm dependendo da geometria	Ero médio ± 3 mm para inspeção de solda	20 m de solda/ dia	Altos valores de POD publicados	ID	Trinca superficial e interna, volume	Capacidade de inspeção de solda depende da geometria e do procedimento de IS	Cabeçotes pequenos	Revestimentos bemaderidos são permitidos Componentes do vaso como suportes, olhais e chapas de reforço implicam na restrição de áreas para inspeção pontual
2 US pulso-eco 0° onda de compressão	2 a 300	Capacidade reduzida pra soldadas austenícas e duplex	Aé 250 °C usando cabeçotes especiais	Revestimento uniforme até 1,5 mm	0,5 mm para valores típicos espessura de parede, dependente da espessura	Medidor de espessura digital ±0,1mm ideal, ±0,5mm típico	1000 pontos/ dia, lento	Altos valores de POD publicados	ID/OD	Perda de espessura generalizada e localizada, volume, empolamento	Cabeçotes pequenos	Revestimentos bemaderidos são permitidos Componentes do vaso como suportes, olhais e chapas de reforço implicam na restrição de áreas para inspeção pontual	

## ABNT NBR 16455:2016

Tabela A.2 (continuação)

Método de END	Espessura de parede mm	Materia a	Fixa de temp	Acabamento superficial	Sens b dade menor descont nu dade detectáve	Prec são / Repet b dade	Produt v dade <sup>b</sup>	Matur dade do método <sup>c</sup>	Loca do defe to <sup>d</sup>	T po de defe to <sup>e</sup>	Componente do vaso na qual é ap cáve <sup>f</sup>	Restr ção de acesso <sup>g</sup>	Limitações / comentár os Requisitos de ensa o	
3	Mapeamento a corrosão por US C-Scan 0° onda de compressão	2 a 300	Conforme US pulso-eco	Até 125 °C (contato demorado)	Conforme US pulso-eco	0,5 mm para valores típicos espessura de parede, dependente da espessura	± 0,1 mm ideal ± 0,5 mm típico	2 m <sup>2</sup> a 3 m <sup>2</sup> Até 16 m <sup>2</sup> mecanizado	Altos valores de POD publicados	ID	Perda de espessura localizada, empolamento	Superficial	Cabeçote e encoder ou dispositivo mecanizado com rodas	Regiões de varredura Mapa de cores de magnéticas Manipulação posterior à inspeção quando P-Scan (varredura progressiva) é utilizado
4	UTOFD	8 a 300	Restri a materiais com grãos finos	Conforme US pulso-eco	Conforme US pulso-eco	3 mm dependendo da geometria	± 0,5 mm ideal ± 2 mm típico	Solda 40 m/dia	ID, intemo	Trinca interna e superficial, volume	Soldas em ângulo, geometrias complexas	Carimho ou correia tracionadora	Rápida inspeção de soldas. Interpretação posterior dos dados de inspeção Zona morta de 2 mm a 4 mm abaixo da superfície	
5	US CH ME	Até 40	Conforme US pulso-eco	Aplicações nomais até 60 °C	Conforme US pulso-eco	Mínimo 10 % da espessura de parede, dimensão lateral > 15 mm	10 mm na localização	Velocidade de inspeção 1 m/min	Valores médios de POD publicados	Sem distinção entre ID e OD	Perda de espessura generalizada, localizada e trincamento	Chapa de reforço, suportes, olhais, Varredura do casco	Cabeçote e manipulador	
													Sinal não quantitativo, grau do dano pode ser estimado	

**Tabela A.2 (continuação)**

Método de END	Espessura de parede mm	Mater a <sup>a</sup>	Faixa de temp	Acabamento superficial	Sens b dade menor descont nu dade detectáve	Prec são / Repet b dade	Produt v dade <sup>b</sup>	Matur dade do método <sup>c</sup>	Loca do defeito <sup>d</sup>	T po de defeito <sup>e</sup>	Componente do vaso na qual é ap cáve <sup>f</sup>	Restr ção de acesso <sup>g</sup>	Limitações / comentár os Requisitos de ensaio
6 US à distância (onda de Lamb)	Tubos de 2 pol a 48 pol de diâmetro	Em geral, apenas tubos de aço-carbono	-25 °C a 125 °C Até 160 °C	Similar a US pulso-eco. Melhor para superfícies sem pintura ou revestimento	Min. 5 % a 9% da área da seção transversal do tubo	–	Tipicamente 1 km/dia	Valores médios de POD publicados	Sem distinção entre ID e OD	Perdida de espessura localizada, trincamento	Cabegote em anel posicionado ao redor do tubo.	Acesso a 0,5 m de tubo sem revestimento ou pintura (bare)	Funciona melhor em tubulações retas. O anel de sensores necessita estar a pelo menos 1 m da solda circumferencial mais próxima. Alguns tipos de revestimento limitam o alcance do método (por exemplo, betume)
7 US EMAT	10 a 150	Conforme US pulso-eco	-200 °C a 460 °C	Superfícies grosseiras aceitáveis em princípio, porém reduzem ainda mais a sensibilidade	Conforme US pulso-eco em condições ideais, tipicamente muito pior	Conforme US pulso-eco	Baixa	ID	Conforme US pulso-eco	Pequenos cabegotes	Sensibilidade muito menor que US com cabeçotes convencionais	A principal aplicação é medição de espessura de parede em componentes com camada superficial de magnetita US sem contato é possível	

## ABNT NBR 16455:2016

**Tabela A.2 (continuação)**

Método de END	Espessura de parede mm	Materia <sup>a</sup>	Fixa de temp	Sens b dade menor	Acabamento superficial	Preç sâo/ Repet b dade	Produt v dade <sup>b</sup>	Matur dade do método <sup>c</sup>	Loca do defeito <sup>d</sup>	Tpo de defeito <sup>e</sup>	Componente do vaso na qual é ap cáve <sup>f</sup>	Restr ção de acesso <sup>g</sup>	Limitações/ comentár os Requisitos de ensa o
8	Correntes parasitas ACM	Não aplicável	A tê 150 °C usando sondas especiais	Todos	Revestimentos permitidos com restrições	Condições ideais, profundidades de trincas > 1mm e comprimento > 10 mm	Média	Alta	Apenas OD	Trincas sobre revestimento	Soldas, limitado a superficie	Pequenos cabeçotes	Sondas com múliplos elementos para varredura de superficies, possibilidade de medição da profundidade de trincas. Óxidos e depósitos ferromagnéticos podem influenciar a inspeção
9	Correntes parasitas pulsadas	6 - 60 (máximo 150 mm de isolamento)	Aço-carbono de baixa ligा, restrito para chapas ferromagnéticas laminadas	- 100 °C a 500 °C	Sem contato, por meio do isolamento	5 % da espessura de parede (medida relativa)	Precisão 5 % da espessura	1 000 pontos/dia	Quando isolado, sem distinção entre ID e OD	Perda de espessura generalizada, volume	Pontos da superficie	Cabeçote com dimensão 100 mm a 250 mm	Detecção de corrosão e erosão generalizada se a área com dano for maior que 500 mm <sup>2</sup> , não detecta corrosão alveolar, influenciado por metais nas proximidades

**Tabela A.2** (continuação)

Método de END	Espessura de parede mm	Materia a	Fixa de temp	Acabamento superficial	Sens b dade menor descont nu dade detectáve	Prec são / Repet b dade	Produt v dade <sup>b</sup>	Matur dade do método <sup>c</sup>	Loca do defe to <sup>d</sup>	T po de defe to <sup>e</sup>	Componente do vaso na qual é ap cáve <sup>f</sup>	Restr ção de acesso <sup>g</sup>	Limitações / comentários Requisitos de ensa o
10	Correntes parasitas saturada de baixa freqüência (SLOFEC)	Até 35	Todos, medição de espessura para ferromagnéicos, capacidade reduzida para outros, porém semelhante a correntes parasitas	Até 60 °C	Sem contato, máx. 8 mm de revestimento	15 % espessura de parede	10 m <sup>2</sup> a 50 m <sup>2</sup> por dia	Média	Perda de espessura localizada, volume	Perda de espessura entre ID e OD é possível	Equip. pesado devido aos imãs	Varedura rápida de grandes áreas Perda de espessura mínima de 1,4 mm <sup>3</sup> de volume pode ser detectada em condições favoráveis	
11	Líquidos penetrantes	Não aplicável	Todos os materiais não porosos	10° C a 50° C	Livre de carepas, óxidos, sujeiras, óleos, graxas ou pinturas	Tudo que seja visível	—	20 m/dia	Altos valores de POD publicados	Apenas trincas superficiais externo (OD)	Todas as geometrias	Não aplicável	Superfície necessita estar bem limpa. Menos confiável que PM para materiais ferromagnéticos
12	Inspeção por partículas magnéticas	Não aplicável	Ferromagnético	Até 100 °C	Livre de carepas, óxidos, sujeiras, óleos, graxas ou pinturas	Tudo que seja visível	—	40 m/dia	Altos valores de POD publicados	Apenas trincas superficiais externo (OD)	Depende do yoke	Dimensão do yoke 300 mm	Tinta de contraste pode ser utilizada. Uso de partículas "víva seca" para altas temperaturas

## ABNT NBR 16455:2016

Tabela A.2 (continuação)

Método de END	Espessura de parede mm	Mater a <sup>a</sup>	Fixa de temp	Acabamento superficial	Sens b dade menor	Prec são / Repet b dade detectáve	Produt v dade <sup>b</sup>	Matur dade do método c	Loca do defe to <sup>d</sup>	T po de defe to <sup>e</sup>	Componente do vaso na qual é ap cáve <sup>f</sup>	Restr ção de acesso <sup>g</sup>	Limitaçõe s/ comentár os Requisitos de ensa o
13	Fuga de fluxo magnético (MFL)	4 - 10	Ferromagnético	Até 60 °C	Revestimento superficial de máx 3 mm, superfície limpa	Mínimo de 30% de perda de espessura ou 20 mm <sup>3</sup>	–	10 m <sup>2</sup> a 50 m <sup>2</sup> por dia	Altos valores de POD publicados	Sem distinção entre ID e OD	Perda de espessura localizada, volume	Tamanho médio de equip. 300 mm x 300 mm	Varredura rápida de grandes áreas Varredura de paredes e tubulações, não aplicável para fundo de tanque
14	Termografia	Superficial	Não aplicável pulsada	Método sem contato, -20 °C a 1 000 °C	Depende da emissividade da superfície	Variações de temperatura de 0,2 °C a 1 m, 10 °C a 100 m	–	Depende da aplicação	Alta	Externa (OD), indicação para defeitos internos	Anomalias	Superficial	Não aplicável Indicação de presença de defeitos. Depende da emissividade da superfície da amostra e da distância. Filtros acima de 500 °C. Linha de visão requerida
15	Radiografia convencional	Ir-192 até 100 mm de espessura penetrada	Todos	Max. 40 °C	Não aplicável	2 % de espessura de parede	–	Lento, depende de acesso e cuidados com radiação (legislação)	Alta	Interno (ID) e externo (OD) inserido na espessura	Pontos críticos, soldas, bocais	Acesso a ambos os lados	Técnica de dupla-parede limitada aos vasos com diâmetro menor que 1,5 m. Técnica tangencial possível em serviço. Restrições de segurança devido à radiação

**Tabela A.2** (continuação)

Método de END	Espessura de parede mm	Materia	Fixa de temp	Acabamento superficial	Sens b dade menor	Prec sô / Repet b dade	Produtv dade <sup>b</sup>	Matur dade do método <sup>c</sup>	Loca do defe to <sup>d</sup>	T po de defe to <sup>e</sup>	Restr çao de acesso <sup>g</sup>	Componente do vaso na qual é ap câve <sup>f</sup>	Limitações / comentários os Requisitos de ensaio
16 Radiografia computadorizada	Similar à radiografia com filme	Todos	–	Não aplicável	2 % da espessura de parede	–	Mais rápido que radiografia convencional. Depende do acesso e restrições legais de uso	Média	ID/OD	Perda de espessura localizada e generalizada	Conforme radiografia convencional	Acesso a ambos os lados, movimento do manipulador	Em serviço. Limitações legais e normativas devido à segurança no trabalho com radiações
17 Emissão acústica	–	Todos	Normalmente máximo 60 °C	Conforme métodos de inspeção 1 e 2 para cabeçotes	Apenas descontinuidades em propagação	Informação da posição	Todo o vaso	Média	ID/OD interno	Trincas em propagação, trincas e corrosão em iniciação	Todo vaso	Pequenos cabeçotes	Extremamente sensível a influências do ambiente

a Aço-carbono, aço inoxidável (inclusive inconel), duplex.

b Velocidade sobre condições normais

c Experiência na aplicação do método (baixa / média / alta) e valores de POD conhecidas.

d OD é detecção de indicações no lado afastado, ID é lado próximo (cabeçote, sonda), distinção entre ID/OD possível, falhas internas na espessura podem ser detectadas.

e Descrição do dano, principal característica do método. Trincas podem ser superficiais ou inseridas na espessura.

f Tipo de componentes suscetíveis ao método. Soldas: de topo, em ângulo ou de geometria complexa. Superfície com acesso total (área inspecionada igual à área do cabeçote). Volume significa volume de material inspecionado e local de contato dos cabeçotes não são necessariamente os mesmos.

g Aborda do ponto de vista do método de END, como a área necessária para realização do ensaio. Na maioria dos casos determinado pelo tamanho da sonda ou cabeçote (unidades independentes).

## Anexo B (informativo)

### Abordagem estatística para a INI

#### B.1 Geral

##### B.1.1 Prefácio

Uma gama de métodos estatísticos pode ser usada em apoio à quantificação de vários aspectos do procedimento de INI. Este Anexo apresenta alguns dos principais métodos que podem ser usados em apoio ao programa de inspeção, assim como na avaliação dos dados por ela obtidos.

A primeira Seção apresenta uma abordagem estatística para estabelecer os intervalos de inspeção necessários para assegurar uma operação segura. São apresentados também dois exemplos de métodos estatísticos que podem ser úteis para a avaliação de resultados de END utilizados na INI.

O primeiro método é a análise estatística do valor extremo, que pode ser útil para prever qual a profundidade máxima de um alvéolo de corrosão esperada para uma determinada região de um vaso de pressão, baseada na inspeção por amostragem nessa mesma região. Ele também pode ser usado para ajudar a determinar o tamanho da amostragem necessária para alcançar um determinado nível de confiança nos resultados obtidos.

O segundo exemplo cobre o uso de métodos estatísticos para determinar qual a probabilidade de detecção de pelo menos um defeito em função do tamanho da amostra, e qual a amplitude (espalhamento) da degradação e se esta está ativa.

##### B.1.2 Símbolos e abreviaturas

Os símbolos e abreviaturas a seguir são utilizados nas equações deste Anexo.

$C_{ov}$	é o percentual do volume da solda coberto
$D_d$	é a distribuição percentual dos defeitos
$F(x, x_i)$	é a distribuição do tamanho ao final do intervalo especificado
$F_1(x)$	é a função da distribuição de Gumbel
$f_i$	é a proporção da população total de defeitos constituída daqueles dentro da faixa inicial de tamanho
$G(x, \mu, \sigma)$	é a distribuição normal do crescimento de um dado defeito em um intervalo de tempo
$POD(x)$	é a probabilidade de detecção
$POF_a$	é a probabilidade de falha após a inspeção
$POF_b$	é a probabilidade de falha antes da inspeção
$POI$	é probabilidade da inclusão de um defeito

PON	é a probabilidade de não detectar defeitos
$p(x)$	é a distribuição inicial da população de defeitos
$p_a(x)$	é a distribuição probabilística após a inspeção
$p_b(x)$	é a distribuição probabilística antes da inspeção
$S(x)$	é a distribuição de tamanhos de defeitos
$\mu$	é o crescimento do defeito
$\sigma$	é o desvio-padrão do crescimento

## B.2 Bases estatísticas para um programa de inspeção

### B.2.1 Introdução

Tradicionalmente, os intervalos de inspeção são geralmente especificados com base em exigências ou requisitos Legais. Entretanto, mais recentemente, análises de risco têm sido levadas em conta. Se a INI for especificada para uso em conjunto com a IVI ou como alternativa a esta, então uma base aceitável para a determinação de seus parâmetros levaria em conta que os níveis de risco não poderiam ser aumentados. Para qualquer vaso de pressão em particular, isso significaria que não haveria um aumento na probabilidade de falha do mesmo (*POF*, do inglês) no caso da aplicação da INI.

A abordagem sugerida nesta seção objetiva comparar a natureza da evolução da probabilidade de falha sob diferentes regimes de inspeção assumidos. Esta comparação é então usada no desenvolvimento de uma base para a determinação de uma estratégia aceitável para a INI.

### B.2.2 Probabilidade de falha

A probabilidade de falha é determinada em função da possível existência de um defeito com tamanho maior que o crítico. Dada uma distribuição probabilística conhecida para os tamanhos da população de defeitos e tamanho de defeito crítico, a probabilidade de falha pode ser calculada como a área sob a curva de distribuição para defeitos maiores que o tamanho crítico.

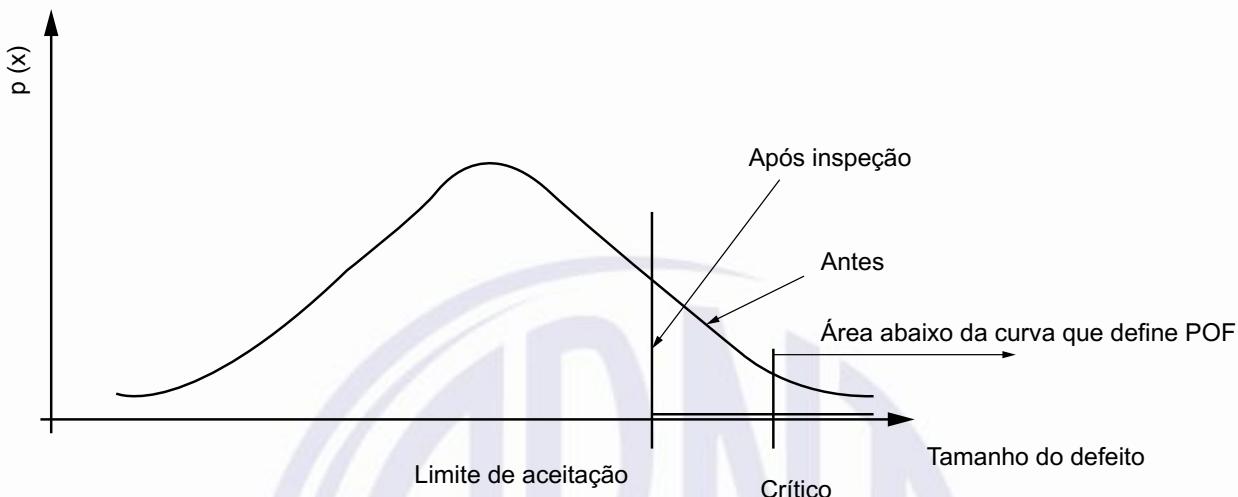
Em muitos casos, o tamanho do defeito crítico não varia com o tempo. Entretanto, a distribuição probabilística é tipicamente dependente do tempo, como resultado do crescimento do defeito pela atuação de uma variedade de mecanismos em potencial. A natureza desse crescimento com o tempo, portanto, tem uma influência direta na probabilidade de falha. Com o crescimento, há uma maior probabilidade de defeitos excedendo o tamanho crítico, o que leva a probabilidade de falha a aumentar com o tempo.

Uma inspeção objetivando a identificação e dimensionamento de defeitos, juntamente com ações apropriadas (reparo ou reprovação) tomadas quando estes excedem um determinado tamanho, reduz a probabilidade de falha. Esta é a consequência da distribuição probabilística sendo modificada para defeitos com tamanhos maiores que um limite aceitável definido.

A natureza da redução da probabilidade de falha está diretamente relacionada com a probabilidade de detecção (POD) do END executado. Um END com POD de 100 % para defeitos maiores que o limite aceitável reduz a probabilidade de falha à zero. Portanto, a distribuição probabilística, definida como  $p(x)$ , antes e depois da inspeção, se apresenta como mostrado na Figura B.1.

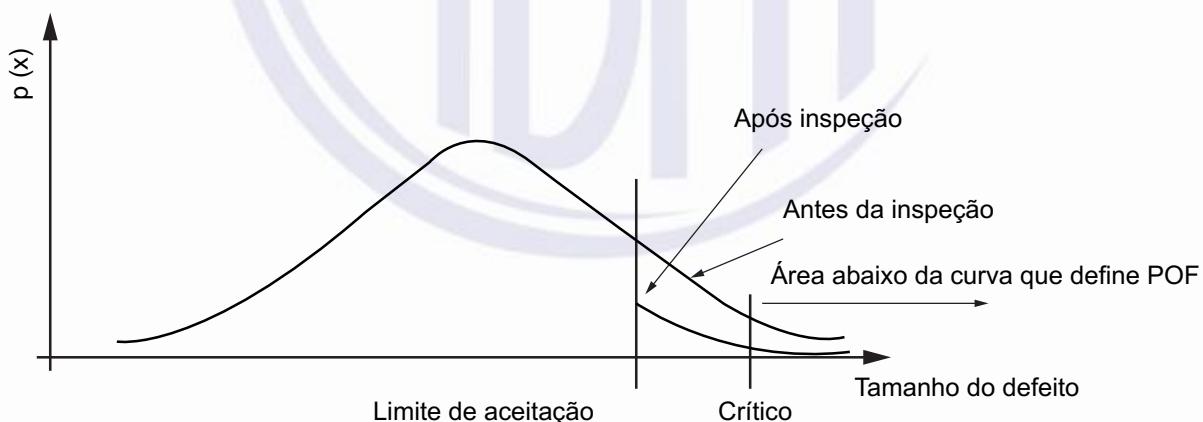
## ABNT NBR 16455:2016

Notar que na prática há uma modificação da curva para defeitos menores que o tamanho aceitável, devido à imprecisão do método de END, que leva à indicações espúrias. Isto, no entanto, não é considerado neste Anexo e é assumido que o método de END tem uma taxa de indicações espúrias igual a zero.



**Figura B.1 – Efeito do END com  $POD = 1$  na distribuição probabilística**

Poucos métodos de END provêm um POD de 100 %, logo o caso mostrado na Figura B.1 não é típico. Normalmente, o POD é menor do que 100 %, e função do tamanho do defeito. No entanto, a inspeção reduz de algum modo a probabilidade de defeitos maiores do que o tamanho aceitável, ao invés de eliminá-la. Um caso mais típico está ilustrado na Figura B.2.



**Figura B.2 – Efeito do END com  $POD < 1$  na distribuição probabilística**

Para uma distribuição probabilística, antes da inspeção, definida por  $P_b(x)$  e uma probabilidade de detecção por  $POD(x)$ , a distribuição probabilística após a inspeção é dada por:

$$P_a(x) = P_b(x) \text{ para } x \leq x_{aceito} \quad (4)$$

$$P_a(x) = [1 - POD(x)] \cdot P_b(x) \text{ para } x > x_{aceito}$$

A probabilidade de falha antes da inspeção é dada por:

$$\text{POF}_b = \int_{x_{\text{crítico}}}^{\infty} P_b(x)dx \quad (5)$$

E a probabilidade de falha após a inspeção é dada por:

$$\text{POF}_a = \int_{x_{\text{crítico}}}^{\infty} [1 - \text{POD}(x)] \cdot P_b(x)dx \quad (6)$$

Obviamente, quanto maior for o POD do END, menor é a probabilidade de falha após a inspeção. Essa probabilidade mais baixa é mantida em parte até a próxima inspeção por meio da mudança do efeito na distribuição probabilística. A forma como esta última se desenvolve entre as inspeções, no entanto, depende muito da natureza do crescimento da falha e da sua forma depois da inspeção. Esse crescimento indica que a distribuição da falha depende do tempo e, portanto, da mesma forma, o mesmo acontece com a probabilidade de falha, que tende a aumentar durante os intervalos de tempo entre as inspeções. Quanto menores forem esses intervalos (aumento da frequência das inspeções, por exemplo), menores são as probabilidades de falha. Além de ser uma função do crescimento da falha entre inspeções, a forma da distribuição após a inspeção é dependente também da probabilidade de detecção-POD e da margem entre defeitos críticos e aceitáveis. Por isso, pode-se concluir que a probabilidade de falha é função do tempo (que define o processo de crescimento), do intervalo entre inspeções, do POD do END, e da margem entre os defeitos críticos e os aceitáveis.

Uma vez que os processos de crescimento são muito frequentemente determinados pelo projeto do equipamento e suas condições de operação, seu controle por meio da probabilidade de falha é tipicamente possível somente por meio da variação dos intervalos de inspeção, do POD e da margem entre defeitos toleráveis e críticos. A definição do tamanho de defeito aceitável não é usualmente atribuição do operador e, por isso, a gestão da segurança depende substancialmente da especificação adequada dos intervalos de inspeção e de seu método (END), sendo este último o que define o POD.

De maneira a ganhar algum conhecimento de como o intervalo e o POD podem afetar a probabilidade de falha, é usual considerar alguns exemplos representativos.

O caso a ser considerado a seguir assume um processo de crescimento com taxa constante em média, mas que permite alguma variação, como definido em uma distribuição normal. Isto seria típico para processos do tipo corrosão.

Neste cenário, o crescimento de um dado defeito em um intervalo de tempo especificado é dado por uma distribuição normal, sendo definido por:

$$G(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\left[\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (7)$$

Para defeitos com tamanhos iniciais na faixa  $x_i$  para  $x_i + \delta x$ , a distribuição do tamanho ao final do intervalo especificado é dada por:

$$F(x, x_i) = f_i \cdot G(x, x_i + \mu, \sigma) \quad (8)$$

Para uma distribuição inicial da população de defeitos dada pela função  $p(x)$ , a proporção de defeitos cobrindo a faixa  $x_i$  para  $x_i + \delta x$  pode ser definida aproximadamente por:

$$f_i = p(x_i) \delta x \quad (9)$$

## ABNT NBR 16455:2016

De maneira a determinar a distribuição de tamanhos de defeitos  $S(x)$  no fim do período, o crescimento de toda a população de defeitos deve ser considerado por meio do somatório das distribuições individuais, como a seguir:

$$S(x) = \sum_i F(x \cdot x_i) = \sum_i p(x_i)G(x, x_i + \mu, \sigma) \delta x \quad (10)$$

No limite para  $\delta x \rightarrow 0$ , tem-se:

$$S(x) = \int_0^{\infty} p(y)G(x, y + \mu, \sigma) dy \quad (11)$$

No caso de não haver inspeção no final do período, a distribuição inicial para o próximo período é dada diretamente por  $S(x)$ , e isto pode ser usado na integral da Equação para obter a distribuição ao final desse novo período.

Quando uma dada inspeção for executada, a distribuição antes dela é  $S(x)$  e após ela é modificada pela redução da probabilidade de defeitos com tamanho maior que o aceitável, como a seguir:

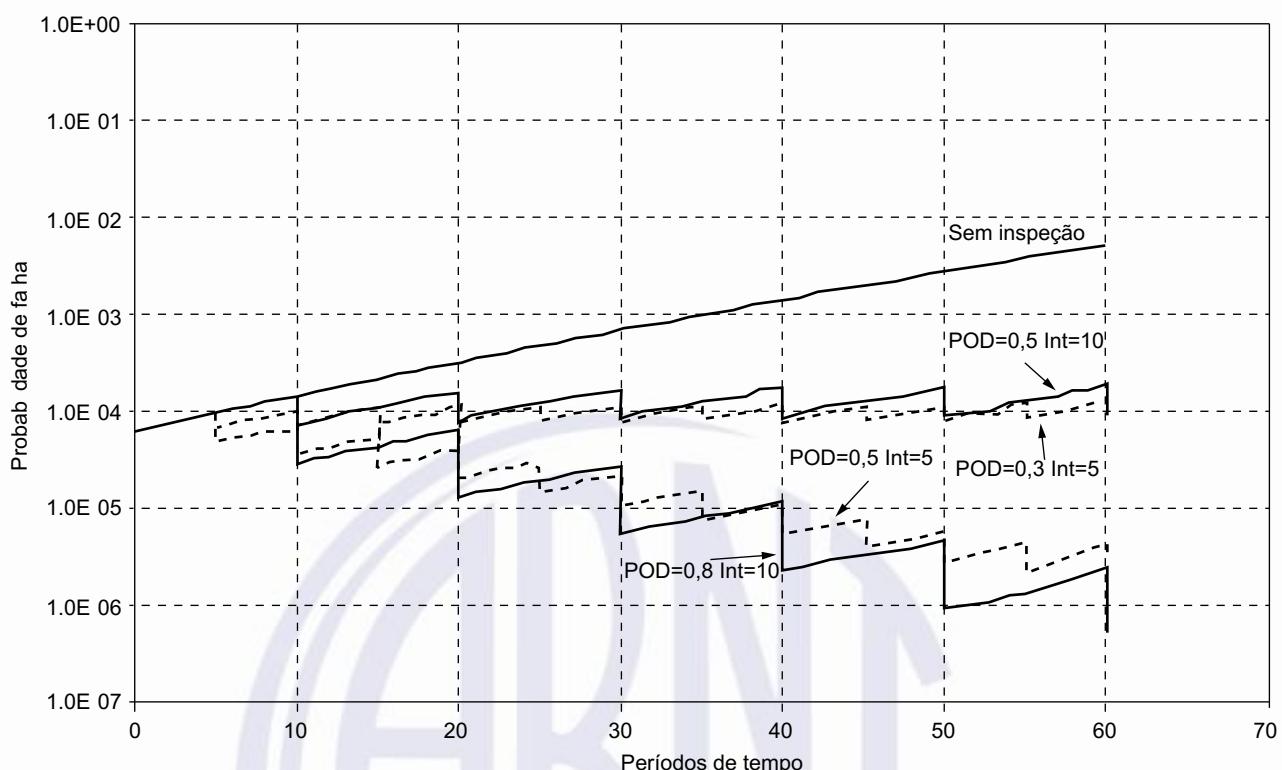
$$\begin{aligned} S_a(x) &= S(x) \text{ para } x \leq x_{\text{aceito}} \\ S_a(x) &= [1 - \text{POD}(x)]S(x) \text{ para } x > x_{\text{aceito}} \end{aligned} \quad (12)$$

Os valores descritos anteriormente são então usados para definir a distribuição de defeitos no início do próximo período de tempo. Por meio do recurso de atualizar dessa maneira a distribuição de defeitos, a probabilidade de falha pode ser monitorada ao longo da vida do vaso de pressão e os efeitos provenientes do uso de diferentes estratégias de inspeção (mudanças nos intervalos de inspeção ou na POD, por exemplo) podem ser estudados.

A Figura B.3 mostra alguns resultados típicos que ilustram o efeito de variações no intervalo de inspeção e na POD.

A curva superior não tracejada (sólida) mostra a situação onde não houve inspeção e, como esperado, a probabilidade de falha aumenta com o tempo. Olhando mais abaixo, a próxima curva sólida mostra a evolução da POF para o caso de inspeções com POD igual a 0,5 para cada décimo do período de tempo. A redução na POF a seguir de cada inspeção fica claramente visível. Esta redução é observada para encontrar claramente o crescimento da POF ao longo do tempo, desde a inspeção precedente, onde, portanto, em média a POF é mantida razoavelmente constante sob esta estratégia de inspeção. A figura mostra que uma POF média similar pode ser mantida pela adoção de uma estratégia alternativa em que o intervalo de inspeção é reduzido para cinco períodos de tempo e a POD reduzida da mesma forma (para 0,3).

As curvas para POD igual a 0,5 com um intervalo de cinco períodos de tempo e POD igual a 0,8 com um intervalo de dez períodos de tempo mostra, como esperado, que o efeito de aumentar a POD é reduzir a POF. Novamente fica claro que uma dada POF nominal pode ser alcançada a qualquer tempo pela variação da POD e do intervalo de inspeção. Entretanto, há diferenças no tempo entre inspeções e um longo intervalo entre estas deve levar a uma alta inaceitável da POF, mesmo que precedida por uma inspeção com alta POD.



**Figura B.3 – Efeito do intervalo de inspeção e POD na probabilidade de falha**

### B.2.3 Considerações práticas

Na prática, devido ao grande número de incertezas, a quantificação da probabilidade de falha com um grau de confiança adequado geralmente é muito difícil, conforme realçado anteriormente. Portanto, este tipo de abordagem nem sempre é adequado para fornecer diretrizes confiáveis para definição do tipo e intervalo de inspeção. Há, entretanto, uma necessidade que esses parâmetros sejam definidos de forma sistêmica e isso é endereçado em uma variedade de códigos de boas práticas ou até em documentos próprios desenvolvidos pelas próprias empresas.

Dado que a inspeção visual interna IVI tem sido historicamente o método principal, a maioria da indústria aceitou aproximações baseadas nela. Entretanto, os princípios permanecem aplicáveis para a especificação da INI. Uma aproximação usual é usar o intervalo de inspeção para IVI como base para determinação do grau de inspeção assinalado para o vaso de pressão. As diretrizes para a determinação desse grau variam de acordo com o Código ou Norma utilizados, mas efetivamente dependem:

- do histórico de intervalos de inspeção adotados originalmente;
- da confiança no estabelecimento das taxas de degradação;
- da taxa máxima de degradação considerada possível.

O grau 0 é o mais severo, demanda o intervalo de inspeção mais curto, e este aumenta progressivamente até atingir o correspondente ao grau 3. Um determinado vaso só pode ser classificado em um grau mais elevado se tiver sido inspecionado ao menos uma vez no intervalo determinado no grau antecessor. Isto é onde o histórico dos intervalos de inspeção previamente utilizados é determinante para o estabelecimento da graduação.

**ABNT NBR 16455:2016**

Uma confiança reduzida nas taxas de degradação determinadas implica na redução do Grau de inspeção, e a correspondente diminuição do seu intervalo. Isso efetivamente leva a uma abordagem conservadora para reduzir a probabilidade de falha diante dessa incerteza.

Da mesma forma, o grau de inspeção diminui com o aumento a taxa de degradação. Pode-se afirmar isto na medida em que a probabilidade de falha permanece mais ou menos constante, mesmo considerados diferentes mecanismos de deterioração.

A especificação do intervalo de inspeção baseada no grau não leva em consideração de maneira sistêmica o risco. A inspeção baseada no risco (IBR) vem tendo sua aceitação aumentada por oferecer uma base técnica considerando o custo efetivo para a gestão da segurança de uma planta industrial. O risco é determinado como o produto da probabilidade de falha por sua consequência e a IBR objetiva assegurar, que o risco está sendo consistentemente mantido em nível baixo e aceitável. Isso pode ser alcançado de várias maneiras, mas as variáveis principais para tal são o tipo e o intervalo de inspeção. Quando considerada a IVI, o controle de risco se resume na especificação de um intervalo de inspeção apropriado, onde itens de maior risco demandam intervalos mais curtos, e vice-versa.

Diferentes premissas têm sido desenvolvidas para a especificação de intervalos de inspeção de acordo com o risco. Em muitos casos, o intervalo não é especificado apenas de acordo com o risco, levando também em consideração o grau de inspeção. O intervalo é então definido de acordo com a combinação da classificação do risco e o grau de inspeção. Tipicamente, podemos adotar os parâmetros mostrados na Tabela B.1 (esses parâmetros não são genéricos e podem variar para diferentes aplicações, definições de risco etc).

Na Tabela B.1, a criticidade define a classificação do risco em graus de 1, o mais alto, a 5, o mais baixo. Nas regras citadas anteriormente, deve ser especificado que a itens com criticidade 1 não pode ser atribuído grau maior que 1 e a itens com criticidade 2 não pode ser atribuído grau maior que 2.

Itens que possuam alto risco e baixo grau de inspeção têm baixo intervalo de inspeção e vice-versa. A combinação dessa forma de risco e grau de inspeção pode ser considerada como uma contagem dobrada do risco. Isto é verdade apenas na medida em que o grau é uma medida da probabilidade de falha. Entretanto, o grau não considera de forma alguma a consequência da falha. Adicionalmente, o risco não pode considerar, de maneira geral, o histórico dos intervalos das inspeções prévias. Assim, tomar em conta uma combinação de risco e grau oferece uma base mais completa para a especificação do intervalo de inspeção e resulta em uma grande diferenciação nos requisitos para diferentes vasos. Fica claro que usar essa combinação refina a escala de intervalo a ser especificada, se comparada a situações onde esses parâmetros são usados separadamente.

**Tabela B.1 – Intervalos de inspeção de acordo com a criticidade e o grau**

Criticidade	Intervalos de inspeção/meses			
	Grau de Inspeção			
	0	1	2	3
1	12	36	N/A	N/A
2	24	36	72	N/A
3	24	48	72	96
4	36	48	84	120
5	36	48	96	144

É importante reconhecer que tipo de inspeção tem de ser considerado para a determinação do risco. Uma inspeção que tenha alta efetividade redundaria em uma redução do risco e vice-versa.

Na maioria dos casos, os intervalos de inspeção já terão sido especificados assumindo que a IVI será executada. Uma vez determinado que a INI seja possível e aplicável a uma determinada situação, o intervalo após esta deve ser ajustado considerando a efetividade dessa inspeção.

As tabelas de fluxo usadas como referência na seleção de uma INI apropriada atribuem classificações da eficácia de cada método para uma determinada aplicação. A classificação é definida a seguir, para áreas cobertas pela inspeção:

- a) alta – o END usado na INI tem um POD maior que o de uma IVI;
- b) média – o END usado na INI tem um POD igual ao de uma IVI;
- c) baixa – o END usado na INI tem um POD menor que o de uma IVI.

Em linha com o objetivo de manter uma probabilidade de falha constante por longo prazo, o processo decisório usa a efetividade das inspeções prévias como uma base para determinar a eficiência mínima requerida para a inspeção corrente. É aceitável que uma inspeção com alta efetividade seja seguida no futuro por outra com baixa efetividade (considerando naturalmente que outros fatores considerados o permitam). Alternativamente, uma inspeção com baixa efetividade necessita ser seguida por outra com alta efetividade, de maneira que uma probabilidade de falha aceitável seja mantida.

Dado que neste estágio do projeto a periodicidade da inspeção é determinada como o exposto anteriormente, nada além dos requisitos de eficiência do método pode ser especificado. Fica claro, entretanto, que o controle da probabilidade de falha poderia ser mais efetivo pela aceitação de mudanças no intervalo de inspeção de acordo com o método usado. Isto traria uma maior flexibilidade no desenvolvimento e adaptação de uma estratégia de INI para atender às exigências específicas de uma planta. Por exemplo, permitiria ao usuário especificar mais frequentemente um END de eficiência mais baixa, e talvez de custo mais baixo, mantendo ainda uma probabilidade de falha comparável àquela que seria conseguida com uma IVI a intervalos maiores.

### B.3 Teorema de Bayes

O teorema de Bayes fornece uma forma lógica de adquirir conhecimentos que estão incompletos (por exemplo, 75 % de confiança de que não exista degradação) com base em ensaios ou observações que não podem ser eles mesmos 100 % confiáveis (por exemplo, método de inspeção detecta degradação 90 % das vezes).

O teorema de Bayes postula que na ocorrência de um dado evento B, a probabilidade que ele seja devido à causa  $A_j$  é igual à probabilidade que  $A_j$  cause o evento B, multiplicada pela probabilidade que a causa  $A_j$  seja a primeira a ocorrer; e esse produto dividido pelo fator de escala, que é o somatório dos respectivos produtos para todas as causas de ocorrência do evento B.

Por exemplo, assumindo que antes da inspeção de um item em particular de uma planta há uma confiança de 75 % que não há degradação presente. Se o item for agora inspecionado com um método de END com 90 % de probabilidade de detecção, sem indicações espúrias, nem indicação de degradação, o teorema de Bayes pode ser usado para determinar a probabilidade revisada que de fato não há nenhuma degradação presente.

## ABNT NBR 16455:2016

Neste caso o evento B é referente ao não relato de degradação, e a causa A<sub>j</sub> é não haver de fato nenhuma degradação presente. Entretanto, outra causa possível é que haja degradação presente e que esta não tenha sido detectada.

A notação  $p(A|B)$  significa a probabilidade de A, dado B.

De acordo com o teorema de Bayes:

$$\begin{aligned} & (\text{probabilidade de nenhuma degradação presente | nenhuma reportada}) = \\ & \frac{(\text{probabilidade nenhuma reportada | nenhuma presente}) \times (\text{probabilidade nenhuma presente})}{\left[ (\text{probabilidade nenhuma reportada | nenhuma presente}) \times (\text{probabilidade nenhuma presente}) + \right.} \\ & \left. \left[ (\text{probabilidade nenhuma reportada | presente} \times \text{probabilidade presente}) \right] \right] = \\ & = \frac{1 \times 0,75}{(1 \times 0,75) + (1 \times 0,25)} = 0,968 \end{aligned}$$

A confiança de que não há degradação presente é dessa forma aumentada de 75 % para aproximadamente 97 %.

O Teorema de Bayes pode também ser usado para suportar decisões baseadas no julgamento de especialistas, onde não existam dados quantitativos precisos sobre a efetividade da inspeção ou probabilidade da degradação. Por exemplo, o julgamento de um especialista poderia ser usado para atribuir uma categoria para a efetividade da inspeção, como muito alta, média alta ou média, onde cada categoria é utilizada para representar uma faixa, como melhor que 90 %, entre 75 % e 90 % etc. Uma abordagem similar pode ser adotada para descrever a probabilidade inicial de degradação (ou taxa de degradação). A média em cada banda (95 % para muito alto, por exemplo) pode então ser usada na aplicação do teorema de Bayes. Dependendo da banda tida como aplicável, a probabilidade revisada de degradação (ou taxa de degradação) pode então ser atribuída em seus termos originais (muito alta, alta etc.).

Notar que devem ser tomados cuidados ao usar dados de POD no teorema de Bayes em casos onde um determinado número de indicações discretas como trincas, por exemplo, possam estar presentes. Um método de END com um POD de 90 % deve ter considerado atingível esse percentual para a detecção de defeitos individuais, mas, por outro lado, oferece muito menor probabilidade para detectar todos os defeitos.

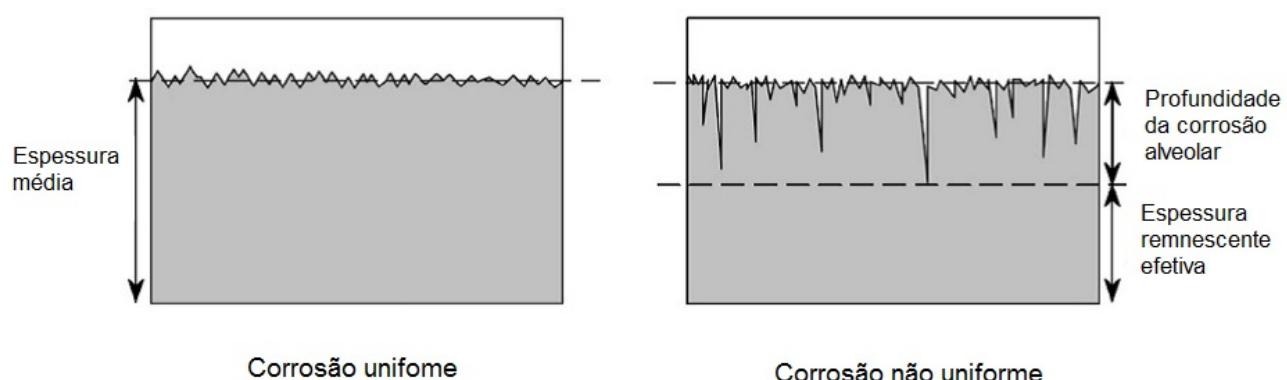
## B.4 Análise estatística do valor extremo

### B.4.1 Introdução

Há um requisito comum para monitorar a condição de plantas de processo por razões de segurança, ou de maneira a planejar reparos ou substituição de componentes durante sua vida útil de trabalho. Por exemplo, uma planta química deve ter vários vasos de pressão que requerem ações para avaliar a severidade da corrosão interna presente. Isso poderia ser feito por meio da execução de uma inspeção detalhada do interior do vaso, visando mapear as áreas com corrosão. Isso inevitavelmente significa a necessidade de uma parada da planta de maneira a tornar possível essa inspeção. Uma alternativa seria executar medidas de espessura por ultrassom em todo o costado do vaso, desde a sua superfície externa. A vantagem de se utilizar tal método seria que a planta não precisaria ser parada, e seus vasos de pressão abertos para a execução da inspeção. Entretanto, o vaso poderia ser grande, implicando em um tempo muito longo para execução de tal inspeção por ultrassom. Outra maneira para avaliar a corrosão presente seria executar uma inspeção em uma área representativa do vaso e usar métodos estatísticos para estender a validade dos resultados encontrados para

o equipamento como um todo. A vantagem de utilizar essa técnica seria a diminuição do tempo e do custo da inspeção.

O processo de corrosão pode ser complexo, com vários mecanismos atuando simultaneamente. Para uma plena compreensão dos mecanismos de corrosão presentes pode ser necessária a execução de longos testes e análises em laboratório. Entretanto, a corrosão pode ser classificada em duas categorias genéricas: uniforme e não uniforme (localizada). Ilustrações dessas duas categorias são mostradas na Figura B.4.

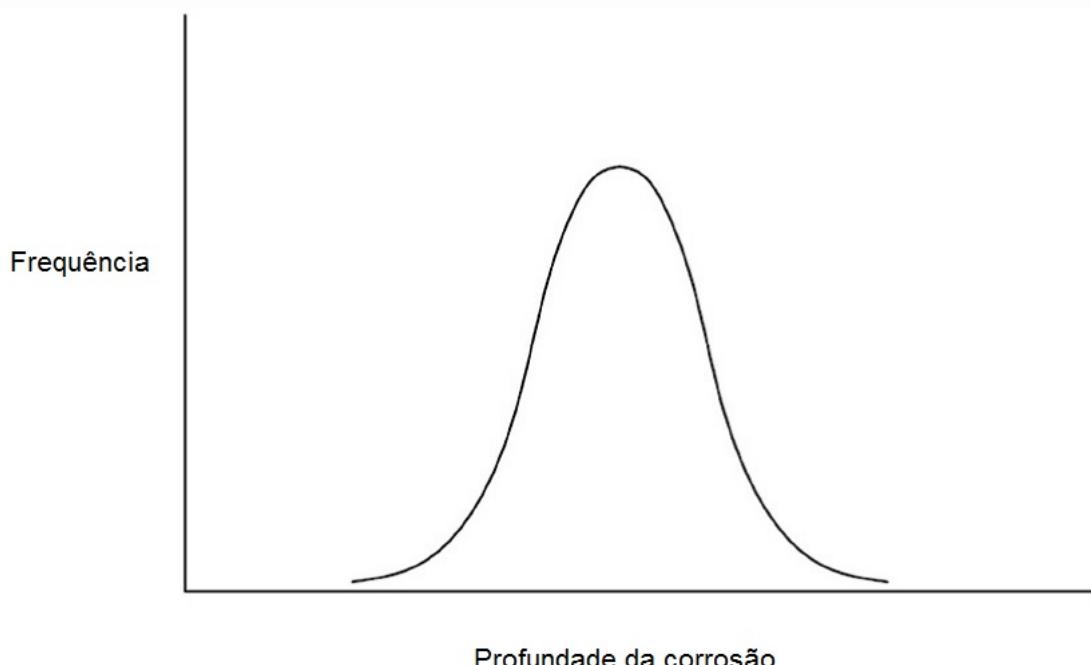


**Figura B.4 – Categorias da corrosão**

Quando uma amostra estatística é tomada, uma distribuição de resultados é produzida, a partir da qual certas grandezas como variância e significado da distribuição (ou desvio-padrão) podem ser medidas. Se aplicado esse método de amostragem para o vaso de pressão em questão, pode-se obter informações valiosas sobre a severidade da corrosão e também informações quantitativas para comparação com as de inspeções futuras. Este tipo de análise é útil onde a corrosão no vaso é sabidamente uniforme. Nesses casos, há um maior interesse nos pontos com maior redução de espessura, ou até mesmo na média destes.

Ao executar uma medição de espessura por ultrassom em um vaso com corrosão uniforme, é esperável encontrar uma distribuição do tipo Gauss ou normal dos valores medidos. O tipo Gauss ou normal de distribuição está ilustrado na Figura B.5. Os valores medidos apresentam uma dispersão de resultados simétrica sobre o valor significativo (referência).

Podem ser usadas técnicas estatísticas para medir o valor significativo e calcular o desvio-padrão e a variância da distribuição. Isso forneceria a medida da dispersão de valores nessa distribuição.



**Figura B.5 – Distribuição de Gauss ou Normal**

No caso de corrosão não uniforme, o interesse mais provável é obter a medida da espessura de parede das áreas mais corroídas, como a de uma região contendo um simples alvéolo atravessando a parede do vaso, que poderia causar um vazamento. Ao usar ferramentas estatísticas para corrosão uniforme, pode-se obter valores subestimados para a gravidade da corrosão mais profunda no componente. Uma técnica diferente deve ser usada nesse caso como, por exemplo, uma baseada em medições e tratamento estatístico, com foco maior nas áreas com maior perda de espessura por corrosão.

Alguns processos ocorrem com as áreas de maior degradação apresentando corrosão não uniforme (alvéolos). Em um processo de corrosão não uniforme o interesse maior se concentra nos valores mais extremos obtidos na medição de espessura por ultrassom, que levam a uma maior confiança nos valores médios ou significativos e, consequentemente, a um maior otimismo na avaliação da condição da planta. O ramo da estatística que lida com a análise desses valores extremos é o objeto deste item.

Esta análise estatística é descrita na forma de um exemplo, onde há a necessidade de análise da região com maior perda de espessura de parede por corrosão na superfície interna de um grande vaso de pressão usando medidas obtidas por ultrassom. É sabido que a corrosão existente no interior do vaso é consistente ao longo de toda a superfície interna, não uniforme, e na forma alveolar severa. É possível o uso de técnicas de valor extremo para estimar a maior perda provável de espessura por corrosão presente no vaso de pressão.

#### B.4.2 Obtenção dos dados

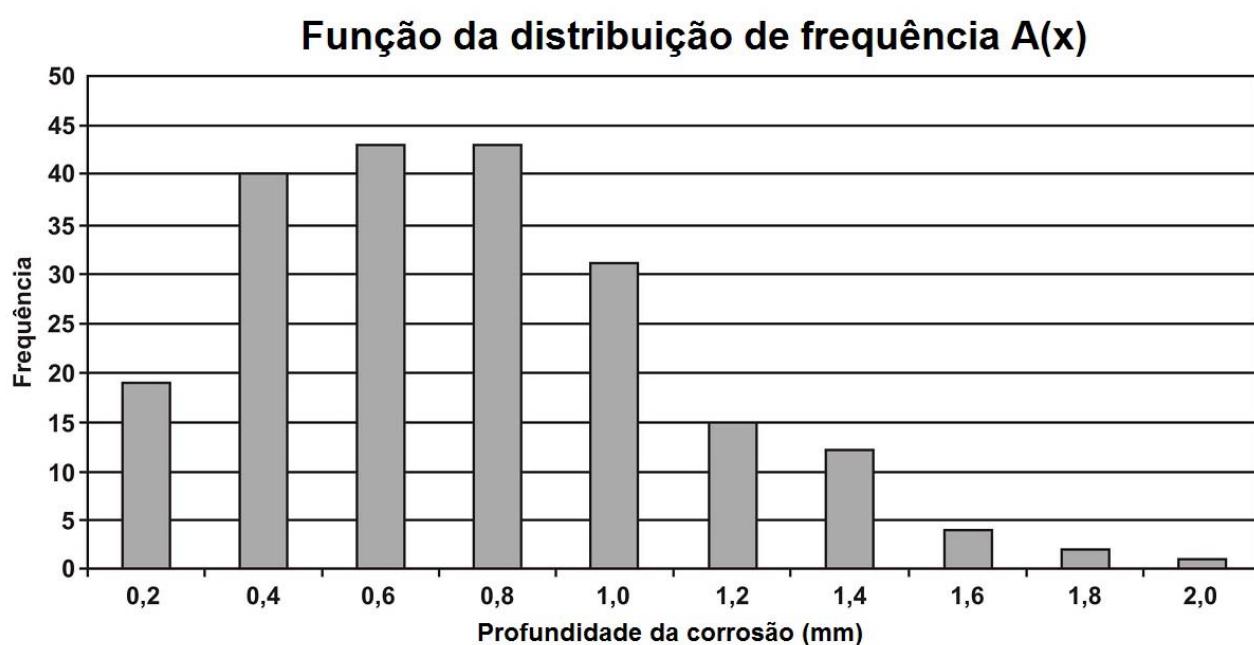
Ao coletar dados para uma análise estatística do valor extremo, é dada maior relevância estatística aos valores extremos máximos ou mínimos medidos. Em termos de uma distribuição estatística normal, é analisada efetivamente a sua extremidade e usadas técnicas estatísticas para derivar funções probabilísticas, as quais fornecem melhor informação quantitativa sobre as áreas mais corroídas do componente.

O exemplo aqui trabalhado envolve a necessidade de avaliar uma área com corrosão alveolar não uniforme (ou outro processo corrosivo severo) de um vaso de pressão grande. É sabido que o processo

corrosivo é não uniforme, severo, e está atuando em toda a superfície interna do vaso. Uma maneira de obter uma amostra estatística para a análise dos valores extremos é apresentada a seguir:

- escolher uma área representativa do vaso, neste caso, de 1 m por 2,1 m. (observação: a área deve ser representativa da condição de todo o vaso, ou da parte deste levada em consideração);
- dividir a área a examinar em subáreas de 100 mm × 100 mm;
- executar um exame detalhado por ultrassom em cada subárea e registrar apenas o valor mais extremo da profundidade de alvéolo medido em cada uma delas.

Essa amostra agora criada é passível de análise por técnicas de valor extremo. Obteve-se 210 valores que podem ser exibidos na forma de histograma, conforme o da Figura B.6. O eixo x apresenta valores crescentes de profundidade da corrosão e o eixo y a frequência do número de leituras para cada uma delas.



**Figura B.6 – Histograma de resultados do exame por ultrassom (profundidade máxima dos alvéolos)**

#### B.4.3 Processamento dos dados

O histograma contendo os resultados é chamado de distribuição de frequências. Mesmo sendo produzido por um processo baseado em valores extremos, o histograma não mostra o padrão de simetria de Gauss ou o normal. Os valores extremos registrados tendem a se concentrar no lado direito da distribuição. É necessário então identificar uma função para modelar a distribuição dos dados, para processamento dos mesmos. Uma função de distribuição chamada de exponencial dupla ou Gumbel é habitualmente usada para modelar uma distribuição de máximos.

**ABNT NBR 16455:2016**

A função de distribuição Gumbel assume a forma:

$$F_1(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\alpha}\right)\right]; -\infty \leq x < \infty \quad (13)$$

onde

- $x$  é a variável aleatória (profundidade da corrosão);
- $\lambda$  parâmetro de localização (modo estatístico);
- $\alpha$  parâmetro de escala (relacionado à variância).

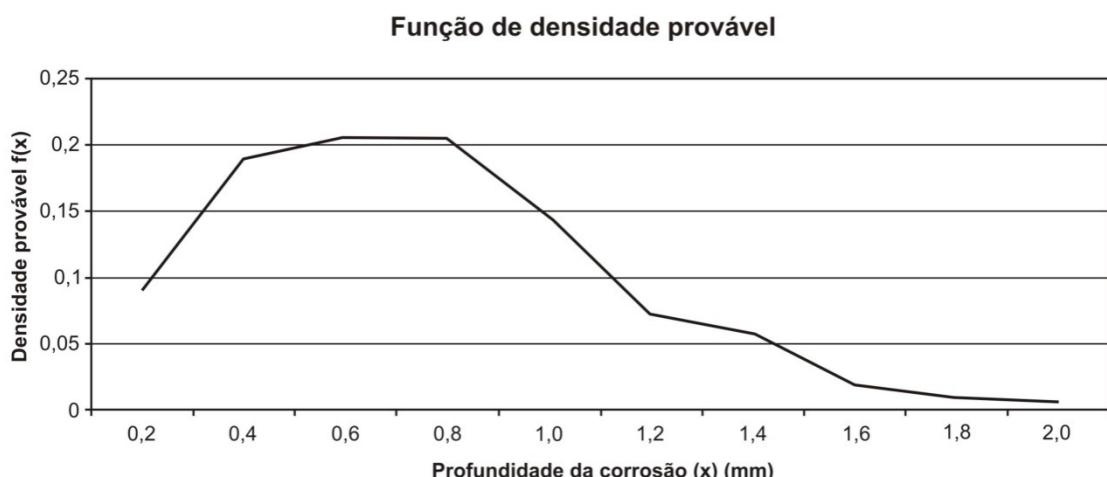
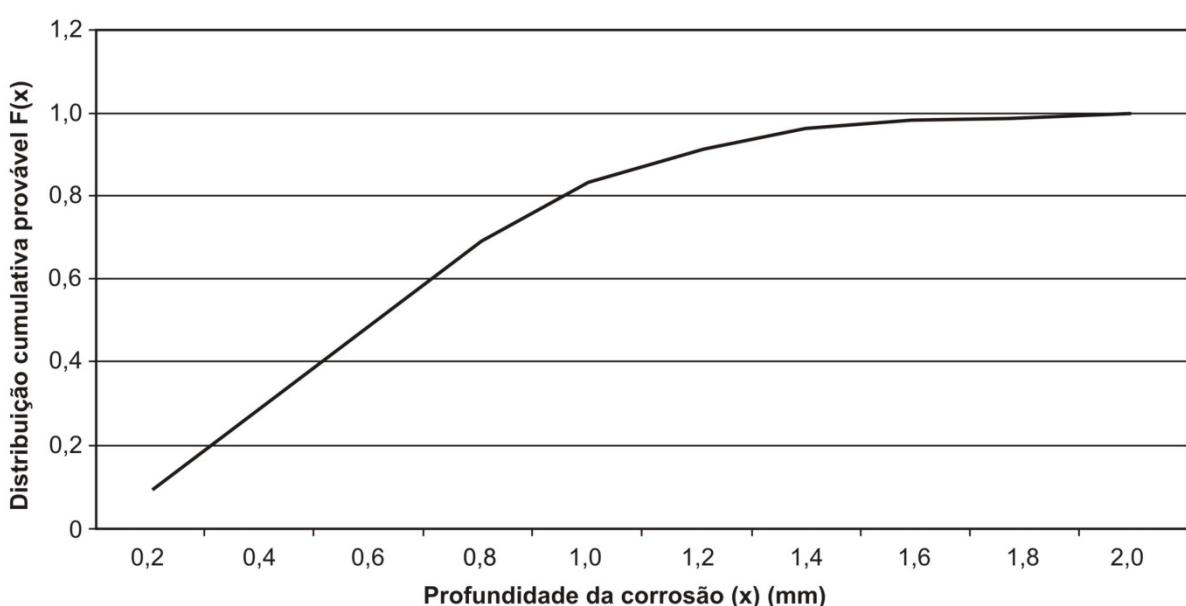
O primeiro passo no processamento dos dados registrados deve ser checar se estes são adequados à modelagem por uma função de distribuição Gumbel. Os dados podem ser processados em uma planilha informatizada (mesmo para grande quantidade de dados). Os resultados devem ser apresentados na forma de tabela, como mostrado na Tabela B.2.

**Tabela B.2 – Exemplo de dados para análise estatística de valor extremo**

Máximo local do alvéolo/corrosão mm	Frequência A (número)	Função de densidade provável $f = A/(N+1)$ <sup>a</sup>	Função de distribuição cumulativa $F = \sum f$
0,2	19	0,090	0,090
0,4	40	0,190	0,280
0,6	43	0,203	0,483
0,8	43	0,203	0,686
1,0	31	0,138	0,834
1,2	15	0,071	0,905
1,4	12	0,057	0,962
1,6	4	0,019	0,981
1,8	2	0,010	0,991
2,0	1	0,004	0,995
Total (N)	210		

<sup>a</sup> Utilizado o método das médias classificadas (*Average Rank Method*).

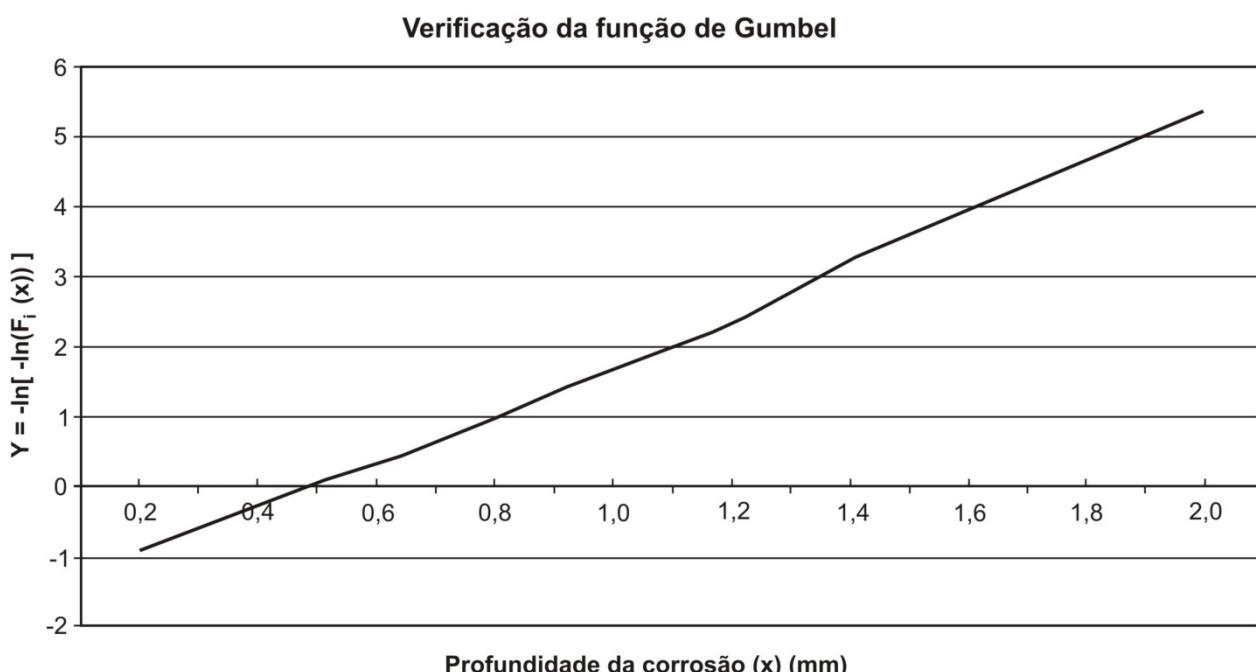
A Tabela B.2 inclui duas colunas contendo informação relevante da distribuição, que são apresentadas graficamente: a função de densidade provável (Figura B.7) e a função de distribuição cumulativa (Figura B.8). Essas funções são derivadas dos dados registrados na inspeção (exame).

**Figura B.7 – Função de densidade provável****Função de distribuição cumulativa F(x)****Figura B.8 – Função de distribuição cumulativa**

Para checar se o modelo Gumbel é uma caracterização válida da distribuição, deve-se plotar a função:

$$Y = -\ln[-\ln(F_i(x))] \quad (14)$$

Aplicando a Equação nos resultados apresentados na Tabela B.2 obtém-se a curva mostrada na Figura B.9.



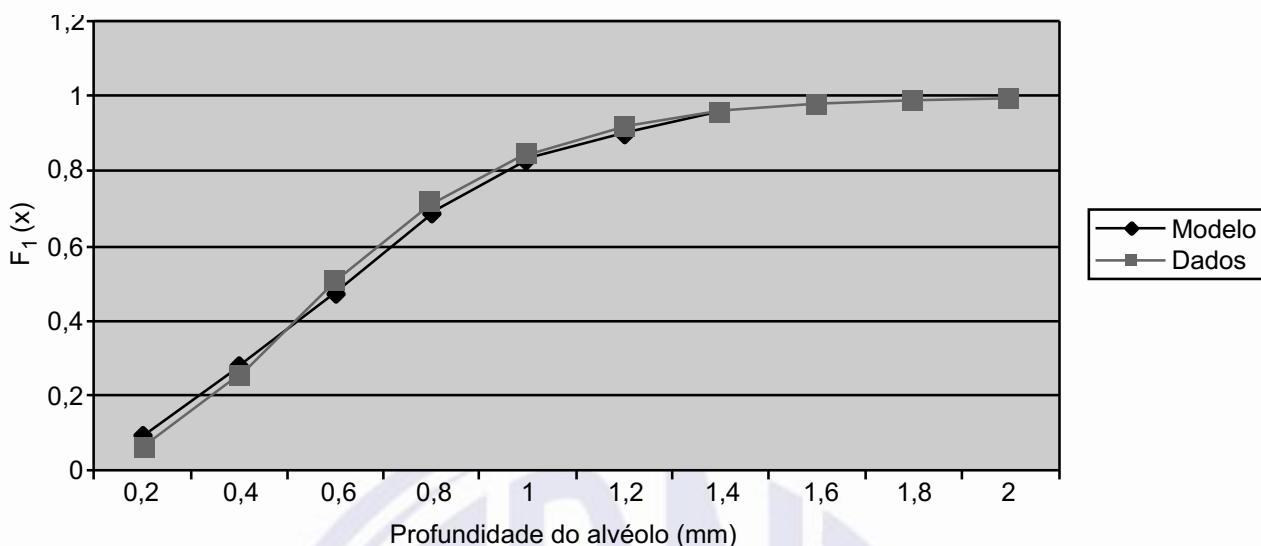
**Figura B.9 – Verificação da função Gumbel**

A Figura B.9 mostra claramente uma boa relação linear para a função plotada  $Y$ . Essa linearidade indica que a função de Gumbel é um modelo estatístico válido para o tratamento dos dados. Os parâmetros  $\lambda$  e  $\alpha$  da Equação (1) podem ser determinados a partir do gráfico;  $\lambda$  é a inclinação do gráfico e  $\alpha$  corresponde à interseção em  $y = 0$ . A determinação dos parâmetros  $\lambda$  e  $\alpha$  permite a construção de um modelo de distribuição usando a função de Gumbel, de acordo com a Equação.

A Figura B.10 mostra uma comparação da função de Gumbel com  $F(x)$ . Se esse modelo se ajustar com os dados plotados, então ele se mostra razoavelmente confiável, assim como as probabilidades estabelecidas a partir dele. Neste caso, o gráfico mostra um ajuste razoavelmente bom, e o resultado dessa análise estatística pode ser usado para prever a probabilidade de existir uma determinada profundidade máxima para a corrosão presente no vaso, ou na área representada pela amostra.

Quando usado o gráfico de probabilidade cumulativa (Figura B.8), são visualizadas as probabilidades de encontrar corrosão com uma dada profundidade máxima. Neste exemplo há uma probabilidade de 99,5 % de que a corrosão mais profunda presente tenha 2 mm de profundidade. Ou por analogia, que há uma probabilidade de 0,5 % de que haja corrosão com profundidade maior que 2 mm.

O uso dessa técnica pode ser muito útil na avaliação de corrosão não uniforme, especialmente quando há a necessidade da obtenção de informações quantitativas de uma maneira rápida e eficiente. As técnicas estatísticas do valor extremo podem ser usadas para uma ampla faixa de aplicações. Existe bom material de referência que descreve a teoria por trás da técnica e apresenta vários exemplos de sua aplicação.



**Figura B.10 – Comparação de CDF com a função de Gumbel**

#### B.4.4 Influência da pintura

Cuidados devem ser tomados quando da aplicação da análise estatística dos valores extremos para dados obtidos por meio de medição de espessura por ultrassom executada sobre superfícies pintadas. Mesmo que a tinta esteja bem aderida, há a possibilidade de haver pequenas variações na espessura da película de tinta. Uma vez que a velocidade do ultrassom na tinta é tipicamente 40 % da velocidade no aço, uma variação de 0,4 mm na espessura da película pintada da amostra pode ser interpretada como uma variação de 1 mm na espessura do aço, se não forem aplicadas as devidas correções. Se a análise estatística dos valores extremos for aplicada nos dados obtidos dessa forma indevida, a variação máxima na espessura de parede do componente na área não inspecionada da zona de amostragem pode ser estimada como sendo significativamente maior que 1 mm, mesmo que processos corrosivos ou erosivos não se façam presentes nela e sua espessura seja uniforme.

Vários instrumentos que medem a espessura da película de tinta estão disponíveis comercialmente, incluindo aqueles que trabalham por meio de simples princípios magnéticos.

### B.5 Influência do tamanho da amostra

#### B.5.1 Geral

É importante atentar se a inspeção está apta a detectar no mínimo um exemplar de cada tipo de defeito presente. Certamente isso depende da população desse tipo de defeito, da efetividade do método de END utilizado e do tamanho da amostra. Para trincas localizadas, amostras pontuais são inadequadas. Enquanto inspeções por amostragem podem ajudar a determinar se um mecanismo de trincamento está presente, provavelmente estas não são eficazes para fornecer informação confiável sobre quantas trincas estão presentes na região de interesse, tampouco suas dimensões.

Se a zona do vaso sob consideração for homogênea, então os métodos estatísticos são úteis para a determinação do tamanho da amostra, e para a extração dos resultados da inspeção desta para todo o restante dessa zona. A confiança na validação da inspeção por amostragem depende do tamanho da amostra e sua proporção em relação ao tamanho da zona. Quanto maior o tamanho da amostra, maior a confiança na extração dos resultados.

## ABNT NBR 16455:2016

A validade da inspeção da amostra ou parte também depende do mecanismo de degradação e da população de defeitos presentes. Para uma zona suscetível apenas à corrosão uniforme, uns poucos pontos de medição de espessura de parede devem disponibilizar informações muito confiáveis com relação à extensão da degradação na totalidade da zona sob análise. A repetição dessas medidas nos mesmos locais no futuro pode então ser usada para determinar as taxas de corrosão.

Se o exame da amostragem revelar uma degradação não esperada ou mais severa que o previsto, deverá ser necessário um aumento da área coberta, podendo esta chegar até 100 %.

### B.5.2 Métodos de análise

#### B.5.2.1 Introdução

Assume-se que uma solda tem uma distribuição randômica uniforme de defeitos ao longo dela. Essa distribuição randômica pode ser representada como uma porcentagem de solda defeituosa. Se um defeito for detectado quando a zona que o contém for inspecionada (assumindo 100 % de capacidade de detecção), o desafio é determinar a probabilidade de detecção de ao menos um desses defeitos quando inspecionado apenas um percentual do volume da solda (e, por conseguinte, ser alertado para o fato que há ativo um mecanismo de degradação em particular).

Em auxílio ao cálculo da *POI*, é assumido que o volume da solda está dividido em 100 unidades discretas. A probabilidade que uma dada unidade contenha um defeito é:  $P_d = D_d / 100\%$ .

A probabilidade que a unidade não contenha defeitos é:  $P_0 = 1 - P_d$

$POI = 1 - PON$

Usando as definições e considerações descritas anteriormente, podem ser utilizados vários modelos para calcular a *POI*, que são descritos a seguir.

#### B.5.2.2 Avaliação simples

Usando as avaliações de dados mostrados na Tabela B.3, uma fórmula deve ser estabelecida e extrapolada para 100 % de cobertura.

A fórmula geral é dada por:

$$PON = \frac{\frac{(100 - P_d)!}{(100 - P_d - C_{ov})!}}{100!} \frac{1}{(100 - C_{ov})!} \quad (15)$$

**Tabela B.3 – Dados para extração da equação para avaliações simples**

$P_d \%$	1	2	3	4
$P_0 \%$	99	98	97	96
$C_{ov} \%$	PON	PON	PON	PON
0	1	1	1	1
1	$\frac{99}{100}$	$\frac{98}{100}$	$\frac{97}{100}$	$\frac{96}{100}$
2	$\frac{99}{100}, \frac{98}{100}$	$\frac{98}{100}, \frac{97}{100}$	$\frac{97}{100}, \frac{96}{100}$	$\frac{96}{100}, \frac{95}{100}$
3	$\frac{99}{100}, \frac{98}{100}, \frac{97}{100}$	$\frac{98}{100}, \frac{97}{100}, \frac{96}{100}$	$\frac{97}{100}, \frac{96}{100}, \frac{95}{100}$	$\frac{96}{100}, \frac{95}{100}, \frac{94}{100}$
4	$\frac{99}{100}, \frac{98}{100}, \frac{97}{100}, \frac{96}{100}$	$\frac{98}{100}, \frac{97}{100}, \frac{96}{100}, \frac{95}{100}$	$\frac{97}{100}, \frac{96}{100}, \frac{95}{100}, \frac{94}{100}$	$\frac{96}{100}, \frac{95}{100}, \frac{94}{100}, \frac{93}{100}$

### B.5.2.3 Distribuição binomial

A equação da distribuição binomial é dada por:

$$POI = 1 - PON = 1 - \left[ \frac{n!}{(n-r)! \times r!} \right] \cdot P_0^{n-r} \cdot P_d^r \quad (16)$$

onde

$n$  é a cobertura da inspeção;

$r$  0 defeitos para detectar.

Variando  $n$  de 0 % para 100 % de cobertura, a POI varia de 0 a 1.

### B.5.2.4 Distribuição de Poisson

A equação da distribuição de Poisson é dada por:

$$POI = 1 - PON = 1 - \left[ \frac{e^{-\mu} \cdot \mu^r}{r!} \right] \quad (17)$$

onde

$n$  é a cobertura da inspeção;

$\mu$  é igual a  $nP_d$ ;

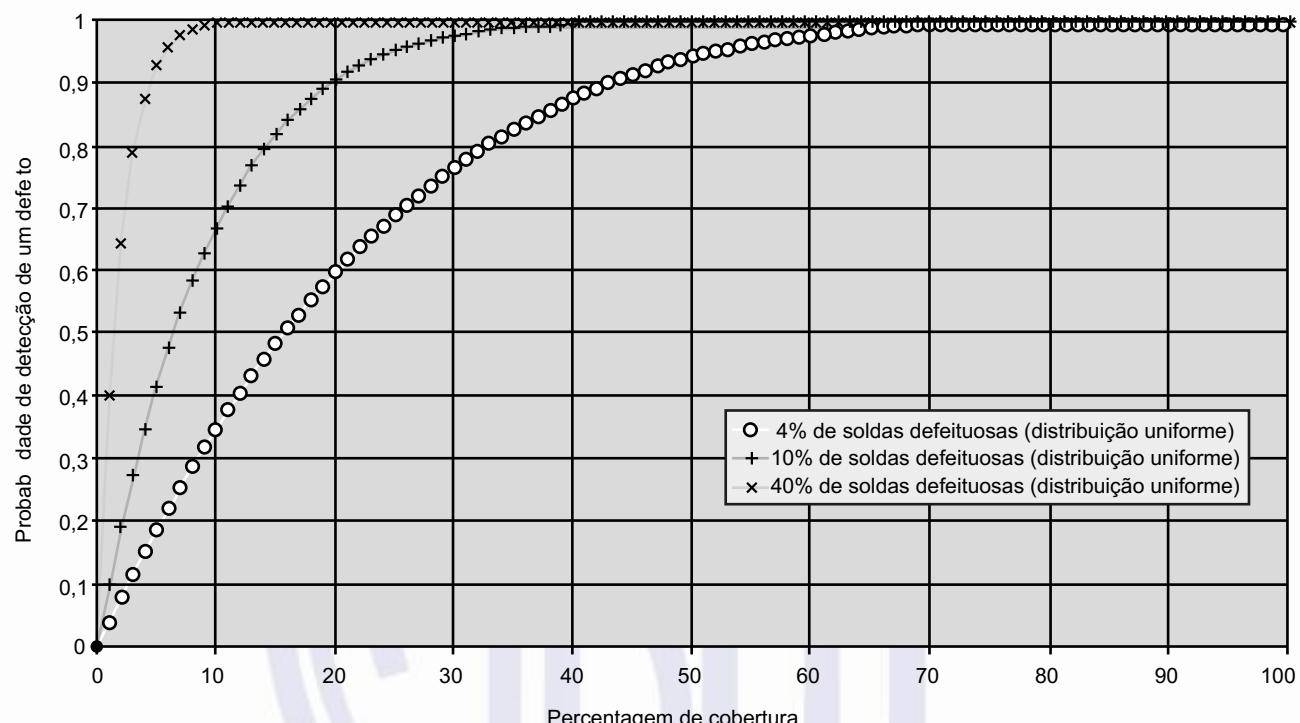
$r$  0 defeitos para detectar.

As Figuras B.11 a B.13 mostram os gráficos para os três métodos de análise.

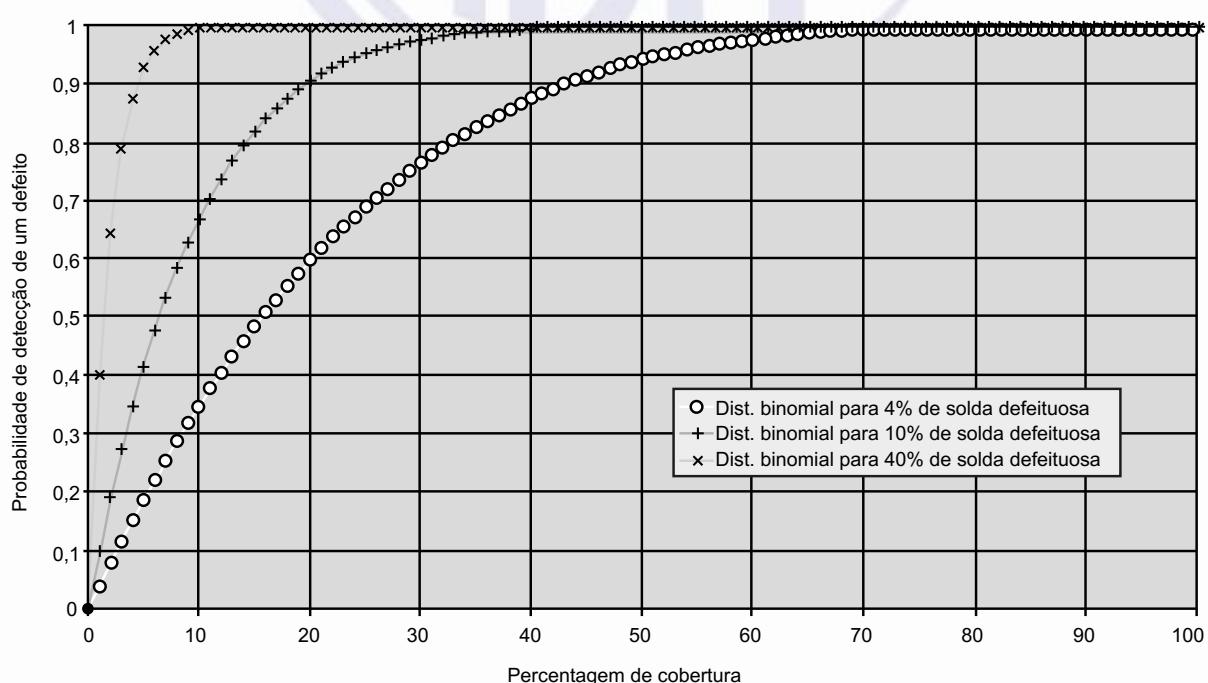
## ABNT NBR 16455:2016

Geralmente, os três gráficos apresentam tendências similares.

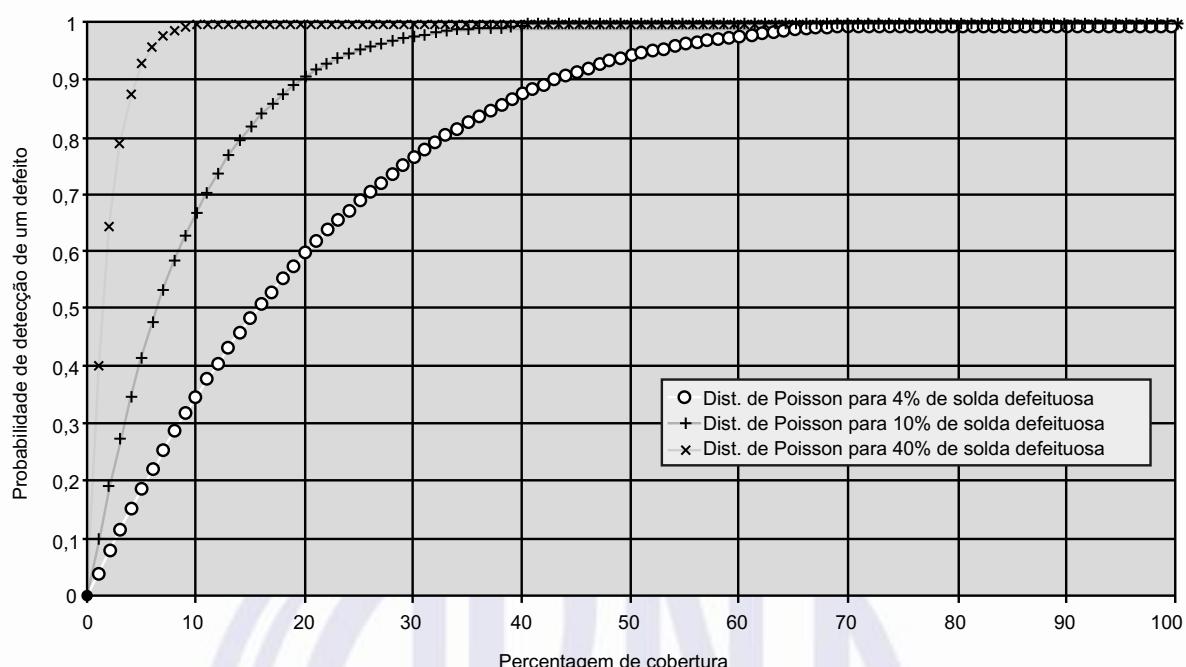
A relação binomial e Poisson não apresentam resultados confiáveis para grande cobertura de soldas com baixa distribuição de defeitos, uma vez que os gráficos não preveem uma probabilidade de 1 % a 100 % de cobertura da solda, com 4 % de distribuição uniforme dos defeitos.



**Figura B.11 – Probabilidade de detectar um defeito conforme o percentual de cobertura de uma solda defeituosa – Utilizando distribuição simples**



**Figura B.12 – Probabilidade de detectar um defeito conforme o percentual de cobertura de uma solda defeituosa – Utilizando o modelo de distribuição binomial**



**Figura B.13 – Probabilidade de detectar um defeito conforme o percentual de cobertura de uma solda defeituosa – Utilizando o modelo da distribuição de Poisson**

## Anexo C (informativo)

### Exemplos do processo decisório

#### C.1 Geral

Este Anexo apresenta exemplos de aplicação do processo para se definir se a INI pode ou não ser aplicada a um determinado vaso de pressão. Os requisitos de processo decisório estão definidos na Seção 6.

#### C.2 Permutador de calor

O permutador de calor (2-HX-05), em serviço há dois anos, está agendado para a sua primeira inspeção. Deve se decidir entre INI ou IVI.

Informações relevantes:

- a) material (casco e tampos): aço-carbono;
- b) material (tubos): aço inoxidável;
- c) processo do fluido (lado do casco): gás úmido de hidrocarboneto com alguma condensação esperada;
- d) processo do fluido (lado do tubo): água.

O vaso foi projetado segundo o *ASME Code, Section VIII, Division 1*, com 3,2 mm de sobre-espessura de corrosão. O vaso faz parte de uma nova corrente de processo (corrente 2). Esta corrente tem funcionamento similar à corrente 1 (em funcionamento há dez anos), mas foi projetada para uma maior eficiência e capacidade de operação. O vaso em questão desempenha a função de dois outros vasos (1-HX-05 e 1-HX-06) da corrente 1. Ambos os vasos possuem intervalo entre inspeções de três anos. As duas primeiras inspeções foram realizadas por meio de IVI, porém a mais recente foi a por meio de INI, com esta sendo avaliada tão efetiva quanto a IVI na identificação dos principais mecanismos de deterioração. Foi observado que ambos os vasos estão submetidos à corrosão interna moderada. A taxa média de corrosão calculada foi de aproximadamente 0,15 mm/ano. As inspeções iniciais mostraram que a taxa de corrosão varia dependendo da localização. Acredita-se que isso está relacionado ao fluxo de gás e à ocorrência de condensado. No 1-HX-06, por exemplo, a primeira inspeção revelou uma área com perda localizada de espessura de parede de 1,5 mm. Uma investigação, sugerida na época, mostrou que o problema estava ocorrendo em uma área em particular de alto fluxo, onde gotas de água seriam provavelmente carreadas. Isso foi considerado suficiente para remover a película protetora rica em hidrocarboneto que seria normalmente esperada no aço, o que levou à aceleração da corrosão por CO<sub>2</sub>. Uma chapa deflectora adicional foi instalada durante a parada para manutenção. Inspeções subsequentes revelaram que a modificação resolveu o problema e a região não estava mais sujeita à alta corrosão tal como o resto do equipamento.

O projeto do 2-HX-05 é diferente dos dois vasos que ele substitui. Ele requer um fluxo maior e mais complexo de gás. Adicionalmente, a temperatura de saída do gás é mais baixa do que a do 1-HX-06, logo, espera-se que a taxa de condensação da água seja um pouco menor. O carregamento para a corrente 2 é normalmente o mesmo da corrente 1, embora oriundo de outra fonte.

Aplicação do processo de seleção (*screening*) (Figura 2):

- O vaso sofreu inspeções anteriores e seus históricos ainda são relevantes?

Resposta: Não;

- O vaso foi projetado especificamente para a metodologia INI?

Resposta: Não;

- O vaso é o similar a outros com históricos de operação?

Resposta: A resposta inicial deveria ser Não. Os dois vasos para os quais existem históricos de operação são similares no funcionamento geral, porém diferem em relação ao projeto e às condições de operação, sendo possível que o tipo e a taxa de deterioração sejam diferentes. A resposta Não, a essa altura, indica que a INI não é recomendada para esse vaso para a próxima inspeção.

### C.3 Vaso receptor de gás

O vaso receptor de gás está programado para a sua primeira inspeção três anos após início de operação. Este é um entre dez vasos que apresentam o mesmo projeto e função. O gás entra no vaso por um duto em comum e sai por um *manifold*. Cinco desses vasos estão em serviço por dez anos e cada um passou por três inspeções, sendo que as duas últimas foram via INI. Os relatórios das inspeções estão disponíveis para cada inspeção realizada e eles foram revisados no planejamento da inspeção atual. Esses relatórios indicam que uma corrosão média foi encontrada no interior de cada vaso, na região do fundo. A corrosão encontrada é praticamente uniforme ao longo das regiões de cada vaso de pressão, com um máximo de perda de espessura de 1 mm em um deles (o projeto inclui uma sobre-espessura de corrosão de 5 mm). Essa corrosão é esperada, uma vez que o gás não é completamente seco e a umidade se concentra na geratriz inferior do vaso. As inspeções mais recentes realizadas segundo a metodologia INI incluíram grande quantidade de medidas de espessura de parede nas regiões preferenciais de corrosão, e a técnica *Time of Flight Diffraction* (TOFD) foi aplicada nas juntas soldadas do vaso, uma vez que este opera sob pressão cíclica, tendo o trincamento por fadiga sido identificado como um possível mecanismo de falha. Nenhum dos ensaios de TOFD identificou qualquer indicação relevante.

Decidiu-se avaliar se a metodologia INI poderia ser aplicada.

Aplicando-se o processo de seleção da Figura 2:

- O vaso passou por inspeções anteriores?

Resposta: Não.

- Os históricos dessas inspeções ainda são relevantes?

Resposta: Não.

- O vaso foi projetado especificamente para a metodologia INI?

Resposta: Não.

## ABNT NBR 16455:2016

- O vaso é similar a outros com históricos de operação?

Resposta: Sim, uma vez que o vaso possui mesmo projeto e função e não há fatores que possam levar a distintos mecanismos de deterioração.

- A parada foi programada por outras razões?

Resposta: Não.

Procedeu-se à aplicação do fluxograma de decisão de alto nível (Figura 3).

- Confiabilidade na previsão dos tipos e locais preferenciais dos mecanismos de deterioração:

Considerando que existe uma quantidade de vasos de mesmo projeto e função, e que muitos desses apresentam longos históricos de inspeção, o usuário pode considerar diretamente as evidências disponíveis desses vasos na seleção da categoria. Considerando a opção (2) de definição de categoria (ver 6.3.2.2), a opção alta é justificada aqui.

- Eficiência de inspeções anteriores:

A eficiência da INI executada nos vasos que já se encontram em serviço, pode ser tomada como média, isto é, muito equivalente a IVI.

- Severidade e taxa de deterioração:

A taxa de corrosão igual a do vaso em serviço não apresenta ameaça à integridade do vaso de pressão sob análise durante sua vida útil, sendo selecionada a eficiência média.

Entrando com as categorias alta, média e média na Figura 3, chega-se a uma recomendação que a INI é possível, em princípio.

### C.4 Vaso separador

Um vaso separador de alta pressão está programado para inspeção. O vaso opera há 11 anos. Sua primeira inspeção foi três anos após a entrada em operação. O intervalo para a próxima inspeção foi definido em quatro anos e vem sendo mantido até a inspeção atual. Deve-se decidir se a INI é aplicável.

O vaso é construído em aço-carbono revestido internamente com um revestimento (*liner*) de aço inoxidável. O vaso é completamente isolado do lado externo. O isolamento é protegido por uma chapa fina de aço galvanizado.

O plano de gestão da integridade da planta inclui revisões técnicas, considerando as principais ameaças à integridade dos vasos. Corrosão e erosão são consideradas os únicos mecanismos de deterioração presentes. A corrosão externa (sob o isolamento) tem maior probabilidade de ocorrência do que a corrosão e erosão interna. No entanto, se o aço-carbono for exposto aos fluidos de processo (por meio de falha no revestimento interno), a corrosão pode ser acelerada. Logo, a integridade do revestimento interno é importante. A corrosão tende a se apresentar mais na forma alveolar do que uniforme.

Ambas as inspeções anteriores foram realizadas por meio de inspeção visual do interior do vaso, tendo sido realizada uma avaliação visual detalhada de todas as superfícies internas acessíveis. Todas as áreas inspecionadas foram relatadas como em boas condições, sem deterioração aparente. Essa informação foi considerada na revisão técnica mais recente e utilizada para a inspeção em curso. Para se verificar a presença de corrosão externa, partes do isolamento foram removidas durante cada uma dessas inspeções. O isolamento se apresentava seco em cada caso e uma corrosão média localizada (< 0,5 mm) foi observada.

Aplicando-se o processo de seleção da Figura 2, tem-se:

- O vaso sofreu inspeções anteriores e seus históricos ainda são relevantes?

Resposta: Sim.

- A entrada foi programada por outros motivos?

Resposta: Não.

A aplicação do fluxograma de decisão de alto nível é recomendada (Figura 3), onde tem-se:

- Confiança na previsão dos tipos e locais preferenciais dos mecanismos de deterioração:

As revisões realizadas como parte do processo de planejamento da inspeção são consideradas incluídas nos requisitos da opção 1) para a seleção deste fator (ver 6.3.2.1.2, categoria alta). A categoria alta é aqui selecionada dado que as conclusões iniciais das revisões foram validadas pelas inspeções realizadas, não existindo agora nenhuma expectativa de que mecanismos, mesmo não identificados, ainda estejam ativos

- Efetividade das inspeções anteriores:

As IVI anteriores podem ser consideradas como média.

- Severidade e taxa de deterioração:

As inspeções internas não revelaram deterioração significativa, porém a corrosão, insuficiente para impactar a integridade do vaso durante sua vida remanescente, foi observada na parte externa. Logo, a categoria média é aplicável aqui.

Entrando com as categorias média, média e média na Figura 3, chega-se a uma recomendação que a INI é possível, em princípio.

O isolamento externo foi mantido, logo, a INI de acordo com os requisitos exigidos pode não ser possível, a menos que o mesmo seja removido.

## C.5 Vaso absorvedor

Um vaso opera absorvendo H<sub>2</sub>S por meio de um leito de óxido de zinco. O óxido de zinco é desgastado durante a operação e requer substituição após algum tempo de funcionamento. A taxa de consumo da camada de zinco depende da natureza do gás e o tempo de substituição é determinado pelo monitoramento da eficiência da quebra de acidez, baseado na composição do gás produzido. A substituição do óxido de zinco exige a parada do vaso, sendo esta uma operação complexa e cara. Uma parada para avaliação visual interna requer a remoção das câmaras do óxido de zinco,

**ABNT NBR 16455:2016**

envolvendo um custo tão alto quanto o da substituição. Existem dois vasos, aqui referenciados como A e B, que atuam em paralelo, sendo que apenas um deles é necessário para a absorção de todo o hidrogênio, consequentemente não ocorre perda de produção associada à interrupção de operação de um deles. Contudo, considerando os custos de remoção e substituição, pode-se ter uma economia considerável se a intervenção puder acontecer ao mesmo tempo da substituição da câmara de óxido de zinco, quando isso for necessário.

Os vasos estão dentro de um plano de gestão da integridade, que usa uma metodologia baseada em risco para o planejamento da inspeção. Como parte disso, uma avaliação operacional crítica foi desenvolvida para identificar e estimar os mecanismos de danos possíveis. Foi observado que a corrosão alveolar interna no ambiente contendo H<sub>2</sub>S é a principal ameaça à integridade. Uma taxa moderada de corrosão é esperada, e a perda de parede não excederia a sobre-espessura de corrosão projetada para a vida útil do vaso. A inspeção baseada em risco (IBR) prevista quando da entrada em operação do vaso recomendava IVI com intervalos de quatro anos. Após os quatro primeiros anos de operação, o óxido de zinco mostrou pouca deterioração e a decisão tomada foi de retardar a IVI com base em uma INI. Ambos os vasos foram submetidos a uma INI consistindo de:

- a) 42 medidas de espessura de casco e tampo e 24 nos bocais onde foram realizadas medições pré-serviço e;
- b) ensaio ultrassônico TOFD para cada solda longitudinal e circunferencial.

As medidas de espessura de parede não mostraram nenhuma alteração considerável de perda de espessura. Nenhuma descontinuidade reportável foi encontrada na inspeção TOFD. Baseado nos resultados obtidos, o plano de inspeção foi revisado para a realização da primeira inspeção IVI depois de dois anos de funcionamento (ou antes, se alterações na camada de óxido de zinco assim requererem).

Após esse período de dois anos, é evidente que o óxido de zinco nos dois vasos ainda tinha um tempo de vida considerável, logo, seria recomendável evitar a abertura dos vasos. O processo decisório foi seguido para estabelecer se isso seria possível.

Aplicando-se o processo de seleção da Figura 2, tem-se:

- O vaso sofreu inspeções anteriores e seus históricos ainda são relevantes?

Resposta: Sim (INI);

- A entrada foi programada por outros motivos?

Resposta: Não.

Aplicando-se o fluxo de decisão de alto risco naFigura 3, tem-se:

- Confiança na capacidade de prever os tipos e locais preferenciais dos mecanismos de deterioração

A gestão da integridade e as avaliações das condições operacionais realizadas permitem que a opção 1 seja considerada na determinação da categoria aqui aplicável. Enquanto a avaliação essencialmente operacional considera em detalhes os tipos prováveis de deterioração, os resultados não podem ser validados pelas inspeções realizadas até agora. Deve-se considerar que mecanismos de deterioração inesperados, não detectados, dada as próprias limitações da inspeção realizada, podem ocorrer. Logo, a classificação média foi selecionada.

— Eficiência de inspeções anteriores.

As inspeções anteriores (em ambos os vasos) foram não intrusivas. A medição de espessura em pontos fixos é muito menos eficiente na detecção do tipo de mecanismo mais crítico (corrosão por pites) do que a IVI. Logo, a eficiência das inspeções anteriores é tida como baixa neste caso.

— Severidade e taxa de deterioração.

As medidas da espessura não revelaram nenhuma perda considerável da espessura de parede. No entanto, um estudo essencialmente operacional indicou que a corrosão poderia ser esperada, embora insuficiente para consumir a sobre-espessura de corrosão durante a vida útil do vaso. Logo, a classificação média é aplicável neste caso.

Utilizando a Figura 3 com médio, baixo, médio, a INI não seria recomendável.

Baseada nesta recomendação, a decisão de se utilizar a IVI em um dos vasos (o vaso B seria aberto para inspeção) foi tomada. Isso consistiu de uma avaliação visual detalhada de todas as superfícies internas e a execução de PM em todas as soldas dos bocais e em aproximadamente 20 % da extensão das soldas do casco.

Considerando que:

- a maioria das superfícies internas apresentou pequena corrosão alveolar com uma profundidade máxima de 0,75 mm;
- nenhuma trinca ou defeito foi identificado nas soldas;
- o óxido de zinco no vaso A permaneceu em boas condições e que seria aconselhável prosseguir com a INI, no mesmo, ao invés de abri-lo para IVI.

O processo decisório deve ser aplicado para determinar se esse procedimento é justificável.

Com a aplicação do processo decisório, tem-se:

— O vaso sofreu inspeções anteriores e os históricos existentes ainda são relevantes?

Resposta: Sim (INI);

— A entrada foi programada por outros motivos?

Resposta: Não

Aplicando-se o fluxograma de decisão de alto nível, tem-se:

— Confiança na capacidade de prever os tipos e locais preferenciais dos mecanismos de deterioração.

Mais uma vez as definições da opção 1 são consideradas na determinação da categoria aplicável. As mesmas considerações se aplicam aqui para o vaso B, porém agora a possibilidade de existência de mecanismos de deterioração inesperados pode ser determinada pelos resultados de sua inspeção. Logo, um nível de confiança alto é selecionado.

## ABNT NBR 16455:2016

- Eficiência das inspeções anteriores.

A metodologia usada no vaso B foi a IVI e os resultados são relevantes para o vaso A. Logo, o médio é aplicável neste caso.

- Severidade e taxa de deterioração.

As medidas de espessura não revelaram nenhuma perda significativa de parede, porém a inspeção visual interna no vaso B mostrou uma região de corrosão alveolar de até 0,75 mm de profundidade. Logo, o médio deve ser selecionado neste caso.

Seguindo a Figura 3, com alto, médio, médio, a INI é a princípio recomendada para este vaso.



## Anexo D (informativo)

### Exemplo de identificação das zonas

#### D.1 Geral

Este Anexo apresenta um exemplo que ilustra a identificação de zonas correspondentes a diferentes combinações de um vaso de pressão, de acordo com as recomendações de 7.4.

#### D.2 Identificação das zonas

Em um vaso de pressão, o casco e as soldas submersos ou não no líquido e as interfaces entre líquido e vapor podem corroer com diferentes taxas. Neste caso, devem-se considerar as seguintes possibilidades de zonas:

- a) A: zona líquida;
- b) B: zona de interface;
- c) C: zona de vapor.

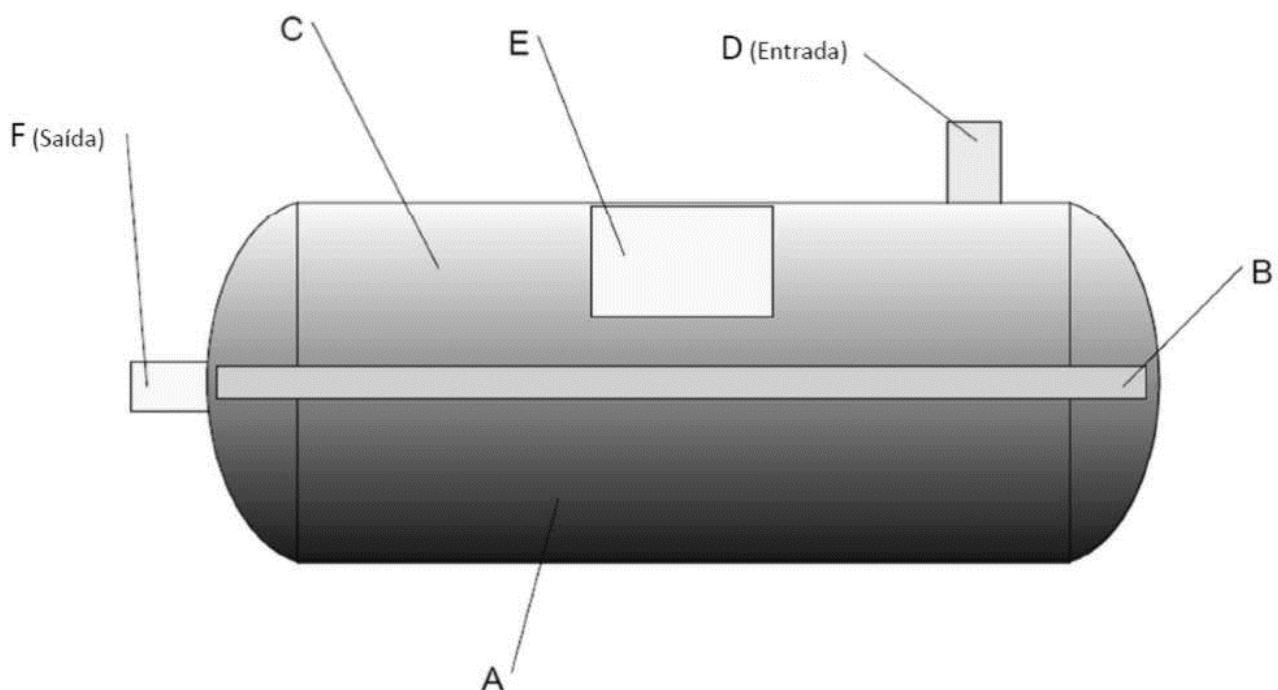
**NOTA** Frequentemente existem aspectos específicos relativos aos bocais e conexões do vaso que os fazem ser classificados como zonas individuais.

- a) D: bocais de entrada;
- b) F: bocais de saída.

Estes aspectos normalmente são suficientes para a classificação do vaso. No entanto, se em registros de inspeções anteriores for identificada uma região com corrosão mais considerável em uma área específica do casco (por exemplo, na região contígua ao vapor onde a sua condensação acelera o processo de corrosão), deve definir-se uma zona adicional (chamada “E” na Figura D.1), com base na combinação de aspectos como casco, região de vapor e falhas anteriormente detectadas.

Cada uma das zonas, de A a F, deve ser considerada individualmente para análise do processo de INI.

## ABNT NBR 16455:2016



Zona	Identificador
Fase líquida	A
Interface	B
Fase de vapor	C
<i>Inlet</i> = Entrada (líquido)	D
Corrosão previamente reportada	E
<i>Outlet</i> = Saída (fases misturadas)	F

Figura D.1 – Exemplo de zonas do vaso

## Anexo E (informativo)

### **Exemplos de avaliação da inspeção**

#### **E.1 Introdução**

Este Anexo apresenta diversos exemplos de como avaliar os resultados da inspeção de acordo com a Seção 9.

#### **E.2 Inspeção tipo A**

##### **E.2.1 Exemplo 1**

Considerar o caso de um vaso separador fabricado em aço-carbono cladeado com uma liga resistente à corrosão. O escopo de trabalho da INI inclui o mapeamento da corrosão e a avaliação de regiões selecionadas do fundo do vaso pelo método ultrassônico de pulso-eco com ondas cisalhantes. A conservação externa do vaso é esperada para ser ruim em virtude de já haver um processo de corrosão sob isolamento desde a aplicação deste. A condição da superfície é tal que a POD para a degradação por pequenos alvéolos, identificada como o pior mecanismo de deterioração presente no metal-base do chapeamento, é consideravelmente reduzido com relação ao que realmente seria detectado por meio de um escaneamento superficial adequado. A POD é avaliada entre 50 % e 90 % daquela esperada para uma superfície escaneada (coberta) adequadamente. Uma cobertura plena é alcançada sobre as regiões para inspeção. Neste caso, a conformidade nível 3 seria aplicável e o intervalo máximo de postergação atingível por meio da INI não seria justificável a não ser que medidas adicionais fossem tomadas para avaliar a deficiência dessa inspeção. Caberia realçar que, como abordado anteriormente em outras partes desta Norma, cuidados devem ser tomados para evitar baixos desempenhos dos END, por exemplo, a verificação preliminar da região a inspecionar com vistas à identificação de áreas passíveis de retificação de sua condição superficial. Também durante a inspeção propriamente dita, deve-se prever o deslocamento da varredura para áreas similares, próximas à região de interesse, com melhor condição superficial.

##### **E.2.2 Exemplo 2**

Para o caso anterior, se a cobertura for de 75 % da planejada e a POD for considerada para estar na parte inferior da faixa, sendo alcançado 50 % neste caso, a aplicação da conformidade nível 4 deve ser avaliada. Se a cobertura foi menor que 75 % da planejada e a POD alcançou aproximadamente os 50 %, a aplicação da conformidade nível 4 neste caso é incontestável.

##### **E.2.3 Exemplo 3**

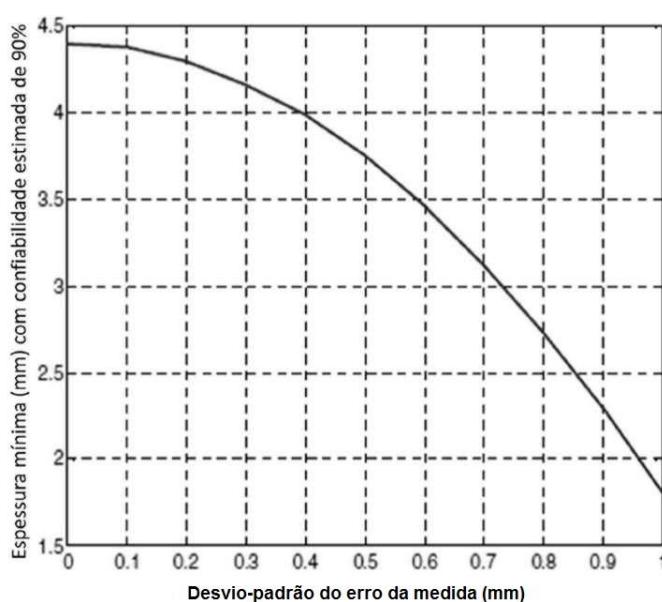
Na hipótese de ter sido alcançado uma POD plena, em uma cobertura de apenas 70 % do planejado, a Tabela 5 indicaria uma conformidade nível 3 para esta situação. Entretanto, se ficou claro que 75 % de cobertura são considerados uma amostragem razoável da região de interesse, que a cobertura cobriu as áreas consideradas como de maior risco, e que os dados coletados são de boa qualidade e não apontam degradação evidente, pode-se assinalar a conformidade nível 2 para este caso.

### E.3 Inspeção tipo B

No decorrer de uma inspeção do tipo B, a ênfase será a coleta de informação suficiente para permitir uma conclusão estatisticamente quantificada, que deve ser usada para demonstrar a alta confiabilidade na estimativa do pior defeito que possa existir (inclusive nas áreas não inspecionadas). O desempenho e a área coberta pela inspeção, ambos, afetam a efetividade da informação obtida pela inspeção.

Sendo aceitável que este tipo de inspeção forneça as bases para uma análise estatística cujo objetivo é permitir um julgamento quantificado da condição do vaso, então essa mesma análise estatística pode ser usada para verificar a aplicação da inspeção. Incertezas associadas ao desempenho do sistema de inspeção (por exemplo, baixa resolução) e área coberta tende (nem sempre) a aumentar a dimensão do pior defeito esperado. A natureza do resultado quantificado depende da cobertura e da capacidade da técnica de END (a precisão das medidas é questão-chave aqui). Em geral, os requisitos da inspeção são alcançados mais facilmente quando aumentadas a acuracidade do END empregado e sua cobertura.

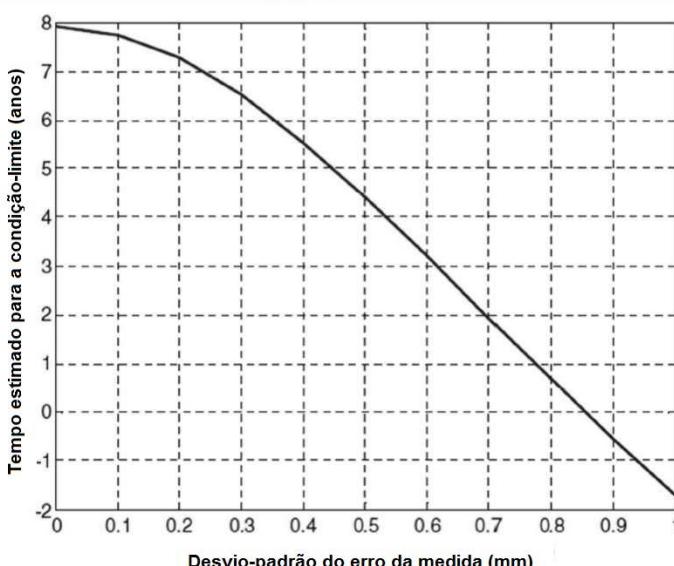
A Figura E.1 serve como uma ilustração dos efeitos dos erros de medição. Ela mostra uma confiabilidade estimada de 90%<sup>1</sup> para a menor medida de espessura em uma situação onde uma análise de valor extremo tenha sido feita baseada em uma cobertura da inspeção em 20%. A espessura mínima estimada determina a aceitação da situação atual até o final do intervalo planejado. Os efeitos de erros de medição podem impactar diretamente na aceitação das condições correntes (atual), como ao assumir 2,5 mm como a espessura aceitável (para corrosão localizada), como neste exemplo onde a Figura E.1 aponta que um sistema com um desvio de erro-padrão maior que 0,85 mm não é suficiente para considerar aceitável a condição presente. Para justificar a continuidade operacional do item inspecionado, deve ser exigida uma inspeção posterior por meio de um método de END com acuracidade e cobertura maiores.



**Figura E.1 – Efeitos dos erros de medição na estimativa da espessura mínima**

<sup>1</sup> A espessura mínima para a área total deve ser maior que o valor mostrado em 90 % dos casos. Notar que o uso de uma confiabilidade de 90 % não pode ser tomado como a recomendada para uso. A execução de estimativas da condição baseadas em análises estatísticas deve ter sua efetividade avaliada como apropriada pelo responsável por sua execução e acordada com a equipe da integridade. Orientações para a aplicação de análises estatísticas são fornecidas no Anexo B.

Deve-se atentar também que a espessura mínima estimada é usada frequentemente como base para a estimativa de taxas de corrosão, ainda que uma pequena redução na mesma possa ter um efeito considerável na determinação da vida remanescente estimada (a espessura inicial é mais baixa e a taxa de corrosão mais alta). Para ilustrar isto, considerar a situação onde: (i) a espessura média no comissionamento foi de 8 mm; (ii) o equipamento está em operação há 15 anos, e; (iii) o valor de espessura mínima aceitável é de 2,5 mm. O tempo para se alcançar a condição-limite é mostrado na Figura E.2. Este tempo é usado frequentemente para estabelecer o intervalo para a próxima inspeção, que deverá ser a metade do tempo estimado para se atingir a condição-limite. Neste caso, um intervalo de quatro anos pode ser justificado com uma técnica com 0,1 de desvio-padrão. Um intervalo de apenas dois anos deve ser justificado no caso de um desvio-padrão de 0,5 mm. A influência dos erros de medição varia caso a caso, mas esta ilustração mostra como pode ser significativa.

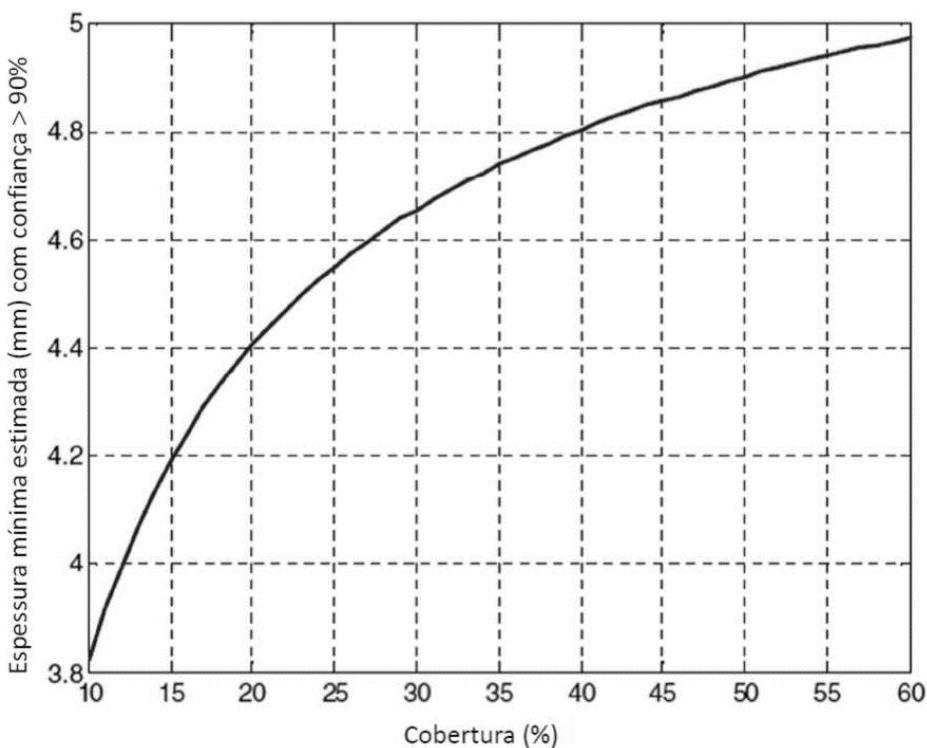
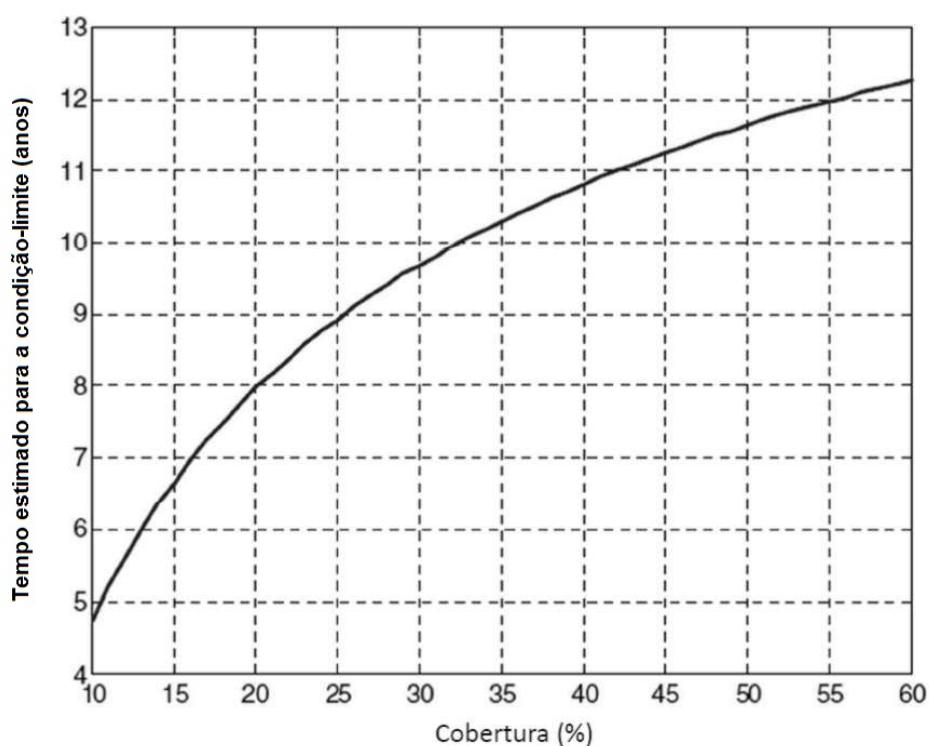


**Figura E.2 – Efeitos dos erros de medição na estimativa da taxa de corrosão**

A área de cobertura também tem uma influência na estimativa da espessura mínima e na comprovação da condição aceitável. A Figura E.3 considera os efeitos da cobertura para o mesmo caso tratado na Figura E.1, mas assumindo um sistema de medidas com erro zero. A ampliação da cobertura implica no aumento da estimativa de 90 % da espessura mínima.

Da mesma forma que com o erro de medição, a cobertura alcançada pode afetar a aceitação na condição corrente e impactar na aceitação dos novos intervalos para inspeção. A Figura E.4 mostra o tempo estimado para uma condição limitante baseado nos resultados, frutos da cobertura atingida. Para o caso considerado, e usando uma margem de 2 no tempo para a condição-limite, um intervalo de quatro anos deve ser justificado por uma inspeção com 20 % de cobertura, mas apenas dois anos e meio no caso de 10 % de cobertura. Os verdadeiros efeitos variam de acordo com cada situação, mas o exemplo apresentado mostra que estes podem ser significativos.

## ABNT NBR 16455:2016

**Figura E.3 – Efeito da cobertura na estimativa da espessura mínima****Figura E.4 – Efeito da cobertura na estimativa do tempo para uma condição-limite**

## E.4 Inspeção tipo C

### E.4.1 Exemplo 1

O plano de inspeção para um vaso separador fabricado em aço-carbono, revestido internamente com resina de fibra de vidro (RFP) recomenda 100 % de cobertura para o casco. Há restrições para acesso à região do fundo do vaso que limitam a cobertura a apenas 75 % da zona molhada com água. Os requisitos de POD devem ser atingidos em sua totalidade. A Tabela 6 indica inicialmente a conformidade nível 3. Neste caso, não seria possível justificar uma mudança no nível de conformidade uma vez que a redução da cobertura é significativa e abrange uma área com alto potencial para degradação.

### E.4.2 Exemplo 2

Considerado o mesmo vaso do exemplo anterior, mas agora com obtenção da cobertura total na zona molhada e 75 % na zona de gás. Novamente, a Tabela 6 indicaria inicialmente uma conformidade nível 3. Entretanto, pode haver uma justificativa para a mudança da conformidade para nível 2 se a cobertura abrange claramente todas as áreas mais suscetíveis à degradação (por exemplo, bocais e mudanças na geometria), se os resultados da inspeção não apontam evidências de degradação no revestimento, e se não há histórico anterior de degradação desse mesmo revestimento para o vaso em consideração.

### E.4.3 Exemplo 3

Considerando uma situação similar ao Exemplo 2, mas onde o END não foi capaz de atingir a capacidade de detecção requerida, tal que sua POD para degradação isolada (nas profundidades preocupantes definidas) foi algo em torno de 50 % da planejada. Neste caso, a Tabela 6 indicaria conformidade nível 3, baseada tanto na POD quanto na cobertura, mas devido a essas variáveis terem sido afetadas significativamente, a conformidade nível 4 deve ser aplicada neste caso.

## Anexo F (informativo)

### **Exemplos de validação de intervalos de inspeção**

#### **F.1 Introdução**

Os casos a seguir são apresentados como exemplos de aplicação do processo de validação de intervalos admissíveis a partir de uma inspeção na qual uma não conformidade tenha sido detectada. Para cada um dos exemplos, os passos da avaliação são apresentados e a redução de intervalo resultante é avaliada em comparação a uma decisão de engenharia.

Claramente, assim como em todo o processo de INI, a validação da inspeção requer decisões de engenharia em todos os seus estágios. Todas as informações disponíveis devem ser utilizadas para definir a qualidade da inspeção realizada e não apenas a confiança no método deve ser considerada na abordagem apresentada nesta Norma. Entretanto, os exemplos apresentados demonstram que, sob circunstâncias normais, a abordagem proposta nesta Norma apresenta avaliações consistentes.

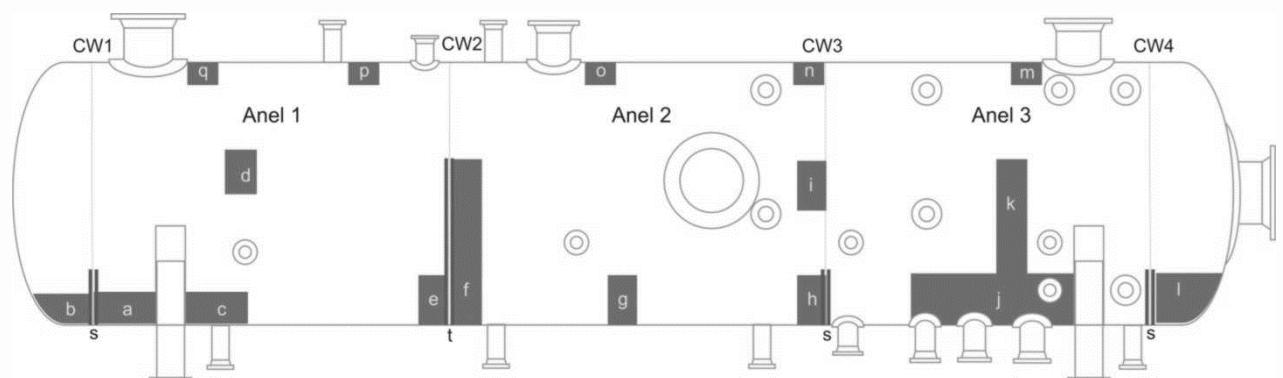
#### **F.2 Falta de cobertura em uma inspeção tipo A**

Um vaso separador deve ser inspecionado. O vaso é construído em aço-carbono cladeado internamente com uma liga de alta resistência à corrosão. A avaliação de risco da corrosão (ARC) indica uma pequena probabilidade de degradação interna, onde a corrosão sob tensão originada por pites causados pela presença de cloreto é o principal mecanismo de degradação a ser considerado. A probabilidade desta ocorrência foi considerada muito baixa pela análise das condições operacionais. O vaso já foi submetido a algumas inspeções internas, e todas elas indicaram boas condições internas, sem sinal de qualquer degradação.

A avaliação para INI, realizada utilizando-se as orientações desta Norma, indicou que a INI é aplicável. O principal requisito relacionado ao casco do vaso foi que a inspeção confirmasse as premissas relativas às condições de corrosão, ou seja, nenhuma degradação ativa. Determinou-se que uma avaliação tipo A é aplicável, ou seja, uma inspeção de alta sensibilidade, porém sobre determinadas áreas representativas, capazes de permitir a identificação de que qualquer degradação estivesse ativa.

O planejamento da INI é apresentado na Figura F.1, no qual um mapeamento da corrosão por ultrassom *B-Scan* e ultrassom convencional com cabeçote angular foram utilizados nas áreas identificadas em cinza.

Foi realizada uma avaliação no campo antes de iniciar a inspeção. Identificou-se dificuldade de acesso na parte superior do vaso (regiões de m até q apresentadas na Figura F.1), devido à presença de estruturas acima do vaso, conforme ilustrado na Figura F.2. Para acessar a superfície superior, é necessária a remoção de grades e passadiços, para então remover o isolamento do vaso. Desta forma, no momento da avaliação no campo, é difícil determinar a extensão da superfície acessível, pois há impedimento de acesso devido à presença das grades. Durante a inspeção, foi possível acessar os locais m, n e q, porém nos locais o e p não foi possível. Esta redução representou uma fração de menos de 5 % do total da cobertura requerida para o vaso.



**Figura F.1 – Áreas de cobertura do mapeamento da corrosão e de ultrassom convencional com cabeçote angular para detecção de perdas de espessura localizada**



**Figura F.2 – Estruturas acima do vaso dificultando o acesso**

Na inspeção, obteve-se cobertura total das áreas remanescentes e o desempenho da técnica foi considerado de acordo, conforme os requisitos de planejamento. A inspeção não revelou quaisquer sinais de perda de espessura ou degradação da superfície cladeada em nenhuma das localizações.

A cobertura da parte superior da zona de gás (parte superior do vaso) foi de 60 % do planejado, sendo isto considerado uma não conformidade (nível 3) de acordo com a abordagem da Seção 9. A primeira consideração na determinação de um intervalo de inspeção apropriado é o efeito da falta de cobertura.

## ABNT NBR 16455:2016

Como ponto de partida, considera-se um fator de cobertura  $C_r$  igual a 0,6, uma vez que, três das cinco regiões foram inspecionadas. Este é então ajustado conforme os pontos mencionados em 10.3, isto é:

- a falta de cobertura está localizada em uma região cuja expectativa é de corrosão menos severa do que a corrosão presente nas partes do vaso que estejam molhadas ou em contato com a água. A inspeção de áreas dentro da região molhada do vaso não apresentou quaisquer sinais de degradação. Portanto, é possível ajustar o fator de cobertura para um valor de cobertura total, isto é, para uma perda de cobertura menor do que 5 %, resultando em  $C_r$  superior a 95 %;
- a probabilidade de degradação ativa na região onde ocorreu a falta de cobertura foi avaliada como muito baixa. O histórico de inspeção, incluindo alguns intervalos de inspeção visual prévia, não apresenta nenhuma evidência de degradação. Isto também sugere a utilização de um fator de cobertura alto na avaliação.

Considera-se razoável, neste caso, a adoção de um intervalo máximo admissível de 95 % do intervalo pretendido. Nota-se, entretanto, conforme discutido em 10.3, que o atual intervalo utilizado pode ser ajustado no intuito de alinhar-se com os requisitos operacionais e de planejamento, uma vez que este pode, razoavelmente, ser estendido para coincidir com o intervalo planejado para uma inspeção completa.

Apesar do resultado da avaliação citada anteriormente, sempre que possível devem ser despendidos esforços no intuito de cumprir o escopo de trabalho conforme este foi planejado (a menos que um intervalo reduzido não cause impacto). A extensão que pode ser obtida depende de cada caso em particular, entretanto, em muitas situações de uma inspeção Tipo A, é bem razoável que se substitua áreas com falta de cobertura por outras áreas dentro da mesma região, e isto pode ser considerado assim que for evidenciado que a cobertura exata, conforme definida no escopo de trabalho, não foi possível.

### F.3 POD reduzida em uma inspeção tipo A

A situação a seguir também pode ser utilizada para ilustrar como devem ser tratados os efeitos de uma POD reduzida em uma inspeção tipo A. O escopo de trabalho prevê a utilização de mapeamento da corrosão por ultrassom *B-Scan* e ultrassom convencional com cabeçote angular nas áreas indicadas na Figura F.1. De forma ilustrativa, é assumido que foi possível realizar totalmente a inspeção por ultrassom convencional com cabeçote angular, onde 100 % da cobertura planejada foi obtida. A inspeção com mapeamento da corrosão é posteriormente avaliada indicando POD de aproximadamente 60 % para a degradação de interesse, neste caso, corrosão por pites, obtida quando ambas as técnicas são combinadas. O valor da mudança de POD é indicado apenas de forma ilustrativa e não pode ser considerado como um indicativo real do impacto na POD para uma situação como esta.

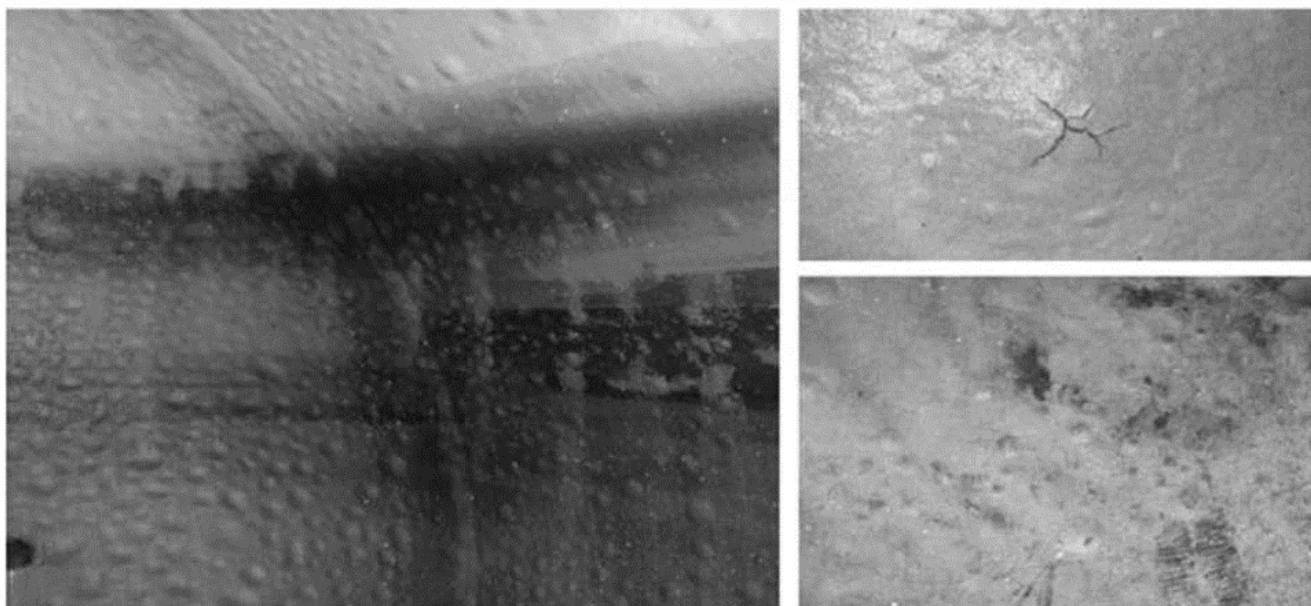
O ponto de partida para obtenção do intervalo admissível será, conforme 10.3:

$$\begin{aligned} I_{\text{admissível}} &= I_{\text{IBR}} \times (2,5P_r - 1,25) \times C_r \\ &= (2,5 \times 0,6 - 1,25) \times 1 \times I_{\text{IBR}} \\ &= 0,25 \times I_{\text{IBR}} \end{aligned}$$

Este intervalo poderá ser futuramente ajustado, por exemplo, caso seja identificada alguma indicação suspeita nos resultados do mapeamento da corrosão.

#### F.4 Falta de cobertura em uma inspeção tipo C

Um vaso separador deve ser inspecionado. O programa de inspeção (IBR) do vaso determina um intervalo de inspeção de três anos para inspeção visual interna. Entretanto, na última inspeção interna foi identificado severo empolamento no revestimento polimérico interno, conforme ilustrado na Figura F.3.



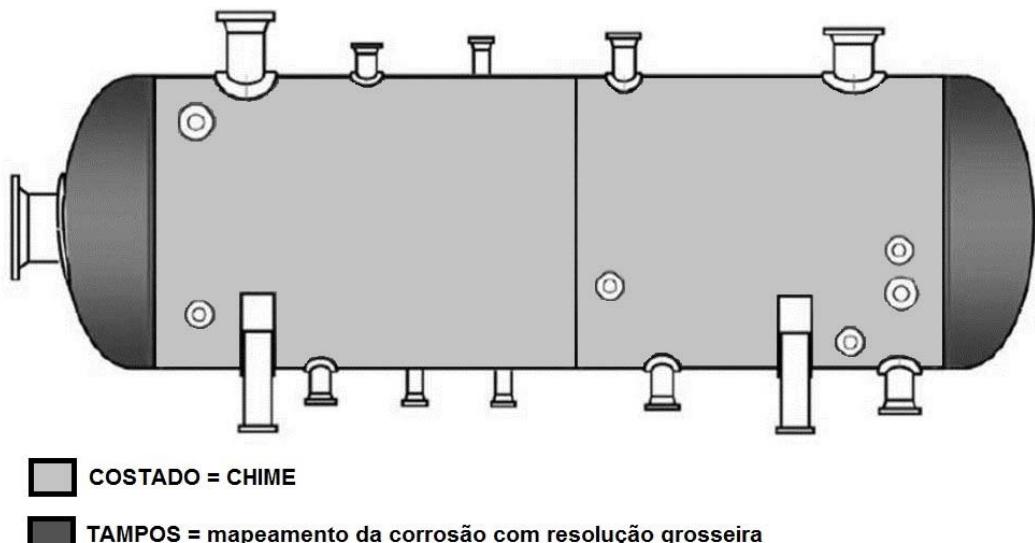
**Figura F.3 – Empolamento e degradação do revestimento interno (de acordo com a última IVI)**

Verificou-se que o empolamento afetava a maior parte do vaso, porém era mais severo no topo, ou seja, na região dos gases. Esperava-se que a exposição do aço-carbono às condições de processo, especialmente na parte inferior do vaso onde há contato com a água, provocaria altas taxas de corrosão, onde, portanto, a integridade do revestimento era uma preocupação. O reparo não era considerado uma opção, uma vez que o problema foi deflagrado durante a IVI.

Foi decidido que se realizaria uma INI na metade do intervalo de uma inspeção normal no intuito de identificar a existência de áreas degradadas (possivelmente existentes nas regiões de perda total do revestimento). O principal requisito era identificar qualquer área de degradação com potencial de comprometer a integridade do vaso até a data da próxima IVI (e reparo do revestimento). A condição do revestimento indicou uma probabilidade alta de haver algumas áreas onde o aço-carbono estivesse exposto às condições de processo e uma abordagem de inspeção tipo C foi considerada apropriada para este caso, ou seja, ampla cobertura utilizando uma técnica visual (*screening*), com esta podendo apresentar sensibilidade limitada para pequenos níveis de degradação, porém alta POD para qualquer degradação mais significante.

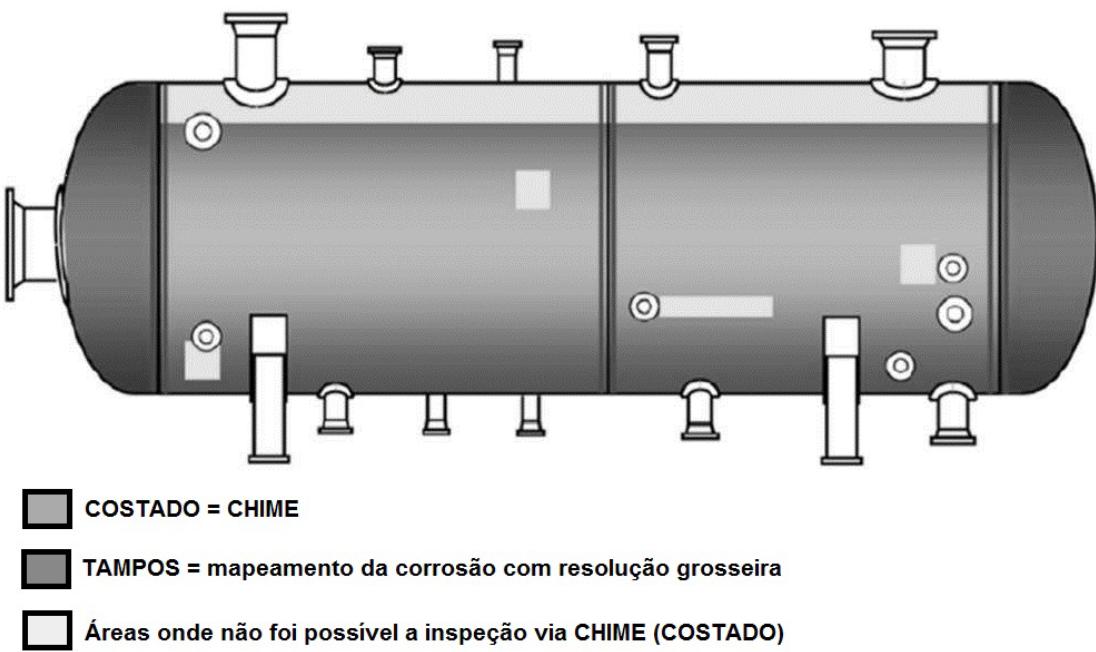
O plano INI desenvolvido prevê a utilização de CHIME como técnica visual (*screening*) preliminar para o casco do vaso, conforme apresentado na Figura F.4. A técnica de CHIME foi selecionada neste caso, uma vez que a espessura de parede do vaso era tal que permitia que a capacidade de detecção da técnica fosse adequada para degradações com profundidades menores que a sobre-espessura de corrosão.

## ABNT NBR 16455:2016

**Figura F.4 – Áreas de cobertura do separador conforme definido no plano de INI**

Para haver acesso, era necessária a montagem de andaime e ele foi montado de forma que a parte superior do vaso não permitiu o acesso para a inspeção via CHIME. Além disso, havia algumas áreas onde foi possível realizar somente a cobertura parcial. As áreas cuja cobertura não foi possível de ser realizada via CHIME são mostradas nas regiões mais claras na Figura F.5. As condições e ajustes foram tais que permitiram que a capacidade da técnica fosse alcançada, conforme se esperava.

A área inacessível à inspeção via CHIME representava aproximadamente 15 % do casco, sendo a maioria desta localizada na sua parte superior. A inspeção via CHIME não revelou nenhuma área com perda de espessura superior a 10 % da espessura de parede e a menor espessura medida nos tampos foi maior que a nominal. Entretanto, houve indicações de corrosão alveolar, com profundidade de até 2 mm (menos que 10 % da espessura nominal), nos tampos. Alvéolos isolados de baixa profundidade também foram encontrados por meio de inspeção por ultrassom pulso-eco com cabeçote a 0° em algumas áreas onde não foi possível posicionar o cabeçote CHIME.

**Figura F.5 – Áreas onde não foi possível a inspeção via CHIME**

A redução de cobertura em uma inspeção tipo C deve ser considerada com alguma preocupação, conforme explicado na Seção 9. A preocupação principal é a perda de cobertura na parte superior do casco, representando cerca de 25 % da área na região de gás do vaso, isto é, a cobertura obtida foi de 75 % do pretendido para esta região. Como ponto de partida, o intervalo admissível deve ser determinado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} I_{\text{admissível}} &= (2,5C_r - 1,25) \times C_r \times I_{\text{IVI}} \\ &= (2,5 \times 0,75 - 1,25) \times 1 \times I_{\text{IVI}} \\ &= 0,65 \times I_{\text{IVI}} \end{aligned}$$

A última inspeção interna indicou a presença de danos no revestimento na região com falta de cobertura. Portanto, é razoável assumir que há alguma exposição do aço-carbono às condições de processo. Isso normalmente é considerado como uma indicação de que o intervalo, conforme determinado anteriormente, deve ser reduzido mais adiante. Entretanto, considerando que a falta de cobertura está localizada na região de gás, as taxas de corrosão ocasionadas pelas falhas no revestimento, provavelmente são menores do que se esperaria em regiões molhadas. Portanto, é razoável adotar como base o intervalo admissível conforme determinado anteriormente, a não ser que uma avaliação das taxas de corrosão indique o contrário. Desta forma, a análise do planejamento, isto é, da inspeção (e reparo do revestimento) na metade do intervalo normal determinado para IVI, é aceita.

## F.5 Qualidade da inspeção prejudicada em uma Inspeção tipo C – Caso 1

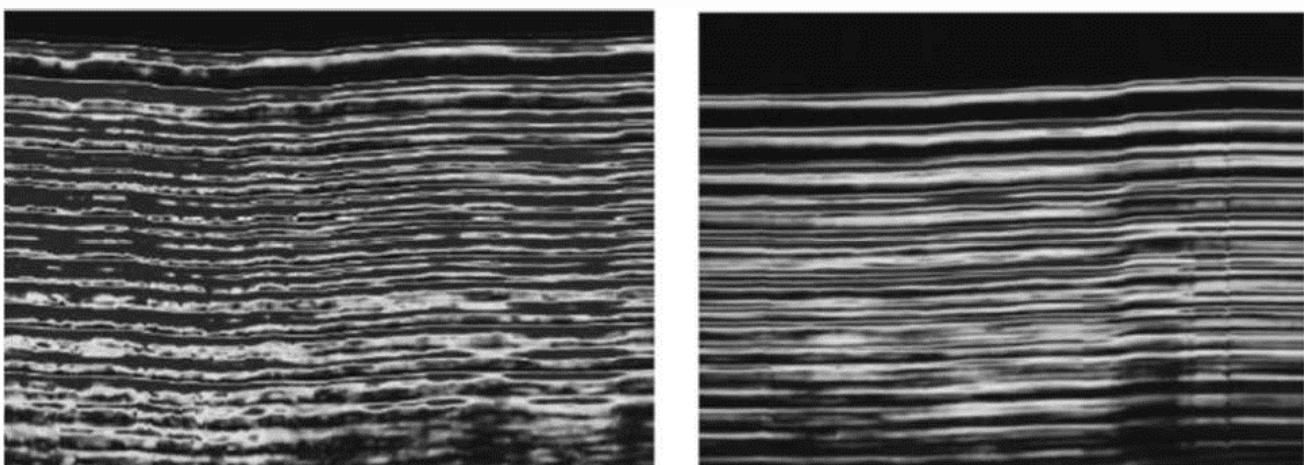
Este exemplo trata da inspeção de um vaso separador cujo plano de INI prevê utilização extensiva da técnica de CHIME para a visualização (*screening*). O material da parte inferior do costado é internamente revestido por polímero e uma abordagem tipo C foi então aplicada. A inspeção abrangeu a cobertura da parte inferior do corpo do vaso por meio da utilização de CHIME, uma vez que esta técnica supostamente apresenta uma capacidade adequada de visualização (*screening*). Uma pequena parte (< 5%) desta área não estava acessível para inspeção via CHIME, porém a maioria dessas zonas foi inspecionada utilizando-se mapeamento da corrosão por ultrassom *B-Scan*, por exemplo, nas regiões próximas de bocais. O casco do vaso apresentou algumas áreas com a pintura e corrosão externa nas quais foi difícil manter o acoplamento ultrassônico. Uma destas áreas é apresentada na Figura F.6.



**Figura F.6 – Áreas com corrosão ou com más condições superficiais afetando a inspeção por CHIME**

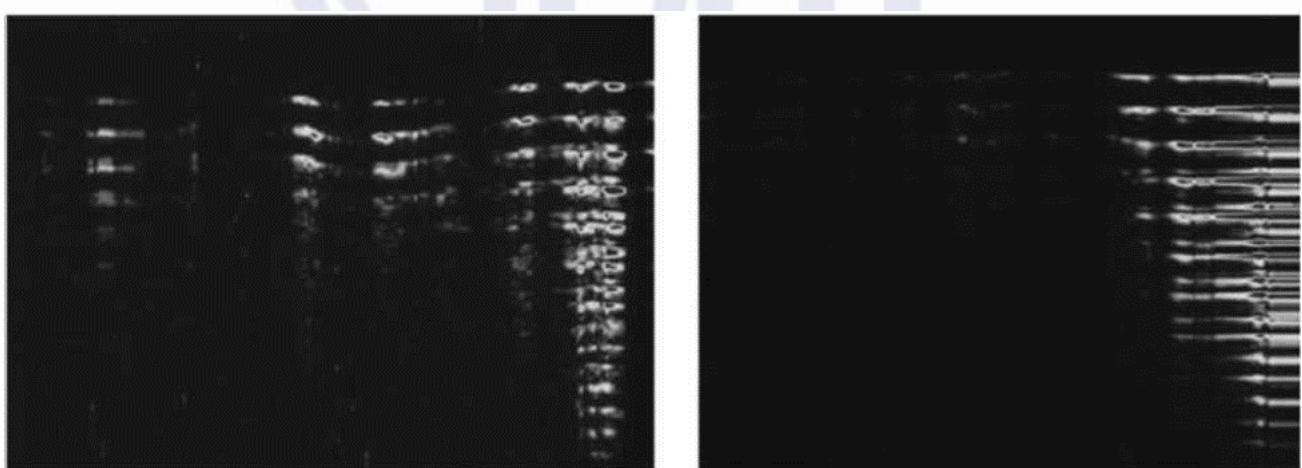
## ABNT NBR 16455:2016

Os sinais resultantes da inspeção por CHIME foram afetados em algumas destas áreas. Alguns dados de CHIME típicos de regiões com boas condições superficiais são apresentados na Figura F.7.



**Figura F.7 – Dados de CHIME típicos de regiões com boas condições superficiais**

A Figura F.8 mostra dois escaneamentos, representando os piores casos obtidos, cuja qualidade dos dados foi claramente degradada. Os efeitos da condição superficial são considerados relevantes nas áreas onde se observa queda geral da amplitude e perda completa do sinal. Caso uma área com significativa perda de amplitude de sinal coincida com a localização de um defeito, é provável que este não seja detectado, isto é, uma queda da POD a níveis menores que 50 % daquele planejado para a inspeção pode ser esperada em algumas áreas. Um total de mais de duzentos escaneamentos por CHIME foram obtidos, e aproximadamente quinze deles apresentaram qualidade visual reduzida dos dados ( $POD < 90\%$  do esperado). A maioria destas varreduras estava localizada na base do vaso.



**Figura F.8 – Varreduras típicas cuja qualidade dos dados foi afetada pela condição superficial do material**

De acordo com a avaliação descrita em 10.5, e considerando que as áreas com a POD prejudicada são localizadas e as varreduras afetadas são poucas em relação ao total, é razoável assumir que as regiões afetadas foram totalmente cobertas. Neste caso, o fator de cobertura é  $(200 - 15)/200 = 95\%$ . Aplicando a Equação obtém-se que o intervalo total para inspeção interna é aplicável. A inspeção também pode ser considerada adequada para remarcação (substituição da interna).

Este exemplo também pode ser usado como base em alguns outros cenários para ilustrar futuras abordagens.

## F.6 Qualidade da inspeção prejudicada em uma inspeção tipo C – Caso 2

Para o mesmo vaso do exemplo F.5, considere-se que a maioria das varreduras foi comprometida pela baixa qualidade superficial, e avaliou-se que, para a maioria destas, a POD foi considerada menor que 50 % da pretendida. Nesta situação, de acordo com 9.8, a não conformidade é considerada inaceitável, sendo a INI incapaz de garantir a integridade do vaso caso este continue operando. Nesta situação, onde existe uma alta probabilidade de existência de degradação relevante não detectada, devido ao fraco desempenho da inspeção, ações adicionais (ver Anexo E) são requeridas.

## F.7 Qualidade da inspeção prejudicada em uma inspeção tipo C – Caso 3

Para o mesmo vaso do exemplo F.5, considere que aproximadamente 30 % das varreduras realizadas apresentam baixa qualidade. Neste caso, conforme as recomendações de 10.3, as áreas de POD reduzida podem ser consideradas áreas não cobertas e um fator de cobertura de 70 % pode ser utilizado na Equação , ou seja, um intervalo admissível máximo de metade do intervalo normal pode ser validado.

## Anexo G (informativo)

### Exemplos de postergação do prazo de inspeção

#### G.1 Exemplo de situação onde aINI é avaliada como não aplicável

Considerar um vaso que foi submetido a duas inspeções visuais internas prévias e o intervalo entre inspeções é de quatro anos. Nenhuma destas inspeções encontrou qualquer degradação além de corrosão muito leve em certas áreas. O início da avaliação daINI vem a seguir.

Confiança na capacidade de predizer o tipo e a localização da degradação: avaliada como baixa uma vez que existem apenas duas inspeções prévias do vaso e aIBR não inclui uma detalhada avaliação de risco da corrosão.

Efetividade da inspeção prévia: avaliada como baixa uma vez que a inspeção mais recente não abrangeu muitas áreas por falta de acesso devido à presença de estruturas internas.

Severidade e taxa de degradação: avaliada como média (observa-se degradação prevista, porém não se espera comprometimento da integridade ao longo da vida da planta).

De acordo com a Seção 6, aINI é não aplicável. Conforme a 11.2.3, é possível justificar uma recategorização na confiança na capacidade de predizer o tipo e a localização da degradação, se uma avaliação de risco da corrosão (ARC) for realizada de forma suficientemente detalhada. Caso a avaliação seja recategorizada e justificada como alta, então aIVI pode ser totalmente substituída porINI, conforme indicado na Seção 6.

Caso a reavaliação seja de no máximo média, aINI não poderá substituir completamente aIVI. Entretanto, a aplicação daINI pode ser utilizada para suportar uma postergação daIVI, conforme indicado na Tabela 7, que recomenda período de até 50 % do intervalo de inspeção baseado na pior taxa de corrosão a partir da inspeção mais recente, na qual uma efetividade média ou alta tenha sido aplicada.

Isto significa que o período máximo de postergação seguindo aINI será de 50 % do intervalo planejado paraIVI, neste caso dois anos, assumindo um intervalo de quatro anos para inspeção interna. Considerando a pior taxa de corrosão, estimada em 0,3 mm por ano, e uma perda de espessura de até 6 mm como aceitável, o tempo para que se chegue a uma condição-limite é de vinte anos. O tempo em operação, desde a última inspeção na qual tenha sido obtida efetividade média ou alta (oito anos atrás) até o final do período de postergação (dois anos seguintes) é de dez anos. Isto representa o tempo até que se chegue a uma condição-limite, que é menor que 75 % do valor definido em 11.2.3, de onde se conclui que o período de dois anos de postergação é aceitável.

No caso anterior, o tempo para uma condição-limite pode ser verificado ao término daINI por meio de uma atualização da condição vigente e, onde necessário, da taxa de corrosão mais severa. O tempo de postergação determinado deve ser menor que o tempo de vida remanescente atualizado (contendo limites adequados conforme definido em 11.2.3).

## G.2 Exemplos de situação onde a INI é avaliada como aceitável

### G.2.1 Exemplo 1

Um vaso separador fabricado em aço-carbono revestido internamente com liga resistente à corrosão deve ser inspecionado internamente. Contudo, o programa de inspeção, de uma forma geral, é otimizado se a inspeção interna desse vaso puder ser adiada por um período de dois anos, sendo que o intervalo para a IVI é de quatro anos. A avaliação indica que a INI é aceitável, com substituição total da IVI. O escopo de trabalho da INI, como um substituto completo para IVI, inclui cobertura de vinte áreas de varredura ao longo do fundo do vaso para mapeamento da corrosão por medição de espessura e inspeção por ultrassom com cabeçote angular. Este requisito pode ser reduzido caso a opção seja por uma inspeção que tenha como objetivo somente a postergação da IVI. As condições indicam que uma abordagem de inspeção tipo A é aplicável. Conforme descrito em 11.2.3, reduções na cobertura devem ser consideradas em primeiro lugar para esse tipo de inspeção. No intuito de garantir a cobertura mínima necessária à postergação, uma amostragem de 50 % da prevista, normalmente é suficiente (ver 10.3).

Os requisitos de cobertura também devem ser avaliados por meio da Equação. Assumindo que a POD será conforme o pretendido ( $P_r = 1$ ), a cobertura (determinada a partir de  $C_r$ ) proporcionará um intervalo de  $0,5 \times I_{IBR}$ .

$$(0,25 \times 1 - 1,25) \cdot C_r = 0,5 \Rightarrow C_r = 0,4$$

Isto é menos do que o mínimo requerido de 50 %, portanto, como ponto de partida, a cobertura pode ser reduzida para 50 % do que se pretendia, ou seja, para um total de dez regiões de varredura das vinte atribuídas inicialmente. Um ponto importante para determinar se a cobertura é aceitável, é assegurar que as dez regiões de varredura encontram-se suficientemente distribuídas, de modo a garantir que uma amostra representativa seja obtida a partir de cada local de susceptibilidade potencialmente diferente dentro da zona em consideração. Deve-se avaliar, por exemplo, se a quantidade de regiões de varredura é suficiente para permitir a cobertura em regiões adjacentes a cada bocal, onde as condições de fluxo podem ser ligeiramente diferentes. Como consequência, pode ser necessário aumentar a cobertura acima do nível de 50 % (10 regiões de varredura) indicado pela Equação, de modo a assegurar que todas as variações locais estejam cobertas. Conforme demonstrado em 11.2.3, uma redução no tamanho das regiões de varredura, ou seja, mantendo os vinte locais de varredura, mas fazendo com que cada área de varredura seja de 50 % do tamanho determinado no plano original, só é aplicável nos casos em que se tenha certeza da ausência de variações dentro de uma mesma zona.

### G.2.2 Exemplo 2

Um vaso revestido internamente com revestimento polimérico apresenta programação para inspeção interna e sua postergação está sendo avaliada. A avaliação por INI indica que o vaso é elegível para INI como alternativa para a substituição total da IVI. A periodicidade atual para a IVI é de cinco anos e uma postergação de dois anos está sendo solicitada. O plano de INI inicialmente desenvolvido para a inspeção completa em substituição à IVI abrange a cobertura de todas as áreas acessíveis do casco em que houvesse contato com o meio líquido. A estimativa inicial era que a soma dessas áreas seria superior a 90 % da área de contato com o meio líquido. Entretanto, algumas partes do casco do vaso não são acessíveis para inspeção e somente 75 % da cobertura planejada para a mesma pode ser obtida. No plano inicial de INI, considerou-se realizar o mapeamento da corrosão com taxa de varredura razoavelmente boa. A fim de reduzir o tempo total da inspeção, foi adotado

**ABNT NBR 16455:2016**

um aumento da taxa de varredura no processo de mapeamento da corrosão. A Equação pode ser usada para se determinar a POD mínima com relação à que foi inicialmente planejada:

$$(0,25 \times C_r - 1,25)P_r = 0,5 \Rightarrow (0,25 \times 0,75 - 1,25)P_r = 0,5 \Rightarrow P_r = 0,8$$

Portanto, um aumento na taxa de varredura pode ser implementado, desde que este não resulte em uma diminuição da POD para valores menores que 80 % da estimada no plano de inspeção inicial.

## Bibliografia

- [1] DNV-RP-G103: Non-intrusive inspection, 2011
- [2] API 510: Pressure Vessel Inspection Code, 8th Ed., American Petroleum Institute, 1997
- [3] PCN/GEN General Requirements for Qualification and PCN Certification of NDT Personnel. British Institute of Non-Destructive Testing
- [4] Decision Guidance Process for Non-Invasive Inspection: User Guide, HOIS 2000 Report ref. HOIS2000 C5/3, September 2004.
- [5] Recommended Practice for Non-Invasive Inspections, GSP 235 Mitsui Babcock, 2002
- [6] Guidance on the Evaluation of Non-Invasive Inspection, HOIS 2000 Report ref. HOIS2000 C5/4 November 2005
- [7] Best Practice for the Procurement and Conduct of Non-Destructive Testing. Part I: Manual Ultrasonic Inspection, HSE Gas and Process Safety Technology Division, November 2000. www.hse.gov.uk/dst/ndt.pdf.
- [8] Best practice for risk based inspection as part of plant integrity management, HSE Contract Research Report 363/2001 prepared by TWI and Royal & Sun Alliance Engineering, Health and Safety Executive, 2001
- [9] Energy Institute Model code of safe practice. Pressure vessels examination, Part 12. (1993)
- [10] Energy Institute Model code of safe practice. Pressure piping systems examination, Part 13. (1993)
- [11] Wall M. and Highmore P.J., 'A comparison of visual and non-invasive methods for vessel and tank internal inspection', HOIS(98)P8, A report produced for HOIS by AEA Technology, 1998
- [12] National NDT Centre POD database, AEA Technology Engineering Solutions, 1998
- [13] Silk M.G., Stoneham A.M and Temple J.A.G., The reliability of non-destructive inspection, Adam Hilger, Bristol, 1987
- [14] Non-destructive Testing Handbook American Society for Non-destructive Testing, Second Edition, 1996
- [15] Non-destructive evaluation (NDE) capabilities data-book. Non-destructive Testing Information Analysis Center (NTIAC) Texas Research Institute, 1997. Interactive Knowledge Base (IKB) on NDT, HOIS Member Version
- [16] Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Structures BS7910: 1997 British Standards Institution, BSI, London
- [17] Best Practice for the Procurement and Conduct of Non-Destructive Testing Part 1: Manual Ultrasonic Inspection, HSE, November 2000

**ABNT NBR 16455:2016**

- [18] Best Practice for the Procurement and Conduct of Non-Destructive Testing Part 1: Magnetic Particle and Dye Penetrant Inspection, HSE, April 2002
- [19] Discussion with P Horrocks regarding AEA Technology RBI principles, January 2001
- [20] Comments from D Ritchie regarding Phillips Petroleum methods for determination of inspection interval, March 1999
- [21] Example adapted from "Introduction to Life Prediction of Industrial Plant Materials" edited by M. Kowaka. Allerton Press 1994
- [22] Probabilistic Models for Optimising Flaw Detection in LPG Welds G. A. Georgiou, Proceedings of the British Institute of NDT Conference 2000, pp 168 - 173.
- [23] <http://hois-ikb.esrtechnology.com>
- [24] Recommended Practice No. SNT-TC-1A, Personnel Qualification and Certification in Non-destructive Testing