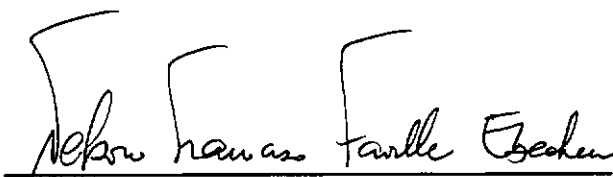


# SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO PARA A ANÁLISE DA INTEGRIDADE FÍSICA DE EQUIPAMENTOS DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

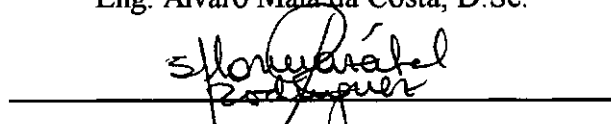
JOSE ANTONIO BOGARIN GEYMAYR

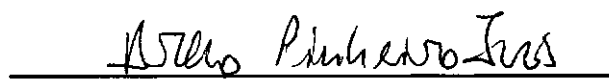
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

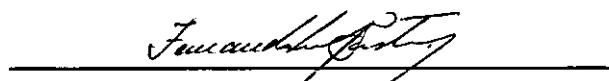
Aprovada por :

  
Prof. Nelson F. Favilla Ebecken, D.Sc.  
(PRESIDENTE)

  
Eng. Alvaro Maia da Costa, D.Sc.

  
Eng. Sergio G. Hermazabal Rodriguez, D.Sc.

  
Eng. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

  
Prof. Fernando Luiz Bastian, D.Sc.

**BOGARIN, JOSE ANTONIO**

Sistema baseado em conhecimento para a análise da integridade física de equipamentos da indústria do petróleo [Rio de Janeiro] 1993.

VIII, 165 p. 29.7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 1993)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Sistemas Especialistas I. COPPE/UFRJ      II. Título (série).

*A meus pais, Jorge e Marta*  
*A minha esposa, Nathalie*  
*Aos meus filhos Gabriela e Mauricio*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o professor Nelson Francisco Favilla Ebecken pela orientação irrepreensível, pelo apoio e principalmente, pela amizade.

A minha querida esposa e filhos, pelo incentivo, pela paciência e por sobre todas as coisas, pelo amor e compreensão.

Aos meus queridos pais, que em todo momento apoiaram a minha formação profissional e incentivaram as minhas atividades de pesquisa.

A todos meus colegas do Programa de Engenharia Civil da COPPE, pela amizade e pelos bons momentos compartilhados ao longo desses anos.

A PETROBRÁS, pelo fornecimento do material bibliográfico e pela capacidade profissional dos seus engenheiros, sem os quais seria impossível a realização do trabalho.

Aos engenheiros Carlos S. Camerini, Luiz C. Meniconi, Alexandre Pope, José C. Teixeira e Renato Bernardes pela sua contribuição como especialistas, pelas críticas, sugestões e apoio à elaboração deste trabalho.

Aos engenheiros Luiz C. Messina e Marcia Godgtroy pelas discussões que levaram à definição do assunto da tese.

Finalmente, presto uma homenagem póstuma ao nosso falecido colega e amigo Rafael Ochoa, que deixou muitas saudades com a sua partida.

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

## **SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO PARA A ANÁLISE DA INTEGRIDADE FÍSICA DE EQUIPAMENTOS DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO**

*JOSE ANTONIO BOGARIN GEYMAIR*

Novembro de 1993

Orientador : Nelson Francisco Favilla Ebecken

Programa : Engenharia Civil

Este trabalho trata sobre o desenvolvimento de um sistema especialista idealizado para auxiliar técnicos e engenheiros na tomada de decisões ao longo da etapa de inspeção de equipamentos, principalmente no que se refere à avaliação das condições operacionais atendendo as normas de segurança vigentes. A base de conhecimentos do sistema cobre as principais etapas da inspeção de equipamentos de processo utilizados na indústria petrolífera: ensaios não destrutivos, análise de descontinuidades pela mecânica da fratura, recomendação do procedimento de reparo correspondente, análise de risco de equipamentos em operação e cálculo da vida útil do equipamento.

O sistema foi desenvolvido em microcomputador no ambiente NEXPERT OBJECT sob o sistema operacional DOS. A utilização de conceitos avançados de programação orientada a objetos (geração dinâmica de objetos, reconhecimento de padrões), e a utilização de arquitetura do tipo "blackboard" na construção da base de conhecimentos e bancos de dados permite gerenciar grande número de informações ao longo da análise. A parte algorítmica do sistema foi representada em FORTRAN77 e a sua interface com a base é feita através de arquivos. A análise de riscos utiliza um enfoque baseado em conhecimento e algoritmos "fuzzy sets".

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

## **A KNOWLEDGE-BASED SYSTEM FOR ANALYSIS OF THE PHYSICAL INTEGRITY OF EQUIPMENT IN THE PETROLEUM INDUSTRY**

*JOSE ANTONIO BOGARIN GEYMAIR*

November 1993

Thesis Supervisor : Nelson Francisco Favilla Ebecken

Department : Civil Engineering

This work deals with the developing of an expert system, idealized to assist the technical personnel in the decision making process of the evaluation of the physical integrity of the equipment. The equipment must operate under safe conditions, according to the current standards. The knowledge base gathers the three expertise domains required to cover the inspection of the equipment : non-destructive tests, analysis of detected flaw with fracture mechanics procedures, and recommendation of the corrective action.

The system was developed on an personal computer with the NEXPERT OBJECT environment under DOS. Advanced object-oriented techniques (dynamic object generation, pattern matching) and a blackboard architecture configuration are used to define the knowledge and the data base of the system. This feature allows the management of a great amount of information during the analysis. The algorithms of the system were developed under the FORTRAN 77 compiler. The interface between the system and the algorithms is performed by a file definition structure. The risk analysis is focused in heuristics and fuzzy sets procedures.

## ÍNDICE

<i>I. INTRODUÇÃO E ESCOPO</i>	<i>1-8</i>
<i>I.1. Introdução</i>	
<i>I.2. Escopo</i>	
<i>I.3. Arquitetura do sistema</i>	
<i>I.4. Organização da tese</i>	
<i>II. REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO</i>	<i>9-37</i>
<i>II.1. Introdução</i>	
<i>II.2. Formalismos de representação</i>	
<i>II.3. Mecanismo de inferência</i>	
<i>II.4. Arquiteturas "Blackboard"</i>	
<i>III. INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS</i>	<i>38-67</i>
<i>III.1. Introdução</i>	
<i>III.2. Ensaaios não destrutivos</i>	
<i>III.3. Avaliação de resultados de ensaios</i>	
<i>III.4. Classificação das descontinuidades</i>	
<i>III.5. Escolha do END adequado para dimensionar defeitos</i>	
<i>III.6. Critério de caracterização de trincas múltiplas</i>	
<i>III.7. Trincas de operação em aços carbono e de baixa liga</i>	
<i>III.8. Estrutura da base de conhecimentos INTEQ</i>	
<i>IV. MECÂNICA DA FRATURA</i>	<i>68-100</i>
<i>IV.1. Introdução</i>	
<i>IV.2. Modos de consulta do sistema</i>	
<i>IV.3. Caracterização de defeitos</i>	
<i>IV.4. Avaliação da criticidade de defeitos</i>	
<i>IV.5. Análise de sensibilidade e margens de segurança</i>	
<i>IV.6. Determinação das tensões atuantes</i>	
<i>IV.7. Determinação da tenacidade do material</i>	
<i>IV.8. Identificação de regiões na curva de geometria limite</i>	
<i>IV.9. Estrutura da base de conhecimentos MFRAT</i>	
<i>IV.10. Estrutura do algoritmo FRAT</i>	

<i>V. AÇÃO CORRETIVA</i>	<i>101-107</i>
<i>V.1 Introdução</i>	
<i>V.2 Esmerilhamento</i>	
<i>V.3 Enchimento com solda</i>	
<i>V.4 Tratamento térmico de alívio de tensões</i>	
<i>V.5 Estrutura da base soldagem</i>	
<i>VI. UTILIZAÇÃO DE MATRIZES DE INCERTEZA PARA ANÁLISE DE RISCO</i>	<i>108-128</i>
<i>VI.1. Introdução</i>	
<i>VI.2. Definição de conjuntos "fuzzy"</i>	
<i>VI.3. Variáveis linguísticas</i>	
<i>VI.4. Inferência com raciocínio aproximado</i>	
<i>VI.5. Extremização de funções de associação</i>	
<i>VI.6. Análise de risco com matrizes "fuzzy"</i>	
<i>VII. CONCLUSÕES</i>	<i>129-135</i>
<i>VII.1. Escolha da ferramenta para sistemas baseados em conhecimento de engenharia.</i>	
<i>VII.2. Recomendações para utilização de arquiteturas do tipo "Blackboard"</i>	
<i>VII.3 Expectativas do sistema INTEQ</i>	
<i>VII.4. Análise de risco e tratamento de incertezas</i>	
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>136-138</i>
<i>ANEXO I EXEMPLOS DE CONSULTAS AO SISTEMA</i>	<i>139-147</i>
<i>ANEXO II RELATÓRIO DE CONSULTA GERADO PELO SISTEMA</i>	<i>148-165</i>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO E ESCOPO

### I.1 INTRODUÇÃO

As indústrias de refino de petróleo e outros processos químicos utilizam um extenso número de vasos de pressão, tanques, tubulações, fornos e outros equipamentos, fabricados com as mais variadas geometrias e utilizando diferentes tipos de materiais, incluindo os mais diversos tipos e ligas de aços.

Durante a inspeção do equipamento, pode-se encontrar indicações que afetam a confiabilidade do equipamento em operação. A recuperação do equipamento avariado é demorada e dispendiosa, e a sua indisponibilidade gera uma interrupção parcial ou total da produção, que em certos casos pode ocasionar um prejuízo de varios milhões de dólares.

O tempo estimado de reparo muitas vezes é ultrapassado quando a análise exige a utilização de tecnologias complementares, tais como elementos finitos ou mecânica da fratura, que permitam um diagnóstico mais detalhado sobre a integridade física do equipamento.

Uma característica do processo é a necessidade de interação de diversas especialidades para obter resultados confiáveis. A grande massa de informação gerada ao longo da inspeção, a dificuldade encontrada pelo usuário para consulta a especialistas e a necessidade de diminuir o tempo gasto da inspeção até a volta à operação viabiliza a implementação de um protótipo de sistema especialista projetado para evitar paradas desnecessárias, agilizar o processo de análise do equipamento, e sugerir ações que permitam o retorno do equipamento à operação.

### I.2 ESCOPO

O sistema especialista proposto, denominado INTEQ, tem como objetivo final a integração de parte considerável do conhecimento necessário para a resolução do problema nas suas mais diversas formas: bancos de dados, programas aplicativos de análise, bancos de conhecimento resultante da experiência acumulada dos especialistas, normas e procedimentos, textos e gráficos explicativos, etc, permitindo que os diferentes setores envolvidos com essa tecnologia possam ser beneficiadas.

O INTEQ não foi idealizado para tomar decisões, mas para fornecer sugestões com fundamento teórico, que ajudem ao usuário na tomada de decisões evitando a interrupção demorada da sequência normal de uma inspeção [1].

Os procedimentos a serem descritos, obtidos da experiência dos especialistas da PETROBRÁS e de uma extensa pesquisa bibliográfica podem ser utilizados para

equipamentos construídos com aços do tipo CARBONO ou AUSTENÍTICO, nos seguintes casos:

- *Vasos de Pressão* projetados e fabricados de acordo com [2,3].
- *Tanques de armazenamento* projetados e fabricados de acordo com [4,5].
- *Tubulações* projetadas e fabricadas de acordo [6].
- *Equipamentos em geral*, projetados e fabricados de acordo com [2-6].

Os equipamentos deverão trabalhar a temperaturas superiores a  $-160$ ( F) e inferiores à temperatura de fluência do material, especificada como a temperatura máxima de projeto para o material [3].

<b>EQUIPAMENTOS</b>	<b>MECANISMOS DE FALHA</b>	<b>TIPO DE FALHA</b>
<b>VASOS DE PRESSÃO</b> Esferas Torres Cilindros Cascos Permutadores	Contaminação por H <sub>2</sub> S Erosão Corrosão Fadiga Vibrações	Trincas Perdas de espessura
<b>Tubulações</b>	Contaminação por H <sub>2</sub> S Erosão Corrosão Fadiga Vibrações	Trincas Perdas de espessura
<b>Tubos de Fornos</b>	Contaminação por H <sub>2</sub> S Erosão Corrosão Tensões elevadas	Trincas Perdas de espessura Deformações
<b>Tanques</b>	Contaminação por H <sub>2</sub> S Erosão Corrosão	Perdas de espessura

Tabela I.1 - Relação de equipamentos avaliados pelo sistema

A tabela (I.1) mostra a relação de equipamentos utilizados em refinarias do parque PETROBRÁS que atendem às especificações citadas anteriormente e que poderão ser analisadas com o sistema proposto.

### I.3 ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema INTEQ foi implementado de maneira modular e estruturada, o que facilita a manutenção e/ou inclusão de módulos. A estrutura do sistema (figura I.1) é composta dos seguintes módulos: *banco de dados*, *algoritmos*, *interface do usuário*, *bases de conhecimento*. As fontes de consulta utilizadas na fase de aquisição de conhecimentos, foram a bibliografia disponível, resultados de ensaios realizados na PETROBRÁS e a experiência de especialistas nas áreas de metalurgia, análise de tensões e inspeção de equipamentos.

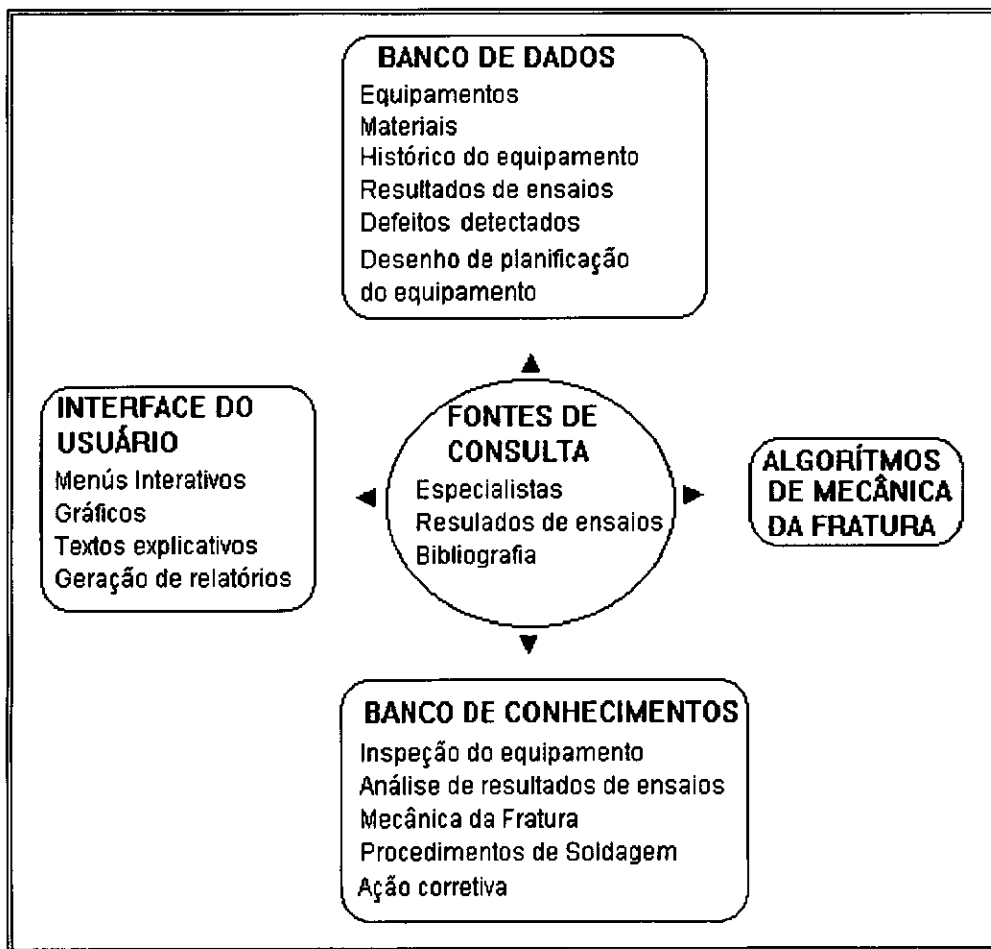


Figura I.1 Estrutura do sistema INTEQ

Os módulos que integram o sistema INTEQ são descritos a seguir:

- **Bancos de Dados (BD):** Existe na Petrobrás uma quantidade enorme de informação distribuída numa extensa região geográfica. Na maioria das vezes, esta informação não se encontra à disposição de todos os usuários, por falta de comunicação entre os

diversos setores ou devido à dispersidade das fontes (dados não compilados dificultam o seu aproveitamento em outros setores da companhia). O módulo de banco de dados do sistema INTEQ foi construído e dividido em :

*(a) Características físicas e mecânicas de aços*

- Curvas experimentais de CTODxTEMPERATURA
- Curvas experimentais TENSÃOxDEFORMAÇÃO do material
- Dados obtidos da bibliografia

*(b) Dados Técnicos do equipamento*

- Dados de montagem
- Dados de operação
- Desenhos de planificação
- Histórico

*(c) Resultados de Ensaios Não Destrutivos (END)*

- Defeitos a serem analisados pela Mecânica da Fratura
- Descontinuidades Reprovadas (defeitos)
- Descontinuidades Relevantes
- Quantidade de defeitos por solda
- Amostragem de soldas inspecionadas

*(d) Laudos da mecânica da fratura de consultas anteriores*

*(e) Procedimentos de soldagem gerados em consultas anteriores*

- **Base de Conhecimentos (BC):** O sistema INTEQ foi implementado com arquitetura do tipo "Blackboard", que permite classificar e implementar diversas bases de conhecimento que se comunicam entre si, e que podem ser acessadas independente ou sequencialmente de acordo com as combinações necessárias para resolver o problema. O conjunto de BCs do sistema INTEQ contém informação para dar assistência ao usuário nas seguintes solicitações:

*(a) Inspeção do equipamento;*

- Análise do histórico do equipamento
- Recomendações prévias de inspeção
- Recomendações para detecção e localização de descontinuidades
- Recomendações para identificação de defeitos
- Recomendações para dimensionamento de defeitos
- Recomendação de técnicas especiais de ensaios não destrutivos (END)
- Análise de resultados de END
- Seleção de defeitos detetados nos END a serem analisados pela mecânica da fratura.

- Descrição de meios agressivos em equipamentos industriais
- Geração de relatórios solicitados pelo usuário

*(b) Análise pela mecânica da fratura;*

- Análise numérica e avaliação da criticidade dos defeitos detetados.
- Cálculo da geometria limite de defeitos.
- Seleção dos defeitos que podem ficar no equipamento.
- Seleção dos defeitos a serem reparados.
- Análise de risco do equipamento em operação.
- Determinação da vida útil e prazo para inspeções futuras
- Cálculo da espessura mínima admissível de chapas com cavidades ou redução de espessura.
- Geração de laudo da mecânica da fratura para defeitos analisados.
- Atualização de dados de histórico, materiais ou do próprio equipamento.
- Recategorização e retroanálise de defeitos mantidos na estrutura após a execução de ações que influenciem a análise pela MF (necessidade de tratamento térmico, esmerilhamento, etc.)

*(c) Sugestão da ação corretiva correspondente;*

- Recomendação de procedimentos de soldagem
- Especificação de parâmetros para tratamentos térmicos
- Identificação dos defeitos que precisam enchimento com solda.
- Geração de relatório de procedimento de soldagem
- Indicação de ensaios complementares

- **Algoritmos de análise:** O sistema requer a implementação de um algoritmo a ser utilizado pelas BC do sistema. O sistema, denominado FRAT, foi desenvolvido FORTRAN 77 para processar a parte numérica da análise da mecânica da fratura (MF) e gerar as curvas a serem utilizadas pelo sistema para montar o laudo correspondente ou fornecer explicações ao usuário. O sistema FRAT executa as seguintes funções:

*(a) Análise da sensibilidade do defeito e geração dos gráficos correspondentes.*

- Variações da tenacidade ou resistência do material
- Variação das tensões atuantes
- Variação da geometria do defeito

*(b) Avaliação da criticidade do defeito e geração dos gráficos correspondentes*

- Posição do defeito na curva FAD (Failure Assessment Diagram)
- Posição do defeito na curva de geometria limite

*(c) Definição dos parâmetros de esmerilhamento e geração dos gráficos correspondentes*

- Forma da cavidade
- Espessura mínima remanescente
- Adoçamento

*(d) Interface com as bases de conhecimento do sistema INTEQ*

- **Interface do usuário:** Os recursos previstos no sistema a ser utilizados durante a consulta incluem:

*(a) Geração de relatórios a serem definidos pelo usuário*

*(b) Geração de telas gráficas interativas*

*(c) Geração de textos e gráficos explicativos*

*(d) Seleção de funções com telas de menus interativos*

*(e) Saídas para arquivos de dados e impressoras*

*(f) Memorização do caminho de solução*

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O presente texto pretende incluir um resumo teórico dos aspectos relevantes das tecnologias emergentes da engenharia do conhecimento e da engenharia de equipamentos que foram necessários para produzir o sistema INTEQ. Espera-se ter conseguido realizar um produto de utilidade prática da engenharia. Para tal, diversas áreas de pesquisa devem ser abordadas, e como a literatura é vasta, o texto inclui apenas a bibliografia considerada indispensável à leitura. Para maiores informações, recomenda-se a leitura da referência [7]. O conhecimento adquirido e o protótipo resultante são de propriedade da PETROBRÁS.

No *capítulo II* apresenta-se os recursos disponíveis para representação de conhecimentos em ambientes de desenvolvimento híbridos de última geração. Recomendações e exemplos práticos de utilização de classes, objetos e meta-conhecimento descrevem a potencialidade da ferramenta escolhida. A arquitetura "blackboard" do sistema é descrita em detalhe, citando as vantagens e características deste tipo de implementação.

No *capítulo III* descreve-se a parcela de conhecimentos a ser implementada, referente à inspeção de equipamentos. As bases INTEQ e INSP são responsáveis pela análise e classificação das indicações detetadas com os ensaios não destrutivos correspondentes em função da norma e experiência dos engenheiros de manutenção. Sugestões relacionadas com identificação e dimensionamento de defeitos são também descritas ao longo deste capítulo.

No *capítulo IV* apresenta-se em detalhe os procedimentos de mecânica da fratura utilizados para avaliação da criticidade dos defeitos. Comentários e soluções adotadas para tratamento de incertezas decorrentes da utilização do modelo, e a interação do modelo citado com o especialista foram representados na base MFRAT. O usuário sem conhecimentos de MF podem processar a base, obtendo explicações e laudos que permitam dar continuidade ao processo de solução do problema. A estrutura da base MFRAT e do algoritmo FRAT, responsáveis pela análise de defeitos planares (trincas) e volumétricos (cavidades) são descritas no final do capítulo.

O *capítulo V* trata sobre o universo de ações corretivas adotadas ao longo do procedimento de reparo ou prevenção de defeitos de operação, representados na base SOLDAGEM.

O *capítulo VI* introduz o conceito de conjuntos "fuzzy" na consideração de incertezas associadas ao modelo utilizado, e a experiência do especialista. É apresentado um modelo para avaliação da vida útil, cálculo do prazo para inspeção futura e avaliação do risco do equipamento. A análise foi baseada em [8-19], utilizando conjuntos "fuzzy"

para representar níveis de contaminação, mudanças bruscas das condições operacionais e expectativas de taxas crescimento dos defeitos remanescentes ao longo do tempo.

No *capítulo VII* apresenta-se as observações e conclusões relacionadas com a escolha da ferramenta ideal para aplicações de engenharia, recomendações para implementação de arquiteturas "blackboard", expectativas de utilização do sistema INTEQ e potencialidades deste tipo de programação para desenvolvimentos futuros.

No *Anexo I* apresenta-se telas geradas pelo sistema ao longo da consulta.

O *Anexo II* contém listagem do relatório final gerado pelo sistema com os resultados obtidos ao longo da consulta.

## CAPÍTULO II

### REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

#### II.1. INTRODUÇÃO

Existe na engenharia de computação a área de *Inteligência Artificial (IA)*, que vem estudando há décadas, técnicas e procedimentos que permitam desenvolver sistemas de computador capazes de simular o processo de solução ou duplicar as funções do cérebro humano. A pesquisa de IA focaliza o desenvolvimento de software e hardware destinados a reproduzir procedimentos mentais e físicos do ser humano. *Procedimentos mentais* estão relacionados com o pensamento, o raciocínio, o aprendizado, o armazenamento de informação e a resolução de problemas. *Procedimentos físicos* estão relacionados com funções motoras ou sensitivas tais como visão, audição, olfação, etc. A robótica industrial, os jogos eletrônicos e os sistemas especialistas são exemplos práticos de aplicações resultantes da tecnologia de IA. A evolução do computador ao longo do tempo foi um fator preponderante para os avanços na área.

Embora o objetivo inicial na concepção do computador foi desenvolver processadores capazes de armazenar "conhecimento", o resultado obtido na prática foi a construção e aperfeiçoamento de processadores capazes somente de armazenar dados. Inicia desta maneira a era dos "algoritmos", onde pesquisadores no mundo inteiro concentram as suas atividades em idealizar modelos, que possam ser representados com programas de computador visando a manipulação de grandes quantidades de informação e a redução do tempo gasto na análise. A conquista do espaço na década de 60 teve grande influência na evolução da programação algorítmica. Surgem assim, as linguagens estruturadas como FORTRAN, PASCAL e C, que permitem aproveitar os recursos disponíveis e desenvolver programas de fácil manutenção. O método dos elementos finitos é um exemplo prático da evolução da ciência em função da evolução da informática. A falta de recursos das linguagens citadas para a representar modelos declarativos viabilizou o aparecimento das linguagens declarativas, como é o caso do LISP ou PROLOG. A programação "algorítmica" é recomendada para resolver problemas baseados em análises quantitativas. Este tipo de programação torna-se ineficiente na representação de problemas que dependam do julgamento ou experiência do ser humano (análise qualitativa). Surgem assim os *sistemas especialistas (SE)* ou *sistemas baseados em conhecimento (SBC)*, que são programas de computador que incorporam o conhecimento ou experiência de especialistas numa determinada área, simulando ao longo da consulta, a interação entre usuários e especialistas. Os sistemas especialistas podem ser classificados de acordo com o tipo de problema a ser resolvido[20]:

- . *Interpretação*: Descreve a situação em função de dados sensoriais
- . *Predição*: Infere consequências em função das condições iniciais dadas.
- . *Diagnóstico*: Identifica o mau funcionamento do sistema em função dos sintomas observados.
- . *Projeto*: Define objetos em função das restrições e normas vigentes.
- . *Planejamento*: Análise qualitativa das alternativas de solução.
- . *Monitorização*: Compara as observações com as expectativas correspondentes
- . *Ação corretiva*: Sugere a correção para o mau funcionamento detectado.
- . *Reparos*: Executa o plano de ações corretivas prescritas.
- . *Controle*: Governa o comportamento do sistema.

Observa-se que as vantagens da programação declarativa são as desvantagens da algorítmica e vice-versa. Para o caso de aplicações de engenharia, o ideal seria implementar um modelo híbrido que seja capaz de representar os modelos matemáticos e a experiência requerida dos especialistas para obtenção de resultados confiáveis. A escolha da ferramenta ideal para implementar o sistema proposto é fundamental para atingir os objetivos propostos. Os fatores que influenciam na escolha são a necessidade de integração de algoritmos e heurística, a consideração de parâmetros vagos ou desconhecidos que influenciam o resultado, a disponibilidade económica do cliente, os requisitos de portabilidade do sistema, a frequência de manutenção e o número de usuários. Pode-se classificar as ferramentas de implementação em *linguagens de programação* e os *ambientes de desenvolvimento*. As mais utilizadas na atualidade são[20]:

- . *Linguagens de máquina*: Assembler
- . *Linguagens convencionais* : Fortran, Pascal, C, C++, Basic
- . *Linguagens declarativas*: Prolog, Lisp
- . *Ambientes baseados em regras*: ESE, Expertech
- . *Ambientes híbridos*: Nexpert OBJECT, G2, KEE, ART

No caso de sistemas especialistas, a utilização de linguagens de programação está ultrapassada, pois a necessidade de implementação do algoritmo de busca e das facilidades de interface com o usuário e rotinas externas, limita a sua utilização à analistas de sistemas especializados em IA. A vantagem de utilizar ambientes de desenvolvimento de sistemas especialistas é que os algoritmos de busca e uma variedade de recursos computacionais, já fazem parte da ferramenta, reduzindo consideravelmente

o tempo de implementação, testes e manutenção do sistema. Por outro lado o mesmo ambiente pode ser aproveitado para desenvolver sistemas especialistas em outras áreas e permitir no futuro a interação entre as mesmas.

No Brasil, os primeiros ambientes propícios para desenvolver sistemas especialistas de engenharia apareceram no final da década de 80, o que permitiu a rápida difusão da tecnologia na área. No caso específico de análise de estruturas, no início dos anos 90 surgem os primeiros sistemas integrando modelos matemáticos de análise estrutural com o conhecimento especializado requerido para a sua utilização. Estes sistemas otimizam dados de entrada, processam os algoritmos correspondentes e diagnosticam os resultados obtidos. Cita-se como exemplos o sistema TRADAN [21] que foi implementado em Expertech [21] para rodar em computadores do tipo PC para avaliação, análise e tratamento de danos detectados ao longo da inspeção de estruturas de plataformas marítimas de petróleo; e o sistema FRAES [22], que foi implementado no ambiente ESE [22] para mainframe IBM 4381, visando a análise do comportamento mecânico local de tubos flexíveis utilizados na indústria do petróleo.

O ambiente escolhido para a implementação do sistema a ser idealizado, denominado INTEQ, é o NEXPERT OBJECT [23] que é uma ferramenta de última geração e permite a representação do conhecimento nas suas mais diversas formas. Este capítulo será destinado para definir os conceitos básicos referentes a classes, objetos, metachecimento, frames, regras, interface com bancos de dados e algoritmos utilizados na construção da base de conhecimento (BC). Posteriormente será descrita a arquitetura do tipo "Blackboard" (BB) escolhida para esta aplicação. Para terminar, será apresentada uma descrição da estrutura do sistema, os bancos de dados, os algoritmos e as facilidades da interface do usuário. As bases de conhecimento que integram o sistema INTEQ serão descritas nos capítulos posteriores.

## II.2. FORMALISMOS DE REPRESENTAÇÃO

O dinâmica de um sistema especialista pode ser representado com dois planos ortogonais, conforme a figura (II.1). O plano YY representa o *domínio* da aplicação, onde os conceitos e atributos sobre os quais se processa o conhecimento são representados com classes, objetos e propriedades. O plano XX representa a estrutura do *conhecimento* adquirido que manipula os conceitos definidos no plano YY ao longo do processo de solução do problema. O conhecimento é representado por regras que podem ser ordenadas hierarquicamente formando estruturas independentes. O *mecanismo de inferência* é responsável pela dinâmica do sistema fazendo com que os planos ortogonais se movimentem em ambos sentidos (conforme as setas), estabelecendo as estratégias de busca, percorrendo o universo de regras e objetos envolvidos na análise e traçando o

caminho de solução. A interseção dos planos aponta as regras e objetos a serem avaliados no passo seguinte. O caminho de solução é guardado na memória para fornecer ao usuário explicações posteriores de como e porque o sistema adota as diferentes estratégias de solução ao longo da consulta.

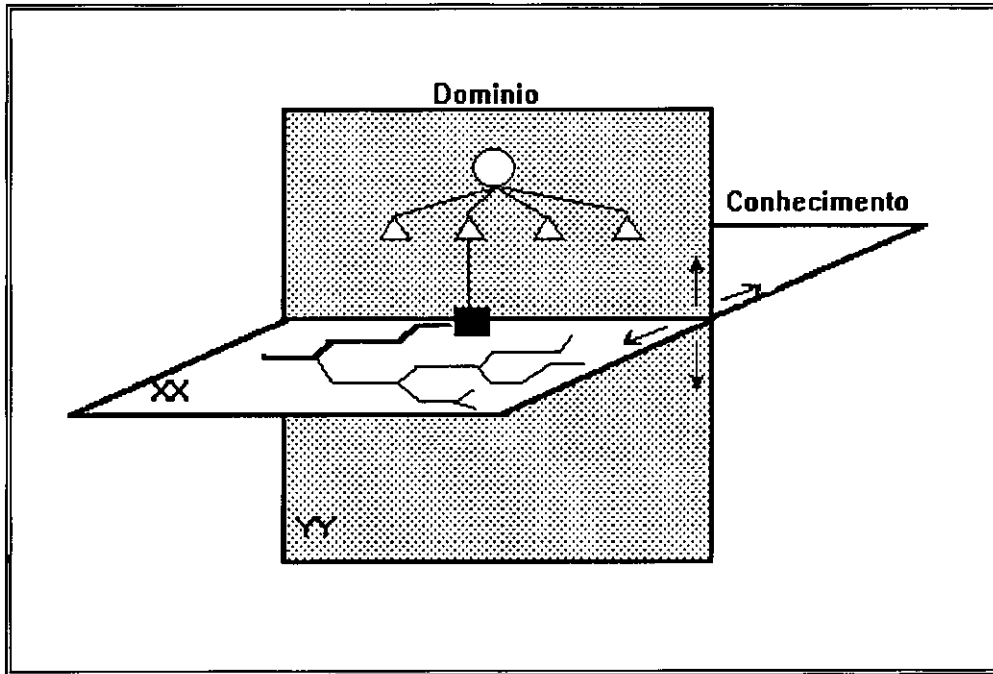


Figura II.1 - Dinâmica de funcionamento de um sistema especialista

O caminho escolhido de solução é indicado em negrito no plano XX. Os ícones circulares representam as classes, os triangulares os objetos e os retangulares as propriedades utilizadas para definição do domínio no plano YY..

## II.2.1 REPRESENTAÇÃO DO DOMÍNIO

As estruturas disponíveis no ambiente escolhido para representar o domínio a ser analisado podem ser divididos em *objetos*, *classes* e *propriedades* [23]. Os *objetos* são a menor parcela de informação de um sistema baseado em conhecimento. Representam qualquer coisa, lugar, pessoa ou conceito do domínio a ser analisado. As *classes* são também objetos, utilizados normalmente para agrupar ou classificar objetos com características similares. As classes e objetos podem ser estruturados hierarquicamente com subclasses e sub-objetos com o intuito de aprofundar em detalhe a descrição do problema e os tipos de estruturas a serem utilizados.

A figura (II.2) mostra a estrutura das classes EQUIPAMENTOS e REFINARIAS definidas no sistema INTEQ. Os ícones *circulares* representam as classes e subclasses e os *triangulares* representam os objetos correspondentes. A relação hierárquica das classes, subclasses e objetos define vários aspectos inerentes ao elemento a ser analisado. O objeto PX100 por exemplo, pode ser definido na figura (II.2) como sendo um equipamento do tipo vaso de pressão esférico do parque de equipamentos da refinaria RPP1.

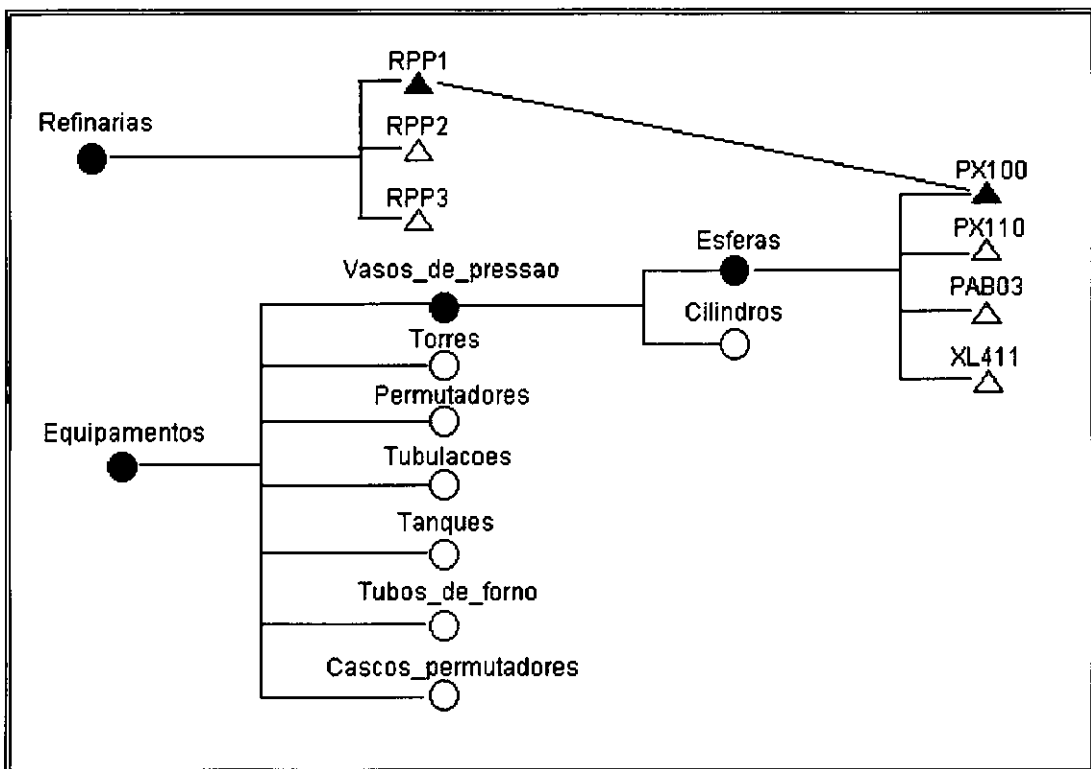


Figura II.2 : Estrutura hierárquica de classes e objetos

O comportamento de um objeto durante a consulta estará sempre condicionado ao conhecimento genérico, definido para os seus ascendentes, e o conhecimento personalizado, que o diferencia dos demais. A utilização de classes e objetos na representação do domínio e a sua associação com outras estruturas similares se aproxima bastante da estrutura de representação utilizada pelo ser humano.

Outro recurso disponível no ambiente escolhido é a utilização de propriedades para descrever em detalhe as classes e objetos. A relação objeto-propriedade pode ser comparada como uma estrutura de "frame" [24]. As propriedades de objetos podem assumir valores múltiplos ou singulares e devem ser definidos de acordo com o tipo correspondente: *float*, *string*, *integer*, *boolean*, *date*, *time*. Existe uma analogia entre as variáveis de sistemas convencionais e as propriedades de objetos numa base de conhecimento, pois ambas assumem valores ao longo da aplicação. No entanto, do ponto de vista conceptual, as mesmas tem comportamento totalmente diferenciado durante a execução.

A *variável* representa um endereço de memória no qual será armazenado o valor correspondente para ser utilizado pelo algoritmo. O valor da variável deve ser conhecido antes de executar o algoritmo correspondente para evitar resultados imprevisíveis.

A *propriedade* é definida com o par (**status,valor**). O *status* da propriedade é utilizado pelo algoritmo de busca do ambiente para determinar as estratégias de solução ou estabelecer uma sequência de busca do valor procurado. O status de uma propriedade tem influência no processo de avaliação das regras e pode assumir os seguintes valores [23]:

- **Status=UNKNOWN**: o valor é desconhecido, e a propriedade não foi ainda sequer avaliada pelo mecanismo de inferência
- **Status=NOTKNOWN**: o valor continua desconhecido, mas a propriedade já foi avaliada pelo sistema sem conseguir resultados concretos.
- **Status=KNOWN**: a propriedade teve o valor definido pelo sistema.

Durante a construção da base, o programador pode utilizar tanto o valor como o status da propriedade para montar as regras que irão representar o conhecimento. O status NOTKNOWN, por exemplo pode ser utilizado para definir valores arbitrados em função da experiência do especialista que permitam dar continuidade ao processo de solução. Neste tipo de programação o usuário não precisa conhecer todos os dados solicitados pelo programa para obter a solução.

Descreve-se a seguir a classe *defeitos*, que foi definida no sistema INTEQ para agrupar os defeitos analisados durante a consulta. A classe *defeitos* é definida com as *propriedades* listadas na tabela (II.1). A coluna *descrição* explica o significado de cada

propriedade. As regras a ser construídas que estão relacionadas com defeitos deverão necessariamente utilizar as propriedades definidas na classe correspondente.

<b>CLASSE : DEFEITOS</b>		
<b>PROPRIEDADES</b>	<b>TIPO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
Altura	FLOAT	Altura em mm do defeito
Amplitude	STRING	Amplitude do ensaio de US : 100+4, +2
Area	FLOAT	Altura x Comprimento
Avaliação	STRING	Defeito a reparar Defeito a acompanhar Defeito a ignorar
Comprimento	FLOAT	Comprimento em mm do defeito
Forma	STRING	Planar ou Volumétrica
Lado	STRING	Interno ou externo
Largura	FLOAT	Largura em mm do defeito (trincas tem largura igual a 0).
Laudo_RX	STRING	Reprovado Aprovado Recomendação de ensaio complementar
Laudo_US	STRING	Reprovado Aprovado Recomendação de ensaio complementar
Laudo_MF	STRING	Defeito crítico Defeito preocupante Defeito aceitável
Local	STRING	Defeito na chapa Defeito na solda
Num relatório	STRING	Número do relatório do END
Orientação solda	STRING	Transversal ou longitudinal
Planta	STRING	Denominação da solda que contém o defeito em função da terminologia utilizada no desenho de planificação correspondente
Profundidade	STRING	Superficial Interno Passante
t	FLOAT	Menor espessura das chapas ligadas pela solda definida na propriedade planta
Vizinhos	STRING	Referência de soldas vizinhas para rápida localização do defeito

Tabela II.1 : Definição das propriedades da classe defeitos

A sintaxe **objeto.propriedade** ou **|classe|.propriedade** é utilizada na construção da base para manipulação das propriedades utilizadas. Os delimitadores **|** são utilizados para diferenciar as classes dos objetos.

Dependendo da situação o programador poderá definir para cada propriedade uma lista de estratégias genéricas de busca ou *meta-procedimentos*. Um metaprocedimento pode ser utilizado para estabelecer a ordem de sequência de busca, arbitrar valores, ou ativar conjuntos de regras destinadas a determinar o valor da propriedade em questão. As principais opções de estratégias de busca são listadas a seguir:

- . *Inferência com regras selecionadas*
- . *Procura informação no banco de dados*
- . *Executa algoritmo para calcular o valor*
- . *Formula pergunta ao usuário*
- . *Resultado obtido com fórmulas ou funções definidas*
- . *Herda o valor dos filhos*
- . *Herda o valor dos pais*
- . *Arbitra valores (heurística)*

O mecanismo de inferência executa ordenadamente as opções até determinar o valor procurado. Se após processar o meta-procedimento não foi possível encontrar um valor para a propriedade, o status da mesma é modificado para NOTKNOWN. O programador deverá definir se os procedimentos definidos para a propriedade são de domínio público (podem ser herdados pelos descendentes) ou privado (não podem ser herdados pelos descendentes). Define-se como *metaconhecimento*, a representação do conhecimento em termos genéricos, o que permite processar simultaneamente um conjunto de objetos com características semelhantes.

Existem duas maneiras de definir o conhecimento genérico ou *metaconhecimento* para um conjunto de classes e objetos :

- (a) Definir meta-procedimentos como instância da propriedade
- (b) *Construir regras genéricas* (meta-regras) utilizando a técnica de reconhecimento de padrão e a geração dinâmica de objetos. Estes recursos serão descritos nas seções posteriores.

O conhecimento particular referente à qualquer descendente tem precedência em relação às estruturas de metaconhecimento definidas nas camadas superiores.

## II.2.2 REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

A estrutura que permite raciocinar com os objetos, classes e propriedades do sistema é construída através de uma associação de regras do tipo IF-THEN. As regras são construídas com a mesma filosofia de construção de teoremas, onde as hipóteses são propriedades que tem valor booleano (falso ou verdadeiro) e são determinadas avaliando um conjunto de suposições (premissas). As hipóteses podem ser associadas a outras hipóteses formando uma estrutura hierárquica chamada *ilha de conhecimento*.

A figura (II.3) mostra a estrutura básica de uma regra, na qual identifica-se três campos: *premissa*, *hipótese* e *ação*. Na premissa o programador codifica as condições e restrições que devem ser satisfeitas para validar a hipótese. A hipótese é definida no campo correspondente e pode ser uma propriedade (booleana) associada com qualquer objeto da base. É interessante tentar escolher nomes de hipóteses que descrevam a finalidade das regras associadas à mesma. O preenchimento dos campos premissa e hipótese são obrigatórios. O campo ação é utilizado para listar as instruções que só serão processadas se a hipótese correspondente é validada.

As hipóteses podem ser utilizadas como propriedades tanto nas premissas como na lista de ações. A determinação do seu valor exigirá a avaliação das regras associadas.

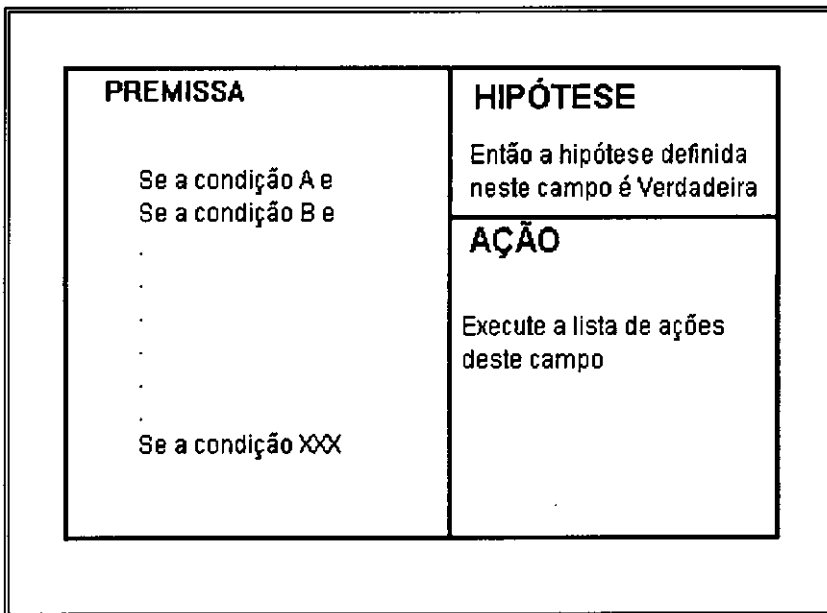


Figura II.3 - Estrutura básica de uma regra

A associação condicional do tipo "E" é representada listando na premissa da mesma regra as condições associadas (figura II.3). A associação de condições do tipo "OU"

pode ser obtida utilizando uma regra por condição, e associando todas elas à mesma hipótese.

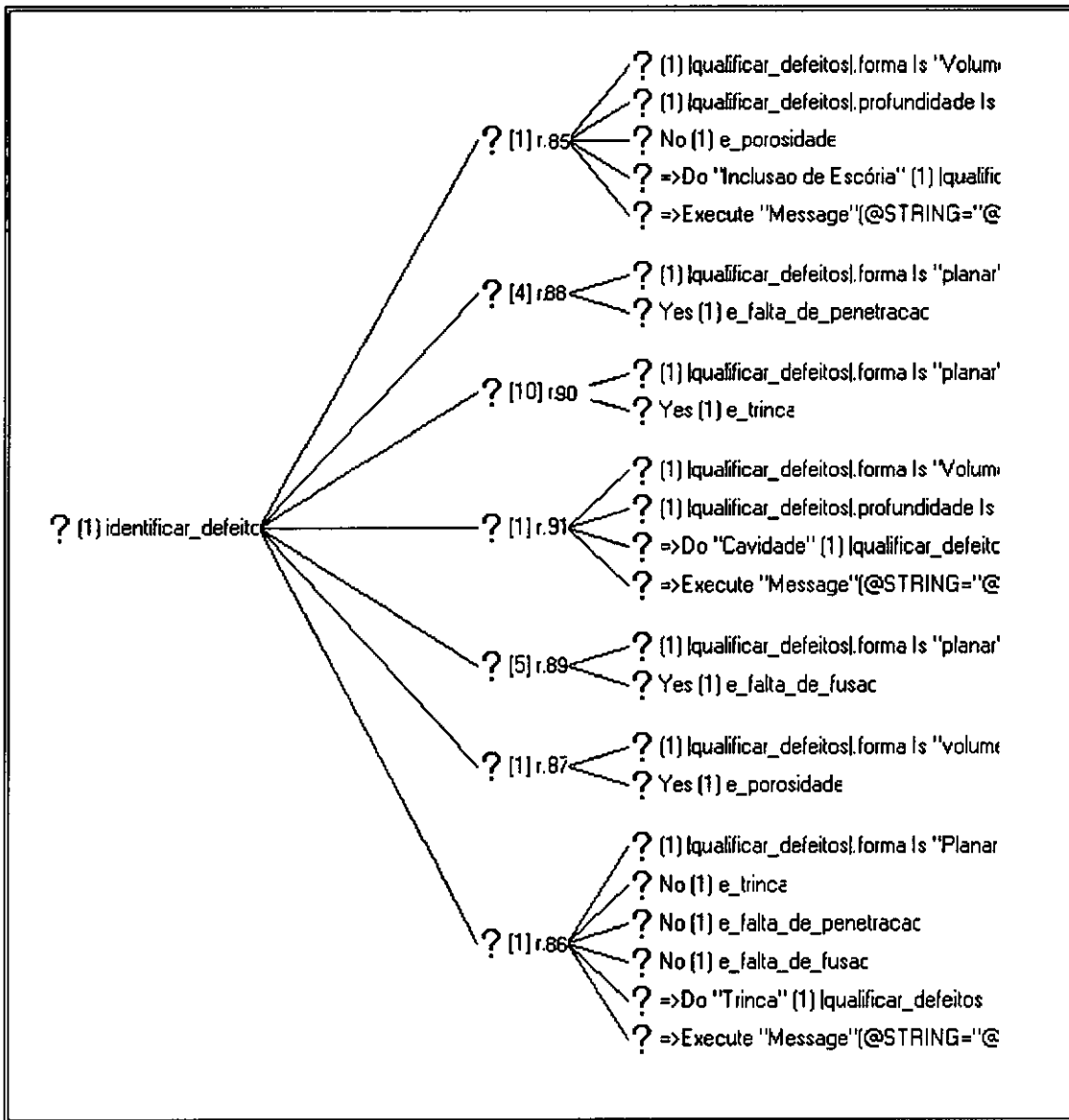


Figura II.4 - Ilha de conhecimento do sistema INTEQ

A figura (II.4) mostra a representação gráfica de uma IC no ambiente NEXPERT. O texto aparece truncado pois ultrapassou os limites estabelecidos para os campos correspondentes. A seta (=>) identifica as ações, e as linhas anteriores à primeira seta, as premissas da regra. O sinal de interrogação (?) mostra que a regra em questão ainda não foi avaliada. O valor entre colchetes [] mostra a prioridade na ordem de execução das regras definida a priori pelo programador. No exemplo citado, a regra 90 será a primeira a ser avaliada. O primeiro campo da esquerda para a direita é reservado para a hipótese associada ao conjunto de regras correspondente. No exemplo da figura (II.4) a hipótese *identificar defeito* representa as 7 regras responsáveis pela identificação dos defeitos. As hipóteses *e trinca*, *e falta de penetracao*, *e falta de fusao*, e *porosidade*

representam outros conjuntos de regras que são utilizados nas premissas ou ações das regras da hipótese *identificar\_defeito*. A IC resultante deverá prever todas as alternativas de análise para evitar que a validação da hipótese correspondente deixe de cumprir a totalidade dos objetivos propostos. Utilizando o jargão dos especialistas para definir classes, objetos, propriedades e hipóteses, as regras podem ser facilmente interpretadas pelo leitor.

Na regra 86 da figura (II.4) se observa as associações "E" na premissa e na ação correspondente. O conhecimento representado na regra é listado a seguir:

*SE o defeito for "Planar" E não foi identificado como uma trinca E não é "falta de fusão" E não é "falta de penetração" ENTÃO o defeito é uma "trinca" e mostrar uma mensagem na tela indicando que: o sistema não conseguiu identificar o defeito em função das características fornecidas nesta consulta, e portanto assume a pior condição para defeitos planares que é identificar o defeito como sendo uma TRINCA.*

Comparando o código com a interpretação da regra, o leitor pode constatar que a sintaxe da regra de um SE se aproxima muito mais da terminologia utilizada pelo especialista para descrever o conhecimento do que um código algorítmico de um programa convencional, que na maioria das vezes só pode ser interpretado pelo programador ou por pessoas com conhecimentos aprofundados da linguagem de programação utilizada.

A hipótese *identificar\_defeito* representa um MC que pode ser utilizado via regras ou através de MS. A classe *qualificar\_defeitos* utilizada na confecção das regras possui a mesma estrutura de propriedades do que a classe *defeitos*. A tabela II.2 define a modo de ilustração o meta-procedimento (metaslot) da propriedade **[defeitos].qualificacao** utilizado para definir a ordem de busca de valores relacionados com a identificação dos defeitos detectados e definidos sob a classe *defeitos*.

<p><b>METASLOT :  defeitos .qualificação</b></p> <p><b>Filhos herdam propriedade "qualificação"</b></p> <p><b>Filhos não herdam valores</b></p>
<p>Copiar todos os valores de propriedades do <u>defeito analisado</u> na classe <i>qualificar_defeitos</i></p> <p>Avaliar a hipótese <i>identificar_defeito</i></p> <p>Copiar o valor de  <u>qualificar_defeito</u> .qualificacao na propriedade qualificacao do <u>defeito analisado</u>.</p>

Tabela II.2 - Meta-procedimento para a propriedade `defeitos.qualificação`

Neste caso, a definição genérica permite que qualquer defeito membro da classe "defeitos" possa ser avaliado da mesma forma.

### II.2.3 TÉCNICA DE RECONHECIMENTO DE PADRÃO

Os ambientes de desenvolvimento de SE de última geração que trabalham com a filosofia de objetos utilizam uma técnica similar à utilizada em bancos de dados relacionais para condicionar a busca do universo de solução à restrições ou "palavras-chave" impostas durante a consulta. Esta técnica recebe o nome de *reconhecimento de padrão* (RP). A técnica de reconhecimento de padrão é recomendada para a resolução dos seguintes tipos de problemas:

- (a) *Seleção*: Utilizando sucessivas condições aplicadas ao mesmo conjunto na premissa da regra, obtém-se o subconjunto "solução" que poderá ser manipulado, de acordo com a necessidade, na ação da regra avaliada.
- (b) *Classificação*: Utilizando condições em conjuntos diferentes na premissa da regra, pode-se apagar ligações com classes indesejadas e criar novas ligações com as desejadas.

A técnica de reconhecimento de padrão pode também ser utilizada para montar estruturas de meta-regras. Este recurso é recomendado quando se tem mais de uma propriedade dos objetos analisados, que poderão assumir valores condicionados ao mesmo conjunto de premissas.

Os conjuntos de reconhecimento de padrão utilizados nas regras podem ser classificados em *universais* e *existenciais*. No reconhecimento de padrão do tipo *universal* todos os objetos analisados devem satisfazer as condições impostas na premissa para validar a hipótese correspondente[23]. O reconhecimento de padrão *existencial* é verdadeiro se existir pelo menos um objeto que satisfaça a condição imposta.

**EXEMPLO:** A figura II.5 mostra a relação de defeitos detectados ao longo de uma inspeção com os ensaios de ultra-som (US), partículas magnéticas (PM) e raios-x (RX). A classe **defeitos** contém as subclasses **aprovados** e **reprovados**. Os defeitos A1 e A2 são "sub-objetos" do defeito PM56, pois foram recategorizados como o defeito único com comprimento equivalente a 768 mm. Os defeitos reprovados por norma são o RX2, US120 e o PM56. Os defeito US11 foi aprovado e os defeitos RX1 e US224 não foram ainda analisados pelo sistema. Recomenda-se testar a lista de condições da tabela (II.3) para a configuração atual de defeitos e determinar o subconjunto de solução para cada conjunto avaliado.

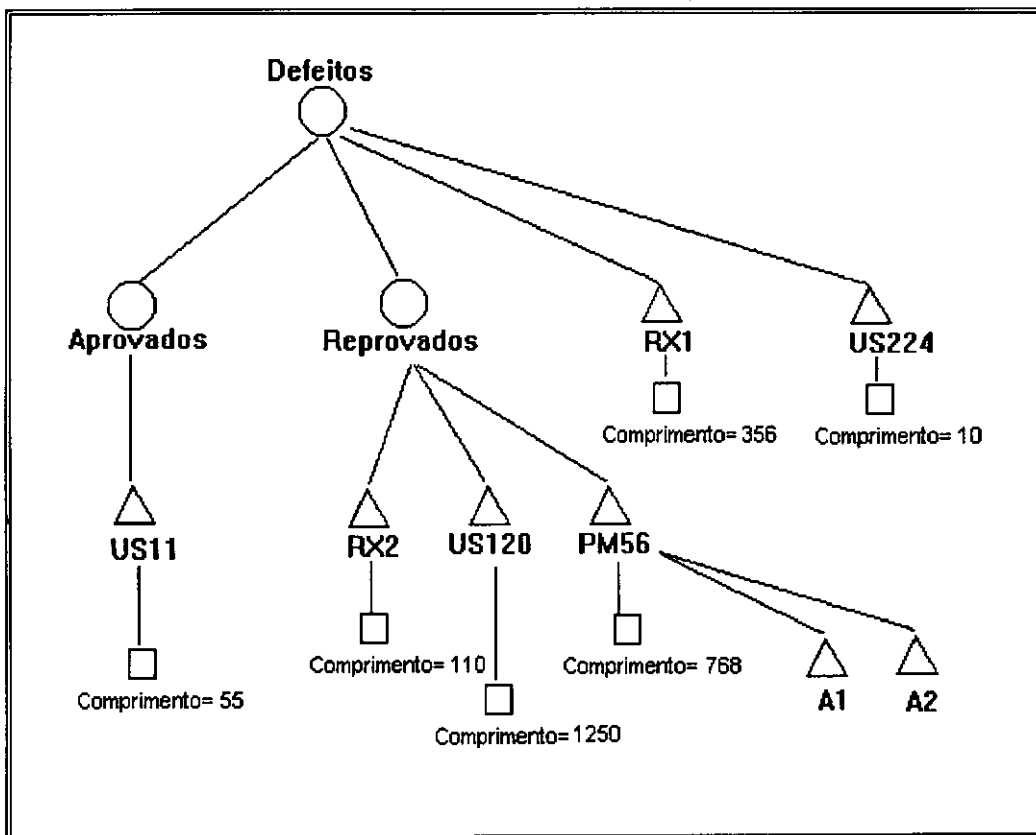


Figura II.5 - Lista de defeitos detectados na inspeção

Os conjuntos universais serão representados delimitando as classes e objetos com os caracteres "{ }", e os existenciais com os caracteres "< >". A superposição dos caracteres é utilizada para definir conjuntos diferentes na mesma regra. A condição **{objeto1}.prop1>5** será verdadeira se todos os objetos dependentes de *objeto1* tem o *prop1* maior que 5. A condição **<objeto1>.prop1>5** é verdadeira se existe pelo menos 1 objeto dependente de *objeto1* com *prop1* maior que 5. As condições avaliadas para analisar os defeitos da figura II.5 apresentam os seguintes sub-conjuntos de solução:

CONDIÇÃO	AVALIAÇÃO	SUB-CONJUNTO DE SOLUÇÃO
{defeitos}.comprimento>60	FALSO	nulo
<defeitos>.comprimento>60	VERDADEIRO	RX1, RX2, US120, PM56
<aprovados>.comprimento >10	FALSO	nulo
<reprovados>.comprimento >100 e <reprovados>.comprimento <500	VERDADEIRO	RX2
{defeitos}.comprimento <10	VERDADEIRO	RX1, RX2, US11, PM56 US120, US224
{defeitos}.comprimento <50 e {defeitos}.comprimento > 0	FALSO	nulo
<defeitos>.comprimento <0 e <<defeitos>>.comprimento >1000	VERDADEIRO	RP1(<...>); nulo E RP2(<<...>>); US120

Tabela II.3 - Exemplos de reconhecimento de padrão universal e existencial

A condição número 6 utiliza duas restrições de comprimento para o mesmo conjunto. Na condição número 7 observa-se duas restrições impostas a dois conjuntos diferentes (RP1=<defeitos> e RP2=<<defeitos>>). Após a avaliação da regra, o conjunto inicial fica reduzido ao sub-conjunto que satisfaz as restrições impostas.

O conjunto de reconhecimento de padrão armazena durante a execução da regra, os nomes dos objetos "solução". Utilizando o mesmo número de delimitadores na ação da regra, o programador pode manipular propriedades ou ligações dos objetos avaliados. Não é possível aproveitar o mesmo conjunto de reconhecimento de padrão em regras diferentes.

EXEMPLO: "A retirada de defeitos por esmerilhamento deverá ser realizada em defeitos **superficiais** com comprimentos **superiores a 25 mm**". Construir a regra que forneça a sugestão de esmerilhamento para os defeitos que satisfaçam a condição fornecida pelo especialista. As palavras em negrito representam as restrições a serem impostas nas

propriedades "profundidade" e "comprimento" de todos os defeitos detetados. Como o objetivo é formar um único sub-conjunto de solução, um conjunto existencial será suficiente para construir a regra correspondente. O nome escolhido para a hipótese é "esmerilha\_defeitos", pois resume o conhecimento representado. A propriedade *sugestão* (string) foi definida na classe *defeitos* para armazenar a resposta do sistema. A figura II.6 mostra o formato da regra idealizada.

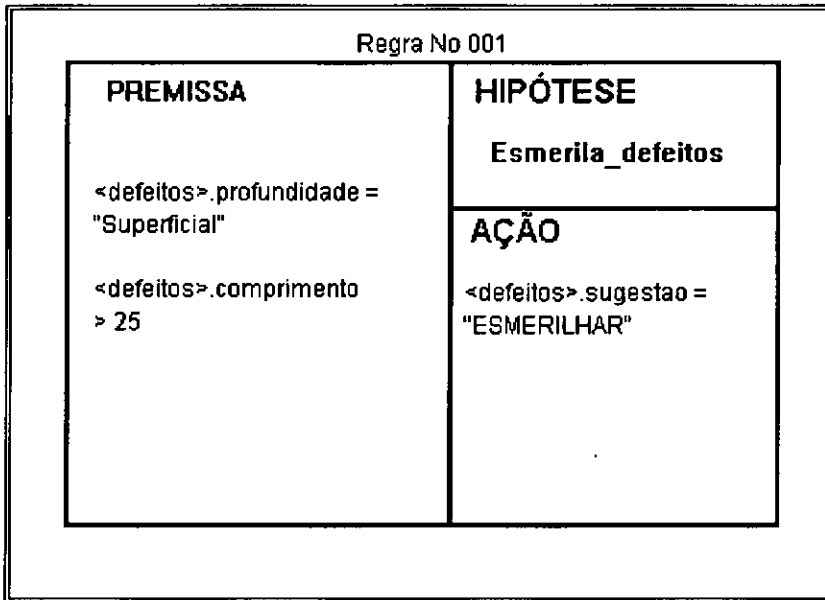


Figura II.6 - Combinação de RP nas regras

Observa-se que a hipótese *esmerilha\_defeitos* somente é verdadeira se existe pelo menos um defeito que satisfaça as condições estabelecidas na premissa da regra. Se no decorrer da aplicação o programador precisa testar a existência de defeitos esmerilhados, basta verificar na premissa de uma regra qualquer, se a hipótese *esmerilha\_defeitos* é verdadeira.

## II.2.4 GERAÇÃO DINÂMICA DE OBJETOS

A geração dinâmica de objetos permite definir objetos em tempo de execução ou modificar as ligações do mesmo com outros objetos definidos na base. Os objetos criados dinamicamente podem ser associados a mais de uma classe ou objeto, formando estruturas que contém a soma das propriedades dos ascendentes. O comando "criar objeto *yyy* em *xxx*" gera os objetos dinâmicos, onde *yyy* representa os nomes dos objetos a serem criados e *xxx* a lista de objetos "pai" de *yyy*. O comando "*deleta objeto yyy de xxx*" elimina a ligação existente entre os objetos *yyy* e os *xxx*, mas os objetos permanecem na memória. Conjuntos de objetos resultantes de RP podem ser utilizados

numa regra como *yyy* para manipular objetos. O espaço *xxx* reservado para definir os objetos "pai" é opcional. Os objetos e associações dinâmicas só podem ser totalmente apagados da memória nas seguintes condições:

- Fornecendo o comando "deletar objeto *yyy*" (sem fornecer o *xxx*) numa regra ou meta-procedimento.
- Descarregando da memória RAM a base de conhecimentos que contenha a definição das propriedades e classes associadas com os objetos gerados.
- Inicializar uma nova consulta (limpar a memória)

É recomendado trabalhar sempre que for possível com objetos e associações dinâmicas, pois diminuem o número de regras, objetos e propriedades da base, economizando espaço em disco e otimizando o tempo de consulta. Esta técnica é ideal para aplicações onde não se conheça apriori o número de objetos a ser analisado. Os *nós* e *elementos* de uma malha de elementos finitos podem ser representados com este procedimento, onde os nós e elementos são objetos criados dinamicamente. Os nós são associados como sub-objetos dos elementos correspondentes, conforme a figura (II.7).

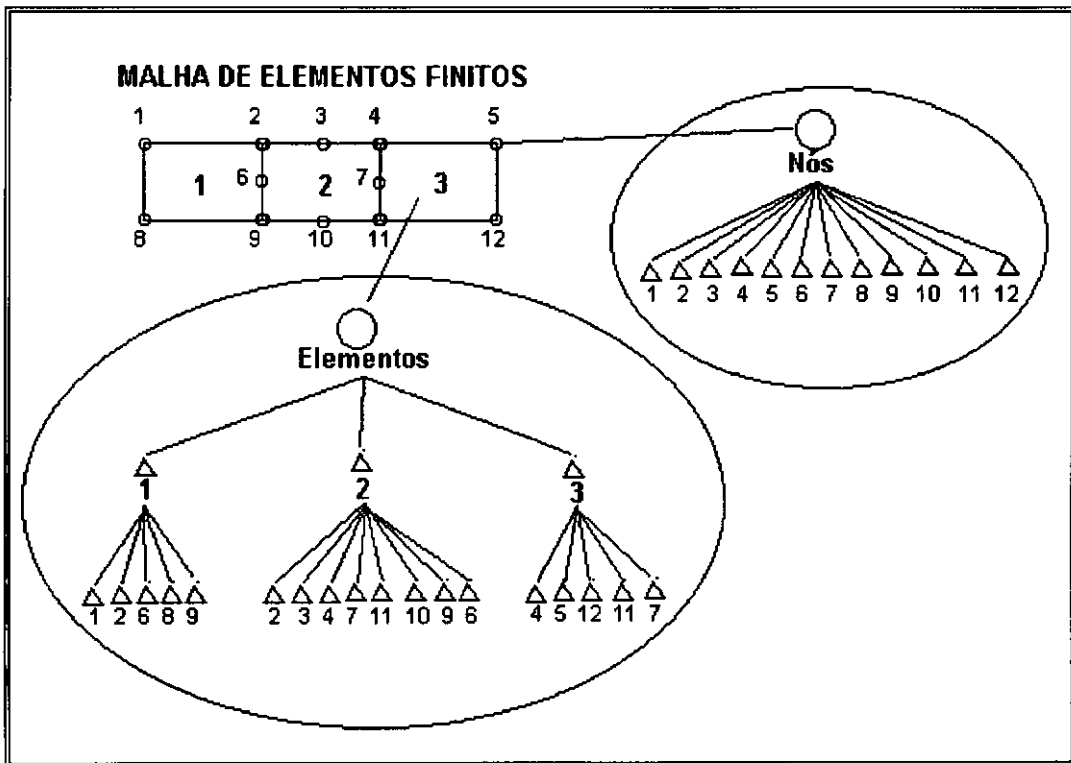


Figura II.7 - Representação de malha de elementos finitos com geração e associação dinâmica de objetos

EXEMPLO: A norma de ultrassom (US) determina em função das amplitudes correspondentes se as indicações detetadas são aprovados (A) ou reprovados (R). As descontinuidades reprovadas são classificadas como defeitos, as aprovadas como descontinuidades. Defeitos com amplitudes superiores a 100% são reprovados na norma citada. Como definir a base para classificar as indicações detetadas na inspeção de US utilizando a geração dinâmica de objetos?

A) *Definição do domínio* (figura II.8) : A classe **indicação\_US** foi definida com quatro propriedades: *Norma\_us*, *Laudo\_US*, *Amplitude*, *N*. As classes **defeitos** e **descontinuidades** foram definidas sem propriedades. A propriedade *indicação\_us.norma\_US* (booleana) será utilizada como hipótese das regras R1 e R2, responsáveis pela determinação do laudo de US. A propriedade *indicação\_us.laudo\_US* armazenará o resultado da avaliação da norma. Será necessário definir MS para as quatro propriedades da classe *indicação\_US*, pois:

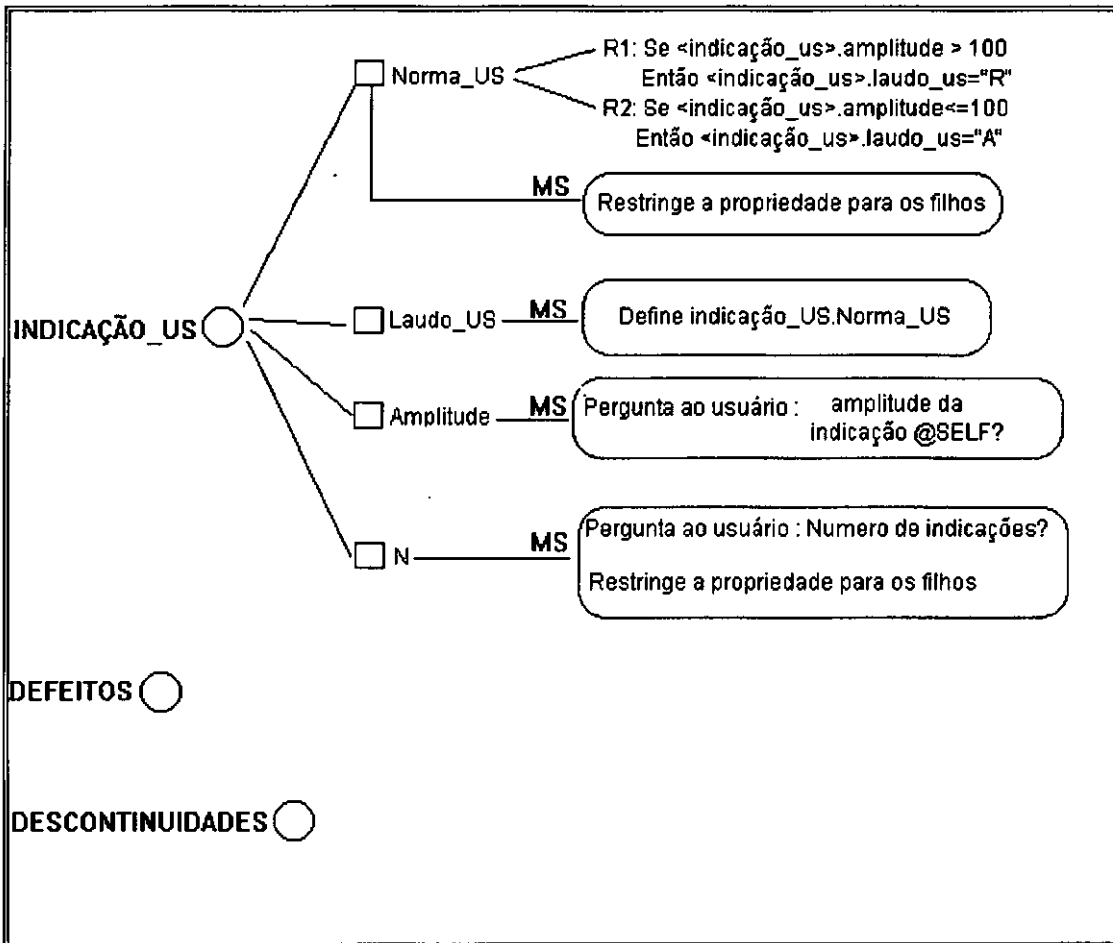


Figura II.8 - Definição do domínio

- As propriedades *indicação\_us.N* e *indicação\_us.norma\_US* não devem ser herdadas pelos descendentes.
- A propriedade *indicação\_us.laudo\_US* deve avaliar a hipótese *indicação\_us.norma\_us* para inferir o valor correspondente.
- Perguntas com textos formatados serão formuladas ao usuário para determinar os valores de *indicação\_us.N* e *indicação\_us.amplitude*.

B) *Definição do conhecimento* (figura II.9) : o conhecimento necessário para atingir os objetivos propostos é representado com 3 regras associadas à hipótese *classifica defeitos*. A prioridade de inferência (números entre colchetes) define a ordem de execução das regras (de maior a menor).

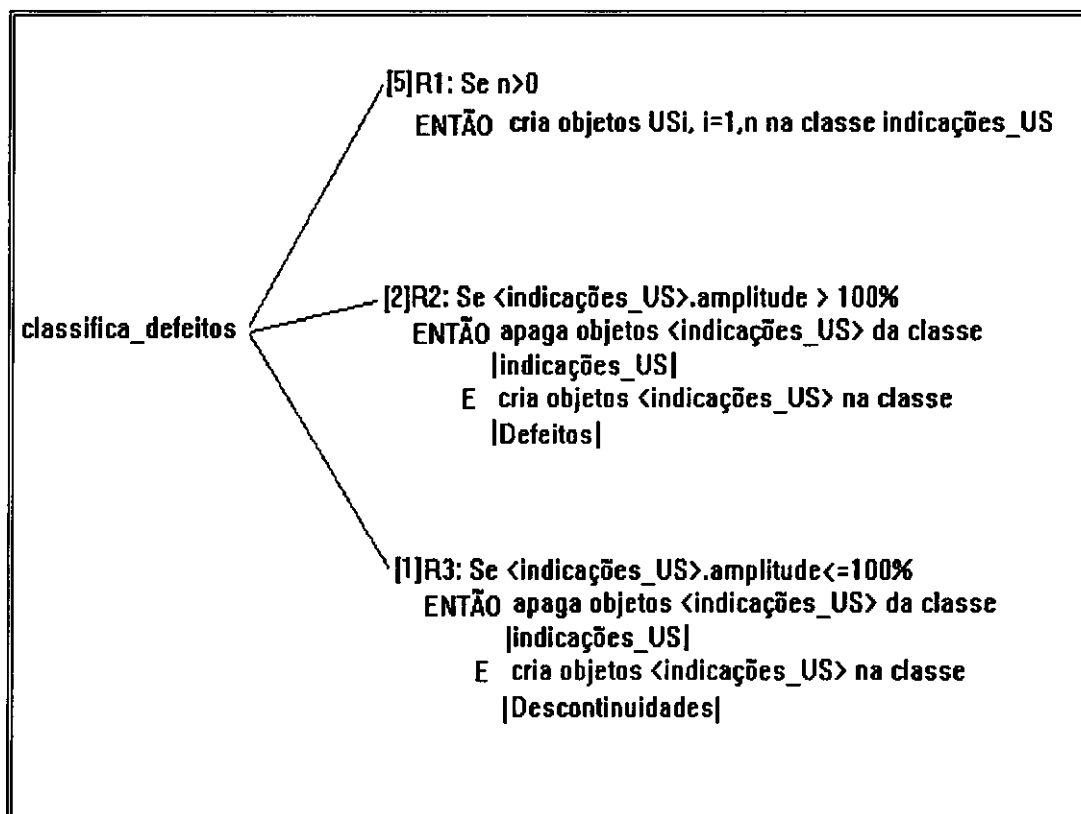


Figura II.9 - Definição do conhecimento

A geração dinâmica de objetos é utilizada em R1 para criar as  $n$  indicações que serão analisadas debaixo da classe **indicações\_US**. A associação dinâmica de objetos é utilizada em R2 e R3 para alterar as ligações entre os objetos gerados em R1 e as classes **indicações\_US**, **defeitos** e **descontinuidades** em função dos laudos correspondentes. O símbolo (+) diferencia os objetos dinâmicos dos estáticos. A figura (II.10) mostra a

avaliação da hipótese *classifica defeitos* para  $n=3$  e indicações com amplitudes de 50,  $100+2$  e  $100+4$  respectivamente. Inicialmente o sistema pergunta o número de indicações utilizando o texto definido no MS da propriedade *indicações\_US.N*. A seguir a regra R1 gera três objetos na classe *indicações\_US*.

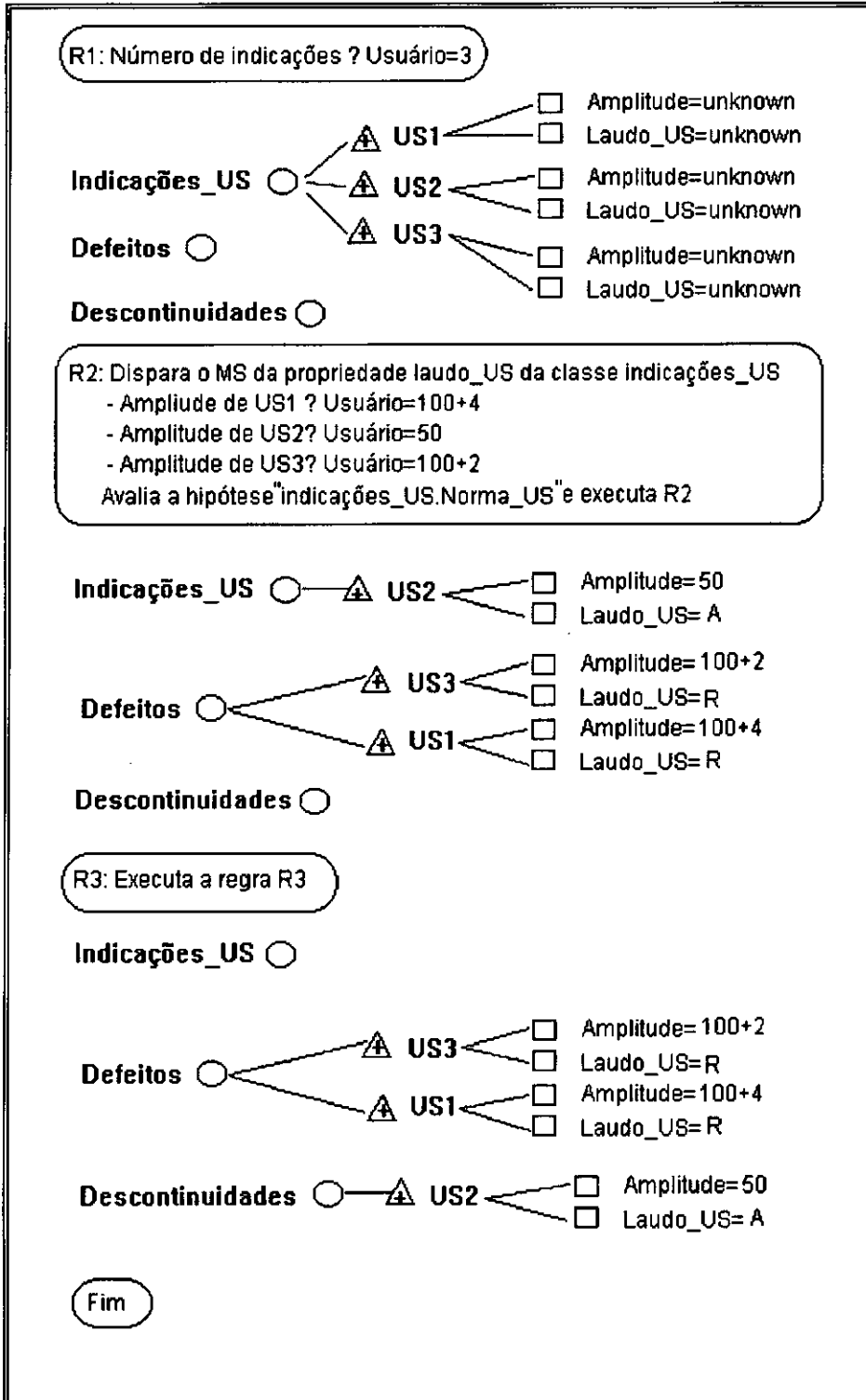


Figura II.10 - Avaliação da hipótese *classifica defeitos*

Deve-se observar que as classes defeitos e descontinuidades continuam vazias e os valores das propriedades ainda não foram determinadas. A premissa da regra R2 dispara o MS da propriedade *indicações\_US.amplitude*, onde o usuário fornece os valores correspondentes de amplitude. A seguir o mecanismo de inferência avalia todas as hipóteses contendo a propriedade *amplitude* nas premissas das regras (forward chaining). Consequentemente a hipótese *indicações\_US.norma\_US* é avaliada. A seguir, a classe **defeitos** recebe os defeitos US3 e US1 que não são mais conhecidos como indicações. Finalmente a regra R3 passa as indicações aprovadas para a classe **descontinuidades**. No final da avaliação, a classe *indicações\_US* é um conjunto vazio, e as classes **defeitos** e **descontinuidades** contém o resultado da avaliação da norma utilizada.

## II.2.5 INTERFACE COM BANCOS DE DADOS

O NEXPERT OBJECT, ou qualquer outro ambiente similar possui características que permitem a leitura, armazenamento, manipulação e gerenciamento de informações contidas em bancos de dados (BD). A figura (II.11) mostra um exemplo de estrutura de banco de dados chamado **defeitos**.

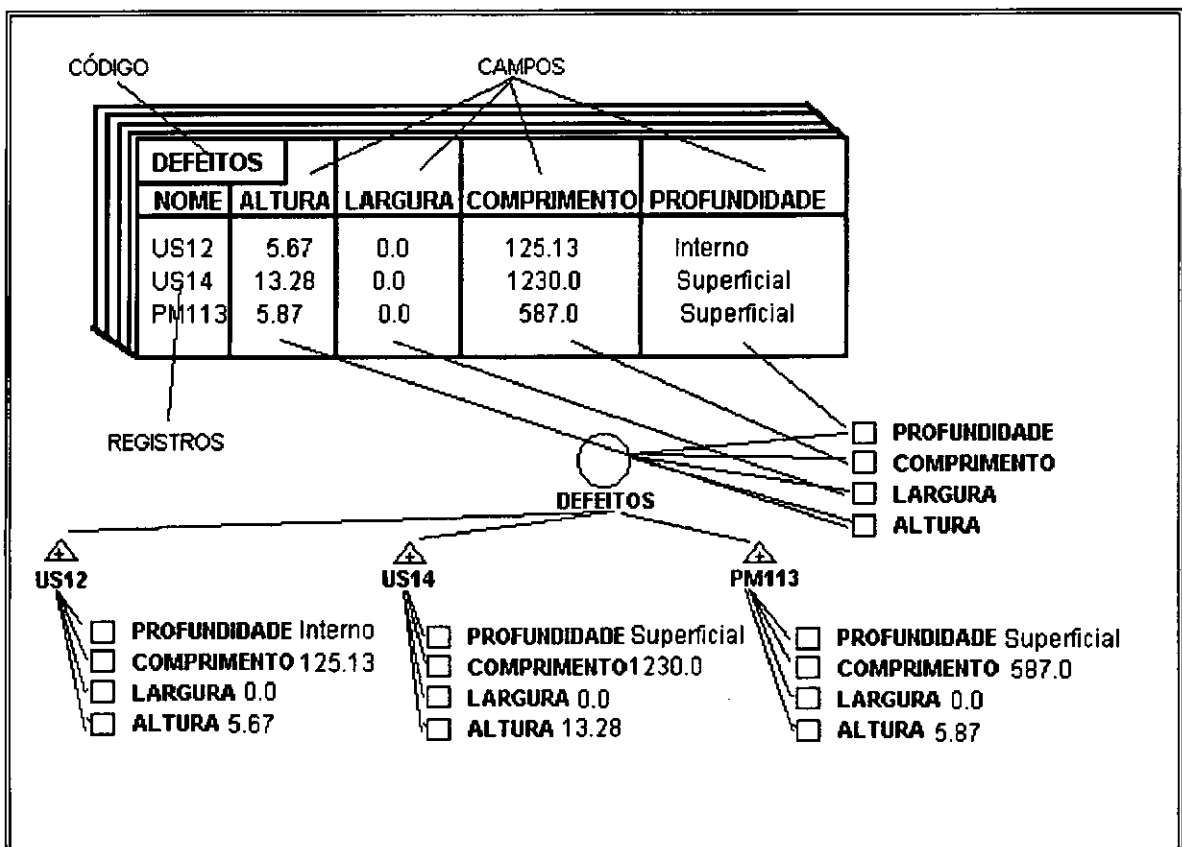


Figura II.11 - Representação de BD com objetos e propriedades

Os *campos* do banco de dados definidos a partir da segunda coluna correspondem aos diferentes tipos de elementos associados com o *registro*, o qual é definido na primeira coluna. O *código* é um identificador a ser utilizado em bancos relacionais para classificar as diferentes estruturas criadas. A interseção da linha do registro escolhido (coluna no1) com um campo(coluna) qualquer define o local do dado procurado.

Verifica-se no exemplo que os dados disponíveis para o primeiro registro, chamado US12 são altura=5.67, largura=0.0, comprimento=125.13 e profundidade="interno". O usuário pode alterar, corrigir, deletar dados de qualquer campo do banco ou então inserir novos registros, inserindo linhas no arquivo já existente.

Qualquer tipo de BD pode ser representado no sistema com uma estrutura de classes e propriedades compatíveis com os dados correspondentes. Os códigos podem ser representados com classes, e os campos com propriedades associadas à classe correspondente. Os registros são objetos criados dinamicamente com os mesmos valores obtidos da primeira coluna. Cada objeto criado herda as propriedades da classe "pai". Os valores das propriedades dos objetos recebem os dados correspondentes do BD. Na figura acima pode ser comparada a estrutura de BD com a estrutura de objetos correspondente. Observa-se que não necessariamente as propriedades, classes e objetos devem ser definidos com os mesmos nomes dos registros, códigos e campos associados.

O procedimento proposto pode ser utilizado para importar informação de BD já existentes ou armazenar em BD a informação gerada pela BC para utilização futura. Ilhas de conhecimento e MS devem ser idealizadas para gerenciar o fluxo de dados na base e a interface com os BD disponíveis.

### II.3. MECANISMO DE INFERÊNCIA

O comportamento do conhecimento codificado na BC do sistema é gerenciado por um algoritmo encarregado de processar as regras, selecionar a estratégia adequada de solução e passar as instruções correspondentes para o computador. Este algoritmo é conhecido como máquina ou *mecanismo de inferência* (MI), e faz parte do ambiente de desenvolvimento. Outra característica importante do MI é a capacidade de "memorizar" o caminho de solução adotado, as regras que foram utilizadas e os valores que foram inferidos. Este recurso permite fornecer explicações ao usuário referentes a "como?" e "porque?" o sistema chegou aos resultados apresentados. Estas explicações podem ser utilizadas para treinar usuários não especializados, ou para corrigir ou atualizar a base com a presença dos especialistas. O programador define a estratégia de solução a ser utilizada pelo MI utilizando regras de controle ou MS em propriedades.

As estratégias de solução mais utilizados para desenvolver SE são o *encadeamento direto* ou "forward-chaining" (FCH), e o *encadeamento reverso* ou "backward-chaining" (BCH). A definição de estratégias de solução depende das características de cada problema. É possível combinar ambas estratégias ao longo da aplicação.

### II.3.1 MÉTODO DE ENCADEAMENTO DIRETO (FCH)

Esse método é muitas vezes chamado *dirigido por dados*, porque o MI utiliza a informação que o usuário fornece para selecionar o conjunto de regras que podem levar a solução. O FCH é utilizado em aplicações com as seguintes características:

- (a) existe grande número de hipóteses associados com poucos sintomas;
- (b) o sistema é alimentado com dados obtidos de sensores;
- (c) o usuário fornece um conjunto de dados como ponto de partida para resolver o problema.

Na figura (II.12) observa-se um exemplo típico de encadeamento direto onde os dados iniciais fornecidos pelo usuário são utilizados nas premissas das regras 1, 3 e 5.

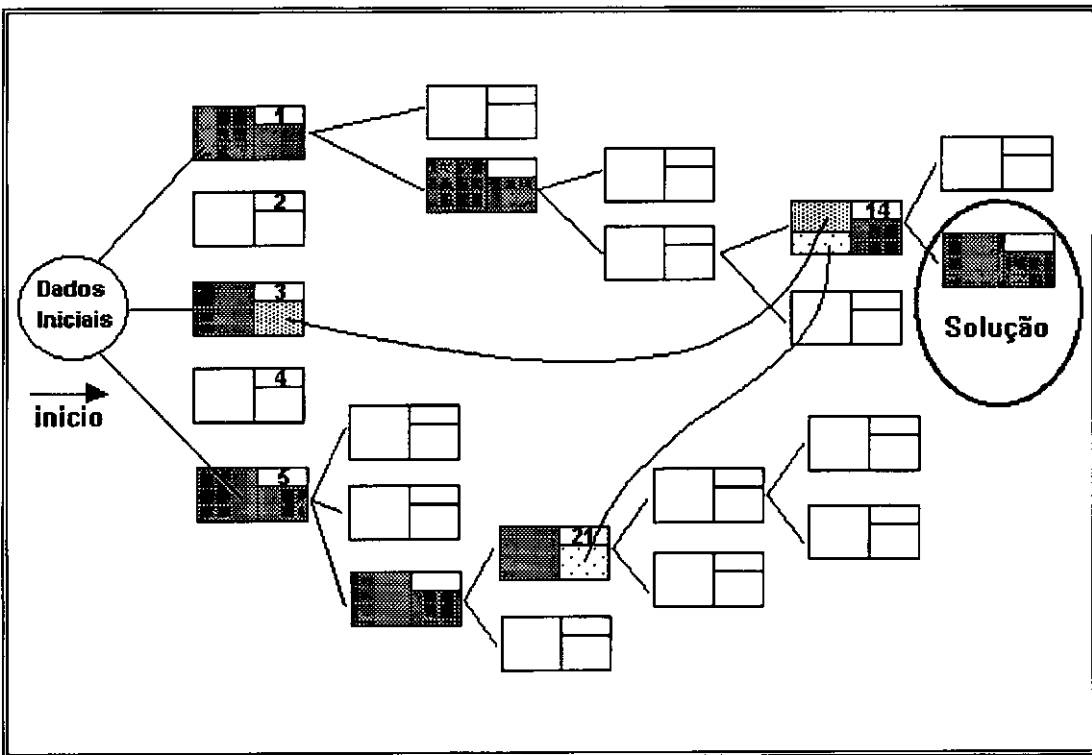


Figura II.12 : Método de encadeamento direto

As regras citadas serão colocadas na agenda para avaliação futura, enquanto que as regras 2 e 4 serão ignoradas no processo de solução.

Os dados que são inferidos pelo sistema ao longo da consulta produzem o mesmo efeito dos dados iniciais no procedimento de escolha das regras a serem avaliadas. O processo de busca de solução é interrompido quando o MI avalia a última regra empilhada na agenda. Na avaliação da IC no1 o sistema não conseguiu chegar à solução, pois as premissas das regras da terceira camada hierárquica não foram satisfeitas. A avaliação das IC 3 e 5 também não fornecem a solução final do problema, mas determinam a avaliação da regra 14 por encadeamento direto. Avaliando a regra citada com os resultados obtidos nas regras 3 e 21, a solução final é apresentada para o usuário.

Recomenda-se a utilização de FCH como estratégia de solução de sistemas de *planejamento, projeto, e prognósticos*.

### II.3.2 MÉTODO DE ENCADEAMENTO REVERSO (BCH)

O método de encadeamento reverso (figura II.13) está diretamente relacionado com a avaliação de ilhas de conhecimento. O mecanismo de inferência concentra a busca nas ligações hierárquicas da ilha de conhecimento analisada, começando nas camadas inferiores e subindo até validar ou invalidar a hipótese "pai".

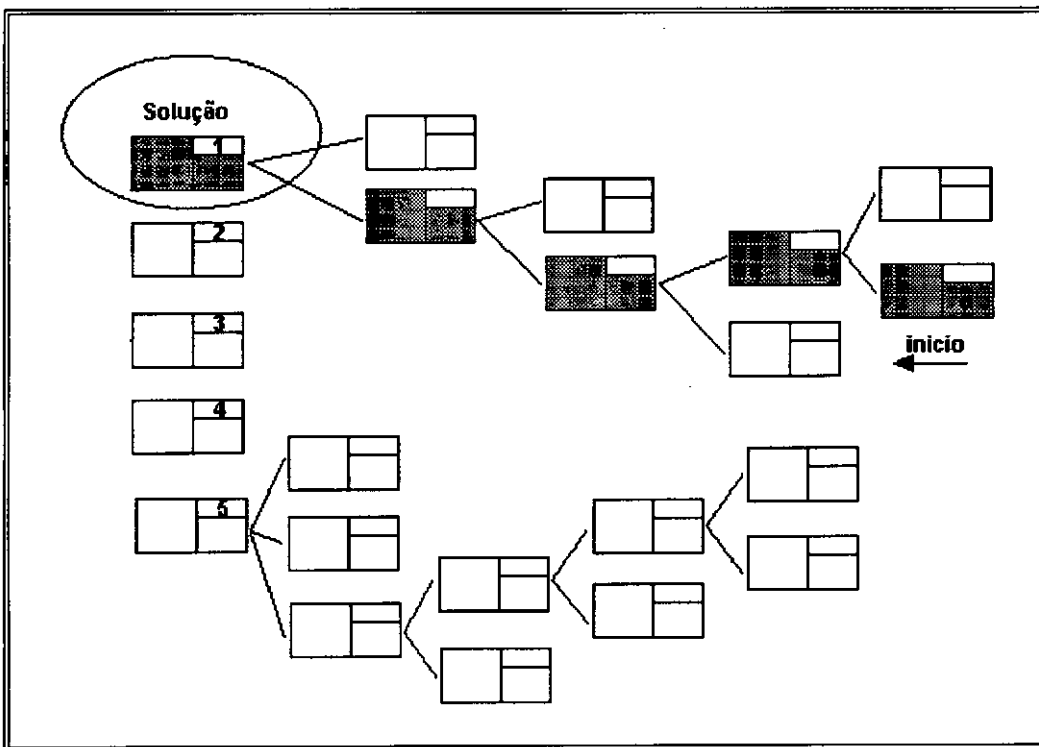


Figura II.13 - Método de encadeamento reverso

Este método simula o raciocínio indutivo do ser humano, onde as informações a serem manipuladas tem sempre relação direta com o objetivo da investigação.

No exemplo da figura (II.13), a hipótese 1 representa um objetivo que o usuário deseja cumprir ou avaliar. Os requisitos das premissas associadas à cada hipótese mostram que o problema em questão deve começar a ser resolvido nas camadas inferiores de conhecimento. Validando as hipóteses associadas, o sistema caminha ao longo da ilha na direção "reversa" até obter o valor (falso ou verdadeiro) da hipótese "pai" correspondente.

Recomenda-se a sua utilização na resolução de problemas de *diagnóstico, controle ou monitoração*.

### II.3.3 ESTRATÉGIAS DE BUSCA

A estratégia de busca e a priorização das regras de uma hipótese são fatores fundamentais para otimizar o trabalho executado pelo MI. Existem dois modos de busca utilizados para avaliação de ilhas de conhecimento: o modo de *avaliação exaustiva* e o modo de *avaliação em profundidade*. O modo de *avaliação exaustiva* requer necessariamente a avaliação da totalidade das regras associadas antes de validar ou invalidar a hipótese correspondente (figura II.14).

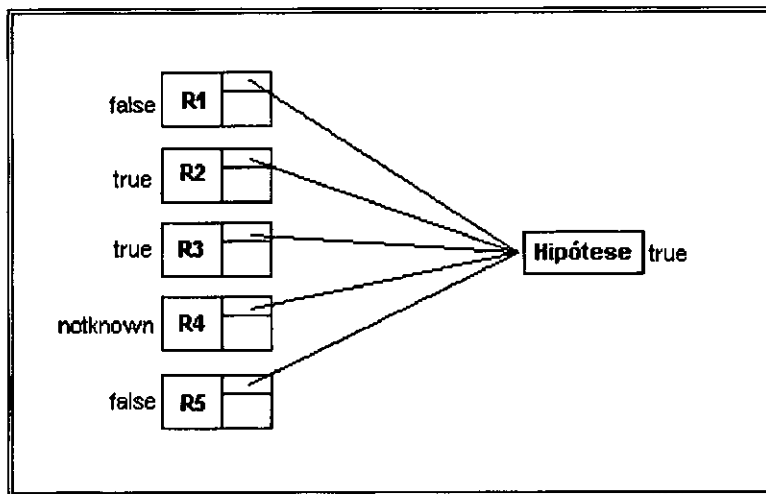


Figura II.14 - Modo de avaliação *exaustiva* da hipótese

O modo de *avaliação em profundidade*, interrompe a avaliação das regras após a detecção da primeira regra com premissa verdadeira (figura II.15). Observa-se que a diferença do exemplo da figura (II.14), as regras R3, R4 e R5 do exemplo da figura (II.15) não precisaram ser avaliadas para confirmar a hipótese, pois o processo de busca foi interrompido com a primeira regra validada (R2=True).

Mesmo no modo de avaliação em profundidade, pode se dar um caso de avaliação de todas as regras associadas. Este fenômeno ocorre quando todas as premissas de todas as regras recebem o status de "falso" ou "notknown". Todas as regras com status="false" equivalem à uma hipótese com valor "false". Pelo menos uma regra com status="unknown" e as demais com status="false" equivalem à uma hipótese com valor "unknown".

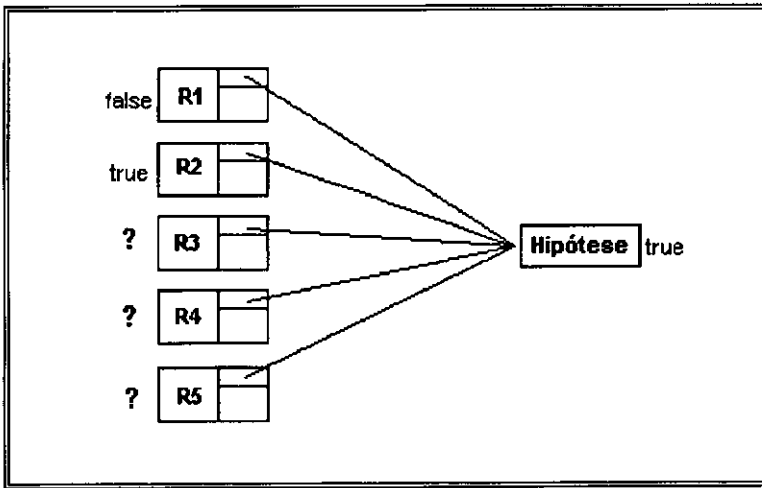


Figura 2.15 - Modo de avaliação em *profundidade* da hipótese

A ordem de avaliação das regras é outro fator que pode influenciar o comportamento do MI na manipulação de informações. O programador tem condição de alterar a ordem de execução das regras, que inicialmente são avaliadas de acordo com a ordem em que foram implementadas. A priorização de regras associadas a uma hipótese pode ser alterada preenchendo uma propriedade particular da regra chamada *prioridade de inferência (PI)*.

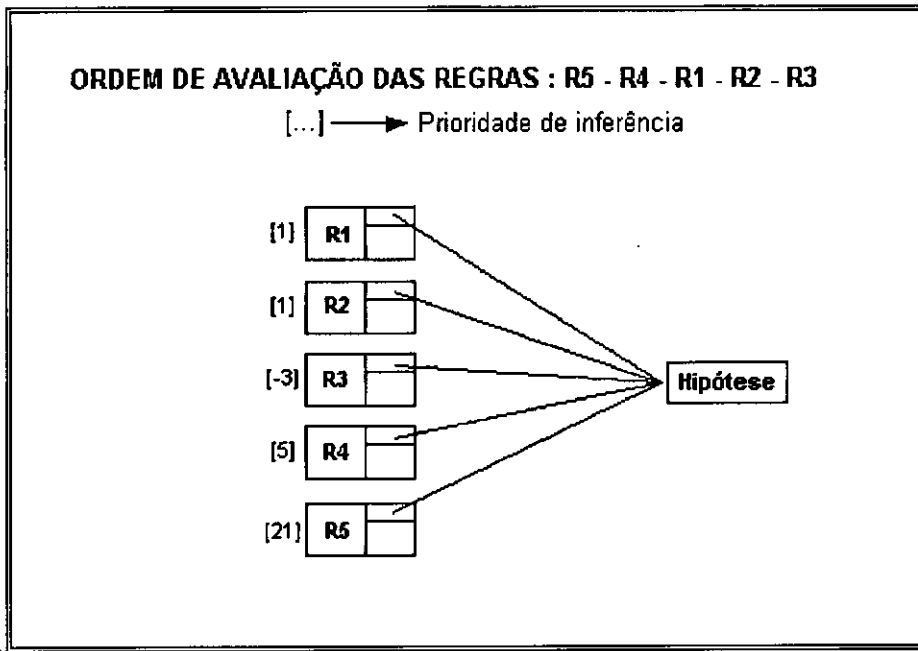


Figura II.16 - Utilização de números de prioridade de inferência para avaliação de regras

A figura (II.16) mostra a sequência de avaliação de um conjunto de regras com a PI definida pelo programador. Os números entre colchetes representam as prioridades de inferências correspondentes a cada regra, e os números R1,...R5, a respectiva ordem de implementação das mesmas. As regras com prioridades mais baixas serão as últimas a serem executadas. No caso das regras R1 e R2, que tem a mesma PI, a regra R1 será executada em primeiro lugar, pois foi implementada anteriormente à regra R2. Caso o programador não deseje utilizar este recurso, o mecanismo de inferência atribui a mesma prioridade para todas as regras.

#### II.4 ARQUITETURAS BLACKBOARD

Em seções anteriores foram comentados aspectos referentes aos formalismos de representação e estratégias a serem utilizadas para construir bases de conhecimentos de sistemas especialistas. Existem na engenharia, problemas que exigem uma interação de várias áreas e especialistas. A melhor maneira de estruturar este tipo de problemas é representar cada tipo de conhecimento com BC independentes que serão interligadas através de uma estrutura central. Este tipo de representação recebe o nome de *arquitetura "blackboard" (BB)*, que funciona de maneira similar a estruturas de bancos de dados. A arquitetura BB possui os seguintes elementos: a unidade de definição das classes, objetos e propriedades globais do problema, a estrutura de controle e gerência, e as unidades independentes de conhecimento associadas. Este tipo de organização de conhecimento possui as seguintes vantagens[25]:

- . *Integra fontes múltiplas de conhecimento*
- . *Trabalha com diferentes níveis de abstração*
- . *Integra métodos diferentes de resolução de problemas*
- . *Consegue resolver problemas em paralelo*
- . *Permite representar problemas complexos*

A sua utilização é recomendada para problemas com:

- . *Necessidade de integração de conhecimento de diversas áreas*
- . *Dificuldade em antecipar a estratégia de solução*
- . *Necessidade de organização hierárquica do conhecimento*
- . *A solução requer flexibilidade de controle e inferência*
- . *Necessidade de montar diferentes seqüências de inferência para cada caso analisado*

A arquitetura BB foi selecionada para implementar o sistema INTEQ devido à necessidade de interação das áreas de inspeção, mecânica da fratura, análise de tensões, e técnicas de manutenção e reparo de equipamentos. A figura (II.17) mostra a estrutura do sistema INTEQ, composta das seguintes unidades:

- OBJETOS : contém a definição de dados globais, representados com classes, objetos, propriedades e MS.
- INTEQ contém as estruturas de gerência e controle do sistema. Esta base é responsável através de menus interativos com o usuário de definir a estratégia de solução para o problema em questão, e fornecer informação explicativa apresentando hiper textos e gráficos relacionados com as diferentes tecnologias envolvidas.
- HISTORIC fornece sugestões para procedimentos de inspeção baseado na informação do histórico do equipamento, armazenado no banco de dados **equipamento.HIS**.
- EQUIPAME : gerência informação relacionada com dados técnicos e geométricos de equipamentos e atualiza o banco de dados de equipamentos **equipamento.TEC**
- MATERIAL : gerência informações relacionadas com as características do material do equipamento. Atualiza os bancos de dados de materiais **equipamento.MAT**.
- PLANT : infere informações sobre a terminologia utilizada nos desenhos de planificação correspondente. Atualiza os bancos de dados de desenhos de planificação **equipamento.DES**

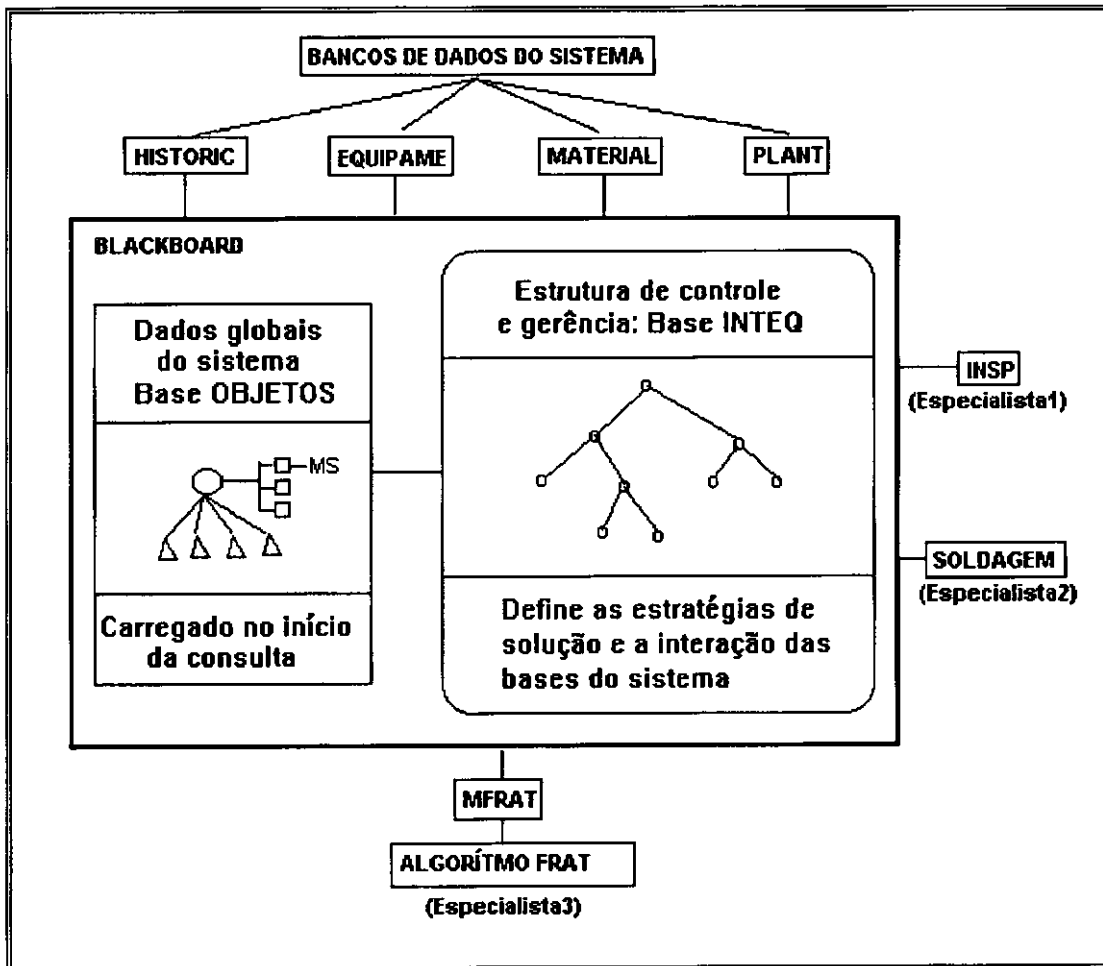


Figura II.17 - Arquitetura "blackboard" do sistema INTEQ

- INSP : executa a análise de resultados de ensaios não destrutivos fornecendo o laudo correspondente de acordo com as normas vigentes. Classifica as discontinuidades de acordo com o seu grau de periculosidade e seleciona os defeitos a serem avaliados pela mecânica da fratura.
- MFRAT: Executa os algoritmos de mecânica da fratura e elementos finitos, gera o laudo de MF e seleciona os defeitos a serem reparados. A rotina externa FRAT pode ser chamada desta base para complementar a informação correspondente ao grau de criticidade do defeito analisado.
- SOLDAGEM: Baseado na informação disponível no histórico do equipamento e no conjunto de defeitos a serem reparos com solda, monta o procedimento de soldagem correspondente.

A interação entre as diferentes bases que integram o sistema INTEQ é obtida montando regras de controle encarregadas de carregar e descarregar da memória as

bases selecionadas para interagir no processo de solução. Quando uma base é carregada, as regras e definições locais de objetos são somadas às já existentes, permitindo a sua utilização temporária e a interação dos diferentes níveis de abstração. A definição global do domínio é alimentada com os resultados obtidos em cada chamada e podem ser aproveitadas ao longo da consulta. Tanto as regras como a definição local dos subdomínios representados nas bases são apagados da memória após a sua utilização para economizar espaço e evitar a superposição de conhecimento diferenciado.

## **CAPÍTULO III INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS**

### **III.1 INTRODUÇÃO**

Todo o processo de inspeção de equipamentos está diretamente relacionado com a realização de ensaios não destrutivos (END) nas etapas de detecção, dimensionamento e identificação de defeitos. O técnico responsável escolhe o método adequado, e em muitos casos existe um END indicado e um outro END complementar para confirmar as informações obtidas no primeiro ensaio.

Para cada equipamento existe uma metodologia de inspeção regulamentada por normas: vasos de pressão[2,3,26,27], tanques de armazenamento[4,5,27] e tubulações [6,27].

As etapas a serem cobertas na inspeção do equipamento são:

- Identificar o meio agressivo causador de problemas atuais ou futuros no equipamento;
- Em função do mecanismo de falha atuante, ver que tipos de problemas deverão ser procurados na etapa de detecção;
- Classificar as indicações encontradas de acordo com a sua criticidade;
- Para os defeitos críticos, estabelecer o reparo ou ação corretiva correspondente.

O objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos fundamentais referentes ao processo de inspeção levantados na fase de aquisição de conhecimentos, descrever a estrutura da base, explicitar os pontos de interação com a mecânica da fratura, ação corretiva, bancos de dados e hipertextos.

### **III.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Os ensaios não destrutivos mais utilizados na inspeção de equipamentos industriais são partículas magnéticas (PM), ultrassom (US), líquidos penetrantes (LP), radiografia (RA) e emissão acústica (EA). Baseado nas necessidades do usuário na etapa de execução dos ensaios, o sistema INTEQ oferece as seguintes facilidades a serem utilizadas ao longo da consulta:

- Recomendação do END correspondente, em função das condições operacionais e dos recursos disponíveis, para cobrir as etapas de detecção, identificação o dimensionamento de defeitos;
- Classificação das indicações detetadas em defeitos e descontinuidades de acordo com a norma vigente (defeito é a descontinuidade que foi reprovada por norma);
- Armazenamento dos resultados de ensaios em banco de dados.
- Geração de relatórios com recomendações prévias de inspeção avaliando resultados de ensaios de inspeções anteriores armazenados em banco de dados.
- Recomendação de ensaio complementar correspondente para confirmar identificação ou geometria.
- Seleção de indicações preocupantes a serem avaliadas pela Mecânica da Fratura.
- Identificação de defeitos de operação (podem propagar com o equipamento em operação).
- Sugestões para categorização de trincas múltiplas e critérios de interação de trincas complanares.

Os resultados de ensaios são processados na base de conhecimentos INSP. Textos ou gráficos podem ser solicitados pelo usuário para obter explicações ou sugestões relacionadas com as facilidades descritas. Resume-se a seguir o conhecimento adquirido e implementado para os END considerados.

### **III.2.1 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

Este ensaio é utilizado na detecção de defeitos que afloram à superfície da chapa em materiais ferromagnéticos. Induzindo campos eletromagnéticos em materiais ferromagnéticos, as partículas magnéticas se concentram no contorno das anomalias superficiais e sub-superficiais da chapa. Existem dois tipos de partículas: a seca e a úmida. Normalmente recomenda-se a utilização de partículas fluorescentes úmidas, devido ao excelente grau de sensibilidade em fundos escuros. As PM podem também detetar redução de espessura de tubulações com ajuda de sensores.

Esta técnica é eficiente no dimensionamento de comprimentos, mas deve ser utilizada com cuidado, pois trincas que afloram à superfície podem ter boa parte do comprimento (interno à espessura) não detetado [28].

Independentemente do percentual de soldas analisado, o aparecimento de defeitos ou altos índices de contaminação exige a inspeção na totalidade das soldas e a realização de um exame complementar de US para confirmar a orientação e dimensões dos defeitos[26]. As vantagens de utilização do método são o seu baixo custo, sensibilidade à detecção de trincas muito fechadas, portabilidade do equipamento e precisão no

dimensionamento de comprimentos superficiais. O método é limitado à materiais ferromagnéticos. O preparo da superfície é fundamental para evitar indicações falsas.

Qualquer indicação acima de 1/16 polegadas evidencia uma imperfeição que deve ser registrada em relatório. Na impossibilidade de execução de PM, recomenda-se a inspeção por líquidos penetrantes, que apresenta níveis de sensibilidade inferiores aos do PM, mas que podem ser utilizados em qualquer tipo de superfície. LP são também recomendados para locais de difícil acesso[27]. A ação de reparo mais utilizada para trincas superficiais detetadas com PM ou LP é o esmerilhamento. Este procedimento reduz a espessura de projeto e conseqüentemente diminui o tempo de vida do equipamento. Deve ser utilizado com receio em equipamentos contaminados com H<sub>2</sub>S.

O sistema INTEQ armazena em BD a localização, orientação e geometria dos defeitos através de perguntas ao usuário e fornece informações úteis, como por exemplo o número de defeitos de operação por solda, percentual de soldas que devem ser inspecionados, define a taxa de contaminação e verifica a condição atual de reparos e cavidades na superfícies externa e interna do equipamento efetuados em inspeções anteriores. Esta informação pode ser aproveitada na geração de sugestões para inspeções futuras, colocação dos andaimes para a inspeção, definição do percentual de soldas a ser inspecionado e avaliação do nível de contaminação do equipamento.

### III.2.2 ULTRASOM

A técnica de ultrassom (US) é uma das mais utilizadas, pois consegue detectar e dimensionar defeitos superficiais ou internos das mais variadas geometrias[29]. Os defeitos comumente detectados com US, com algumas de suas peculiaridades são[30]:

- *Trincas*: se o tamanho da trinca for superior ao comprimento de onda dos cabeçotes, a detectabilidade pode ser baixa.
- *Falta de Penetração*: resulta difícil diferenciar os sinais de reforço com a parede oposta dos defeitos na raiz de solda (Baixa detectabilidade).
- *Falta de Fusão*: detectabilidade baixa devido à pouca rugosidade da superfície do defeito. Só é detectado com incidência de feixe na superfície do defeito com um ângulo aproximado de 90 graus.
- *Inclusões*: de fácil detecção, devido à rugosidade superficial.
- *Porosidade*: deve-se procurar sinais abaixo do nível de rejeição.
- *Decoção lamelar*: sua detecção depende da escolha adequada do ângulo do cabeçote.
- *Impurezas na solda*.
- *Perda de espessura* devida à erosão ou corrosão.

Os ângulos de cabeçote mais utilizados nas diversas técnicas de US são 45, 60, 70 e 90 graus. *Trincas* muito fechadas ou cobertas com óxidos podem não ser detectadas com este tipo de END. O US pode ser aplicado em materiais metálicos e não metálicos com espessuras variando de 0.1 a 10 polegadas. Para o caso de equipamentos na indústria do petróleo, técnicas especiais deverão ser especificadas para chapas acima de 3 polegadas. A escolha da técnica adequada de US para o dimensionamento será feita em função da facilidade de acesso e do tamanho do defeito [28]:

- *Comprimentos superiores a 20 mm*: recomenda-se a técnica dos *seis decibels (6 dB)* [29]. Esta técnica acarreta erros grosseiros quando os defeitos possuem mudanças de orientação ao longo do comprimento. Embora seja uma técnica de simples aplicação, deve-se ter cuidado, pois a margem de erro gira em torno dos 30% [30]. Caso o inspetor deseje aumentar a precisão do dimensionamento, pode-se utilizar a técnica do *Tip-diffraction* que tem uma margem de erro de aproximadamente 10% [30].
- *Comprimentos inferiores a 20 mm*: a técnica recomendada é a dos *vinte decibels (20dB)* [29], a qual também pode ser utilizada para medir a altura. A sua utilização

depende da habilidade do inspetor, pois exige a correção da abertura do feixe ultrassônico.

- *Alturas*: existem vários métodos para dimensionar a altura. Os mais utilizados são o de *20dB*, o da *máxima amplitude* e o da *queda de potencial*. O dimensionamento da altura requer também o dimensionamento da profundidade da trinca, no caso de defeitos internos à superfície da chapa.

Durante a especificação de técnicas especiais de US, o técnico responsável deverá, de acordo com as necessidades, especificar parâmetros tais como: sensibilidade, local do sensor, escolha do equipamento, cabeçote, ângulos de inclinação, etc.

As magnitudes da amplitude e o comprimento do defeito determinam a necessidade de um ensaio complementar de radiografia.

Imperfeições com respostas acima de 20% durante a execução do ensaio devem ser investigadas com o objetivo de determinar a forma, qualificação e localização da indicação. As imperfeições que são reprovadas por norma [3,4] são:

- *Trincas, falta de fusão e falta de penetração, independentemente das suas dimensões.*
- *Outras imperfeições acima do nível limite de amplitude, com comprimentos acima de:*
  - *1/4 polegadas para chapas de espessura (t) até 3/4 polegadas*
  - *1/3 t polegadas para chapas de 3/4 a 2- polegadas de espessura*
  - *3/4 polegadas para t acima de 2- polegadas*

Todas as indicações acima de 50% da curva de referência deverão ser registradas e dimensionadas. Entende-se por dimensionamento a avaliação quantitativa da geometria do defeito: comprimento, largura, altura e profundidade.

Todas as discontinuidades *reprovadas* (defeitos) e as *relevantes* deverão ser reconfirmadas com ensaio complementar de radiografia. Uma discontinuidade relevante é aquela que foi aprovada por norma mas apresenta características que justifiquem o seu acompanhamento com o exame complementar. É um critério subjetivo definido pelo engenheiro responsável pela manutenção do equipamento.

Utilizando o conhecimento descrito, o sistema INTEQ classifica as indicações de US utilizando a norma e a experiência dos especialistas consultados. Em versões futuras pretende-se conectar diretamente o sistema com os equipos de US para automatizar o processo de aquisição de dados, bastante demorado no caso do ensaio citado. O armazenamento de resultados de inspeção de US permite acompanhar o crescimento de defeitos selecionados para estudo da taxa de crescimento de defeitos no equipamento correspondente e comparar resultados obtidos em inspeções ao longo do tempo.

### III.2.3 RADIOGRAFIA

Existem dois tipos de ensaios radiográficos utilizados na inspeção de equipamentos: o *raio-x* e o *raio-gama*. Os raios *gama* são mais leves e não dependem de energia elétrica, mas em compensação a qualidade da imagem nem sempre é satisfatória. A espessura mínima da chapa para utilização de raios *gama* é de aproximadamente 60 mm e para os *raios-x* de 10mm. A absorção de raios por um material depende da espessura da chapa analisada, de sua densidade e do seu número atômico.

Para detectar discontinuidades com radiografias, as mesmas devem apresentar um coeficiente de absorção à radiação diferente do aço, e devem ter pelo menos uma dimensão visível na direção do eixo de radiação. No caso de trincas, as mesmas só podem ser detetadas quando são coplanares à direção da radiação. Em caso de dúvidas na identificação de um defeito, recomenda-se radiografar a região de vários ângulos.

Este tipo de ensaio tem boa precisão no dimensionamento do comprimento das indicações e no processo de identificação de discontinuidades em complemento com o US. Por outro lado, sendo uma imagem planar, não se pode determinar a altura nem a orientação, precisando sempre um ensaio complementar de US para completar a fase de dimensionamento.

A dificuldade de transporte do equipamento e o requerimento de uma zona de proteção para o operador poderá dificultar a sua aplicação do ensaio em áreas de difícil acesso. De acordo com [2,3] são considerados defeitos no ensaio radiográfico:

- *Trincas, falta de fusão ou de penetração independentemente da geometria;*
- *Quaisquer outras indicações alongadas com comprimentos superiores a:*
  - . *1/4 polegadas para chapas de espessura (t) até 3/4 polegadas*
  - . *1/3t polegadas para chapas de 3/4 a 2- polegadas de espessura*
  - . *3/4 polegadas para t acima de 2- polegadas*
- *Quaisquer grupos de indicações alinhadas com comprimento agregado acima de t numa envoltória de 12t, exceto quando a diferença entre imperfeições sucessivas exceder 6L, onde L é o comprimento da imperfeição mais longa no grupo.*
- *Indicações arredondadas não aceitas pelos critérios de aceitação de porosidade da norma.*

A combinação de resultados obtidos no US e RX permitem a correta identificação do defeito em casos de dúvida. As incertezas que acompanham o processo de inspeção com END são originadas por [30]:

- . *Erros no dimensionamento do defeito devido à falta de precisão do equipamento*
- . *Falta de qualificação técnica do inspetor*
- . *Falta de preparo adequado da superfície a ser inspecionada*

O sistema INTEQ armazena resultados de ensaios radiográficos de solicitações decorrentes de "recomendação de ensaio complementar" obtidos nos ensaios de US, com o intuito de aumentar a certeza no processo de classificação de indicações em descontinuidades e defeitos. A seguir apresenta-se a metodologia do sistema na avaliação de resultados obtidos dos END.

### III.3 AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIOS

#### III.3.1 IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS PERIGOSOS

Na avaliação dos resultados obtidos nos ensaios pode-se identificar na figura (III.1) três regiões que serão utilizadas para avaliar o grau de periculosidade do defeito analisado:

- *Região I: descontinuidades aprovadas por norma-e que não são perigosas;*
- *Região II: descontinuidades muito próximas ao limite estabelecido pela norma que devido a incerteza de dados podem ou não ser consideradas perigosas de acordo com a visão do engenheiro responsável pela inspeção;*
- *Região III: descontinuidades reprovadas pela norma classificadas como perigosas.*

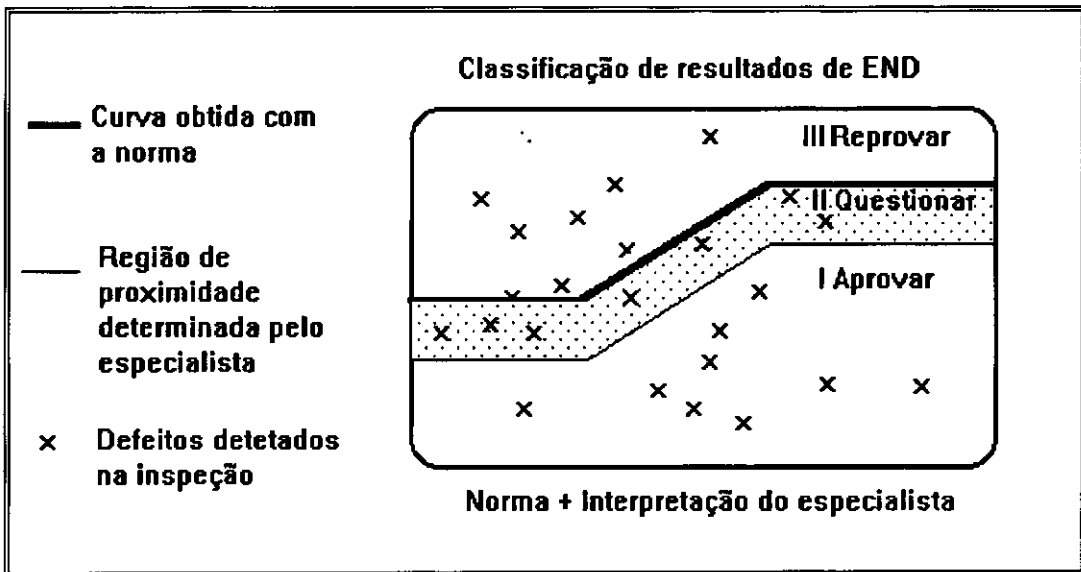


Figura III.1 - Classificação por amostragem de resultados obtidos nos END

A curva (em negrito) representa a norma correspondente ao ensaio realizado e define duas regiões de descontinuidades: descontinuidades *aprovadas* (abaixo da curva) e descontinuidades *reprovadas* (acima da curva). A região de incerteza é definida de acordo com a experiência do engenheiro responsável, a qualificação do inspetor, e do tipo de equipamento utilizado. Nesta região, os resultados obtidos são questionados, sendo necessário a realização de ensaios complementares. Não tendo condição de executar ensaios complementares, o engenheiro reprova os defeitos na região de

incerteza, adotando uma solução conservativa. Existem duas formas de representar este tipo de problema no sistema proposto:

- *Análise por tolerância:* É selecionado o parâmetro preponderante na análise e estipula-se uma tolerância (constante) que define uma curva paralela à curva limite estabelecida pela norma. No caso de resultados de END, o parâmetro escolhido é o comprimento do defeito. O problema deste tipo de aproximação é que padroniza a análise e não leva em consideração outros fatores que, embora sejam informações subjetivas, influenciam na tomada de decisões do engenheiro responsável, como por exemplo o grau de contaminação, o tipo de produto armazenado, as variações nas condições de operação, o tempo de vida e o histórico do equipamento.
- *Análise com tratamento de incertezas:* o usuário utiliza variáveis linguísticas subjetivas para definir certos parâmetros que influenciam a análise: "alto grau de contaminação", "pouca variação de temperatura". Estes parâmetros são incluídos na análise e representados com modelos "fuzzy" [32] na avaliação da periculosidade dos defeitos em questão. Os resultados ("aprovado", "reprovado") recebem rótulos de certeza, como por exemplo "absolutamente", "quase", "não", "levemente" que são utilizados para avaliar os resultados da inspeção.

### III.3.2 DETERMINAÇÃO DE EXAME COMPLEMENTAR

Os defeitos que afloram na superfície da chapa são facilmente identificados com PM ou LP. O exame de US poderá ser solicitado como ensaio complementar para dimensionar a altura e determinar a orientação do defeito em questão. Defeitos internos utilizam o ensaio de US no dimensionamento de defeitos em geral. A escolha da técnica adequada pode diminuir o aumentar o grau de certeza das medições efetuadas. O ensaio complementar radiográfico é recomendado para identificar defeitos e confirmar as medições efetuadas no US.

Defeitos e descontinuidades relevantes devem receber a indicação de ensaio complementar. As descontinuidades relevantes são escolhidas de acordo com critérios subjetivos que dependem exclusivamente dos engenheiros responsáveis pela inspeção. O critério de relevância utilizado no sistema INTEQ identifica como descontinuidades relevantes aquelas com amplitudes entre 50 e 100% e comprimentos *grandes*. A palavra *grande* é uma variável linguística "vaga" utilizada pelo especialista, mas que carece de limites numéricos bem definidos. Embora o tratamento de incertezas a ser apresentado no capítulo VII possa ser utilizado neste procedimento, o sistema utiliza a análise por tolerância, onde descontinuidades "grandes" "são aquelas com comprimentos superiores a 50 mm.

### **III.3.3 DEFEITOS A SEREM ANALIZADOS PELA MECÂNICA DA FRATURA**

Existem casos em que o engenheiro de campo decide conviver com os defeitos que após uma análise cuidadosa não representem perigo algum para a confiabilidade do equipamento. A avaliação da criticidade do defeito no sistema INTEQ é baseada numa análise pela Mecânica da Fratura (MF) onde o usuário tem condições de quantificar o risco de propagação de uma trinca utilizando um modelo matemático que fornece a solução em função do material utilizado na chapa, as condições de operação e a geometria do equipamento[7]. O capítulo IV descereve em detalhe os procedimentos correspondentes á análise de defeitos pela MF. Na etapa de avaliação de resultados de inspeção, o sistema ajuda ao usuário a escolher as descontinuidades que em função da sua localização, geometria, orientação e forma devam ser analisados pela MF. Em principio, o sistema gera um banco de dados com a lista de descontinuidades e defeitos com dimensões "preocupantes" e risco de propagação que serão processados na MF, visando a geração do laudo correspondente. O usuário tem participação direta no processo de escolha dos defeitos a serem avaliados. A dimensão que mas preocupa o inspetor é o comprimento. O modelo de MF do sistema mostra e explica para os usuários que nem sempre a trinca mas comprida é a mais crítica.

### **III.3.4 GERAÇÃO DO DESENHO DE PLANIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO**

Os resultados de ensaios são armazenados em relatórios de inspeção contendo o laudo correspondente para cada indicação em função da norma vigente. Na maioria das vezes estes relatórios utilizam informação gráfica para descrever a localização, orientação e geometria do defeito. A informação gráfica do detalhe da solda contendo os defeitos é muito utilizada no processo de inferência dos especialistas. Cada chapa e solda do equipamento analisado recebe um nome para permitir a geração dos relatórios de ensaios. A identificação e posicionamento gráfico dos componentes e acessórios do equipamento são descritos no *desenho de planificação*, que faz parte da documentação do equipamento. O sistema INTEQ não pode perder a informação gráfica na sua inferência, portanto foi necessário idealizar um gerador gráfico de desenhos de planificação de equipamentos associado a um banco de dados, que permita o seu aproveitamento em consultas posteriores. O gerador inclui visualização da seção transversal da solda com os defeitos corresponden, vistas superior, inferior e lateral do equipamento, recursos de "zoom" e vista espacial da estrutura gerada. O algoritmo foi implementado em FORTRAN 77 e tem interface com a base de conhecimentos PLANT,

responsável pela aquisição de dados e armazenamento da informação em banco de dados.

A interface gráfica foi baseada em programas de geração de malhas de elementos finitos[33]. Elementos finitos bidimensionais isoparamétricos de 8 nós foram utilizados para representar no espaço as chapas que definem a geometria do equipamento a ser analisado. Os acessórios do equipamento (bocais, tubulações, bocas de visita, pernas, etc.) são representados com ícones. A figura III.2 mostra as vistas lateral, superior e inferior de um vaso de pressão esférico com a utilização do gerador proposto. Os elementos gerados que representam as chapas podem ser visualizados com as variáveis alfanuméricas correspondentes ao nome da chapa e das soldas associadas (conectividades). Cada chapa ou solda do equipamento é definida na base de conhecimentos com objetos dinâmicos. A BC PLANT é responsável pela aquisição e armazenamento dos dados, inferências e interface com o algoritmo citado. Os ícones correspondentes as pernas de sustentação, bocais de produto, conexões e boca de visita são definidos como propriedades dos objetos da classe CHAPA.

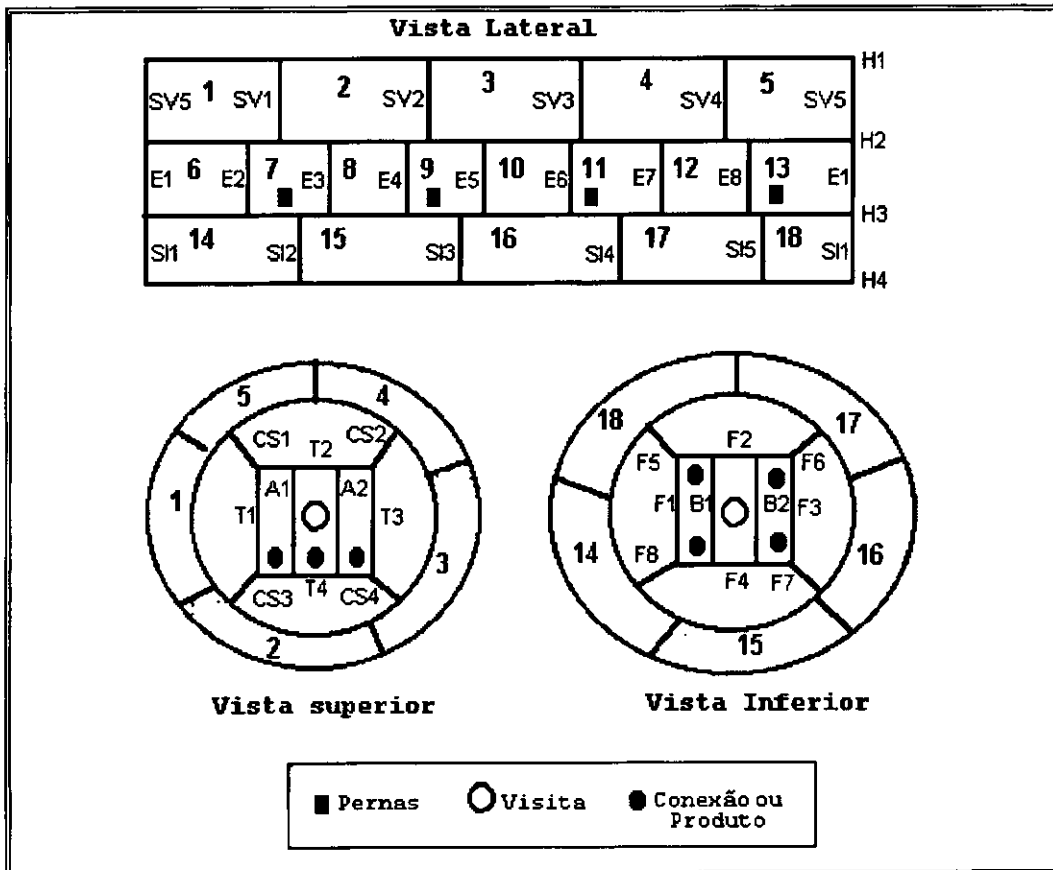


Figura III.2 - Geração da planta de situação do equipamento

Este recurso facilita a interação do usuário com o sistema na etapa de análise dos resultados de END. Perguntando somente o nome da solda (ou chapa) contendo o defeito detetado, o sistema infere do gráfico gerado a localização (bocais, calotas, costado), orientação (solda horizontal, vertical, de bocal), tipo de solda (V,K) e espessura representativa para avaliação de normas de END ou procedimentos de MF.

### III.4 CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

Ao longo do processo de avaliação da integridade física do equipamento os defeitos são classificados de acordo com as informações adquiridas nas etapas de *deteção, localização, identificação e dimensionamento*. Os defeitos detetados ao longo da inspeção são definidos no sistema como objetos da classe "defeitos", e os valores que as propriedades podem assumir são definidos de acordo com a terminologia obtida dos especialistas consultados. Na tabela (II.1) do capítulo II foi definida a classe "defeitos" e as propriedades que a definem. A terminologia utilizada teve que ser padronizada com o intuito de facilitar a programação e interação da rede de bases de conhecimento do sistema INTEQ. Descreve-se a seguir o jargão utilizado pelo sistema no processo de definição das propriedades dos defeitos a serem analisados.

#### III.4.1 DETEÇÃO E LOCALIZAÇÃO

Para efeitos de análise, o sistema considera finalizada a etapa de *deteção e localização* de descontinuidades após a definição dos seguintes parâmetros:

(a) **Local**: A descontinuidade pode estar localizada no BOCAL ou no COSTADO (no caso de esferas). Esta informação pode ser inferida pelo sistema do banco de dados correspondente ao desenho de planificação. Caso contrário, a informação será obtida através de pergunta ao usuário. A definição do local é utilizada para cálculo dos fatores de concentração de tensões (desalinhamento de chapas, tensões residuais, soldas de topo, etc.) e avaliação da periculosidade do defeito (defeitos no costado são mais perigosos que defeitos nos bocais).

(b) **Região**: Uma vez localizada a solda onde foi detetada a descontinuidade, o sistema deverá determinar a região da solda que foi afetada. A figura (III.3) mostra as quatro regiões que podem ser utilizadas para descrever o defeito : o metal de base(MB), a zona termicamente afetada(ZTA), a linha de fusão(LF) e o metal de solda(MS). A região mais favorável para propagação de defeitos de operação em vasos de pressão costuma ser a

ZTA. A resistência mecânica e a tenacidade do aço varia conforme a região onde foi localizado o defeito. O banco de dados de materiais do sistema INTEQ, contém campos para definição diferenciada das propriedades mecânicas e tenacidade das regiões descritas. A técnica de reconhecimento de padrão permite utilizar os valores correspondentes às regiões de cada defeito durante a análise pela MF. A análise de trincas em equipamentos contaminados com  $H_2S$  exige a definição das regiões, pois aços hidrogenados apresentam variação considerável da tenacidade nas 4 regiões especificadas.

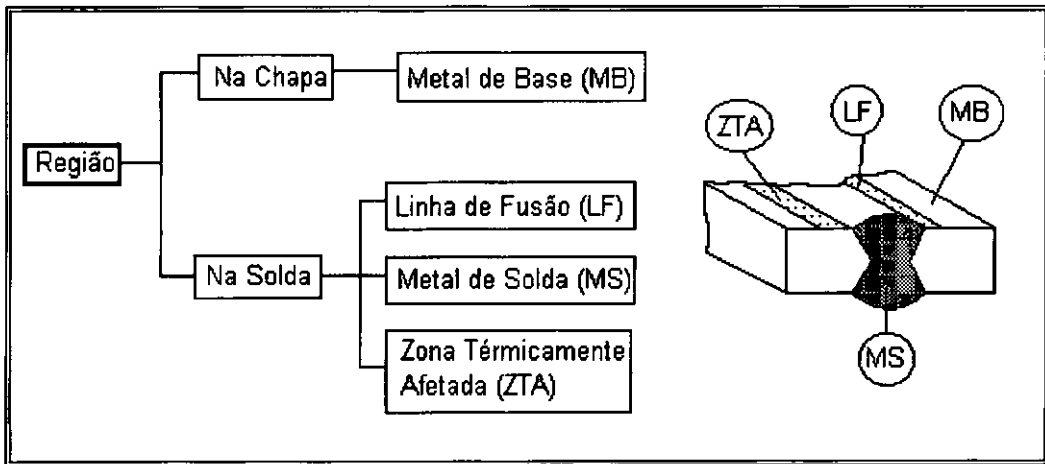


Figura III.3 - Classificação das regiões na chapa

(c) **Lado**: O defeito pode aparecer no lado *interno* ou *externo* do equipamento. Defeitos no lado interno estão em contato com o meio agressivo, defeitos no lado externo com o meio ambiente. O sistema concentra a busca de defeitos de operação nos defeitos detetados no lado interno. As trincas por fadiga nas pernas de sustentação são os únicos defeitos oriundos da operação que podem aparecer no lado externo do equipamento. Por outro lado os END podem ser realizados de ambos os lados. Esta informação poderá também influir na avaliação da credibilidade dos resultados obtidos nas etapas de detecção e dimensionamento de defeitos no ensaio de US.

(d) **Profundidade**: Este termo costuma gerar confusão, pois normalmente é também utilizado pelo pessoal da inspeção para referenciar a *altura* do defeito detetado. No sistema INTEQ a propriedade profundidade é utilizada para classificar defeitos em *interno*, *superficial* ou *passante* de acordo com a metodologia proposta em [7]. A figura (III.4) mostra a inferência utilizada pelo sistema para avaliação da profundidade do defeito: se a altura do defeito é superior a 80% da espessura ( $t$ ) da chapa, considerar a altura ( $a$ ) como sendo  $a=t$  e a trinca é definida com profundidade *passante*. Caso a altura

do defeito não ultrapasse os 80%, mede-se a distância até a superfície mais próxima ( $dy$ ). Defeitos com profundidades *superficiais* são aqueles com  $dy$  inferiores a 20% de  $t$  com  $a$ =altura medida +  $dy$ , em caso contrário, os defeitos são caracterizados com profundidade *interna* com  $2a$ =altura medida. No capítulo IV será explicado em detalhe o procedimento para cálculo do dimensionamento de defeitos na MF.

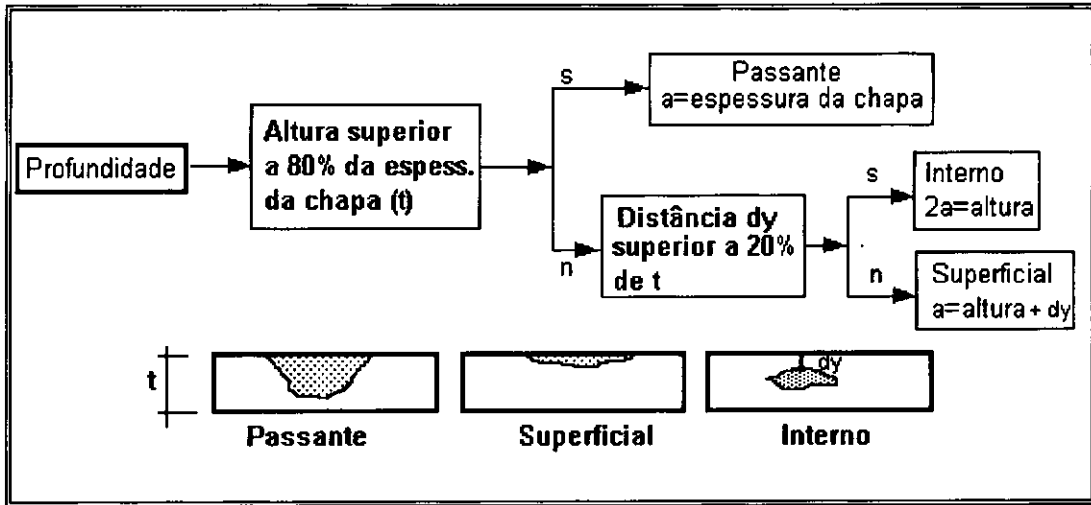


Figura III.4 - Classificação de defeitos de acordo com a profundidade

A análise da MF no sistema INTEQ varia em relação à profundidade. Por outro lado, na etapa de sugestão da ação corretiva correspondente, a ação recomendada para retirar defeitos superficiais é o esmerilhamento, para defeitos passantes é o enchimento com solda ou troca de gomos, e no caso de defeitos internos os mesmos só devem ser removidos em casos extremos. A profundidade é inferida pelo sistema em função dos resultados de END. Observa-se no entanto que a profundidade fornecida nos relatórios de ensaios de US corresponde à distância do defeito até a superfície onde foi realizado o ensaio, que nem sempre corresponde à distância até a superfície mais próxima. A ilha de conhecimento responsável pela determinação da profundidade considera todos os aspectos relacionados com o problema em questão.

(e) **Forma**: Logo no primeiro estágio de detecção, o técnico tem condição de determinar se a indicação tem formato *planar* (duas dimensões muito maiores do que a terceira) ou *volumétrico* (as três dimensões com a mesma ordem de grandeza). A metodologia utilizada no sistema para análise pela MF [7] considera a largura de defeitos planares igual a zero. A ilha de conhecimento da figura (III.5) mostra a inferência da forma em

função da largura do defeito, fornecida pelo usuário durante a etapa de dimensionamento.

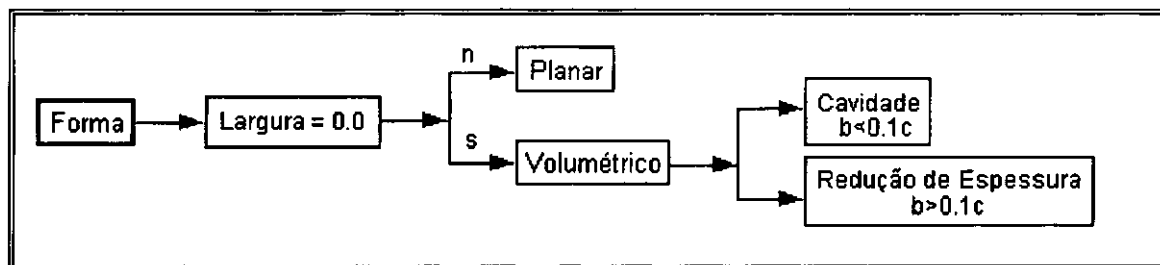


Figura III.5 - Forma do defeito em função do comprimento (c) e a largura (b)

A propriedade forma do defeito é utilizada no sistema para tentar identificar defeitos para o usuário, ou para diferenciar a análise de criticidade na MF.

(f) **Orientação:** Determinar a orientação do defeito é fundamental para avaliar a sua periculosidade. Um defeito coplanar e paralelo à direção da tensão atuante não apresenta riscos de propagação e pode ser ignorado. A orientação do defeito é definida de acordo com o cordão de solda ou a espessura da chapa, segundo a figura (III.6).

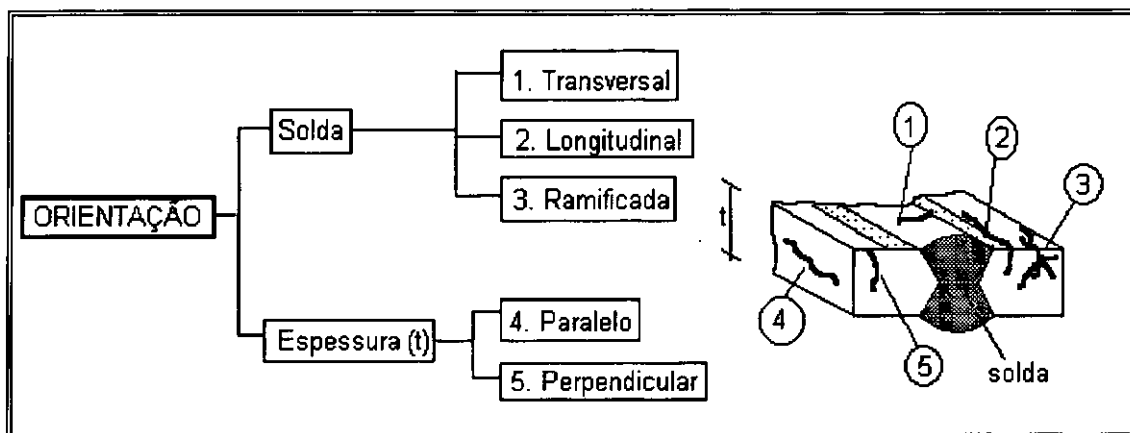


Figura III.6 - Orientação do defeito

A orientação será utilizada no sistema para cálculo de tensões residuais[7] e na identificação de defeitos de operação.

### III.4.2. IDENTIFICAÇÃO

Conhecendo o tipo predominante de discontinuidades detetadas em inspeções anteriores, o sistema pode montar as recomendações prévias de inspeção, determinar o

grau de contaminação do equipamento, e calcular o percentual de soldas a ser inspecionadas. Identificando defeitos durante a avaliação dos resultados obtidos nos END, o sistema não precisa adotar valores conservativos durante a análise da MF. A propriedade qualificação da classe *defeitos* é utilizada para identificar o defeito a ser avaliado. O sistema INTEQ identifica os defeitos de acordo com a terminologia definida na figura (III.7). Soluções conservadoras são adotadas para qualificar defeitos não identificados pelo sistema nem pelo usuário: defeitos planares desconhecidos são avaliados como trincas, defeitos volumétricos desconhecidos como cavidades.

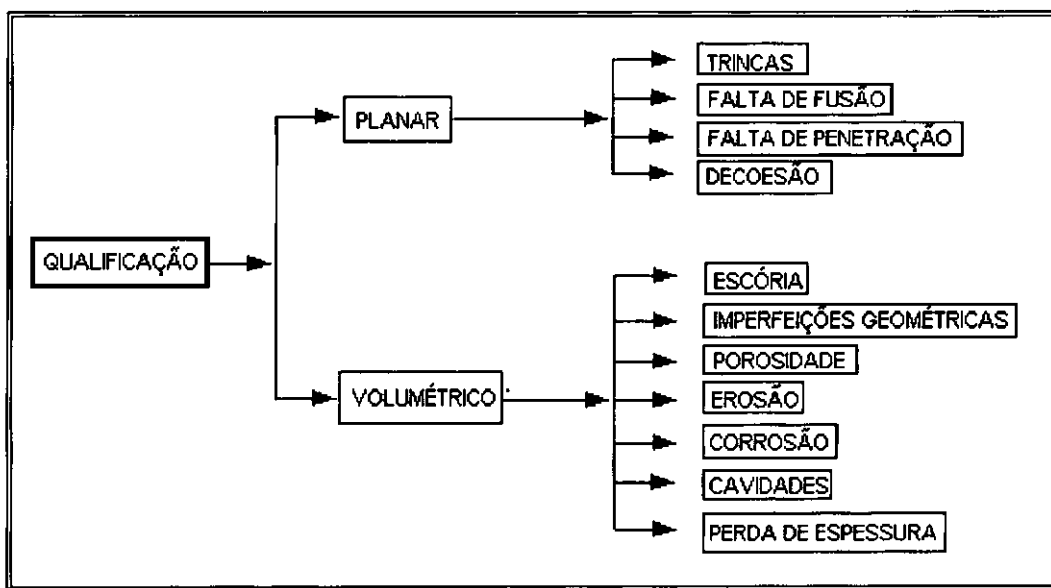


Figura III.7 - Tipos de defeitos analisados pelo sistema

O sistema INTEQ pode orientar o usuário na identificação de defeitos gerando telas gráficas definidas por norma[34]. A figura III.8 mostra a tela do sistema utilizada para ajudar o usuário a detectar e identificar de inclusões de escória ou mordeduras.

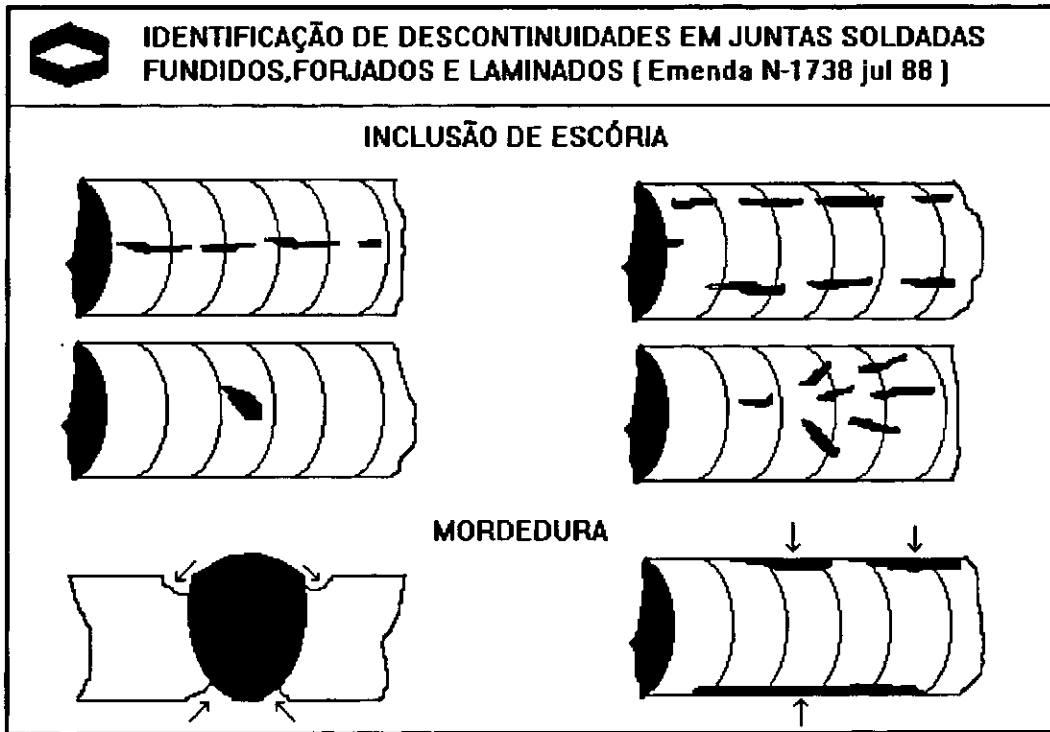


Figura III.8 - Tela gerada pelo sistema para identificação de defeitos

Técnicas especiais de END poderão também ser indicadas pelo sistema para ajudar a identificar defeitos em situações especiais.

### III.5. ESCOLHA DO END ADEQUADO PARA DIMENSIONAR DEFEITOS

A etapa de dimensionamento exige a determinação da altura (a), o comprimento (c), a largura (b), profundidade (dy), e a orientação do defeito. A precisão dos resultados obtidos no dimensionamento depende da escolha do END adequado. Quando o usuário não consegue dimensionar corretamente os defeitos, o sistema apresenta uma sequência de gráficos explicativos ou informação textual, destinados a orientá-lo na escolha ou realização do ensaio. Reduzindo a margem de erro no dimensionamento, aumenta-se a confiabilidade dos resultados obtidos ao longo da consulta. A figura (III.9a) mostra uma das ilhas de conhecimento do sistema para recomendação de ensaio para dimensionamento do comprimento : para defeitos internos com ordem de grandeza de comprimento superior a 20 mm, recomenda-se o método dos 6 dB (caso contrário o método dos 20 dB). No caso de defeitos superficiais, se o material for ferromagnético, utilizar PM com partículas fluorescentes úmidas (caso contrário, LP). Observa-se que o conhecimento representado neste conjunto de regras foi descrito na seção III.2.

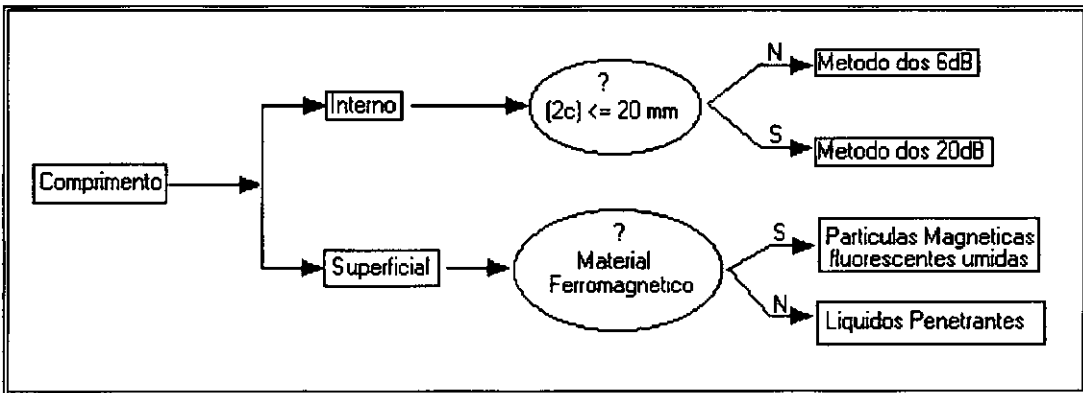


Figura III.9a : Dimensionamento do comprimento

Técnicas especiais de END para dimensionamento da altura poderão também ser inferidas no sistema, conforme a necessidade do usuário. Respondendo NOTKNOWN à pergunta correspondente ao valor da altura do defeito avaliado, o sistema ativa o conhecimento representado na figura (III.9b):

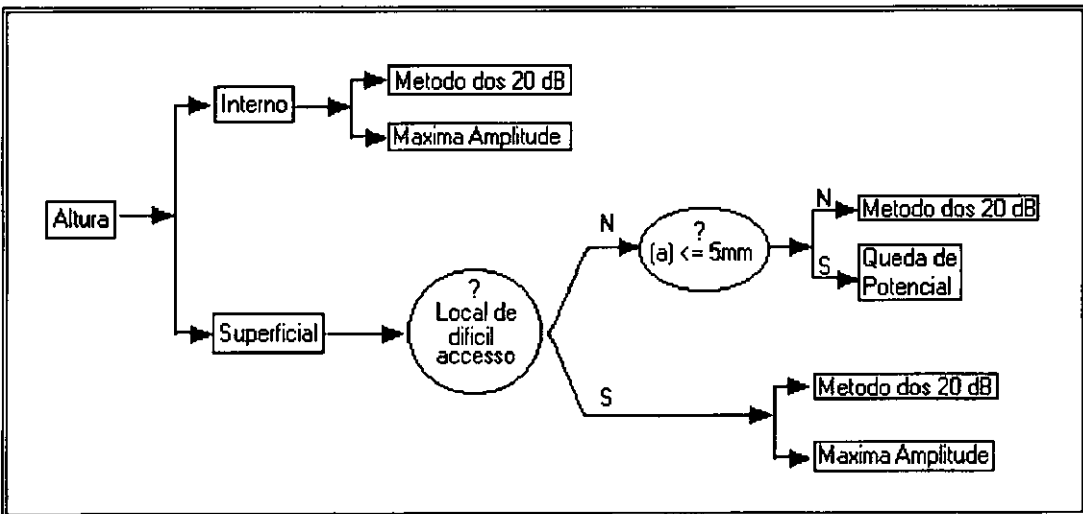


Figura III.9b - Dimensionamento da altura

Lembra-se mais uma vez que a recomendação da técnica de END pode estar acompanhada de gráficos ou textos, conforme a necessidade. Nas seções seguintes descreve-se a inferência do sistema para recomendação de END para o dimensionamento de defeitos em geral.

### III.5.1. TRINCAS SUPERFICIAIS

O comprimento de trincas que afloram na superfície pode até ser determinado com a *inspeção visual*. Em certos casos, a trinca pode propagar-se sub-superficialmente ou pode ser muito fechada, mascarando parte do comprimento. Recomenda-se, então, por ordem de prioridade, os seguintes exames para dimensionar comprimentos[27]:

- *Partículas Magnéticas, de preferência fluorescente úmida.*
- *Líquidos Penetrantes*
- *Correntes Parasitas*

Para determinação da altura, recomenda-se as técnicas de US apresentadas na figura (III.9) ou o ensaio de *resistência elétrica* (com as devidas limitações). Caso não seja possível aplicar nenhum dos citados métodos de dimensionamento, esmerilhar até o defeito desaparecer, e dimensionar a cavidade resultante.

### III.5.2. TRINCAS INTERNAS

Comprimentos de trincas com orientação paralela em relação à espessura da chapa, podem ser facilmente dimensionados com radiografia ou US. A altura do defeito pode ser determinada com as técnicas de US da figura (III.9). O aparecimento de trincas nos extremos de empolamentos de hidrogênio, ou a existência de dupla laminação poderá dificultar o dimensionamento, inclusive com US.

### III.5.3. FENDAS, CAVIDADES, E PERDAS DE ESPESSURA

Tendo acesso à superfície, estes tipos de defeitos podem ser medidos com fitas métricas ou com indicador de profundidade. A espessura remanescente da chapa pode ser inferida com a técnica de US do tipo "shear wave"[29].

### III.5.4. EMPOLAMENTOS

Tanto o comprimento como a altura de empolamentos por hidrogênio podem ser dimensionados com a técnica de US do tipo "compression wave"[29].

### III.6. CRITÉRIO DE CARACTERIZAÇÃO DE TRINCAS MÚLTIPLAS

Muitas vezes, a proximidade de duas ou mais trincas pode tornar a análise de cada uma delas em separado ineficiente e contra a segurança. Neste caso, existem critérios [7] para idealizar um grupo de descontinuidades muito próximas como sendo uma só, e executar a análise com a geometria equivalente. O sistema utiliza telas gráficas semelhantes as da figura (III.10) para auxiliar o usuário no dimensionamento de interação de trincas múltiplas coplanares.

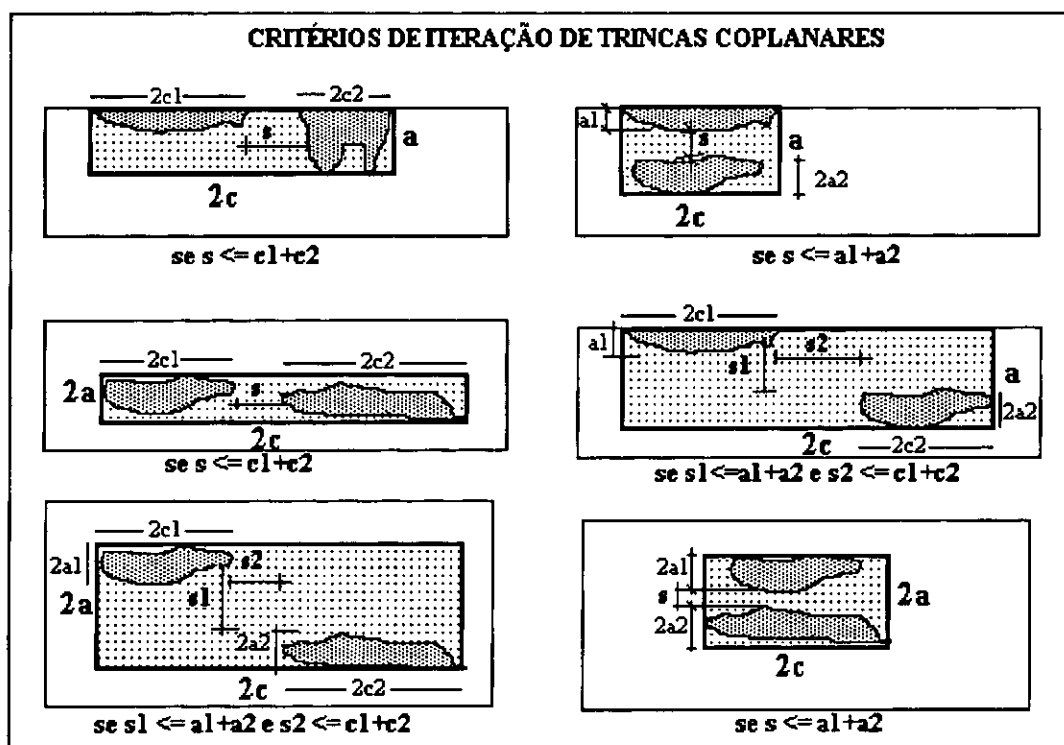


Figura III.10 - Tela gerada pelo sistema para avaliação de trincas múltiplas coplanares

No anexo I o leitor pode observar o formato exato das janelas de visualização de telas gráficas no ambiente NEXPERT. Nesta seção apresenta-se somente o conteúdo gráfico das telas, definidas pelo programador no formato BMP para Windows.

### III.7 TRINCAS DE OPERAÇÃO EM AÇOS CARBONO E DE BAIXA LIGA

O objetivo fundamental da inspeção é identificar e analisar defeitos planares, principalmente trincas, que possam evoluir durante a operação e provocar o colapso do

equipamento. Não detectando este tipo de defeitos, o equipamento pode voltar à operação.

As trincas de operação são aquelas que de acordo com a sua morfologia, geometria e orientação, apresentam características que as identifiquem com algum mecanismo de formação. Os parâmetros que determinam o fator de risco de crescimento de trincas de operação são a *geometria do defeito*, a *tenacidade do material* e as *tensões de tração* transversais à direção do comprimento da trinca. A variação das condições "normais" de operação do equipamento, a diminuição da resistência do material com tratamentos térmicos sucessivos e a ação de meios agressivos são os principais fatores que favorecem o crescimento ou aparecimento de novas trincas no equipamento. O sistema INTEQ possui um sistema de hipertextos baseado na bibliografia [7] e anotações dos especialistas, que pode ser consultado para obter orientações sobre meios agressivos e outros tipos de mecanismos que favorecem a formação e propagação de trincas em operação. O objetivo do sistema de hipertextos é incentivar a pesquisadores e técnicos a alimentar o INTEQ com resultados de testes e pesquisas nas diversas áreas catalogadas como "conhecimento não consolidado", permitindo a sua divulgação nos diversos setores da companhia. Ao longo do tempo, a informação (textual ou gráfica) do sistema poderá ser validada pelos especialistas, e os procedimentos resultantes poderão ser acrescentados nas bases de conhecimento correspondente.

O sistema de hipertextos para obter sugestões relacionadas com trincas de operação foi estruturado de acordo com os meios agressivos atuantes: *gás de amônia*, *gás de amina*,  $\text{CO}_2$  e *hidrogênio* a altas ou baixas temperaturas. A manutenção dos textos será feita de acordo com as solicitações dos especialistas. O menu principal do sistema de hipertextos atende às seguintes solicitações:

1. *Descrição da substância contaminante*
2. *Condições que podem favorecer o aparecimento de trincas*
3. *Morfologia do trincamento*
4. *Sugestão de END para detecção e dimensionamento*
5. *Como limitar ou prevenir o crescimento de trincas*
6. *Tipos de reparos adequados*

### **III.8 - ESTRUTURA DA BASE DE CONHECIMENTOS INTEQ**

A figura (III.11) mostra a estrutura geral do menu da base de conhecimentos de gerência do sistema (BCG), denominada INTEQ. O menu principal apresenta as seguintes opções:

- (1) Sugestão prévia de inspeção (consulta a base HISTORIC);
- (2) Acompanhamento da inspeção
- (3) Avaliação de resultados de ensaios (consulta a base INSP);
- (4) Análise pela mecânica da fratura (consulta a base MFRAT);
- (5) Sugestão de procedimentos de reparo (consulta a base soldagem);
- (6) Estrutura da base inteq (telas de auxílio ao usuário).

As bases de conhecimento responsáveis pela interface do sistema com os bancos de dados de dados técnicos do equipamento (base EQUIPAME), características do material (base MATERIAL) e desenho de planificação (base PLANT) são consultadas antes de apresentar o menu principal. Este recurso permite carregar na memória o conjunto de dados necessários para a análise do equipamento escolhido, ou adquirir e armazenar informação dos novos equipamentos a serem analisados.

As regras de controle do BCG INTEQ são responsáveis pelo gerenciamento da memória disponível. Descarregando as bases consultadas, o sistema aumenta a velocidade de consulta e economiza a memória disponível para a utilização dos outros recursos oferecidos. A seguir, descreve-se as funções associadas à cada item da estrutura do BCG do sistema da figura (III.11)

### **III.8.1 SUGESTÃO PRÉVIA DE INSPEÇÃO**

O objetivo do sistema na opção (1) do menu principal, é apresentar sugestões ao técnico responsável pela inspeção do equipamento que le permitam definir o relatório de inspeção prévia, que é um documento gerado nas refinarias antes de iniciar o processo de inspeção. As sugestões podem estar baseadas em:

- (a) Consultas ao sistema de hipertexto referente à defeitos de operação e meios agressivos;
- (b) Consultar a base HISTORIC para obter sugestões baseadas em resultados de inspeções anteriores;
- (c) Consultar as telas gráficas baseadas na norma 1738 [34], visando a detecção e identificação dos diversos tipos de descontinuidades e imperfeições que possam surgir ao longo da inspeção.

O usuário poderá imprimir as telas apresentadas ou consultar o relatório de consulta, armazenado em arquivo ao longo da utilização do sistema. O Anexo II apresenta a

listagem do relatório de consulta, contendo toda a informação obtida dos bancos de dados e na inferência das bases avaliadas.

### III.8.1.1 SUGESTÕES PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS DE OPERAÇÃO

Com ajuda desta opção, o usuário consegue acessar o banco de dados de meios agressivos, como é o caso do hidrogênio. A informação contida no banco pode ser utilizada pelo usuário interessado para obter informação sobre o mecanismo de formação do defeito de operação correspondente.

A estrutura de hipertextos de meios agressivos foi dividido nos seguintes itens:

- *Causas do trincamento*: detalhamento do mecanismo de formação do defeito.
- *Morfologia do defeito*: descrição do defeito, locais de maior incidência e desenhos que podem ajudar a identificar o defeito ao longo da inspeção.
- *Técnicas de END apropriadas*: informação sobre as técnicas de END recomendadas na bibliografia para detecção e dimensionamento .
- *Técnicas de prevenção*: pinturas, revestimentos e sugestões para evitar ou diminuir a taxa de crescimento de defeitos.
- *Técnicas de reparo*: dependendo do meio agressivo atuante, recomenda-se técnicas especiais a serem utilizadas durante a retirada, tratamento térmico ou enchimento com solda.
- *Taxa de crescimento do defeito*: a taxa de crescimento analisa a variação da geometria em relação ao tempo. Monitorando defeitos em operação, pode-se ter idéia da influência do meio agressivo no equipamento, que pode ser temporária ou permanente. Este dado poderá no futuro ser utilizado no sistema para estimar o prazo para as próximas inspeções ou o tempo de vida útil do equipamento.

A filosofia adotada pelo sistema na avaliação de defeitos de operação permite:

(a) Compartilhar, entre os setores interessados, novos resultados de campo e experiências ainda em andamento nos grupos de pesquisa da Companhia, através dos recursos do sistema.

(b) Concentrando o conhecimento adquirido no banco de dados, os especialistas poderão idealizar procedimentos que no futuro conseguirão ser facilmente incluídas no sistema.

### **III.8.1.2 ANÁLISE DO HISTÓRICO DO EQUIPAMENTO**

Os resultados obtidos e processados pelo sistema INTEQ em inspeções passadas são armazenados em banco de dados para a sua posterior utilização. A partir desses dados, é possível montar uma lista de sugestões para a próxima inspeção baseada nos seguintes parâmetros:

- Dados técnicos do equipamento
- Grau de contaminação
- Percentual de ensaios realizados na inspeção passada
- Características do material
- Descontinuidades e defeitos detetados na inspeção passada

A base HISTORIC representada nas figuras (III.12a) e (III.12b) permite a geração de um relatório com sugestões prévias de inspeção, utilizando a informação disponível de resultados e conclusões gerados pelo sistema em inspeções anteriores. As sugestões fornecidas incluem informações tais como o percentual de END recomendado por norma, a relação de descontinuidades que não foram removidas e devem ser verificadas, os locais reparados, e tipos particulares de defeitos que devem ser procurados.

### **III.8.1.3 SUGESTÕES PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS DE FABRICAÇÃO**

A norma N-1738 da PETROBRÁS [34] define e classifica descontinuidades. Esta opção contém informação gráfica da morfologia dos defeitos, locais de ocorrência e técnicas de END recomendadas para a sua detecção.

## **III.8.2. ACOMPANHAMENTO DA ETAPA DE INSPEÇÃO**

Ao longo do processo de inspeção do equipamento, o usuário pode não completar satisfatoriamente as etapas de identificação, dimensionamento ou caracterização do defeito. A opção (2) do menu principal oferece subsídios baseados em normas e experiência dos especialistas consultados, que podem ajudar no processo sugerindo ENDS ou arbitrando valores conservativos que permitam dar continuidade à análise. O conhecimento descrito nas seções III.2, III.4, III.5 e III.6 estão representados nesta ilha de conhecimentos.

### **III.8.2.1 IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS**

Quando o usuário não consegue identificar o defeito, o sistema utiliza a informação disponível sobre a localização, profundidade e orientação do defeito em relação à solda e à espessura para tentar identificar o defeito. Caso o sistema não consiga identificar o defeito, adota uma solução conservadora: *trinca* (para defeitos planares) ou *cavidade* (para defeitos volumétricos).

### **III.8.2.2 DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS**

A etapa de dimensionamento é completada quando o usuário obtém informação sobre o comprimento, largura, altura e profundidade do defeito analisado (para defeitos planares considerar largura zero). Caso o usuário encontre problemas na determinação de um dos parâmetros, o sistema INTEQ oferece valores "default" definidos em [7] para comprimentos e alturas, ou sugere técnicas especiais de END, conforme o conhecimento descrito em seções anteriores.

### **III.8.2.3 CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS**

Descontinuidades muito próximas umas das outras devem ser consideradas como sendo uma só para efeitos de análise. Os diversos critérios para interação de defeitos são apresentados em forma de gráficos. Em versões posteriores do sistema INTEQ pretende-se incluir este conhecimento na inferência correspondente à etapa de avaliação de resultados de ensaios.

### **III.8.3 AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIOS**

A opção (3) do menu principal da figura III.11 carrega a base INSP, responsável pela avaliação de resultados de ensaios. A figura III.13 mostra o menu principal da base INSP, idealizado em função do tipo de ensaio não destrutivo a ser avaliado. A classificação e armazenamento em banco de dados é realizada conforme o conhecimento descrito na seção III.3.

### **III.8.4 ANÁLISE PELA MECÂNICA DA FRATURA**

A opção (4) do menu principal da figura (III.11) carrega a base MFRAT, responsável pela análise da mecânica da fratura. A avaliação de descontinuidades e defeitos detetados na inspeção exige procedimentos com cálculos matemáticos baseados

em [7]. O capítulo IV será reservado para descrever o conhecimento representado e a estrutura da base resultante. Os defeitos selecionados durante a avaliação da opção (3) do menu principal para posterior análise pela MF, serão armazenados em BD para a sua posterior utilização. Este recurso permite ao usuário interromper a consulta após a avaliação da opção (3), e voltar no dia seguinte para consultar a opção (4), eliminando a necessidade de repetir a sequência da opção avaliada no dia anterior.

### **III.8.5 SUGESTÕES PARA PROCEDIMENTOS DE REPARO**

A opção (5) permite carregar a base SOLDAGEM, responsável pela definição de procedimentos de soldagem e parâmetros de tratamentos térmicos. O capítulo V do presente trabalho descreve em detalhe o conhecimento adquirido e a estrutura da base em questão. O conhecimento representado está limitado a aços da família A516, pois existe na companhia um sistema especialista genérico de procedimentos de soldagem que deverá no futuro ser incluído na arquitetura "blackboard" do sistema INTEQ. Nesta fase, a base SOLDAGEM será modificada com o objetivo de criar a estrutura de dados e inferência que permita a comunicação com a nova base a ser inserida no sistema.

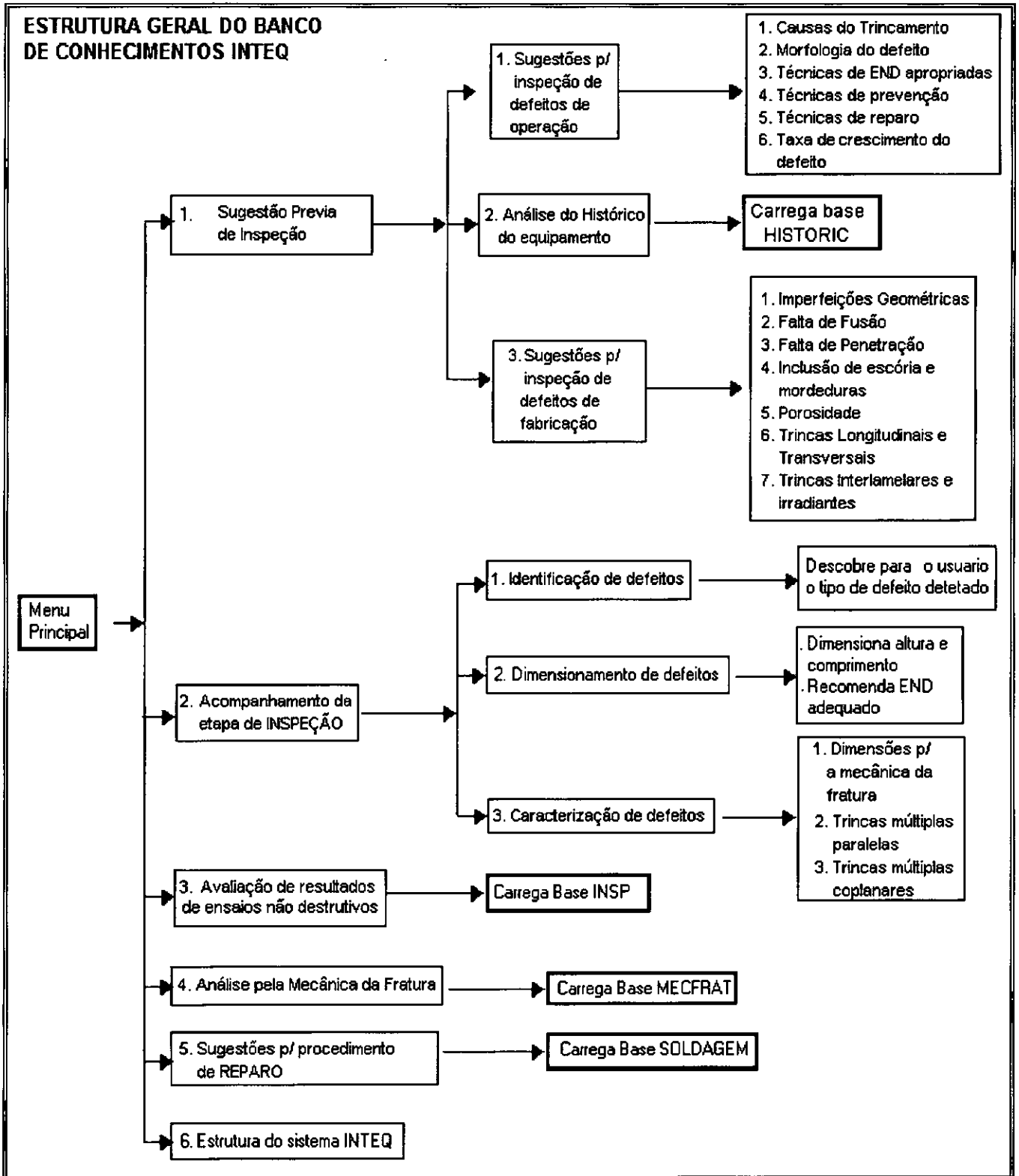


Figura III.11

## Recomendação Previa de Inspeção

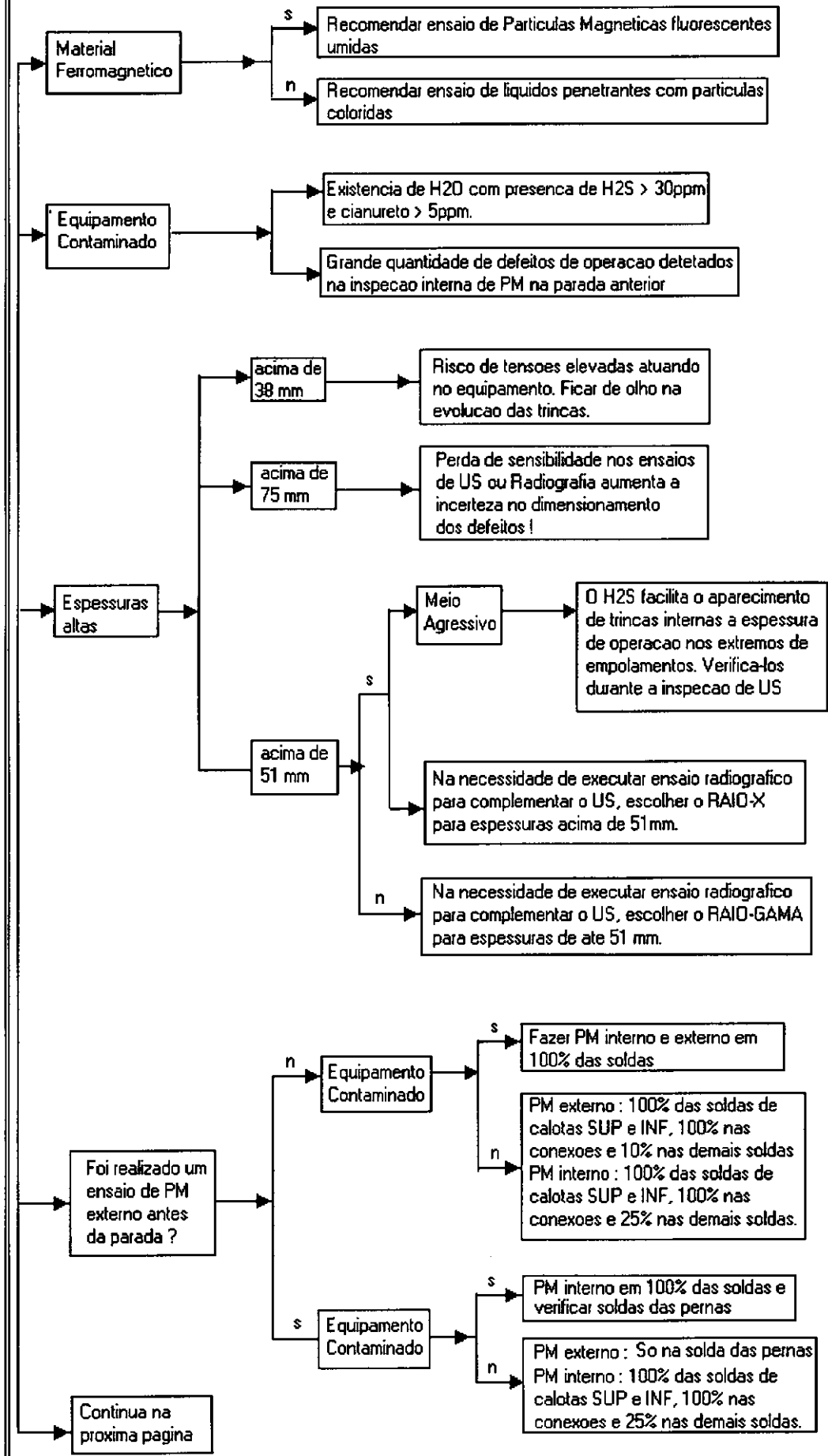


Figura III.12a

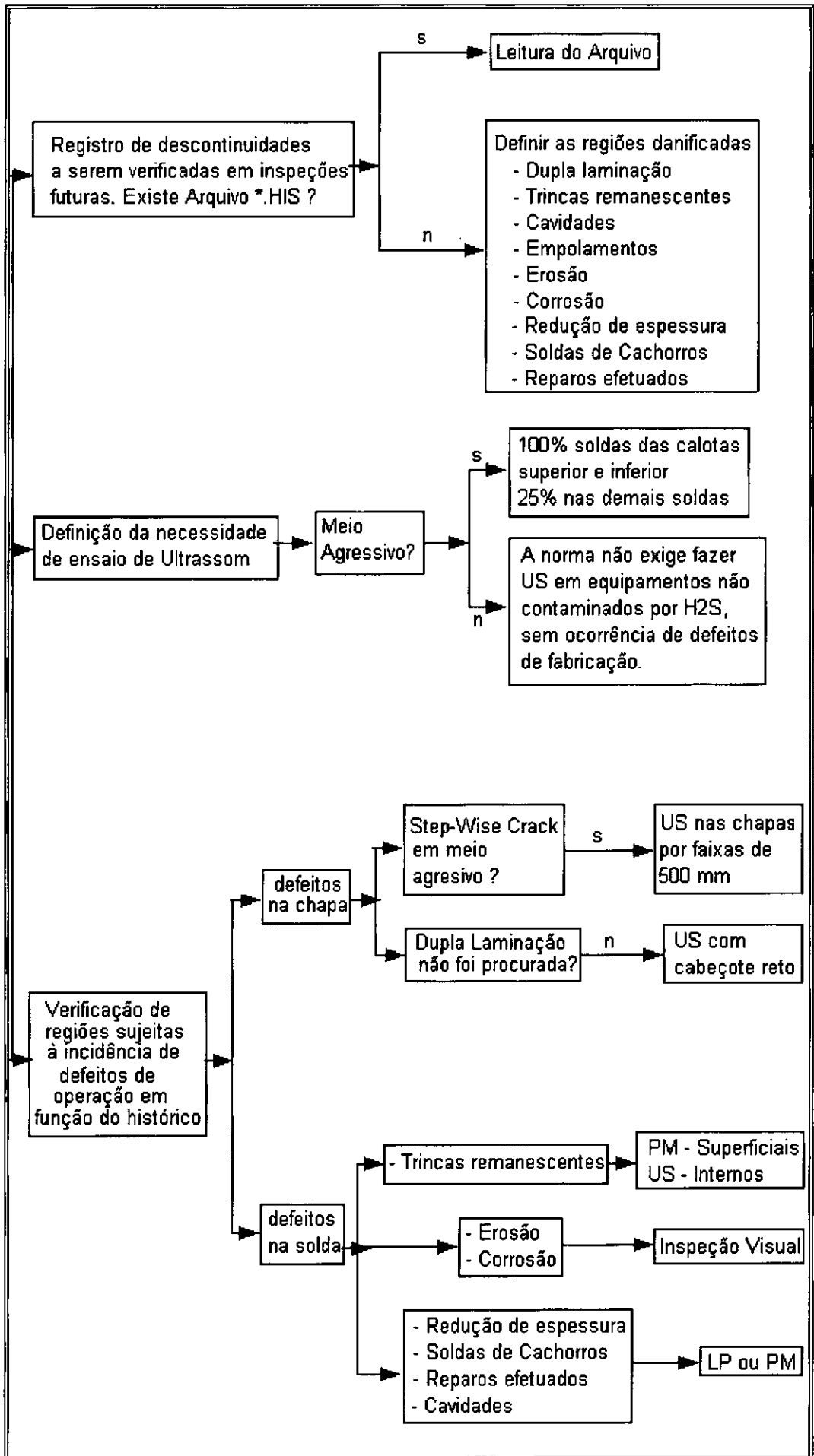


Figura III.12b

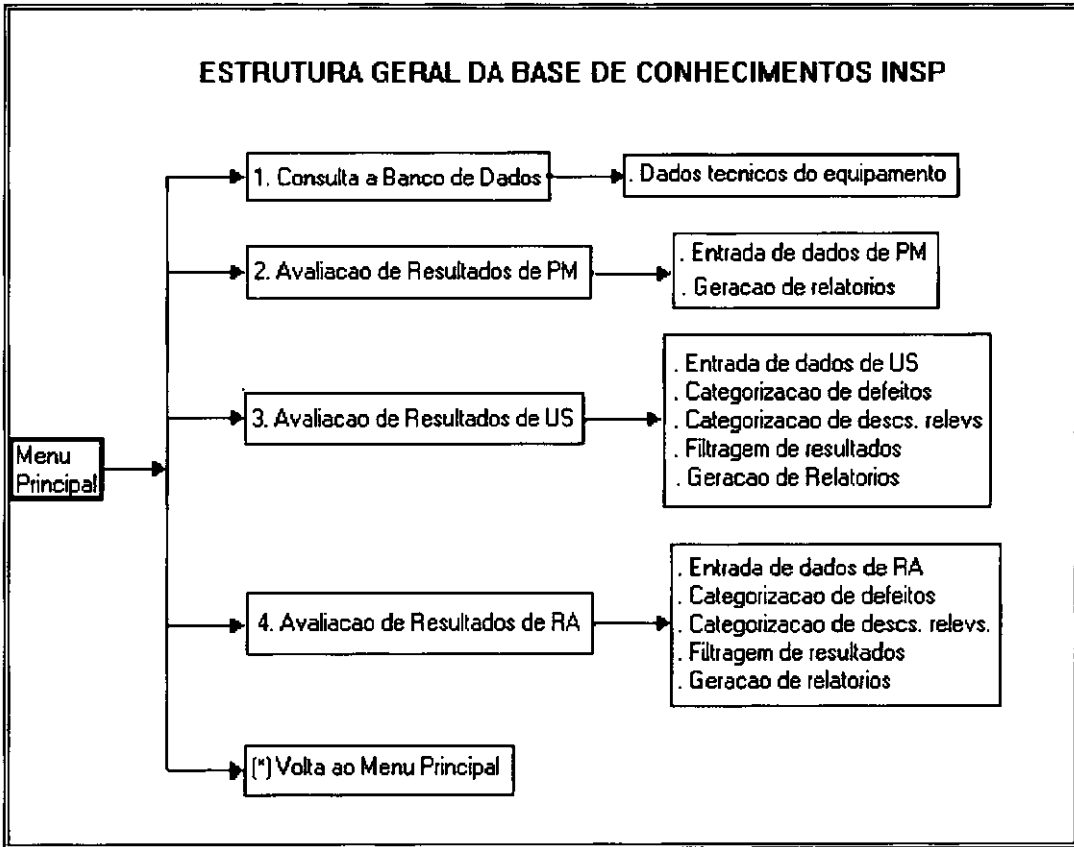


Figura III.13

## CAPITULO IV

### MECÂNICA DA FRATURA

#### IV.1. INTRODUÇÃO

Como foi visto no capítulo anterior, o objetivo da inspeção é a detecção de descontinuidades que de alguma forma representem risco ou diminuam a confiabilidade do equipamento em operação. As normas de inspeção e a experiência dos engenheiros responsáveis pela manutenção do equipamento classificam as descontinuidades em "aprovadas" ou "reprovadas". Os defeitos reprovados por norma são aqueles que devido à sua geometria ou localização podem propagar com o equipamento em operação e causar danos materiais ou até acidentes graves com perdas humanas.

Os defeitos reprovados podem ser tratados de acordo com as seguintes recomendações estabelecidas pelos engenheiros responsáveis:

- *Retirada imediata e indiscriminada de todos os defeitos:* Esta recomendação é válida para casos onde o tratamento térmico de alívio de tensões é indispensável. A dimensão da quantidade de defeitos a serem retirados do equipamento permite calcular o tempo de indisponibilidade e a volta à operação. Por outro lado, observa-se que o reparo desnecessário reduz a resistência do material e diminui o tempo de vida útil do equipamento. O alto custo e o tempo perdido no reparo incentiva a pesquisa de novas tecnologias que permitam conviver com defeitos que não apresentem risco de propagação. Embora os especialistas recomendem evitar o reparo indiscriminado este procedimento ainda é o mais utilizado.
- *Recomendação de ensaio complementar:* A incerteza dos resultados de um ensaio não destrutivo ou a falta de qualificação dos técnicos envolvidos justificam a realização de ensaios complementares. O objetivo deste procedimento é reduzir a amostragem de defeitos reprovados aumentando a precisão do ensaio. A dimensão que mais preocupa ao engenheiro de campo é o comprimento das trincas. Os critérios de avaliação de resultados de END também se baseiam no comprimento para reprovar ou aprovar descontinuidades. A recomendação de ensaio complementar para dimensionar a altura e a orientação do defeito pode demonstrar que nem sempre a trinca mais comprida é a mais perigosa. Este procedimento aumenta a confiabilidade da inspeção, mas atrasa ainda mais o tempo previsto para volta à operação.
- *Avaliação do risco de propagação de defeitos:* Procedimentos baseados na mecânica da fratura, determinação da tenacidade e resistência do material com

retirada de amostra, e análise de concentração de tensões na região do defeito são utilizados para determinar o risco de propagação dos defeitos. A utilização desta tecnologia requer a participação de especialistas e laboratórios especializados, que normalmente não se encontram disponíveis nos locais de inspeção. O tempo exigido para a análise ou consulta á especialistas deve ser avaliado pelo engenheiro responsável para ver se compensa ou não conviver com os defeitos detetados. No caso de vasos de pressão foi constatado pelos especialistas consultados que na maioria das vezes os defeitos que preocupam os engenheiros de campo, não oferecem risco algum e podem permanecer no equipamento. Analizando os defeitos detetados pode até se evitar reparos desnecessarios e voltar a operação monitorando os defeitos remanescentes. Este procedimento permite determinar a taxa de crescimento de defeitos no equipamento e consequentemente avaliar a vida útil e o prazo para inspeção futura.

O sistema INTEQ tem como objetivo permitir que o usuário possa dar continuidade ao processo de inspeção consultando um único programa de computador que contenha o conhecimento necessário para completar as diversas etapas da análise. A avaliação do risco de propagação de defeitos é processada na base MFRAT. Consultando este módulo, o sistema fornece subsídios e executa a análise de acordo com as diretivas dos especialistas, evitando que o usuário "não especialista" participe na etapa de tomada de decisões no processo de solução. A base MFRAT é responsável pela otimização de dados de entrada para processar os algoritmos de MF e a posterior interpretação dos resultados confeccionando relatórios e laudos que podem ser utilizados como justificativa para conviver com defeitos que não representem riscos para a estrutura. Este capítulo descreve a metodologia utilizada no sistema INTEQ para análise de defeitos pela mecânica da fratura.

## **IV.2 MODOS DE CONSULTA DO SISTEMA**

A avaliação de descontinuidades e defeitos detetados na inspeção exige procedimentos com cálculos matemáticos. O sistema INTEQ é fortemente baseado em [7] e na experiência de especialistas em análise de tensões. O conhecimento codificado permite executar a análise da mecânica da fratura (MF) de acordo com o grau de conhecimento do usuário.

Um algoritmo que permita alterar os parâmetros de análise é fundamental para o usuário *especialista* interessado em determinar fatores de segurança, geometrias limites, taxas de crescimento, influência de variações bruscas de condições de operação ou tensões atuantes.

Por outro lado um usuário *não especialista* não consegue interagir com este tipo de programas devido á grande dificuldade de manipulação e interpretação das variáveis numéricas envolvidas. Este tipo de usuários possui uma lista de defeitos resultantes do processamento dos END, e precisa do laudo da MF para avaliar a criticidade dos defeitos em questão.

Com o objetivo de atender simultaneamente ambos tipos de usuários, o sistema INTEQ executa a análise de MF em dois módulos diferentes, que podem se comunicar entre sí:

- *Base de conhecimentos MFRAT*: Este módulo tem como objetivo básico a interação do sistema com usuários sem fundamentos teóricos aprimorados na área de análise de tensões ou MF. Consultando a base, o usuário não especializado em MF consegue completar as etapas da análise, evitando a perda de tempo com consultas rotineiras aos especialistas e concentrando-se em obter o laudo que le permita completar as etapas de inspeção e reparo, requisitos essenciais para a volta do equipamento à operação. O sistema MFRAT analisa em grupo o conjunto de defeitos detetados nos END, executa todos os procedimentos necessários e prepara o laudo, classificando os defeitos analisados em "ignoráveis", "a acompanhar" e "a reparar", e fornecendo explicações detalhadas do porquê e como chegou-se a determinadas conclusões. O acesso à telas gráficas interativas e facilidades de manipulação dos parâmetros de análise é restrito ao usuário neste módulo. A base de conhecimentos MFRAT contém, além dos algoritmos de análise, as diversas alternativas de solução fornecidas pelos especialistas consultados. A determinação dos parâmetros de análise é obtida através de interfaces com bancos de dados, por inferência de regras ou através de valores arbitrados pelos especialistas para substituir as respostas do tipo NOTKNOWN fornecidas pelo usuário ao longo da consulta. Os conceitos disponíveis da MF foram ordenados de tal modo a resolver a maioria dos problemas que surgem durante a etapa de inspeção. A base MFRAT gera também um arquivo formatado para consulta ao algoritmo FRAT.
- *Algoritmo FRAT*: Muitas vezes a consulta da base de conhecimentos pode resultar demorada, limitada e tediosa para os usuários especialistas em análise de tensões e MF. O módulo FRAT visa atender à este tipo de usuários. O sistema foi desenvolvido em FORTRAN 77 e conta com uma interface gráfica interativa que permite ao usuário modificar parâmetros de análise tais como: CTOD, geometria do defeito, tensões aplicadas ou características do material, otimizar parâmetros operativos, plotar curvas de geometrias limites, definir parâmetros de esmerilhamento ou executar uma análise de risco de propagação em função da variação de geometria,

tenacidades ou tensões atuantes. O módulo FRAT engloba todos os algoritmos e gráficos necessários para completar a análise pela MF, mas não fornece diagnósticos nem classifica defeitos. Recomenda-se a sua utilização para análise de casos isolados ou consultas rápidas, pois só tem capacidade de analisar um defeito por vez. O programa tem a estrutura convencional de um programa sequencial: lê arquivo de dados, processa os dados, mostra resultados. O usuário pode consultar o FRAT fora do sistema INTEQ, ou chama-lo da base MFRAT (neste caso a base monta o arquivo de entrada necessário para processar o algoritmo). A velocidade de processamento do módulo FRAT é muito superior ao obtido consultando a base MFRAT.

### IV.3 CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS

Como já foi visto no capítulo anterior, a escolha correta do END permite a identificação e dimensionamento de defeitos aumentando a precisão da análise. Os resultados obtidos nos END devem ser manipulados para permitir a análise da mecânica da fratura (MF). A geometria, orientação e classificação de defeitos devem ser definidos de acordo com [7]. A forma e a profundidade do defeito determinam o procedimento a ser utilizado para a avaliação da criticidade. O correto dimensionamento de defeitos *planares e volumétricos* é indispensável para a análise.

#### IV.3.1 DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS PLANARES

A MF trata qualquer defeito planar como sendo uma trinca. Dependendo da altura e da profundidade ( $d$ ) da trinca em relação à superfície mais próxima, as mesmas podem ser classificadas em *superficiais* (figura IV.1) , *internas* (figuras IV.2) ou *passantes* (figuras IV.3). As avaliações são realizadas em função da espessura ( $t$ ) da chapa que contém o defeito a ser avaliado.



Figura IV.1 - Trincas Superficiais

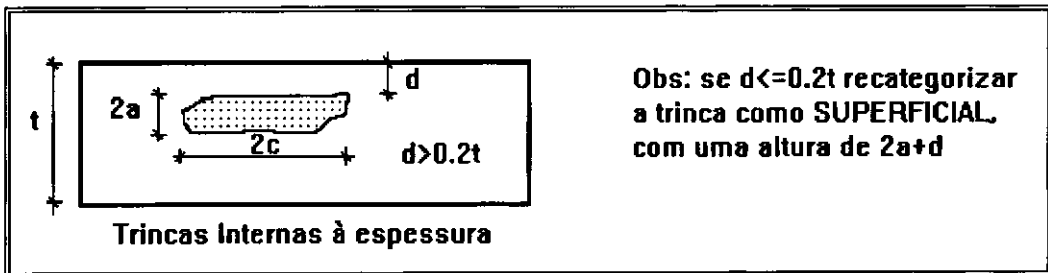


Figura IV.2 - Trincas Internas

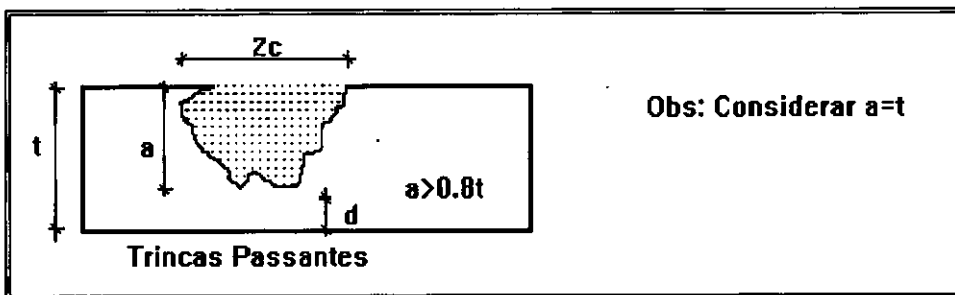


Figura IV.3 - Trincas passantes

O modelo de análise considera a largura ( $2b$ ) de defeitos planares igual a 0. O comprimento e a altura equivalente devem ser definidos em função da direção das tensões principais atuantes na seção. O comprimento ( $2c_0$ ) obtido dos END deve ser projetado na direção das tensões principais atuantes. A figura (IV.4) mostra a tela gerada pelo sistema que mostra como dimensionar comprimentos para a MF. O refinamento da análise utilizando os comprimentos  $2c_1$  e  $2c_2$  só será necessário para defeitos muito próximos ao limite de aceitação.

As duplas de comprimentos-tensão atuante ( $2c_1, \sigma_1$ ) e ( $2c_2, \sigma_2$ ) devem ser analisadas por separado para determinar a condição menos conservadora. A orientação do comprimento em relação à direção das tensões principais é definido pelo ângulo  $\beta$ .

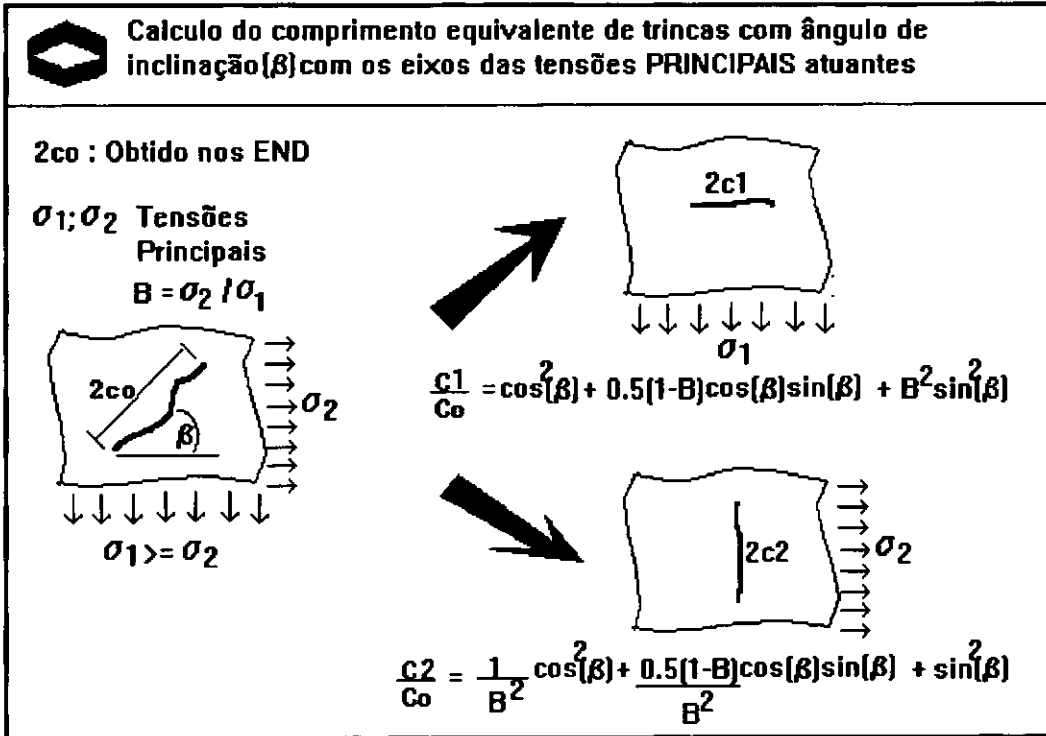


Figura IV.4 - Cálculo do comprimento equivalente para a MF

Com o objetivo de simplificar a análise, costuma-se utilizar o comprimento obtido dos END e a maior tensão atuante. Caso o resultado obtido estiver muito próximo ao limite de aceitação, a análise poderá ser refinada conforme a figura (IV.4).

No caso do dimensionamento das alturas observa-se que trincas internas tem uma altura= $2a$  no entanto trincas superficiais ou passantes tem a altura= $a$ . O procedimento adequado para o cálculo da altura equivalente para a MF é descrito a seguir:

- *Altura obtida no END (ao):* deve-se multiplicar a projeção da altura no plano principal por 1.2 para considerar o efeito da biaxialidade[7], como podemos observar na figura (IV.5).

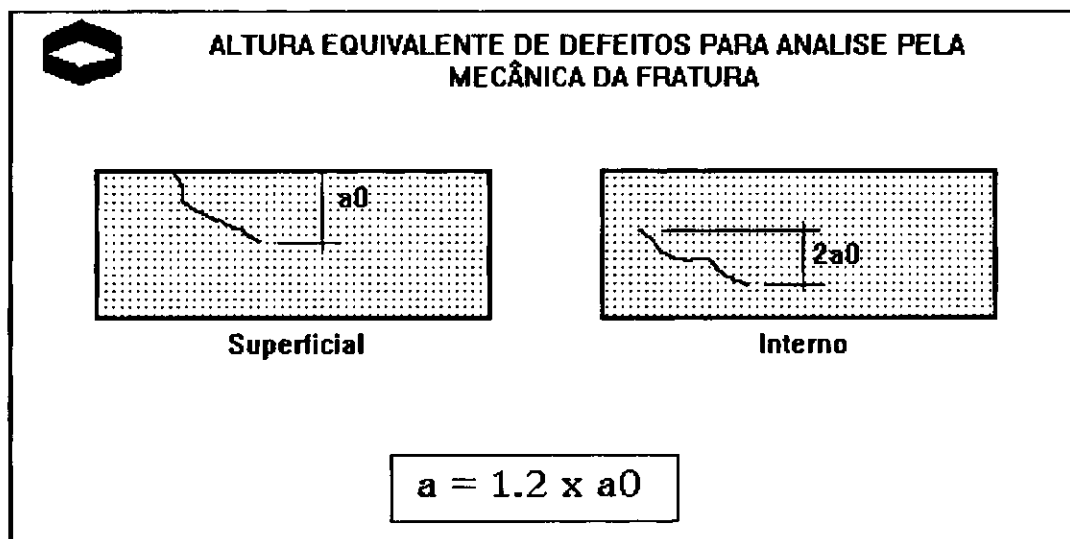


Figura IV.5 - Altura obtida de resultados de END

*Altura desconhecida:* Se o valor da altura é desconhecido pelo usuário, a primeira alternativa seria adotar  $a=t$ , onde para o caso de vasos de pressão, tanques e tubulações, significaria testar o critério de "Leak-Before-Break" (LBB). Caso a trinca com  $a=t$  seja estável, garante-se que o equipamento não estará exposto aos mecanismos de fratura frágil ou colapso plástico. Embora trincas com  $a=t$  devam ser reparadas imediatamente, trincas menores analisadas e aprovadas com esta alternativa de solução poderiam permanecer na estrutura. Valores estimados equivalentes a  $0.5t$  ou  $0.25t$  poderão também ser utilizados como o primeiro passo para refinar a análise. A solução correta seria utilizar o END adequado para o dimensionamento da altura.

### IV.3.2 DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS VOLUMÉTRICOS

Para efeito de análise da MF, um defeito volumétrico único superficial irregular (corrosão, erosão) deverá ser circunscrito num retângulo de largura  $2b$  e comprimento  $2c$  e terá a sua altura  $a$  medida como sendo 80% da altura medida na parte mais profunda da região corroída definida pelo retângulo inscrito de dimensões  $bxc$ , conforme a figura (IV.6):

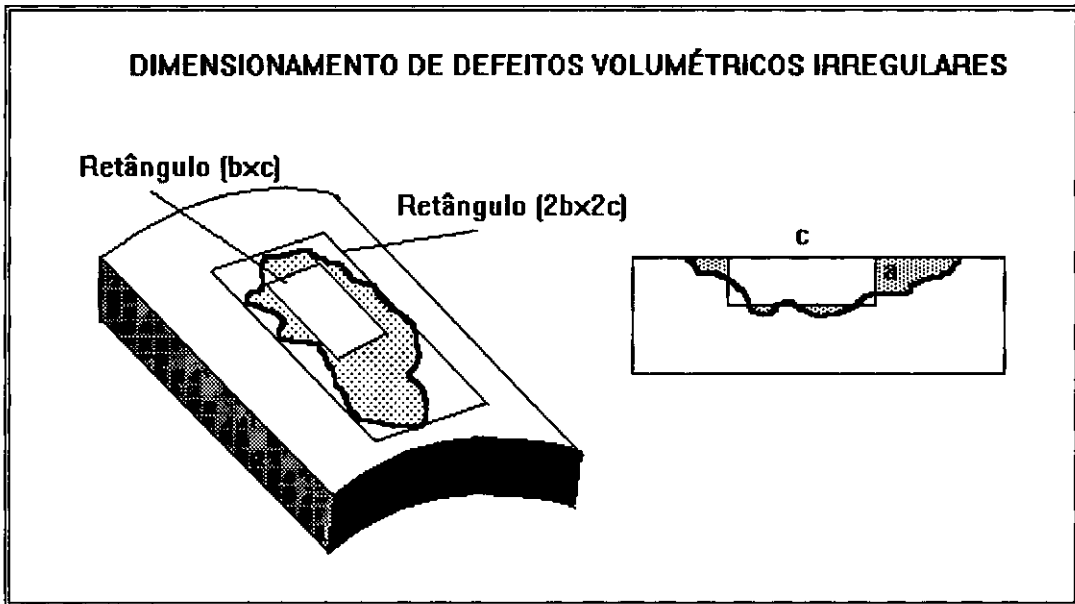


Figura IV.6 - Dimensionamento de defeitos volumétricos superficiais

Para efeito de análise, os defeitos volumétricos superficiais são agrupados da seguinte forma: as *cavidades* devem ter larguras  $2b$  inferiores à espessura  $t$  da chapa e ao mesmo tempo inferiores a 10% do comprimento  $2c$ , caso contrário são identificadas como *redução de espessura*.

Os defeitos volumétricos *internos* podem ser identificados e analisados como *inclusões ou empolamentos*. A ação do hidrogênio nos empolamentos pode favorecer o aparecimento de trincas nas suas extremidades. Dependendo da direção da evolução da trinca, o conjunto deverá ser dimensionado e analisado como trinca ou cavidade. A figura (IV.7) mostra os casos práticos de empolamentos que evoluem como trincas:

Os casos (a) e (b) mostram empolamentos sem trincas que devem ser analisados como cavidades de comprimento  $2c$  e altura  $a$ .

Os casos (c) e (b) mostram trincas crescendo nas extremidades do empolamento. A análise corresponde a um defeito volumétrico com comprimento  $2c$  e altura  $a$ .

O caso (e) corresponde a uma situação particular, onde trincas evoluem em lados opostos. Neste caso o defeito deve ser analisado como trinca superficial de comprimento  $2c$  e altura  $a$

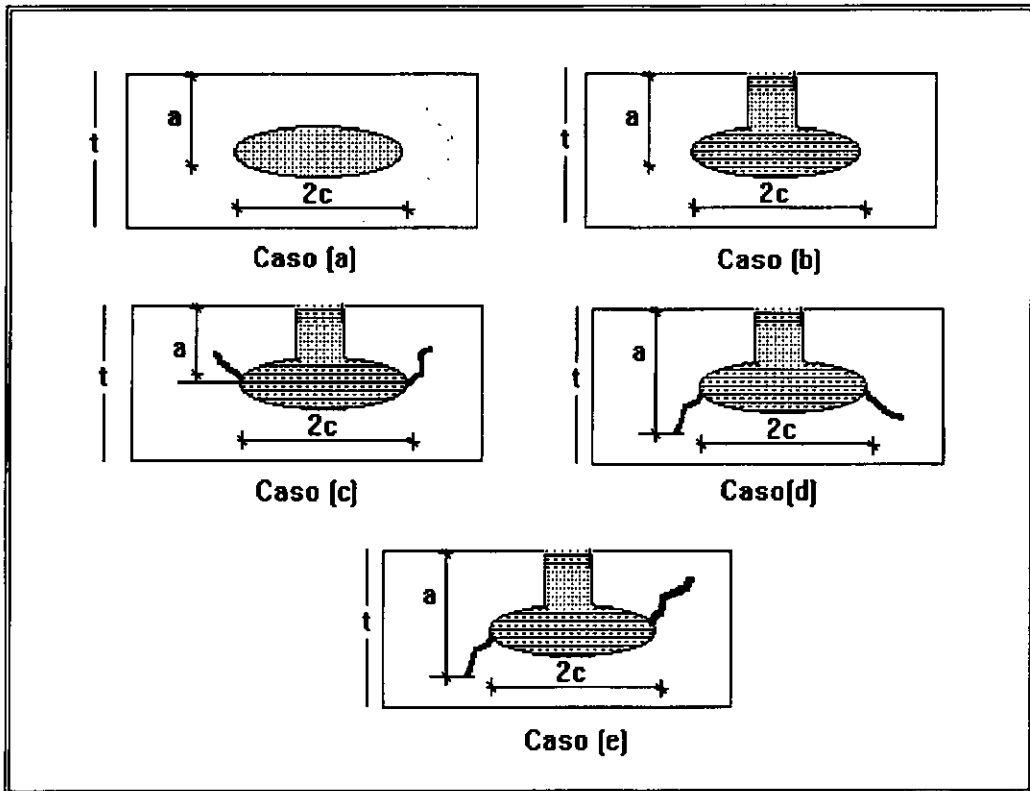


Figura IV.7 - Dimensionamento de defeitos volumétricos internos

Uma vez dimensionado o defeito pode-se pensar em executar os algoritmos correspondentes para determinação da sua criticidade.

#### IV.4 AVALIAÇÃO DA CRITICIDADE DE DEFEITOS

Para efetuar a análise da criticidade de defeitos pela mecânica da fratura é necessário conhecer:

(a) *A geometria do defeito*

(b) *A resistência mecânica e a tenacidade do material da chapa*

(c) *As tensões atuantes na região afetada*

Para avaliar a criticidade de defeitos compara-se o fator de intensidade de tensões com a tenacidade do material para avaliar o risco de fratura frágil e as tensões resultantes do carregamento aplicado com um modelo elastoplástico para determinar o risco de colapso

plástico. Os procedimentos definidos para análise de defeitos planares diferem dos utilizados para os defeitos volumétricos. Ambas metodologias são descritas nas seções seguintes.

#### IV.4.1 DEFEITOS PLANARES

A análise de trincas está baseada numa aproximação elastoplástica[7] onde são considerados os dois modos prováveis de falha: *fratura frágil* e *colapso plástico*.

Representando no eixo vertical o critério de *fratura frágil* e no eixo horizontal o critério de *colapso plástico* gera-se uma curva que combina ambos mecanismos de falha. Esta curva de condição limite é conhecida como curva ou *diagrama FAD (Failure Assessment Diagram)*. A avaliação da criticidade de uma trinca consiste em calcular os pontos  $S_r$  e  $K_r$  que representam no gráfico a posição da trinca analisada em função da curva FAD. A distância do ponto  $(S_r, K_r)$  da curva FAD determina a criticidade do defeito analisado. Se a trinca está posicionada abaixo da curva, a mesma é aprovada pela MF, e pode ficar no equipamento. A figura (IV.8) mostra os parâmetros necessários para cálculo dos pontos  $S_r$  e  $K_r$ , e a curva FAD, definida com uma expressão matemática obtida de [7].

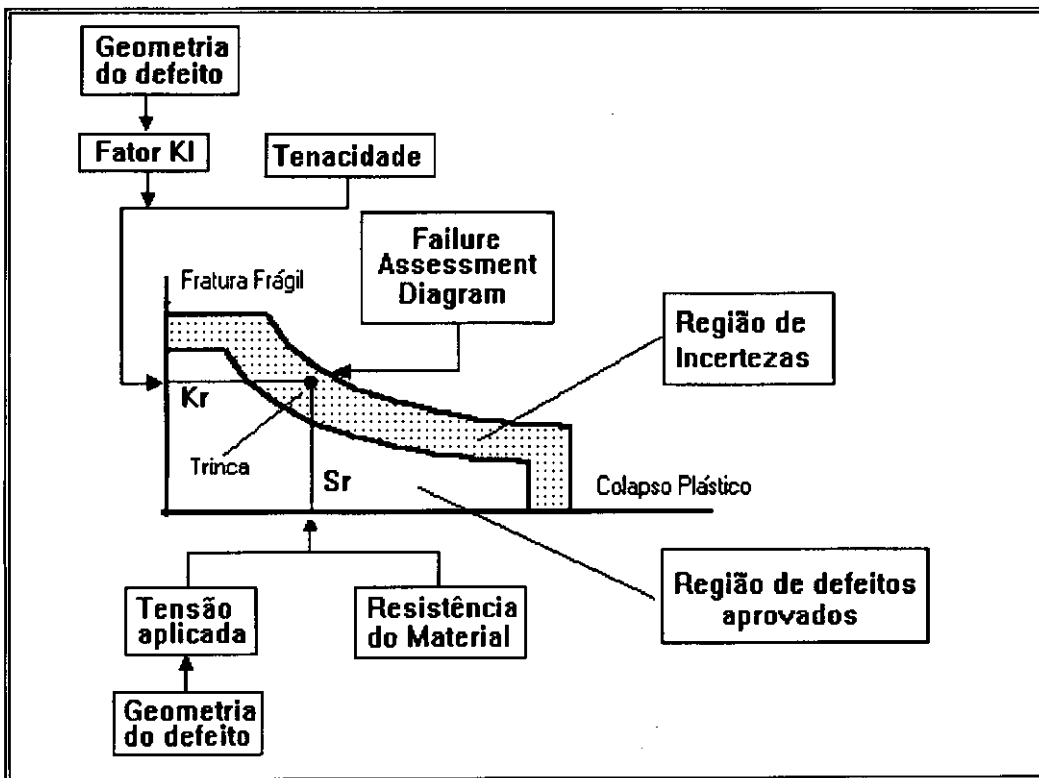


Figura IV.8 : Avaliação da criticidade de defeitos planares

O ponto Sr é calculado com os seguintes parâmetros:

- . *Tensão aplicada* : Tensão primária de membrana (Pm), Tensão Primária de Flexão (Pb), Tensão secundária de membrana (Sm) e Tensão secundária de flexão (Sb). As tensões podem ser calculadas com fórmulas aproximadas ou através de modelos de análise estrutural, como é o caso do método de elementos finitos.
- . *Geometria do defeito*: Comprimento, altura e profundidade são relacionadas com a espessura da chapa .
- . *Resistência do material* : A tensão de escoamento e a tensão de ruptura definem o limite elastoplástico a ser utilizado. O ponto Sr não pode ser superior a 1.2 vezes a tensão de escoamento.

O ponto Kr é calculado com os seguintes parâmetros:

- . *Geometria do defeito*
- . *Fator KI de intensidade de tensões* : a sua avaliação depende do tipo de trinca e da sua geometria.
- . *Tenacidade*: representa a resistência que o material oferece à propagação das trincas. É determinado através de testes de laboratório.

Quando o ponto (Sr,Kr) representativo da trinca cair fora dos limites estabelecidos pela curva FAD, pode-se partir para o refinamento dos dados utilizados ou então retirar o defeito do equipamento. O refinamento de dados consiste em aumentar a precisão no dimensionamento de defeitos utilizando END adequados, calcular as tensões com o método de elementos finitos ou determinar a resistência do material e a tenacidade com ensaios de laboratório. Os defeitos localizados abaixo da curva FAD podem ficar na estrutura nas seguintes condições:

- . *Não existe indícios de contaminação do equipamento*
- . *As condições de operação não sofrem variações muito acentuadas*
- . *Os defeitos serão monitorados ao longo do tempo com inspeções periódicas*

O sistema INTEQ define uma região de incerteza de largura equivalente a 30% da curva FAD. Esta região tem como objetivo considerar a margem de erro de dimensionamento dos ensaios não destrutivos e qualquer outra fonte de incerteza presente ao longo da inspeção. De acordo com a posição dos defeitos em relação á curva FAD, pode-se classifica-los da seguinte maneira:

- *Defeitos a reparar (DAR)*: São defeitos que estão localizados acima da curva FAD. Devem ser retirados da estrutura com a ação de reparo correspondente. O esmerilhamento da trinca gera uma cavidade que deve ser dimensionada e analisada e classificada de acordo com o seu grau de criticidade.
- *Defeitos a acompanhar (DAA)*: Os defeitos localizados na faixa de incerteza podem ficar no equipamento após o refinamento da análise. O refinamento da análise recalcula o ponto correspondente e tem como objetivo principal tirar o ponto da área próxima ao limite FAD. As trincas DAA devem ser registradas no histórico e a sua geometria deve ser monitorada com inspeções periódicas.
- *Defeitos a ignorar (DAI)*: Os pontos abaixo da região de incertezas representam trincas que podem ser mantidas na estrutura pois considerando o alto grau de conservadorismo da análise, as mesmas não representam risco algum para o equipamento. Trincas do tipo DAI devem ser registradas no histórico mas não precisam ser monitoradas periodicamente.

A figura (IV.9), mostra o algoritmo do sistema para avaliar a criticidade de trincas de geometria conhecida atuando em meios não agressivos e compara-los com a curva FAD:

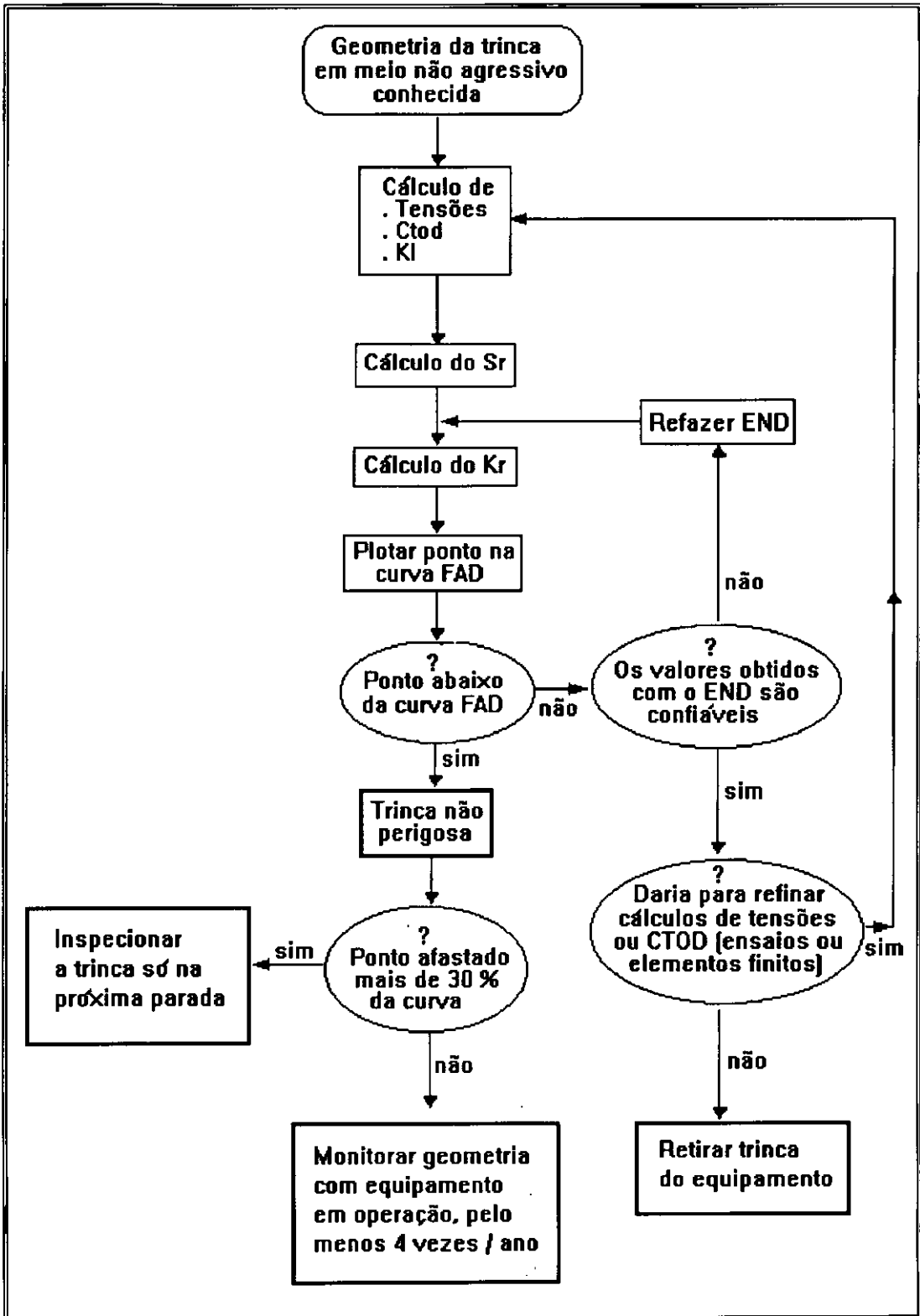
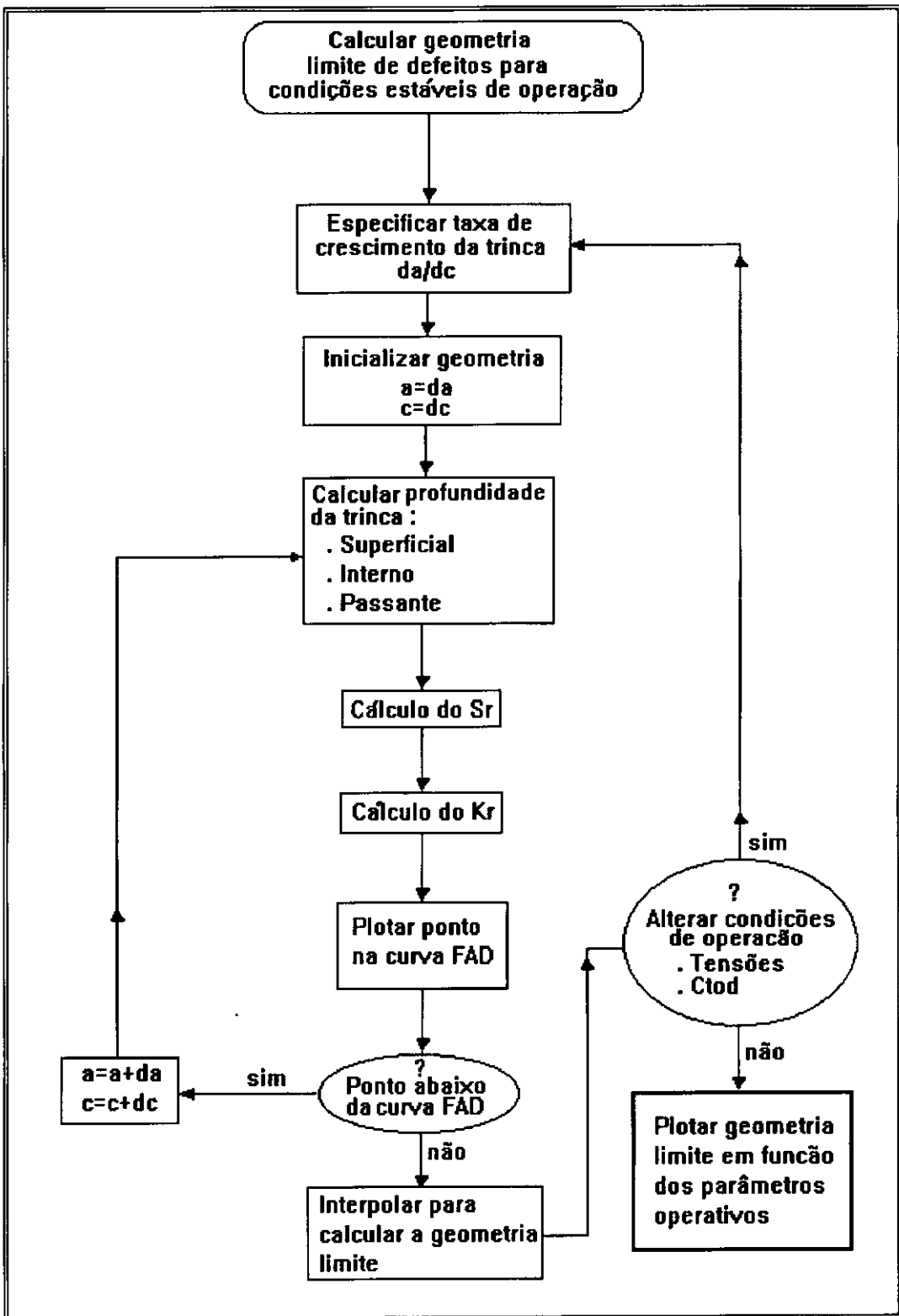


Figura IV.9 - Algoritmo de avaliação de criticidade de defeitos conhecidos



Figuras IV.10 - Algoritmo para cálculo de geometrias limite

Existem casos nos quais o usuário desconhece a geometria do defeito. Incrementando interativamente o comprimento e a altura, de acordo com uma taxa de crescimento predeterminada obtém-se a curva de geometria limite de defeitos. Esta análise é válida

para determinar valores mínimos de defeitos que devem ser procurados em inspeções futuras ou então para acompanhar a evolução do crescimento do defeito ao longo do tempo. A figura (IV.10) mostra o fluxograma do sistema para cálculo da geometria limite de defeitos para uma região determinada.

A curva de geometria limite varia em função da tensão aplicada e da tenacidade à fratura do material.

#### IV.4.2. AVALIAÇÃO DA CRITICIDADE DE DEFEITOS VOLUMÉTRICOS

A análise de defeitos volumétricos é realizada considerando somente a possibilidade de colapso plástico, pois devido ao baixo fator de concentração de tensões não existe possibilidade de fratura frágil. Fazendo uma analogia com a curva FAD, pode-se afirmar que a análise é realizada exclusivamente no eixo (X) da curva. Utilizando o mesmo critério elastoplástico das trincas e manipulando as expressões de análise colocando o valor limite de  $S_r$  como dado e a espessura ( $t$ ) como incógnita, o sistema determina a *espessura mínima da chapa* contendo a cavidade, condição requerida para que as tensões atuantes na cavidade atinjam o regime plástico. Os defeitos volumétricos podem ser analisados como *cavidades*, *perdas de espessura* ou *inclusões* (defeito volumétrico interno).

(a) *Cavidades*: Modelando a cavidade como um defeito semi-elíptico superficial, e assumindo um carregamento puro de membrana, pode-se utilizar a tensão de escoamento do material como carregamento limite e calcular a altura máxima  $a_g$  da cavidade com a seguinte expressão;

$$a_g = t \left(1 + \frac{t}{c}\right) \left(1 - \frac{P_m}{\sigma_{flow}}\right) \left[0.5 + 0.5 \exp\left(-\frac{c}{6t}\right)\right] \quad (4.1)$$

onde  $a_g$  é limitado à  $0.75t$ ,

- $P_m$  : Tensão de membrana aplicada
- $\sigma_{flow}$  : Média das tensões de escoamento e ruptura
- $t$  : Espessura da chapa
- $c$  : metade do comprimento da cavidade

Se a altura  $a$  da cavidade for menor que a altura máxima admissível  $a_g$  então a cavidade pode permanecer na estrutura, caso contrário deve-se optar por um enchimento com solda ou troca de gomos.

A expressão 4.1 é baseada na análise local da espessura remanescente no local da cavidade assumindo uma distribuição uniforme de tensões ao longo da espessura. Para o caso de defeitos pequenos, a expressão (4.1) pode ser conservadora demais. Um procedimento de análise global de tensões pode fornecer resultados mais realísticos sobre a distribuição de tensões na cavidade e conseqüentemente avaliar a periculosidade do defeito com maior precisão. Esta análise é realizada através de uma análise elastoplástica de elementos finitos caso o usuário deseje refinar a análise e aumentar a certeza do diagnóstico.

*(b) Redução de espessura:* O procedimento adotado para análise de criticidade de regiões com redução de espessura é baseado numa expressão obtida através de uma análise elastoplástica de vasos de pressão com o método de elementos finitos [35]. O resultado da análise é expresso em termos do efeito da diminuição da espessura na resistência mínima admissível do vaso. O roteiro de análise é o seguinte:

- Determinar a tensão de membrana principal  $P_m$  atuando na região da espessura reduzida (adotar sempre o valor máximo da tensão).
- Calcular  $a_g$  com a equação de altura máxima de cavidades .
- Calcular a espessura mínima admissível ( $h = t - acir$ ), para um vaso de pressão de diâmetro  $D$  e uma redução de espessura de comprimento ( $2c$ ). Caso a área afetada não seja num vaso de pressão, adotar  $D=100$ . A espessura ( $h$ ) é calculada com o algoritmo da figura (IV.11):

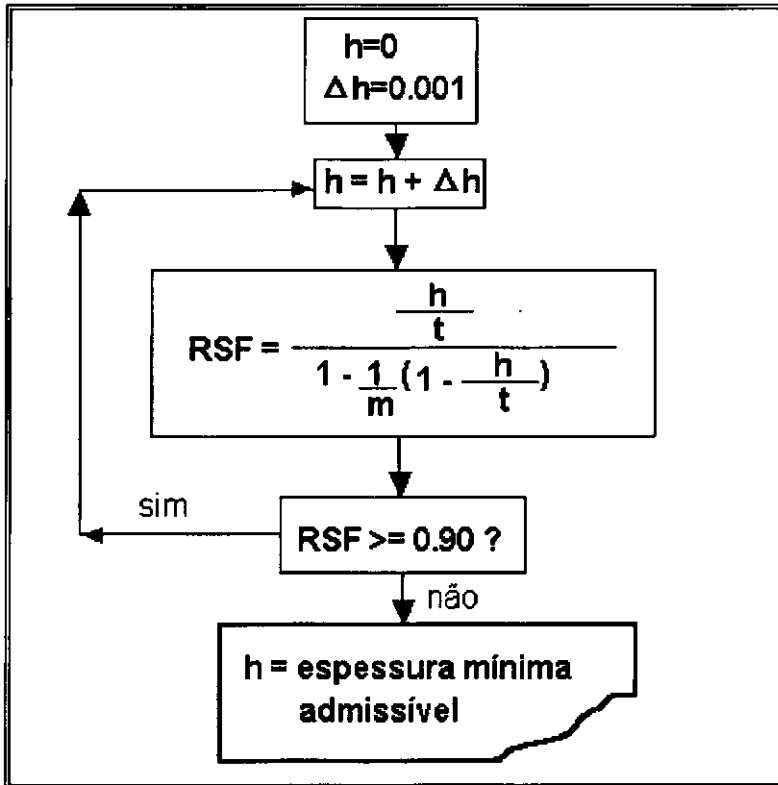


Figura IV.11 : Algoritmo para calculo de espessura mínima admissível de regiões com redução de espessura

onde temos que:

$$A = 55 (h/t) - 168 (h/t) + 189 (h/t) - 100 (h/t) + 25 \quad (4.2)$$

$$m = 1 + 2.3 (h/t) [ A.(2c/D) ] \quad (4.3)$$

Observa-se que para efeitos de avaliação rápida de defeitos conhecidos, pode-se fazer ( $h = t - a$ ) e calcular o **RSF** correspondente; se  $RSF < 0.90$  o defeito está abaixo da espessura mínima admissível.

- O valor de ( $a_{cir}$ ) é obtido em função do ( $h$ ) calculado e da espessura da chapa ( $t$ ). Nos casos em que ( $2b$ ) < ( $2c$ ) pode-se utilizar a seguinte expressão de interpolação para cálculo da altura máxima:

$$a_{max} = a_g \left[ 1 - \frac{b}{c} \left( 1 - \frac{a_{cir}}{a_g} \right) \right] \quad (4.4)$$

onde  $a_g$  é calculado em (4.1)

- A máxima altura admissível será  $a_{max}$  que não pode ser superior a  $0.75t$ .

(c) *Defeitos volumétricos internos*: Os defeitos volumétricos internos são analisados com as equações de colapso plástico utilizadas para análise de trincas internas. A tensão primaria de membrana limite  $P_m$  de um defeito volumétrico interno de comprimento ( $2c$ ), altura ( $2a$ ) a uma distância da superfície mais próxima ( $d$ ) e calculada com a seguinte expressão:

$$P_m(L) = \frac{\sigma_{flow} [(1 - \alpha^2) + \frac{4d\alpha}{t}] [0.5 + 0.5 \exp(-\frac{ca}{3t^2})]}{\alpha + \sqrt{(\alpha^2 + (1 - \alpha)^2 + \frac{4d\alpha}{t})}} \quad (4.5)$$

onde assumindo carregamento puro de membrana, tem-se:

$$\alpha = \frac{2a}{t} \left(1 + \frac{t}{c}\right)^{-1} \quad (4.6)$$

A inclusão pode permanecer na estrutura se  $(P_m + P_b) < P_m(L)$ .

Uma solução alternativa pode ser encontrada analisando o defeito volumétrico interno como defeito superficial, conforme o caso (a) da figura (IV.7).

A figura (IV.12) mostra a resposta do sistema na análise de criticidade de defeitos volumétricos. Plotando a espessura mínima admissível, a sobre-espessura de corrosão e a altura da cavidade ou redução em função da espessura da chapa classifica-se os defeitos volumétricos da seguinte maneira:

- *Defeitos a ignorar (DAI)*: Cavidades ou redução de espessuras que não ultrapassam a espessura de corrosão não precisam ser registradas para acompanhamento.
- *Defeitos a acompanhar (DAA)*: Defeitos volumétricos com profundidades superiores à espessura de corrosão que não atingem o valor calculado de espessura mínima admissível podem ficar no equipamento, mas devem ser monitoradas com inspeções

periódicas, pois o fundo da cavidade é um local que favorece ao aparecimento de novas trincas em operação.

- *Defeitos a reparar (DAR)*: Cavidades que ultrapassam a espessura mínima admissível devem ser reparadas com enchimento com solda ou eventualmente com uma troca de gomos.

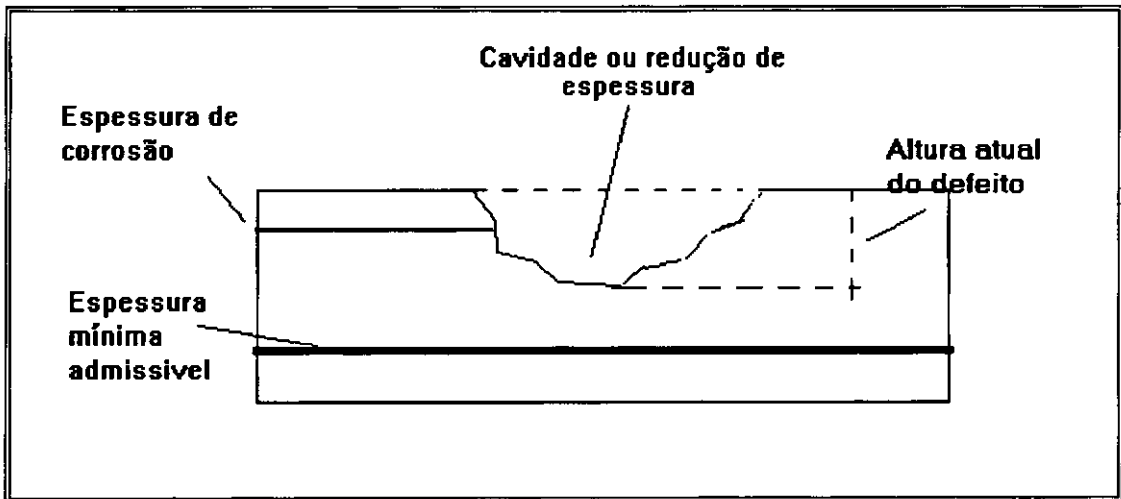


Figura IV.12 - Análise de criticidade de defeitos volumétricos

Após classificar os defeitos planares e volumétricos detetados, o sistema gera um relatório contendo o laudo da mecânica da fratura. Na etapa seguinte, ações preventivas ou corretivas são sugeridas pelo sistema. A ação preventiva tem como objetivo básico retardar ou evitar o crescimento de trincas em operação. Uma análise de sensibilidade da trinca á mudanças nos parâmetros que favorecem à sua propagação é proposta a seguir, e foi implementada no algoritmo FRAT.

#### IV.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E MARGENS DE SEGURANÇA

Os fatores que podem favorecer à propagação de trincas de um equipamento não contaminado trabalhando dentro das condições pre-estabelecidas de operação e que são utilizados como dados de entrada do modelo proposto da mecânica da fratura são a *tensão aplicada*, a *tenacidade* e a *geometria do defeito*. Qualquer alteração destes parâmetros ocasiona um deslocamento do ponto ( $S_r, K_r$ ) na curva FAD.

Os valores limites de cada parâmetro são obtidos com a análise de sensibilidade correspondente : mantendo constante dois parâmetros, incrementa-se iterativamente o terceiro até que o ponto ( $S_r, K_r$ ) ultrapasse a curva FAD. O sistema INTEQ define as margens de segurança dos parâmetros com as seguintes expressões:

(1) **Segurança ao Carregamento (tensões):** é a razão percentual entre a carga aplicada e a carga necessária para que a trinca ultrapasse a curva FAD. Como pode ser observado na figura (IV.13), a análise de sensibilidade e o cálculo da margem de segurança ao carregamento ( $F^L$ ) são executadas com o seguinte procedimento gráfico:

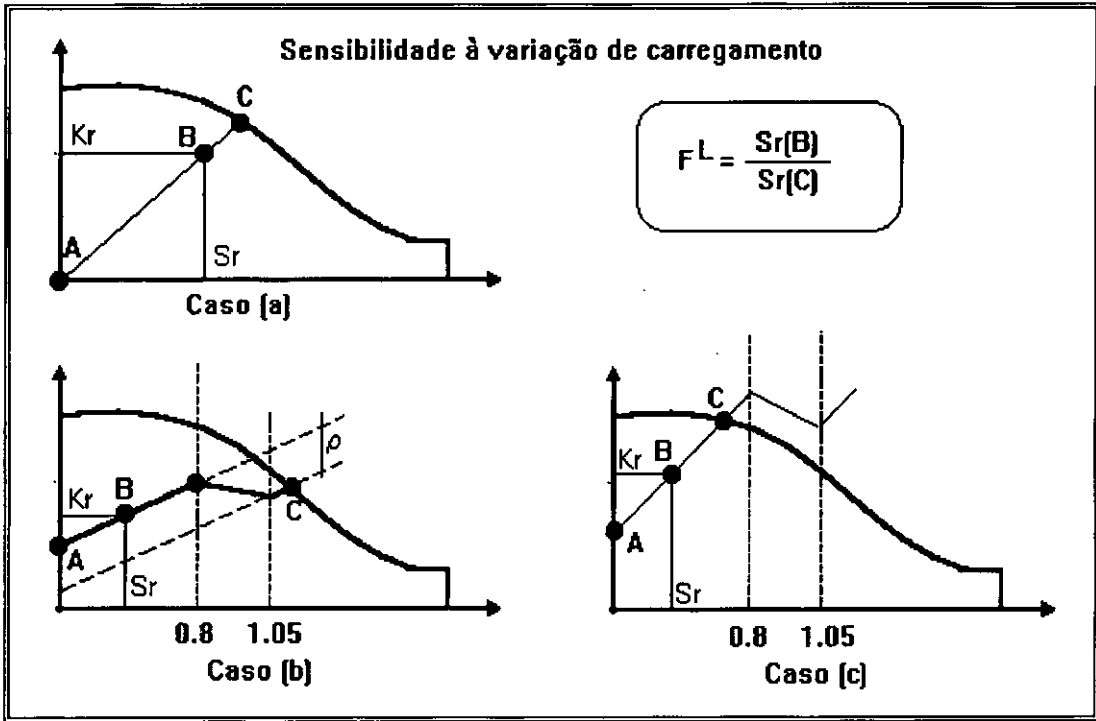


Figura IV.13 - Análise de sensibilidade á variação de carregamento

O ponto A (casos b e c) corresponde ao  $K_r$  calculado para as tensões secundárias, o ponto B corresponde à posição da trinca em relação à curva FAD, e o ponto C ao valor aproximado no qual, aumentando iterativamente a tensão atuante, o ponto  $(S_r, K_r)$  intersepta a curva FAD. A relação entre  $S_r(B)/S_r(C)$  é definida como sendo a margem de segurança ao carregamento. Pode ainda ser observado que, na ausência de tensões secundárias (caso a), o ponto A coincide com o ponto de origem (0,0). Para os outros casos, o fator de plasticidade  $\rho$  deve ser reduzido para corrigir a posição do do ponto C. Os pontos 0.8 e 1.05 são utilizados para atualizar a posição do ponto C. Valores próximos à unidade de  $F^L$  indicam que o fator de propagação da trinca é sensível á variações de carregamento. A solução recomendada para esta situação é diminuir a pressão de operação e/ou as tensões secundárias.

(2) **Segurança à tenacidade:** é a razão percentual entre a tenacidade a fratura requerida para atingir a condição limite e a tenacidade á fratura do material. O fator de sensibilidade à tenacidade  $F^k$  é calculado em função da relação  $K_r(B)/K_r(C)$ . O ponto

C representa a condição limite devido à variações de tenacidade. Valores de  $F^K$  próximos à 100% indicam a elevada sensibilidade da trinca à variações de tenacidade, e determinam a necessidade de refinar o cálculo de tenacidade a fratura do material através de ensaios de CTOD com retirada de material. O valor estipulado para CTOD é um dos dados mais incertos utilizados na análise.

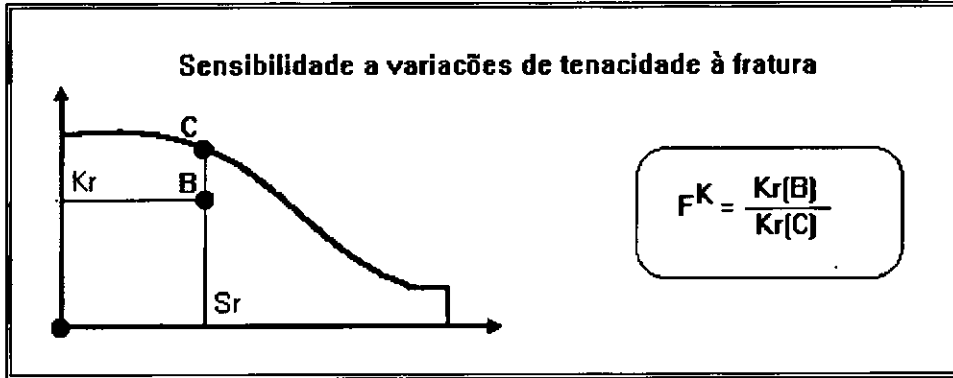


Figura IV.14 - Sensibilidade a variações de tenacidade

(3) **Segurança à variação da geometria do defeito:** é a razão percentual entre a geometria necessária para atingir a condição limite e a geometria atual. Incrementando iterativamente a altura  $a$  e o comprimento  $c$  do defeito de acordo com uma taxa de variação  $da/dc$ , observa-se na figura (IV.15) que a evolução da geometria na curva FAD é não linear. A altura (ou comprimento) do defeito localizado no ponto B dividido pela altura (ou comprimento) correspondente ao ponto limite C definem a margem de segurança  $F^a$  correspondente à variação de geometria. Valores de  $F^a$  próximos a 100% indicam a necessidade de aumentar a precisão no dimensionamento ou retirar o defeito correspondente.

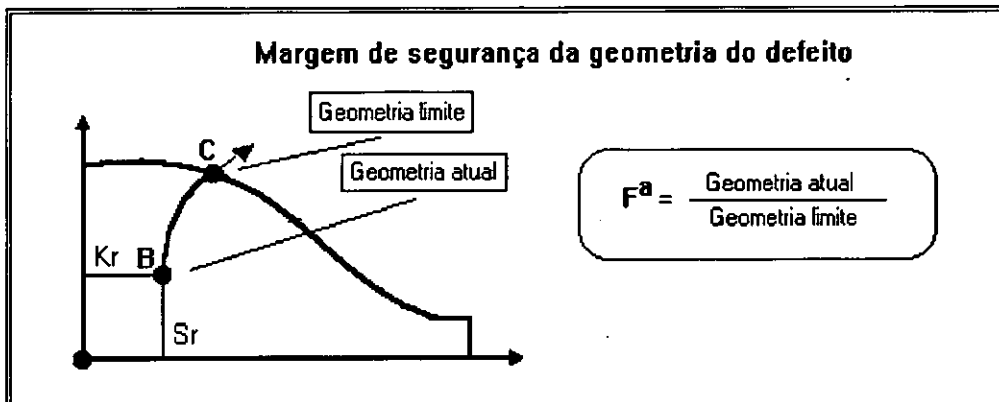


Figura IV.15 - Sensibilidade a variações de geometria do defeito

Existem situações nas quais a altura  $a$  cresce até se igualar à espessura da chapa  $t$  e mesmo assim o ponto continua abaixo da curva FAD. Este fenômeno é conhecido como o critério de *Leak-before-break (LBB)* que indica que caso a altura da trinca cresça até vaziar, o vazamento não produzirá o colapso do equipamento, dando tempo à equipe de manutenção para tomar as medidas correspondentes. Neste caso como não existe um valor para a geometria limite, o fator  $F_a$  não é calculado.

#### IV.6 DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES ATUANTES

As tensões atuantes na estrutura podem ser originadas pelas mais diversas combinações de carregamento: temperaturas, pressões, momentos, cargas remotas, cargas dinâmicas, etc. Concentração de tensões ocorre no contorno de qualquer tipo de variação da geometria, como é o caso de furos, cantos, cavidades etc. A determinação das tensões atuantes pode ser obtida de fórmulas aproximadas, análise experimental ou análise pelo método de elementos finitos, em função da geometria do equipamento e do carregamento aplicado

As tensões atuantes podem ser classificadas em *primárias* ou *secundárias*:

- . Tensão Primária de Membrana (Pm)
- . Tensão Primária de Flexão (Pb)
- . Tensão Secundária de membrana (Sm)
- . Tensão Secundária de Flexão (Sb)

Em vasos de pressão esféricos ou cilíndricos a *tensão de membrana* é calculada em função do carregamento. A *tensão de flexão* só deve ser considerada nos locais de geometria irregular ou imperfeições geométricas do equipamento.

As *tensões secundárias* são aquelas que por estarem autoequilibradas localmente, não podem produzir o colapso plástico da estrutura. Todo tipo de tensão atuante que pode contribuir para o colapso plástico deve ser classificada como tensão primária. Em caso de dúvida, partir sempre para a solução mais conservadora e considerar a tensão atuante como sendo primária. Para efeito de análise, classificamos as tensões primárias e secundárias em:

Normalmente, as *tensões residuais na solda*  $\sigma_r$  são utilizadas como *tensões secundárias*  $S_m$  ( $S_b=0$ ). A distribuição de tensões residuais numa solda é complicada. Existe uma região no contorno da solda, dentro da qual a trinca pode ser influenciada

pelas tensões residuais. Fora esta região, a tensão secundária atuante é nula. Para equipamentos não tratados termicamente assume-se uma distribuição constante ao longo da espessura de uma tensão residual  $\sigma_r$  equivalente à tensão de escoamento do material  $\sigma_y$ . No caso de equipamentos com tratamento térmico, pode-se fazer  $\sigma_r=0.15\sigma_y$  para defeitos orientados longitudinalmente ao cordão de solda e  $\sigma_r=0.30\sigma_y$  para defeitos transversais. A área de influência das tensões residuais se estende até à distância equivalente ao valor da espessura da chapa ou meia polegada (o que for menor), contado a partir da linha de fusão da solda.

#### IV.7 DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE DO MATERIAL

A tenacidade do material deve ser determinada para a região do *metal de base (MB)*, *zona termicamente afetada (ZTA)* e *metal de solda (MS)*, pois existe uma variação considerável de tenacidade em cada uma das regiões citadas. O valor da tenacidade pode ser representada por diferentes tipos de unidades utilizadas nos ensaios correspondentes: CTOD, J ou CHARPY. Existem fórmulas aproximadas (4.7,4.8) que definem a correlação entre as unidades e permitem o cálculo do fator de intensidade de tensões  $K_I$  utilizado no algoritmo para calcular o ponto  $K_r$ . O sistema INTEQ utiliza o CTOD como unidade básica de tenacidade.

$$J_{mat} = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{E} \quad (4.7)$$

$$\delta_{mat} = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{1.6 \cdot E\sigma_{flow}} \quad (4.8)$$

Onde  $E$  é o módulo de elasticidade do material,  $K_I$  é o fator de intensidade de tensões,  $\sigma_{flow}$  é a media entre a tensão de escoamento e tensão de ruptura do material,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson (=0.3),  $\delta_{mat}$  o CTOD do material e  $J$  o valor obtido no teste do J-integral[7].

Os ensaios de tenacidade do material são dependentes da temperatura e requerem a realização de ensaios destrutivos com retirada de material. Estes ensaios podem ser executados e/ou exigidos pelo usuário nas diferentes etapas da vida do equipamento com

o objetivo de montar um banco de dados confiável, que poderá ser utilizado na análise de equipamentos similares. Recomenda-se a realização do ensaio nas seguintes situações:

- . *Durante a montagem do equipamento (como recebido)*
- . *Durante a operação do equipamento, após uma troca de gomos, por exemplo.*
- . *Equipamentos condenados e retirados de circulação.*
- . *Após um tratamento térmico de alívio de tensões*

O teste de CTOD é o mais recomendado, pois o mesmo pode ser aplicado a todos os modos de falha de aços. A norma ASTM E1290-89 pode ser consultada pelo pessoal interessado na realização do ensaio de CTOD.

#### **IV.8 IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES NA CURVA DE GEOMETRIA LIMITE**

A análise do defeito utilizando a curva de geometria limite permite a compilação e armazenamento de dados a serem utilizados para:

- . *Recomendação previa do tipo de geometria a ser procurada na inspeção futura.*
- . *Cálculo da taxa de crescimento de defeitos.*
- . *Determinação do tempo de vida útil do equipamento.*
- . *Determinação do prazo para inspeções futuras.*

As regiões identificadas na curva de geometria limite da figura (IV.16), obtida com o algoritmo da figura (IV.10), são definidas da seguinte maneira:

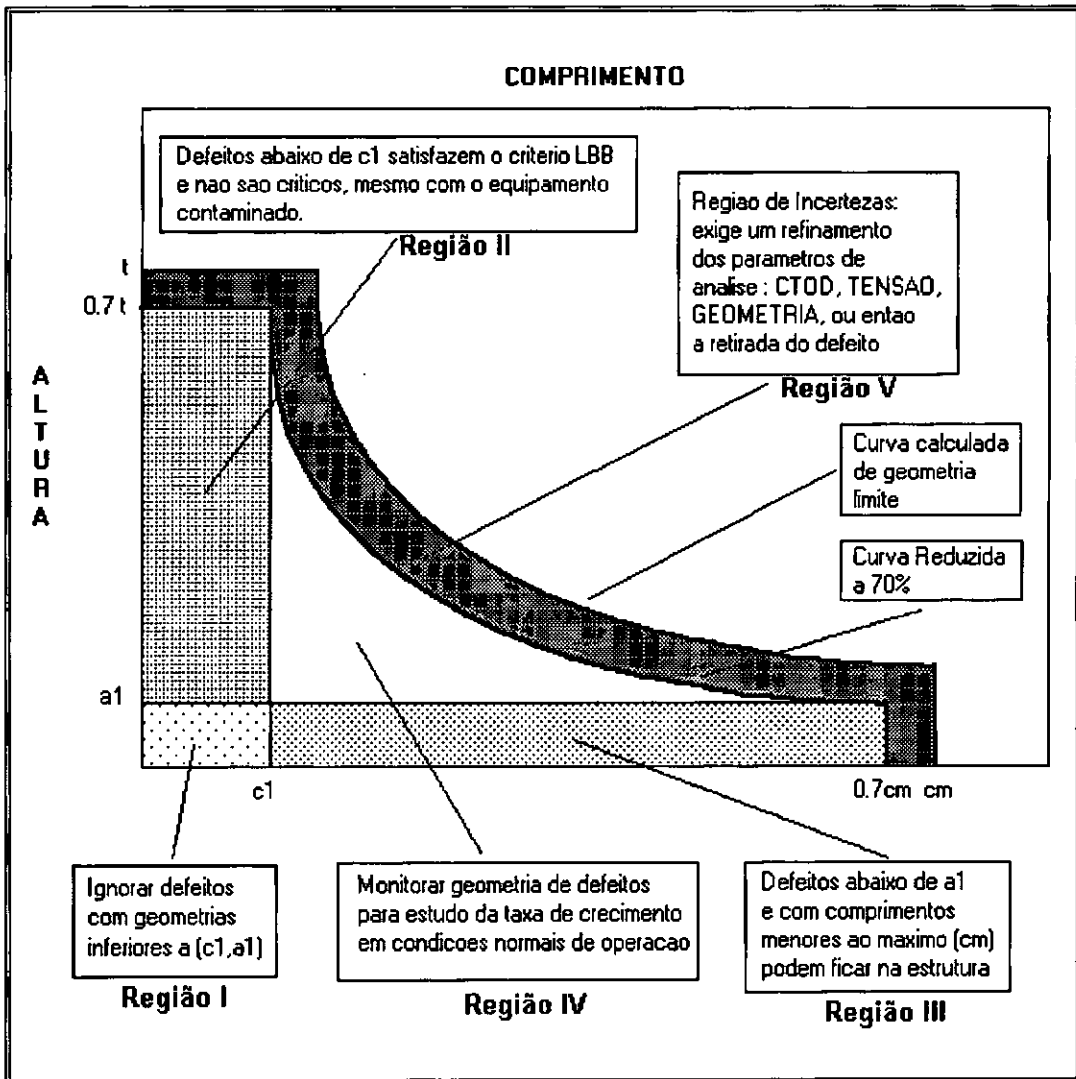


Figura IV.16 -: Análise da curva de geometria limite

- Região (I):** O valor da altura ( $a1$ ) no qual a "curva 0,7" fica assintótica e o comprimento ( $c1$ ) até onde o critério LBB é válido na mesma curva, definem uma região com defeitos não perigosos para a estrutura por estarem muito abaixo da curva limite. Estes valores ( $c1, a1$ ) podem ser utilizados nos relatórios prévios de inspeção gerados pelo sistema para orientar aos técnicos sobre o grau de grandeza de defeitos que devem procurar. Trincas na região I não precisam ser acompanhadas com medições periódicas. A maioria das trincas detetadas na inspeção pertencem a esta região.
- Região (II):** Quando o comprimento é menor ou igual a ( $c1$ ), a curva de geometria limite é uma reta paralela ao eixo de comprimentos, na altura  $a=0.7t$ . Em condições muito favoráveis, o comprimento  $c1$  pode ultrapassar o comprimento máximo estabelecido pelo sistema (10 vezes o comprimento original). Neste caso, a curva resultante é uma linha reta paralela ao eixo  $x$ , com altura igual a espessura da chapa.

Quando a curva de geometria limite contém defeitos na região **II**, o critério "LEAK-BEFORE-BREAK" ou **LBB** pode ser aplicado na estrutura. A metodologia **LBB** [7] identifica o conjunto de trincas localizadas em regiões que não possuem condições favoráveis para propagar, não precisam ser reparadas e o equipamento pode voltar imediatamente à operação. O critério de **LBB** não pode ser aplicado nas seguintes condições: (a) *trincas em locais com alto grau de concentração de tensões primárias ou tensões residuais*, onde a trinca pode crescer na direção do comprimento e não na direção da altura podendo atingir dimensões exageradas; e (b) *Equipamentos contaminados* favorecem o crescimento e aparecimento de novas trincas podendo súbitamente sair da condição de estabilidade e ocasionar acidentes graves.

- *Região (III)*: O sistema INTEQ define um comprimento máximo admissível de 10 vezes o comprimento original da trinca analisada ou 2 metros (o que for menor) utilizado para limitar a geração de pontos da curva de geometria limite. O valor de comprimento máximo pode também ser definido pelo usuário. Defeitos com comprimentos acima do comprimento máximo (fixado pelo usuário) não são aceitos e normalmente são retirados independentemente da análise da mecânica da fratura. Baseado nas informações obtidas da curva, o usuário poderá definir valores acima dos estabelecidos pela sua experiência, reduzindo o número de defeitos com alturas pequenas e comprimentos grandes a serem reparados em inspeções futuras.
- *Região (IV)*: Esta região contém defeitos com geometrias consideráveis que podem ficar na estrutura pois ainda estão abaixo da região de incertezas de dimensionamento (região V). São defeitos ideais para montar o banco de dados destinado ao estudo da taxa de crescimento de defeitos do equipamento. Recomenda-se a monitoração das geometrias pelo menos 4 vezes por ano. A determinação do tempo de vida útil e prazo para a inspeção futura depende exclusivamente do acompanhamento de defeitos localizados nesta região.
- *Região (V)*: A técnica mais utilizada e sedimentada para dimensionar trincas é o ULTRASOM. A incerteza na medição da geometria pelo US gira em torno de 30%. A região V define a área de incertezas na qual os defeitos e demais parâmetros de análise deverão ser refinados com END para confirmar medidas, ensaios de tenacidade e análise de tensões por elementos finitos. Caso não seja possível refinar defeitos localizados nesta região, a solução conservadora é adotada: passar os defeitos da região V para a região VI.
- *Região (VI)*: Define a região de defeitos que ultrapassaram a curva FAD. Este grupo de defeitos deve ser retirado da estrutura com a ação de reparo correspondente.

Alterações nas condições de operação, tratamentos térmicos, resfriamentos súbitos e outros fatores que alterem as características do material ou o carregamento aplicado, ativam o módulo de retroanálise do sistema INTEQ, no qual todos os defeitos remanescentes armazenados no banco de dados do equipamento são re-avaliados e re-classificados pelo sistema.

Cabe lembrar que sendo o sistema INTEQ um sistema de suporte e não de decisão, o mesmo deve ser utilizado com cautela. Recomenda-se a consulta à especialistas em caso de dúvidas e a realização de ensaios em caso de falta de informação. A responsabilidade final é sempre do usuário.

#### **IV.9. ESTRUTURA DA BASE DE CONHECIMENTOS MFRAT**

A análise pela MF de descontinuidades e defeitos detetados na inspeção é processada carregando a base MFRAT com a opção 4 do menu principal do sistema. O conhecimento foi estruturado de tal forma a atender todas as necessidades do usuário relacionadas com critérios de mecânica da fratura ao longo da inspeção. Uma vez finalizada a consulta, a base MFRAT é descarregada da memória e o controle de execução retorna ao menú principal do sistema (Base Inteq).

A possibilidade de criar estruturas hierárquicas de conhecimento permite montar mecanismos de solução aproveitando bancos de dados e estruturas (objetos gerados dinamicamente) gerados ao longo da consulta.

A consulta à BC se dá de maneira similar á consulta ao especialista através de um "raciocínio" baseado em perguntas/respostas. Caso o usuário desconheça a resposta a uma determinada pergunta, o sistema (da mesma forma que um especialista) faz outras perguntas que poderão levar a inferir um valor para o dado desconhecido. Em último caso, baseado na informação disponível, o sistema (idem o especialista) estipula um valor (conservador) que dará continuidade á análise.

A figura (IV.17) mostra a estrutura do conhecimento distribuido na base MFRAT.

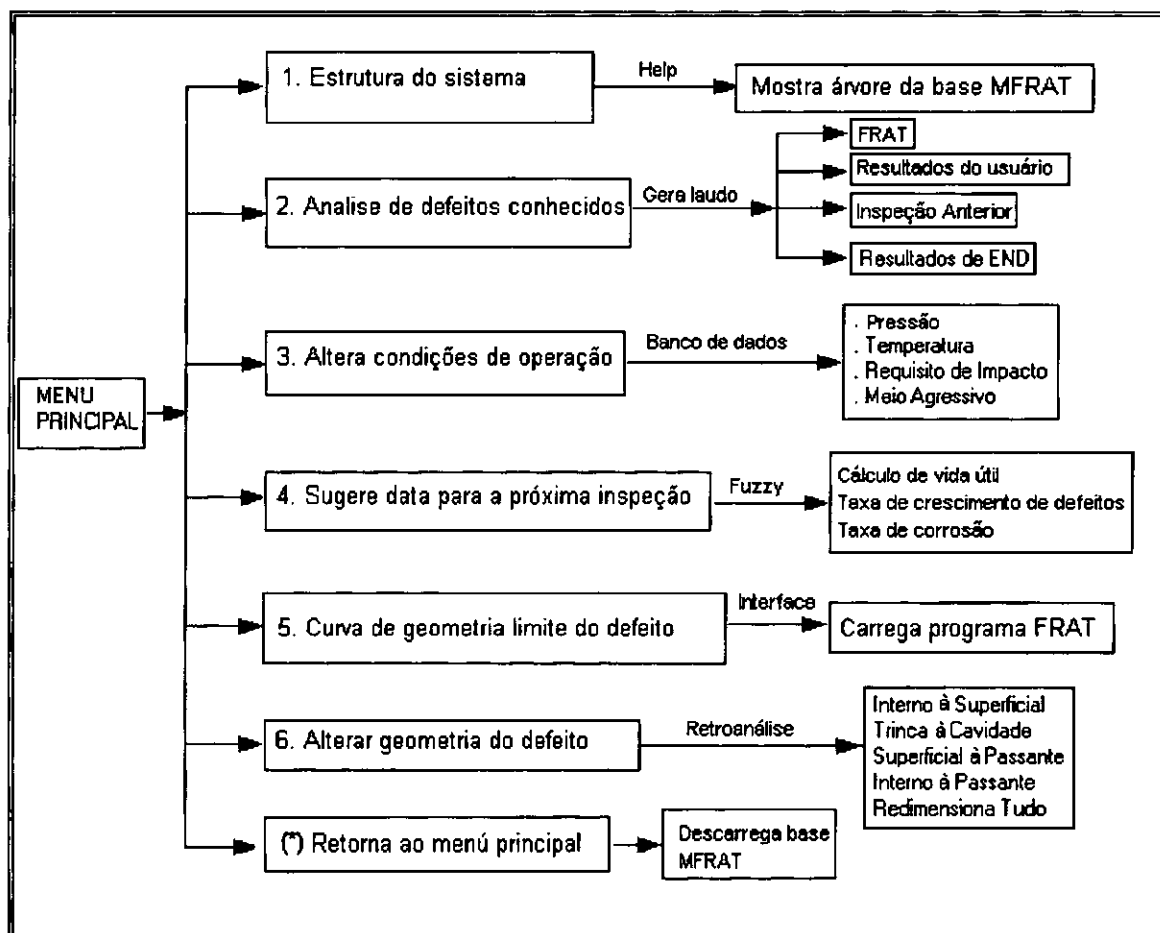


Figura IV.17 - Estrutura da base de conhecimento MFRAT

O menu principal da base MFRAT apresenta as seguintes opções para o usuário:

**1. Estrutura da base MFRAT:** Breve descrição da estrutura da base, que pode ajudar ao usuário a entender melhor o fluxo de informação e as alternativas de análise ao longo de uma consulta.

**2. Análise de defeitos conhecidos:** Nesta opção o usuário executa a análise de defeitos previamente selecionados. Após carregar a base, o usuário tem a opção de selecionar a fonte dos defeitos a serem analisados:

- . *Defeitos fornecidos pelo usuário*
- . *Defeitos resultantes da avaliação previa de END (base INSP)*
- . *Análise de defeitos de consultas anteriores (Inspeções anteriores ou consultas prévias)*

O sistema analisa os defeitos de acordo com o seu grau de criticidade e gera o laudo da MF. Como já foi visto em seções anteriores, os defeitos planares e volumétricos são classificados em:

- *Defeitos a Ignorar (DAI)*: Defeitos que não oferecem perigo para a estrutura.
- *Defeitos a acompanhar (DAA)*: Defeitos que são aprovados pela MF, mas estão próximos ao limite.
- *Defeitos a reparar (DAR)*: Defeitos que não foram aprovados pela MF.

O usuário poderá fazer modificações na classificação de defeitos gerados pela MF, definindo faixas mais conservadoras para defeitos dos grupos "a ignorar" e "a acompanhar". Cabe lembrar que a decisão de respeitar (ou não) a avaliação da MF é de inteira responsabilidade do usuário. O objetivo do sistema MFRAT é fornecer sugestões baseadas no critério da MF e não de tomar decisões. Existem situações nas quais a retroanálise ou a recategorização de defeitos torna-se necessária antes de gerar o laudo correspondente. A interação entre os algoritmos disponíveis e a heurística do especialista é descrita no diagrama da figura (IV.18.)

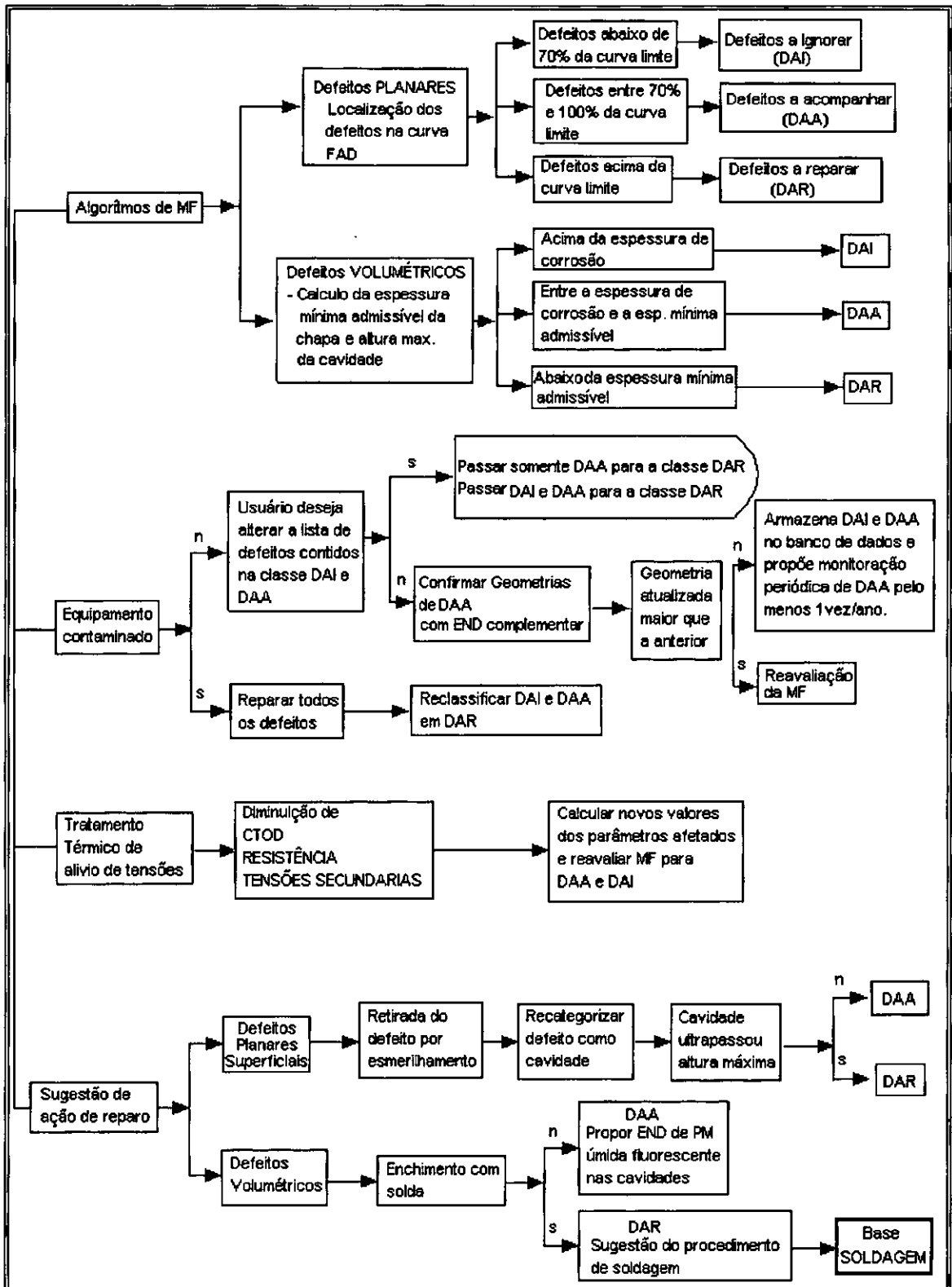


Figura IV.18 - Interação das alternativas de solução sugeridas pelos especialistas e geração do laudo da MF

**3. Altera condições de operação:** muitas vezes, mudanças não programadas na pressão de operação, temperatura, requisito de impacto ou no grau de contaminação do

equipamento, fazem com que defeitos previamente aprovados e classificados devam ser novamente analisados. Nesta opção, o sistema atualiza a informação contida nos bancos de dados do equipamento e refaz a análise e o laudo obtidos na opção (2). Uma variação brusca de temperatura, por exemplo altera os valores de resistência mecânica e CTOD do material. O sistema neste caso, dispondo da curva de variação da resistência e CTOD em função de T pode calcular os novos valores e analisar os defeitos remanescentes para esta nova configuração. Em condições de instabilidade a sugestão seria interromper a operação para a retirada dos defeitos comprometidos.

**4. Sugerir prazo para próxima parada:** mantendo um registro do crescimento de descontinuidades monitoradas (que permaneceram na estrutura) ao longo do tempo, o sistema terá condição de montar um banco de dados com a taxa de crescimento ( $da/dt$ ,  $dc/dt$ ) em diversos setores do equipamento. Uma metodologia de maximização do tempo previsto para inspeção futura e cálculo de vida útil do equipamento é proposta no capítulo VI, utilizando conceitos "fuzzy" que considera a influência de informações vagas ou incertas referentes ao estado atual de cada equipamento no processo de solução.

**5. Curva de geometria limite do defeito:** a interpretação dos resultados obtidos com a curva de geometria limite do defeito é utilizada neste módulo para gerar sugestões para inspeções futuras e auxiliar o engenheiro de manutenção a entender o processo de propagação de trincas no equipamento analisado.

**6. Alterar geometria do defeito:** no processo de esmerilhamento, o defeito planar passa a ser volumétrico, uma trinca interna pode aflorar na superfície, uma trinca superficial pode se tornar passante, ou simplesmente a verificação das dimensões do defeito pode requerer uma nova análise de criticidade. Esta opção permite ao usuário executar as mudanças correspondentes, inserir ou retirar defeitos e refazer a análise de defeitos conhecidos (opção 2).

#### IV.10. ESTRUTURA DO PROGRAMA FRAT

O algoritmo figura (IV.19) descreve a estrutura geral do programa FRAT. O módulo de ENTRADA DE DADOS apresenta um menu de 5 opções:

- *Arquivo externo*: O sistema pergunta ao usuário o nome do arquivo (nome.ext) a ser lido e analisado pelo sistema. Neste caso, antes de chamar o programa FRAT, o usuário poderá com qualquer editor de texto entrar num arquivo de dados já existente e modificá-lo de acordo com as suas necessidades.
- *Sistema INTEQ*: Quando o usuário consulta a base de conhecimentos da MF, o sistema monta um arquivo no formato "FRAT" para permitir acessar o programa com os dados obtidos na consulta. Este arquivo tem o nome INTEQ.DAT . Nesta opção o sistema endereça a leitura de dados ao arquivo referenciado.
- *Montar arquivo na tela*: O programa pergunta na tela todas os dados necessários para a análise e os armazena num arquivo de nome a ser escolhido pelo usuário.
- *Retomar Consulta Anterior*: Muitas vezes o usuário do sistema se vê na necessidade de interromper a consulta. O sistema FRAT tem um arquivo que armazena todas as mudanças produzidas no arquivo de dados de entrada. Este arquivo chamado INTEQ.AUX, é chamado na opção (4) do menu interativo do usuário para a leitura de dados correspondente.
- *Finalizar Consulta*: Finaliza o program FRAT.

Após a leitura de dados de entrada, o sistema identifica se o defeito é planar ou volumétrico e direciona a análise chamando os algoritmos correspondentes. Uma vez calculados os parâmetros numéricos de interesse, as rotinas gráficas interagem de acordo com o fluxograma correspondente. No caso de defeitos volumétricos é calculada a espessura mínima admissível, e a seguir o sistema mostra a seção transversal de espessura (t) contendo o defeito de altura (a) e comprimento (2c), a espessura de corrosão (ECORR), a espessura mínima calculada (EMIN).

No caso de defeitos planares, o sistema apresenta um sub-menu para o usuário escolher a curva a ser gerada. O sub-menu contém as seguintes opções:

1. *Gera a curva FAD e plota o ponto (Sr, Kr)*
2. *Gera curvas de analise de sensibilidade e cálculo das margens de segurança*
3. *Gera curva de geometria limite de defeitos (comprimento x altura)*
4. *Permite alterar dados e refazer a análise*

5. Calcula as dimensões prováveis da cavidade resultante do processo de esmerilhamento.
6. Retorna ao menu principal

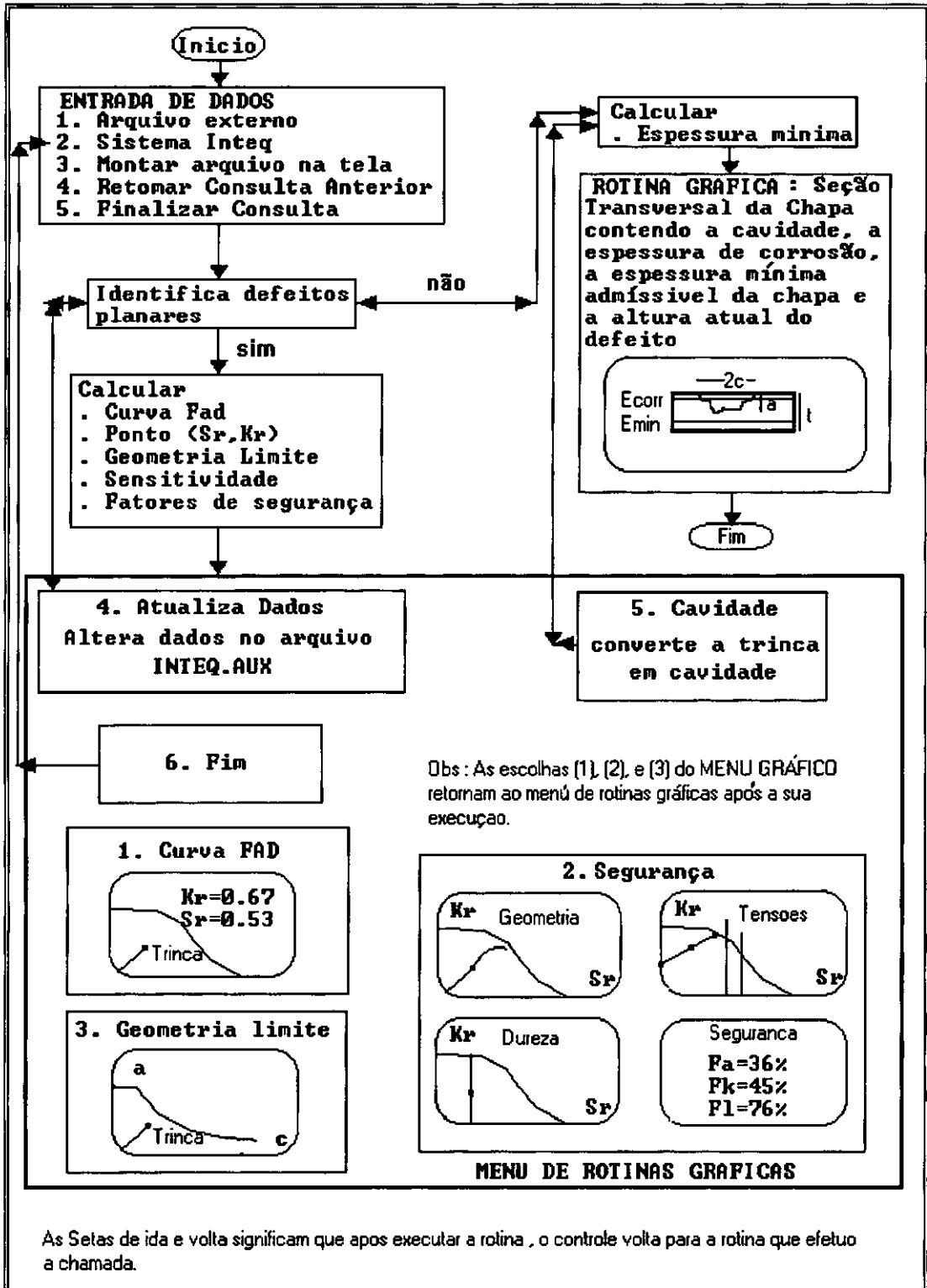


Figura IV.19 - Fluxograma do algoritmo FRAT

## CAPÍTULO V

### AÇÃO CORRETIVA

#### V.1 INTRODUÇÃO

A análise da periculosidade de defeitos encontrados ao longo da inspeção permite ao engenheiro de campo tomar as decisões corretas no que se refere à ação corretiva ou preventiva correspondente para liberar o equipamento para a operação. Normalmente, o processo requer a combinação de uma ou mais atividades citadas a seguir, para o equipamento voltar a operar:

- . *Esmerilhamento*
- . *Enchimento com solda*
- . *Tratamento Térmico*
- . *Troca de gomos*
- . *Pinturas e revestimentos de proteção*
- . *Reduzir a pressão de operação*

O processo de tomada de decisão é normalmente baseado na experiência dos especialistas responsáveis pela manutenção, mas, dependendo do caso, o engenheiro de campo pode também solicitar a ajuda de especialistas nas áreas de *análise de tensões*, *mecânica da fratura* ou *metalurgia*. Embora a mecânica da fratura apresente uma metodologia para avaliação do risco de permanência de defeitos em equipamentos, a decisão final é sempre dada pelo engenheiro responsável pela inspeção, o qual pode condenar defeitos que inclusive foram aceitos na MF.

As normas de inspeção de equipamentos utilizadas na PETROBRAS exigem a retirada de todos os defeitos detetados nos END. Existe um critério com fundamentos técnico-econômicos que pode fazer com que o engenheiro responsável sobreponha a sua experiência à norma, evitando retirar defeitos que comprovadamente não ofereçam riscos nas condições normais de operação. Tal procedimento pode ser utilizado nas seguintes condições:

- . *Equipamentos não contaminados*
- . *Condições estáveis de operação*
- . *Aceitação de defeitos pela mecânica da fratura*
- . *Viabilidade de inspecionar periodicamente os defeitos com o equipamento em operação.*

Nos capítulos anteriores foi dada uma descrição do conhecimento disponível para consulta nas áreas de análise dos resultados de inspeção com END e avaliação da criticidade dos defeitos detetados com procedimentos consolidados de mecânica da fratura. Este capítulo descreve a base de conhecimentos SOLDAGEM, responsável pela definição da ação corretiva correspondente aos defeitos reprovados que devem ser retirados do equipamento.

## V.2 ESMERILHAMENTO

O procedimento convencional no reparo de uma trinca é retirar o defeito esmerilhando a seção afetada e encher a cavidade com solda. Um procedimento alternativo é deixar a cavidade na estrutura, o que exige uma análise da mecânica da fratura ou elementos finitos para o cálculo da altura máxima que a cavidade pode ter sem comprometer a resistência estrutural do equipamento. Sempre que possível deve se evitar o esmerilhamento desnecessário, pois a redução de espessura aumenta o fator de concentração de tensões na região..

O acabamento da superfície esmerilhada deve minimizar o fator de concentração de tensões através do adoçamento dos ângulos retos e garantindo que a largura (**2b**) da cavidade seja no mínimo superior à *altura* ou **3/8"** (o que for menor). Os extremos da cavidade deverão ter no mínimo um *caimento* de **4:1**, e o *adoçamento* dos ângulos retos entre as laterais e o fundo deve pelo menos ser executado com um raio de **1/8"**.

É recomendado um ensaio de *partículas magnéticas* após o esmerilhamento para constatar a retirada "total" do defeito. A dureza na região esmerilhada deve ser medida, pois o fundo da cavidade torna-se uma região suscetível ao aparecimento de trincas.

A necessidade ou não de esmerilhar um defeito é definida pelo usuário ao longo da consulta a base MFRAT. O sistema fornece sugestões para adoçamento e as dimensões ótimas para a cavidade a ser gerada. Cavidades classificadas como "a reparar" devem ser enchidas com solda. A base SOLDAGEM contém procedimentos de soldagem para aços da família A516.

## V.3 ENCHIMENTO COM SOLDA

Para o caso de cavidades com alturas superiores ou muito próximas a altura limite **amax** é necessário o enchimento com solda. O procedimento de soldagem deve ser especificado de acordo com a característica do equipamento e da necessidade (ou não) de executar um tratamento térmico de alívio de tensões.

Consultando a base SOLDAGEM o usuário gera o relatório de procedimento de soldagem correspondente, baseado no conhecimento adquirido dos especialistas ou

utilizando a interface para rotinas externas implementada para consultar programas e bancos de dados de procedimentos de soldagem. A base de conhecimentos atende a família dos aços A516. A maioria dos vasos de pressão do parque analisado foram construídos com aços A516gr70 e A516gr60 (ou similar).


 <b>SUGESTÃO PARA PRÁTICA DE SOLDAGEM PARA AÇOS DA FAMÍLIA A-516</b>				
Faixa de Espess. [mm]	Temperatura mínima de pre-aquecimento e interpasse [°C]	Temperatura de alívio de tensões [°C]	Metal de Solda	
			Especif.	Classe $\sigma_Y$ $\sigma_R$ (mínimo) [Mpa]
ate 19	10	Opcional	AWS A5.1 ou AWS A5.5	E60xx 345 425
acima de 19 ate 38	10	593-675 ate 25 mm e opcional		ou
acima de 38 ate 64	66	593-675 desejável		E70xx 415 495
acima de 64	107	593-675 desejável		Ex : E7016 , E7018 Consultar a especific. AWS...

Figura V.1 - Sugestões para definição de procedimentos de soldagem da família A516

A figura (V.1) mostra os valores sugeridos pelo sistema para cálculo de temperaturas em função da espessura da chapa e especificação do metal de solda correspondente. As expressões *E60xx* e *E70xx* indicam que qualquer metal de solda correspondente à estes grupos podem ser utilizados com segurança (E6016, E7018, etc...). A figura (V.1) corresponde também à uma tela gráfica do sistema mostrando a heurística utilizada na inferência dos parâmetros de soldagem. A temperatura deve ser selecionada de acordo com as seguintes observações:

- A temperatura de interpasse não deve ultrapassar 250 °C
- O aumento da temperatura de preaquecimento pode ser necessário em situações envolvendo alta restrição, alto hidrogênio, baixo aporte de calor ou composição do aço no limite superior da especificação.

#### V.4 TRATAMENTO TÉRMICO DE ALVIO DE TENSÕES


Como foi visto no capítulo anterior, as tensões principais somadas com as secundárias (residuais) podem fazer com que uma trinca propague até ultrapassar os limites admissíveis pela mecânica da fratura. O aquecimento do material à temperaturas pré-estabelecidas faz com que as tensões residuais na solda sejam redistribuídas, aliviando as tensões atuantes e conseqüentemente diminuindo o risco de propagação. Este procedimento é conhecido com *Tratamento Térmico de Alívio de Tensões* (TTAT). O alívio de tensões compressivas pode ocasionar a abertura de trincas até então não detetadas com os END correspondentes. Recomenda-se um ensaio superficial de líquidos penetrantes ou partículas magnéticas após o tratamento. As normas vigentes podem exigir o tratamento térmico para determinados vasos de pressão em função da espessura da chapa e do conteúdo do vaso.

A redução da resistência e tenacidade do material devido ao TTAT deve ser avaliada pelos especialistas antes de recomendar a sua utilização. Dependendo da situação, a variação das características do material pode ser tão marcante que pode ocasionar a condenação do equipamento. Existem normas que limitam a dois ou três tratamentos térmicos por equipamento durante a sua vida útil.

Os ensaios com retirada de material exigidos após o tratamento térmico são:

- . *ensaio de determinação de resistência mecânica*
- . *ensaio de tenacidade (CTOD ou CHARPY)*

A figura (V.2) mostra a tela gerada pelo sistema para explicação do cálculo dos parâmetros de TTAT.



## SUGESTÃO PARA PRÁTICA DE SOLDAGEM PARA AÇOS DA FAMÍLIA A-516

**OBSERVAÇÕES IMPORTANTES :**

1. O aumento da temperatura de pre-aquecimento pode ser necessário em situações envolvendo alta restrição, alto hidrogênio, baixo aporte de calor ou composição do aço no limite superior da especificação. O valor máximo da temperatura de interpasses deve ser limitado a 250°C.
2. TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES
  - [a] Acima de 315°C , a taxa de aquecimento é obtida do valor mínimo entre [ 220 , 220 / maior espessura em polegadas ] °C / hora . A variação de temperatura na extensão de 4.6 m não deve ser maior que 140°C
  - [b] Acima de 315°C , a taxa de resfriamento é obtida do valor mínimo entre [ 260 , 260 / maior espessura em polegadas ] °C / hora . Abaixo de 315 , o conjunto pode ser resfriado ao ar tranquilo .
  - [c] O tempo mínimo de permanência da temperatura e calculado em função da espessura do equipamento :
 
$$e \geq 6.4 : t = 15 \text{ min.}$$

$$6.4 < e \leq 51 : t = 2.36 / e \text{ min}$$

$$e > 51 : t = 120 + 0.59 ( e - 51 )$$

Figura V.2 - Regras do sistema para cálculo de parâmetros para tratamento térmico

A redução da resistência dos aços A516 para até 10 TTAT no caso de vasos de pressão foi estudada e testada em laboratório. Constatou-se que a redução chega até aproximadamente 8% do valor original para vasos operando em condições normais. No caso da tenacidade existem valores conservativos obtidos do MPC que podem ser utilizados para análise de vasos com TTAT. A informação disponível é utilizada na base MFRAT, para efetuar a retroanálise dos defeitos e discontinuidades que permaneceram na estrutura utilizando os dados originais de resistência e tenacidade.

## V.5 ESTRUTURAÇÃO DA BASE SOLDAGEM

As sugestões para procedimentos de reparo são calculadas na base SOLDAGEM. Esta parcela de conhecimento pode ser acessada diretamente do menu principal (opção 5) do INTEQ. O usuário poderá consultar diretamente os procedimentos de reparo disponíveis para o tipo de aço analisado, e gerar um relatório de procedimento de reparo. A figura V.3 mostra resumidamente a estrutura da base SOLDAGEM, na qual o usuário pode optar pelo cálculo dos parâmetros de soldagem, tratamento térmico ou procedimentos alternativos de soldagem sem tratamento térmico, como é o caso da técnica de dupla camada.

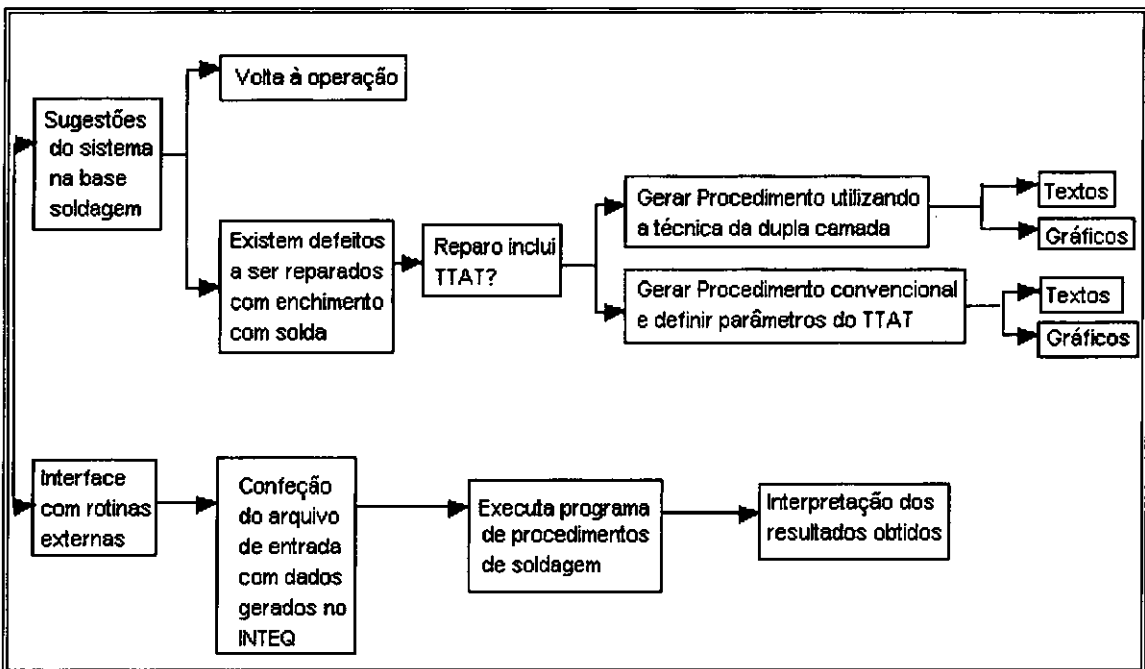


Figura V.3 - Estrutura da base Soldagem

Informações sobre a heurística utilizada ou detalhamentos gráficos podem ser obtidos com a combinação de textos e gráficos gerados por solicitação do usuário. A figura (V.4) mostra uma das telas geradas no sistema para detalhar o passe de acabamento da solda. Observa-se que a combinação de gráficos com textos aumenta a capacidade de passagem de informações para o usuário.

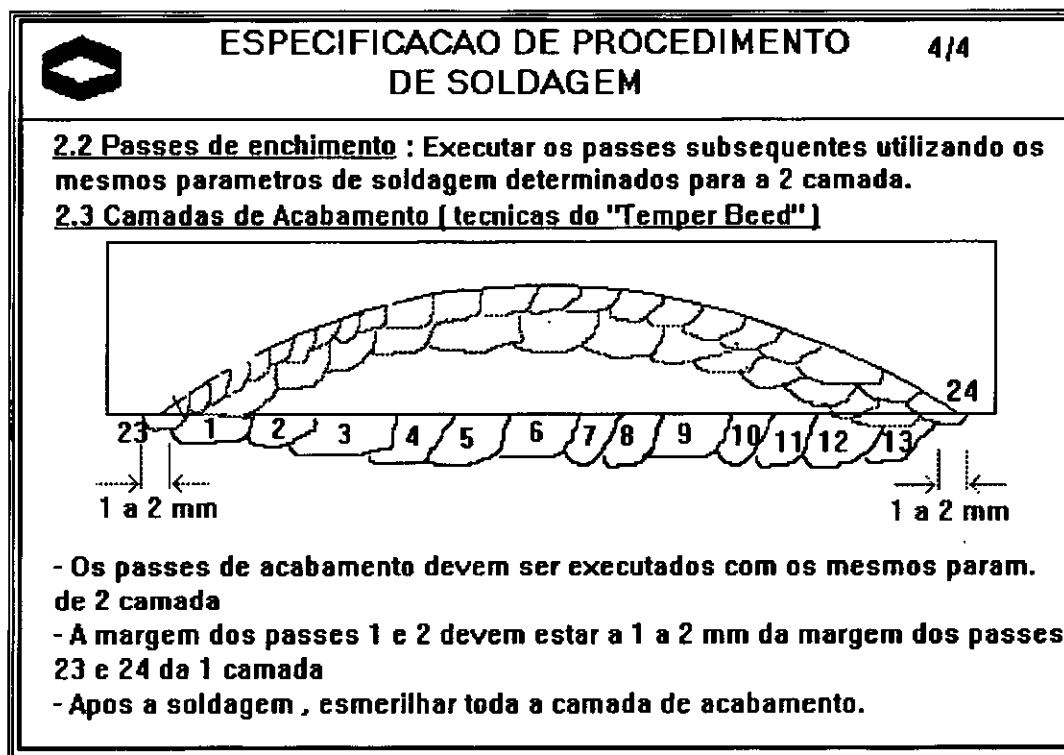


Figura V.4 - Tela gráfica gerada pelo sistema sugerindo o procedimento para executar a camada de acabamento

A interface com as rotinas externas previstas para versões futuras permitirá a interface do INTEQ com outro sistema especialista implementado por técnicos da PETROBRAS, destinado à geração de procedimentos de soldagem em geral. Os procedimentos de interface incluem a montagem do arquivo de dados de entrada do programa a ser consultado com as informações geradas ao longo da consulta ao sistema INTEQ, e a posterior interpretação dos resultados obtidos. O relatório geral de consultas, apresentado no Anexo II inclui a informação gerada na base SOLDAGEM.

## CAPÍTULO 6

### UTILIZAÇÃO DE MATRIZES DE INCERTEZAS PARA ANÁLISE DE RISCO

#### VI.1. INTRODUÇÃO

Existe na engenharia situações nas quais o engenheiro deve raciocinar com evidências incertas ou incompletas. As fontes de incerteza no processo de solução de problemas de engenharia são:

- *Dados errados*
- *Falta de conhecimento*
- *Utilização de modelos simplificados ou não apropriados*

A teoria da probabilidade e/ou estatística é utilizada para o tratamento de incertezas de dados ou modelos.

Incertezas decorrentes da falta de conhecimento ou dependentes do julgamento humano ou da experiência do especialista podem ser agrupadas em :

- *randômicas* ou *aleatórias*, originadas em modelos estocásticos e que podem ser representadas com distribuições probabilísticas e;
- *fuzzy*, incertezas que não podem ser analisadas com a inferência estatística por carecer de limites bem definidos. Definindo conjuntos com elementos qualitativos, pode-se montar uma estratégia não booleana de solução.

Um engenheiro especialista acostumado a trabalhar com os diversos níveis de incerteza trabalha com estratégias e métodos que lhe permitem chegar a conclusões por sua vez incertas num processo de inferência baseado em expressões linguísticas como por exemplo "*x muito maior* que *y*", "Trincas longitudinais tem um *alto* risco de propagação", "Trincas no bocal são *menos preocupantes* do que trincas no costado" (as variáveis linguísticas em itálico mostram que o pensamento humano possui características de análise qualitativa e não quantitativa). Pode-se afirmar que a principal diferença entre o raciocínio humano e o computador é justamente a habilidade natural de manipulação e interpretação de conceitos vagos ou incertos, mais conhecidos como "fuzzy".

A inspeção de equipamentos industriais trabalha com dados incertos (geometria do defeito, tenacidade do material, grau de contaminação do equipamento, tempo de

exposição) e utiliza modelos simplificados (mecânica da fratura, procedimentos de reparo) associados a parâmetros que dependem do julgamento do engenheiro responsável (defeitos pequenos, médios, grandes, preocupantes).

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos básicos da teoria "fuzzy" e sugerir uma metodologia para análise de risco e periculosidade de defeitos em vasos de pressão esféricos e determinação do prazo para inspeção futura.

## VI.2. DEFINIÇÃO DE CONJUNTOS "FUZZY"

Seja o conjunto  $X$  o universo de uma certa aplicação. A teoria de conjuntos "fuzzy" trabalha com um subconjunto  $A$  do universo  $X$ , onde a participação dos componentes de  $X$  como membros de  $A$  é avaliada de acordo com uma *função de associação*  $\mu_A(x)$ . Esta função representa os elementos  $x$  de  $X$  que pertencem parcialmente a  $A$ . A função de associação  $\mu_A(x)$  assume valores no intervalo  $[0,1]$ . O valor da unidade (1) assume que  $x$  pertence claramente ao conjunto  $A$ . O valor nulo (0) confirma que  $x$  não pertence a  $A$ . Valores intermediários medem o grau de participação de  $x$  em  $A$ . O exemplo abaixo mostra a relação existente entre os elementos de  $X$  e o conjunto de restrições "fuzzy"  $A$  :

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$$

$$A = \{0.3/x_1, 0.7/x_2, 1/x_3, 0.5/x_4, 0.1/x_5\}$$

Interpretando as expressões acima observamos que o elemento  $x_2$  tem um fator de associação do conjunto  $A$  de 0.7. A função  $\mu_A(x)$  pode ser obtida na etapa de aquisição de conhecimentos com os especialistas e deve ser representada com funções do tipo:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right) \rightarrow x \leq m, \alpha > 0 \\ L\left(\frac{x-m}{\beta}\right) \rightarrow x \geq m, \beta > 0 \end{cases}$$

A figura (VI.1) mostra o gráfico de uma função de associação  $\mu_A(x)$  :

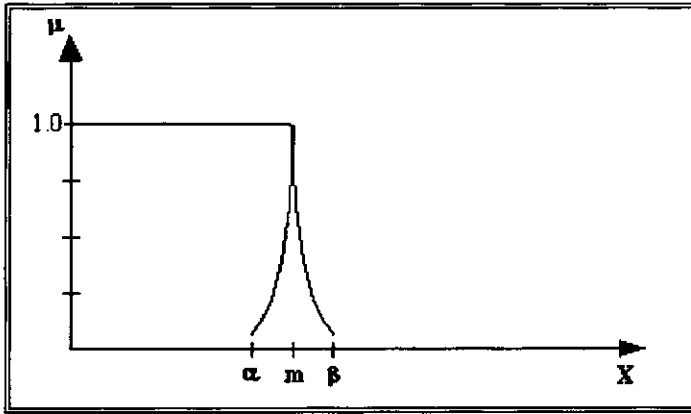


Figura VI.1 - Função de associação "fuzzy"

Observa-se que a função pode ser de ordem  $n$ , dependendo do grau de complexidade do problema. Como primeira aproximação, e com o objetivo de simplificar a análise, costuma-se adotar funções lineares triangulares [10].

A figura (VI.2) mostra exemplos de funções de associação lineares utilizadas com frequência:

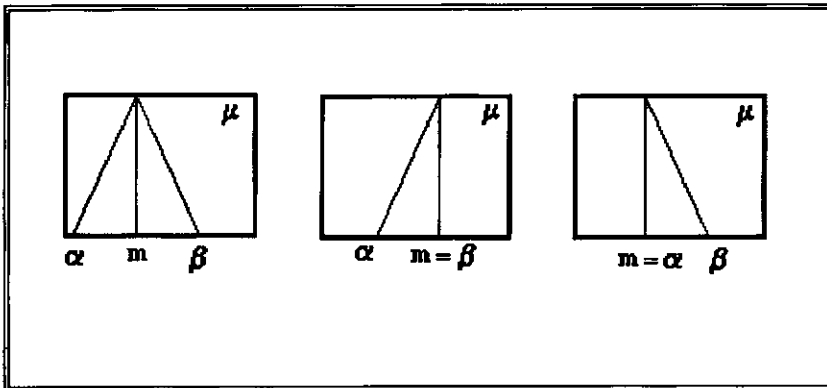


Figura VI.2 - Tipos de funções de associação lineares

Observa-se que tanto  $\alpha$  ou  $\beta$  podem ser modificados no processo de otimização da função.

## VI.2.1 OPERAÇÕES BÁSICAS

Sejam **A** e **B** subconjuntos de **X**, com funções de associação  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$  onde  $x \in X$ , cita-se a seguir as operações básicas de teoria de conjuntos, aplicadas a conjuntos "fuzzy" [10] :

1. Se **A = B** então :

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (6.1)$$

2. Se **A =  $\bar{B}$**  então :

$$\mu_A(x) = \mu_{\bar{B}}(x) = 1 - \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (6.2)$$

3. Se **A = 0** então :

$$\mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in X \quad (6.3)$$

4. Se **A** é subconjunto de **B**, **A  $\subseteq$  B** então :

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (6.4)$$

5. A união de **A** com **B**, **A  $\cup$  B** é igual a :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in X \quad (6.5)$$

6. A interseção de **A** com **B**, **A  $\cap$  B** é igual a :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in X \quad (6.6)$$

## IV.2.2 PROPRIEDADES

As principais propriedades de união e interseção de conjuntos são numeradas a seguir, e podem ser utilizadas nas operações de conjuntos "fuzzy". Fazendo A, B, C subconjuntos fuzzy de X, tem-se :

1. Propriedade Comutativa  $A \cup B = B \cup A$
2. Idempotência  $A \cup A = A$
3. Propriedade Associativa  $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C = A \cup B \cup C$   
 $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C = A \cap B \cap C$
4. Propriedade Distributiva  $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$   
 $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
5. Absorção  $A \cap (A \cup B) = A$   
 $A \cup (A \cap B) = A$
6. Igualdades com conjuntos nulos e universais  $A \cup 0 = A$   
 $A \cup X = X$   
 $A \cap 0 = 0$   
 $A \cap X = A$
7. Desigualdades  $A \cup \bar{A} \neq X$   
 $A \cap \bar{A} \neq 0$
8. Produto cartesiano "Fuzzy"  $R = A \times B$   $\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$
9. Composição max-min  $C = R_1 \circ R_2$   $\mu_{R_1 \circ R_2} = \max_y \{ \min \{ \mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(x, y) \} \}$

### VI.2.3 ÁLGEBRA MATRICIAL

Para exemplificar as operações com matrizes "fuzzy", define-se as matrizes **A** e **B** onde :

$$A = \begin{vmatrix} 0.5 & 0.3 \\ 0.4 & 0.8 \end{vmatrix} \text{ e } B = \begin{vmatrix} 0.1 & 0.5 \\ 0.7 & 0.7 \end{vmatrix}$$

As principais operações são :

$$A \cup B = \begin{vmatrix} 0.5 \vee 0.1 & 0.3 \vee 0.5 \\ 0.4 \vee 0.7 & 0.8 \vee 0.7 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.7 & 0.8 \end{vmatrix}$$

$$A \cap B = \begin{vmatrix} 0.5 \wedge 0.1 & 0.3 \wedge 0.5 \\ 0.4 \wedge 0.7 & 0.8 \wedge 0.7 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.4 & 0.7 \end{vmatrix}$$

$$A \circ B = \begin{vmatrix} (0.5 \wedge 0.1) \vee (0.3 \wedge 0.7) & (0.5 \wedge 0.5) \vee (0.3 \wedge 0.7) \\ (0.4 \wedge 0.1) \vee (0.8 \wedge 0.7) & (0.4 \wedge 0.5) \vee (0.8 \wedge 0.7) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.3 & 0.5 \\ 0.7 & 0.7 \end{vmatrix}$$

$$\bar{A} = I - A = \begin{vmatrix} 1 - 0.5 & 1 - 0.3 \\ 1 - 0.4 & 1 - 0.8 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.5 & 0.7 \\ 0.6 & 0.2 \end{vmatrix}$$

### VI.3. VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Zadeh [17] afirma que os elementos fundamentais do pensamento humano não são números, e sim, conjuntos de indicações vagas ou incertas. O ser humano é comprovadamente mais eficiente na avaliação qualitativa do que quantitativa.

As *variáveis linguísticas* são utilizadas ao longo do processo com o objetivo de condensar informação. A sua utilização em modelos de incerteza ou "fuzzy" pode ser comparada as variáveis numéricas de um modelo matemático. As variáveis linguísticas são palavras ou frases utilizadas freqüentemente no jargão do especialista para representar conceitos vagos, subjetivos e mal estruturados que não possam ser avaliados corretamente com a representação numérica convencional.

A teoria "fuzzy" estabelece uma relação entre as variáveis linguísticas e as funções de associação. Associando variáveis linguísticas a conjuntos "fuzzy", pode se introduzir e manipular no modelo de solução a parcela de conhecimento mal estruturada ou incerta do problema.

A tabela (VI.1) mostra o universo de números  $X = \{\text{inteiros entre 1 e 10}\}$  associados às variáveis linguísticas "pequeno", "médio", "grande". As funções de associação fornecidas pelo especialista, permitem estabelecer uma ligação entre as variáveis citadas e os números do conjunto X.

VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS SELECIONADAS	CONJUNTOS "FUZZY" EQUIVALENTES
"POUCO"	{1.0/1,0.8/2,0.5/3,0.2/4}
"MÉDIO"	{0.3/3,0.8/4,1/5,1/6,0.8/7,0.2/8}
"MUITO"	{0.4/6,0.6/7,0.8/8,0.9/9,1/10}

Tabela VI.1 - Associação de variáveis linguísticas a conjuntos "fuzzy"

A determinação das funções de associação de um conjunto "fuzzy" é subjetiva por natureza. Em geral representa o contexto no qual o problema é abordado. Não é permitido uma atribuição arbitrária da função de associação. A definição de funções é dependente da observação do especialista.

## VI.4. INFERÊNCIA COM RACIOCÍNIO APROXIMADO

Uma conclusão imprecisa é resultado de uma coleção de premissas incertas. Neste tipo de inferência, o raciocínio costuma ser qualitativo e não quantitativo. A regra de inferência condicional "fuzzy" permite a análise utilizando o raciocínio aproximado:

- *Premissa :*        *A e verdadeiro*
- *Implicância:*    *Se A, então B*
- *Conclusão:*        *B e verdadeiro*

onde **A** e **B** são subconjuntos "fuzzy" de **X** e **Y** respectivamente, e a conclusão é idêntica a **B**. Para efeito de cálculo, a regra é definida com duas relações fuzzy **R1**, **R2** definidas a seguir:

- *A1:*        *x a R1*
- *A2:*        *x e y são R2 fazendo,*

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = [\mu_A(x) \wedge \mu_B(x)] \vee [1 - \mu_A(x)] \quad (6.7)$$

- *A3:*        *y e R1 ◦ R2*

A regra pode ser comparada com uma regra de três simples onde:

*se x1 então y1 (A2)*

*então se x2(A1), y2=?(A3)*

O raciocínio incerto permite o encadeamento de relações incertas no processo de solução.

## VI.5. EXTREMIZAÇÃO DE FUNÇÕES DE ASSOCIAÇÃO

Os problemas de extremização na engenharia visam maximizar ou minimizar uma função de acordo com as características do problema. No procedimento convencional o extremo de uma função do modelo analisado é representado por um ponto único e bem determinado que pertence à função. Existe uma relação unívoca entre o ponto ótimo procurado e o ponto extremo calculado.

Existe no entanto problemas nos quais a representação numérica torna-se insuficiente para representar o jargão utilizado na sua resolução. Normalmente este tipo de problemas possui um alto grau de incertezas nas premissas e conclusões obtidas ao longo do processo de solução. Extremizando funções obtidas com restrições representadas com conjuntos "fuzzy" pode-se obter valores que representem situações como "o mínimo possível", "o mais seguro possível", "o mais confiável possível", lembrando que o termo possível introduz o conceito "fuzzy" na análise, eliminando a relação unívoca entre o ponto extremo e o ponto ótimo procurado.

Seja  $f(x)$  uma função com valores reais no domínio  $X$ , e  $\inf(f)$  e  $\sup(f)$  os seus extremos inferior e superior respectivamente. O conjunto "fuzzy"  $M = \{\mu_m(x)/x\}$ ,  $x \in X$  é conhecido como *conjunto de maximização*[36], onde :

$$\mu_M(x) = \frac{f(x) - \inf(f)}{\sup(f) - \inf(f)} \quad \forall x \in X \quad (6.8)$$

Sendo  $A$  um subconjunto "fuzzy" de  $X$ , a solução  $x^*$ ,  $x^* \in X$  que satisfaz a equação abaixo,

$$\mu_M(x^*) = \sup_{x \in X} [\mu_M(x) \wedge \mu_A(x)] \quad (6.9)$$

corresponde ao ponto máximo de  $f(x)$  em  $A$  e  $f(x^*)$  equivale ao valor máximo de  $f(x)$  em  $A$  atendendo às restrições "fuzzy" do problema.

### VI.5.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE VIDA ÚTIL DO EQUIPAMENTO

O sistema INTEQ armazena em banco de dados a geometria de trincas que foram classificadas como "a ignorar" ao longo da análise da mecânica da fratura. Como foi visto em capítulos anteriores, recomenda-se a medição periódica de trincas remanescentes na estrutura pelo menos 1 vez por ano. Identifica-se os seguintes parâmetros que serão utilizados no processo de cálculo de vida útil do equipamento:

$X=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}$  chapas contendo os defeitos monitorizados

$\delta=\{\delta_1,\delta_2,\dots,\delta_n\}$  altura dos defeitos medidas na última inspeção (em mm)

$\xi=\{\xi_1,\xi_2,\dots,\xi_n\}$  taxa de crescimento dos defeitos (em mm/ano)

onde para a amostragem de dados obtidos, tem-se:

$$\delta_{\text{sup}}=\text{MAX}(\delta_1,\delta_2,\dots,\delta_n) \quad \text{maior altura} \quad (6.10)$$

$$\delta_{\text{inf}}=\text{MIN}(\delta_1,\delta_2,\dots,\delta_n) \quad \text{menor altura} \quad (6.11)$$

$$\xi_{\text{sup}}=\text{MAX}(\xi_1,\xi_2,\dots,\xi_n) \quad \text{maior taxa de crescimento} \quad (6.12)$$

$$\xi_{\text{inf}}=\text{MIN}(\xi_1,\xi_2,\dots,\xi_n) \quad \text{menor taxa de crescimento} \quad (6.13)$$

Para efeito de análise e baseados nos resultados obtidos nas  $n$  medições, define-se os valores de tempo de vida útil máximo e mínimo a serem avaliados:

- Tempo mínimo de vida útil : considera a *altura máxima* atuando sob a *taxa máxima* de crescimento do defeito.

- Tempo máximo de vida útil : considera a *altura máxima* atuando sob a *taxa mínima* de crescimento do defeito.

Sendo um problema de máximos e mínimos, define-se a seguir as variáveis linguísticas que serão utilizadas para o cálculo das funções de associação:

$$M=\text{"altura máxima"}=\{1/\delta_{\text{sup}},\dots,0/\delta_{\text{inf}}\}$$

$$A=\text{"taxa máxima"}=\{1/\xi_{\text{sup}},\dots,0/\xi_{\text{inf}}\}$$

$$B=\text{"taxa mínima"}=\{1/\xi_{\text{inf}},\dots,0/\xi_{\text{sup}}\}$$

Os valores respectivos de  $\mu_M$ ,  $\mu_A$  e  $\mu_B$  são calculados com a expressão (6.8) e os valores extremos são obtidos com a expressão (6.9).

**EXEMPLO:**

O banco de dados da esfera PX211 contendo propano apresenta os valores da tabela (VI.2) para os 20 defeitos selecionados após a última medição periódica anual:

<b>Defeitos remanescentes na estrutura</b>	<b>Altura do defeito (mm)</b>	<b>Taxa de crescimento do defeito (mm/ano)</b>
<b>X</b>	$\delta$	$\xi$
x1	17	1.13
x2	19	4.52
x3	16	1.695
x4	12	2.26
x5	20	1.695
x6	15	5.65
x7	18	6.78
x8	11	0
x9	28	7.91
x10	28	5.65
x11	30	1.295
x12	30	1.13
x13	16	6.78
x14	16	8.475
x15	25.5	3.39
x16	20	7.345
x17	12	1.113
x18	15	1.017
x19	17	1.4125
x20	20	1.6995

Tabela VI.2 - Defeitos monitorizados com inspeções periódicas

Onde tem-se que para  $\delta_{\max}=30$ ,  $\delta_{\min}=11$ ,  $\xi_{\max}=8.475$  e  $\xi_{\min}=0$ , as funções de associação para M, A e B são calculadas com as seguintes expressões abaixo e apresentadas na tabela (VI.3).

$$\mu_M(x) = \frac{\delta - 11}{30 - 11} \quad (\text{altura máxima})$$

$$\mu_A(x) = \frac{\xi - 0}{8.475 - 0} \quad (\text{taxa máxima de crescimento})$$

$$\mu_B(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{taxa mínima de crescimento})$$

X	$\mu_M$	$\mu_A$	$\mu_B$	$\mu_M \wedge \mu_A$	$\mu_M \wedge \mu_B$
x1	0.316	0.133	0.867	0.136	0.316
x2	0.421	0.533	0.467	0.421	0.421
x3	0.263	0.2	0.8	0.2	0.263
x4	0.053	0.267	0.733	0.053	0.053
x5	0.474	0.2	0.8	0.2	0.474
x6	0.211	0.667	0.333	0.211	0.211
x7	0.368	0.8	0.2	0.268	0.2
x8	0	0	1	0	0
x9	0.895	0.933	0.067	<b>0.895</b>	0.067
x10	0.895	0.667	0.333	0.667	0.333
x11	1	0.153	0.847	0.153	0.847
x12	1	0.133	0.867	0.133	<b>0.867</b>
x13	0.263	0.8	0.2	0.263	0.2
x14	0.263	1	0	0.263	0
x15	0.763	0.4	0.6	0.4	0.6
x16	0.474	0.867	0.133	0.474	0.133
x17	0.053	0.131	0.869	0.053	0.053
x18	0.21	0.12	0.88	0.12	0.21
x19	0.316	0.167	0.833	0.167	0.316
x20	0.474	0.201	0.799	0.201	0.474

Tabela VI.3 - Cálculo das funções de associação

Utilizando a expressão (6.9) nas tabelas correspondentes obtém-se os valores de  $\mu_M(x^*)=0.895$  e  $\mu_M(x^*)=0.867$  representativos dos defeitos X9 e X12 respectivamente. A análise conclui que utilizando a taxa de crescimento e o valor da altura atual do defeito X9 será obtido o ponto mínimo a ser utilizado para calcular o tempo mínimo de vida útil do equipamento. Análise similar utiliza o defeito X12 para cálculo do tempo máximo de vida útil. Para poder calcular o tempo de vida útil o usuário conta com a ajuda do modelo matemático de *mecânica da fratura*, que embora forneça resultados conservadores, é utilizado pelos especialistas para o cálculo da geometria limite dos defeitos. No exemplo apresentado, a altura máxima admissível calculada pelo sistema INTEQ para admitir a convivência com defeitos durante a operação é de 47 mm, assim:

- Se o defeito X9 com uma altura de 28 mm cresce a uma taxa de 7.91 mm/ano, a vida útil mínima será de  $(47-28)/7.91=2.40$  anos.
- Se o defeito X12 com uma altura de 30 mm cresce a uma taxa de 1.13 mm/ano, a vida útil máxima será de  $(47-30)/1.13=15.04$  anos.

O resultado da análise depende do cálculo da função de associação  $\mu$ . A expressão 6.8 foi escolhida por ter sido calculada baseada na análise de vasos de pressão similares [36].

## VI.5.2 CÁLCULO DO PRAZO ÓTIMO PARA INSPEÇÃO FUTURA

O procedimento a seguir associa a incerteza do modelo matemático utilizado na MF com a incerteza do especialista em conviver com defeitos durante a operação. A incerteza do modelo de MF define a lista de defeitos a acompanhar onde os valores utilizados de tenacidade, geometria e tensões aplicadas apresentam uma grande margem de erro. O histórico do equipamento, as condições de operação e o meio agressivo atuante, fazem com que o engenheiro responsável pela inspeção estime um valor para a geometria limite ainda menor do que o calculado. O ponto ideal para a inspeção futura é a interseção da função de taxa de crescimento "mínima"  $\mu_A(x)$  com a função da geometria "admissível"  $\mu_M(x)$  estimada pelo engenheiro responsável. As variáveis linguísticas "mínimo" e "admissível", são representadas com as seguintes funções de associação:

$$\mu_M(x) = \frac{\frac{a1 - \delta_{sup}}{x} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (6.14)$$

$$\mu_A(x) = 1 - \frac{x}{\xi_{sup}} \quad (6.15)$$

onde **Tmin** e **Tmax** são os tempos mínimo e máximo de vida útil calculados com o procedimento descrito na seção anterior, **a1** corresponde a altura máxima "admissível" definida pelo usuário, e **x** é a variável que representa a taxa de crescimento do defeito. O valor de **x** no ponto de interseção define a taxa de crescimento a ser utilizada para calcular o prazo para inspeção futura com a seguinte expressão:

$$T_{insp} = \frac{a1 - \delta_{sup}}{x_{int\ erseção}} \quad (6.16)$$

#### EXEMPLO:

Em função dos resultados obtidos na seção anterior, a altura limite do defeito admissível foi limitada à 45 mm, com tempos de vida útil equivalentes a Tmax=15 e Tmin=2.4 anos respectivamente.

As funções de forma calculadas com as expressões 6.14 e 6.15 são:

$$\mu_M(x) = \frac{(45 - 30) - 2.4}{15 - 2.4} x$$

$$\mu_A(x) = 1 - \frac{x}{8.475}$$

fazendo  $\mu_M(x) = \mu_A(x)$ , calcula-se o ponto de interseção resolvendo a equação de segundo grau resultante:

$$1.487x^2 - 15x + 15 = 0$$

dos resultados obtidos,  $x_1=1.13$  e  $x_2=8.96$ , descarta-se o  $x_2$  por corresponder à valores negativos de funções de associação. A gráfico da figura (VI.3) mostra as funções de associação em função da taxa de crescimento de defeitos. A seta mostra o ponto de interseção calculado.

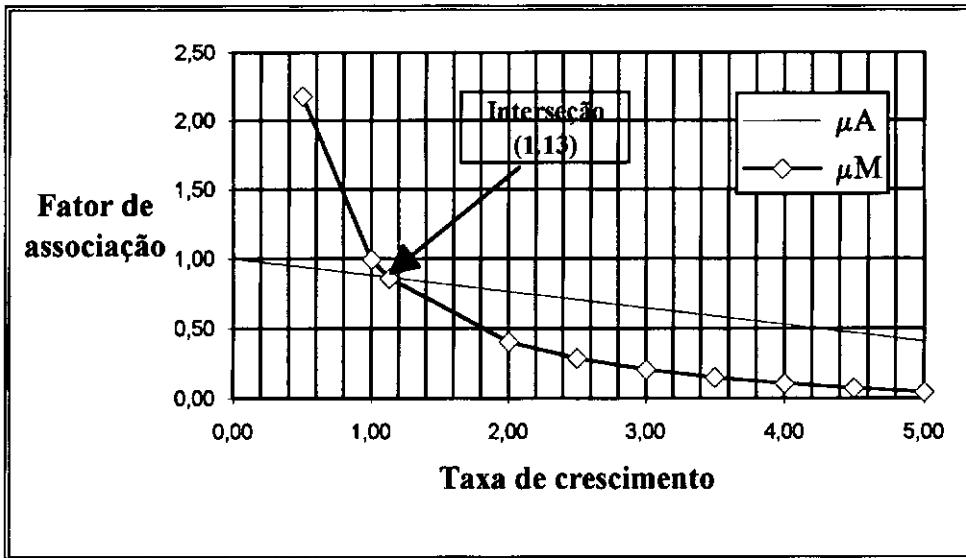


Figura VI.5 - Cálculo do ponto de interseção das funções  $\mu_M(x)$  e  $\mu_A(x)$

A expressão 6.16 pode ser utilizada a seguir para cálculo do prazo para inspeção futura:

$$T_{\text{insp}} = \frac{45 - 30}{1.13} = 13.27 \rightarrow 10 \text{ anos}$$

Observa-se que devido à estabilidade da esfera PX211 o prazo de inspeção futura corresponde ao prazo máximo estabelecido por norma para a inspeção do equipamento.

## VI.6. ANÁLISE DE RISCO COM MATRIZES "FUZZY"

Nesta seção aborda-se o problema de análise de risco de estruturas ou equipamentos utilizando conceitos "fuzzy". Os modelos tradicionais de análise de risco são baseados no cálculo numérico do grau de importância dos eventos associados, os quais são representados com fatores (ou pesos) que permitem calcular um fator de risco para a estrutura ou equipamento analisado. Quantificado o risco os engenheiros fazem uma avaliação detalhada, e baseados na experiência, eliminam eventos com o objetivo de diminuir o fator de risco até obter valores aceitáveis de acordo com as normas vigentes.

No entanto o risco é um conceito "fuzzy" pois um único número não é suficiente para representar na sua totalidade todos os estados, implicações e condições associadas a um dano específico. Por outro lado o ser humano executa uma avaliação qualitativa e não quantitativa na sua inferência para avaliar o risco de um sistema. Um modelo verbal com variáveis linguísticas e relações "fuzzy" é proposto por [36] e será utilizado no sistema para análise de risco de equipamentos em operação.

A análise de risco é baseada em três fatores: a *probabilidade* de ocorrência da falha; a *exposição* a fatores que produzam a falha; e as *consequências* de ocorrência de falha. O universo que viabiliza a utilização dos conceitos descritos acima é definido a seguir:

Exposição	$X=\{x_i\}$
Probabilidade	$Y=\{y_i\}$
Consequência	$Z=\{z_i\}$
Risco	$S=\{s_i\}$
	$i=1,2,\dots,7$

Os fatores de associação são:

- Exposição  $E = V_E = \{\mu_E(x_i)\}$
- Probabilidade  $P = V_P = \{\mu_P(x_i)\}$
- Consequência  $C = V_C = \{\mu_C(x_i)\}$
- Risco  $S = V_S = \{\mu_S(x_i)\}$

Onde  $V$  representa a variável linguística utilizada e  $\mu$  a função de associação. Com estas informações é possível calcular as correspondentes relações fuzzy associadas ao risco :

$$R_E = E \circ S$$

$$R_P = P \circ S$$

$$R_C = C \circ S$$

Se os fatores associados e o risco sofrem alterações:

$$\text{Exposição} \quad E = V_E \rightarrow E' = V_E'$$

$$\text{Probabilidade} \quad P = V_P \rightarrow P' = V_P'$$

$$\text{Consequência} \quad C = V_C \rightarrow C' = V_C'$$

então o risco pode ser avaliado da seguinte maneira:

$$S = (E' \circ R_E) \cap (P' \circ R_P) \cap (C' \circ R_C) \quad 6.17$$

As funções de associação de risco e as variáveis linguísticas "fuzzy" a ser utilizadas [36], são definidas na tabela (VI.4):

Variáveis Linguísticas	Função de associação						
	0	0	0.1	0.3	0.7	0.9	1
Alto	0	0	0.1	0.3	0.7	0.9	1
Médio	0	0.2	0.7	1	0.7	0.2	0
Baixo	1	0.9	0.7	0.3	0.1	0	0
Desconhecido	1	1	1	1	1	1	1
Indefinido	0	0	0	0	0	0	0
Mais ou menos alto	0	0	0.3	0.5	0.85	0.95	1
Muito alto	0	0	0	0.1	0.5	0.8	1
Provável	0	0.1	0.5	0.7	0.9	1	1
Pouco provável	1	1	0.9	0.8	0.5	0	0
Improvável	1	1	0.5	0.3	0.1	0.1	0

Tabela VI.4 - Variáveis linguísticas propostas para análise de risco

## VI.6.1 ANÁLISE DE RISCO DE EQUIPAMENTOS EM OPERAÇÃO

Em condições de emergência, o engenheiro de campo possui pouco tempo para decidir interromper a operação devido a defeitos detectados na estrutura. A utilização das variáveis linguísticas permite simplificar a relação dos parâmetros desconhecidos ou vagos que influenciam a análise a ser efetuada. Os fatores a serem utilizados na análise de risco com a metodologia proposta devem ser qualificados em função das restrições do problema a ser resolvido.

*Exposição (E):* A contaminação do equipamento pode ser permanente ou temporária onde o tempo de exposição da parede interna do equipamento com meios agressivos pode ocasionar a fratura frágil dos defeitos (modo de falha não analisada com a MF). Este mecanismo favorece o aparecimento de novas trincas que podem comprometer a estrutura analisada. O histórico do equipamento deve ser avaliado para obter informação correspondente à agressividade do meio.

*Probabilidade (P):* A tenacidade e/ou resistência do material podem variar consideravelmente com o equipamento operando fora da faixa de operação "normal" pre-estabelecida. O modelo de MF fornece a probabilidade de ocorrência de falha avaliando a proximidade do defeito até a sua condição limite. A probabilidade pode também ser definida pelo engenheiro em função da sua expectativa atual em relação as condições operacionais vigentes. Lembra-se que o termo probabilidade está relacionado com variáveis linguísticas e não com valores numéricos utilizados na análise convencional.

*Consequência (C):* dependendo do tipo de defeito a ser avaliado, as consequências podem ser altas, medias ou baixas. Risco de explosão ou perdas humanas são o tipo de consequência qualificadas como "altas" com as variáveis linguísticas utilizadas.

*Risco (S) :* As diversas combinações de E,P e C fazem com que o especialista dimensione qualitativamente o risco do equipamento. Os valores conhecidos de risco são armazenados em banco de dados e serão utilizados pelo sistema para avaliação do risco atualizado. Riscos *médios* ou *altos* determinam a necessidade de parada para inspeção e reparo do equipamento.

As ações corretivas adequadas sem interromper a operação podem fazer com que o risco de manter o equipamento em operação diminua. Aumentando o controle referente às condições operacionais e meios agressivos atuantes pode-se chegar a uma nova combinação de E,P e C onde a incógnita do problema é o fator risco S correspondente.

*EXEMPLO :*

Um vaso de pressão cilíndrico hipotético com propano está trabalhando à temperaturas inferiores a -15 oC (limite mínimo de operação por norma). Na temperatura de -20 oC foi consultado o sistema INTEQ e o defeito US\_115 de comprimento equivalente à 1230 mm e altura 10 mm foi classificado como "defeito a acompanhar". Na atual configuração, a análise de sensibilidade à mudanças de tenacidade do defeito fornece um valor de 79% em relação ao valor limite. A trinca superficial US\_115 foi classificada pelo sistema como defeito de operação do tipo "corrosão sob tensão". O índice de H<sub>2</sub>S e água e a quantidade de defeitos detectados no END de ultra-som externo evidenciam um elevado grau de contaminação por H<sub>2</sub>S. A fratura frágil pode ocasionar a explosão do equipamento, o qual não satisfaz ao critério de Leak-Before-Break (LBB). As dimensões consideráveis do defeito e a pouca segurança à variações de tenacidade exigem uma análise mais detalhada com retirada de amostragem para testes de resistência e CTOD, pois o sistema utiliza dados conservativos demais para chegar a uma solução mais apurada. A solução ideal seria refinar os dados e reavaliar o defeito com as rotinas de MF, mas o pouco tempo disponível para a tomada de decisão justifica a análise "fuzzy" de risco, baseado nas seguintes observações dos especialistas consultados - *devido ao "alto" índice de contaminação por H<sub>2</sub>S e a "probabilidade" de fratura frágil em função do resultado da análise pela MF, que classifica o defeito na região próxima ao limite, pode-se afirmar que as consequências de manter o equipamento operando podem ser "muito graves" e o risco, na atual situação é "alto"* - De acordo com a situação atual, obtém-se os seguintes valores a serem utilizados na análise:

Exposição	E="Alto"={0,0,0.1,0.3,0.7,0.9,1}
Probabilidade	P="Provável"={0,0.1,0.5,0.7,0.9,1,1}
Consequência	C="Muito alta"={0,0,0,0.1,0.5,0.8,1}
Risco	S="Alto"={0,0,0.1,0.3,0.7,0.9,1}

A seguir, o engenheiro responsável pela operação adota as seguintes medidas corretivas:

- (a) *Reduz a pressão de operação*
- (b) *Mantém as condições de operação estáveis, sob um estrito controle.*
- (c) *Elimina o H<sub>2</sub>S so equipamento*

As relações entre exposição e risco, probabilidade e risco, consequência e risco obtidas sob a condição inicial são calculadas a seguir:

$$R_E = E \circ S = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 1 \end{vmatrix}$$

$$R_P = P \circ S = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 1 \end{vmatrix}$$

$$R_C = C \circ S = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.8 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 1 \end{vmatrix}$$

Em função das ações corretivas tomadas pelo engenheiro de operação, a nova condição do sistema é a seguinte:

Exposição	E="Alto"	$\Rightarrow E'="Baixo"=\{1,0.9,0.7,0.3,0.1,0,0\}$
Probabilidade	P="Provável"	$\Rightarrow P'="Improvável"=\{1,1,0.9,0.8,0.5,0,0\}$
Consequência	C="Muito alta"	$\Rightarrow C'="Baixo"=\{1,0.9,0,0.7,0.3,0.1,0\}$

Surge nesse ponto, a dúvida entre os engenheiros de operação: continua operando sob as condições atuais, ou ordena a parada do equipamento para manutenção? O risco de continuar operando sob as condições atuais é então avaliado utilizando a expressão (6.17):

$$S=\{1,0.9,0.7,0.3,0.1,0,0\} \cap \{1,1,0.9,0.8,0.5,0,0\} \cap \{1,0.9,0,0.7,0.3,0.1,0\}$$

$$S=\{0,0,0.1,0.3,0.1,0,0\}$$

Convertendo os valores de S para a terminologia utilizada, observa-se em função da distribuição das funções de associação de S que o equipamento apresenta um risco "*mais ou menos baixo*", para as condições atuais mantidas. Conclui-se que o resultado da análise de risco justifica continuar operando com a produção diminuída até a próxima parada. Neste caso, a taxa de crescimento dos defeitos detetados deverá ser monitorada de 4 em 4 meses.

O exemplo apresentado, mostra que ao contrario da análise probabilística de risco, onde o fator de risco é representado com um número obtido em função de modelos que requerem um grande esforço do engenheiro e do computador, a avaliação de risco com modelos "fuzzy" utiliza os conceitos simples, baseados no raciocínio incerto utilizado pelos proprios especialistas.

A validação do modelo de avaliação de risco proposto neste trabalho deverá passar por severos ajustes das funções de associação e comparações com resultados práticos obtidos em situações similares. O modelo apresentado representa, com certeza, uma alternativa de solução atraente e muito menos trabalhosa do que os métodos convencionais utilizados, onde a qualidade dos resultados obtidos são sempre questionados na prática.

## CAPÍTULO VII CONCLUSÕES

Baseado na experiência adquirida ao longo deste trabalho, este capítulo contém recomendações para escolha da ferramenta ideal para aplicações de engenharia, sugestões para implementação e estruturação de arquiteturas "blackboard", e finalmente comentários sobre expectativas de utilização do sistema INTEQ.

### VII.1. ESCOLHA DA FERRAMENTA PARA SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO DE ENGENHARIA.

A utilização de ambientes híbridos de trabalho, como é o caso do NEXPERT OBJECT permite aproveitar diversas técnicas de encapsulamento, polimorfismo e hereditariedade na representação do problema. Outra vantagem de utilização de ambientes sobre as linguagens é a possibilidade de combinar estruturas de bancos de dados, programação orientada a objetos, bases de conhecimentos e algoritmos para idealizar e representar os diferentes tipos de conhecimento e informação necessários para atingir os objetivos propostos. Recomenda-se a utilização deste tipo de ferramenta para desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento na área de engenharia. A escolha da ferramenta deve ser realizada de acordo com os seguintes critérios:

*(a) Portabilidade:* A ferramenta deve possuir versões compatíveis para as diferentes plataformas de trabalho (computadores pessoais, estações de trabalho e mainframes). Limitar a aplicação à uma plataforma determinada reduz o número de usuários em potencial do sistema a ser implementado.

*(b) Recursos de programação:* Linguagens de programação ou ambientes baseados exclusivamente em regras ou frames estão ultrapassados e devem ser evitados, pois apresentam limitações nos mecanismos de inferência e interface com rotinas externas. Os ambientes de desenvolvimento de última geração oferecem recursos de programação orientada a objetos, interface com bancos de dados comerciais (Dbase, Ingres, Oracle), interface com linguagens algorítmicas (C, FORTRAN), e recursos de hipertextos, gráficos e mecanismos de explicação. Se a aplicação é dependente do tempo (controle de processo) o ambiente deverá contar com facilidades de representação de modelos, tratamento estatístico, simulação, geração dinâmica de gráficos (em função do tempo),

compactador de dados (adquiridos dos sensores), e representação gráfica dos objetos criados. A velocidade no processamento da informação e o tempo de resposta requerido também deverão ser levados em consideração.

*(c) Recursos de depuração e testes:* O programador no processo de depuração e testes deve ter condições de interromper a consulta a qualquer instante, localizar a regra e objeto analisado, alterar valores inferidos ou estratégias de solução. Outro recurso exigido é o mecanismo de gravação e execução (passo a passo) de consultas anteriores, que permite identificar os erros decorrentes da implementação dos erros decorrentes da má utilização do sistema.

*(d) Número de usuários:* A dispersão geográfica e a quantidade de usuários deve ser avaliada no processo de estudo de viabilidade técnico-econômica do sistema proposto. Normalmente, os ambientes de sistemas especialistas são "mono-usuários", fazendo com que o preço final do investimento varie consideravelmente em função do número previsto de usuários.

*(e) Retorno econômico:* Se a utilização do sistema ao longo do tempo não justifica o investimento de compra da ferramenta ideal, adotar as soluções mais baratas disponíveis (liguagens declarativas, ambientes baseados em regras).

O NEXPERT e o KEE são ambientes que satisfazem a maior parte dos requisitos listados. O preço destes produtos no Brasil (1993), gira em torno dos 14.000,00 dólares americanos. O G2 (US\$ 70.000,00) é um ambiente ideal para desenvolver sistemas em tempo real. Já se encontram em fase de desenvolvimento, ambientes integrados com inclusão de recursos para utilização de redes neuronais, análise estatística e probabilística, e utilização de processadores vectoriais e paralelos no processo de inferência.

O principal problema dos ambientes disponíveis na atualidade para aplicações de engenharia é que a parte algorítmica continua sendo tratada como rotinas externas. A passagem de parâmetros do algoritmo para a base é ineficiente, aumenta o tempo gasto na consulta e diminui a memória disponível. A integração de algoritmos e conhecimento em sistemas híbridos semelhantes ao INTEQ continua limitada ao tamanho, espaço de memória e velocidade requerida de processamento dos algoritmos correspondentes. Num futuro não muito distante, espera-se ter ferramentas que permitam dividir modelos matemáticos complexos de grande porte em sub-sistemas e integra-los com heurísticas obtidas de especialistas, permitindo que outros grupos interessados na sua utilização compartilhem junto com o modelo em questão, a experiência dos peritos que o idealizaram. O objetivo de este tipo de sistemas deverá, com certeza, ser a redução do tempo de análise e o aumento da qualidade de resultados obtidos por usuários não especialistas.

## VII.2. RECOMENDAÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DE ARQUITETURAS "blackboard".

A base de conhecimento é definida como sendo um conjunto de objetos, propriedades, regras de produção (conhecimento adquirido) e regras de controle (modificam a estratégia de solução). A utilização de arquiteturas do tipo "blackboard" exige cuidados adicionais por parte do programador, pois nem sempre existe uma definição clara entre a parcela de conhecimento genérica a ser definida na base "gerente", e as parcelas de conhecimento independentes encarregadas de resolver sub-problemas, representadas com bases chamadas "unitárias". O procedimento a ser descrito a seguir é fruto de inúmeras tentativas de aperfeiçoamento na construção "blackboard" do sistema INTEQ até a obtenção do modelo ideal. A sequência ordenada recomendada para implementação de um sistema baseado em conhecimento de arquitetura "blackboard" é a seguinte:

*(a) Criar uma base contendo a definição de todas as classes, objetos e propriedades a serem utilizadas pelo sistema:* concentrando a totalidade de definição do domínio numa única base, o programador evita erros de execução devido à duplicação de classes e objetos em BCU diferentes, facilita a gerência de informação no base "gerente", mantém os valores de propriedades inferidas nas bases unitárias consultadas na memória RAM, e permite a visualização total do domínio representado. *A base de conhecimentos de objetos* é a primeira a ser carregada na memória para consulta ou manutenção das bases de regras. A base OBJETOS contém a definição do domínio no sistema INTEQ.

*(b) Criar a base "gerente" com as regras de controle e inferência relacionadas com a interação das bases unitárias:* A gerência e manipulação do conhecimento ao longo da consulta pode ser feita através de menus interativos com o usuário. Dependendo do número de soluções possíveis, cada item do menu pode estar associado a um subproblema a ser resolvido (poucas combinações de solução), ou relacionado diretamente com a chamada das bases unitárias do sistema (muitas combinações de solução). Quando a aplicação permite quantificar as alternativas de solução, o programador cria ilhas de conhecimento associando o conjunto de bases unitárias necessárias para a solução de cada problema. Problemas complexos exigem inúmeras combinações que não podem ser quantificadas e representadas com menus interativos. Neste caso, a solução é construir a base gerente associando o menu à chamadas diretas às bases unitárias correspondentes, deixando por conta do usuário a definição da sequência de utilização dos mesmos. No caso do sistema INTEQ, o menu principal do da

base "gerente" foi construído em função das alternativas de solução de problemas ao longo do processo de inspeção do equipamento (Capítulo III). A base INTEQ é a base "gerente" do sistema INTEQ.

*(c) Criar as bases unitárias com a estrutura de regras necessária para a resolução de subproblemas independentes:* As bases unitárias do sistema compartilham a informação inferida e armazenada ao longo da consulta. Para rodar e testar as bases unitárias basta carregar na memória a base contendo a definição do domínio. Dependendo da complexidade do problema, as bases de conhecimento unitárias podem ser associadas em estruturas hierárquicas. Na medida em que o sistema cresce, é muito importante gerenciar a memória disponível. Descarregando as bases já avaliadas, libera-se memória para utilizar outras parcelas de conhecimento e diminuir o tempo gasto na execução ou implementação de novas estruturas. As bases MATERIAL, EQUIPAME, PLANT, HISTORIC, INSP, MFRAT e SOLDAGEM são as bases unitárias implementadas no sistema INTEQ.

*(d) Testar e validar as bases unitárias isoladamente:* Antes de adicionar a nova base unitária implementada à estrutura da base "gerente", o programador deve ter certeza de que os objetivos propostos foram todos cumpridos testando uma por uma as alternativas de solução.

*(e) Testar as opções da base "gerente":* Quando a base "gerente" descarrega uma base unitária, a estratégia de solução anterior (backward ou forward chaining) permanece na memória. Ao carregar a próxima base, a utilização da estratégia de solução anterior pode fazer com que o sistema adote estratégias de solução erradas, fazendo perguntas desnecessárias, tomando caminhos de solução inadequados e gerando resultados imprevisíveis. Muitas vezes a interligação de bases requer ajustes que permitam a sua utilização no conjunto. Quando uma base funciona isoladamente, mas não funciona em conjunto, é necessário implementar regras de controle adicionais tanto na base principal como nas unitárias.

*(f) Montar o mecanismo de explicações e ajuda do usuário:* A grande vantagem de sistemas baseados em conhecimento sobre os convencionais é o armazenamento dos caminhos de solução, que podem ser utilizados pelo programador para montar explicações de COMO? e PORQUE? o sistema infere as informações ao longo da consulta. Outro recurso utilizado é mostrar telas gráficas e hiper textos que ajudem o usuário na busca da informação solicitada pelo sistema. Durante a consulta o usuário pode responder "Não sei" (NOTKNOWN) às perguntas geradas. Neste caso, soluções alternativas devem ser previstas pelo programador para dar seqüência à análise. Um sistema "a prova de usuário" ganha a confiança do mesmo e incentiva a sua utilização. A implementação do mecanismo de explicações e ajuda do usuário é uma opção do programador. O dimensionamento do tempo gasto na sua implementação muitas vezes

não é levado em conta, e gera atrasos no cronograma estabelecido. Esta atividade deve ser realizada durante a fase de testes e validação do sistema.

Este tipo de arquitetura mostrou ser ideal para sistemas com interação de conhecimento, bancos de dados e algoritmos, como é o caso do INTEQ. A arquitetura aberta permite a inserção de módulos ao longo do tempo.

### **VIL.3 EXPECTATIVAS DO SISTEMA INTEQ**

No sistema INTEQ, foram aproveitados conceitos de análise de tensões, metalurgia, inspeção de equipamentos, e análise de risco para idealizar um sistema "híbrido" que permite a utilização de diversos formalismos de representação (bancos de dados, bases de conhecimentos, algoritmos) e a decomposição do problema genérico (avaliação da integridade física de equipamentos) em subproblemas, a serem resolvidos com diferentes combinações de estratégias e procedimentos ao longo de uma consulta.

A expectativa gerada em torno da sua utilização nas refinarias de petróleo é grande, pois paradas desnecessárias de equipamentos ocasionam a queda de produção, reparos desnecessários aumentam o custo e o tempo de indisponibilidade do equipamento e defeitos críticos não detectados ou não retirados, podem propagar e ocasionar explosões, mortes, poluição do meio ambiente ou no melhor caso a perda total do equipamento em questão. O perfil do usuário do sistema é a de um engenheiro ou técnico com vasta experiência na área de inspeção de equipamentos, mas com limitações no que se refere a análise pela mecânica da fratura, técnicas especiais de dimensionamento com ensaios não destrutivos e definição de procedimentos de soldagem. A resposta que o usuário precisa para dar continuidade ao processo deve ser fornecida em forma de laudos e relatórios que expliquem o raciocínio adotado e fundamentem as decisões sugeridas.

Deve-se no entanto salientar que o sistema INTEQ é um sistema de suporte e não de tomada de decisão. A sua utilização permite o acesso a parcelas de conhecimento rotineiras para o especialista, mas de grande utilidade para o engenheiro de manutenção da refinaria, interessado em colocar o equipamento em operação. As soluções sugeridas pelo sistema estão fundamentadas em normas, procedimentos consolidados e experiência de especialistas.

Existem dois níveis de conhecimento representados no sistema INTEQ:

(a) *Conhecimento consolidado*: Os especialistas utilizam este tipo de conhecimento na análise rotineira dos problemas que chegam das refinarias. A análise de resultados de ensaios não destrutivos (base INSP), a análise de defeitos pela mecânica da fratura (base MFRAT) e a geração de procedimentos de soldagem (base SOLDAGEM) contém

procedimentos consolidados que são utilizados na análise e solução dos problemas apresentados. A sua utilização requer a participação do usuário através de perguntas/respostas até obter a resposta esperada.

(b) *Conhecimento não consolidado*: Resultados de ensaios em materiais de equipamentos similares, resultados de pesquisas de tecnologias de ponta, o estudo do efeito do H<sub>2</sub>S na propagação de trincas e contaminação de equipamentos, a determinação do prazo para inspeção futura e cálculo da vida útil, a análise de risco do equipamento em operação, a categorização de defeitos múltiplos e outras áreas de interesse comum que estão ainda sendo testadas ou estudadas são representadas no sistema com hiper textos, e gráficos explicativos em forma de sugestões ao usuário. Este recurso permite divulgar os trabalhos de pesquisa dos diferentes setores da companhia e receber informações e críticas dos usuários do sistema que permitam avanços nas pesquisas correspondentes. Uma vez que o conhecimento for consolidado e validado pelos especialistas, o mesmo poderá ser formalizado e introduzido nas ilhas de conhecimento do sistema INTEQ.

A habilidade de aprender do sistema dependerá exclusivamente da capacidade da equipe de desenvolvimento em interagir com os usuários e especialistas ao longo do tempo.

#### **VII.4. ANÁLISE DE RISCO E TRATAMENTO DE INCERTEZAS**

A necessidade de análise de risco de equipamentos em operação no sistema INTEQ motivou o estudo de tecnologias utilizadas na engenharia de confiabilidade onde existem áreas que poderiam ser exploradas pela engenharia de conhecimento:

Na análise de árvore de falhas por exemplo, a importância da experiência do engenheiro de confiabilidade no processo de solução viabiliza a construção de um sistema baseado em conhecimento para reduzir o caminho de busca na determinação de cortes mínimos, caminhos críticos e análise da causa comum (os algoritmos utilizados não apresentam o rendimento esperado, pois a experiência dos especialistas se superpõe em vários aspectos ao cálculo numérico efetuado). Outra aplicação poderia ser a geração automática de árvores de falha em função do "lay-out" da planta industrial fornecida pelo usuário. Criando uma estrutura de banco de dados de árvores de falha de componentes utilizados na indústria em geral (bombas, tubulações, reatores), o sistema poderia aproveitar a experiência dos peritos disponíveis para fazer as associações correspondentes e construir a árvore em questão.

Um modelo para análise de risco de equipamentos para o sistema INTEQ foi apresentado no capítulo VI. A utilização de *matrizes "fuzzy"* podem ser estendida para análise de risco de sistemas em geral. Esta aproximação oferece um modelo para avaliar

o risco de um sistema em função das observações e experiência do especialista ao invés de adotar as aproximações probabilísticas convencionais, as quais exigem a idealização de modelos complicados, a manipulação de uma grande massa de dados e cálculos numéricos que demandam um grande esforço computacional.

As vantagens de utilização de modelos "fuzzy" são a diminuição do tempo de análise, a simplificação no processo de avaliação do risco e a consideração de fatores "vagos" ou "incertos" que influenciam a resposta e que normalmente são desprezados na análise convencional. A grande dificuldade na implementação do modelo "fuzzy" está na determinação e otimização das funções de associação baseados na informação obtida dos especialistas, os quais utilizam variáveis linguísticas que devem ser interpretadas e convertidas em números pelo engenheiro de conhecimento. Por outro lado, a utilização da regra de raciocínio incerto em modelos "fuzzy" exige a definição da condição atual do sistema com variáveis linguísticas que dependem da observação do usuário (O "grande" do usuário pode ser o "pequeno" do especialista).

O tratamento de incertezas no sistema INTEQ utiliza o modelo citado, o qual considera as incerteza dos modelos matemáticos utilizados e a do usuário, na interpretação dos resultados fornecidos.

Finalmente, espera-se ter abordado com a devida profundidade todos os aspectos relevantes das tecnologias envolvidas na presente pesquisa, de forma a motivar o desenvolvimento de novas aplicações da engenharia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOGARIN, J.A.B.e MESSINA, L.C.P, "INTEQ: protótipo de sistema baseado em conhecimento para avaliação da integridade estrutural de equipamentos", Conferência internacional sobre avaliação de integridade e extensão de vida de equipamentos industriais, 1993.
- [2] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME Boiler and pressure vessel code, section VIII, division 1, Ap.12, pp.641-645, New York, 1989.
- [3] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME Boiler and pressure vessel code, section VIII, division 2, Ap.9-3, pp. 598-603, New York, 1989.
- [4] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API standard 620: Recommended Rules for Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1990.
- [5] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API standard 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1990.
- [6] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME Pressure Piping Codes, section B31, 1988.
- [7] PRAGER, M., Fitness-for-service evaluation procedures for operating pressure vessels, tanks, and piping in refinery and chemical service , The Materials Properties Council, phase I report, draft No. 3, 1992.
- [8] GRAHAM, I., "Fuzzy logic in commercial expert systems - Results and prospects", Fuzzy Sets and Systems, vol. 40, pp 451-472, North-Holland, 1991.
- [9] WU, C.S., XU, J. e WU L., "A diagnostic expert system for weld defects", Engineering applications of Artificial Intelligence", vol. 4, pp 65-69, Great-Britain, 1991.
- [10] TURKSEN, I.B., "Fuzzy expert systems for IE/OR/MS", Fuzzy Sets and Systems, vol. 51, pp 1-27, North-Holland, 1992.
- [11] SINGER D., "A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis", Fuzzy Sets and Systems, vol. 34, pp 145-155, North-Holland, 1990.
- [12] ONISAWA, T., "An application of fuzzy concepts to modelling of reliability analysis", Fuzzy Sets and Systems, vol. 37, pp 267-286, North-Holland, 1991.
- [13] BARDOSSY, A. e BOGARDI, I., "Fuzzy fatigue life prediction", Structural Safety, vol. 6, pp 25-38, 1991.
- [14] BLOCKLEY, D.I., The nature of structural design and safety, Halsted Press, pp 111, 293-325, New York, 1980.
- [15] BROWN, C.B., "A fuzzy safety measure", Journal of the Engineering Mechanics Division, vol. 105, pp 855-872, 1979.

- [16] DAI, S. e MING-O, W. , "Application of fuzzy Mathematics and statistical testing method to the analysis of reliability of a pressure vessel", ASME Pressure Vessel and Piping Conference, Honolulu, 1989.
- [17] ZADEH, L., The concept of a linguistic variable and its application to aproximate reasoning., Information Science, 1975.
- [18] ZADEH, L., "The role of fuzzy logic in the manegement of uncertainty in expert systems", Fuzzy sets and systems, vol. 11, pp 199-228, 1983.
- [19] ZIMMERMANN, H.J., Fuzzy set theory and its applications, Kluwer-Nijhoff Publishing Company, Bostom, 1985
- [20] SIRIAM, D, Computer-aided engineering: the knowledge frontier, vol.1, Intelligent Engineering Systems Laboratory, MIT, Cambridge, MA, 1989.
- [21] COPPE, Sistema especialista TRADAN - Manual do sistema, COPPE-CIVIL, UFRJ, 1992.
- [22] BOGARIN, J.A.B. e EBECKEN, N.F.F., "A Coupled Expert System for Flexible Risers Design and Applications", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.4, No.1, pp 51-58, Great Britain, 1991.
- [23] NEURON DATA, NEXPERT OBJECT v2.0 Reference Manual, NEURON DATA INC, Pablo Alto, CA, 1990.
- [24] TUTHILL, G.S., Knowledge Engineering - Concepts&Practices for knowledge-based systems, Tab Books Inc., Blue Bridge Summit,PA, 1990.
- [25] REATH, P.G., Expert Systems - A software methodology for modern applications, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1990.
- [26] PETROBRÁS CONTEC, Norma 2414: Inspeção em serviço de esferas, PETROBRÁS, 1990.
- [27] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME Boiler and pressure vessel code, Section 5 - Nondestructive Evaluation, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1989.
- [28] BRAY, D.E. e STANLEY R.K., "Nondestructive evaluation", McGraw-Hill Book Company, New York, 1989.
- [29] KRAUTKRAMER, J. e KRAUTKRAMER, H., Ultrasonic testing of materials, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- [30] GALLAGHER, M.E. e TRAINOR, B.J., "Reliability and NDT - The Precititioners View", Reliability in nondestructive testing, vol. 13, pp. 37-44, Oxford, 1989.
- [31] BRYANT, L.E., Radiography and radiation testing, American Society for Nondestructive Testing, Vol. 3, Columbus-Ohio, 1985.
- [32] KLIR, G.J. e POLGER, T.A., Fuzzy sets, Uncertainty and Information, Prentice-Hall International Inc., USA, 1988.

- [33] AMMERAL, L., Interactive 3D Computer Graphics, John Wiley & sons, Essex, GB, 1988.
- [34] PETROBRÁS CONTEC, Norma 1738: Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados, PETROBRÁS, 1988.
- [35] SIMS, J.R., HANTZ, E KUEHN, K.E., "A basis for the Fitness-for-Service Evaluation of Thinned Areas in Pressure Vessels and Storage Tanks", ASME Conference on Pressure Vessels and Piping, New Orleans, 1992.
- [36] DAI, S. e WANG, M., Reliability analysis in engineering applications, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.

## ANEXO I EXEMPLOS DE CONSULTA AO SISTEMA

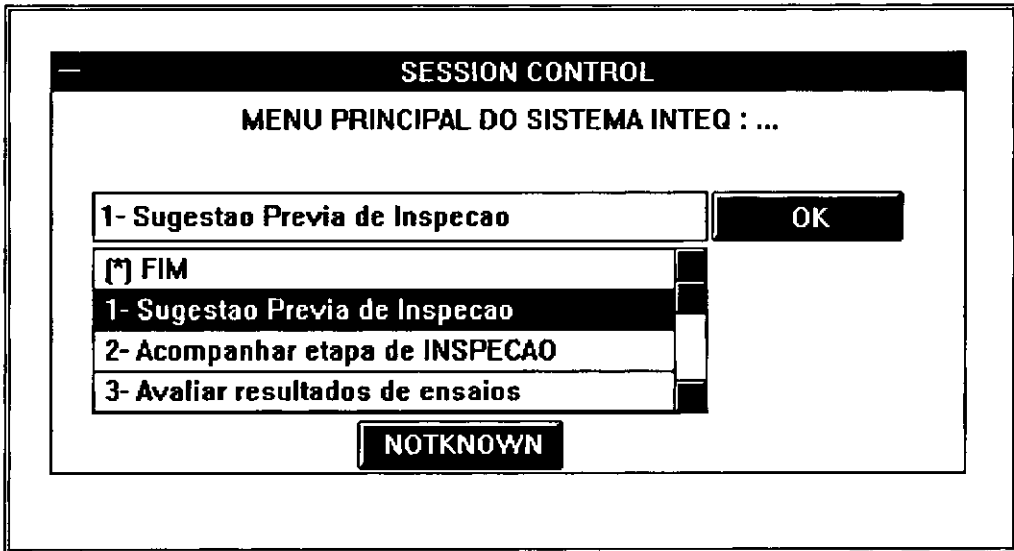


Figura A1: Menú principal do BCG do sistema INTEQ

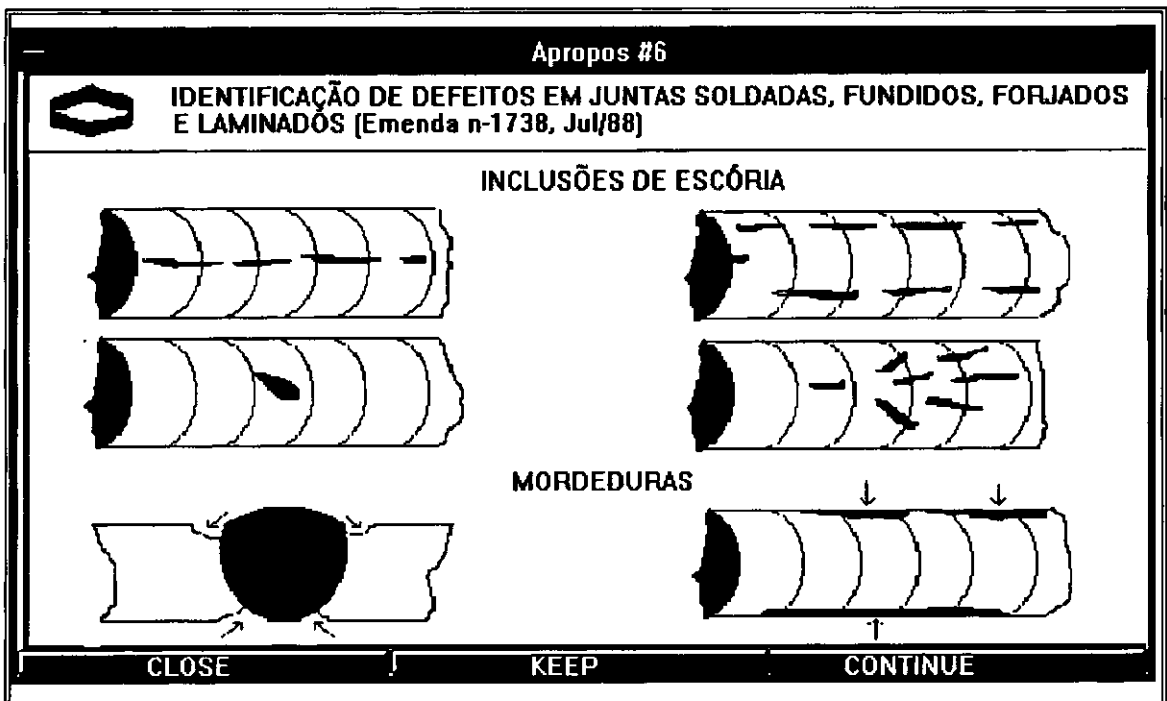


Figura A.2 : Tela gráfica gerada pelo sistema para identificação de inclusões e mordeduras

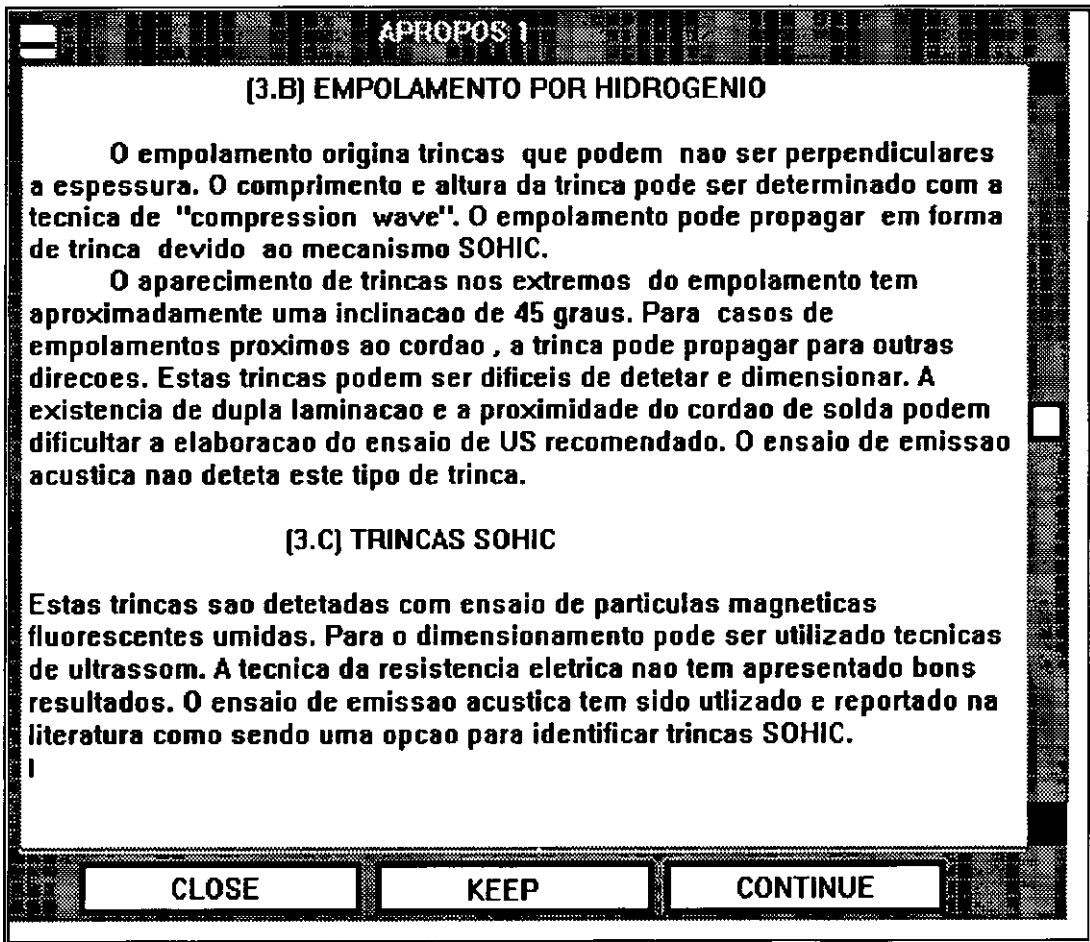


Figura A3 : Hipertexto gerado no sistema para sugestão de END para detecção de trincas geradas por H2 a baixas temperaturas.

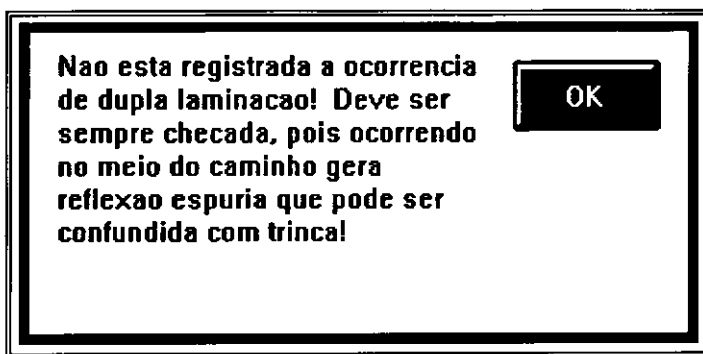


Figura A4: Tela de advertência durante a etapa de análise de resultados de inspeção. O sistema não detectou no histórico dupla laminação. Neste caso deve ser checada antes de proceder à detecção de defeitos.

SESSION CONTROL	
Qual a amplitude [%+dB] em relação a curva de referência da descontinuidade 1 ? [p.e., 100+4, 100, 50+2, 20, +2, -6, etc]	
100+4	OK
0	
NOTKNOWN	

Figura A5 : Tela de perguntas ao usuário. Identifica-se os campos de *perguntas* (Qual a amplitude...), o campo de *respostas do usuário* (100+4...), a tecla NOTKNOWN (utilizada para introduzir o status NOTKNOWN no processo de inferência) e a tecla OK (utilizada para confirmar a resposta e continuar a consulta). O campo de várias linhas logo abaixo do campo de respostas é utilizado para listar as opções de múltipla escolha. No exemplo da figura, a opção "0" é a única opção sugerida pelo sistema.

SESSION CONTROL	
Qual e a altura [mm] do defeito US_2 ? (Relatorio de US 001/88)	
	OK
25.76	
NOTKNOWN	

Figura A6: Tela de pergunta da altura do defeito número 2 detetado no ensaio de Ultrassom no relatório 001 de 1988. Neste caso a tecla NOTKNOWN ativa uma ilha de conhecimento que recomenda a técnica de US adequada para dimensionar a altura do defeito avaliado.

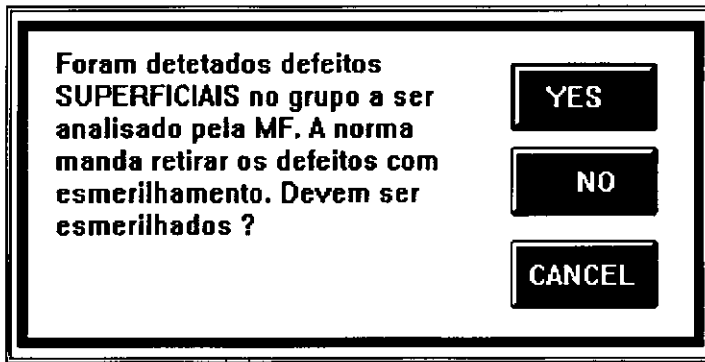


Figura A7: Esta tela mostra a interação do usuário no processo de tomada de decisões do sistema. A norma vigente manda esmerilhar os defeitos superficiais. Caso o engenheiro responsável opte por esmerilhar as trincas superficiais (YES), telas gráficas com as opções de esmerilhamento e adoçamento da cavidade serão mostradas, e as trincas serão avaliadas como cavidades. Caso a resposta seja NO, as trincas serão avaliadas de acordo com os procedimentos da mecânica da fratura (MF).

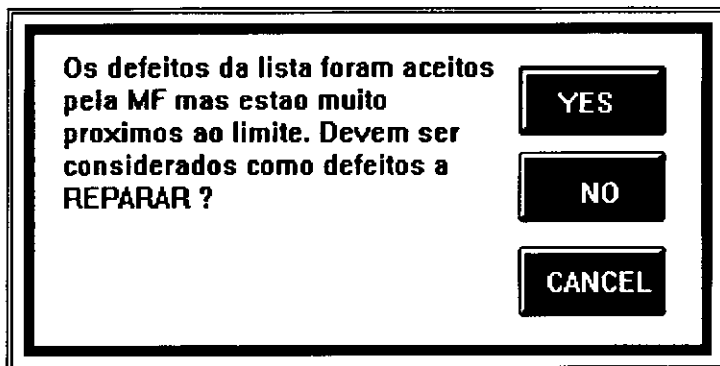


Figura A8: Esta tela é utilizada para eliminar defeitos da área de incertezas, na qual erros no dimensionamento, tenacidade ou tensões atuantes podem modificar consideravelmente o laudo do defeito (aprovado/reprovado). Esta pergunta passa a responsabilidade da tomada de decisão para o usuário. No caso de aceitar os defeitos (NO), os mesmos serão armazenados em banco de dados e acompanhados com medições periódicas para avaliação da taxa de crescimento, conforme procedimentos do capítulo VI. Reprovando os defeitos (YES), os mesmos deverão ser retirados do equipamento com a ação corretiva correspondente. Caso o equipamento estiver contaminado, o sistema toma automaticamente a decisão de retirar os defeitos deste tipo.

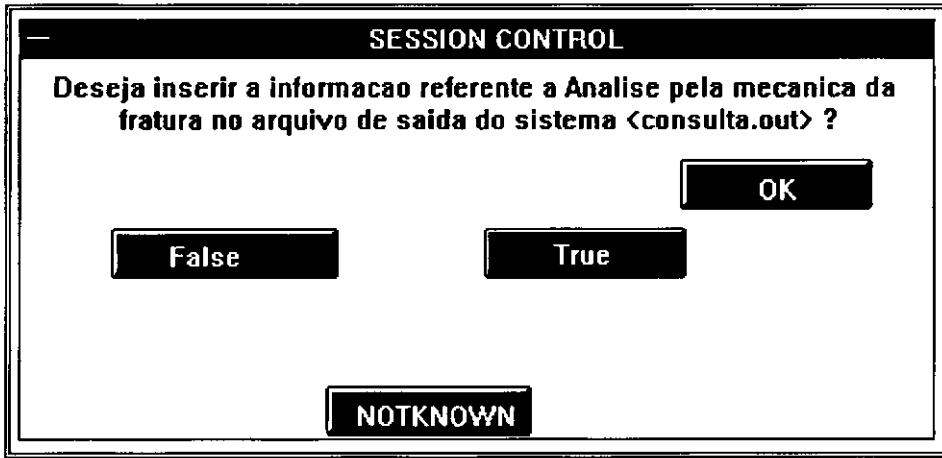


Figura A9: Esta tela aparece no final de cada BCU consultado. Pergunta ao usuário se a consulta realizada deve ser armazenada ou não no relatório final de consulta apresentado no anexo II. No exemplo da figura, o usuário consultou o BCU de mecânica da fratura e optará por inserir a informação no relatório CONSULTA.OUT. Neste relatório o sistema documenta e diferencia as ações tomadas pelo sistema das ações consequentes da interação com o usuário.

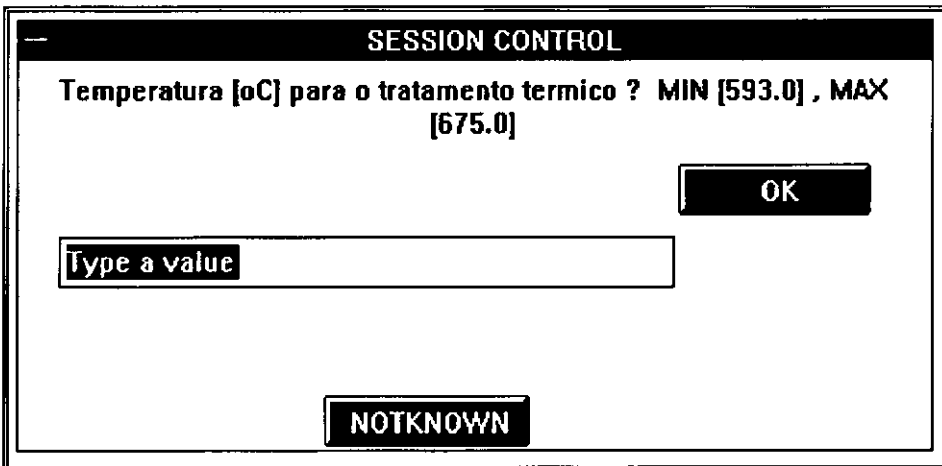


Figura A10: Esta tela é gerada no BCU de geração de procedimento de soldagem, onde após constatar a existência de defeitos a serem reparados com solda, o sistema calcula as temperaturas mínimas (593) e máximas (675) para efetuar o tratamento, e deixa por conta do usuário a definição final da temperatura a ser utilizada.

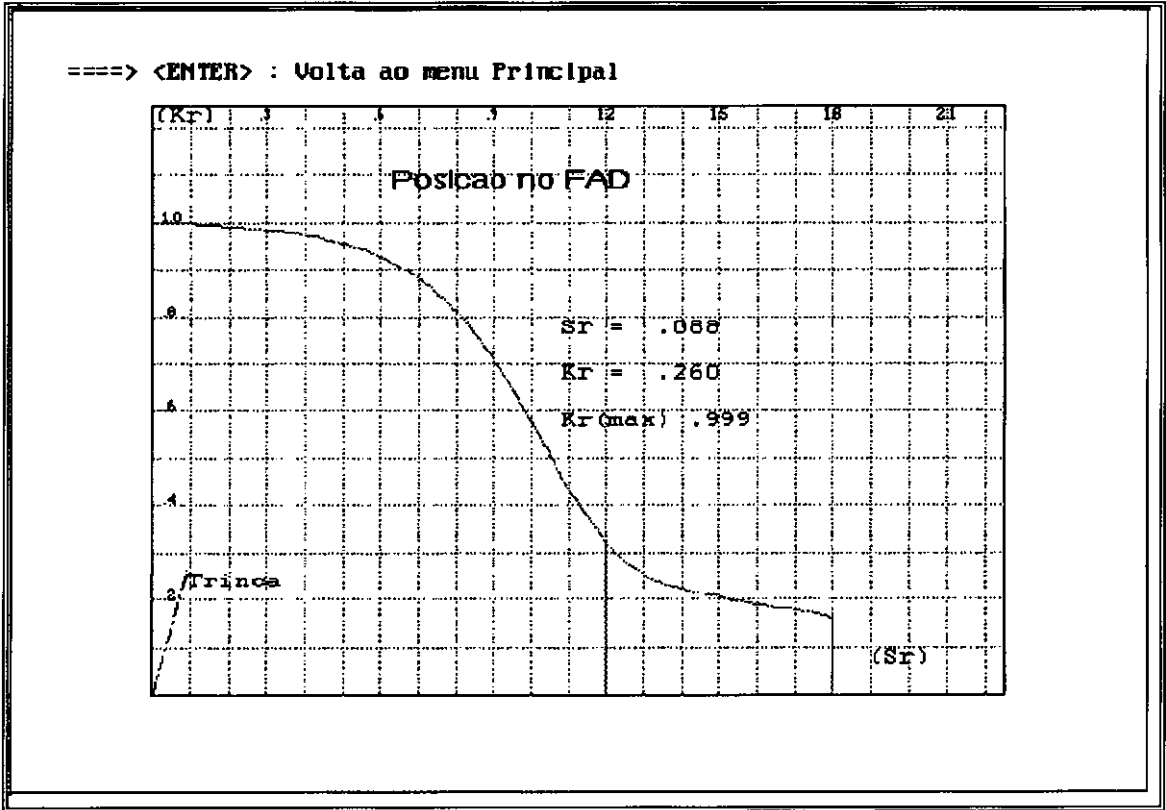


Figura A11 : Posição da trinca analisada em relação da curva FAD (Failure Assessment Diagram). Observa-se que a trinca em questão foi aprovada na avaliação pela mecânica da fratura.

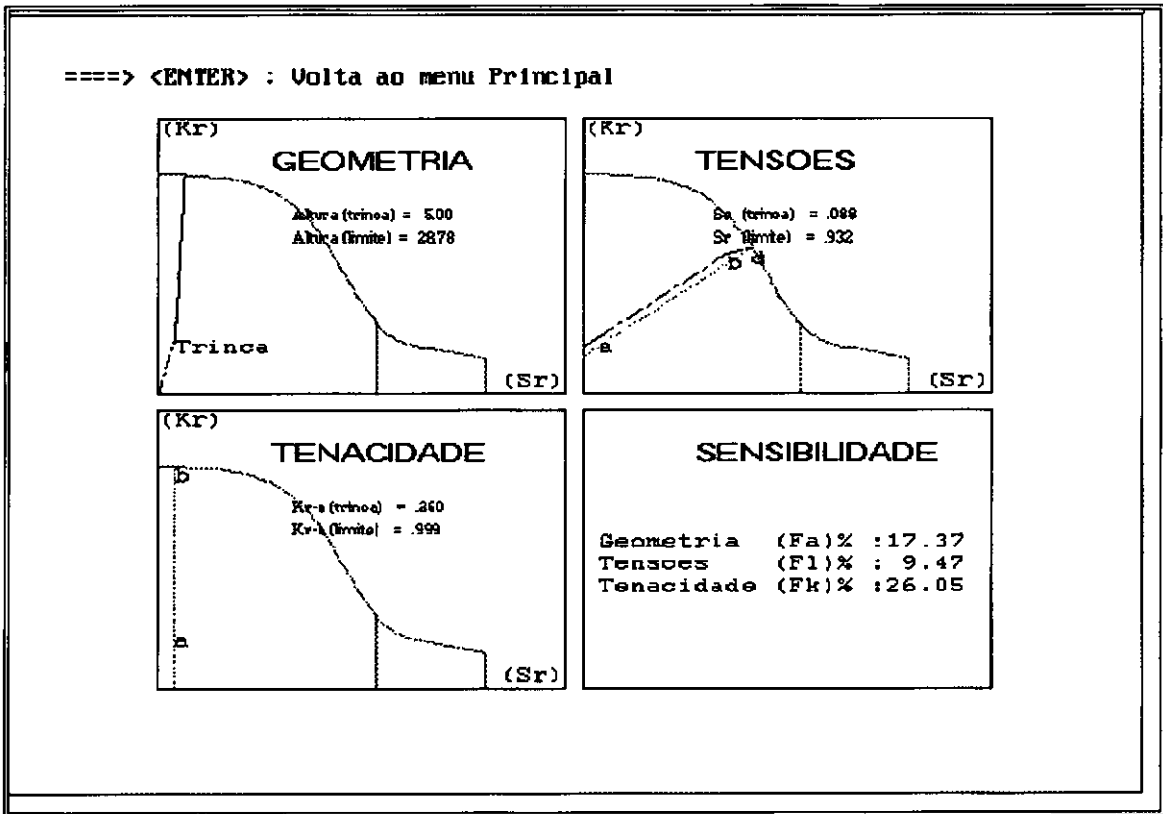


Figura A12: Tela de avaliação da sensibilidade do defeito à variações de tenacidade, tensões e geometria. No exemplo da figura, a fratura frágil poderá acontecer por causa da tenacidade (26.05%).

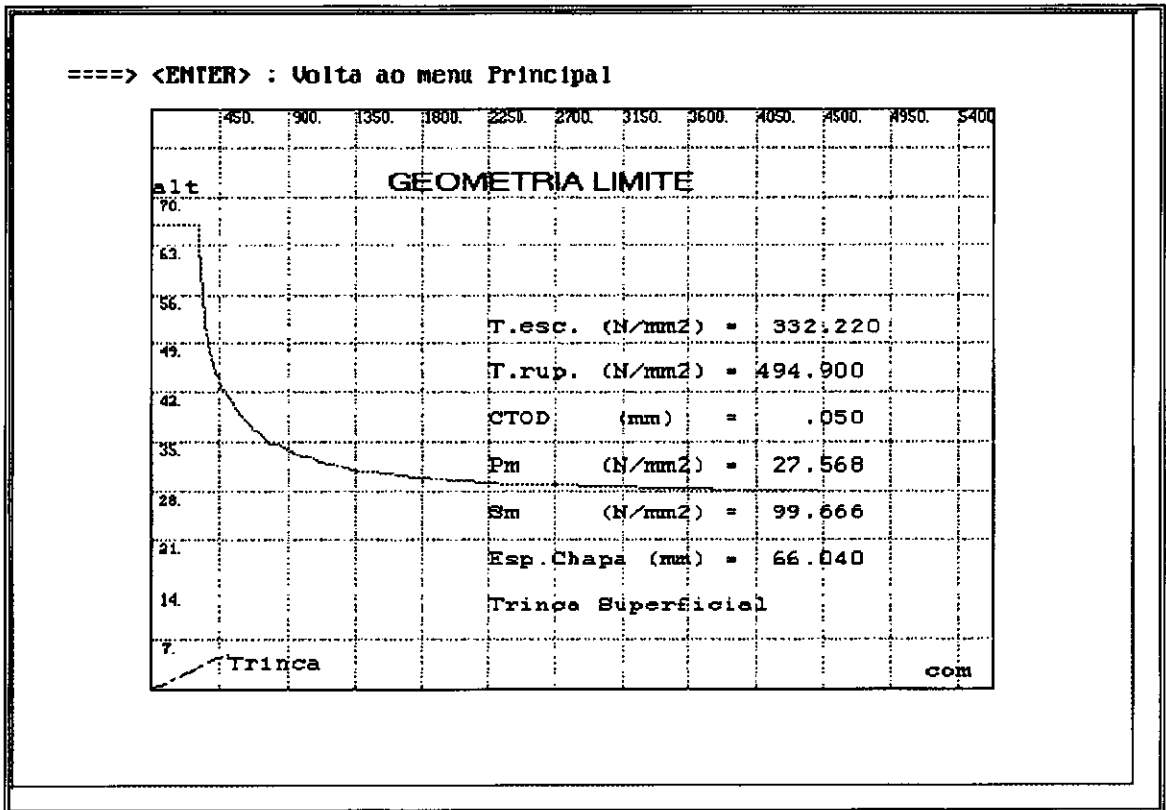


Figura A13 : Tela gerada pelo sistema de curva de geometria limite de defeitos

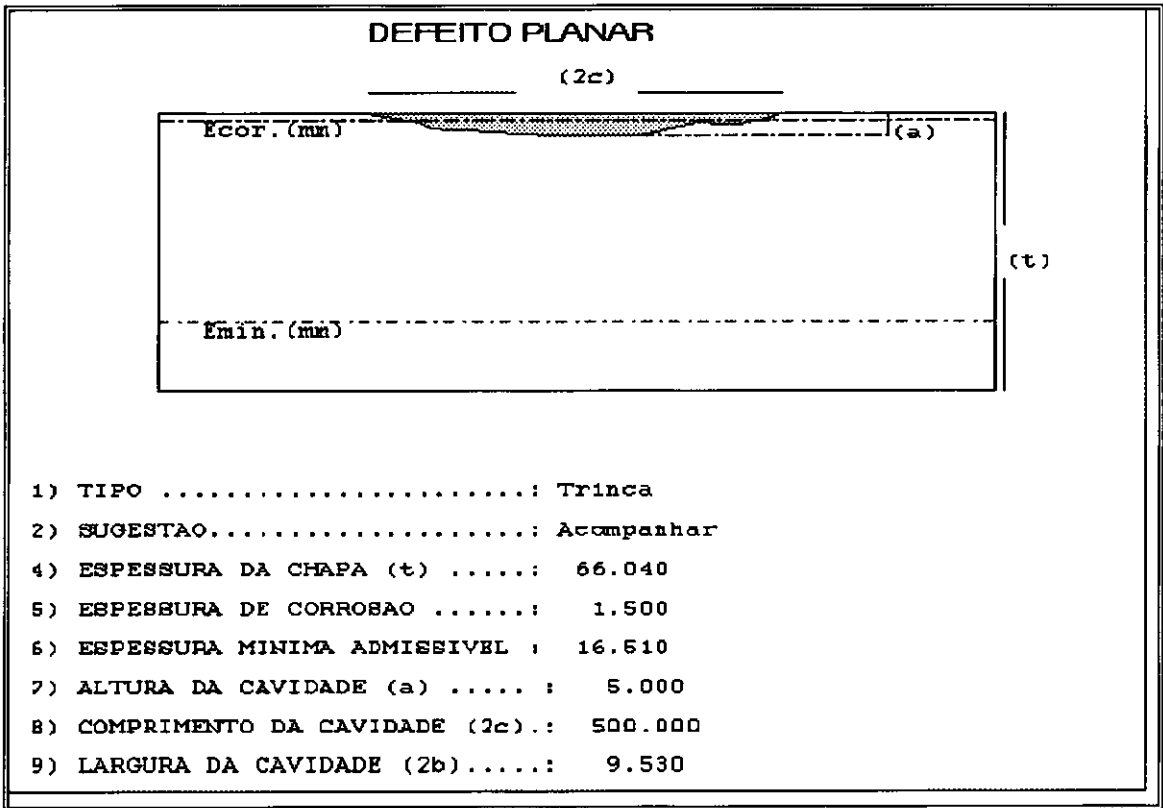


Figura A14: Tela de definição dos parâmetros de esmerilhamento de uma trinca

## ANEXO II

### RELATÓRIO DE CONSULTA GERADO PELO SISTEMA

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
 AVALIACAO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE EQUIPAMENTOS  
 INDUSTRIAIS  
 (relatorio obtido dos bancos de dados)

#### I - DADOS TECNICOS DO EQUIPAMENTO

1. IDENTIFICACAO .....: P205F
2. TIPO .....: Esferas
3. UNIDADE .....: RPBC
4. CONTEUDO .....: Propano
5. NORMA DE PROJETO .....: ASME-SecVIII-Div1
6. FABRICANTE .....: York
7. MATERIAL .....: BS1501gr32
8. ANO DE FABRICACAO .....: 1977
9. DIAMETRO .....(mm): 1844.0000
10. SOBRE-ESPESSURA DE CORROSAO (mm): 1.5000
11. ESPESSURAS (mm) :
  - Calota superior.....: 66.0400
  - Tropico superior.....: 67.6150
  - Tropico inferior.....: 69.4440
  - Equador (s/pernas).....: 69.0630
  - Chanfros das pernas.....: 73.6090
  - Calota inferior.....: 69.5200
12. PRESSAO DE PROJETO .....(MPa): 2.5500
13. PRESSAO DE TESTE HIDR...(MPa).....: 1.7250
14. TEMP. MINIMA DE OPERACAO (oC).....: -12.0000
15. TRATAMENTO TERMICO DE ALIVIO DE TENSOES : Sim

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F

## II - PROPRIEDADES DO MATERIAL

## A- Características do material na CHAPA

1. TENSÃO DE ESCOAMENTO...(MPa): 324.0000
2. TENSÃO DE RUPTURA .....(MPa): 505.0000
3. MÓDULO DE YOUNG .....(MPa): 205689.0000
4. COEF. DE POISSON .....: 0.3000
5. TIPO DE AÇO .....: BS1501gr32
6. CTOD MÍNIMO .....(mm): 1.7780
7. CURVA T<sub>x</sub>CTOD<sub>x</sub>RESISTÊNCIA.....: N tem
8. FONTE .....: MPC

## B- Características do material na SOLDA

1. TENSÃO DE ESCOAMENTO...(MPa): 324.0000
2. TENSÃO DE RUPTURA .....(MPa): 505.0000
3. MÓDULO DE YOUNG .....(MPa): 203456.0000
4. COEF. DE POISSON .....: 0.3000
5. TIPO DE AÇO .....: BS1501gr32
6. CTOD MÍNIMO .....(mm): 0.1021
7. CURVA T<sub>x</sub>CTOD<sub>x</sub>RESISTÊNCIA.....: N tem
8. FONTE .....: CENPES

## Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F

## III - RELACAO DE JUNTAS E BOCAIS DO DESENHO DE PLANIFICACAO

## A- JUNTAS DE COSTADO

- JUNTAS DA CALOTA SUPERIOR HORIZONTAIS.....: TA,TB
- JUNTAS HORIZONTAIS .....: H1,H2,H3,H4
- JUNTAS DE SUPORTE (PERNAS).....:
- S1,S2,S3,S4,S5,S6,S7,S8,S9,S10,S11,S12
- JUNTAS VERTICAIS SUPERIORES .....:
- SA,SB,SC,SD,SE,SF,SG,SH,SI,SJ,SK,SL,SM,SN,SO,SP,SQ,SR,SS
- JUNTAS VERTICAIS INFERIORES .....:
- IA,IB,IC,ID,IE,IF,IG,IH,II,IJ,IK,IL,IM,IN,IO,IP,IQ,IR,IS
- JUNTAS VERTICAIS CENTRAIS .....:
- CA,CB,CC,CD,CE,CF,CG,CH,CI,CJ,CK,CL,CM,CN,CO,CP,CQ,CR,CS,CT,CU,CV,  
CX,CZ
- JUNTAS DA CALOTA INFERIOR HORIZONTAIS.....: FA,FB

## B- CONEXOES

- Identificacao na planta .....: CX2 na calota SUP
- Disposicao .....: LESTE
- Diametro .....(pol): 4
- Espessura da solda..(mm): 66.0400
  
- Identificacao na planta .....: CX1 na calota SUP
- Disposicao .....: OESTE
- Diametro .....(pol): 4
- Espessura da solda..(mm): 66.0400

## C- BOCAS DE VISITA

- Identificacao na planta .....: BV2 na calota INF
- Diametro .....(pol): 20
- Espessura da solda..(mm): 69.5200
  
- Identificacao na planta.... : BV1 na calota SUP
- Diametro .....(pol): 20
- Espessura da solda..(mm): 66.0400

## D- BOCAIS DE PRODUTO

- Identificacao na planta.... : BP1 na calota INF
- Diametro .....(pol): 18
- Espessura da solda..(mm): 69.5200

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
**SUGESTOES DO SISTEMA INTEQ PARA RELATORIO PREVIO DE INSPECAO**  
 (relatorio obtido da opcao 1 do menu principal)

As recomendacoes deste relatorio podem ser utilizadas pelo usuario para gerar o relatorio de inspecao aproveitando a informacao contida no historico do sistema INTEQ.

- Sendo o material do equipamento ferromagnetico, recomenda-se inspecao superficial de PM fluorescentes umidas. Caso nao seja possivel PM , fazer LP.
  - O equipamento apresenta sinais de contaminacao por H<sub>2</sub>S. Fazer avaliacao da taxa de crescimento dos defeitos. Nao podem ser tomadas decisoes a partir da MF.
  - Espessura da chapa (66.04 mm ) superior a 38 mm. Existe o risco de tensoes elevadas atuando em chapas grossas. Atencao com as trincas.
  - Espessura da chapa (66.04 mm ) superior a 51 mm. Havendo necessidade de ensaio radiografico , recomenda-se RAIOS-X .
  - Espessura da chapa (66.04 mm ) superior a 51mm. Em meios agressivos existe a possibilidade de surgimento de trincas internas de operacao nos extremos dos empolamentos e inclusoes. Verificar empolamentos.
  - Devido a contaminacao por H<sub>2</sub>S do equipamento, a norma N-2414 recomenda a inspecao INTERNA e EXTERNA com PM em 100% das soldas.
  - Nos casos de contaminacao por H<sub>2</sub>S ou grande numero de defeitos de operacao no ensaio de PM, fazer exame complementar de US em 100% das soldas das calotas SUP/INF, 100% das conexoes e 25% das demais soldas.
  - Radiografar as discontinuidades reprovadas. Por norma, os defeitos reprovados na radiografia devem ser removidos.
- => Lista de regioes afetadas em funcao da morfologia dos defeitos detetados na inspecao passada :
- cachorros.referencia = h1,h2
  - cavidades.referencia = SB
  - trincas\_remanescentes.referencia = FB,H3IDIE
  - reparos\_efetuados.referencia = CF
  - dupla\_laminacao.referencia = h3,h4
  - reducao\_de\_espessura.referencia = H2CGCH
  - escoria.referencia = TA

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
 AVALIACAO DE RESULTADOS DE ENSAIOS  
 (relatorios obtidos da opcao 3 do menu principal)

A avaliacao de resultados de ensaios realizada pelo sistema ira gerar, dentre os 3 grupos seguintes de relatorios, aqueles que foram considerados durante a consulta:

### 1 - RESUMO DE ENSAIO DE PM

- . mostra o numero de DEFEITOS SUPERFICIAIS INTERNOS E EXTERNOS considerados;
- . apresenta tabela com o NUMERO DE DEFEITOS POR JUNTA.

### 2 - RESUMO DE ENSAIO DE US

- . podera mostrar o LAUDO DE US DOS DEFEITOS detetados pelo sistema - e daqueles acrescentados pelo usuario durante a reclassificacao;
- . idem para as DESCONTINUIDADES RELEVANTES;
- . podera mostrar o LAUDO DE US DAS DESCONTINUIDADES NA CHAPA;
- . podera mostrar o LAUDO DE US DOS DEFEITOS NAS CONEXOES;
- . podera mostrar o LAUDO DE US DAS DESCONTINUIDADES NAS CONEXOES;
- . podera mostrar os "POSSIVEIS DEFEITOS" (considerados defeitos pela norma, mas que nao receberam laudo "reprovado" no ensaio) (podem ser reclassificados pelo usuario como defeitos);
- . podera mostrar os "QUASE DEFEITOS" (nao sao defeitos pela norma, mas estao a menos de 2 mm abaixo do comprimento limite de aceitacao) (podem ser reclassificados pelo usuario como defeitos);
- . podera mostrar os "NAO-DEFEITOS" (nao sao defeitos pela norma, mas receberam laudo "reprovado" no ensaio) (podem ser reclassificados pelo usuario como defeitos);
- . podera mostrar as "POSSIVEIS DESCONTINUIDADES RELEVANTES" (consideradas relevantes por criterio de relevancia, mas que nao receberam laudo de "recomendacao de ensaio complementar") (podem ser reclassificadas como relevantes pelo usuario);
- . podera mostrar as "DESCONTINUIDADES NAO-RELEVANTES" (aquelas que receberam laudo "recomendacao de ensaio complementar", mas que nao atenderam ao criterio de relevancia) (podem ser reclassificadas como relevantes pelo usuario);
- . podera mostrar as "MAIORES DESCONTINUIDADES DE COSTADO" (lista das descontinuidades de costado que nao foram consideradas relevantes) (podem ser reclassificadas como relevantes pelo usuario);
- . podera mostrar o NUMERO DE DEFEITOS POR JUNTA (com a identificacao de cada defeito e qual a SUPERFICIE MAIS PROXIMA);

. podera mostrar o NUMERO DE DESCONTINUIDADES RELEVANTES POR JUNTA (com a identificacao de cada descontinuidade relevante e qual a SUPERFICIE MAIS PROXIMA).

### 3 - RESUMO DE ENSAIO RADIOGRAFICO

. podera mostrar o LAUDO DE RX DOS DEFEITOS analisados no ensaio radiografico

- com eventual reclassificacao feita pelo usuario;
- . idem para o LAUDO DE RX DAS DESCONTINUIDADES RELEVANTES;
- . podera mostrar os "POSSIVEIS REPROVADOS" (descontinuidades reprovadas pela norma, mas que nao receberam laudo "reprovado" no ensaio) (podem ser reclassificados pelo usuario como reprovados, quando entao aparecerao no laudo como reprovado\*);
- . podera mostrar os "NAO REPROVADOS" (descontinuidades aprovadas pela norma, mas que receberam laudo "reprovado" no ensaio) (podem ser reclassificados pelo usuario como reprovados, quando entao aparecerao no laudo como reprovado\*);
- . podera mostrar os "NAO CHECADOS" (descontinuidades ainda nao checadas pelo sistema) (podem ser reclassificados pelo usuario como reprovados, quando entao aparecerao no laudo como reprovado\*).

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
P205F - LAUDO DE US  
ENSAIO DE 20/05/88  
DEFEITOS ENCONTRADOS NO CASCO (JUNTAS E/OU CHAPAS)

Foram detetados 2 defeitos com amplitudes acima da curva de referencia.

DEF	LOCALI- ZACAO	L A U D O U S			LAUDO
		AMPLI- TUDE	COMPRI- MENTO (mm)	PROFUN- DIDADE (mm)	
1	H1 SASB	100+4	1250	11	aprovado
2	H2 IKIL	100	3000	0	reprovado

P205F - LAUDO DE US  
 ENSAIO DE 20/05/88  
 DESCONTINUIDADES RELEVANTES ENCONTRADAS NO CASCO

Foram detetadas 1 descontinuidades entre a curva de 50% e a curva de referencia.

=====					
DEF	LOCALI-	L A U D O U S			
No	ZACAO	AMPLI-	COMPRI-	PROFUN-	LAUDO
		TUDE	MENTO	DIDADE	
		(mm)	(mm)	(mm)	
=====					
4	IJ	50+4	123	0	aprovado
=====					

P205F - LAUDO DE US  
 ENSAIO DE 20/05/88  
 DEFEITOS ENCONTRADOS NAS SOLDAS DAS CONEXOES

DEFEITO No	LOCALI- ZACAO	L A U D O U S			LAUDO
		AMPLI- TUDE (mm)	COMPRI- MENTO (mm)	PROFUN- DIDADE (mm)	
3(EXTERNA)	BP1	+2	456	23	exame compl

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
P205F - LAUDO DE US  
ENSAIO DE 20/05/88  
RELACAO DE POSSIVEIS DEFEITOS

=====					
DEF	LOCALI-	L A U D O U S			
No	ZACAO	AMPLI-	COMPRI-	PROFUN-	LAUDO
		TUDE	MENTO	DIDADE	
			(mm)	(mm)	
=====					
1	H1	100+4	1250	11	aprovado
	SASB				
=====					
3	BP1	+2	456	23	exame compl
=====					

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
P205F - LAUDO DE US  
ENSAIO DE 20/05/88  
RELACAO DE POSSIVEIS DESCONTINUIDADES RELEVANTES

DEF	LOCALI- ZACAO	L A U D O U S			LAUDO
		AMPLI- TUDE	COMPRI- MENTO (mm)	PROFUN- DIDADE (mm)	
4	IJ	50+4	123	0	aprovado

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
P205F - LAUDO DE US  
ENSAIO DE 20/05/88  
RELACAO DAS MAIORES DESCONTINUIDADES NO COSTADO  
(dentre as nao consideradas relevantes)

DEF	LOCALI- ZACAO	L A U D O U S			LAUDO
		AMPLI- TUDE	COMPRI- MENTO (mm)	PROFUN- DIDADE (mm)	
4	IJ	50+4	123	0	aprovado

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
P205F  
ENSAIO DE 20/05/88  
NUMERO DE DEFEITOS POR JUNTA (COSTADO)

JUNTA	DEFS/ JUNTA	IDENTIFICACAO DOS DEFEITOS (SUPERFICIE MAIS PROXIMA)
H2_IKIL	1	002 (I)
H1_SASB	1	001 (I)

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
P205F

ENSAIO DE 20/05/88

NUMERO DE DESCONTINUIDADES RELEVANTES POR JUNTA (COSTADO)

JUNTA	DESC/ JUNTA	IDENTIFICACAO DAS DESCONTINUIDADES RELEVANTES (SUPERFICIE MAIS PROXIMA)	
IJ	1		004 (1)

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
ANALISE DA MECANICA DA FRATURA DE DEFEITOS DETETADOS NA  
INSPECAO

(relatorio obtido da opcao 4 do menu principal)

Os defeitos a serem analisados pela MF sao divididos em tres grupos

(a) DEFEITOS A REPARAR : Sao os defeitos que foram reprovados pela MF ou pelo usuario. Devem ser removidos do equipamento e registrados no historico. Os defeitos com acao corretiva "ANALISAR" sao trincas em equipamentos contaminados que dependem de ensaios de CTOD para poderem ser analisados pela MF; estas trincas nao foram analisadas (por opcao do usuario), mas devem ser reparadas de acordo com procedimentos especificos para meios agressivos, como e o caso do H2S.

(b) DEFEITOS A ACOMPANHAR : Sao os defeitos que foram aprovados pela MF, mas estao muito proximos (+-30%) do limite. Como o erro de medicao do ensaio de US atinge a casa dos 30%, o ideal seria confirmar as geometrias com ensaio complementar. Este tipo de defeitos pode ficar no equipamento, fazendo medicoes periodicas (1/ano) da sua geometria.

(c) DEFEITOS A IGNORAR : Sao defeitos que estao muito abaixo do limite da MF e que podem ficar na estrutura. Se nao houver defeitos da classe (b), registrar o maior defeito para comparar as suas medidas na proxima inspecao.

LAUDO DA MECANICA DA FRATURA

(A) DEFEITOS A REPARAR

nao tem

(B) DEFEITOS A ACOMPANHAR

DEFEITO US\_1 [Trinca]

- ESPESSURA (Mec.da Fratura).....: 66.0400
- REFERENCIA.....:
- LOCALIZACAO.....: costado Na\_solda
- COMPRIMENTO.....: 1250.0000 mm
- LARGURA.....: 0.0000 mm
- ALTURA.....: 32.0000 mm
- PROFUNDIDADE.....: SUPERFICIAL
- REGIAO.....: H1SASB
- ACAO CORRETIVA.....: Acompanhar
- PONTO NA CURVA FAD (Sr,Kr): 0.15146,0.72162

## (C) DEFEITOS A IGNORAR

## DEFEITO US\_3\_60E\_BP1 [Trinca]

- ESPESSURA (Mec.da Fratura).....: 69.5200
- REFERENCIA.....:
- LOCALIZACAO.....: bocal Na\_solda
- COMPRIMENTO.....: 456.0000 mm
- LARGURA.....: 0.0000 mm
- ALTURA.....: 34.0000 mm
- PROFUNDIDADE.....: SUPERFICIAL
- REGIAO.....: BP1
- ACAO CORRETIVA.....: Ignorar
- PONTO NA CURVA FAD (Sr,Kr):. 0.10793,0.42594

## DEFEITO US\_2 [Trinca]

- ESPESSURA (Mec.da Fratura).....: 67.6150
- REFERENCIA.....:
- LOCALIZACAO.....: costado Na\_solda
- COMPRIMENTO.....: 3000.0000 mm
- LARGURA.....: 0.0000 mm
- ALTURA.....: 25.7600 mm
- PROFUNDIDADE.....: SUPERFICIAL
- REGIAO.....: H2IKIL
- ACAO CORRETIVA.....: Ignorar
- PONTO NA CURVA FAD (Sr,Kr)...: 0.13066,0.36275

Tue\_19/10/1993 SISTEMA INTEQ - P205F  
SUGESTAO DE PRATICA DE SOLDAGEM  
(relatorio obtido do item 5 do menu principal)

O procedimento especificado a seguir e resultado da analise realizada no sistema INTEQ. A utilizacao dos parametros de soldagem sugeridos sao de exclusiva responsabilidade do USUARIO.

#### A) METAL DE BASE

- Especificacao .....: BS1501gr32
- Faixa de espessura..(mm)...: > 64 mm
- Espessura da chapa .(mm)..: 69.0000

#### B) TECNICA DE SOLDAGEM

- Avanco .....: 231-264,117-128
- Filetado .....: Sim
- Oscilacao .....: 2.5x diametro do eletrodo
- Oscilado .....: -
- Martelamento .....: -

#### C) PRE-AQUECIMENTO

- Temperatura .....(oC): 125.0000
- Temperatura minima .....(oC): 107.0000
- Temperatura max.interpasses .(oC): 250.0000
- Tecnica .....: Chuveiro Oxiacetilenico - Manter com manta durante o esfriamento.

#### D) CARACTERISTICAS ELETRICAS

- Amperagem .....(A): 110-115,125-130
- Corrente .....: CC
- Polaridade .....: (-)
- Voltagem .....(V): 21-22,22-23

#### E) METAIS DE ADICAO

- Especificacao .....: AWS A5.5
- Classe .....: E60xx
- Fluxo .....: -
- Tensao minima de escoamento.: 345.0000 (MPa)
- Tensao minima de ruptura.....: 425.0000 (MPa)
- Diametro do eletrodo....(mm)....: 3.25,4.0
- Marca Comercial .....: Simaouro50

**F) TRATAMENTO TERMICO**

- Taxa minima de aquecimento ...: 80.98 oC / h
- Taxa minima de resfriamento.....: 95.71 oC / h
- Tempo .....: 130.6200 minutos
- Temperatura.....: 600.0000 oC
- Temperatura Minima .....: 593.0000 oC
- Temperatura Maxima .....: 675.0000 oC
- Tecnica.....: -