

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - CPGEC

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO DE
FISSURAS EM CONCRETO ARMADO

Lucília Maria Bernardino da Silva

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - CPGEC, como parte dos requisitos para a obtenção do título
de *Mestre em Engenharia*

Área de Concentração : Construção

Porto Alegre

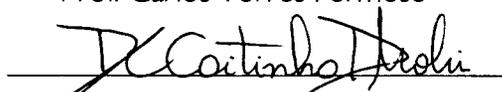
1996

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientadores:



Prof. Carlos Torres Formoso



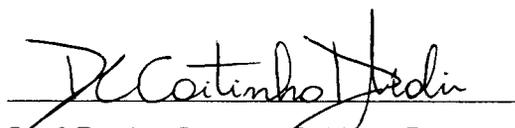
Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Banca Examinadora:

Prof. Hélio Adão Greven, Dr. pela Universidade Hannover

Prof. Enio José Pazini Figueiredo, Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Ruy Alberto Cremonini, Dr. pela Universidade de São Paulo



Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Coordenadora do Curso de Pós-Graduação

Porto Alegre, novembro de 1996.

Aos meus pais.
Ao Júlio, Letícia e Renata.

Agradecimentos

Ao Professor Carlos Torres Formoso, pela orientação, dedicação e valiosas contribuições ao longo do trabalho.

À Professora Denise Dal Molin, pela orientação, incentivo e esforço pessoal proporcionado. Por sua participação efetiva durante todo o trabalho, transmitindo seus conhecimentos e experiência profissional.

Ao Professor Ronaldo Duarte, por sua importante participação no trabalho, transmitindo seus conhecimentos e experiência profissional.

À Professora Beatriz Leão, pela indispensável colaboração e receptividade.

Aos Professores Enio Pazini Figueiredo e Cláudio Rodolfo Petrucci, pela importante contribuição ao trabalho.

Aos Engenheiros Anibal Knijnik, Mauro Touguinha de Oliveira e Humberto Pessil Soares, pela receptividade e efetiva colaboração prestada.

Ao colega Adriano Costa, meu especial agradecimento pelo empenho, dedicação e amizade demonstrada ao longo do trabalho.

Aos colegas Daniela Fischer, Márcia Sperb, Marcelo Kipper da Silva, Juliano Rodrigues Gimenez e, especialmente, à Elisabeth Vieira Pessoa, pela inestimável colaboração.

A todos os colegas do NORIE, pelo incentivo, apoio e amizade demonstrada ao longo destes anos de convivência.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento do trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE QUADROS.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiv
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
I INTRODUÇÃO.....	I
1.1 Importância do uso de sistemas especialistas no diagnóstico de fissuras concreto armado	1
1.2 Sistemas especialistas.....	3
1.3 Objetivos da pesquisa.....	5
1.4 Hipótese da pesquisa.....	5
1.5 Estrutura do trabalho.....	6
1.6 Delimitações do trabalho.....	7
2. DIAGNÓSTICO DE FISSURAS EM CONCRETO ARMADO (CA).....	9
2.1 O problema da fissuração em CA.....	9
2.2 A tarefa de diagnóstico de fissuras em CA.....	9
2.3 Principais causas associadas à fissuração do CA.....	11
2.3.1 Falhas ligadas ao projeto, à execução e ao uso inadequado da estrutura.....	12
2.3.2 Falhas ligadas a ataques químicos, corrosão e reação álcali-agregado.....	13
2.3.3 Falhas devidas a variações térmicas ou no teor de umidade do concreto.....	15
2.4 Configurações típicas de fissuras abordadas pelo EDIFICAR.....	15
3 MÉTODO DE PESQUISA.....	30
3.1 Métodos utilizados para desenvolvimento de SE.....	30
3.2 Novas abordagens e tendências no desenvolvimento de SE.....	33
3.3 Descrição do método utilizado para o desenvolvimento do EDIFICAR.....	34

3.3.1 Fase conceitual.....	37
3.3.1.1 Avaliação do domínio de conhecimento.....	37
3.3.1.2 Definição dos usuários e identificação dos limites do domínio.....	40
3.3.1.3 Disponibilidade de especialistas.....	41
3.3.2 Fase de aquisição de conhecimento.....	42
3.3.2.1 Técnicas de aquisição de conhecimento.....	45
3.3.2.2 Descrição das técnicas de aquisição utilizadas durante o desenvolvimento do EDIFICAR.....	48
3.3.3 Fase de implementação do EDIFICAR.....	53
3.3.4 Ferramentas para representação de conhecimento.....	54
3.3.4.1 Escolha da ferramenta utilizada para implementação do EDIFICAR.....	56
3.3.5 Representação de conhecimento.....	57
3.3.5.1 Redes semânticas.....	58
3.3.5.2 Enquadramentos ou <i>frames</i>	59
3.3.5.3 Programação orientada a objeto.....	60
3.3.5.4 Regras.....	61
3.3.5.5 Técnicas de representação de conhecimento utilizadas no EDIFICAR.....	62
3.3.6. Mecanismo de inferência	63
4 MODELO DO CONHECIMENTO.....	65
4.1 Resolução humana de problemas.....	65
4.1.1 Tipos de conhecimento.....	66
4.2 O conhecimento especializado.....	67
4.3 Tipos de SE.....	68
4.3.1 SE para diagnose.....	70
4.4 Tipos de modelagem.....	71
4.5 O modelo do conhecimento.....	75
4.5.1 Estratégias utilizadas para a resolução do problema.....	78

4.5.1.1 Fissuração em lajes.....	80
4.5.1.2 Fissuração em lajes em balanço.....	93
4.5.1.3 Fissuração em vigas.....	96
4.5.1.4 Fissuração em pilares.....	99
5 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO.....	103
5.1 Arquitetura do sistema.....	103
5.2 Representação do domínio de conhecimento.....	104
5.2.1 Estrutura do domínio: classes e instâncias.....	104
5.2.2 <i>Slots</i>	105
5.2.3 Base de regras.....	106
5.3 Mecanismo de inferência utilizado no EDIFICAR.....	107
5.4 Interface.....	108
6 VALIDAÇÃO DA APLICAÇÃO.....	116
6.1 Avaliação de SE	116
6.1.1 Verificação e validação de SE.....	117
6.1.2 Métodos utilizados na verificação e validação de SE.....	119
6.1.3 Validação da interface com o usuário.....	120
6.2 Métodos utilizados no processo de avaliação do EDIFICAR.....	122
6.2.1 Validação informal do protótipo.....	123
6.2.2 Validação da base de conhecimento.....	123
6.2.2.1 Validação de fissuras em lajes.....	127
6.2.2.2 Validação de fissuras em vigas.....	129
6.2.2.3 Validação de fissuras em pilares.....	132
6.2.2.4 Validação de fissuras em lajes em balanço.....	134
6.2.3 Análise dos resultados da validação da base de conhecimento.....	135
6.2.4 Demonstração do protótipo para especialistas externos.....	136

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	137
7.1 Avaliação das fases de desenvolvimento do protótipo.....	137
7.1.1 Fase conceitual.....	137
7.1.2 Fase de aquisição de conhecimento.....	138
7.1.3 Fase de desenvolvimento do modelo.....	138
7.1.4 Fase de implementação do protótipo.....	139
7.1.5 Fase de validação.....	140
7.2 Conclusões finais.....	141
7.3 Sugestões para novos trabalhos.....	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142

LISTA DE FIGURAS

3.1 Principais fases do desenvolvimento do sistema EDIFICAR	37
3.2 Rede semântica para o elemento fissura.....	58
3.3 Estrutura orientada a objeto representando a classe ELEMENTOS.....	61
4.1 Árvore representativa da base de conhecimento para o elemento laje	76
4.2 Árvore representativa da base de conhecimento para o elemento laje em balanço.....	76
4.3 Árvore representativa da base de conhecimento para o elemento viga	7
4.4 Árvore representativa da base de conhecimento para o elemento pilar	77
4.5 Trecho de árvore de decisão para lajes que apresentam fissuras paralelas à armadura	80
4.6 Trecho da árvore de decisão representativa de fissura paralela à armadura, em lajes, na face superior	82
4.7 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes com fissuras paralelas à armadura, na face inferior	84
4.8 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes com fissuras em forma de mapeamento	86
4.9 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes com fissuras ao longo da armadura, nas duas direções, na face superior.....	87
4.10 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes apresentando fissuras ao longo da armadura, nas duas direções, na face inferior	88
4.11 Árvore de decisão representativa de lajes com fissura ao longo de eletrodutos	89
4.12 Árvore de decisão representativa de lajes com fissura nos cantos	89
4.13 Árvore de decisão representativa de lajes com fissuras em torno de aberturas	90

4.14	Árvore de decisão representativa de lajes com fissuras características de comportamento deficiente frente aos esforços de flexão	91
4.15	Trecho da árvore de decisão representativa de lajes com fissura na face superior, próxima ao apoio	92
4.16	Trecho da árvore de decisão representativa de lajes em balanço com fissura transversal	94
4.17	Árvore de decisão representativa de lajes em balanço apresentando fissura longitudinal, próxima ao apoio	95
4.18	Árvore de decisão representativa de lajes em balanço com fissura longitudinal, na face inferior e no meio do vão	96
4.19	Árvore de decisão para vigas com fissura ao longo da armadura longitudinal.....	97
4.20	Árvore de decisão representativa de vigas com fissuras de cisalhamento	99
4.21	Trecho da árvore representativa de pilares com fissuras transversais	100
4.22	Trecho árvore de decisão representativa de pilares com fissuras longitudinais	101
4.23	Árvore de decisão representativa de pilares com fissuras horizontais no trecho central.....	102
5.1	Arquitetura do sistema Edificar	103
5.2	Árvore hierárquica do sistema EDIFICAR.....	105
5.3	Tela na qual são apresentadas instruções ao usuário do sistema	109
5.4	Tela principal do sistema, através da qual o usuário seleciona o assunto a consultar	110
5.5	Tela que apresenta as configurações mais comuns em lajes	110
5.6	Exemplo de pergunta utilizada pelo sistema em uma sessão de consulta.....	111
5.7	Tela final na qual o sistema fornece o diagnóstico da fissura ao usuário.....	113
5.8	Explicação fornecida pelo sistema EDIFICAR para a regra Laje IB	113
5.9	Linha de raciocínio fornecida pelo sistema EDIFICAR para a regra Laje IB.....	114
5.10	Tela contendo resumo para consulta, abordando o assunto retração térmica,	

no sistema EDIFICAR	115
5.1.1 Tela contendo sugestões de medidas para prevenir problemas ligados à retração.....	115
6.1 Percentuais correspondentes às configurações validadas, considerando-se os elementos estruturais abordados no protótipo.....	124
6.2 Percentuais correspondentes às configurações validadas em lajes.....	125
6.3 Percentuais correspondentes às configurações validadas em lajes em balanço.....	125
6.4 Percentuais correspondentes às configurações validadas em vigas.....	126
6.5 Percentuais correspondentes às configurações validadas em pilares.....	126

LISTA DE QUADROS

2.1 Fissuras por assentamento plástico	17
2.2 Fissuras por dessecação superficial	18
2.3 Fissuras por movimentação de formas	19
2.4 Fissuras por retração térmica	20
2.5 Fissuras por retração hidráulica ou por secagem	21
2.6 Fissuras por cobrimento insuficiente	22
2.7 Fissuras por corrosão da armadura	23
2.8 Fissuras por eletrodo	24
2.9 Fissuras por comportamento deficiente frente aos esforços originados por momentos volventes	24
2.10 Fissuras por movimentação térmica	24
2.11 Fissuras por reações expansivas	25
2.12 Fissuras por incêndio	26
2.13 Fissuras por falha no projeto estrutural	27
2.14 Fissuras por falha na execução e por sobrecarga	29
3.1 Forma de avaliação dos atributos essenciais para o domínio de fissuração em CA (SLAGLE & WICK, 1988).....	39
3.2 Forma de avaliação dos atributos desejáveis para o domínio de fissuração em CA (SLAGLE & WICK, 1988).....	40
3.3 <i>Frame</i> genérica para fissura	60
3.4 Instância de fissura por dessecação superficial	60
6.1 Casos de lajes com fissuras paralelas à armadura	127
6.2 Casos de lajes com fissuras na direção da armadura	127
6.3 Casos de fissuras em torno de aberturas em lajes	127

6.4 Casos de fissuras próximas ao apoio, na face superior da laje	128
6.5 Casos de fissuras nos cantos de lajes, formando triângulos	128
6.6 Casos de fissuras saindo dos cantos de lajes, como bissetrizes	128
6.7 Casos de fissuras na direção de eletrodutos	128
6.8 Casos de fissuras paralelas à armadura, em vigas	129
6.9 Casos de fissuras transversais à armadura, em vigas	130
6.10 Casos de fissuras transversais à armadura, com abertura variável	130
6.11 Casos de fissuras helicoidais em vigas	131
6.12 Casos de fissuras inclinadas em vigas	131
6.13 Casos de fissuras no topo de pilares	132
6.14 Casos de fissuras transversais em pilares	132
6.15 Casos de fissuras longitudinais em pilares	133
6.16 Casos de fissuras longitudinais, próximas ao apoio de balanços	134
6.17 Casos de fissuras transversais em balanços	134

LISTA DE ABREVIATURAS

CA - concreto armado

CBR - *Case Based Reasoning*

CCA - *Client-Centred Approach*

EC - engenheiro de conhecimento

IA - inteligência artificial

KADS - *Knowledge Acquisition and Documentation Structuring*

KEATS - *The Knowledge Engineering's Assistent*

SBR - sistema baseado em regras

SE - sistema especialista

RESUMO

As degradações que ocorrem em edificações podem desencadear problemas patológicos. A fissuração do concreto armado é um destes problemas e seu diagnóstico é, até certo ponto, complexo, envolvendo uma quantidade relativamente grande de fatores.

O estudo dos problemas patológicos é muito importante na formação e aprimoramento técnico dos profissionais ligados à área, podendo trazer reflexos positivos na manutenção da qualidade das edificações.

A presente pesquisa propõe o desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista para diagnóstico de fissuras em concreto armado, denominado *sistema EDIFICAR* (sistema Especialista para o Diagnóstico de Fissuras em Concreto Armado).

O sistema foi concebido para auxiliar profissionais ligados à construção civil na resolução de problemas relativos à fissuração do concreto armado, quando não houver a possibilidade de consulta a um especialista. O sistema foi concebido, também, para desempenhar a função de treinamento, contribuindo para a qualificação destes profissionais e de estudantes, nesta área de conhecimento.

Espera-se obter importantes benefícios com o desenvolvimento do sistema, que pode ser utilizado como ferramenta de apoio à decisão, facilitando o acesso ao conhecimento especializado e garantindo o armazenamento deste conhecimento.

ABSTRACT

The degradations that occur in buildings can cause pathological problems. The fissuration of reinforced concrete is one of these problems and its diagnosis is, to a certain extent, complex, involving a relatively large number of factors.

The study of pathological problems is very important in the training and technical improvement of the professionals linked to the area, possibly bringing about positive results in the maintenance of the quality of buildings.

The present research aims to develop a prototype of expert system for diagnosis of fissures in reinforced concrete, called *EDIFICAR system* (sistema Especialista para Diagnóstico de Fissuras em Concreto Armado).

The system was conceived to help professionals linked to building construction in solving problems related to the cracking of reinforced concrete, when there is no possibility of consulting an expert. The system was also conceived to have, as secondary function, the training, contributing towards the qualification of these professionals and of students in this field of knowledge.

One expects to obtain important benefits with the development of the system which can be used as a supporting tool in the decision making process, making easier the access to expert knowledge and securing the storage of this knowledge.

1 INTRODUÇÃO

1.1 A importância do uso de sistemas especialistas no diagnóstico de fissuras em concreto armado

As edificações são construídas para desempenhar inúmeras funções, fundamentais ao desenvolvimento da sociedade, devendo suprir algumas necessidades básicas do usuário, como moradia, trabalho, educação, entre outras.

Pode-se dizer que uma das principais funções de uma edificação é isolar o ambiente interno das condições externas de temperatura, protegendo seus ocupantes das intempéries (RICHARDSON, 1991). Para que o edifício tenha um desempenho adequado deve, principalmente, ser estanque, estável, funcional, durável, não devendo apresentar custos de execução e manutenção demasiadamente elevados.

A habitação, seus elementos e componentes estão sujeitos a uma grande variedade de ações devidas a fenômenos de origem natural ou à própria utilização do edifício (SOUZA, 1983). CÁNOVAS (1977) compara a obra a um ser vivo, por estar submetida à ação de vários elementos como o calor, umidade, vento, geadas e por suportar ações mecânicas que causam fadiga e que podem originar a ocorrência de danos à estrutura.

Com a incidência destas ações, as edificações tendem a se degradar e desencadeiam-se inúmeros problemas patológicos que comprometem o seu desempenho satisfatório, ocasionando transtornos ao usuário.

Um dos problemas que pode ser verificado nas construções é a fissuração do concreto armado (CA). As fissuras, além de ocasionarem problemas quanto à durabilidade da obra, comprometem a estética da edificação e podem afetar psicologicamente o usuário, pois sua presença normalmente tende a ser associada à idéia de risco quanto à estabilidade estrutural da obra.

A área da engenharia que estuda as causas, manifestações ou sintomas e as conseqüências das falhas que ocorrem nas construções é denominada patologia das edificações. O desenvolvimento da patologia das edificações está intimamente ligado à qualidade.

De acordo com HELENE (1985), o processo de produção e uso de uma estrutura compreende cinco etapas distintas: (i) planejamento e concepção; (ii) projeto e especificações;

(iii) seleção e recepção de materiais e componentes elaborados fora do canteiro; (iv) execução, propriamente dita; e (v) utilização da edificação.

A incidência de processos de degradação pode estar relacionada não apenas à ação do meio natural e às solicitações a que os edifícios estão submetidos mas também, segundo DAL MOLIN (1988), ao baixo nível de controle de qualidade realizado em cada uma das etapas do processo construtivo, citadas anteriormente.

Para a implantação de um programa de prevenção de patologias em CA, deve-se buscar obter um controle adequado da qualidade de todas as atividades desenvolvidas ao longo do processo da construção civil (DAL MOLIN & CAMPAGNOLO, 1989).

A qualidade dos materiais, a qualidade do planejamento dos detalhes e a qualidade da execução exigem do profissional ligado à área, o conhecimento das diversas formas de deterioração possíveis e de suas causas (JOHNSON, 1973).

Portanto, uma das tarefas mais importantes do especialista em patologia das edificações consiste no diagnóstico de fissuras em CA. Após a identificação das causas geradoras do problema, o especialista é capaz de recomendar as medidas corretivas apropriadas a cada caso específico e retro-alimentar o sistema de produção e uso das edificações com vistas à melhoria da qualidade de futuras obras. O especialista em patologia das edificações é um profissional extremamente qualificado, solicitado e, em geral, pouco disponível para consultas técnicas.

A presente pesquisa propõe o desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista (SE) para diagnóstico de fissuras em CA, denominado sistema EDIFICAR (sistema Especialista para Diagnóstico de Fissuras em Concreto Armado). O objetivo principal do protótipo é auxiliar profissionais que ainda apresentem uma experiência prática limitada na área, quando não houver a possibilidade de consulta a um especialista. Além disso, o estudo visa a sistematizar o conhecimento dos problemas relativos à fissuração do CA.

O estudo das causas, manifestações e conseqüências dos problemas patológicos possibilita a redução da incidência de falhas e os SE, pelas características que apresentam, podem constituir-se em importantes ferramentas para o estudo dos problemas patológicos, especialmente para problemas de diagnóstico, contribuindo, de uma forma geral, para a melhoria da qualidade das edificações.

1.2 Sistemas especialistas

A inteligência artificial (IA) é um ramo da ciência da computação que busca reproduzir o comportamento de seres humanos em computadores (DYM & LEVITT, 1991).

A IA pode ser definida como ciência e como tecnologia. Como ciência, aborda o estudo do comportamento inteligente, propondo teorias que expliquem o comportamento de seres humanos. Como tecnologia, a IA desenvolve procedimentos, métodos e técnicas que objetivam melhorar a capacidade intelectual de seres humanos, automatizando tarefas de rotina, ligadas ao pensamento e ao raciocínio (ALONSO et al., 1990).

A IA aborda várias áreas de estudo, podendo-se destacar: linguagem natural, na qual são desenvolvidos programas ligados à fala, leitura e entendimento de conversação; robótica, através da qual são desenvolvidos equipamentos automatizados capazes de reconhecer objetos; reconhecimento de imagens e engenharia de conhecimento (TERRY, 1991).

A engenharia de conhecimento é a sub-área da IA que pesquisa técnicas e processos com o objetivo de desenvolver sistemas especialistas (SE).

SE, ou sistemas baseados em conhecimento, são sistemas computacionais que contêm conhecimento especializado para resolver problemas e realizar tarefas normalmente desempenhadas por seres humanos, com o uso de sua inteligência, através de técnicas de representação e processamento do conhecimento da IA (SAGALOWICZ, 1984, apud FORMOSO, 1991; e ALLEN, 1992).

Um SE é constituído, basicamente, por três componentes: base de conhecimento, que contém o conhecimento adquirido sobre o domínio; mecanismo de inferência, que manipula o conhecimento contido na base e desempenha o raciocínio; e interface, que permite ao usuário interagir com o sistema.

O nível de desempenho de um SE está intimamente ligado ao tamanho e à qualidade da base de conhecimento (TERRY, 1991). Portanto, o SE deve possuir uma base de conhecimento robusta, ou seja, que contenha a maior quantidade possível de conhecimento sobre o domínio, além de fornecer respostas corretas e atender, de forma adequada, às reais necessidades do usuário.

Os SE e os programas computacionais convencionais diferem entre si em função de vários aspectos. Embora todos os programas computacionais contenham conhecimento sobre

os problemas que buscam resolver, enfatizam a representação e o uso de dados. Em programas convencionais, o conhecimento é apresentado na forma de algoritmos e, freqüentemente, não está representado explicitamente, dificultando expansões ou manipulações. Os SE enfocam a representação e o uso do conhecimento e, ao contrário dos sistemas convencionais, utilizam processos inferenciais ao invés da programação algorítmica, (ALLEN, 1992).

Nos SE, a base de conhecimento está desvinculada do controle ou mecanismo de inferência (MAHER, apud ALLEN, 1992). Para ALLEN (1992), a razão da separação do conhecimento e do controle baseia-se na suposição de que o processo de raciocínio de especialistas não se altera com o tempo, enquanto que o conhecimento e a experiência tendem a aumentar.

Outra diferença fundamental, que distingue SE de programas convencionais, é a transparência. Os SE caracterizam-se por apresentar a capacidade de fornecer explicações que justifiquem, ao usuário, o raciocínio utilizado pelo sistema para fornecer as conclusões (DYM & LEVITT, 1991). Ao contrário dos sistemas tradicionais, os sistemas baseados em conhecimento buscam justificar suas recomendações, permitindo que o usuário acesse os fatos, teorias e processos de resolução empregados (SOH et al., 1993).

O interesse em desenvolver SE para aplicações em engenharia civil tem crescido significativamente (SPRING et al., 1991).

A tarefa de elaborar projetos de engenharia pode-se tornar mais simplificada com o desenvolvimento de SE. Pode-se citar, como exemplo, o SE denominado DURCON (Durable Concrete), desenvolvido por Clifton & Kaetzel, citados por CAMPBELL-ALLEN & ROPER (1991), que aborda quatro processos de deterioração do concreto: corrosão da armadura, ação de gelo/degelo, ataque de sulfatos e reações entre os álcalis do cimento e os agregados, fornecendo recomendações para que os efeitos danosos destes processos possam ser evitados. O sistema DURCON possibilita um maior entendimento dos procedimentos de reparo, podendo ser utilizado com êxito por equipes de controle de qualidade (CAMPBELL-ALLEN & ROPER, 1991).

Os SE são aplicáveis não apenas a problemas de durabilidade, como mencionado anteriormente, mas podem ser utilizados para resolver vários tipos de problemas, tais como: projeto, planejamento, seleção, controle, diagnóstico, entre outros. Ao incorporar conhecimento, os SE podem desempenhar a função de consultoria nas mais diversas áreas.

O uso de SE pode apresentar vários benefícios, sistematizando e armazenando o conhecimento especializado, além de permitir que este conhecimento esteja disponível para auxiliar o usuário no processo de tomada de decisões, quando não houver a possibilidade de consultar a um especialista.

Segundo SPRING et al. (1991), os SE são úteis porque apresentam um grande potencial de uso na resolução de problemas em áreas nas quais os especialistas são pouco disponíveis ou raros, significando redução no consumo de tempo e de recursos financeiros.

Contudo, devido à grande complexidade de certos domínios, os SE não são capazes de substituir totalmente o especialista (KALYANASUNDARAM et al., 1990).

1.3 Objetivos da pesquisa

Considerando-se o exposto anteriormente, a presente pesquisa objetiva, de uma forma geral:

- Modelar o conhecimento existente e disponível sobre o diagnóstico de fissuras em CA, desenvolvendo um protótipo de SE capaz de contribuir com o aprimoramento de profissionais ligados à construção civil, diminuindo a incidência de falhas, o que tende a se refletir positivamente na manutenção da qualidade das edificações, a médio e longo prazos.

De modo mais específico, objetiva-se:

- Oferecer contribuições à formação acadêmica nesta área de especialização, tendo em vista que o sistema pode ser utilizado para o treinamento de estudantes;

- Avaliar o potencial do emprego da engenharia de conhecimento para resolver este tipo de problema.

1.4 Hipótese da pesquisa

O estudo tem, como principal hipótese a ser verificada:

Os SE podem-se constituir em eficazes ferramentas de apoio à decisão, auxiliando profissionais ligados à construção civil na resolução de problemas relativos ao diagnóstico de fissuras em CA, diminuindo a incidência de falhas, o que tende a se refletir positivamente na manutenção da qualidade das edificações, a médio e longo prazos.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho é apresentado em sete capítulos. No capítulo 1, apresenta-se a justificativa para o desenvolvimento do estudo e procura-se abordar algumas definições importantes com relação à IA e SE. São apresentados os objetivos e hipóteses da pesquisa, bem como as limitações do trabalho, definindo-se o que deve ser esperado com o desenvolvimento do protótipo.

No capítulo 2, abordam-se o problema da fissuração em CA e a tarefa de diagnóstico discutindo-se, também, as principais causas associadas à fissuração. Para ilustrar melhor o processo de aquisição de conhecimento, são apresentados quadros contendo a descrição, em linhas gerais, das configurações típicas das diversas fissuras abordadas no protótipo, da localização das mesmas nos elementos estruturais e de suas características gerais.

O capítulo 3 descreve o método utilizado para o desenvolvimento do protótipo, abordando as fases conceitual, aquisição de conhecimento, implementação e validação.

No capítulo 4, apresenta-se o modelo desenvolvido para diagnosticar fissuras em lajes, vigas, pilares e lajes em balanço de edificações correntes. São discutidos alguns trechos das árvores de decisão elaboradas, expondo-se a linha de raciocínio utilizada e identificando-se a seqüência de passos adotada pelo especialista na realização da tarefa.

O capítulo 5 apresenta a arquitetura do protótipo, abordando a representação da estrutura do domínio, mecanismo de inferência e apresentando a interface com o usuário, discutindo-se a sua importância para a aceitação do protótipo.

O capítulo 6 refere-se à validação do protótipo, descrevendo as técnicas utilizadas e os resultados obtidos.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as considerações finais, discutindo-se os resultados obtidos com o desenvolvimento da pesquisa e apontando aspectos que podem ser melhorados ou acrescentados, no sentido de melhor satisfazer às necessidades do usuário. Também são apresentadas sugestões para novas pesquisas.

Salienta-se que, ao longo dos capítulos 1,3,4,5 e 6 foram apresentadas definições e conceitos importantes ao entendimento da tecnologia de SE.

1.6 Delimitações do trabalho

Os objetivos da presente pesquisa estão restritos à modelagem do conhecimento especializado empregado no diagnóstico de fissuras em CA e ao desenvolvimento de um protótipo de SE, como forma de aplicação ou produto final. Apesar da pesquisa apresentar vínculos com a informática, não houve um aprofundamento maior nesta área, devido à formação técnica da autora estar restrita à área de engenharia civil e em virtude da limitação de tempo para a realização do trabalho, impedindo uma especialização em técnicas de programação. Portanto, não foram utilizadas linguagens de programação próprias da IA para implementação do protótipo, sendo o mesmo desenvolvido através do uso de uma ferramenta computacional do tipo *shell*.

O trabalho insere-se ainda em uma fase experimental, embora tenha sido realizado um processo formalizado de validação. O protótipo deve permanecer em uso, por um período determinado de tempo, a fim de que possam ser realizadas as adequações necessárias. Na escala de BRANDON (1993) (ver seção 3.1), o protótipo pode ser classificado em uma etapa intermediária entre sistema produzindo resultados e sistema sendo utilizado.

O protótipo foi elaborado para ser utilizado como ferramenta de apoio à decisão e como um meio de aperfeiçoamento técnico, podendo ser também aplicado no ensino de estudantes da área. Não foi concebido para substituir especialistas atuantes na resolução de problemas de fissuração em CA.

As configurações de fissuras abordadas no trabalho correspondem às mais simples e freqüentemente encontradas nas edificações correntes, excluindo-se casos complexos.

Embora algumas configurações de fissuras possam-se localizar em mais de uma face do elemento, por exemplo, superior ou inferior, devido a restrições de ordem prática, não são apresentadas todas as alternativas possíveis nas telas de escolha, durante a consulta. O usuário deve escolher a configuração que mais se assemelha ao caso que deseja consultar e, durante o questionamento, pode indicar a posição da fissura, no elemento.

Existem casos reais nos quais há uma clara correspondência entre os problemas existentes na estrutura de uma edificação e os existentes na alvenaria. Nestas situações, o especialista pode analisar os problemas da edificação de forma integrada, obtendo mais subsídios para indicar o diagnóstico da fissuração em elementos de CA através da observação das condições da alvenaria da edificação.

O protótipo não foi concebido para analisar problemas de fissuração na estrutura e na alvenaria, de forma conjunta. Para consultá-lo, o usuário deve somente utilizar as informações disponíveis sobre a estrutura de CA, sem haver a consideração de outras manifestações patológicas existentes na edificação, como rachaduras em paredes, desaprumo de esquadrias, entre outros. Salienta-se, porém, que estas informações podem ser analisadas pelo usuário, possibilitando-lhe relacionar os resultados obtidos através do protótipo com outras evidências.

O protótipo não apresenta vinculação com bancos de dados que permitam consulta a normas técnicas, métodos de ensaios ou procedimentos técnicos. Também não apresenta vinculação com aplicativos que permitam realizar verificações de cálculo estrutural, sem que seja necessário abandonar a consulta.

Limita-se a apresentar os métodos preventivos mais indicados no sentido de prevenir ou evitar o surgimento dos tipos de fissuras abordadas, mas não apresenta os métodos corretivos necessários a sua recuperação.

As respostas fornecidas pelo protótipo não estão vinculadas a índices ou percentuais de acerto. Quando são apontadas mais de uma causa provável para o mesmo problema, não são estabelecidas prioridades nem são expressas quantitativamente as probabilidades de ocorrência.

Durante a construção das árvores de decisão procurou-se observar, além da seqüência utilizada pelo especialista na realização da tarefa, as necessidades do usuário e suas conveniências ao consultar o sistema procurando-se eliminar, em primeiro lugar, questões que podem ser resolvidas sem que seja necessário abandonar a consulta para realizar verificações no local. Portanto, a ordem do questionamento com o usuário não indica, necessariamente, a maior probabilidade de ocorrência para certos tipos de fissuras.

2 DIAGNÓSTICO DE FISSURAS EM CONCRETO ARMADO (CA)

2.1 O problema da fissuração em CA

A degradação ou deterioração das edificações freqüentemente desencadeia manifestações patológicas indesejáveis sob o ponto de vista estético, do conforto e até da segurança estrutural.

Dentre os inúmeros problemas patológicos que afetam as edificações, THOMAZ (1980) destaca a fissuração em CA, devido a três aspectos: (i) as fissuras constituem-se em aviso de um eventual estado perigoso para a estrutura; (ii) comprometem o desempenho da obra no que se refere, por exemplo, à estanqueidade e durabilidade e (iii) causam a insatisfação psicológica do usuário.

O problema da fissuração é bastante antigo e tem sido alvo de vários estudos e pesquisas por parte dos tecnologistas. Freqüentemente, são várias as causas que provocam a fissuração em CA.

Tendo em vista que várias pesquisas abordando as causas da fissuração do CA (THOMAZ, 1985; DAL MOLIN, 1986, ARANHA, 1994) já foram realizadas a nível nacional, não serão descritos os diversos mecanismos de formação de fissuras, bem como os fatores intervenientes no processo, de forma extensa e detalhada.

Este capítulo objetiva realizar uma compilação dos assuntos abordados durante as fases de aquisição e modelagem, a fim de construir a base de conhecimento do sistema EDIFICAR, além de apresentar a terminologia empregada ao longo do trabalho.

A seção 2.2 apresenta algumas considerações sobre a tarefa de diagnóstico da fissuração em CA, salientando-se alguns aspectos fundamentais sobre a atuação do especialista na resolução de problemas do domínio.

2.2 A tarefa de diagnóstico de fissuras em CA

O especialista em patologia das edificações é um profissional que deve conhecer profundamente os vários sintomas patológicos, suas causas e os métodos de recuperação das estruturas deterioradas (NORONHA, 1984).

Uma etapa bastante importante do trabalho de um especialista consiste no diagnóstico, ou seja, na identificação das possíveis causas que desencadeiam o problema patológico.

Segundo JOHNSON (1973), o especialista deve, em primeiro lugar, ser capaz de identificar o problema. Deve possuir uma formação técnica que lhe permita saber quais informações são necessárias e onde buscá-las. Para ser capaz de detectar a deterioração são necessários conhecimentos sobre os mais diferentes tipos de degradação e suas causas mais frequentes. Além disso, a experiência é indispensável. Indícios que não podem ser observados à primeira vez em que uma situação se apresenta, serão facilmente detectados pelo profissional em oportunidades subseqüentes.

NORONHA (1984) considera a etapa de determinação das causas geradoras das anomalias a mais importante e também a mais difícil. É indispensável que o especialista tenha conhecimentos prévios sobre a constituição, propriedades físicas e mecânicas dos materiais e, ainda, conhecimento do comportamento da estrutura frente às solicitações atuantes na mesma, para subsidiar o diagnóstico.

O planejamento é fundamental para a implementação de uma investigação bem sucedida. O especialista deve realizar uma investigação sistemática da falha e obter o máximo de informações possíveis sobre o projeto e sobre o processo construtivo da edificação, além de buscar todos os dados de sua vida útil e dos efeitos ambientais relacionados com a falha (ASCE, 1989).

A identificação de uma falha e sua classificação segundo tipo, causa e época de surgimento podem ser os primeiros passos para o diagnóstico do problema.

O especialista deve realizar uma inspeção visual ao local, coletando todos os dados possíveis e avaliando a natureza da falha. É útil realizar a documentação fotográfica do local, podendo-se elaborar esquemas ou croquis auxiliares. Quando não se dispõem dos dados necessários, devem ser realizadas entrevistas com pessoas que possam auxiliar a esclarecer certos aspectos importantes, como por exemplo, a época do surgimento da fissura. Para adquirir informações adicionais, podem ser realizados testes ou ensaios (ASCE, 1989).

A partir das observações iniciais, é possível verificar se houve alterações no projeto original da estrutura, assim como na locação dos elementos estruturais, na seção geométrica dos diversos elementos ou alterações na curvatura ou deformação dos membros estruturais. Outro aspecto importante consiste em conhecer o estado de manutenção do prédio. Deve-se verificar, também, se o uso previsto para o prédio foi alterado, havendo um carregamento superior ao especificado em projeto (ASCE, 1989).

Para diagnosticar convenientemente o problema, é necessário buscar as causas possíveis do estado observado e proceder por eliminação. Esse procedimento necessita, em primeiro lugar, da confecção de uma lista dos agentes e processos de degradação, além da compreensão do seu modo de atuar e afetar os constituintes do concreto (JOHNSON, 1973).

A partir do diagnóstico da fissuração em CA, é iniciado o processo decisório no qual o especialista, após o estudo e análise realizados anteriormente, é capaz de definir a medida terapêutica indicada a cada caso específico. Em outras palavras, o especialista indica a conduta técnica adequada à correção do problema patológico apresentado pela estrutura, a fim de recuperá-la.

Quanto mais profunda e eficiente for a análise do problema, existem maiores chances de se obter sucesso durante o processo de recuperação das falhas (RANSOM, 1987).

Para IOSHIMOTO (1988), o estudo sistemático dos problemas patológicos, a partir de suas manifestações características, é importante porque: (i) permite um conhecimento mais aprofundado de suas causas; (ii) subsidia, com informações, os trabalhos de recuperação e manutenção e (iii) contribui para o entendimento do processo de produção de habitações, nas diversas etapas, minimizando a incidência total dos problemas.

Diante do exposto, pode-se verificar que o diagnóstico de fissuras em estruturas de CA é, até certo ponto, um processo complexo, já que envolve uma quantidade relativamente grande de parâmetros (DAL MOLIN, 1988).

É uma tarefa árdua, na qual deve ser seguida uma extensa rotina de trabalho, sem que nenhuma etapa seja negligenciada, sob pena de se obter uma conclusão errônea.

2.3 Principais causas associadas à fissuração do CA

Muitas falhas comumente encontradas em edificações são evitáveis e pode-se dizer que a maioria dos problemas não ocorre devido à falta de conhecimento mas sim, devido à não aplicação ou à aplicação inadequada deste conhecimento (RANSOM, 1987).

Os defeitos de uma edificação podem ser originados devido a falhas ligadas ao projeto ou à execução, podendo também ocorrer quando a edificação é submetida a solicitações ou a agentes cuja presença não tenha sido considerada anteriormente (ELDRIDGE, 1982).

Na seção 2.3.1, são brevemente comentados alguns aspectos sobre as causas mais comuns de fissuração em elementos de CA.

2.3.1 Falhas ligadas ao projeto, à execução e ao uso inadequado da estrutura

Atualmente, muita ênfase tem sido dada ao comportamento mecânico das estruturas de CA, utilizando-se microcomputadores na realização de análises mais complexas, o que tende a diminuir a incidência de falhas devidas ao cálculo estrutural. Assim sendo, os problemas existentes estão mais ligados ao detalhamento deficiente dos projetos, elaboração de especificações imprecisas e inadequadas, interpretação errônea dos padrões estabelecidos pelas normas técnicas, bem como ao não entendimento das necessidades dos clientes e à falta de comunicação entre os projetistas (CAMPBELL-ALLEN & ROPER, 1991).

Os problemas ligados à execução da estrutura podem ser devidos à má interpretação do projeto estrutural ou ao não atendimento das especificações de projeto. Também podem ocorrer falhas na execução devido à falta de qualidade ao longo do processo, seja através da utilização de técnicas construtivas incorretas ou pelo emprego de mão de obra desqualificada.

Existe uma estreita relação entre as falhas de projeto e as de execução. Muitas vezes, podem ocorrer erros durante a execução da estrutura, causados por projetos deficientes. Porém, nem sempre os erros de execução são evitados através da elaboração de um projeto adequado. Além disso, nas etapas intermediárias entre o projeto e a execução da edificação, também podem ser cometidos erros, por falta de uma revisão criteriosa (CÁNOVAS, 1977).

Além das falhas ligadas ao projeto e à execução da estrutura, podem ocorrer danos causados pela utilização inadequada da mesma, não havendo a devida manutenção da edificação ou submetendo a estrutura a sobrecargas não previstas em projeto, como por exemplo, realizando alterações no uso do prédio.

Os carregamentos, previstos ou não no projeto da estrutura, podem ocasionar fissuração sem que ocorra, necessariamente, ruptura ou instabilidade. Normalmente, a ocorrência de fissuras provoca uma acomodação das tensões ao longo do elemento e a solicitação tende a ser absorvida de forma globalizada pela estrutura. Existem casos, no entanto, em que não existe a possibilidade de redistribuição das tensões, seja pelos critérios adotados no dimensionamento da peça, seja pela magnitude das tensões atuantes (THOMAZ, 1980).

Para CAMPBELL-ALLEN & ROPER (1991), todos os técnicos envolvidos na construção e uso de uma estrutura de CA devem preocupar-se com a qualidade, para que sejam obtidos desempenho e aparência adequados ao longo da vida útil da estrutura.

Segundo CÁNOVAS (1977), as falhas ligadas ao projeto, à execução e ao uso inadequado da edificação representam a maior percentagem de danos evitáveis.

2.3.2 Falhas ligadas a ataques químicos, corrosão e reação álcali-agregado

Os efeitos devidos a ataques químicos, corrosão e reação álcali-agregado podem ser desencadeados por agentes cuja presença não tenha sido possível considerar no projeto e também por situações que alterem as condições inicialmente previstas para a estrutura. No entanto, podem estar relacionadas a um projeto inadequado, caso não tenham sido especificadas as medidas indicadas para minimizar os efeitos indesejáveis do meio ambiente sobre a estrutura, ou a uma execução deficiente, caso as especificações de projeto não tenham sido observadas.

O concreto é um material passível de fissurar, tanto no estado plástico como no estado endurecido, devido a tensões internas que surgem como resposta dos materiais constituintes ao meio ambiente. A resistência do concreto pode deteriorar-se com o tempo, como resultado de ataques externos ou devido à deterioração química interna, sendo grande parte desta deterioração associada à fissuração interna (CAMPBELL-ALLEN & ROPER, 1991).

Em regiões situadas próximo à costa marítima, a concentração de sais provenientes da maresia é elevada e os efeitos corrosivos sobre os metais são severos. Em cidades poluídas ou regiões próximas a indústrias também ocorrem concentrações elevadas de contaminantes sólidos e gasosos, podendo afetar os materiais de edificações (RANSOM, 1987).

Em condições normais, a armadura encontra-se protegida por uma camada de óxidos passivante, devido à natureza alcalina do concreto (FIGUEIREDO et al., 1993). Esta camada pode proteger a armadura indefinidamente, desde que o concreto mantenha sua boa qualidade e desde que não ocorram alterações nas suas propriedades físicas ou mecânicas, devido a agentes agressivos externos ou, ainda, desde que não ocorram fissuras (ANDRADE, 1984, apud FIGUEIREDO, et al., 1993).

A carbonatação e os íons cloreto correspondem aos principais agentes desencadeadores da corrosão das armaduras (FIGUEIREDO, 1993). A velocidade e a profundidade da carbonatação dependem do meio ambiente e da qualidade final do concreto endurecido. Para concretos com elevada relação água/cimento e em ambientes agressivos, a velocidade de carbonatação aumenta consideravelmente (FIGUEIREDO et al., 1993).

A corrosão das armaduras devida à ação dos cloretos corresponde a um problema bastante sério. Os íons cloreto podem ser incorporados ao concreto através do uso de aceleradores de pega, de impurezas presentes nos agregados e na água de amassamento. O concreto pode também ser contaminado por íons cloreto presentes em atmosferas marinhas, processos industriais, entre outros (FIGUEIREDO et al., 1993).

As reações provenientes da corrosão são acompanhadas por aumento de volume da armadura, em função da formação do óxido de ferro, podendo haver fissuração ou lascamento do concreto devido à expansão gerada (THOMAZ, 1980; FIGUEIREDO, 1993).

Alguns sulfatos solúveis que ocorrem em determinados tipos de solos como sulfatos de cálcio, magnésio e sódio podem atacar a matriz de cimento (RANSOM, 1987).

A grande expansão associada à presença de sulfatos no cimento é devida à formação de sulfoaluminato tricálcico, ou etringita. Para que a reação expansiva ocorra, é necessária a presença de cimento, água e de sulfatos solúveis (CAMPBELL-ALLEN & ROPER, 1991). A extensão dos danos depende, significativamente, da quantidade e do tipo de sulfato presente, da presença de umidade no terreno e da qualidade do concreto, pois concretos porosos são mais suscetíveis ao ataque. A utilização de cimento resistente a sulfatos, pobre em aluminato tricálcico, pode aumentar consideravelmente a resistência a este tipo de ataque (RANSOM, 1987).

Alguns agregados contendo quantidades excessivas de gesso podem constituir-se em uma fonte de sulfatos, provocando a deterioração do concreto. No entanto, em geral a fonte de sulfatos é externa ao próprio concreto (CAMPBELL-ALLEN & ROPER, 1991). Os sulfatos podem ser provenientes de águas contaminadas ou certos tipos de solos (THOMAZ, 1980).

Algumas formas de sílica existentes em agregados, na presença de água, reagem com os álcalis provenientes do cimento, podendo causar expansão e muitos danos ao concreto. Este fenômeno é conhecido como reação álcali-agregado (RANSOM, 1987). A reação álcali-agregado pode ser prevenida, evitando-se o uso de agregados reativos e/ou utilizando-se cimento Portland com baixo teor de álcalis, como o pozolânico ou com escória. Caso o problema não seja evitado, medidas corretivas geralmente são caras e nem sempre bem sucedidas. Muitas medidas de controle consistem em impedir o ingresso de água ao concreto, através da cobertura da superfície da estrutura ou da impregnação de determinados materiais (CAMPBELL-ALLEN & ROPER, 1991).

2.3.3 Falhas devidas a variações térmicas ou no teor de umidade do concreto

O concreto é um material estrutural sujeito a variações volumétricas, estando quase sempre em desequilíbrio dinâmico com o ambiente. Alguns dos efeitos mais importantes deste desequilíbrio são movimentações térmicas, dessecação superficial, retração térmica e retração hidráulica (CAMPBELL-ALLEN & ROPER, 1991).

O desempenho das edificações varia de acordo com as propriedades físicas e químicas dos materiais constituintes e depende da posição que ocupam na edificação e da função que desempenham.

Segundo CAMPBELL-ALLEN & ROPER (1991), as edificações atuais são suscetíveis a variações dimensionais e podem ocorrer deficiências pela falta de entendimento da interação entre o clima e os materiais que as compõem. A carga solar e os aparelhos de ar condicionados provocam gradientes térmicos importantes nas edificações, podendo levar a movimentações diferenciais.

As alterações na umidade relativa do ar também podem acarretar mudanças dimensionais nas estruturas, com a ocorrência de deformação e fissuração (RANSOM, 1987).

As fissuras por retração térmica ou hidráulica estão ligadas a fenômenos naturais. Quando existem trocas de umidade ou de temperatura entre os elementos estruturais e o meio, o concreto, ao retrair, provoca redução do volume do elemento, ocorrendo esforços de tração. Se o elemento estiver impedido de se movimentar ou de se deformar, podem ocorrer fissuras (CÁNOVAS, 1977).

As variações de temperatura e umidade sobre as estruturas devem ser consideradas durante a elaboração do projeto e realização da execução, buscando-se evitar seus efeitos e diminuir a incidência de manifestações patológicas.

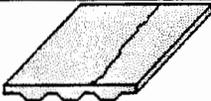
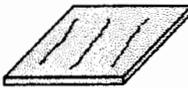
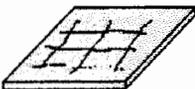
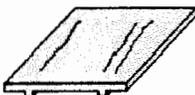
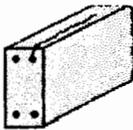
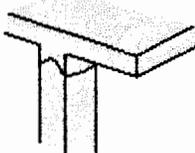
2.4 Configurações típicas de fissuras abordadas pelo EDIFICAR

Diante do exposto, pode-se constatar que as causas da fissuração em CA podem ter várias origens e que existe uma grande quantidade de fatores intervenientes no processo de formação das fissuras.

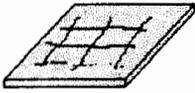
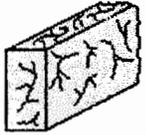
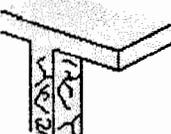
Para a realização da etapa de aquisição de conhecimento, anterior ao processo de modelagem, foi necessário realizar pesquisa bibliográfica na área de especialização, buscando-se empregar uma terminologia adequada, que deveria ser padronizada ao longo do trabalho.

Os quadros 2.1 a 2.15 apresentam a configuração típica, a localização e as características gerais relativas às causas prováveis dos diversos tipos de fissuras abordadas no sistema, em lajes, vigas, pilares e lajes em balanço (referências bibliográficas utilizadas: DAL MOLIN, 1988; ARANHA, 1994; THOMAZ, 1980; FIGUEIREDO et al., 1993; KAZMIERCKZACK & HELENE, 1993; PRUDÊNCIO, 1993; CÁNOVAS, 1977; LEONHARDT & MÖNNIG, 1979; MEHTA, 1993).

Quadro 2.1 Fissuras por assentamento plástico

Assentamento Plástico		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Face superior, na região de menor espessura da laje	Logo após o lançamento e adensamento do concreto, ocorre a sedimentação das partículas sólidas da mistura, devido à ação da gravidade. Em consequência disso, a água e o ar aprisionados deslocam-se para a superfície, (exsudação). A perda de água e ar que ocorre durante o assentamento causa redução no volume da massa em estado plástico. Caso um obstáculo (armadura, agregados de dimensões maiores ou a própria forma) impeça a homogeneidade deste assentamento, podem ocorrer fissuras. Quando as fissuras ocorrem devido às armaduras, a fissuração aumenta com o aumento do diâmetro da armadura, da plasticidade e com a diminuição do cobrimento. As fissuras causadas por armaduras horizontais seguem aproximadamente a direção das mesmas. As que ocorrem devido a agregados não possuem direção privilegiada, podendo ocorrer na superfície ou na massa de concreto. Se as armaduras formarem uma malha muito densa, pode ocorrer um plano de separação abaixo desta malha, ao invés de fissuras superficiais. Este tipo de fissuração pode estar associado ao excesso de exsudação, à utilização excessiva de vibradores, a intervalos de tempo prolongados entre o lançamento e o início da pega e à falta de estanqueidade das formas. As fissuras por assentamento plástico ocorrem na face superior de lajes e, no caso de lajes com espessura variável, tendem a se localizar nas zonas mais delgadas e no topo de vigas e de pilares. São fissuras passivas e ocorrem no período anterior ao endurecimento do concreto, cerca de 10 minutos a 3 horas após o lançamento.
	-Face superior da laje, sobre as armaduras	
	-Face superior da laje	
	-Face superior da laje, próximo ao apoio	
	-Face superior da viga	
	-Topo do pilar	

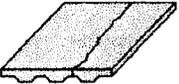
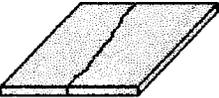
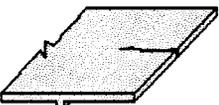
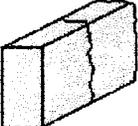
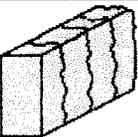
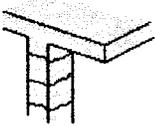
Quadro 2.2 Fissuras por dessecação superficial

Dessecação superficial		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Face superior da laje	As fissuras por dessecação superficial ocorrem devido à secagem exagerada da superfície do concreto, em função da excessiva evaporação da água de amassamento ou por demasiada absorção dos agregados e/ou formas. São fissuras causadas por uma retração hidráulica superficial e intensa. O efeito da dessecação superficial é extremamente vinculado às condições ambientais, já que o grau de evaporação depende da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento. A dessecação superficial ocorre com maior intensidade em clima seco, ensolarado e com vento. Depende, entre outros fatores, da qualidade do processo de cura, da relação a/c, da proporção de finos no cimento e da relação superfície livre/volume dos elementos sendo, portanto, mais comum em lajes e marquises. Em geral, este tipo de fissura apresenta uma distribuição aleatória, atravessando-se umas às outras, formando aproximadamente ângulos retos. Podem ramificar-se ou apresentar sinuosidades, pois no período anterior ao endurecimento, quando o concreto possui baixa resistência, as fissuras contornam os agregados, apresentando configuração semelhante a um "mapeamento hidrográfico" ou "pele de crocodilo". Pode haver regiões de maior concentração de fissuras, correspondendo a áreas de maior concentração de pasta de cimento, nas quais ocorre secagem mais rápida em relação às demais. Podem, também, ocorrer fissuras paralelas à armadura, quando estas se encontram muito próximas à superfície. São fissuras passivas: aparecem nas primeiras horas após a concretagem (1 a 10 h) e não se modificam com o passar do tempo. Têm profundidade variável (1 a 10 mm) e a abertura típica é de 2 a 3 mm, decrescendo rapidamente à medida que se afastam da superfície.
	-Face superior da laje	
	-Qualquer face da viga	
	-Qualquer face do pilar	
	-Face superior da laje em balanço	

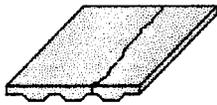
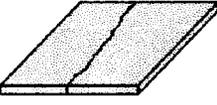
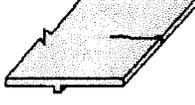
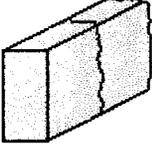
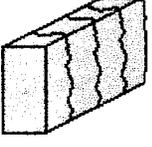
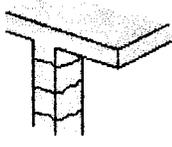
Quadro 2.3 Fissuras por movimentação de formas

Movimentação de Formas		
Configuração típica	Localização	Características gerais
As fissuras causadas por movimentação de formas podem apresentar-se de inúmeras formas, não possuindo configurações típicas.		As movimentações de formas que ocorrerem desde o lançamento até o endurecimento do concreto podem causar o surgimento de fissuras. Tais movimentos geralmente estão ligados a sobrecargas, quando as cargas atuantes sobre as formas são superiores àquelas para as quais foram dimensionadas, a falhas no sistema de escoramento, a problemas relacionados à confecção das formas ou, ainda, à qualidade da mão-de-obra. Além destes fatores, a movimentação de formas pode estar associada a falhas durante a etapa de lançamento do concreto, como velocidade excessiva de colocação da mistura, acúmulo de material em determinados pontos e pressões elevadas de impacto do concreto contra a forma. As fissuras causadas por movimentações de formas podem ser internas ou superficiais, sendo as internas bastante perigosas por favorecerem o processo de corrosão das armaduras. São fissuras passivas, ou seja, após o endurecimento do concreto, não se modificam.

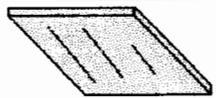
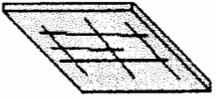
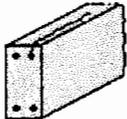
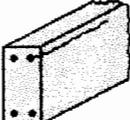
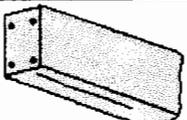
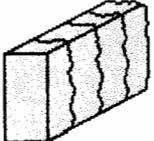
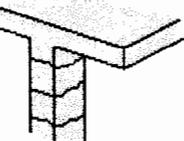
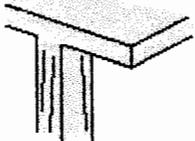
Quadro 2.4 Fissuras por retração térmica

Retração térmica		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Face superior ou face inferior ou seccionando a laje, na região de menor espessura	Em ambientes sujeitos a variações de temperatura, quando as peças estiverem restritas em suas deformações, podem ocorrer tensões importantes, a ponto de exceder a tensão máxima admissível à tração do concreto, ocorrendo fissuração. É comum o aparecimento de fissuras por retração térmica em lajes de grande comprimento e que estejam restritas em suas deformações por vigas; em nervuras contíguas; marquises; pavimentos de concreto e muros. Em alguns casos, o efeito térmico pode ser originado por condutores de calor, próximos aos elementos estruturais, como chaminés ou condutores de água quente, que não estejam devidamente isolados. Para prevenir o surgimento de fissuras por retração térmica, devem ser executadas juntas de dilatação na edificação ou devem ser previstas armaduras adicionais para absorver esforços de tração. As fissuras por retração térmica manifestam-se algumas semanas após o lançamento do concreto, mas podem surgir após meses ou anos, em função das condições ambientais. O aspecto das fissuras de retração térmica é muito semelhante ao das fissuras de retração hidráulica: são perpendiculares ao eixo principal do elemento, de largura constante e podem produzir o seccionamento da peça, se houver impedimentos à livre movimentação. A abertura das fissuras por retração térmica é da ordem de 1/2.500 da sua profundidade e a distância entre duas fissuras paralelas é de 2 a 4 vezes sua profundidade
	-Face superior ou face inferior ou seccionando a laje	
	-Face superior ou face inferior ou seccionando a laje em balanço	
	-Transversal ao vão da viga, podendo haver o seccionamento da peça	
	-Transversais ao vão da viga, espaçadas regularmente, podendo haver o seccionamento da peça	
	-Transversais ao eixo principal de pilares, podendo haver o seccionamento da peça	

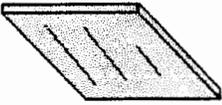
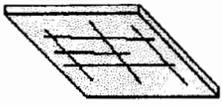
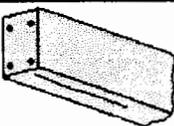
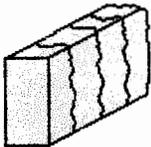
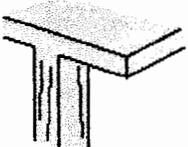
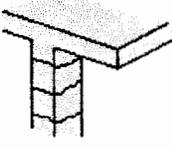
Quadro 2.5 Fissuras por retração hidráulica ou por secagem

Retração hidráulica ou por secagem		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Face superior ou face inferior ou seccionando a laje, na região de menor espessura	Para que ocorra a reação química completa (estequiométrica) entre a água e os compostos do cimento, é necessário cerca de 22 a 32% de água em relação à massa do cimento. Ocorre, durante a hidratação, a formação de uma camada de gel em torno dos grãos. Para a constituição do gel, é necessária uma quantidade adicional de 15 a 25%. Portanto, para que o cimento se hidrate completamente, é suficiente uma relação água/cimento em torno de 0,40. No entanto, em função da trabalhabilidade necessária, os concretos são comumente preparados com uma quantidade excessiva de água, o que tende a aumentar a retração. A retração hidráulica ou por secagem pode ser definida como a redução de volume do concreto devido à evaporação da quantidade de água excedente, empregada na sua preparação e que permanece livre no interior da massa. A retração hidráulica é influenciada por vários fatores, como: relação água/cimento, umidade relativa do ar, composição química e finura do cimento, quantidade de cimento presente na mistura, rigidez dos pórticos, taxas de armadura dos elementos, entre outros. A retração por secagem manifesta-se em períodos muito longos. As fissuras por retração hidráulica apresentam abertura constante, da ordem de 1/2.500 de sua profundidade, são paralelas entre si e costumam seccionar o elemento.
	-Face superior ou face inferior ou seccionando a laje	
	-Face superior ou face inferior ou seccionando a laje em balanço	
	-Transversal ao vão da viga, podendo haver o seccionamento da peça	
	-Transversais ao vão da viga, espaçadas regularmente, podendo haver o seccionamento da peça	
	-Transversais ao eixo principal de pilares, podendo haver o seccionamento da peça	

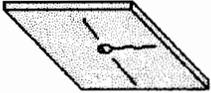
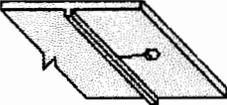
Quadro 2.6 Fissuras por cobrimento insuficiente

Cobrimento insuficiente		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Face inferior da laje	Define-se cobrimento à distância livre entre a superfície da armadura e a face externa mais próxima da estrutura. A espessura da camada de cobrimento não deve ser inferior aos valores mínimos exigidos por norma, de acordo com as condições de exposição da estrutura ao meio. Assim, são exigidos cobrimentos maiores para elementos expostos a agentes agressivos (maresia, efluentes industriais, esgotos domésticos, etc) do que para elementos protegidos. A espessura da camada de cobrimento varia, também, em função do risco de exposição da estrutura a incêndios. Cobrimentos insuficientes, associados à retração térmica/hidráulica, podem causar a ocorrência de fissuras ao longo das armaduras, principalmente as de grandes diâmetros, ou ao longo de eletrodutos. Pode-se dizer, também, que a falta de qualidade adequada do concreto de cobrimento tende a causar e/ou agravar a corrosão das armaduras. Como os mecanismos de formação do processo corrosivo estão ligados, normalmente, a processos de difusão (ex: carbonatação), é de extrema importância que o concreto de cobrimento seja impermeável, de modo a impedir a penetração de íons agressivos, bem como de oxigênio e umidade para o interior do elemento. Portanto, a utilização de cobrimentos adequados quanto à espessura e qualidade (impermeabilidade) é fundamental para a durabilidade das estruturas de concreto armado.
	-Face inferior da laje	
	-Paralelas à armadura longitudinal, na face superior da viga	
	-Paralelas à armadura longitudinal, na face lateral da viga	
	-Paralelas à armadura longitudinal, na face inferior da viga	
	-Transversais ao vão da viga, sobre os estribos	
	-Transversais ao eixo principal de pilares, sobre os estribos	
	-Paralelas à armadura longitudinal de pilares, em qualquer face	

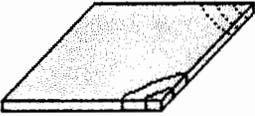
Quadro 2.7 Fissuras por corrosão da armadura

Corrosão da armadura		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Face inferior da laje	No interior do concreto, a armadura encontra-se envolvida por uma camada de ferrato de cálcio, denominada película passivante, protegendo a armadura da corrosão e mantendo-se estável em ambientes altamente alcalinos. Contudo, nas superfícies dos elementos estruturais, a alta alcalinidade inicial do concreto tende a diminuir com o tempo. As principais causas da despassivação da armadura são decorrentes da ação dos íons cloreto ou devido à carbonatação. Os cloretos existentes em ambientes industriais ou marinhos, ao penetrarem no concreto por processos de difusão e/ou capilaridade, podem atingir a armadura e originar um processo de corrosão eletroquímica. Podem, também, ser incorporados involuntariamente ao concreto, através do uso de aditivos aceleradores de endurecimento, agregados e águas contaminadas ou, mesmo, a partir da simples limpeza com ácido muriático. A corrosão é um processo eletroquímico e para que ocorra, é necessária a presença de oxigênio (para a formação do óxido/hidróxido de ferro), de umidade (que atua como eletrólito) e de uma diferença de potencial entre dois pontos da barra, como regiões porosas ou de pequeno cobrimento, alternadas com regiões densas ou com cobrimento maior. Portanto, após a penetração de agentes agressivos por difusão, absorção ou permeabilidade, nas regiões onde o cobrimento não é adequado (baixa qualidade do concreto e/ou espessura inferior à recomendada por norma), ocorre a formação de óxidos/hidróxidos de ferro, ocupando volumes cerca de três a dez vezes superiores ao volume original do aço na armadura. Se as tensões originadas ultrapassarem a tensão admissível do concreto à tração surgem fissuras, acentuando ainda mais o problema, ao permitir a entrada de novos agentes agressivos. A partir deste estágio, pode haver lascamento do concreto e até mesmo redução da seção da armadura. O processo corrosivo pode ser facilmente identificado pelo surgimento de manchas de coloração marrom-avermelhada na superfície do concreto e bordas da fissura. Normalmente, as fissuras causadas por corrosão acompanham a direção da armadura principal e direção dos estribos.
	-Face inferior da laje	
	-Paralelas à armadura longitudinal, na face inferior da viga	
	Transversais ao vão da viga, sobre os estribos	
	-Paralelas à armadura longitudinal de pilares, em qualquer face	
	-Transversais ao eixo principal de pilares, sobre os estribos	

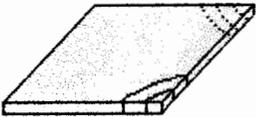
Quadro 2.8 Fissuras por eletroduto

Eletroduto		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Convergindo ao ponto de luz, na face inferior da laje	É possível a existência de fissuras em lajes, acompanhando a direção do eletroduto. A fissura ocorre, basicamente, devido à falta de cobertura de concreto ao eletroduto, ou devido à retração superficial desta camada. Normalmente, localizam-se na face inferior da laje. Podem, no entanto, localizar-se na face superior, dependendo da posição do eletroduto na laje ou, até mesmo, seccioná-la, tornando-se visível em ambas as faces, nos casos em que o eletroduto possuir diâmetro considerável em relação à espessura da mesma.
	-Face inferior da laje em balanço	

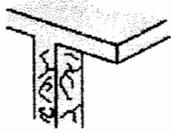
Quadro 2.9 Fissuras por comportamento deficiente frente aos esforços originados por momentos volventes

Momentos volventes		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Cantos das lajes, formando triângulos	Quando os cantos de uma laje forem garantidos quanto à possibilidade de levantamento através de, por exemplo, chumbadores ou cargas elevadas, surgem momentos determinando mudanças de direção dos momentos principais, denominados momentos volventes. Na região dos cantos ocorrem momentos negativos, na direção da bissetriz do ângulo, ocasionando tração na face superior da laje e momentos principais positivos na direção perpendicular àquela, causando tração na face inferior da laje.

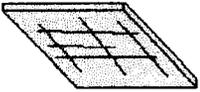
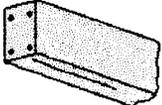
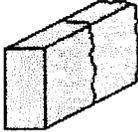
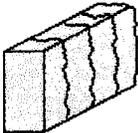
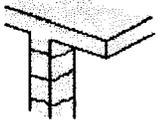
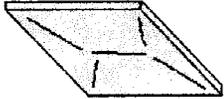
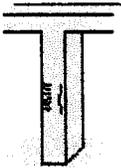
Quadro 2.10 Fissuras por movimentação térmica

Movimentação térmica		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Cantos das lajes, formando triângulos	É possível a ocorrência de fissuras por movimentação térmica nos cantos de lajes, pela expansão das vigas de apoio.

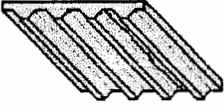
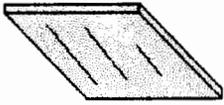
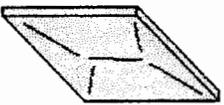
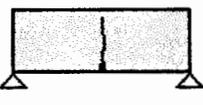
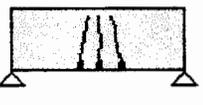
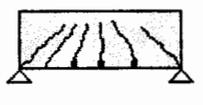
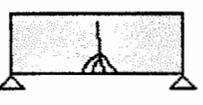
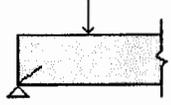
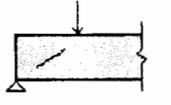
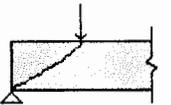
Quadro 2.1 | Fissuras por reações expansivas

Reações expansivas		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Face inferior ou face superior, podendo haver desagregação	Quando exposto a ambientes em condições normais de agressividade e quando convenientemente dosado o concreto, em geral, apresenta durabilidade adequada. No entanto, em ambientes altamente agressivos, ou quando o concreto for permeável, a vida útil das estruturas pode diminuir consideravelmente. Dentre as substâncias químicas nocivas às estruturas de concreto armado, destacam-se os sulfatos presentes na água do mar, em efluentes industriais, esgotos domésticos ou em certos tipos de solos, comumente chamados "alcalinos" ou "selenitosos". O ataque de sulfatos ao concreto envolve três estágios distintos. Inicialmente, ocorre a difusão do íon sulfato através da matriz do concreto. Este processo é de natureza física e depende, basicamente, da porosidade e permeabilidade do concreto. O segundo estágio, de natureza química, corresponde às reações entre os íons sulfato e alguns constituintes do cimento hidratado, formando produtos expansivos (etringita). Quanto maior o teor de C_3A , mais significativo será o processo. A fissuração da matriz, em consequência da violenta expansão originada pelas reações sulfato/aluminato, leva à progressiva perda de resistência e desintegração do concreto. Os óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO) livres, componentes do cimento Portland, também podem provocar expansão e fissuração com a hidratação do grãos. Outro tipo de reação expansiva que ocorre com o concreto é a reação álcali-agregado. Dentre as reações álcali-agregados, a que ocorre com mais frequência é a reação álcali-sílica, que é o resultado da combinação dos álcalis do cimento com a sílica reativa presente em alguns agregados. A reação inicia quando os hidróxidos originados dos álcalis do cimento, como o hidróxido de sódio e o hidróxido de potássio, atacam os materiais silicosos do agregado, formando-se um gel de sílica alcalina que absorve água e tende a aumentar de volume. Como o gel está envolvido pela pasta, surgem pressões internas podendo haver expansão, fissuração e desagregação.
	-Todas as faces da viga, podendo haver desagregação	
	-Todas as faces do pilar, podendo haver desagregação	
	-Face inferior ou face superior, podendo haver desagregação	

Quadro 2.12 Fissuras por incêndio

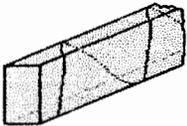
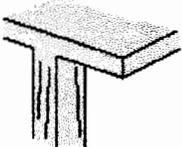
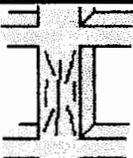
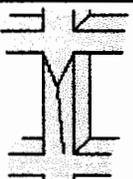
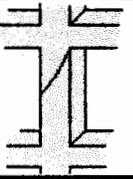
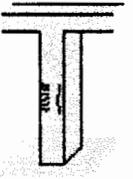
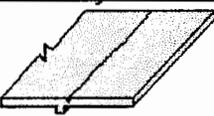
Incêndio		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Face inferior da laje	Se um elemento estrutural é exposto à ação de altas temperaturas, sua resistência mecânica diminui gradativamente, podendo haver colapso. Com a elevação da temperatura, são produzidas tensões significativas que provocam o desprendimento da camada e cobrimento. O aço, ao ficar diretamente exposto ao calor, dilata-se, podendo atingir o colapso em torno dos 500°C, dependendo do tipo de aço. Os pilares, sob a ação do fogo, rompem por compressão e perda de resistência, com flambagem da armadura. Devido à dilatação, ocorrem arqueamentos nas barras de aço, nos trechos entre os estribos. Com a perda de resistência do aço, o concreto fica sobrecarregado, podendo ser ultrapassada a sua resistência limite, levando ao colapso do pilar. As vigas, especialmente as de maiores vãos, dilatam-se, podendo ocasionar esforços adicionais. As fissuras são causadas pela dilatação da viga, pelo aumento da temperatura e posterior contração, com o resfriamento. As lajes, devido à pequena espessura, são mais suscetíveis à ação do fogo. Assim como ocorre nas vigas, a face inferior das lajes fica diretamente exposta às chamas, havendo intensa dilatação do aço e desprendimento do concreto. Com a perda de aderência, redução da resistência e desprendimento do cobrimento, podem ocorrer flechas excessivas
	-Face inferior da viga	
	-Transversal ao vão da viga, podendo haver o seccionamento da peça	
	-Transversais ao vão da viga, sobre os estribos	
	-Transversais ao eixo principal de pilares, podendo haver o seccionamento da peça	
	-Face inferior da laje	
	-Aproximadamente no meio do vão, com a abertura mais pronunciada próxima à face inferior da viga	
	-No meio da altura útil de pilar esbeltos, perpendiculares à armadura principal	

Quadro 2.13 Fissuras por falha no projeto estrutural

Falha no projeto estrutural		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Face inferior da laje	Existem várias manifestações patológicas relacionadas a falhas no cálculo estrutural. Em geral, podem ocorrer problemas ligados aos métodos de cálculo utilizados, dimensionamento e verificação das seções, subestimação das cargas, ou erros e omissões na previsão dos caminhos pelos quais estas cargas devem ser canalizadas até chegarem às fundações. Pode-se dizer que a utilização de maiores tensões de trabalho, o aumento dos vãos e a diminuição da rigidez dos elementos têm ocasionado o aparecimento de fissuras devidas a flechas excessivas. Os problemas existentes estão ligados, também, ao detalhamento dos projetos, à elaboração de especificações imprecisas e inadequadas, além da interpretação errônea dos padrões estabelecidos pelas normas técnicas e uso incorreto ou inexistência de dados. O não entendimento das necessidades dos clientes e a falta de comunicação entre os projetistas também são fatores que podem desencadear falhas.
	-Face inferior da laje	
	-Face inferior da laje	
	-Face superior da laje	
	-Aproximadamente no meio do vão, com a abertura mais pronunciada próxima à face inferior da viga	
	-Aproximadamente no meio do vão, com a abertura mais pronunciada próxima à face inferior da viga	
	-Aproximadamente no meio do vão, com a abertura mais pronunciada próxima à face inferior da viga	
	-Aproximadamente no meio do vão, ramificando-se próxima à face inferior da viga	
	-Inclinada a 45° próxima ao apoio da viga	
	-Inclinada a 45° próxima ao apoio da viga	
	-Inclinada a 45° próxima ao apoio da viga, chegando até o ponto de aplicação da carga	

(continua)

Quadro 2.13 (continuação)

Falha no projeto estrutural		
Configuração típica	Localização	Características gerais
	-Desenvolvimento helicoidal (45° em relação ao eixo da barra) em todas as faces da viga	
	-Paralelas à armadura longitudinal de pilares, em qualquer face	
	-Seguindo as isostáticas de 1ª espécie em pilares impedidos de se deformar	
	-Seguindo as isostáticas de 1ª espécie em pilares esbeltos, impedidos de se deformar	
	-Seguindo as isostáticas de 1ª espécie em pilares esbeltos, impedidos de se deformar	
	-No meio da altura útil de pilares esbeltos, perpendiculares à armadura principal	
	-Face superior, próximo ao apoio de lajes em balanço	

As configurações típicas e localização relativas a fissuras causadas por falha de execução e sobrecarga (falha de uso/manutenção) são idênticas às causadas por falhas de projeto. Portanto, o quadro 2.14 apresenta as características gerais de cada um dos casos.

Quadro 2.14 Fissuras por falha na execução e por sobrecarga.

Falha na execução	Sobrecarga (Falha de uso/manutenção)
Características gerais	Características gerais
<p>Os problemas ligados à execução da estrutura podem ser causados por má interpretação do projeto estrutural ou devido ao não entendimento das especificações de projeto. Assim, é comum a execução inadequada da armadura, podendo haver o uso de bitolas, espaçamentos e posicionamentos diferentes das indicações de projeto. Também podem ocorrer falhas na execução devido à falta de qualidade ao longo do processo, seja através da utilização de materiais inadequados ou técnicas construtivas incorretas ou, ainda, pelo emprego de mão-de-obra desqualificada. Um aspecto bastante freqüente é a diminuição da capacidade resistente dos elementos estruturais devido à dosagem inadequada do concreto.</p>	<p>Um projeto adequado deve prever todas as sobrecargas que possam atuar na estrutura, devendo considerar as limitações impostas pelas normas técnicas, no que se refere a solicitações, deformações, dimensionamento e detalhamento da armadura. Durante o processo executivo devem ser tomadas certas precauções para que os detalhamentos e especificações do projeto estrutural sejam seguidos. É necessário realizar uma conferência rigorosa das armaduras antes da concretagem e o processo de desforma deve ser adequadamente planejado. São freqüentes as falhas causadas por descimbramentos com cargas superiores às estimadas ou quando o concreto ainda não atingiu o endurecimento e a resistência prevista. Podem ocorrer fissuras que não estejam ligadas ao cálculo estrutural ou à etapa de construção, quando a estrutura é submetida a sobrecargas não previstas em projeto. São consideradas falhas devidas à utilização inadequada da edificação, alterando as hipóteses inicialmente admitidas no cálculo ou devidas à falta de manutenção da mesma. Exemplo: transformação de um edifício residencial em comercial, aumentando o carregamento em função de arquivos, depósitos, bibliotecas, acúmulo de lixo em marquises. As sobrecargas podem ocasionar fissuras de flexão em lajes, fissuras de flexão, cisalhamento e torção em vigas ou fissuras por flambagem em pilares.</p>

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 Métodos utilizados para desenvolvimento de SE

A primeira proposta de uma abordagem sistemática para o desenvolvimento de SE foi feita por WATERMAN et al. (1983), citados por GUIDA & TASSO (1989). No entanto, este trabalho não pode ser considerado como um método completo porque os estágios propostos para o processo de desenvolvimento não foram decompostos em atividades operacionais específicas, havendo um alto grau de abstração (GUIDA & TASSO, 1989). Outras propostas foram apresentadas posteriormente (HARMON & KING, em 1985 e WATERMAN, em 1986, apud GUIDA & TASSO, 1989) havendo, contudo, um nível de generalização elevado e a falta de uma definição clara de práticas operacionais.

O trabalho de WATERMAN (1986) citado por GUIDA & TASSO (1989), no entanto, forneceu critérios mais detalhados para a análise de problemas, abordou alguns aspectos do processo administrativo de projetos de SE, além de propor uma classificação mais clara dos estágios envolvidos no processo de desenvolvimento de SE.

Estes trabalhos, apesar de algumas limitações, foram muito importantes para o desenvolvimento da tecnologia de SE. Contudo, devido à necessidade de uma maior estruturação, surgiram novas propostas metodológicas, mais específicas e detalhadas, experimentadas em aplicações reais e que procuravam abordar problemas organizacionais e administrativos, com maior intensidade. Neste sentido, segundo GUIDA & TASSO (1989), foi realizado um projeto especificamente dedicado a definir um método para ser utilizado na construção de SE, denominada KADS (Knowledge Acquisition and Documentation Structuring) desenvolvida por BREUKER, WIELINGA & HAYWARD, em 1986. Esta proposta fez referência a um modelo de ciclo de vida completo de SE, decompondo cada fase em tarefas e atividades operacionais específicas. Além disto, dedicou-se a aspectos específicos do desenvolvimento de SE, tais como modelagem do conhecimento, análise, aquisição e documentação (GUIDA & TASSO, 1989).

Segundo BREUKER & WIELINGA (1989), para que uma metodologia possa ser considerada compreensível, deve apresentar uma descrição das atividades, decompondo-as em tarefas. Também devem estar disponíveis conceitos que descrevam os objetos na metodologia, além das ferramentas e técnicas empregadas. Um dos aspectos recomendados pela metodologia KADS consiste em realizar uma análise completa da informação antes do projeto e implementação do sistema.

Contudo, embora KADS tenha atraído considerável interesse, também tem sido criticada por ser repleta de jargões e por ser difícil de ser aplicada, mesmo por EC (engenheiros de conhecimento) experientes, impondo trabalho adicional desnecessário a quem está desenvolvendo o sistema (WATSON et al., 1994).

Segundo WATSON et al. (1994), embora seja sempre desejável obter uma metodologia prescritiva, com uma descrição formal de todos os passos envolvidos no processo de desenvolvimento de SE, como KADS, ironicamente a comunidade de SE vem-se distanciando desta abordagem. O desenvolvimento de SE tem buscado métodos menos prescritivos e mais contingentes, procurando considerar a habilidade de diferentes EC e as situações nas quais trabalham em diferentes projetos.

Muitas vezes, utiliza-se uma abordagem informal para a construção de SE, denominada rápida prototipagem, através da qual o conhecimento é implementado no microcomputador, à medida que vai sendo realizada a tarefa de aquisição do conhecimento de especialistas.

Segundo BRATKO (1989), a realização de um protótipo preliminar é muito importante pois facilita o trabalho do projetista do sistema, permitindo um maior esclarecimento das reais necessidades dos usuários, nos casos em que os requisitos do projeto não estiverem devidamente entendidos. Além disso, o protótipo preliminar motiva o especialista, fornecendo-lhe uma visão de como o sistema deverá funcionar e quais os possíveis benefícios que poderão ser alcançados com a construção do sistema.

Protótipos podem ter diversos objetivos, dependendo da fase do ciclo de vida do sistema na qual são concebidos. Existem protótipos com especificações funcionais, desenvolvidos para demonstrar as capacidades do sistema proposto. Devem fornecer uma visão adequada do funcionamento e da aparência do sistema a fim de serem submetidos à gerência, clientes ou usuários. Enquanto protótipos desenvolvidos com especificações funcionais tipicamente enfatizam as exigências de um sistema, os protótipos de projeto, desenvolvidos em etapas posteriores, exploram soluções. Podem manipular com eficiência certos problemas complexos ligados à fase de projeto. Os protótipos de implementação, menos indisciplinados e desordenados que os protótipos de projeto, objetivam demonstrar o desempenho do sistema à gerência e aos clientes, além de servir como ferramenta para a aquisição do conhecimento (KAHN & BAUER, 1989).

De acordo com YOUNG (1989), a utilização da prototipagem pode ser adequada a certas tarefas limitadas. A principal inadequação deste método está ligada às dificuldades

encontradas no processo de elicitação do conhecimento, pois trata-se de uma abordagem assistemática e a codificação do conhecimento utilizado é feita diretamente através de regras. Tendo em vista que as ferramentas computacionais utilizadas para o desenvolvimento de sistemas geralmente impõem um formato pré-determinado, através do qual o conhecimento deve ser inserido, podem ocorrer distorções no processo de aquisição e análise do conhecimento, através da rápida prototipagem (SLATTER, 1987).

Utilizando a abordagem da rápida prototipagem o EC pode, muitas vezes, obter uma visão insuficiente, ou pouco coerente, da estrutura do domínio (BREUKER & WIELINGA, 1989). Como conseqüência, pode necessitar retroceder durante o processo, a fim de reestruturar adequadamente o conhecimento adquirido. No mínimo, o emprego deste método pode conduzir à falta de controle do processo de desenvolvimento de SE (HAYES-ROTH et al., 1983, citados por BREUKER & WIELINGA, 1989)

Ao longo dos anos 80, foram apresentadas várias propostas metodológicas baseadas em diferentes abordagens e modelos, algumas incluindo ferramentas para auxiliar o EC no processo de produção de SE.

Contudo, a maioria das ferramentas disponíveis comercialmente não possuíam a capacidade de auxiliar o EC durante a etapa de aquisição de conhecimento. Visando suprir esta lacuna, foi desenvolvido o projeto KEATS (The Knowledge Engineering's Assistent), focado na necessidade de auxiliar o EC na tarefa de transformar o conhecimento adquirido através do especialista, inicialmente obtido na forma de "dados crus", possibilitando sua implementação de modo adequado (MOTTA et al., 1989).

Para WATSON et al. (1989), tanto KADS como KEATS não permitem a modelagem do domínio completamente independente da implementação.

Outro método utilizado consiste em desenvolver aplicações com abordagem centrada no cliente, ou CCA (*Client-Centred Approach*). Nesta abordagem, o cliente é o centro de todo o desenvolvimento do processo. Os primeiros estágios do desenvolvimento do sistema são enfatizados, havendo a clara definição dos benefícios e limitações do sistema. Desta forma, busca-se atingir os objetivos propostos, obtendo-se um produto final adequado às necessidades do cliente e evitando-se desperdícios em termos de tempo e recursos financeiros (WATSON et al., 1994).

Segundo BRANDON (1993), SE podem ser classificados de acordo com as seguintes categorias, considerando-se o seu nível de desenvolvimento: (i) configuração geral do sistema;

(ii) estrutura básica do sistema; (iii) sistema demonstrativo; (iv) sistema produzindo resultados; (v) sistema sendo utilizado; (vi) sistema comercial; e (vii) sistemas produzindo benefícios regulares comprovados.

FERRADA & HOLMES (1990), pesquisadores da utilização de SE aplicados à engenharia química, sugerem um procedimento para o desenvolvimento de SE através de quatro etapas. Durante a primeira etapa são realizadas definições básicas com relação ao problema, funções do sistema e são estabelecidos os requisitos da base de conhecimento. Ao longo desta primeira etapa, devem também ser identificados os especialistas do domínio que estejam dispostos a acompanhar o projeto. A segunda etapa consiste em desenvolver um protótipo preliminar, cujo objetivo principal é demonstrar as potencialidades técnicas e perspectivas econômicas do sistema. Segundo os autores, os projetistas e usuários do sistema valorizam a elaboração de um protótipo nos estágios preliminares, considerando-se que os requisitos do sistema são precisamente estabelecidos e que a extensão do risco envolvido com o desenvolvimento do sistema é determinada. O especialista de quem o conhecimento foi extraído deverá validar a solução obtida através do protótipo preliminar. Os resultados esperados com o protótipo preliminar devem estar adequados ao modo como o especialista resolve o problema e, também, às necessidades do usuário final do sistema, que não só deve concordar com as respostas fornecidas pelo protótipo, mas confiar nos resultados. A terceira etapa corresponde ao desenvolvimento da expansão do protótipo, após o mesmo ter sido aprovado. Esta etapa pode incluir a expansão da base de conhecimento, sofisticação da representação e ligações com outros sistemas ou base de dados, caso seja necessário. O quarto e último estágio utilizado pelos autores corresponde à entrega do sistema. Devem ser analisados diferentes ambientes nos quais o sistema poderá ser rodado, para melhor atender às necessidades do usuário final, como microcomputadores ou *mainframes*, otimizando-se os requisitos do programa em termos de memória e desempenho.

Pode-se dizer que existem várias etapas envolvidas no processo de desenvolvimento de SE. De uma forma geral, a maioria dos pesquisadores em engenharia de conhecimento, ao descreverem os métodos utilizados durante o desenvolvimento de suas aplicações, referem-se a cinco fases: fase conceitual, fase de aquisição de conhecimento, fase de desenvolvimento do modelo, fase de implementação e fase de validação do modelo.

3.2 Novas abordagens e tendências no desenvolvimento de SE

De acordo com NARAZAKI et al. (1990), o estabelecimento de um método para desenvolvimento de SE é extremamente importante. Na maioria dos casos, as dificuldades para

se obter sucesso com a aplicação concentram-se na etapa de formalização do problema, com relação aos paradigmas de SE, bem como durante a aquisição de conhecimento.

A decisão de se escolher entre os diversos paradigmas de SE envolve a análise de uma série de fatores. Para o estabelecimento dos métodos de desenvolvimento mais indicados à cada projeto específico, é necessário realizar uma ampla análise dos objetivos do sistema a ser construído, funções e benefícios inerentes ao sistema, domínio do conhecimento a ser abordado, características da tarefa, tipos de usuários, entre outros. Deve-se considerar, ainda, os recursos humanos e financeiros disponíveis para a realização do projeto.

Muitas vezes, a escolha dos métodos de trabalho a serem utilizados pode implicar a redução do tempo consumido durante o desenvolvimento do SE, provocando, conseqüentemente, redução dos custos envolvidos.

Um aspecto muito importante a ser considerado diz respeito à manutenção e evolução de SE. Assim, sempre que novo conhecimento é adquirido, deve ser implementado, aumentando o desempenho do sistema. Em aplicações comerciais, esta tarefa deve ser sistemática para que seja mantido um padrão de qualidade adequado (GIARRATANO & RILEY, 1989).

Alguns tipos de problemas são adequadamente resolvidos através de sistemas baseados em regras (SBR). Existem problemas, no entanto, que precisam ser abordados utilizando-se técnicas que permitam ao sistema aprender através de exemplos, ou através de casos.

Os SBR são considerados sistemas tradicionais e apresentam maior dificuldade de manutenção, se comparados a sistemas híbridos, ou seja, SE desenvolvidos utilizando-se mais de um paradigma.

Mesmo constituindo-se em uma nova tecnologia, os sistemas híbridos têm sido empregados com sucesso em várias áreas de aplicação, como ferramentas de apoio à decisão.

Os SE tradicionais fornecem uma metodologia adequada para a representação do conhecimento, explicando adequadamente as conclusões obtidas, mas não possuem a capacidade de aprendizado. Os sistemas conexionistas despertam grande interesse, pois possuem a capacidade de aprendizado automático, inerente às redes neurais. Além desta grande vantagem, estes sistemas têm sido muito utilizados na construção de aplicações de reconhecimento de padrões (MENDONÇA et al., 1994; LEÃO et al., 1995).

Os sistemas conexionistas híbridos foram propostos para integrar os paradigmas conexionista e simbólico, incorporando as vantagens de ambos.

O raciocínio simbólico utiliza uma linguagem próxima da linguagem natural para manipular o conhecimento (SZYSZKO, 1987). Este tipo de abordagem permite explicitar a semântica do conhecimento armazenado e possibilita a construção da base de conhecimento através de métodos tradicionais, simplificando o seu entendimento e manipulação. Por outro lado, o paradigma conexionista oferece os recursos necessários para a aquisição de conhecimento e refinamento da base (GALLANT, 1988, citado por GUAZELLI et LEÃO, 1994 e LEÃO et al., 1995).

Atualmente, pode ser observada uma maior tendência no desenvolvimento de sistemas híbridos, ou seja, sistemas desenvolvidos utilizando-se mais de um tipo de representação de conhecimento (exemplo: regras e *frames*, redes neurais e *frames*, etc).

Um dos requisitos mais enfatizados, atualmente, diz respeito à capacidade de aprendizado de SE. Neste sentido, o emprego de sistemas desenvolvidos com a utilização de redes neurais tem sido expressivo. Da mesma forma, muitos esforços vêm sendo concentrados na pesquisa e desenvolvimento de sistemas que utilizam raciocínio baseado em casos, ou CBR (*Case Based Reasoning*).

CBR apresenta características vantajosas em relação à abordagem de raciocínio baseado em modelos. Como CBR não requer um modelo explícito do conhecimento, os processos de elicitação e implementação ficam reduzidos à obtenção e descrição de casos. Um caso pode ser definido como um pedaço contextualizado de conhecimento, representando experiência. Outra vantagem desta abordagem consiste em manipular grandes volumes de informação e, principalmente, em possibilitar o aprendizado automático, adquirindo novo conhecimento à medida em que novos casos são armazenados na base, facilitando o processo de manutenção (WATSON & MARIR, 1994). Os sistemas desenvolvidos através desta abordagem apresentam a vantagem de serem desenvolvidos muito mais rapidamente do que os SE tradicionais.

Diante do exposto, pode-se dizer que existem várias abordagens técnicas e ferramentas disponíveis, devendo-se buscar os métodos mais apropriados à cada tipo de projeto.

3.3 Descrição do método utilizado para desenvolvimento do EDIFICAR

O desenvolvimento do EDIFICAR foi dividido em quatro fases: fase conceitual, fase de aquisição do conhecimento, fase de implementação e fase de validação do protótipo, havendo, contudo, sobreposições entre as mesmas, conforme ilustra a figura 3.1.

A fase conceitual teve como objetivo principal definir e avaliar o domínio do conhecimento, verificando se a tarefa seria adequada ao desenvolvimento de um SE. Foram estabelecidos os limites do domínio, permitindo determinar o nível de profundidade que o processo de aquisição de conhecimento deveria atingir. Nesta fase, identificaram-se os usuários do sistema, ficando bem definidos os objetivos a serem atingidos com o desenvolvimento do protótipo, bem como suas funções e benefícios.

Posteriormente, foi iniciada a fase de aquisição de conhecimento. Esta fase foi subdividida em duas etapas: a primeira, correspondente à aquisição preliminar de conhecimento, na qual foi efetuada revisão bibliográfica na área de fissuração em CA e realizadas entrevistas com o especialista, conforme é abordado com mais detalhe nas próximas seções. A análise dos conhecimentos adquiridos permitiu realizar a modelagem de conhecimento. Para tanto, foram utilizadas técnicas de representação intermediária, possibilitando o início da implementação do protótipo no microcomputador. A segunda etapa, denominada aquisição detalhada de conhecimento, teve como objetivo principal verificar se o modelo do conhecimento correspondia, adequadamente, à visão dos especialistas.

Durante a fase de implementação do protótipo, realizada de forma interligada à fase de aquisição de conhecimento, foi definida a interface com o usuário, de acordo com as facilidades disponíveis na ferramenta computacional utilizada.

Posteriormente, foi desenvolvida a fase de validação, de um modo mais formalizado. Efetivamente, esta tarefa já estava sendo realizada ao longo das etapas de aquisição de conhecimento e de implementação do protótipo.

O sistema EDIFICAR foi desenvolvido a nível de protótipo e, após a validação, deverá estar disponível ao uso. Nesta etapa, poderá ser utilizado na UFRGS, por alunos e professores, ou em instituições privadas que estejam interessadas em colaborar com o projeto. Desta forma, pretende-se obter subsídios para a realização de modificações ou ajustes, a fim de adequar o sistema às prováveis necessidades dos usuários. O conjunto das ações desenvolvidas nesta etapa buscam obter a versão final do sistema EDIFICAR e têm, também, o objetivo fundamental de realizar a manutenção do sistema.

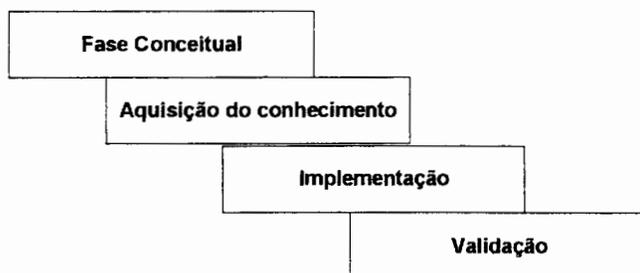


Figura 3.1 Principais fases do desenvolvimento do sistema EDIFICAR

3.3.1 Fase Conceitual

Durante a fase conceitual foi realizada a avaliação do domínio do conhecimento, buscando-se verificar se a tarefa seria adequada ao desenvolvimento de SE. Após a delimitação do domínio, foram definidos os usuários, objetivos e funções do sistema.

3.3.1.1 Avaliação do domínio de conhecimento

A primeira etapa realizada durante a fase conceitual foi a definição do domínio de conhecimento. Para avaliar se o domínio seria adequado ao desenvolvimento de um SE, foi realizada análise com base no método para avaliação de aplicações candidatas, de SLAGLE & WICK (1988). Este método consiste em uma extensão e reformulação de um trabalho similar proposto por PRERAU, em 1985. Segundo os autores, o processo de seleção de uma aplicação corresponde a um passo de fundamental importância para que se obtenha sucesso com o desenvolvimento de um SE. O método propõe a análise do domínio da aplicação verificando se apresenta certos atributos, sendo alguns considerados essenciais e outros, desejáveis. Estes atributos estão relacionados à tarefa, propriamente dita, aos usuários e aos profissionais envolvidos no desenvolvimento do sistema, ou "gerência", incluindo-se o EC e o especialista.

Foram analisadas algumas características essenciais do domínio, isto é, atributos que a tecnologia atual de SE requer para que o desenvolvimento de uma aplicação tenha êxito. Concluiu-se que a aplicação proposta desempenharia uma tarefa útil e necessária. As pessoas ligadas ao desenvolvimento do protótipo, incluindo os especialistas envolvidos, futuros usuários e professores, consideraram a aplicação importante e exequível, sendo adotadas expectativas realistas quanto à abrangência e limitações do protótipo. Houve o comprometimento dos especialistas em acompanharem o projeto até a fase final de desenvolvimento do protótipo.

Além dos requisitos importantes mencionados anteriormente, procurou-se analisar a tarefa do especialista em patologia das edificações, no que se refere ao diagnóstico de fissuras

realistas quanto à abrangência e limitações do protótipo. Houve o comprometimento dos especialistas em acompanharem o projeto até a fase final de desenvolvimento do protótipo.

Além dos requisitos importantes mencionados anteriormente, procurou-se analisar a tarefa do especialista em patologia das edificações, no que se refere ao diagnóstico de fissuras em CA, a fim de identificar os atributos necessários. Verificou-se que o conhecimento especializado, julgamento e experiência adquiridos pelo especialista desempenham um papel fundamental para a adequada realização da tarefa. No processo de resolução do problema é necessária a utilização de conhecimento heurístico, regras e estratégias. Mesmo sabendo-se que um SE para diagnóstico de fissuras em CA poderia utilizar algoritmos, como por exemplo, para resolver problemas ligados a cálculo estrutural, a maior parte da tarefa deveria ser resolvida através de heurísticas. Caso contrário, não seria apropriada ao desenvolvimento de um SE. Concluiu-se, também, que a aplicação poderia ser testada durante os vários estágios de seu desenvolvimento, como é fundamental a qualquer sistema. Constatou-se, ainda, que a tarefa não requer criatividade para ser desempenhada, o que representaria um obstáculo ao desenvolvimento do sistema.

A tarefa em análise não é tão fácil a ponto de poder ser resolvida sem o auxílio de um profissional especializado, já que envolve um grande número de parâmetros e não pode ser resolvida apenas com métodos convencionais. No entanto, não é tão difícil a ponto de envolver um volume enorme de conhecimentos na sua resolução. A tarefa não requer conhecimento em um número grande de áreas distintas, não envolvendo o uso de senso comum, o que traria dificuldades e limitações práticas (PRERAU, 1989).

De acordo com o método sugerido por SLAGLE & WICK (1988), foram também analisadas características desejáveis do domínio do conhecimento. Estas características correspondem a atributos adicionais, não necessariamente requeridos pela tecnologia de SE, mas que podem indicar se a aplicação é adequada ao desenvolvimento do sistema. Foi possível concluir que a tarefa de diagnóstico de fissuras em CA envolve fatores subjetivos, aborda soluções que podem ser explicáveis através do protótipo e que podem ser adequadamente entendidas pelos usuários. Considerou-se possível desenvolver uma interface "amigável", sendo o sistema capaz de interagir de forma inteligente com o usuário.

Outro indicativo da aplicabilidade do desenvolvimento do protótipo é que tarefas similares foram desempenhadas com sucesso por outros SE. Podem ser citados alguns exemplos, como: sistema BREDAMP-diagnóstico das causas de umidade em edificações (ALWOOD, 1989); sistema PERCHE C- diagnóstico de falhas em sistemas de aquecimento de

água (BOURDEAU et al., 1990); sistema DAPS- assessoria em danos estruturais (ROSS et al., 1990); sistema REPCON - assessoria em reparos de edificações (KALYANASUNDARAM et al., 1990), sistema PCPILE - diagnóstico de danos em estacas protendidas (YEH et al., 1991); entre outros.

Para efetuar o sistema de avaliação proposto pelo método utilizado (SLAGLE & WICK, 1988), o EC pontua cada um dos atributos indicados com um valor entre 0 a 10, multiplicando os valores por pesos pré-estabelecidos no método, obtendo os resultados. Posteriormente, o somatório dos resultados é dividido pelo somatório dos pesos, obtendo-se um valor de avaliação.

Os quadros 3.2 e 3.3 apresentam os valores atribuídos para os atributos essenciais e desejáveis que foram considerados na avaliação da tarefa, respectivamente.

Quadro 3.1 Forma de avaliação dos atributos essenciais para o domínio de fissuração em CA (SLAGLE & WICK, 1988)

Atributo	Resultado	Peso	Valor
A aplicação desempenha uma tarefa útil	100	10	10
Há expectativas realísticas quanto às limitações do sistema	100	10	10
O projeto possui o comprometimento da gerência	100	10	10
A tarefa não requer o uso intensivo da linguagem natural	100	10	10
A tarefa requer o uso intensivo do conhecimento	63	7	9
A tarefa requer o uso de regras, heurísticas e estratégias	80	8	10
Estão disponíveis casos para teste da aplicação	100	10	10
O sistema pode crescer de forma incremental	70	7	10
A tarefa não requer o uso de senso comum	90	10	9
A tarefa não requer 100% de acertos	80	8	10
A tarefa será desempenhada no futuro	80	10	8
A tarefa é acessível, mas não é fácil demais	80	8	10
A tarefa não requer um prazo limite para ser desenvolvida	70	7	10
Existem especialistas	100	10	10
Os especialistas possuem ampla experiência profissional	100	10	10
Os especialistas estão dispostos a acompanhar todo projeto	90	10	9
Os especialistas são acessíveis	80	8	10
Os especialistas transmitem os conhecimentos com clareza	80	8	10
Os especialistas não abandonam projetos antes do término	80	8	10
Os especialistas usam raciocínio simbólico	64	8	8
Não é demasiadamente difícil transmitir o conhecimento	70	7	10
Os especialistas não usam habilidades físicas	70	10	7
Existe consenso quanto às boas soluções ao problema	100	10	10
Os especialistas não usam criatividade na resolução	100	10	10
	2047	214	

Quadro 3.2 Forma de avaliação dos atributos desejáveis para o domínio de fissuração em CA (SLAGLE & WICK, 1988)

Atributo	Resultado	Peso	Valor
A gerência prosseguirá o projeto , se for bem sucedido	56	8	7
○ sistema não interferirá na rotina do usuário, radicalmente	32	4	8
○ sistema interage com o usuário	40	4	10
○ sistema é capaz de explicar sua linha de raciocínio	40	4	10
○ sistema questiona o usuário de forma adequada	36	4	99
A tarefa é considerada crucial na área de especialização	32	4	8
As soluções são explicáveis	40	4	10
A tarefa não requer soluções em tempo-real	40	5	8
SE semelhantes já foram desenvolvidos anteriormente	80	8	10
A tarefa é desempenhada em muitos locais	80	8	10
A tarefa pode ser desempenhada em ambientes hostis	0	3	0
A tarefa envolve fatores subjetivos	32	4	8
Os especialistas não estarão disponíveis no futuro	0	3	0
Os especialistas estão atraídos pelo projeto	36	4	9
Os especialistas não se sentem ameaçados pelo SE	45	5	9
○ conhecimento disponível é organizado adequadamente	6	2	3
	595	71	

$$\text{Avaliação} = (2047 + 595) / (214 + 74) = 9,17$$

Após a análise dos atributos e realização da avaliação, a pontuação obtida pela tarefa foi 9,17, concluindo-se que é adequada ao desenvolvimento de SE.

3.3.1.2 Definição dos usuários e identificação dos limites do domínio

A próxima etapa da fase conceitual consistiu em definir o usuário final do sistema.

A decisão do tipo de usuário tem importantes implicações na construção de SE, pois determina qual a profundidade que o processo de aquisição de conhecimento deverá atingir. Pode-se estabelecer, com maior clareza, o nível de detalhamento que o conhecimento encapsulado na base deverá possuir, bem como o grau de precisão dos resultados fornecidos pelo sistema e conteúdo dos relatórios (BRANDON et al., 1988).

É fundamental, portanto, que esta definição seja obtida nos estágios iniciais de desenvolvimento do protótipo, a fim de direcionar o processo de aquisição de conhecimento.

Como o protótipo foi concebido para auxiliar engenheiros e arquitetos não especialistas em patologia das edificações, decidiu-se que o conhecimento contido na base deveria situar-se em um patamar intermediário. Não poderia ser tão aprofundado a ponto de dificultar o seu claro entendimento pelos usuários, deixando de ser uma ferramenta útil durante o processo de

apoio à decisão, nem tão superficial a ponto de não contribuir para o aprimoramento profissional do usuário, visto que uma das funções do sistema é o treinamento. As informações fornecidas pelo protótipo não abordam, por exemplo, aspectos teóricos ligados à microestrutura do concreto.

A definição dos usuários depende das funções que o sistema desempenhará. As funções do sistema, por sua vez, devem estar vinculadas aos benefícios que se deseja obter através do desenvolvimento do sistema (BRANDON et al., 1988).

Definiu-se que o sistema teria, como função principal, a consultoria dirigida a engenheiros ou arquitetos não especialistas em patologia das edificações, considerados os usuários finais do sistema, como já foi mencionado anteriormente.

A consultoria proporciona maior rapidez ao processo de tomada de decisões, além de facilitar o acesso ao conhecimento especializado, garantindo o seu armazenamento (BRANDON et al., 1988).

O sistema também foi concebido para desempenhar a função de treinamento, buscando contribuir para a qualificação de profissionais ligados à área. Além disto, deve ser considerada a possibilidade de utilização do sistema como ferramenta auxiliar na formação acadêmica de estudantes da área.

Além das funções citadas, o sistema poderá servir como *checklist* a especialistas da área. Para BRANDON et al. (1988), o benefício provável da utilização de *checklist* consiste em auxiliar os usuários, na medida em que estes, ao responderem os questionamentos, estarão mais preparados para formularem suas próprias respostas, garantindo maior consistência no desempenho da tarefa.

Nesta fase definiu-se, também, que o domínio a ser abordado ficaria restrito à fissuração em lajes, vigas, pilares e lajes em balanço de edificações correntes.

3.3.1.3 Disponibilidade de especialistas

Durante a fase conceitual, avaliou-se a disponibilidade de especialistas em patologia das edificações, dos quais o conhecimento poderia ser adquirido.

Verificou-se a existência de alguns especialistas no domínio, ligados à UFRGS. Dois especialistas foram consultados e comprometeram-se em acompanhar o desenvolvimento do protótipo.

Os especialistas envolvidos no projeto são notadamente reconhecidos profissionalmente, não só por apresentarem sólidos conhecimentos teóricos sobre o assunto, mas também por possuírem ampla vivência na resolução de problemas do domínio. Ambos são especialistas em patologia das construções possuindo, também, grande conhecimento na área de cálculo estrutural.

Além disso, os dois especialistas são pesquisadores e professores da UFRGS, possuindo grande facilidade de articulação para expor seus conhecimentos e idéias, de forma bastante clara e acessível.

Estas características foram extremamente importantes pois permitiram que, durante o processo de aquisição de conhecimento, fosse possível obter um adequado entendimento sobre as questões abordadas, mantendo-se um bom relacionamento com ambos os especialistas.

A especialista que acompanhou todo o desenvolvimento do protótipo, participando ativamente durante as fases conceitual e de aquisição preliminar de conhecimento, será denominada de especialista A. O segundo especialista, que será denominado de especialista B, iniciou sua participação na fase de aquisição detalhada de conhecimento, quando se envolveu intensamente no projeto, avaliando o modelo proposto.

Ambos participaram do trabalho de verificação e teste do modelo, revisando as árvores de conhecimento e avaliando o protótipo no microcomputador, na medida em que este era implementado.

O processo de validação do protótipo com a participação de especialistas externos contou com a supervisão do especialista A.

3.3.2 Fase de aquisição de conhecimento

O processo de aquisição de conhecimento consiste em uma combinação das atividades de adquirir, interpretar e organizar o conhecimento de especialistas em determinado domínio (MOTTA et al., 1989).

Conforme mencionado na seção 3.2, o processo de adquirir o conhecimento é crucial na construção de SE. A aquisição de conhecimento pode ser considerada difícil por várias razões. As dificuldades são causadas, principalmente, pelo fato do conhecimento de especialistas apresentar-se de forma compilada, praticamente inconsciente. Este fenômeno torna-se ainda

mais evidente à medida que o conhecimento do especialista aumenta (KIDD & WELBANK, 1984 e GIORNO et al., 1988).

Especialistas apresentam dificuldades em expressar o conhecimento que possuem e em relatar o modo pelo qual solucionam problemas do domínio. Frequentemente, o especialista pode dizer qual foi sua solução para determinado problema, porém apresenta dificuldades para descrever, em detalhes, o processo utilizado para obter tal solução. O conhecimento especializado é adquirido através de anos de experiência, abrangendo muito mais do que fatos e regras. É difícil de ensinar e de descrever. Na resolução de problemas, especialistas utilizam métodos e abordagens desenvolvendo regras práticas ou heurísticas (HART, 1985).

Os problemas existentes no processo de aquisição de conhecimento podem ser categorizados, segundo YUEN & RICHARDS (1993), em dois grupos: (i) problemas relativos a limitações humanas de transmissão lingüística do especialista e de comunicação entre ele e o EC; (ii) problemas causados pela própria natureza do conhecimento que é, em grande parte, tácito e requer interpretação para ser adquirido de forma adequada pelo EC.

A função do EC, na construção de SE, consiste em assessorar problemas, extrair conhecimento de especialistas em determinado domínio e organizar este conhecimento de forma eficiente (STOCKLEY, 1987 e COHN et al., 1988).

O EC deve compreender o domínio da informação para interagir adequadamente com o especialista e, ao mesmo tempo, possuir o conhecimento necessário em IA para selecionar a melhor linguagem ou ferramenta para implementar o sistema (ABEL, 1993).

Para HART (1985), o EC deve estar familiarizado com várias áreas, tais como computação, psicologia, lógica formal, estatística, além de conhecer a terminologia utilizada no domínio.

Alguns pesquisadores têm desenvolvido ferramentas automatizadas para serem utilizadas durante a fase de aquisição de conhecimento, tentando eliminar a necessidade de participação de um EC no processo. No entanto, para MEDSKER et al. (1990) a participação de um EC é imprescindível, considerando-se o seu conhecimento e experiência para auxiliar o especialista no uso correto destas ferramentas.

YUEN & RICHARDS (1993) salientam, ainda, que em função da natureza do conhecimento não devem ser utilizadas somente ferramentas automatizadas no processo de

aquisição, sendo recomendável a aplicação de alguns métodos usados em pesquisa nas ciências sociais.

Alguns pesquisadores em SE consideram que o EC não deve ter experiência prévia no domínio, de forma a assegurar que todos os aspectos do problema sejam adequadamente abordados durante a aquisição de conhecimento. Neste caso, o EC pode enfatizar determinados aspectos que ele mesmo considere fundamentais, negligenciando outros pontos abordados pelo especialista e trazendo prejuízos importantes ao sistema.

Por outro lado, quando o EC não possui nenhuma experiência prévia no domínio, existe a desvantagem de um maior consumo de tempo para que sejam adquiridos todos os conhecimentos básicos necessários ao perfeito entendimento do problema.

Para HART (1986), citada por MEDSKER et al. (1990), um bom EC deve ter conhecimentos prévios na área ou, pelo menos, possuir a habilidade de aprender conceitos básicos de um domínio, rapidamente. ALWOOD (1989) considera conveniente que o EC tenha uma apropriada formação geral sobre o assunto, desde que tenha sempre humildade suficiente para elucidar todas as questões, inclusive as mais simples.

A aquisição de conhecimento pode ser realizada de um ou mais especialistas. Segundo MITTAL & DYM (1985), a utilização de vários especialistas no processo de elicitacão pode ser vantajosa, pois conversando sistematicamente com um grupo diversificado de especialistas, pode-se chegar a um melhor entendimento e definição de algumas etapas do desenvolvimento do sistema, obtendo-se maior sucesso.

Existem significativas diferenças entre o conhecimento adquirido de especialistas e de não-especialistas. O conhecimento especializado tende a reduzir a quantidade de informações e de processamento necessários ao processo decisório (LEÃO & ROCHA, 1990).

Entrevistas com vários especialistas no mesmo domínio demonstram que todos seguem uma estratégia bastante similar na decomposição de problemas em sub-problemas, embora seja evidente que existem sub-áreas de especialização no domínio, ou seja, cada especialista parece estar mais familiarizado com um determinado ramo do conhecimento (MITTAL & DYM, 1985).

Apesar de ser conveniente fundir o conhecimento de várias fontes, podem surgir contradições, exigindo do EC um tempo extra para resolver conflitos. No entanto, tais dificuldades podem ser benéficas ao processo de modelagem de conhecimento, indicando áreas do domínio que devam ser melhor pesquisadas (DE LA GARZA & IBBS, 1990).

Na fase de aquisição de conhecimento, pode ainda haver a participação de um programador integrando a equipe de trabalho. Sua função, durante o desenvolvimento do sistema, é ser responsável pela utilização das linguagens de programação, bem como pelos ambientes de desenvolvimento e ferramentas empregadas, normalmente não participando das entrevistas e da análise das informações (ABEL, 1992).

3.3.2.1 Técnicas de aquisição de conhecimento

O processo de eliciação de conhecimento é muito importante e requer um consumo de tempo considerável (DE LA GARZA & IBBS, 1990). O tempo consumido e as dificuldades que ocorrem durante o processo variam com a complexidade do domínio em estudo e com as dimensões do problema que está sendo manipulado. Nenhuma metodologia formal pode ser considerada universalmente efetiva (HART, 1985).

As técnicas de aquisição diferem entre si quanto à sua efetividade na eliciação dos diferentes tipos de conhecimento e na eliciação do conhecimento de diferentes especialistas (STOCKLEY, 1987; BRANDON et al., 1988). Assim, algumas técnicas são mais indicadas a determinados domínios podendo, no entanto, não ser adequadas a outros casos (HART, 1985). A decisão de quais métodos utilizar, em cada caso específico, dependerá da análise e julgamento do EC.

É provável que os melhores resultados sejam obtidos com a combinação de várias técnicas de aquisição (STOCKLEY, 1987; GIORNO et al., 1988; BRANDON et al., 1988).

Normalmente, a aquisição de conhecimento inicia com uma fase de pesquisa na literatura, buscando-se uma familiarização com os métodos e vocabulários específicos do domínio. Esta fase é tão mais necessária quanto mais desconhecido for o domínio (ABEL et al., 1992).

A seguir, são apresentadas, de forma sucinta, as técnicas de aquisição mais freqüentemente encontradas na literatura.

Uma das mais importantes técnicas da engenharia de conhecimento é a entrevista (DIEDERICH & LINSTER, 1989). Grande parte das informações utilizadas durante a fase de análise é obtida através desta técnica, que requer uma preparação anterior por parte do EC. As entrevistas devem ser gravadas e posteriormente transcritas, organizando-se a documentação sobre o conteúdo das sessões.

Em geral, nos primeiros estágios da aquisição de conhecimento, são realizadas entrevistas preliminares, abertas ou não-estruturadas. Estas entrevistas têm caráter geral e são caracterizadas pelo diálogo, sem seguir uma linha rígida. As perguntas dirigidas ao especialista devem abordar o objeto do conhecimento ou o modo pelo qual o problema é resolvido, sem interrupções, permitindo ao especialista discorrer livremente sobre o assunto (ABEL, 1993).

Além de uma descrição geral do processo de resolução do problema, as entrevistas não estruturadas buscam definir os *goals* do SE, que podem ser definidos como metas ou os resultados a serem obtidos, estabelecendo os limites do problema, mesmo que ainda não seja possível ter um entendimento profundo sobre o domínio (ALWOOD, 1989). Servem, ainda, como base para as entrevistas estruturadas, constituindo-se em um valioso auxílio no processo de aquisição e análise de conhecimento (GIORNO et al., 1988).

Buscando obter detalhes mais específicos sobre o domínio, devem ser realizadas entrevistas dirigidas ou estruturadas, através de um questionamento mais sistemático e objetivo ao especialista. Estas entrevistas são menos intuitivas, permitindo focalizar o problema em maior profundidade (DE LA GARZA & IBBS, 1990).

Tendo-se definido os *goals* durante as entrevistas preliminares, nas entrevistas dirigidas são identificados os passos intermediários executados durante a realização da tarefa, confirmando-se cada *goal* como sendo a solução ao problema (ALWOOD, 1989).

Nesta fase, já é possível identificar os objetos do domínio, seus aspectos ou atributos e as relações existentes entre eles. Os objetos normalmente correspondem aos substantivos que são utilizados de forma repetitiva pelo especialista, seus atributos correspondem aos adjetivos e os seus relacionamentos são descritos como verbos (ABEL et al., 1992).

A partir das entrevistas, deve-se obter uma descrição adequada e completa do conhecimento do especialista, além da forma como manipula este conhecimento no domínio, especialmente no que se refere à incerteza e à falta de elementos de análise (HART, 1986).

Outra técnica de aquisição de conhecimento corresponde ao protocolo verbal. Através deste método, é possível observar o especialista durante a realização da tarefa, que descreve em voz alta o modo utilizado para solucionar o problema. Na demonstração do conhecimento heurístico do especialista, esta técnica tende a ser mais fiel do que a entrevista não-estruturada, já que permite verificar exatamente quais os métodos que o especialista realmente utiliza (ABEL, 1993). Contudo, este método pode levar o especialista a adotar uma abordagem mais sistemática do que o normal (STOCKLEY, 1987).

Ainda seguindo a abordagem observacional, pode-se citar a técnica denominada "estudos observacionais". O especialista é filmado enquanto está trabalhando e, posteriormente, faz comentários retrospectivos (STOCKLEY, 1987). Este método apresenta vantagens sob a técnica de entrevista, não havendo interrupções ou possíveis embaraços ao especialista. Contudo, apresenta algumas limitações, como por exemplo: grande consumo de tempo necessário à sua aplicação, já que o especialista não está concentrado na resolução de problemas do domínio durante todo o seu tempo (DE LA GARZA & IBBS 1990). Além disto, o especialista está propenso a esquecer coisas e a seguir falsos caminhos (STOCKLEY, 1987).

A técnica de aquisição de conhecimento denominada classificação conceitual consiste em fornecer listas de objetos ao especialista, obtidas na análise de conhecimento, para que os objetos sejam sucessivamente divididos em classes sob diversos critérios, ordenados e organizados de várias formas (ABEL et al., 1992). Este método evidencia a hierarquia entre os objetos, possibilitando a organização das informações, com vistas à representação do conhecimento (ABEL, 1993).

O método de introspecção consiste em obter o relato do especialista sobre o modo pelo qual resolve um caso imaginário (WIELINGA & BREUKER, 1985, citados por FORMOSO, 1991). Esta técnica possibilita evidenciar as incertezas do conhecimento, propondo ao especialista novas formas de resolver o problema, sob contexto cada vez mais restrito. Pode-se perguntar, por exemplo, o que faria se determinada informação não estivesse disponível e com que segurança poderia propor uma solução ao problema. São apresentadas cada vez mais restrições, até que o especialista declare que não é mais possível resolver o problema (ABEL et al., 1992).

O método de indução (*machine induction*) consiste em selecionar uma série considerável de exemplos específicos do domínio, aplicar um algoritmo indutivo e obter, como resultado, a mais simples série de regras capaz de gerar estes exemplos (STOCKLEY, 1987). Este método é objetivo, consistente e pode ser repetido inúmeras vezes. Contudo, apresenta algumas restrições que devem ser também consideradas. As regras induzidas podem nem sempre estar corretas. A qualidade dos resultados depende do algoritmo utilizado no processo de indução e, principalmente, está relacionada à seleção da série de exemplos, também denominada série de treinamento (HART, 1985).

Dentre as técnicas de escalas multidimensionais, utilizadas na psicologia, destaca-se a técnica conhecida como *repertory grid* ou análise de grade. A técnica *repertory grid* busca

obter resultados que expressem, de forma fiel, a subjetividade transmitida pelo especialista durante o processo de aquisição (HART, 1986).

O processo inicia com a definição do problema a ser investigado. Após a determinação do objetivo, o especialista dedica-se à construção da grade, composta por um sistema de referências cruzadas entre elementos, que representam os objetos do problema, e por construções, que são atributos bi-polares dos elementos, por exemplo, falso/verdadeiro, forte/fraco. Normalmente, é utilizada a elicitación tripla, na qual o especialista compara um grupo de três elementos, identificando os dois mais similares e o elemento diferente dos dois primeiros (HART, 1986). Solicita-se, então, que o especialista atribua um grau numérico para medir a semelhança ou diferença entre os elementos (ABEL, 1993). Após a construção da grade, são empregados métodos de análise baseados em teoria estatística, agrupando os objetos similares em *clusters*. Após esta análise, as construções e elementos são reordenados, de acordo com a obtenção dos *clusters*. O processo deve ser repetido tantas vezes quantas forem necessárias, até que o especialista considere que a grade representa adequadamente o seu ponto de vista (HART, 1986).

A técnica *repertory grid* é adequada para abordar diferenças entre conceitos, auxiliando o especialista a estruturar e classificar seu conhecimento (HART, 1986), além de evidenciar relações de analogia e dependência entre objetos (ABEL, 1993).

Como poderá ser verificado na próxima seção, nem todas as técnicas descritas anteriormente foram utilizadas no processo de aquisição do sistema EDIFICAR.

3.3.2.2 Descrição das técnicas de aquisição utilizadas durante o desenvolvimento do EDIFICAR

a) Aquisição preliminar de conhecimento

A aquisição preliminar de conhecimento para construção do modelo de conhecimento do sistema EDIFICAR teve forte ligação com a fase conceitual, dando continuidade ao processo. Durante esta etapa, o apoio obtido do especialista A permitiu obter grande parte das informações necessárias ao desenvolvimento do modelo de conhecimento. Com base nas entrevistas iniciais, realizou-se uma avaliação do trabalho desenvolvido na fase conceitual, retomando-se aspectos importantes já anteriormente discutidos com o especialista A, como: (i) objetivos do desenvolvimento do protótipo, (ii) funções e benefícios do sistema, (iii) usuários do sistema e (iv) limites do domínio. Todos estes tópicos foram confirmados e ficou estabelecida,

também, a abrangência do conhecimento a ser inserido no protótipo: o sistema foi concebido para fornecer ao usuário as causas mais comuns de fissuração em lajes, vigas, pilares e lajes em balanço de edificações correntes. Foram excluídos os casos de fissuração causada por problemas em fundações e manifestações de fissuras em barragens, muros e cortinas de CA, reservatórios, placas e cascas, pontes, paredes estruturais, consoles, fissuras em elementos de concreto protendido, entre outros.

Para preparar as entrevistas, deu-se continuidade à pesquisa bibliográfica. Nesta etapa, foi intensamente consultada a dissertação de mestrado de autoria do especialista A (DAL MOLIN, 1988). Esta pesquisa apresenta as possíveis causas e mecanismos de ocorrência para cada manifestação típica de fissuras em CA e contém uma aplicação prática a casos reais atendidos pela Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC, com base nos diferentes tipos de problemas ocorridos no Rio Grande do Sul, no período de 1977 a 1986. A dissertação do especialista A também aborda as medidas preventivas e corretivas indicadas aos casos de fissuração descritos.

Inicialmente, foram realizadas duas sessões de entrevistas não-estruturadas, com a duração de aproximadamente 1h30min cada uma. As entrevistas preliminares abordaram os seguintes conteúdos:

(i) 1ª entrevista: teve como objetivo principal motivar o especialista A para a realização do trabalho, expondo-lhe os aspectos gerais da pesquisa, discorrendo sobre o método a ser empregado e procurando familiarizá-lo com os jargões técnicos utilizados em engenharia de conhecimento. Foram apresentadas as técnicas de aquisição de conhecimento que seriam empregadas e comentou-se sobre as limitações técnicas e operacionais que deveriam ser enfrentadas durante o desenvolvimento do protótipo.

(ii) 2ª entrevista: o especialista A foi solicitado a apresentar um relato, abordando aspectos gerais ligados ao domínio. Foram expostos aspectos fundamentais, como:

- a) importância do estudo da fissuração em CA
- b) procedimentos envolvidos na rotina de trabalho do especialista em patologia das edificações
- c) manifestações típicas de fissuras em CA

Esta entrevista foi de grande importância, pois permitiu obter uma visão ampla do problema e possibilitou a realização de um planejamento adequado das próximas etapas do processo de aquisição.

Dando prosseguimento ao processo, foram utilizadas entrevistas dirigidas ou focadas como técnica de aquisição. Os assuntos de cada sessão foram escolhidos previamente com o especialista A, seguindo-se a mesma seqüência em que foram apresentados em sua dissertação (DAL MOLIN, 1988).

Cada configuração típica de fissura em CA abrangida pelo sistema foi discutida em maior profundidade durante as sessões, abordando-se as origens, possíveis causas e mecanismos de formação. As perguntas dirigidas ao especialista A foram preparadas com antecedência, a partir da revisão bibliográfica e objetivaram elucidar alguns tópicos específicos.

As sessões, que tiveram duração aproximada de 2h, foram estruturadas da seguinte forma:

(i) 1ª entrevista: o especialista A discorreu sobre as fissuras típicas do concreto fresco, devidas a assentamento plástico, dessecação superficial e movimentação de formas, apresentando as possíveis causas e origens, fenômenos intervenientes e mecanismos de formação destas manifestações.

(ii) 2ª entrevista: iniciou-se o estudo das manifestações do concreto endurecido. Foram abordadas as causas, origens e fenômenos intervenientes das manifestações por retração hidráulica e retração térmica.

(iii) 3ª entrevista: por se tratar de um assunto de grande interesse em patologia das edificações, esta sessão foi dedicada somente à exposição das possíveis origens e mecanismos de formação de fissuras por corrosão da armadura.

(iv) 4ª entrevista: o especialista A discorreu sobre as manifestações típicas de fissuras por reações expansivas, abordando as reações por contaminação com sulfatos, com óxidos de ferro e magnésio e reação álcali-agregado.

(v) 5ª entrevista: na última sessão deste bloco de entrevistas, foram abordadas fissuras causadas por sobrecargas e detalhes construtivos.

A partir deste segundo bloco de entrevistas, foi possível obter uma visão mais aprofundada sobre o problema em questão, sendo possível avançar no processo de

desenvolvimento do protótipo. Durante o processo de modelagem, foi realizada a análise do conhecimento, à medida em que ia sendo adquirido.

No sentido de organizar adequadamente este conhecimento, foi necessário utilizar uma técnica de representação intermediária no papel.

Para YOUNG (1989), WATSON et al. (1989) e FORMOSO (1991), a utilização de uma representação intermediária no processo de análise de conhecimento apresenta uma série de vantagens. Em primeiro lugar, armazena o conhecimento adquirido, independentemente de qualquer implementação. Desta forma, o sistema pode ser re-implementado utilizando-se outra ferramenta computacional, caso necessário, sem que seja preciso repetir o processo de aquisição de conhecimento. Além disto, a representação intermediária funciona como um meio de comunicação entre o EC e o especialista, facilitando a análise de conhecimento e podendo ser utilizado como um modelo do domínio.

Segundo HART (1986), os documentos intermediários resultantes das entrevistas e discussões demonstram o produto que está sendo obtido, motivando, auxiliando e incentivando o especialista a executar comentários ou modificações, caso necessário, mantendo ou não determinado rumo de trabalho.

Uma das formas de organizar o conhecimento adquirido é através de árvores de decisão. As árvores de decisão são semelhantes a fluxogramas, mas apresentam nós e ramos. A seqüência descendente ocorre através de atributos situados nos nós, definindo o caminho de acordo com seus diferentes valores para cada atributo analisado (HART, 1986).

A árvore de decisão é bastante útil para descrever processos de classificação, permitindo a visualização da base de conhecimento e facilitando a aplicação de testes. No entanto, para que a representação através de árvores seja bem sucedida, a estrutura lógica do problema deve ser suficientemente definida e hierárquica, o que nem sempre é possível de se obter, na prática (NARAZAKI et al., 1990).

Considerou-se esta forma de representação adequada tendo em vista que, para resolver problemas de diagnóstico, os especialistas normalmente usam uma seqüência de passos ou procedimentos, descartando hipóteses à medida em que prosseguem com a investigação.

A princípio, construíram-se esquemas bastante simples que foram sendo gradativamente ampliados para representar os diversos passos necessários à realização da tarefa, na seqüência adequada. Nas árvores, foram criados vários "braços", representando os possíveis caminhos a

seguir durante o processo decisório. Por fim, foram obtidas as diversas árvores de decisão representando o modelo de conhecimento.

Com a finalidade de avaliar o modelo elaborado a partir da representação intermediária do conhecimento no papel, foram realizadas 23 sessões de entrevistas, com a duração aproximada de 1h15min cada uma.

Em cada sessão, mostrava-se a representação elaborada no papel ao especialista A para que fosse criticada. A árvore de decisão era modificada, sempre que necessário, até que fosse capaz de representar, adequadamente, a rotina utilizada pelo especialista A na resolução do problema.

A representação intermediária no papel foi muito importante no desenvolvimento do protótipo, por vários motivos: (i) serviu como documentação do processo de aquisição de conhecimento, (ii) foi indispensável durante o processo de implementação, (iii) foi utilizada como meio de comunicação com os especialistas, facilitando o processo de validação do protótipo que ocorreu ao longo de seu desenvolvimento e (iv) o conjunto de árvores de decisão constituiu-se na representação da base de conhecimento do EDIFICAR.

Como a elaboração do modelo do conhecimento utilizado pelos especialistas no diagnóstico de fissuras em CA é de fundamental importância nesta pesquisa, este assunto será enfocado com o devido destaque no próximo capítulo desta dissertação.

b) Aquisição detalhada de conhecimento

Nesta etapa, já havia sido construído uma primeira versão do modelo de conhecimento, representado no papel através de diversas árvores de decisão ou árvores de conhecimento.

Foi iniciado, então, o processo de aquisição detalhada de conhecimento, no qual se realizou a análise profunda do modelo elaborado, juntamente com o especialista B.

Inicialmente, realizou-se uma entrevista preliminar, de caráter geral, na qual foram expostos os objetivos do protótipo, as funções do sistema, tipos de usuários e os demais itens definidos durante a fase conceitual, com a duração aproximada de 1 hora.

Foram realizadas cerca de 24 sessões de entrevistas dirigidas, com a duração aproximada de 1h15min. A cada sessão foi discutida uma das árvores de decisão elaboradas. O especialista B procurou expor sua própria visão do problema, fazendo críticas sempre que o modelo não representava exatamente o seu ponto de vista.

Algumas alterações foram realizadas. Contudo, a maior parte do trabalho elaborado correspondeu à visão do especialista B, bem como aos métodos utilizados por ele na resolução dos problemas.

Nesta etapa, acompanhou-se o especialista B durante a realização de uma vistoria a um edifício que apresentava alguns tipos de fissuras em CA. Os casos observados durante a vistoria foram rodados no protótipo comparando-se, posteriormente, os resultados obtidos com o diagnóstico contido no laudo elaborado pelo especialista B, constatando-se concordância nas respostas.

A etapa de aquisição detalhada de conhecimento correspondeu a um período extremamente rico, no qual houve uma consolidação dos conhecimentos adquiridos nas etapas anteriores.

Durante o processo de aquisição de conhecimento foram consumidas 40 h para a etapa de aquisição preliminar e 29h para a etapa de aquisição detalhada. No total, realizaram-se 50 sessões de entrevistas e, em função dos diversos compromissos dos especialistas, não foi possível estabelecer uma periodicidade semanal, sendo necessários cerca de 12 meses para concluir todo o processo de aquisição.

3.3.3 Fase de implementação do EDIFICAR

Após a conclusão dos processos de aquisição preliminar e modelagem de conhecimento, foi iniciada a fase de implementação do protótipo no microcomputador, com a participação de um auxiliar de pesquisa que dedicou cerca de 8 horas semanais, durante um período aproximado de 10 meses.

Ainda foram necessários mais 8 meses de trabalho, com a mesma carga horária semanal, para realizar modificações ou ajustes apontados pelos especialistas durante a verificação do protótipo.

O consumo excessivo de tempo nesta fase foi devido, principalmente, às constantes necessidades de correções na base de conhecimento, à medida em que as árvores de decisão foram examinadas pelos especialistas. Outra justificativa do consumo de tempo foi a criação da interface com o usuário, envolvendo a elaboração de desenhos e de um número considerável de textos explicativos.

Nas próximas seções, são apresentadas as ferramentas para a implementação do protótipo e os métodos utilizados para a representação de conhecimento utilizados.

3.3.4 Ferramentas para representação de conhecimento

A construção de um SE envolve a escolha adequada de uma estratégia de representação de conhecimento e de um processo de inferência (ALTY, 1989).

O processo de representar adequadamente o conhecimento é tão crítico quanto o de adquirir o correto conhecimento. Portanto, deve-se fazer uma análise cautelosa da natureza do problema, a fim de tomar a melhor decisão possível na seleção da arquitetura do sistema ou na escolha da ferramenta a ser utilizada para sua implementação (STOCKLEY, 1987).

Para ABEL (1993), o ambiente ou ferramenta de representação de conhecimento deverá ser escolhido segundo as características da informação e disponibilidade de recursos em termos de programas e equipamentos.

Dentre as ferramentas disponíveis para o desenvolvimento de SE, destacam-se as linguagens de programação de IA e as *shells*.

As ferramentas mais básicas para a construção de sistemas consistem em linguagens de programação, envolvidas tanto na construção do mecanismo de representação de conhecimento quanto no mecanismo de resolução, fornecendo grande flexibilidade ao processo (STOCKLEY, 1987 e BRANDON et al., 1988).

As linguagens computacionais para programação lógica são linguagens especializadas que diferem das linguagens procedurais, como FORTRAN ou PASCAL, devendo ser capazes de armazenar e manipular fatos deduzidos e conhecidos em uma base de conhecimento, possuindo funções ou procedimentos capazes de deduzir novos fatos (DYM & LEVITT, 1991)

Uma das linguagens mais antigas utilizadas na construção de SE é a linguagem LISP, capaz de possibilitar uma grande variedade de estruturas representacionais. Alguns dos primeiros SE, tais como MYCIN e PROSPECTOR foram construídos usando LISP. PROLOG, outra linguagem orientada para IA, pode ser considerada de mais alto nível, se comparada à linguagem LISP (DYM & LEVITT, 1991 e ALTY, 1989).

As linguagens da IA possibilitam grande flexibilidade ao projetista do sistema, no acesso a aspectos específicos do problema. Contudo, uma seqüência considerável de códigos deve ser

escrita para que esta vantagem seja obtida implicando, também, em um maior consumo de tempo (FERRADA & HOLMES, 1990).

Outra alternativa possível consiste na utilização de *shells*, que são pacotes de programas computacionais que simplificam bastante o processo, permitindo ganhar-se tempo e esforço, em comparação ao uso de linguagens de alto nível (STOCKLEY, 1987).

As *shells* dispõem de um amplo código de programação em IA, incluindo um mecanismo de inferência que associa a informação obtida através do usuário ao conhecimento armazenado na base, fornecendo uma resposta apropriada (FERRADA & HOLMES, 1990).

As *shells* permitem que o projetista do sistema trabalhe com uma variedade de tipos de objetos, possibilitam controle sobre a busca e permitem a manipulação de variáveis incertas (ALWOOD, 1989). Além disto, destacam-se as condições de construção da interface e possibilidades de conexões externas (ALTY, 1989).

Segundo MERRITT (1994), a chave da aceitação de *shells* no desenvolvimento de SE está em um bom projeto de interface. A interface com o usuário em uma *shell* é a linguagem usada para expressar a aplicação. É importante para sua satisfação, que o projetista do sistema, ao utilizar uma *shell*, possa predizer o que o programa fará, ou de que forma trabalha. Baseado neste entendimento, poderá experimentar e expandir o seu uso do programa.

Devido às facilidades obtidas com o uso das *shells*, é possível a profissionais ligados a diversas áreas de especialização inserir conhecimento, de uma forma próxima à linguagem natural, como LISP ou PROLOG (DYM & LEVITT, 1991).

Na área de conhecimento em engenharia civil, em geral, os profissionais utilizam-se das facilidades oferecidas pelas *shells*, desenvolvendo aplicações relativamente simples, sem a assistência de um EC. Como estas aplicações são muito próximas a seu campo de especialização, é comum, também, o desenvolvimento de SE por engenheiros civis que atuam como seus próprios especialistas (COHN et al., 1988).

Apesar das facilidades obtidas com o uso de *shells*, que possibilitam ao projetista do sistema concentrar o seu tempo no desenvolvimento da base de conhecimento (ALWOOD, 1989), é preciso observar que, se for utilizada uma *shell* disponível comercialmente, pode-se perder em flexibilidade. Deve-se tomar cuidado para não concentrar a aquisição de conhecimento em torno das características da ferramenta, resultando na produção de um sistema ineficaz (STOCKLEY, 1987 e BRANDON et al., 1988).

3.3.4.1 Escolha da ferramenta utilizada para implementação do EDIFICAR

Tendo em vista que o objetivo principal da pesquisa consiste em modelar o conhecimento de especialistas no diagnóstico de fissuras em CA e não o desenvolvimento de programação em IA e considerando-se as vantagens já mencionadas na seção anterior estabeleceu-se, durante a fase conceitual, que seria utilizada uma ferramenta do tipo *shell* para implementação do protótipo.

No início dos trabalhos, tinha-se à disposição a ferramenta denominada GURU, bastante utilizada em aplicações ligadas à área da administração.

O GURU consiste em um ambiente integrado para o desenvolvimento de SE de pequeno e médio portes, desenvolvido em C e ASSEMBLER, pela Micro Data Base Systems (EUA), sendo comercializado no Brasil pela Spectrum (SP) (ABEL, 1993).

Inclui um banco de dados, editor de textos, planilha eletrônica, gerador de gráficos e interface em linguagem natural. A representação de conhecimento é feita através de regras e o mecanismo de inferência inclui encadeamento progressivo (*forward chaining*) e encadeamento regressivo (*backward chaining*), além de possibilitar o raciocínio sob incerteza (GURU MANUAL, 1989).

Através do GURU foi implementado todo o módulo Lajes, ao final da etapa de aquisição preliminar de conhecimento.

Um requisito fundamental para o sucesso do protótipo é permitir ao usuário a escolha visual do elemento fissurado a consultar, não sendo adequada uma descrição do tipo de fissuração, por escrito.

Apesar da base de conhecimento ter sido adequadamente implementada, verificaram-se dificuldades importantes na criação da interface com o usuário relacionadas, principalmente, com deficiências do GURU quanto à capacidade da ferramenta em importar figuras. Outra dificuldade verificada consiste no fato do GURU não ser integrado ao ambiente *Windows*, apresentando recursos limitados para a construção da interface.

Em função destes problemas, decidiu-se abandonar o GURU e reiniciar a implementação utilizando outra ferramenta. Pode-se dizer, contudo, que a implementação de parte do protótipo com o GURU foi proveitosa, na medida em que possibilitou uma avaliação preliminar do protótipo.

Nesta época, foi possível ter acesso ao Kappa-PC, uma ferramenta desenvolvida no Massachusetts Institute of Technology (EUA) inicialmente como uma ferramenta voltada ao ensino sendo, posteriormente, adquirida pela companhia americana IntelliCorp, que desenvolveu um ambiente gráfico para a construção de SE (WATSON et al., 1994).

O Kappa-PC é integrado ao ambiente *Windows* e fornece um grande número de ferramentas para a construção e uso de aplicações. Possibilita a representação de conhecimento através de programação orientada a objeto e programação baseada em regras, com grande flexibilidade.

Além das potencialidades desta *shell* quanto à representação de conhecimento, apresenta importantes ferramentas para a construção da interface com o usuário, estando disponíveis uma grande variedade de imagens gráficas.

As aplicações criadas com o Kappa-PC podem ser ligadas a outros programas existentes escritos em linguagens como C, por exemplo, sendo possíveis integrações com planilhas, banco de dados, etc (KAPPA MANUAL, 1992).

O protótipo foi implementado utilizando-se um microcomputador PC-486, com 66 MHz e 8 Mb de memória RAM.

Para implementar o protótipo foi necessário:

- (i) representar o conhecimento contido na base, utilizando-se formalismos adequados;
- (ii) conhecer a ferramenta a ser utilizada, a fim de inserir o conhecimento modelado e criar a interface com o usuário;
- (iii) verificar o desempenho do protótipo durante o processo de implementação.

Ao término da fase de implementação da base de conhecimento foi realizada a verificação do protótipo com os dois especialistas.

3.3.5 Representação de conhecimento

Existem vários paradigmas para representação de conhecimento e resolução de problemas. Nesta seção, são abordadas apenas os formalismos mais citados na literatura: redes semânticas, *frames* ou enquadramentos, linguagem orientada a objeto e representação baseada em regras.

3.3.5.1 Redes semânticas

Um dos primeiros esquemas de representação de conhecimento utilizados em IA é a rede semântica, cuja vantagem principal é a flexibilidade (HARMON & KING, 1985).

A rede semântica corresponde a um grafo orientado que representa relações entre elementos de um determinado domínio, baseando-se em uma hierarquia taxonômica. Os componentes básicos da rede são os nós, que representam os elementos e as ligações, que representam as relações entre os elementos. As redes semânticas correspondem a uma representação natural em domínios estruturados, principalmente em função da herança de propriedades (PASTORELLO, 1991).

As redes semânticas caracterizam-se por crescerem rapidamente ficando desordenadas, o que representa uma limitação à sua utilização na prática. Esta é uma das razões pelas quais o esquema de representação através de redes semânticas não tem sido amplamente utilizado para representação de conhecimento em aplicações na área de engenharia (DYM & LEVITT, 1991).

A figura 3.2 apresenta uma rede semântica para o elemento fissura.

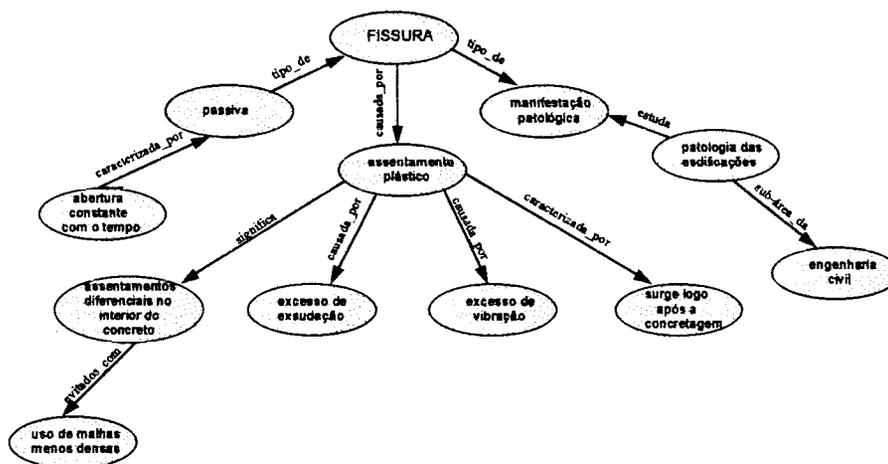


Figura 3.2 Rede semântica para o elemento fissura.

A partir de algumas idéias básicas derivadas das redes semânticas, foram desenvolvidos outros paradigmas para representação e raciocínio em domínios complexos, como representação baseada em enquadramentos e linguagem orientada a objeto (DYM & LEVITT, 1991).

3.3.5.2 Enquadramentos ou *frames*

Objetos são definidos como blocos básicos utilizados na construção de uma base de conhecimento, podendo representar tanto elementos concretos, como conceitos abstratos do domínio. Possuem certas características, partes ou atributos e podem estar relacionados uns aos outros, na base de conhecimento, de modo a demonstrar as relações existentes entre as coisas ou conceitos do mundo real que representam. Uma classe pode ser definida como um objeto mais genérico. A partir de cada classe, podem-se derivar várias subclasses ou descendentes. Instâncias podem ser definidas como objetos mais específicos, que não possuem subclasses e representam o fim de um braço na hierarquia de objetos (KAPPA MANUAL, 1992).

Uma *frame* ou enquadramento fornece uma representação estruturada de um objeto ou de vários objetos, em classes hierárquicas (FIKES & KEHLER, 1985). Representando graficamente a abstração de hierarquias e possibilitando que os atributos de cada classe ou objeto sejam expandidos ou modificados somente quando necessário, a representação baseada em enquadramentos permite a construção e manipulação de grandes bases de conhecimento (DYM & LEVITT, 1991).

Os sistemas que utilizam enquadramentos raciocinam sobre classes de objetos por meio de representações estereotipadas do conhecimento que possibilitam capturar a complexidade de certos domínios (DUCE & RINGLAND, 1988).

O enquadramento consiste de uma coleção de *slots* ou inserções que descrevem os aspectos dos objetos. Os *slots* estão associados a uma série de condições, podendo ou não assumir valores previamente definidos. Na ausência de uma informação específica, o *slot* pode ser preenchido por um valor *default* (MURLIDHARAN et al., 1991).

Os objetos podem ter seus próprios *slots* ou herdar *slots* de ancestrais. Quando utilizada adequadamente, a herança de *slots* apresenta várias vantagens, das quais se destacam as seguintes (KAPPA MANUAL, 1992):

- (i) as semelhanças e diferenças entre objetos tornam-se transparentes ao usuário, já que objetos semelhantes possuem os mesmos ascendentes, o que permite um maior entendimento da base de conhecimento;
- (ii) a herança de características comuns simplifica o processo de criação da base de conhecimento, facilitando o desenvolvimento de aplicações e evitando redundâncias, pois

propriedades gerais são criadas apenas uma vez e armazenadas em uma única classe, mas são aplicáveis a todos os descendentes, automaticamente;

(iii) as alterações que se fizerem necessárias podem ser efetuadas em uma determinada classe, sendo automaticamente transmitidas, por herança, a todas as classes descendentes, simplificando e viabilizando a manutenção de aplicações e, ainda, evitando inconsistências.

Os quadros 3.5 e 3.6, a seguir, apresentam uma *frame* genérica para o elemento fissura e uma instância de fissura por dessecação superficial, respectivamente.

Quadro 3.3 *Frame* genérica para fissura

Slots	Preenchimentos
nome	fissura
especialização_de	tipo_de patologia
tipos	(passiva, ativa)
localização	(laje, viga, pilar, balanço)
época_de surgimento	(concreto_fresco, concreto_endurecido)

Quadro 3.4 Instância de fissura por dessecação superficial

Slots	Preenchimentos
nome	fissura por dessecação superficial
especialização_de	tipo de fissura
tipos	passiva
localização	laje
época_de surgimento	concreto fresco

3.3.5.3 Programação orientada a objeto

A linguagem orientada a objeto consiste em uma abordagem de programação modular, que difere bastante da filosofia e das linguagens de programação procedurais. Apresenta inúmeros benefícios quanto à produtividade da programação, além de proporcionar transparência ao processo (DYM & LEVITT, 1991).

Os objetos encapsulam uma série de informações particulares e podem somente ser acessados ou modificados com a ativação de métodos (RAMAMOORTHY, 1990). Métodos consistem em uma série de procedimentos utilizados para indicar mudanças de estado de objetos, sendo utilizados para implementar o controle em programas orientados a objeto (DYM & LEVITT, 1991).

Os métodos desempenham uma série de ações, dentre as quais, destacam-se (KAPPA MANUAL, 1992): (i) alteram o estado da aplicação, geralmente alterando os valores dos *slots*

dos objetos; (ii) enviam mensagens entre os objetos, permitindo que os mesmos interajam, de modo a alcançar determinados resultados.

Os métodos definidos para uma classe podem ser aplicados aos objetos de todas as suas subclasses. Se a subclasse define sua própria versão de um método, esta versão será executada, caso contrário será executada a versão do método definido na classe ancestral (HABERMANN, 1990).

A utilização do paradigma orientado a objeto, baseado na estruturação de sistemas e usando basicamente os conceitos de objetos, classes e herança, possibilita o desenvolvimento de códigos de informação de forma bastante eficiente e bem documentada. Por muito tempo, o desenvolvimento de interface com o usuário foi realizada utilizando-se o paradigma procedural, demandando um número muito grande de comandos e exigindo acesso à informação e diálogo com o usuário de forma seqüencial. A abordagem orientada a objeto possibilita acesso à informação e às funções de interface de forma paralela, ganhando-se em eficiência (BOURDEAU et al., 1990).

A figura 3.3 apresenta um exemplo de estrutura orientada a objeto, contendo alguns objetos que formam uma estrutura hierárquica.

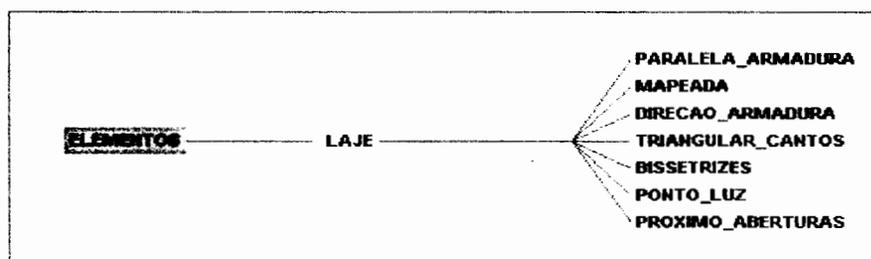


Figura 3.3 Estrutura orientada a objeto representando a classe ELEMENTOS

3.3.5.4 Regras

A estrutura de representação através de regras é uma das mais empregadas na representação de conhecimento para a construção de SE. Às vezes, as regras são chamadas de regras de produção, já que produzem um resultado. A maioria das *shells* possibilitam o seu uso e esta popularidade está ligada, principalmente, à possibilidade de fácil entendimento que as regras apresentam, desde que bem formuladas (ALWOOD, 1989).

Outra vantagem da representação através de regras consiste na facilidade de realizar modificações na base de conhecimento e na capacidade de fornecer explicações ao usuário (DHAWAN, 1991).

As regras especificam uma série de condições e uma série de conclusões que devem ser aceitas, caso as condições sejam verdadeiras. São, portanto, constituídas por cláusulas IF, representando premissas que devem ser satisfeitas quando a regra for disparada, e por cláusulas THEN, que representam as conclusões ou conseqüências relacionadas com as premissas enunciadas nas cláusulas IF.

As regras de produção são utilizadas para descrever as relações dos objetos no domínio e, para construí-las, deve-se identificar os objetos do domínio, seus atributos e o efeito que alterações nos valores destes atributos exercem sobre as conclusões (ABEL, 1993).

A seguir, apresenta-se um exemplo de regra de produção:

IF a abertura da fissura permanece inalterada com o tempo
THEN a fissura é passiva

O raciocínio baseado em regras foi muito utilizado na construção dos primeiros SE desenvolvidos em vários domínios, principalmente porque as regras proporcionam um modo natural e intuitivo de representar o conhecimento. Porém, a integração de mais de um paradigma pode trazer inúmeras vantagens (ver seção 3.2). Portanto, no atual estágio de conhecimento, a integração de regras, enquadramentos e programação orientada a objeto, podendo-se agregar algoritmos ou pacotes gráficos, tende a ser uma boa solução para problemas ligados à engenharia (DYM & LEVITT, 1991).

3.3.5.5 Técnicas de representação de conhecimento utilizadas no EDIFICAR

O sistema EDIFICAR foi desenvolvido de forma híbrida, utilizando-se a linguagem de representação orientada a objeto, para representar a estrutura do domínio e a programação baseada em regras, para modelar e manipular o conhecimento especializado.

A representação da estrutura do domínio de conhecimento é apresentada na seção 5.2.1 e a base de regras é descrita na seção 5.2.3.

3.3.6 Mecanismo de Inferência

O mecanismo de inferência consiste em um programa ou processador que manipula as regras, aplicando-as de forma apropriada, para emular o raciocínio humano na resolução de problemas.

O mecanismo de inferência realiza a associação entre as informações fornecidas pelo usuário e as regras armazenadas na base de conhecimento, fornecendo uma resposta ao problema (FERRADA & HOLMES, 1990).

Uma das características mais importantes da programação baseada em regras é a separação existente entre a base de conhecimento e o controle. Este atributo proporciona um considerável aumento na flexibilidade, possibilitando tanto o acréscimo de conhecimento, como alterações na base de regras. Além disto, permite a exploração de vários esquemas de inferência, no sentido de obter soluções (DYM & LEVITT, 1991).

A eficiência do mecanismo de processamento do conhecimento depende da estrutura de representação de conhecimento e das técnicas de busca utilizadas. Estas técnicas têm sido classificadas com base na direção e no modo de implementação da busca (DHAWAN et al., 1991).

De acordo com o modo de implementação, a busca pode ser classificada como busca em profundidade, busca em amplitude, busca heurística, entre outras (DYM & LEVITT, 1991).

Com relação à direção, são principalmente utilizados o encadeamento progressivo e o encadeamento regressivo.

No encadeamento progressivo (*forward chaining*), também conhecido como raciocínio dirigido aos dados, o sistema raciocina para frente. Os dados são fornecidos pelo usuário e aplicam-se todas as regras cujas premissas possam ser satisfeitas. A resolução de uma regra fornece a conclusão ou as evidências necessárias à premissa da outra (raciocínio em "cascata"). Quando não houver dados suficientes para aplicar nenhuma regra, o sistema solicita informações ao usuário (ABEL, 1993).

Outra estratégia de resolução é o encadeamento regressivo (*backward chaining*), no qual o sistema raciocina para trás. São examinadas as conseqüências ou *goals* antes de buscar as evidências capazes de suportar a conclusão indicada. Esta estratégia de busca também é conhecida como raciocínio dirigido ao *goal* (DYM & LEVITT, 1991).

O encadeamento para frente é mais utilizado para resolução de problemas de projeto, nos quais a manipulação dos fatos realiza-se por meio de um processo de análise. Os sistemas utilizados para resolver problemas ligados a processos de classificação, como diagnose, apresentam predominantemente, controle por encadeamento para trás, já que este mecanismo reduz o espaço de busca, otimizando os resultados (ABEL, 1993).

No desenvolvimento do EDIFICAR foi utilizado o encadeamento para trás como mecanismo de inferência (ver seção 5.3).

4 MODELAGEM DO CONHECIMENTO

4.1 Resolução humana de problemas

Os seres humanos empregam estratégias específicas para codificar e armazenar a informação, bem como para recuperá-la da memória. Segundo HARMON & KING (1985), o modelo do processamento da informação em seres humanos é constituído por três subsistemas principais: sistema perceptivo, sistema cognitivo e sistema motor. O sistema perceptivo é formado por sensores, como olhos ou ouvidos, que permitem a entrada de estímulos externos para o sistema de processamento humano da informação e, por memórias intermediárias, que armazenam temporariamente as percepções, enquanto aguardam pelo seu processamento através do subsistema cognitivo. No subsistema cognitivo, existe uma memória transitória de trabalho, para a qual é transferida parte das informações sensoriais armazenadas. Constantemente, grandes quantidades de informações são colocadas através dos sentidos, mas nem todas são selecionadas e codificadas pelo sistema cognitivo. Em relação às tarefas mais simples, como ligar um interruptor de luz, o sistema cognitivo constitui-se simplesmente em um ponto de transferência de informações das entradas sensoriais para as saídas motoras. No entanto, para cumprir tarefas mais complexas, que requerem processamento mais elaborado, o processador cognitivo busca os dados em um segundo sistema de memória, denominado memória permanente, onde um grande número de símbolos com um complexo sistema de indexação estão armazenados. A memória pode ser entendida como um conjunto de símbolos, onde cada um está associado a uma configuração de estímulos e os processos de aprendizagem e lembrança ocorrem quando se estabelecem elos ou relações entre símbolos. Após investigar as memórias, o processador cognitivo envia a informação ao sistema motor, iniciando-se as ações dos músculos e dos outros sistemas internos, resultando em uma atividade observável e fechando o ciclo "reconhecer-agir".

Para HARMON & KING (1985), resolver problemas é buscar uma forma de se chegar a um fim desejado, a partir de uma situação inicial. A resolução de problemas consiste no processo de partir de um estado inicial e buscar a solução, através de um espaço de problema, identificando a seqüência de operações ou ações que conduzirão ao objetivo. De um modo amplo, o processamento da informação significa resolução de problemas. Os seres humanos resolvem facilmente as tarefas complexas, baseados na experiência que acumulam ao longo dos anos e que é empregada para simplificar problemas. A resolução de problemas complexos fundamenta-se na determinação do conhecimento necessário para reduzir o enorme espaço de busca de um problema mal formalizado.

4.1.1 Tipos de conhecimento

O conhecimento compilado corresponde à informação que foi organizada, indexada e armazenada, facilitando seu acesso. Corresponde ao processo de agrupar em pacotes a informação e é utilizável para a resolução imediata de problemas. O processo de compilação do conhecimento pode ocorrer de modo formal, como em escolas, quando o conhecimento é organizado na forma de definições, axiomas e leis. Normalmente, as pessoas são capazes de descrever o conhecimento adquirido formalmente, mas não sabem exatamente como aplicá-lo, na prática. Outra forma de compilar o conhecimento é através da experiência e este processo caracteriza-se pela aplicação de regras práticas para a execução de tarefas e resolução de problemas (HARMON & KING, 1985).

O conhecimento especializado pode ser considerado como a combinação entre o conhecimento profundo, adquirido através da educação formal e a experiência ou conhecimento superficial, adquirida através da atuação profissional do indivíduo (BRANDON et al., 1988).

O conhecimento formal ou conhecimento público é encontrado em referências escritas como livros ou jornais. A experiência adquirida pelos especialistas corresponde ao conhecimento privado e, em geral, não está incluída na literatura publicada (COHN et al., 1988). O grau com que um ou outro tipo de conhecimento é usado depende do problema a ser resolvido e do nível de informação fornecida (BRANDON et al., 1988).

O conhecimento compilado através da experiência resulta em heurísticas, que correspondem a regras práticas que simplificam os espaços de busca em níveis controláveis. Este processo tende a enfatizar configurações-chave do problema. Com a experiência em determinadas áreas do conhecimento, as pessoas tornam-se competentes porque concentram-se em aspectos importantes do problema, aprendendo as relações relevantes entre os elementos do domínio. O conhecimento heurístico compilado corresponde à experiência organizada e indexada na memória permanente (HARMON & KING, 1985).

Heurísticas são regras práticas adquiridas através da experiência e normalmente são usadas por especialistas na resolução de problemas.

Uma heurística corresponde a um pedaço de conhecimento capaz de sugerir cursos plausíveis de ações a seguir, além de indicar outros caminhos que devem ser evitados. Pode ser definida como uma coleção de atributos e valores correspondentes, incluindo vários tipos de condições e ações (COHN et al., 1988).

Como muitos especialistas expressam seu conhecimento em termos de regras práticas, existe um risco dos SE considerarem apenas fatos e regras, não abordando outros tipos de conhecimento também importantes como procedural, causal, conceitual, classificatório, etc, que tendem a tornar o sistema mais efetivo (STOCKLEY, 1987).

4.2 O conhecimento especializado

Especialista é um indivíduo capaz de resolver, de forma eficiente e eficaz, um determinado tipo de problema que a maioria dos indivíduos desconhece (HARMON & KING, 1985). Para STOCKLEY (1987), o especialista é alguém que tem um profundo e comprovado conhecimento em determinado domínio, possuindo ampla informação e familiaridade com o assunto, adquiridas através de experiência.

Normalmente, especialistas são profissionais que possuem uma sólida educação formal na sua área de especialização. Alguns tipos de especialistas costumam ministrar cursos e participar de seminários ou congressos, mantendo-se sempre familiarizados com as mais novas tecnologias na área. Muitos especialistas prestam consultorias a empresas privadas ou universidades, mantendo contato permanente com os demais profissionais de sua especialização. Contribuem para o aperfeiçoamento técnico da sua área de especialidade através da publicação de trabalhos em jornais técnicos, revistas ou manuais. É comum a sua participação como membros de comitês ou sociedades profissionais de apoio à pesquisa, contribuindo para a disseminação de informações tecnológicas. O conjunto das atividades profissionais de um especialista e a divulgação dos resultados de suas pesquisas contribuem para o reconhecimento e aceitação em seu campo de trabalho (ASCE, 1989).

Na prática, o conhecimento permite que especialistas solucionem problemas de muitas formas.

Após um período de experiência, o especialista é capaz de construir regras práticas através da combinação dos seguintes tipos de conhecimento: (i) entendimento sobre o domínio; (ii) estratégia de resolução do problema; (iii) contexto e (iv) observações da situação (STOCKLEY, 1987).

Inicialmente, o entendimento do especialista sobre o domínio é obtido através da educação, livros, etc. A estratégia de resolução de problemas baseia-se na sua intuição, preferência, habilidade e em experiências anteriores. O contexto é analisado pelo especialista cuidadosamente, levando em consideração apenas os fatores relevantes e desprezando os

demais. A observação criteriosa da situação também é importante na resolução do problema (BRANDON et al., 1988).

O que distingue um novato e um especialista no desempenho de certas tarefas é a habilidade do especialista em utilizar heurísticas, ou associações previamente observadas, além das inferências que podem ser traçadas a partir das informações disponíveis, em vários níveis de abstração. Estas associações heurísticas utilizadas por especialistas permitem que a ampla gama de possíveis soluções seja significativamente reduzida. Os profissionais menos experientes, ou novatos, solucionam problemas através de uma busca exaustiva, baseando-se em princípios fundamentais, já que não possuem a necessária base de experiência para resolver os problemas heurísticamente (DYM & LEVITT, 1991).

4.3 Tipos de SE

Para que um SE seja capaz de emular, de forma efetiva, o comportamento de um especialista humano na resolução de problemas, deve incluir os diversos tipos de conhecimento (STOCKLEY, 1987). Frequentemente, tarefas ligadas a planejamento, diagnóstico, exploração e muitos processos de projeto baseiam-se mais no conhecimento heurístico do que em mecanismos formais de raciocínio (COHN et al., 1988).

A resolução de problemas pode ser dividida em duas classes amplas, de acordo com o tipo de tarefas que são realizadas: tarefas de classificação ou derivação e tarefas de formação ou síntese. Nas tarefas de classificação, as soluções são derivadas de fatos e informações conhecidas. Estes tipos de problemas envolvem escolher uma ou mais soluções dentre uma série finita e pré-definida de possíveis soluções a um problema, procurando confirmá-las através de vários tipos de testes. Estão incluídas nesta classe as atividades de interpretação, diagnóstico, seleção, monitoramento e controle (DYM & LEVITT, 1991).

Os sistemas de interpretação inferem descrições de situações a partir de fatos observáveis e incluem sistemas para vigilância, reconhecimento da fala, análise de imagens, interpretação de sinais, entre outros tipos de análises inteligentes (HAYES-ROTH et al, 1985).

Os sistemas de diagnose identificam causas capazes de explicar sintomas observados (DYM & LEVITT, 1991). Esta categoria inclui diagnóstico médico, eletrônico, mecânico, entre outros (HAYES-ROTH et al, 1985).

Para realizar tarefas de seleção, deve-se encontrar uma análise de estratégia, selecionando as ferramentas apropriadas para analisar a estrutura, dadas certas restrições de tempo, custo e grau de precisão requerido (DYM & LEVITT, 1991).

Os sistemas de monitoramento comparam observações do comportamento do sistema com aspectos considerados cruciais ao sucesso de atividades, tais como plantas de energia nuclear, tráfego aéreo, tarefas de administração fiscal, etc (HAYES-ROTH et al, 1985).

Tarefas de controle governam todo o comportamento de sistemas e, para tanto, necessitam interpretar a situação atual, predizer situações futuras, diagnosticar possíveis falhas ou monitorar sua execução para assegurar o desempenho adequado. Exemplos deste tipo de sistema incluem controle de tráfego aéreo, administração de negócios, entre outros (HAYES-ROTH et al, 1985).

Nas tarefas de formação ou síntese o problema é resolvido formando ou criando um objeto ou planos visando construir este objeto. Esta classe de atividades para resolução de problemas inclui tarefas de planejamento, nas quais busca-se uma seqüência de passos de forma a obter determinado objetivo e tarefas de projeto, nas quais busca-se criar um artefato ou um plano para elaborar este artefato (DYM & LEVITT, 1991).

O planejamento envolve a formulação de uma solução a partir de componentes primitivos ou atividades, de modo a obter um determinado objetivo, satisfazendo algumas restrições. Constitui-se em uma tarefa de síntese de difícil resolução, tanto para indivíduos como para computadores, visto que para qualquer plano realístico existe uma infinidade de combinações de atividades que podem ser geradas, sendo que poucas, ou por vezes nenhuma, são capazes de satisfazer as restrições impostas pelo problema (KARTAN et al., 1991).

Projeto pode ser considerado como o processo de desenvolver uma solução a determinado problema, fornecendo uma série de funções que podem representar o peso, custo, etc. (GARRET & MAHER, 1990). O objetivo do projeto é obter um mínimo, por exemplo, custo, ou um máximo, por exemplo, flexibilidade, para estas funções. A elaboração de um projeto inclui uma série de tarefas nas quais a conclusão de uma das tarefa depende da conclusão das demais. Durante o processo, os dados de entrada para algumas tarefas podem corresponder a parâmetros ou variáveis representando as propriedades do sistema (ROGERS, 1990).

Nas tarefas de classificação objetiva-se classificar informações, manipulando dados não confiáveis e variáveis no tempo, enquanto que em tarefas de formação pretende-se sintetizar

algo envolvendo, muitas vezes, a avaliação parcial de soluções, lidando com dados conflitantes ou gerando múltiplas soluções candidatas. Pode-se dizer, assim, que as tarefas ligadas à classificação tendem a ser mais simples do que as tarefas de formação (DYM & LEVITT, 1991).

4.3.1 SE para diagnose

Os problemas de diagnose constituem-se em uma das mais amplas aplicações de SE.

O processo de diagnóstico explica porque o comportamento observado de um sistema difere do esperado. Pode-se considerar um diagnóstico como o ato de construir uma "árvore de evidências" na qual, procedendo-se para cima, as explicações tornam-se mais específicas em termos da causa ou do tipo específico de processo que está ocorrendo (CLANCEY, 1989).

O procedimento de busca, em um sistema de diagnose, consiste em apontar a causa mais provável a um determinado tipo de falha (ALWOOD, 1989).

Descrições de falhas em processos são, em geral, baseadas em experiência, sendo o conhecimento envolvido na resolução dos problemas, freqüentemente, de natureza heurística (BREUKER & WIELINGA, 1989).

O diagnóstico da causa de um dano ou falha é muito importante pois permite que sejam apontadas responsabilidades, além de possibilitar a adoção de medidas corretivas e preventivas em relação ao problema. Em geral, não existe um algoritmo ou instrumento capaz de cobrir todas as possíveis causas a danos, devendo ser utilizado o conhecimento humano na resolução de problemas. Usualmente, os especialistas apontam as causas a danos utilizando heurísticas ao invés de algoritmos e, em geral, heurísticas são proposições ou regras formadas por antecedentes, correspondentes a evidências ou sintomas e por conseqüências, correspondentes a hipóteses ou causas dos danos (YEH et al., 1991).

O problema de diagnóstico de falhas torna-se complexo quando muitas variáveis estão envolvidas (KALYANASUNDARAM et al., 1990).

Um espaço de busca ou espaço do problema é o espaço dentro do qual está contida uma série de estados do problema em consideração. Árvores e grafos consistem em meios de representar o espaço de busca, sendo que a árvore de busca é um caso especial de grafo de busca. Os vários estados no espaço de busca são denominados nós e cada nó ou estado no espaço representa ou descreve uma configuração da solução envolvida. Em uma árvore, os nós são freqüentemente repetidos. (DYM & LEVITT, 1991).

Existem duas formas de representação do conhecimento para problemas de diagnóstico: árvore de representação e matriz de representação abordando a causa e sintoma do problema (NARAZAKI et al, 1990).

A árvore de decisão é semelhante a um fluxograma, mas apresenta nós e ramos. A seqüência descendente ocorre através de atributos situados nos nós, definindo o caminho de acordo com seus diferentes valores para cada atributo analisado (Hart, 1986). A árvore de representação é bastante útil para descrever processos de classificação, permitindo a visualização da base de conhecimento e facilitando a aplicação de testes. No entanto, para que a representação através de árvores seja bem sucedida, a estrutura lógica do problema deve ser suficientemente definida e hierárquica, o que nem sempre é possível de se obter na prática. A matriz de representação é indicada para categorias de problemas mal refinados e estruturados (NARAZAKI et al, 1990).

As técnicas de processamento do conhecimento consistem em estratégias para buscar o espaço de estado em uma base de conhecimento (DHAWAN et al., 1991).

A seleção de uma estratégia depende do domínio, da natureza do problema, além dos dados disponíveis. A seleção da direção de busca pode ser independente da escolha da estratégia, mas está fortemente ligada à forma da árvore que será gerada (DYM & LEVITT, 1991).

4.4 Tipos de modelagem

Modelo é um termo que apresenta diferentes significados, dependendo da área técnica em que se está trabalhando, ou seja, dependendo do que está sendo representado. Existem diferentes tipos de modelos para representar diferentes sistemas, por exemplo: modelos físicos, modelos simbólicos, modelos matemáticos, entre outros (KUNZ et al., 1989).

As pessoas utilizam modelos a todo instante, em geral de uma forma inconsciente. Modelos verbais são usados para descrever pensamentos, sentimentos, objetos ou planos (DYM & LEVITT, 1990):

Modelos matemáticos formais são muito usados em atividades como a engenharia e descrevem o comportamento funcional de sistemas usando abstrações e a linguagem precisa da matemática (KUNZ et al., 1989).

Utilizam-se vários tipos de conhecimento para a realização de tarefas no campo da engenharia, existindo uma relação taxonômica entre os mesmos. As leis básicas da física são denominadas de princípios fundamentais. Na engenharia estrutural, o campo da mecânica, que é um ramo da física, engloba os princípios fundamentais (por exemplo: as leis de Newton). Pode-se citar, também, os modelos fenomenológicos, tipicamente expressos através de razões, equações diferenciais ou outras formas matemáticas baseadas em resultados experimentais ou em extrapolações das leis fundamentais (por exemplo: relações pressão-volume). Os modelos analíticos são usados para especificar casos ou subgrupos de princípios fundamentais mais gerais e modelos fenomenológicos, empregando a matemática como linguagem para a especificação e manipulação dos modelos (por exemplo: análise do comportamento de lajes ou de vigas). As representações numéricas são “versões numéricas” dos modelos analíticos (teoria dos elementos finitos). As heurísticas ou regras podem ser utilizadas para representar muitos tipos de conhecimento, como para expressar aspectos dos princípios fundamentais ou versões compiladas de modelos analíticos, entre outros (DYM & LEVITT, 1990).

Os modelos heurísticos descrevem simbolicamente as relações entre os dados de entrada e os dados de saída de um sistema, baseados no modo pelo qual especialistas descrevem o comportamento de sistemas (KUNZ et al., 1989).

Os modelos matemáticos, assim como os modelos heurísticos são freqüentemente conhecidos como “caixas pretas”, ou seja, são modelos que enfatizam os dados de entrada e os resultados fornecidos pelos sistemas modelados, sem explicitar os resultados intermediários, ou a estrutura do sistema. Nos modelos simbólicos formais, existe a explicitação tanto da estrutura como do comportamento funcional de sistemas (KUNZ et al., 1989).

Embora as representações matemáticas sejam essenciais para o uso inteligente de muitos tipos de conhecimento, são inadequadas para expressar grande parte do conhecimento categorizado como heurístico (DYM & LEVITT, 1990).

O raciocínio simbólico é baseado na manipulação de símbolos como palavras, que apresentam grande variedade de significados e de associações, além de sentenças, que são estruturas simbólicas combinadas de palavras. A computação simbólica é uma tecnologia baseada em raciocínio simbólico e utiliza a linguagem ou comunicação natural humana como uma ferramenta para formulação de conhecimento (SZYSZKO, 1987).

Durante o processo de modelagem, seja numérica ou simbólica, deve-se sempre estar atento para as premissas admitidas e para as restrições impostas, a fim de garantir que os

pressupostos não sejam violados e que os resultados sejam coerentes com as premissas estabelecidas (DYM & LEVITT, 1990).

O raciocínio baseado em modelos inclui a análise da descrição simbólica da estrutura de um modelo e inclui a análise da descrição simbólica e possivelmente matemática do comportamento deste modelo. Caracteriza-se por enfatizar a correspondência dos dados de entrada, estágios intermediários e dados de saída entre o modelo e o sistema modelado, permitindo a realização de testes e facilitando a análise de possíveis erros ou discrepâncias (KUNZ et al., 1989).

Os SE baseados em heurística são bastante informais, contrastando com as técnicas de tomada de decisão aplicadas a diagnósticos, baseadas puramente em técnicas matemáticas. É vantajosa a aplicação das técnicas de SE a diagnósticos, pois o conhecimento de um especialista pode ser expresso qualitativa, informal e naturalmente pelo seu raciocínio, usando-se ferramentas computacionais que operam com fatos, relações e regras. Assim, a base de regras criada tem uma estrutura modular, onde cada regra se relaciona com um pequeno pedaço independente do domínio de conhecimento (SZYSZKO, 1987).

YUEN & RICHARDS (1993) consideram, no entanto, que a engenharia de conhecimento é um processo de criação e codificação de modelos qualitativos (não-numéricos) de sistemas em diversos domínios de conhecimento e que as bases de conhecimento não correspondem a coleções desorganizadas de heurísticas, ou pedaços de conhecimento diretamente ligados a fatos e estratégias usadas por especialistas na resolução de problemas.

O conhecimento encapsulado em um SE funciona como um modelo, pois a estrutura de uma base de conhecimento descreve o que está acontecendo no domínio e fornece uma base para ação. SE contêm modelos na forma de descrições do comportamento e projeto do sistema e, como todos os modelos, estas descrições são abstrações seletivas, auxiliando os usuários a identificar, explicar, predizer e controlar eventos no domínio (CLANCEY, 1989 e YUEN & RICHARDS, 1993).

Os EC, além de adquirirem heurísticas junto a especialistas e codificarem regras, interpretam e constroem modelos (MUSEN, citado por YUEN & RICHARDS, 1993).

Embora o raciocínio contido em SE seja qualitativo e impreciso, pois são manipuladas heurísticas e conhecimento baseado em dados incertos, a literatura em IA quase sempre aplica o termo "raciocínio qualitativo" para se referir a modelos de simulação de sistemas físicos (Clancey, 1989). Sistemas físicos são representados por modelos físicos, podendo ser usados

como ferramentas para antecipar ou prever o comportamento dos sistemas modelados (KUNZ et al., 1989).

O raciocínio qualitativo, também chamado de física qualitativa, é a representação simbólica da estrutura física de um fenômeno e é especialmente útil por expressar aspectos comportamentais deste fenômeno em termos qualitativos (DYM & LEVITT, 1990).

O processo de simulação tem um caráter qualitativo: quando um modelo qualitativo é usado em simulações reflete a estrutura do esquema modelado e o comportamento de cada componente do sistema (PRICE & HUNT, 1989).

Para CLANCEY (1989), a maior parte dos SE utiliza modelos de classificação, que são uma forma de raciocínio qualitativo, sendo incorreto o emprego deste termo exclusivamente a modelos de simulação. Modelos qualitativos não devem ser aplicados exclusivamente a sistemas físicos, podendo-se utilizar técnicas de modelagem qualitativa para modelar processos cognitivos de discurso, diagnóstico e planejamento.

Os modelos de simulação descrevem como os sistemas produzem comportamentos observados, permitindo prever como mudarão, dada uma série de condições iniciais, enquanto que os modelos de classificação e de comportamento não podem, necessariamente, prever que estado seguirão as condições iniciais arbitradas (CLANCEY, 1989).

Um modelo qualitativo de um sistema representa sua estrutura e o comportamento de cada um dos componentes integrantes deste sistema. Construir um modelo qualitativo requer um esforço maior do que construir um modelo baseado em heurística. Para aplicar o raciocínio qualitativo a tarefas reais, tais como diagnóstico, devem ser contornadas algumas limitações, visto que a natureza qualitativa pode implicar ambigüidades inconvenientes. Também deve-se considerar que o diagnóstico qualitativo gera muitas possibilidades e esta complexidade deve ser evitada, do mesmo modo como especialistas fazem, isto é, tentando primeiro heurísticas e depois buscando conhecimento mais fundamental (PRICE & HUNT, 1989).

Na maioria dos problemas de diagnóstico, é provável que uma única falha, entre várias, tenha ocorrido. Uma estratégia razoável consiste em considerar a ocorrência de possíveis falhas, com certo nível de detalhe, antes de ampliar a busca a múltiplas falhas. Em muitos domínios, é possível estabelecer testes para eliminação, quando existirem duas ou mais falhas candidatas, igualmente plausíveis, apontando para uma série particular de sintomas. Alguns testes possuem a habilidade de diminuir o espaço de busca, desqualificando um grande número de falhas candidatas. O benefício do uso destes testes consiste em estabelecer prioridades. Contudo, é

importante considerar o custo dos testes a serem indicados, ou seja, quão difíceis e quanto tempo consomem (PRICE & HUNT, 1989).

4.5 O modelo do conhecimento

A partir da etapa de aquisição de conhecimento, iniciou-se o processo de elaboração do modelo. Para manter a organização e facilitar o entendimento, o conhecimento foi inserido na base através de quatro módulos distintos, correspondentes aos quatro elementos estruturais de interesse.

Considerou-se adequada a representação do conhecimento através de árvores de decisão tendo em vista que, para resolver problemas de diagnóstico, os especialistas normalmente usam uma seqüência de passos ou procedimentos, descartando hipóteses à medida em que prosseguem com a investigação.

A representação intermediária elaborada apresenta, no topo da árvore principal, um nó contendo a seguinte pergunta:

“Que tipo de elemento estrutural apresenta fissuração?”

Existem quatro ramificações a partir deste nó:

Laje

Viga

Pilar

L.Balanço

A cada uma destas quatro opções de escolha, está vinculado o seguinte nó

“Qual a configuração da fissura?”

Existem vários nós associados a este, correspondendo às diversas configurações de fissuras abordadas no sistema e cada um corresponde a uma árvore de decisão, representando a rotina empregada durante a realização da tarefa.

A partir das configurações típicas de fissuras descritas no capítulo 2, foram elaboradas as árvores representativas da base de conhecimento do EDIFICAR que são apresentadas através das figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, a seguir.

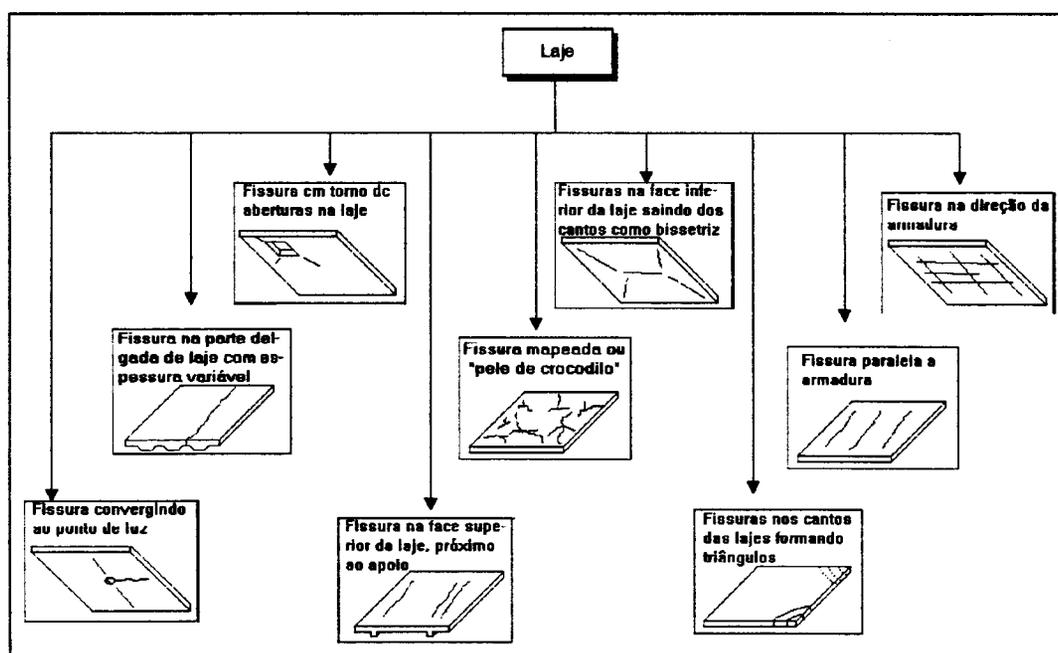


Figura 4.1 Árvore representativa da base de conhecimento para o elemento laje

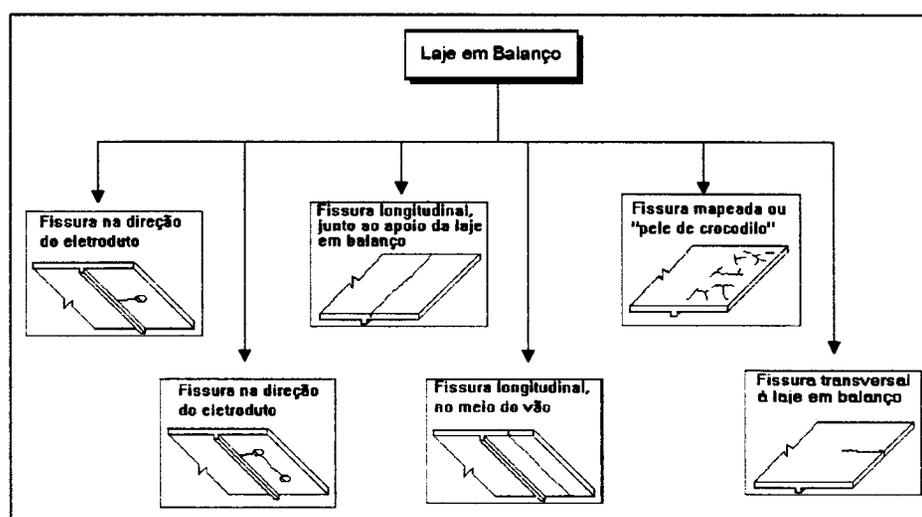


Figura 4.2 Árvore representativa da base de conhecimento para o elemento laje em balanço

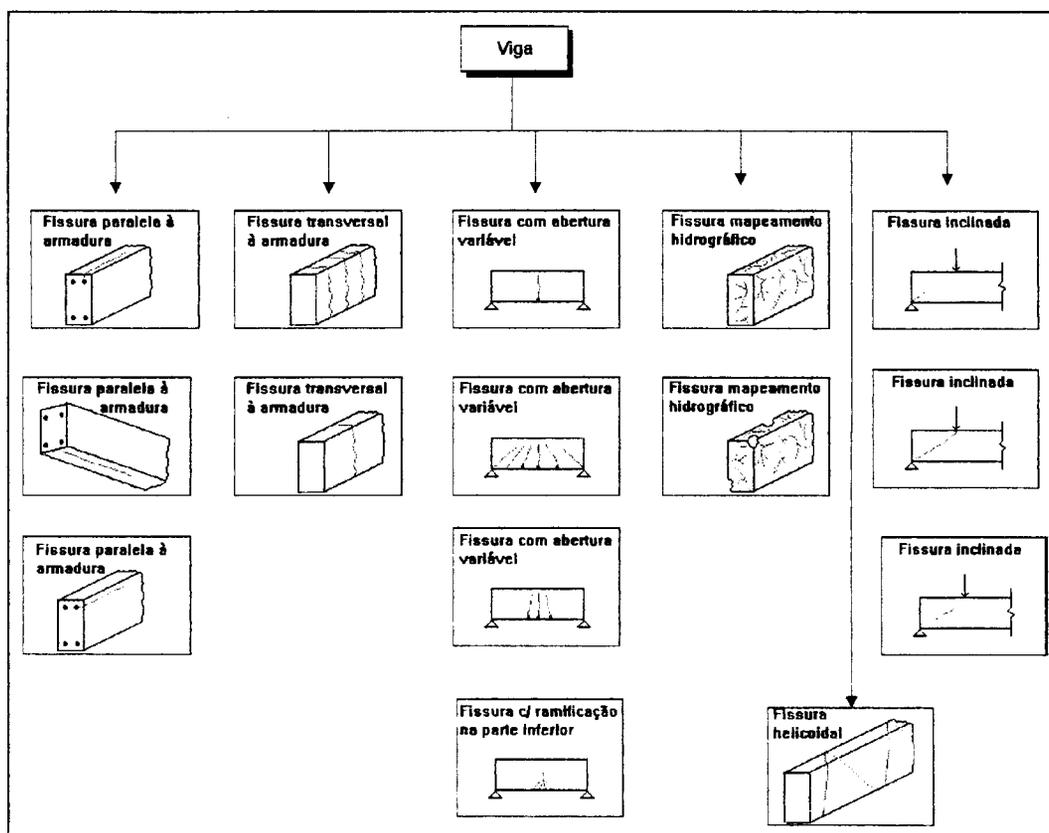


Figura 4.3 Árvore representativa da base de conhecimento para o elemento viga

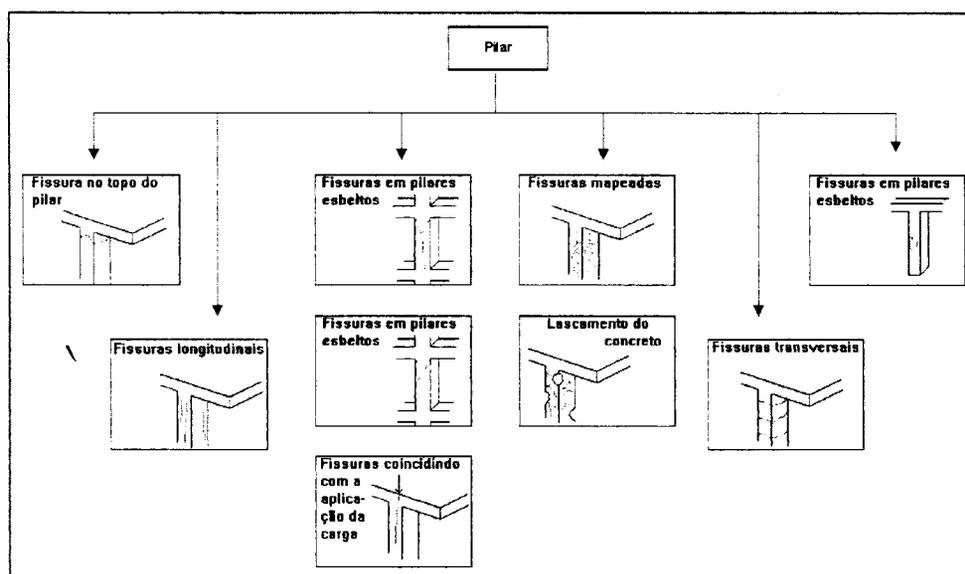


Figura 4.4 Árvore representativa da base de conhecimento para o elemento pilar

Buscou-se obter uma aproximação com a realidade vivenciada pelo especialista ao realizar tarefas de diagnóstico. Em primeiro lugar, o profissional inspeciona o elemento analisando o tipo de configuração da fissura para, posteriormente, buscar a(s) causa(s) do

problema. Portanto, o usuário identifica a fissura entre os desenhos existentes nas telas do sistema, escolhendo a configuração que mais se assemelha com o caso a consultar.

4.5.1 Estratégias utilizadas para a resolução do problema

Existem situações nas quais o elemento estrutural apresenta várias configurações de fissuras. Uma das estratégias empregadas pelo especialista no diagnóstico consiste em decompor o problema, analisando cada tipo de fissura, separadamente.

A estratégia de resolução utilizada na modelagem da base de conhecimento do EDIFICAR também baseia-se na decomposição de problemas. Assim, para resolver este tipo de situação, o usuário deve consultar o sistema tantas vezes quantas forem necessárias, de acordo com o número de configurações de fissuras constatadas no elemento.

Certas configurações de fissuras podem estar ligadas a inúmeras causas, sendo necessário percorrer um caminho maior para obter informações que permitam eliminar hipóteses, até que seja possível obter uma conclusão. Existem, também, fissuras bem características de determinados tipos de problemas, sendo mais fácil identificar a(s) causa(s) geradora(s).

Existem casos em que as técnicas empregadas na recuperação da estrutura são idênticas para certos tipos de causas geradoras de fissuras, não havendo nenhum significado prático fazer uma distinção entre as mesmas, no diagnóstico. Pode-se citar, por exemplo, o caso de fissuras causadas por assentamento plástico, dessecação superficial e movimentação de formas, que são todas fissuras passivas, surgidas durante o período anterior ao endurecimento do concreto e que são reparadas através do emprego do mesmo tipo de material.

Contudo, a identificação do tipo de causa geradora da fissura é importante com relação à prevenção dos problemas.

Deve-se salientar, também, que vários problemas podem estar sobrepostos, ou seja, podem ocorrer falhas com diversas origens, incidindo no mesmo elemento (por exemplo, incidência de sobrecarga não prevista em projeto, associada a falhas de cálculo pré-existentes ou falhas de cálculo, associadas a falhas de execução, entre outros). A incidência de um problema pode, às vezes, agravar outro problema pré-existente.

As causas da fissuração podem, ainda, estar muito relacionadas, sendo difícil identificar qual delas desencadeou o processo. Problemas relacionados com corrosão da armadura, cobrimento inadequado e falhas de cálculo ou execução, por exemplo, estão muito

relacionados, sendo difícil obter-se uma definição, por parte dos especialistas, nas conclusões de alguns casos.

Sabe-se que as fissuras por corrosão podem ser desencadeadas pela existência de uma camada de revestimento com espessura insuficiente, ou constituída por concreto de baixa qualidade (elevada permeabilidade), considerando-se as condições de exposição do elemento de CA ao meio ambiente. Por outro lado, muitas vezes o revestimento é considerado insuficiente devido a especificações inadequadas, constituindo-se em falha ligada ao projeto, ou porque não foram realizados alguns procedimentos técnicos, durante o processo de execução, no sentido de manter a camada de revestimento uniforme ao longo da armadura (por exemplo, colocação de espaçadores), constituindo-se em falha construtiva.

Outra situação semelhante é o caso de ocorrência de fissura ao longo de eletrodutos existentes em lajes ou marquises. Pode-se dizer que este tipo de fissuração está bastante relacionado à retração térmica/hidráulica da camada de revestimento. Depende, também, dos cuidados dispensados durante a execução da obra, no sentido de garantir uma camada adequada de concreto recobrindo o eletroduto.

Normalmente, nestes casos os especialistas tendem a citar todas as causas relacionadas ao problema, sem o estabelecimento de prioridades.

Observou-se, ao longo do desenvolvimento do trabalho que, embora chegando às mesmas conclusões finais na resolução de problemas, especialistas tendem a desenvolver tarefas através de uma linha de raciocínio própria, havendo algumas diferenças quanto à seqüência de passos necessária ou quanto aos procedimentos utilizados. Estas diferenças podem ser devidas a aspectos relacionados com a experiência de cada especialista, ou mesmo com suas preferências pessoais ou estilo. Pode-se dizer que existe mais de uma forma de abordar o mesmo problema, embora os resultados finais não sejam, necessariamente, divergentes.

Durante a construção do modelo, representado através das árvores de decisão, foram indicadas as várias etapas realizadas na execução da tarefa, procurando-se observar as características próprias dos especialistas envolvidos no projeto. Para tanto, considerou-se a seqüência dos passos necessários para o diagnóstico, buscando-se compatibilizar a ordem cronológica, ou habitualmente utilizada pelo especialista, com a ordem mais adequada ao uso do sistema. Esta estratégia fundamenta-se na preocupação de facilitar a consulta, descartando-se hipóteses mais evidentes e evitando-se que o usuário tenha que realizar intervenções desnecessárias na edificação, como por exemplo, escarificações na estrutura.

4.5.1.1 Fissuração em lajes

As causas de fissuras em lajes, abordadas no protótipo, sem a consideração de probabilidades de frequência, são: assentamento plástico; dessecação superficial; movimentação de formas; cobrimento inadequado da armadura; corrosão da armadura; retração térmica e/ou hidráulica; movimentações térmicas; lixiviação; reações expansivas (sulfatos, óxidos de cálcio e magnésio e reação álcali-agregado); presença de eletrodutos; falhas ligadas ao projeto estrutural ou à execução; falhas de uso/manutenção (sobrecargas ou execução de paredes não previstas em projeto, sob a laje) e, ainda, ocorrência de altas temperaturas, como incêndios.

O primeiro passo empregado para o diagnóstico de fissura paralela à armadura, em lajes, consiste em tentar excluir os casos devidos à retração térmica e/ou hidráulica, verificando se há seccionamento total do elemento estrutural. Quando o usuário responde afirmativamente, existe uma grande probabilidade da fissura ter sido causada por retração. Em caso negativo, devem ser verificadas outras hipóteses não se excluindo, contudo, a possibilidade de ocorrerem fissuras por retração, mesmo sem haver o seccionamento total do elemento. A figura 4.5, a seguir, ilustra as considerações anteriores.

Deve-se observar, ainda, que antes de se indicar a retração como provável causa da fissura, procura-se excluir a possibilidade da existência de eletroduto, embora a probabilidade de ocorrência de fissura causada por eletroduto, seccionando o elemento, seja relativamente pequena.

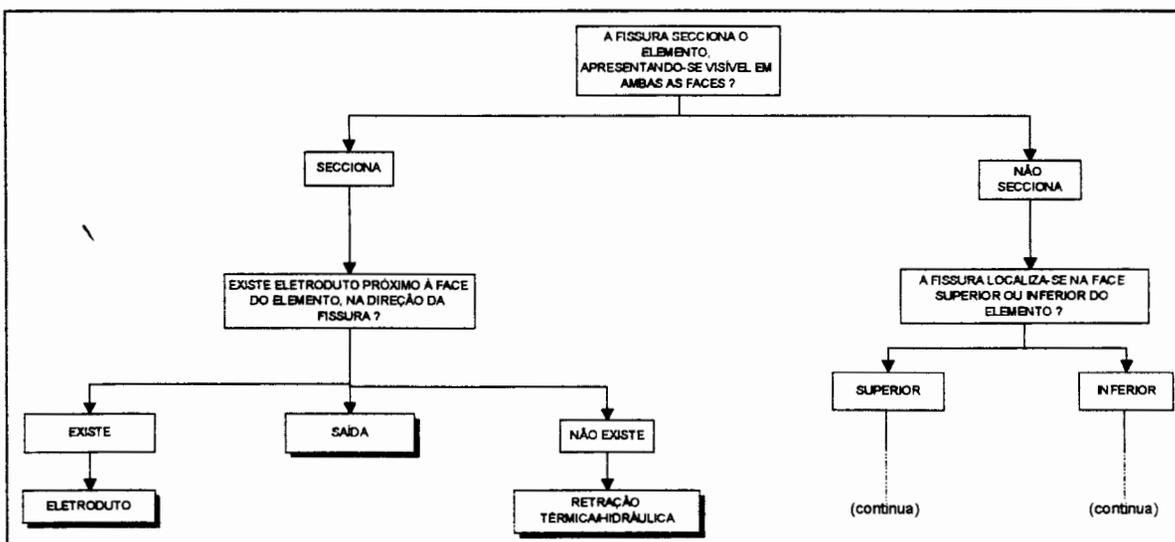


Figura 4.5 Trecho da árvore de decisão para lajes que apresentam fissuras paralelas à armadura

Quando a fissura não seccionar a laje, o usuário deve indicar se ocorre na face superior ou inferior. Se ocorrerem fissuras na face superior da laje, existe a possibilidade da fissura ter sido causada por: construção de parede não prevista em projeto, sob a laje, funcionando como um apoio intermediário e ocorrendo fissura na face superior; existência de eletroduto na direção da fissura; cobrimento insuficiente ou, ainda, por retração térmica/hidráulica. Existe, também, uma forte probabilidade de serem manifestações características do período anterior ao endurecimento do concreto e o próximo passo corresponde à verificação da época de surgimento da fissura.

O sistema não manipula incerteza de forma quantitativa, expressando-a em termos de percentuais. A incerteza é manipulada de uma forma qualitativa, através do próprio questionamento, de acordo com os atributos dos objetos. Quando cabíveis, são apresentadas opções de resposta do tipo "Não sei". Quando esta opção é selecionada, são realizadas outras perguntas que permitem eliminar hipóteses, redirecionando o processo de busca.

Uma das situações em que é permitido ao usuário responder, de forma incerta aos questionamentos mantidos durante a consulta, corresponde à verificação da época de surgimento da fissura. Esta informação pressupõe que o usuário tenha acompanhado a obra desde o início, o que é pouco provável, ou que tenha obtido esta informação junto a outras pessoas.

Se o usuário responder que a fissura surgiu logo após a concretagem, a hipótese fica confirmada e a mesma pode ter sido causada por assentamento plástico, dessecação superficial ou movimentação de formas. Caso contrário, tenta-se obter a causa provável através de outras linhas de raciocínio.

O ramo da árvore de decisão originado a partir da resposta "Não", indicando que a fissura não ocorreu logo após a concretagem, exclui as causas confirmadas pela resposta "Sim".

O ramo da árvore de decisão originado a partir da resposta "Não sei", normalmente, indica às duas possibilidades: uma correspondente às hipóteses relativas à resposta "Sim" e a outra, às hipóteses relativas à resposta "Não".

Salienta-se, novamente, que a ordem empregada durante o questionamento busca facilitar a consulta, procurando-se eliminar as causas possíveis, sem que o usuário tenha que abandonar o sistema para realizar intervenções no local. Assim, neste caso são dirigidas ao usuário perguntas sobre a existência ou não de paredes não previstas em projeto, sob a laje, na direção da fissura, pois é uma informação facilmente disponível. Só a partir da eliminação desta

Se a fissura ocorrer na face inferior da laje, pode ser devida à corrosão da armadura, cobertura insuficiente, falhas de cálculo e execução, ocorrência de sobrecarga não prevista em projeto ou, ainda, retração térmica/hidráulica sem ocorrer o seccionamento da laje.

O usuário deve indicar se há presença de manchas ferruginosas, normalmente associadas ao processo corrosivo. Caso existam, é bastante provável que a fissura tenha sido causada por corrosão. Caso contrário, as hipóteses de existência de eletrodo na direção da fissura e da ocorrência de cobertura insuficiente são verificadas, antes de se solicitar ao usuário para que escarifique o concreto, a fim de constatar se existem produtos de corrosão ao longo da armadura. Se não existirem vestígios de corrosão no interior do concreto, são investigados o projeto estrutural, a execução da estrutura e é verificada, ainda, a possibilidade de ocorrência de sobrecarga.

Quando a fissuração pode estar ligada a comportamento deficiente do elemento estrutural frente a solicitações mecânicas, os passos utilizados para a resolução do problema seguem sempre a seguinte seqüência: verificação do projeto estrutural, verificação das condições de execução da estrutura, isto é, se a execução foi realizada de acordo com as especificações de projeto e, por fim, investiga-se a possibilidade de ocorrência de sobrecarga não prevista em projeto. Esta linha de raciocínio é idêntica à utilizada pelos especialistas, pois como os problemas estruturais podem estar associados a riscos para a edificação, a etapa de verificação do projeto não deve ser negligenciada.

A figura 4.7 apresenta o trecho da árvore representativa de lajes com fissuras paralelas à armadura, considerando-se fissura na face inferior da laje.

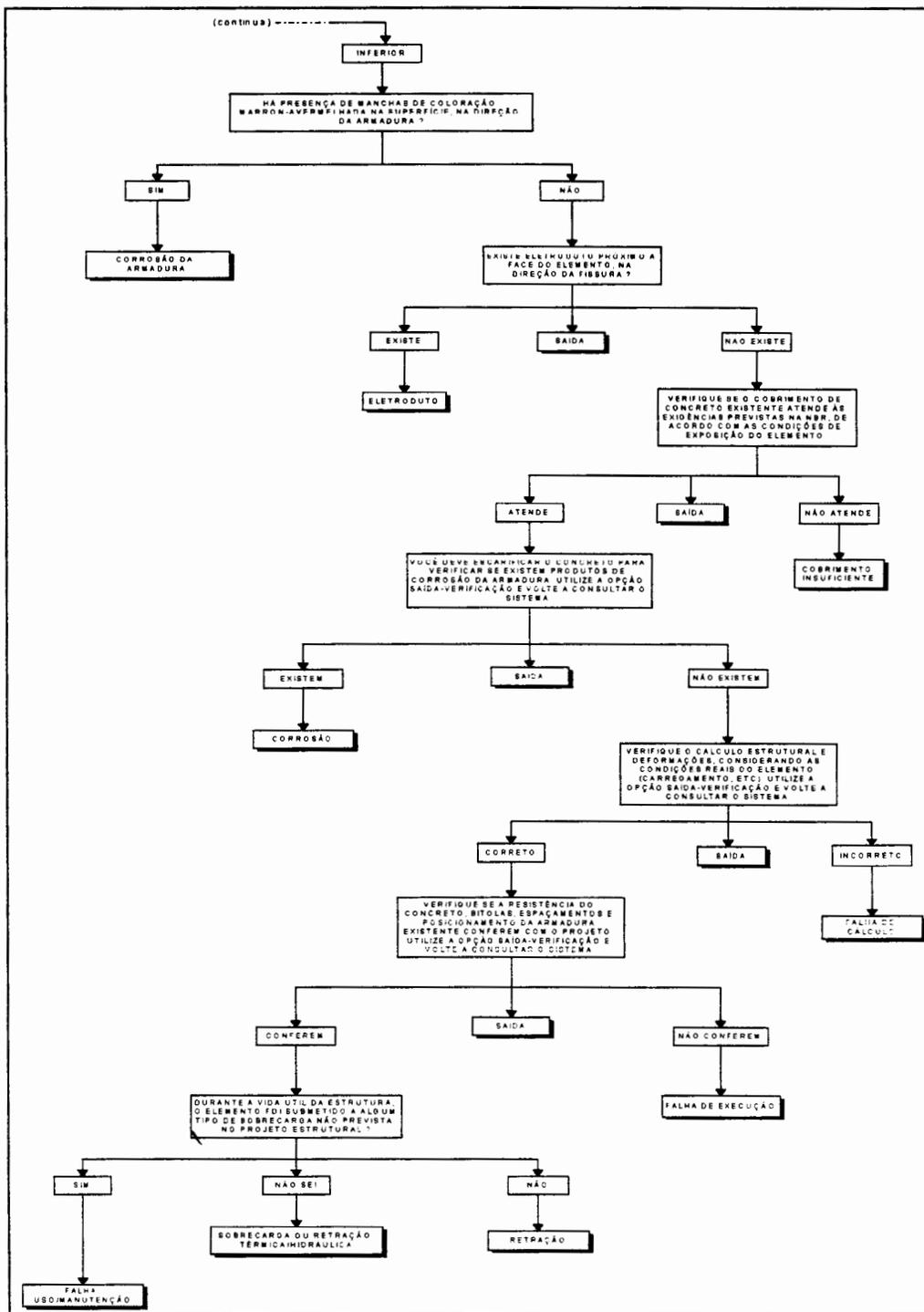


Figura 4.7 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes com fissuras paralelas à armadura, na face inferior

Quando lajes apresentam fissuras mapeadas ou semelhantes à “pele de crocodilo”, estas podem ter sido causadas, provavelmente, por dessecação superficial ou por reações expansivas.

A investigação inicia-se com a indagação sobre a época de surgimento das fissuras. Se o usuário responder que a fissura surgiu logo após a concretagem, é bastante provável que a

causa do problema seja a dessecação superficial, ocorrida durante o período anterior ao endurecimento do concreto. Nos casos em que o usuário descarta esta hipótese, ou quando não dispõe desta informação, a investigação prossegue.

Um caso freqüente, na prática, consiste na ocorrência de manchas esbranquiçadas, na face inferior de lajes, devidas à percolação de água, com formação de carbonato de cálcio. Muitas vezes, ocorrem também estalactites característicos do processo. Normalmente, a percolação de água ocorre na direção das fissuras existentes na face superior, descendo pela ação da gravidade. As manchas, portanto, tomam a forma das fissuras existentes. Este processo nem sempre está associado à fissuração havendo, muitas vezes, percolação de água através de trechos de maior porosidade, no interior do concreto.

Investiga-se, também, se a laje está ou esteve exposta à insolação intensa, buscando-se confirmar a hipótese da dessecação superficial e se a laje está ou esteve exposta a meio agressivo (indústrias, maresia, entre outros), buscando-se confirmar a ocorrência de reação expansiva com sulfatos.

Caso a fissura seja superficial e não exista certeza de que não surgiu logo após a concretagem, é provável que seja devida à dessecação superficial devendo-se, contudo, observar o quadro de fissuração ao longo do tempo, pois pode ter havido contaminação da areia com sulfatos, estando o processo ainda em etapa inicial.

Se a fissura for profunda, havendo o fendilhamento com posterior desintegração do concreto, é provável que a fissura seja devida a reações expansivas, como reações com sulfatos, ou com óxidos de cálcio e magnésio ou, ainda, reações álcali-agregado.

O protótipo indica, ao final da consulta, que devem ser realizadas análises químicas, caso o usuário necessite identificar o tipo de reação que ocasionou o problema. Esta solicitação não é feita no decorrer do questionamento, para evitar que o usuário abandone a consulta, a fim de realizar cada uma das análises, implicando consumo de tempo e recursos financeiros, o que pode não ser interessante, dependendo das reais necessidades do usuário.

A figura 4.8 apresenta um trecho da árvore de decisão utilizada para representar a resolução dos casos de lajes com fissuras em forma de mapeamento.

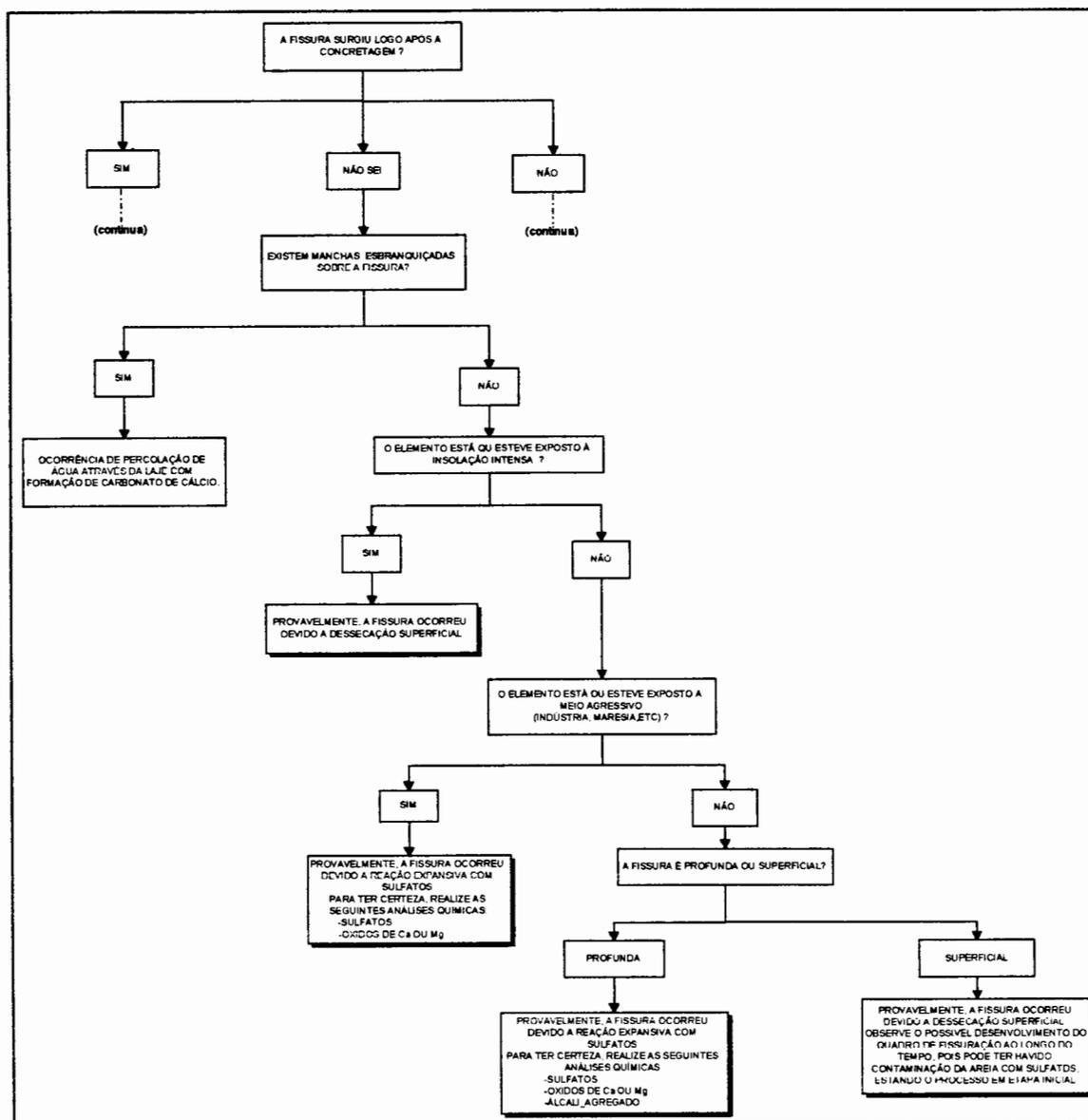


Figura 4.8 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes com fissuras em forma de mapeamento

Quando existem fissuras ao longo da armadura de lajes, nas duas direções, é importante determinar se ocorrem na face superior ou inferior. Caso as fissuras ocorram na face superior, podem ser devidas a assentamento plástico, dessecação superficial, movimentação de formas, cobrimento insuficiente e corrosão da armadura, em casos de lajes com armadura dupla.

Novamente, nesta árvore de decisão é necessário excluir as fissuras verificadas antes do endurecimento do concreto, investigando-se a época de surgimento. Caso o usuário desconheça a época de surgimento da fissura ou quando responde que a mesma não ocorreu logo após a concretagem, deve ser investigado o cobrimento e a existência ou não de produtos de corrosão ao longo da armadura. Neste caso, a pergunta sobre a existência de manchas

ferruginosas não é formulada, uma vez que as fissuras localizam-se na face superior e os produtos de corrosão tendem a descer, por gravidade.

Para o caso de fissuras na face superior da laje, quando não surgiram logo após a concretagem, o cobrimento atende às exigências da NBR 6118 e não existem produtos de corrosão, ao longo da armadura, o protótipo fornece uma resposta do tipo "causa indeterminada", solicitando ao usuário que confira os dados e volte a consultar o sistema. Neste caso, o espaço de busca tornou-se cada vez mais restrito, não havendo subsídios suficientes para a indicação da causa provável das fissuras.

A figura 4.9 apresenta o trecho da árvore que corresponde ao caso descrito anteriormente.

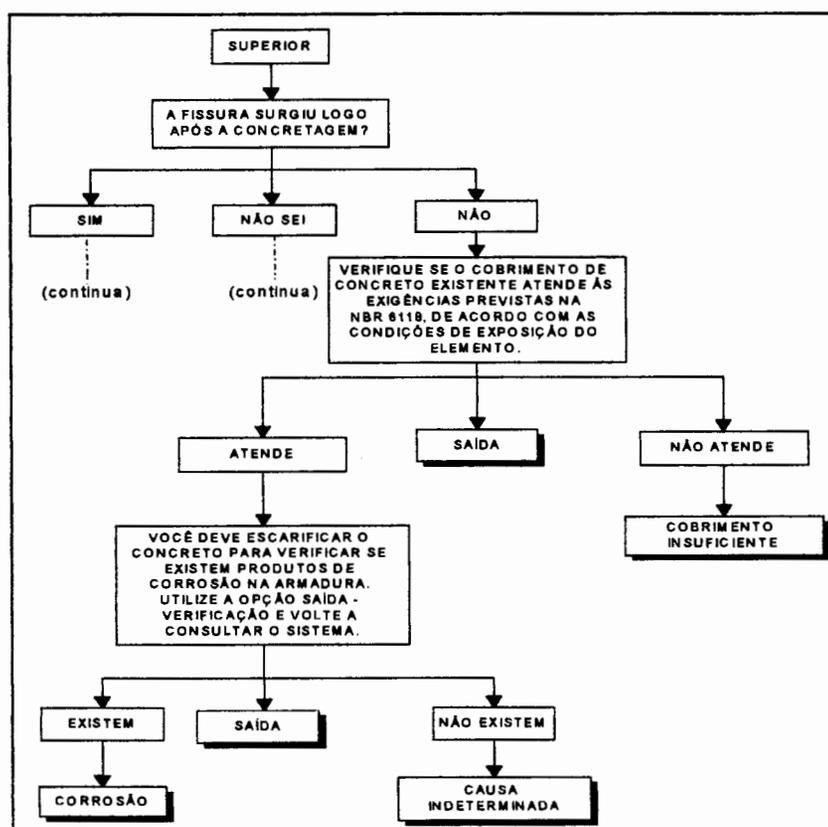


Figura 4.9 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes com fissuras ao longo da armadura, nas duas direções, na face superior

Para fissuras na face inferior da laje, as causas prováveis são corrosão da armadura, cobrimento insuficiente, ocorrência de altas temperaturas (incêndio) e deformação excessiva da laje, embora com pequena possibilidade.

Outro exemplo da estratégia utilizada no modelo, a fim de obter uma ordem de questionamento compatível com o uso do protótipo, corresponde às indagações que buscam confirmar ou excluir a ocorrência de corrosão da armadura, para esta configuração de fissuras. Inicialmente, o usuário é solicitado a responder se existem manchas ferruginosas. Caso a presença das manchas seja confirmada, o protótipo conclui que a provável causa das fissuras é a corrosão da armadura. Se não houver manchas ferruginosas e se o cobrimento é adequado, antes de solicitar a escarificação do concreto, na busca de indícios que comprovem a existência de corrosão, procura-se descartar a ocorrência de altas temperaturas, hipótese considerada remota, mas que deve ser excluída, a fim de garantir a robustez do protótipo. A figura 4.10 apresenta o trecho descrito anteriormente.

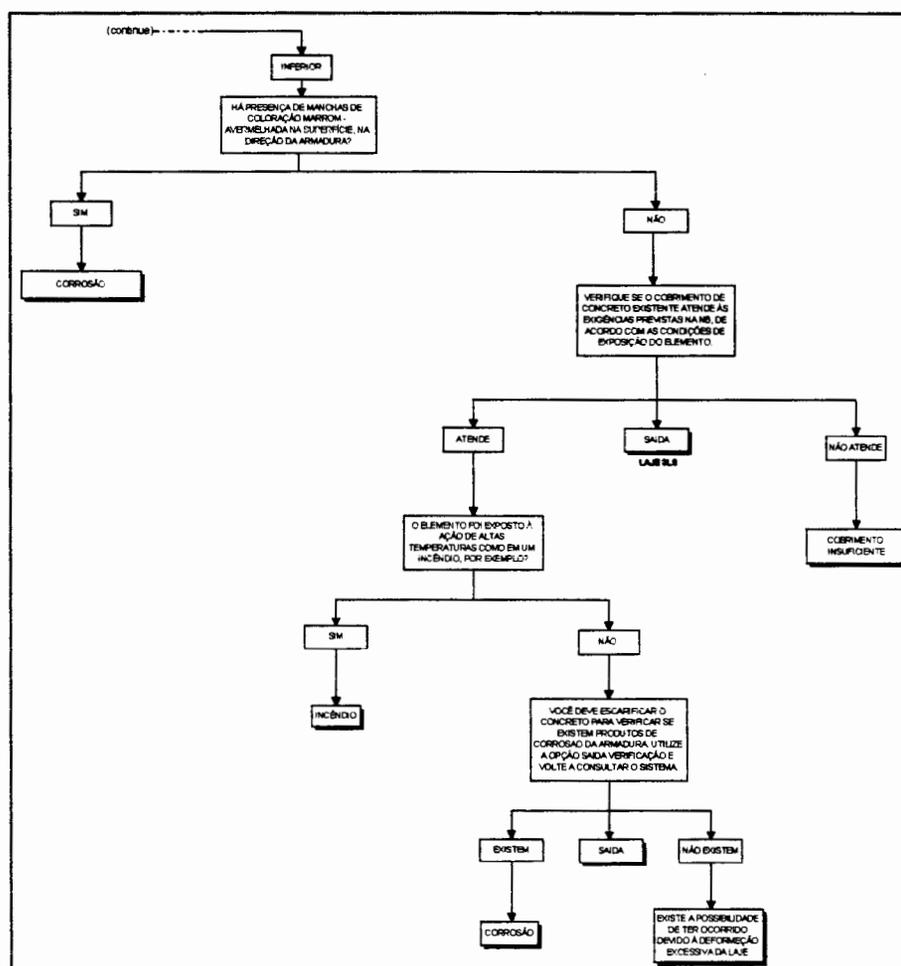


Figura 4.10 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes apresentando fissuras ao longo da armadura, nas duas direções, na face inferior

O caso de fissura devida à presença de eletroduto, em lajes, é típico e não requer qualquer tipo de investigação mais aprofundada. Assim, o diálogo com o usuário para obtenção de dados adicionais foi considerado irrelevante. A figura 4.11 ilustra o exposto anteriormente.



Figura 4.11 Árvore de decisão representativa de lajes com fissura ao longo de eletrodutos

No caso de fissura inclinada nos cantos de lajes, podem existir duas causas prováveis. Optou-se por não manter um diálogo com o usuário, apresentando-se a conclusão logo após a seleção da configuração. Foi considerado que o custo das verificações necessárias (falhas de cálculo/execução) pode ser elevado, não justificando a vantagem de se obter uma definição.

A figura 4.12, a seguir, apresenta a árvore representativa de lajes com fissura nos cantos, formando triângulos.



Figura 4.12 Árvore de decisão representativa de lajes com fissura nos cantos

É comum o surgimento de fissuras nas bordas de aberturas existentes em lajes. Podem ocorrer quando não é especificada armadura adicional para absorver as tensões existentes em torno da abertura ou quando esta armadura é insuficiente frente à magnitude das tensões. Este problema pode ser classificado como falha ligada ao projeto estrutural, devido a especificações inadequadas, ou por falha construtiva, caso as especificações de projeto não tenham sido corretamente observadas. Pode, também, haver a ocorrência de sobrecarga não prevista em projeto, havendo fissuração na área mais frágil, ou seja, em torno da abertura.

Existem casos, no entanto, em que a laje é calculada através do método de elementos finitos, considerando-se a existência da abertura, sem haver necessidade de prever armadura

adicional para absorver as tensões que ocorrem nas bordas. Neste caso, também podem existir falhas devidas ao projeto ou execução ou, ainda a sobrecargas não previstas em projeto.

Considerou-se irrelevante, tendo em vista as necessidades do usuário, determinar a origem das falhas que causam fissuras em torno de aberturas, não havendo questionamento durante a consulta. As causas do problema são fornecidas diretamente ao usuário, após a seleção da configuração da fissura.

A figura 4.13 ilustra o exposto anteriormente.

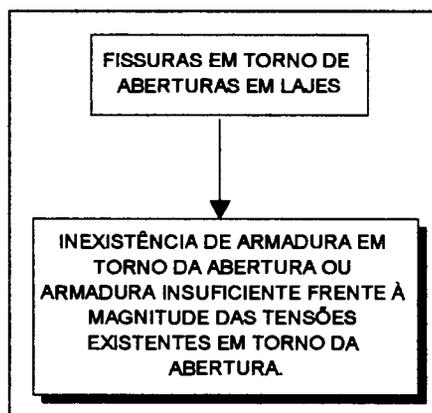


Figura 4.13 Árvore de decisão representativa de lajes com fissuras em torno de aberturas

Os casos de fissuras na face inferior de lajes, saindo dos cantos como bissetriz, sugerem comportamento deficiente frente aos esforços de flexão. São investigadas falhas ligadas ao projeto estrutural, à execução ou ocorrência de sobrecargas, nesta ordem. Salienta-se que pode haver a sobreposição dos efeitos destas causas, mas este fato não é considerado pelo protótipo, mantendo-se coerência com outros tipos de problemas.

Um dos trechos da árvore corresponde a uma situação na qual foram admitidas todas as restrições possíveis, havendo a indicação de resposta do tipo "causa indeterminada" observando-se, contudo, que esta configuração é típica de fissura causada por flexão.

A figura 4.14 apresenta-se a árvore de decisão correspondente à situação descrita anteriormente.

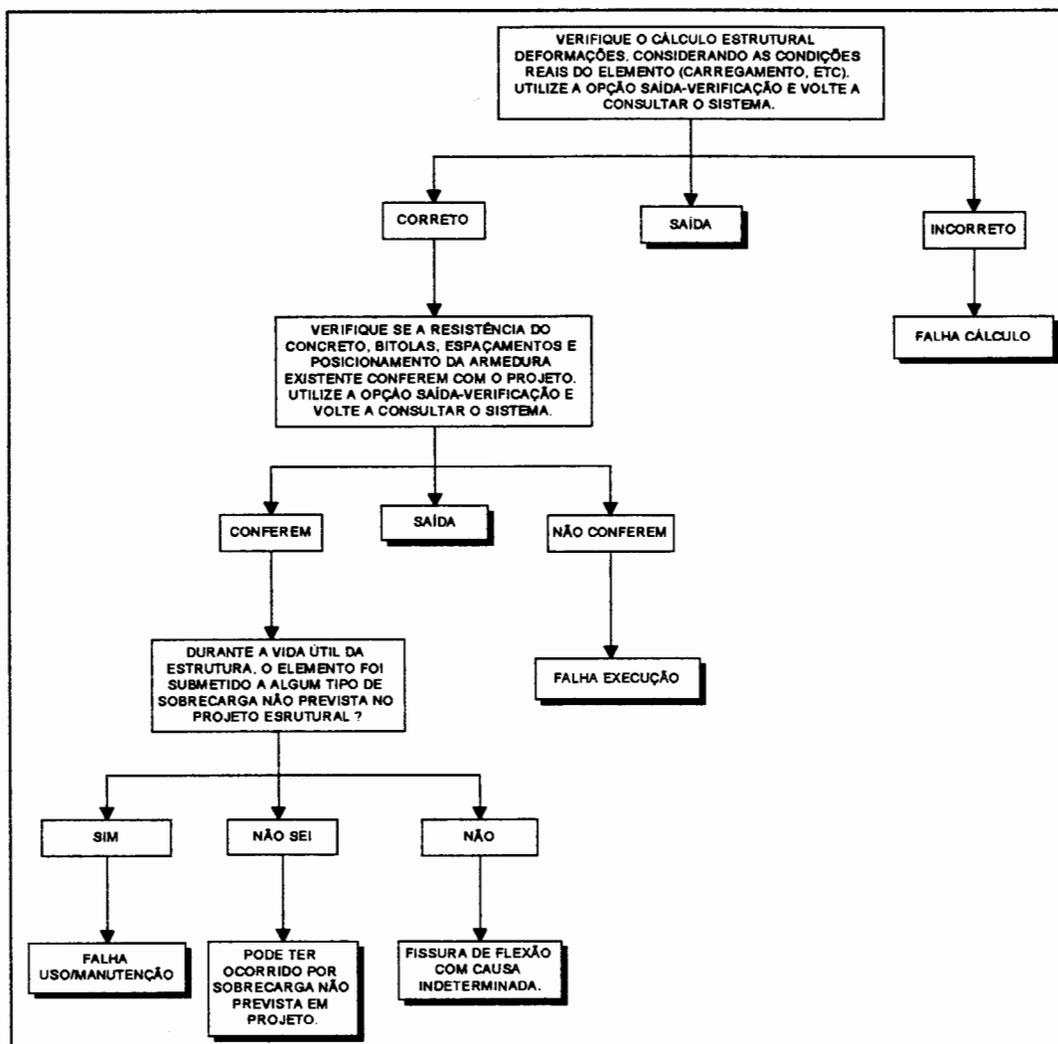


Figura 4.14 Árvore de decisão representativa de lajes com fissuras características de comportamento deficiente frente aos esforços de flexão

No caso de fissura na face superior de lajes, próxima ao apoio, as causas prováveis são: assentamento plástico; dessecação superficial; movimentação de formas; construção de parede não prevista em projeto, sob a laje; eletroduto; cobrimento insuficiente, falhas de projeto ou de execução, sobrecarga não prevista em projeto ou retração térmica/hidráulica.

A investigação inicia pela época de surgimento da fissura. Logo em seguida, o protótipo tenta excluir as hipóteses de construção de parede não prevista em projeto e da ocorrência de eletroduto. A investigação prossegue com a verificação da espessura de cobrimento e da possibilidade de terem sido cometidos erros no projeto estrutural, ou na execução da estrutura. Investiga-se, por fim, a ocorrência de sobrecarga e, caso não tenha ocorrido, o protótipo sugere a possibilidade de a fissura ter sido causada por retração térmica/hidráulica.

A figura 4.15 apresenta uma trecho da árvore de decisão representativa de lajes com fissura próximo ao apoio.

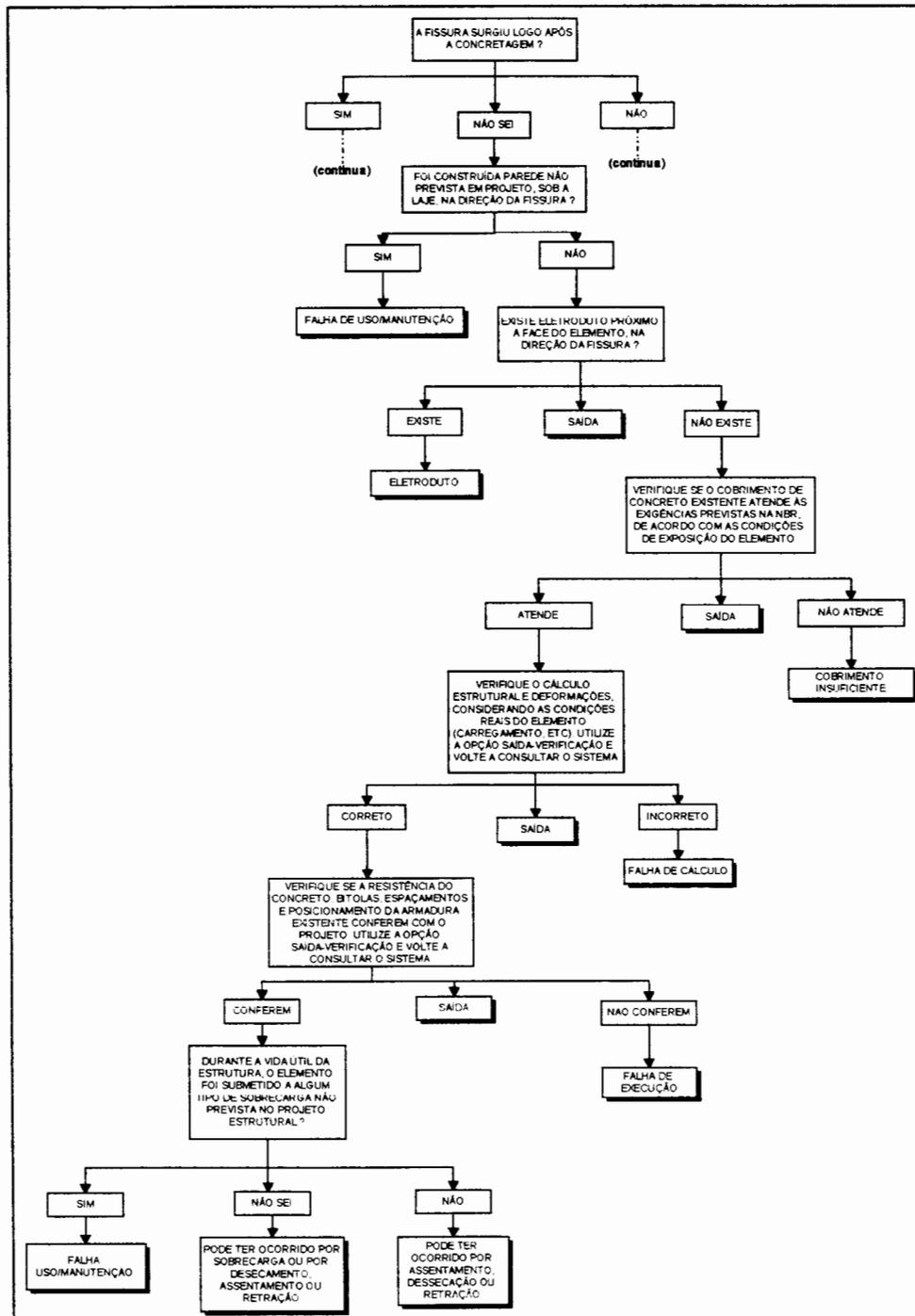


Figura 4.15 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes com fissura na face superior, próxima ao apoio

4.5.1.2 Fissuração em lajes em balanço

As causas de fissuras em lajes em balanço, abordadas no protótipo, desconsiderando-se a maior ou menor incidência, são: assentamento plástico; dessecação superficial; cobrimento insuficiente; corrosão da armadura; retração térmica e/ou hidráulica; escoramento inadequado da estrutura; lixiviação; reações expansivas (sulfatos, óxidos de cálcio e magnésio e reações álcali-agregado); presença de eletrodutos; falhas ligadas ao projeto estrutural ou à execução; falhas de uso/ manutenção (sobrecargas).

Com relação a fissuras transversais à laje em balanço, as causas prováveis são retração térmica/hidráulica, assentamento plástico, dessecação superficial, movimentação de formas, cobrimento insuficiente e corrosão da armadura.

Inicialmente, o protótipo busca confirmar se a fissura ocorreu por retração térmica/hidráulica, perguntando ao usuário se a mesma secciona a laje em balanço. A seguir, o protótipo pergunta ao usuário em qual face da laje em balanço ocorre a fissura.

Quando a fissura ocorre na face superior do elemento, buscam-se dados sobre a época de seu surgimento. Se surgiu logo após a concretagem, o protótipo indica, como prováveis causas, o assentamento plástico, a dessecação superficial e movimentação de formas havendo, ainda, a possibilidade de existência de cobrimento insuficiente. Quando o usuário não sabe a época de surgimento da fissura, ou quando afirma que não surgiu logo após a concretagem, são investigadas as possibilidades de o cobrimento não satisfazer às exigências da NBR 6118, ou de haver corrosão. Caso estas hipóteses não sejam confirmadas, a causa provável indicada pelo protótipo é a retração térmica/hidráulica.

Quando a fissura ocorre na face inferior, são consideradas as hipóteses de corrosão, cobrimento insuficiente e retração térmica/hidráulica, sem haver o seccionamento da laje em balanço.

A figura 4.16 apresenta um trecho da árvore de decisão, representativa de lajes em balanço com fissura no sentido transversal do elemento.

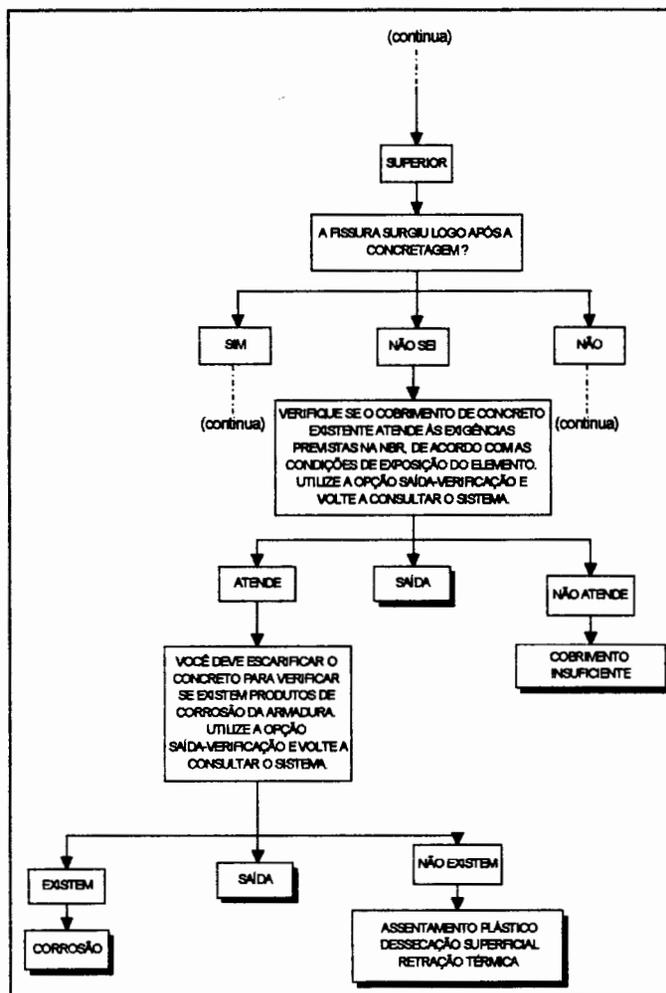


Figura 4.16 Trecho da árvore de decisão representativa de lajes em balanço com fissura transversal

A fissura longitudinal, junto ao apoio de lajes em balanço, é bastante perigosa para a estrutura, podendo indicar início de colapso. Esta configuração sugere comportamento deficiente da laje em balanço frente aos esforços de flexão. Devem-se investigar falhas ligadas ao projeto estrutural, à execução da estrutura e sobrecarga.

Com relação a lajes em balanço, a seqüência de raciocínio utilizada no processo de modelagem foi alterada. Verificam-se, em primeiro lugar, as possíveis falhas de projeto e, em seguida, a possibilidade de ocorrência de um carregamento superior ao previsto em projeto para, por fim, verificar-se a execução. Em marquises, é bastante freqüente a ocorrência de sobrecarga não prevista em projeto (exemplo: entupimentos de ralos, painéis de propagandas, lixo depositado, entre outros), motivo pelo qual o item sobrecarga é avaliado antes da verificação da execução.

A figura 4.17 apresenta a árvore de decisão para o diagnóstico de lajes em balanço com fissura longitudinal, próximo ao apoio.

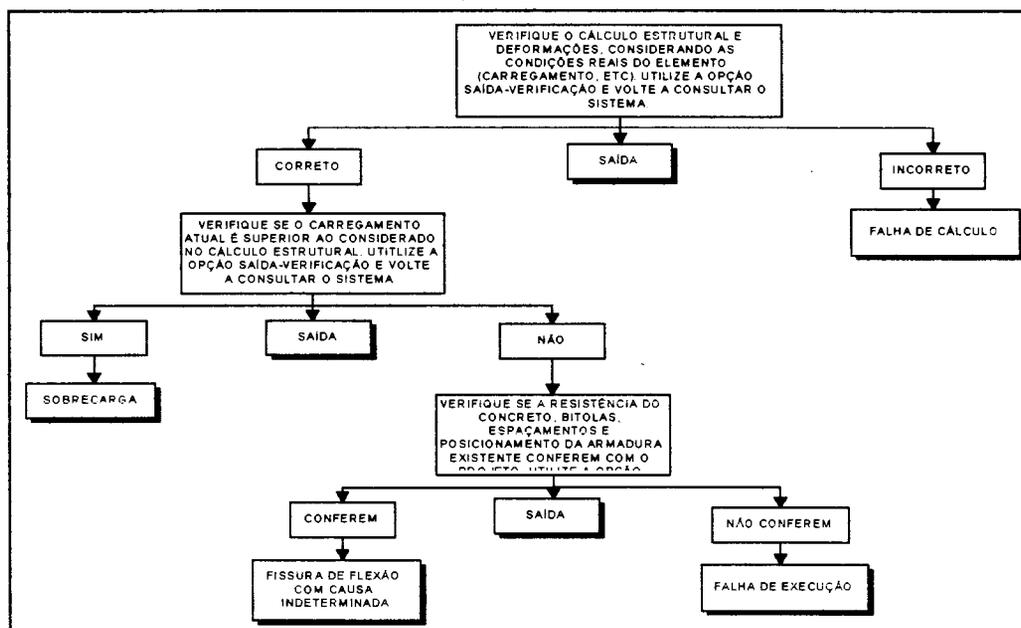


Figura 4.17 Árvore de decisão representativa de lajes em balanço apresentando fissura longitudinal, próximo ao apoio

O caso de lajes em balanço com uma fissura longitudinal na face inferior e no meio do vão é devido, geralmente, ao escoramento inadequado. As escoras devem ser retiradas no sentido da extremidade livre ao apoio. Caso sejam retiradas as escoras intermediárias, em primeiro lugar, deixando-se as escoras existentes na extremidade livre do balanço, a estrutura tende a se comportar como se fosse bi-apoiada. Como a armadura na face inferior das lajes em balanço pode ser inexistente ou inferior à correspondente a lajes bi-apoiadas com as mesmas características geométricas e mesmas condições de carregamento, pode ocorrer fissura no meio do vão por insuficiência de armadura.

Para estes casos, o protótipo apresenta diretamente a conclusão, sem haver questionamento com o usuário, durante a consulta.

A figura 4.18 apresenta a árvore de decisão representativa do caso exposto anteriormente.



Figura 4.18 Árvore de decisão representativa de lajes em balanço com fissura longitudinal, na face inferior e no meio do vão

Os casos de fissuras mapeadas e por eletrodutos, em lajes em balanço, foram abordados da mesma forma como no caso de lajes.

4.5.1.3 Fissuração em vigas

As causas de fissuras em vigas, abordadas no protótipo, sem considerar-se a maior ou menor incidência de cada uma delas, são: assentamento plástico ou utilização excessiva do vibrador; dessecação superficial; cobrimento insuficiente; corrosão da armadura; retração térmica e/ou hidráulica; reações expansivas (sulfatos, óxidos de cálcio e magnésio e reações álcali-agregado); falhas ligadas ao projeto estrutural ou à execução; falhas de uso/ manutenção (sobrecargas) e, ainda, ocorrência de altas temperaturas, como incêndio.

No caso de fissuras paralelas à armadura, nas faces superior, inferior e faces laterais das vigas, as causas prováveis indicadas pelo protótipo são corrosão, cobrimento insuficiente, ação de altas temperaturas, assentamento plástico ou utilização excessiva do vibrador.

A árvore de decisão inicia com a investigação da existência de manchas indicativas de corrosão. Caso não existam, o protótipo busca verificar se o cobrimento é adequado às exigências da NBR 6118 e se o elemento foi submetido à ação de altas temperaturas. Em caso negativo, tenta-se excluir a hipótese de corrosão, solicitando que o usuário escarifique o concreto, verificando a existência de produtos de corrosão ao longo da armadura. Se a corrosão não for confirmada, o protótipo indica como provável causa da fissura, o assentamento plástico ou vibração excessiva, durante a concretagem.

A figura 4.19 apresenta a árvore de decisão relativa ao caso descrito anteriormente.

O caso de fissura transversal em vigas corresponde à árvore de decisão com um maior número de caminhos ou possibilidades. As causas prováveis, para este caso, são: corrosão da

armadura, cobrimento insuficiente, ação de altas temperaturas, retração térmica/hidráulica, falhas ligadas ao projeto estrutural à execução ou sobrecarga.

Inicialmente, busca-se identificar se a fissura secciona ou não a viga. Caso seccione, deve-se identificar se a fissura localiza-se sobre os estribos. Caso esteja localizada sobre os estribos, são investigadas as hipóteses de corrosão, cobrimento insuficiente e ação de altas temperaturas. Quando o espaço de busca torna-se mais restrito, o protótipo conclui que não há informações suficientes para indicar a provável causa da fissura e solicita ao usuário para que confira seus dados e volte a consultar o EDIFICAR.

Se a fissura não ocorre sobre os estribos, as hipóteses investigadas são ação de altas temperaturas e retração térmica/hidráulica.

Altas temperaturas provocam a dilatação do aço, podendo ocasionar fissura sobre a armadura, levando à total perda de aderência ao concreto. Devido à excessiva elevação da temperatura podem surgir, na viga, esforços adicionais de flexão ou retração, principalmente em vigas de grande comprimento.

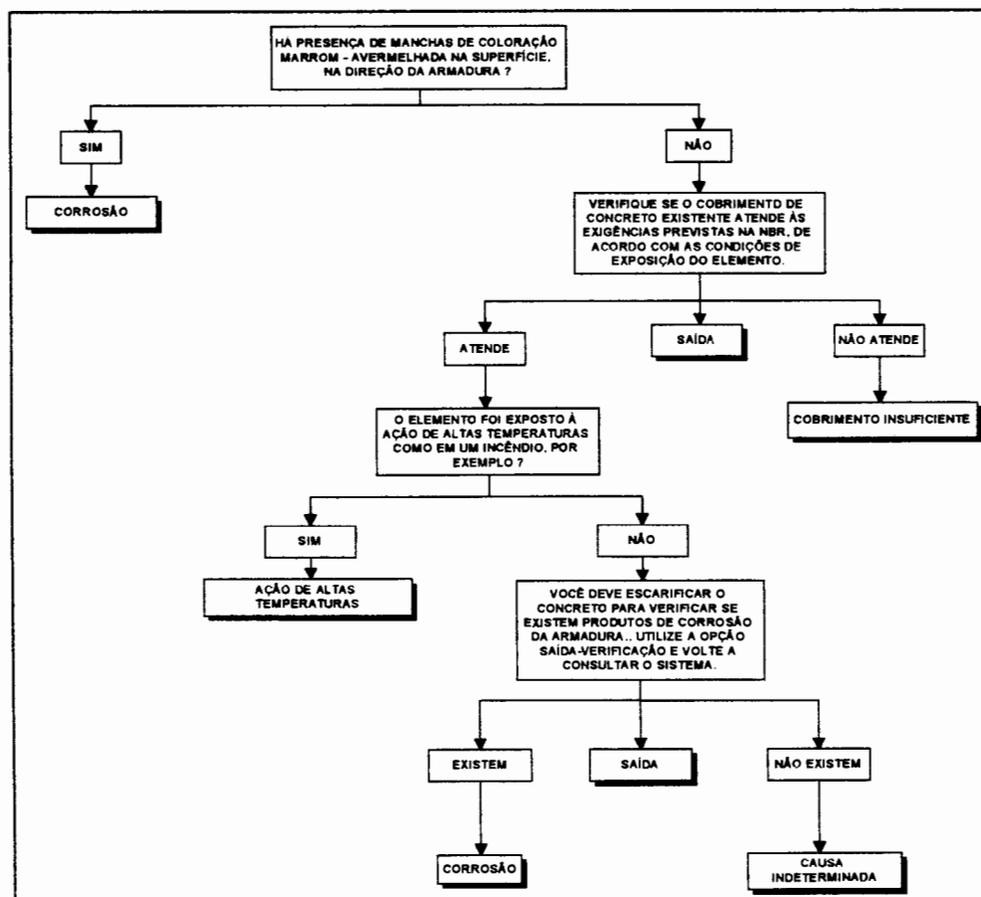


Figura 4.19 Árvore de decisão para vigas com fissura ao longo da armadura longitudinal

Portanto, a hipótese de ocorrência de altas temperaturas deve ser descartada em ambas as situações, ou seja, quando a fissuração ocorre sobre os estribos, ou não.

Quando as fissuras não seccionam a viga e estão localizadas sobre os estribos, investiga-se a possibilidade de corrosão, cobertura insuficiente e ação de altas temperaturas. Neste caso, novamente o protótipo fornece uma resposta do tipo "causa indeterminada", quando todas as possibilidades são esgotadas.

Quando as fissuras não seccionam a viga e não estão localizadas sobre os estribos, é investigado se as mesmas apresentam abertura variável. Em caso negativo o protótipo indica, como provável causa, a retração térmica/hidráulica, mesmo sem haver o seccionamento total do elemento.

Se a abertura da fissura é variável, sugerindo um comportamento deficiente da viga frente aos esforços de flexão, são investigadas falhas ligadas ao projeto estrutural, execução e sobrecarga. É investigada, ainda, a possibilidade de ocorrência de altas temperaturas.

Quando o processo de busca toma-se restrito, não havendo mais hipóteses a confirmar, o protótipo solicita ao usuário para que confira seus dados, repetindo a consulta, posteriormente.

Nos casos de fissuras mapeadas, em vigas, as causas prováveis apontadas pelo modelo são as seguintes: dessecação superficial e reações expansivas, como reações com sulfatos, reações com óxidos de cálcio e magnésio e reações álcali-agregado. A linha de raciocínio mantida, neste caso, é a mesma admitida para lajes e lajes em balanço. Contudo, não é abordada a situação de exposição da viga à insolação, visto que esta questão é mais relevante apenas nos casos de elementos que apresentam uma área de exposição considerável, como pode ocorrer em lajes ou marquises.

São abordados, também, problemas de vigas com comportamento deficiente frente a esforços de flexão, configurando-se através de fissuras com abertura variável, apresentando a maior abertura próximo à face inferior e tendendo a desaparecer em direção à linha neutra da viga. Pode ocorrer uma única fissura, aproximadamente no meio da viga, ou várias fissuras na região central.

Nestes casos, o protótipo solicita ao usuário a verificação do projeto estrutural, da execução e investiga a possibilidade da ocorrência de sobrecarga não prevista. Quando todas as

possibilidades são esgotadas, o protótipo fornece uma resposta do tipo “causa indeterminada”, sugerindo ao usuário que confira os dados disponíveis, voltando à consulta posteriormente.

As vigas com fissuras inclinadas, típicas de vigas com comportamento deficiente frente aos esforços de cisalhamento e as fissuras helicoidais, características de vigas submetidas à torção, são abordadas através de árvores de decisão idênticas à árvore representativa de vigas com problemas relativos à flexão.

A seguir, apresenta-se a árvore de decisão representativa de vigas com fissuras de cisalhamento, através da figura 4.20 .

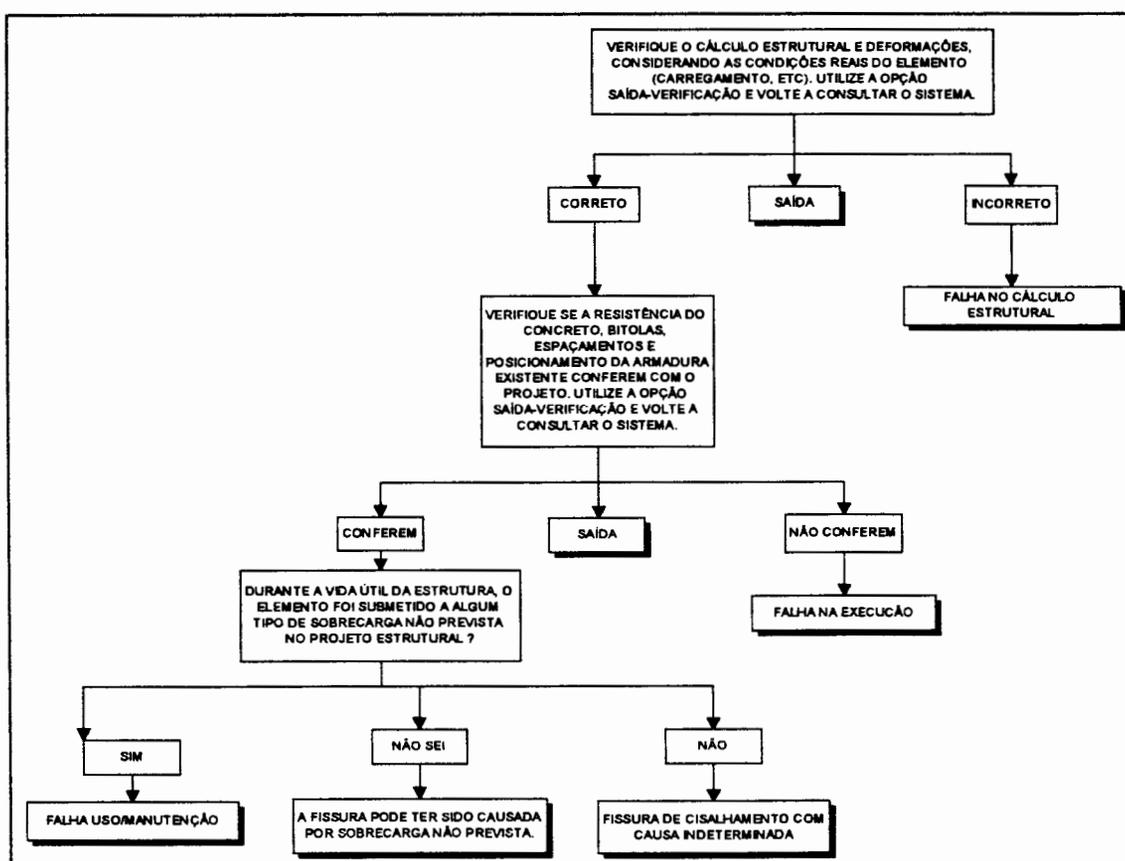


Figura 4.20 Árvore de decisão representativa de vigas com fissuras de cisalhamento

4.5.1.4 Fissuração em pilares

As causas de fissuras em pilares, abordadas no protótipo, sem considerar-se a maior ou menor incidência de cada uma delas, são: assentamento plástico ou junta de concretagem mal executada; dessecação superficial; cobrimento insuficiente; corrosão da armadura; retração térmica e/ou hidráulica; reações expansivas (sulfatos, óxidos de cálcio e magnésio e reações

álcali-agregado); falhas ligadas ao projeto estrutural ou à execução; falhas de uso/ manutenção (sobrecargas) e, ainda, ocorrência de altas temperaturas (incêndio).

As fissuras transversais, bem como fissuras que ocorrem no topo de pilares, são abordadas na mesma árvore de decisão e as causas prováveis para este caso são: assentamento plástico ou junta de concretagem mal executada, retração térmica/hidráulica, corrosão da armadura, cobrimento insuficiente ou efeito de altas temperaturas.

Assim, inicialmente é investigado se a fissura ocorre no topo do pilar. Em caso afirmativo, solicita-se ao usuário que informe se o pilar apresenta pequena rigidez com relação à viga. Se o usuário responder que apresenta, a causa provável fornecida pelo protótipo, para a fissuração, é a retração térmica/hidráulica. Caso contrário, o protótipo conclui que a fissura é devida ao assentamento plástico ou à junta de concretagem mal executada.

Se a fissura não ocorre no topo do pilar, investiga-se a possibilidade de ocorrência de corrosão, cobrimento insuficiente e altas temperaturas.

A figura 4.21, a seguir, apresenta um trecho da árvore de decisão representativa de pilares com fissuras transversais.

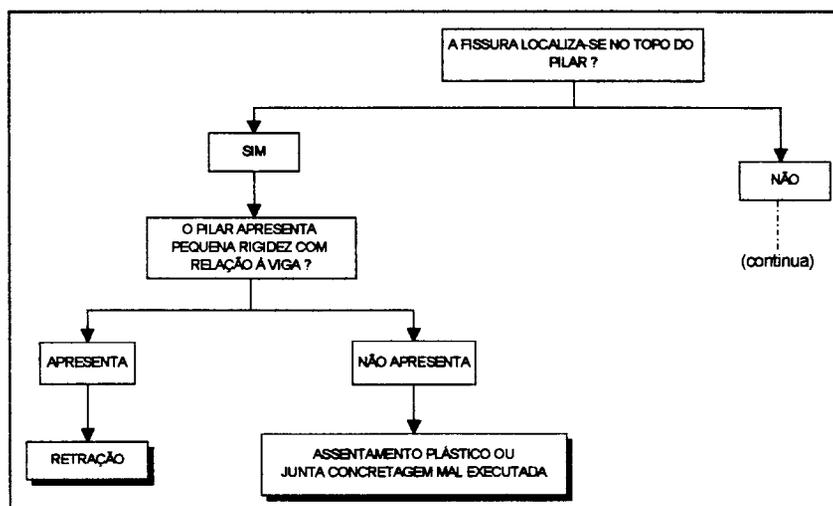


Figura 4.21 Trecho da árvore representativa de pilares com fissuras transversais

Quando ocorrem fissuras longitudinais, as possibilidades mais prováveis são: corrosão da armadura, cobrimento insuficiente, falhas ligadas ao projeto estrutural, execução, sobrecarga ou ação de altas temperaturas.

A investigação é iniciada buscando-se confirmar a corrosão como causa provável. Busca-se eliminar, a seguir, o cobrimento insuficiente e, por fim, a ocorrência de falhas de projeto,

execução, sobrecarga e ação de altas temperaturas. Quando todas estas questões são abordadas, sem que seja obtida nenhuma conclusão, o protótipo fornece uma resposta do tipo "causa indeterminada" e solicita ao usuário que confira os dados disponíveis.

A figura 4.22 apresenta um trecho da árvore de decisão correspondente ao caso descrito.

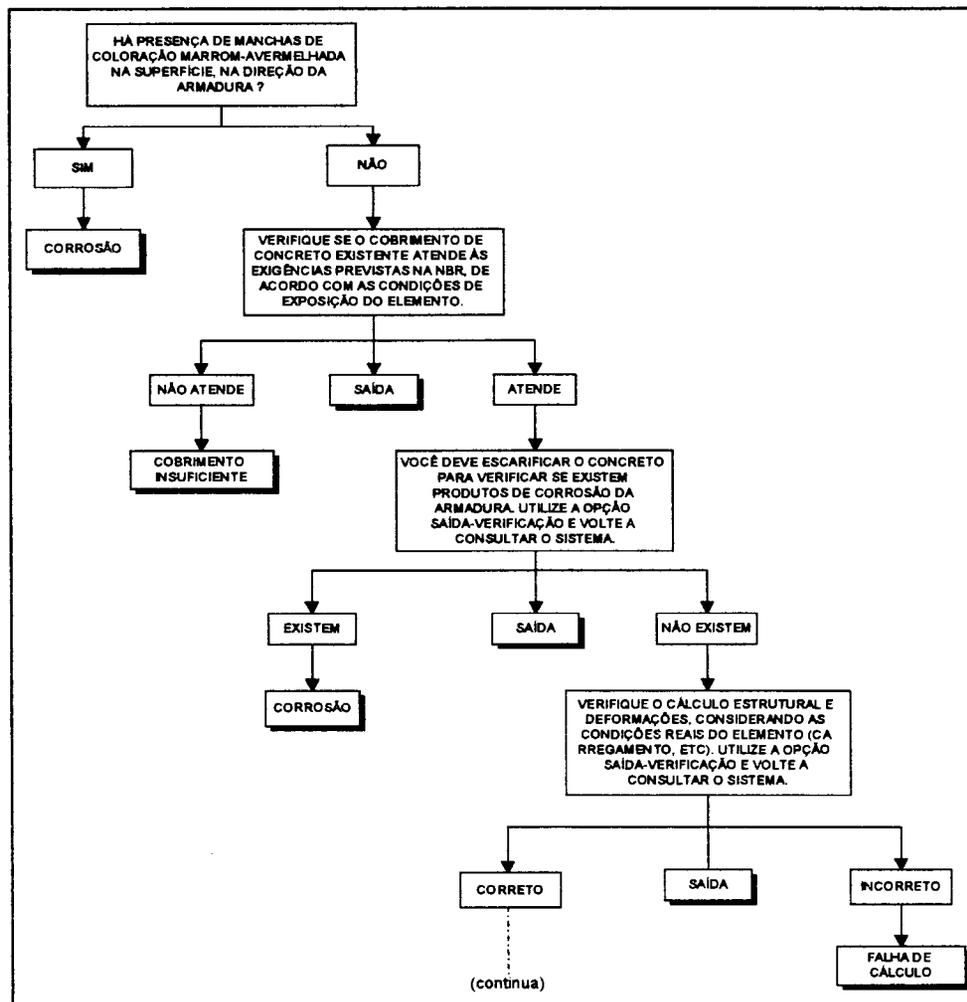


Figura 4.22 Trecho da árvore de decisão representativa de pilares com fissuras longitudinais

O caso de fissura mapeada em pilares pode ocorrer devido à dessecação superficial ou a reações expansivas, sendo abordada através de uma árvore de decisão semelhante a de vigas.

Fissuras horizontais na face central de pilares podem representar risco quanto à estabilidade estrutural, devido ao comportamento inadequado do elemento para resistir a esforços de flexão. Devem ser investigadas falhas ligadas ao projeto estrutural, execução ou sobrecarga.

A figura 4.23 apresenta a árvore de decisão correspondente a este tipo de situação.

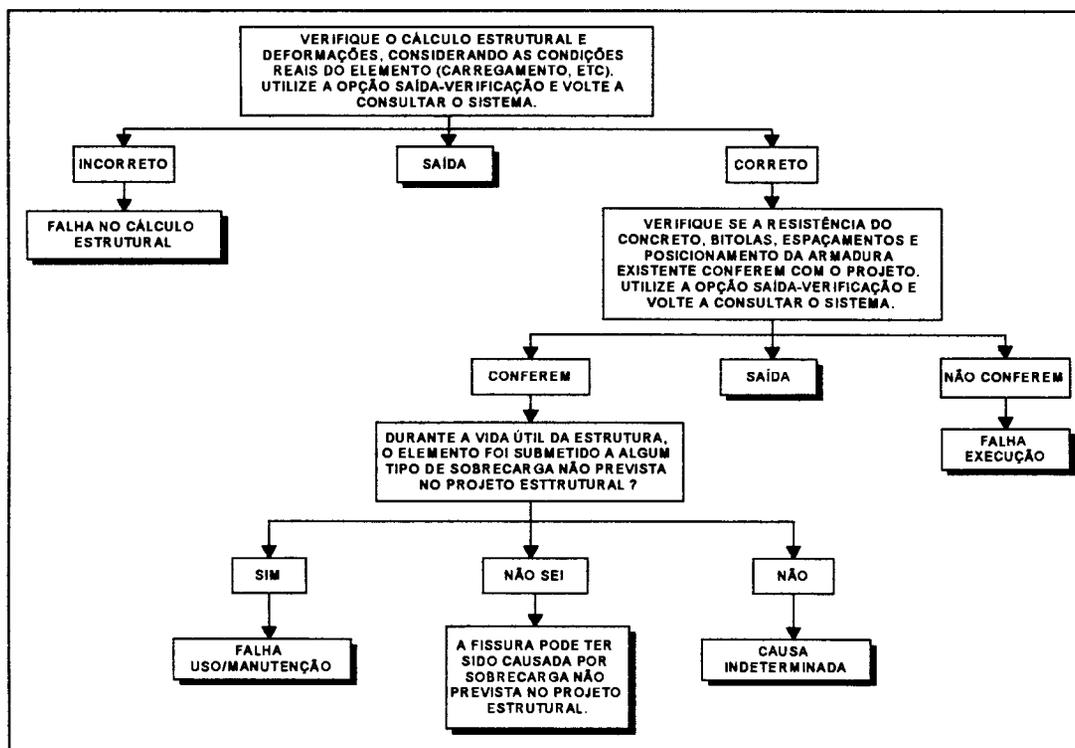


Figura 4.23 Árvore de decisão representativa de pilares com fissuras horizontais no trecho central

Existem, também, fissuras que sugerem comportamento deficiente de pilares frente a esforços de compressão, devendo-se investigar falhas ligadas ao projeto estrutural, execução ou sobrecarga.

O raciocínio utilizado para a resolução do problema é idêntico ao caso anteriormente descrito.

5 Descrição da aplicação

5.1 Arquitetura do sistema

O sistema EDIFICAR, cuja arquitetura está representada na figura 5.1, foi desenvolvido em um ambiente computacional do tipo *shell* denominado Kappa-PC (ver seção 3.3.4.1).

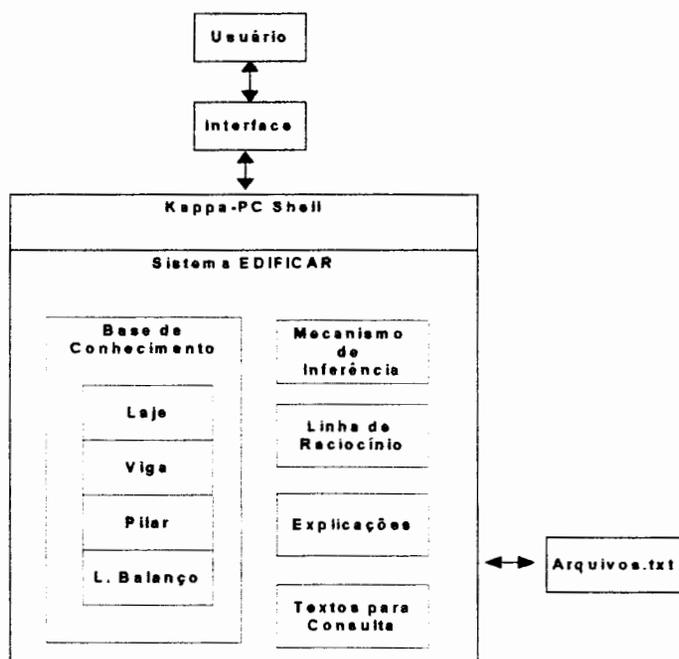


Figura 5.1 Arquitetura do sistema EDIFICAR

A estrutura do sistema é composta por: base de conhecimento, mecanismo de inferência, dispositivo de interface que fornece a linha de raciocínio e módulos de explicação/consulta.

A base de conhecimento do sistema é constituída por quatro módulos independentes de regras: LAJE, VIGA, PILAR e LAJE EM BALANÇO, nos quais está representado o conhecimento modelado a partir do processo de elicitação. O objetivo da divisão do sistema em módulos foi facilitar a realização de alterações futuras, permitindo modificar a base de conhecimento ou ampliá-la. Cada módulo principal foi subdividido em módulos secundários, conforme as várias configurações de fissuras abordadas na fase de aquisição de conhecimento. Portanto existem 23 submódulos de regras:

a) vinculados ao módulo LAJE: PARALELA_ARMADURA, MAPEADA, DIREÇÃO_ARMADURA, TRIANGULAR_CANTOS, BISSETRIZES, PONTO_LUZ, PRÓXIMO_ABERTURAS;

b) vinculados ao módulo VIGA: LONGITUDINAL, TRANSVERSAL_ARMADURA, GEOGRÁFICA, CISALHAMENTO, TORÇÃO, FLEXÃO;

c) vinculados ao módulo PILAR: TOPO_PILAR, PARALELA_ARMADURA, BISSETRIZ, CENTRAL, MAPEAMENTO;

d) vinculados ao módulo LAJE_BALANÇO: TRANSVERSAL, PRÓXIMO_APOIO, PARALELA_MEIO_VÃO, CROCODILO, ELETRODUTO.

Independente da base de conhecimento, existe o mecanismo de inferência que manipula as regras, buscando emular o raciocínio do especialista na resolução do problema. Este item é discutido na seção 5.2.4.

A estrutura do sistema é constituída, também, por um dispositivo de interface que fornece a linha de raciocínio utilizada na resolução do problema, possibilitando maior transparência ao processo. Este módulo está vinculado diretamente à base de regras.

O sistema é constituído, ainda, por módulos que fornecem explicações e textos para consulta. O módulo de explicações armazena as justificativas correspondentes a cada conclusão obtida durante as consultas. O módulo que contém textos possibilita ao usuário consultar sobre os mecanismos de formação dos diversos tipos de fissuras abordados no sistema e os métodos preventivos indicados a cada caso. Estes módulos são constituídos por textos armazenados em arquivos externos ao Kappa-PC e são apresentados com mais detalhes na seção 5.3.

5.2 Representação do domínio de conhecimento

O sistema EDIFICAR foi desenvolvido de forma híbrida, utilizando a linguagem de representação orientada a objeto, para representar a estrutura do domínio e a programação baseada em regras, para modelar e manipular o conhecimento especializado.

5.2.1 Estrutura do domínio: classes e instâncias

A árvore hierárquica do sistema, apresentada na figura 5.2, foi estruturada a partir de uma classe genérica denominada ELEMENTOS, da qual foram derivadas as classes especializadas LAJE_BALANÇO, LAJE, VIGA e PILAR, que representam os elementos estruturais enfocados no sistema. Assim, a superclasse ELEMENTOS descreve um grupo de quatro subclasses de objetos (LAJE_BALANÇO, LAJE, VIGA e PILAR) que dividem características comuns. De cada uma destas subclasses foram derivados membros ou instâncias, para representar elementos

estruturais apresentando fissuras com as configurações mais comuns, abordadas na fase de aquisição de conhecimento.

Por exemplo, a classe LAJE_BALANÇO possui, como membros, as subclasses TRANSVERSAL, representando as lajes em balanço que apresentam fissuras na direção perpendicular ao apoio de balanços, PRÓXIMO_APOIO, representando lajes em balanço que apresentam fissuras próximo ao apoio, PARALELA_MEIO_VÃO, representando lajes em balanço que apresentam fissuras na direção paralela ao apoio e no meio do vão, CROCODILO, representando lajes em balanço que apresentam fissuras com aspecto semelhante ao da “pele de crocodilo” e ELETRODUTO, representando lajes em balanço que apresentam fissuras acompanhando a direção de eletrodutos, em balanços.

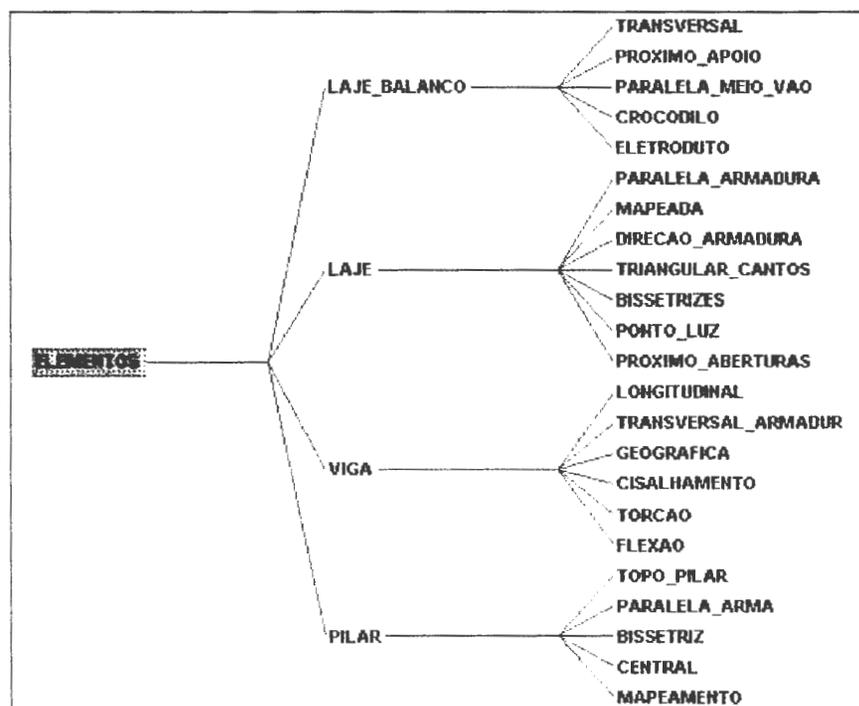


Figura 5.2 - Árvore hierárquica do sistema EDIFICAR

5.2.2 Slots

Foram criados vários *slots* para representar características peculiares aos diversos tipos de fissuras abordadas. Estrategicamente, alguns *slots* foram definidos dentro da classe ELEMENTOS, por serem comuns a várias subclasses descendentes. Outros foram definidos como *slots* locais por estarem relacionados, especificamente, a determinadas classes.

Por exemplo, o *slot* APÓS_CONCRETAGEM é utilizado para representar fissuras que se caracterizam por surgirem em períodos anteriores ao endurecimento do concreto, o *slot*

MANCHAS é utilizado para representar fissuras que se caracterizam por apresentarem manchas ferruginosas, o *s/ot* ELETRODUTO é utilizado para representar fissuras convergentes a pontos de luz, e assim por diante.

5.2.3 Base de regras

As regras representam pedaços de conhecimento de uma forma notadamente modular, existindo uma conexão entre a sintaxe das regras e a organização das informações na base de conhecimento. Não existe uma única forma de organizar a base de conhecimento em um SBR. A escolha depende de alguns fatores, tais como: complexidade da tarefa que será modelada, estratégia de controle empregada na reprodução da tarefa, disponibilidade de ferramentas adequadas, além das preferências do projetista do sistema (DYM & LEVITT, 1991).

No caso do sistema EDIFICAR, procurou-se criar uma estreita correspondência entre o conjunto de regras que constituem a base de conhecimento do sistema e a árvore contextual, modelada a partir da etapa de aquisição de conhecimento. As regras foram organizadas diretamente da árvore de conhecimento, sendo cada regra correspondente a um "braço" ou "galho" da árvore. A base de regras, portanto, também foi organizada de uma forma modular, sendo cada módulo relacionado a uma das quatro ramificações principais da árvore de conhecimento: laje, viga, pilar e laje em balanço.

Cabe salientar, ainda, que o Sistema EDIFICAR possui apenas 231 regras sendo um sistema de fácil organização e manutenção.

A cada regra foi atribuído um nome para facilitar a organização do sistema. Cada módulo é formado por várias árvores de regras, correspondendo às diversas configurações de fissuras.

Por exemplo, o módulo Lajes é constituído pelos seguintes submódulos ou árvores de regras:

- Laje1 - fissuras transversais
- Laje2 - fissuras mapeadas
- Laje3 - fissuras na direção da armadura
- Laje4 - fissuras nos cantos das lajes
- Laje5 - fissuras em forma de bisettrizes
- Laje6 - fissuras convergentes a pontos de luz
- Laje7 - fissuras em torno de aberturas
- Laje8 - fissuras próximo ao apoio

Por convenção, cada regra apresenta o nome do módulo correspondente (laje, viga, pilar e laje em balanço), seguido do número indicativo do submódulo e de uma letra relativa a cada regra, por exemplo, Laje1.A, Viga3.B, Pilar1.C, entre outras.

Através da modularidade estabelecida e da utilização de uma sintaxe flexível proporcionada pela ferramenta adotada, foram garantidas facilidades para etapas ligadas à implementação e manutenção do sistema, possibilitando acréscimos ou modificações nas regras, sem necessitar alterar toda a base.

5.3 Mecanismo de inferência utilizado no EDIFICAR

No Kappa-PC existem dois tipos de processadores que manipulam as regras desenvolvendo linhas de raciocínio adequadas. Um dos processadores, denominado *forward chainer* realiza a inferência utilizando o encadeamento para frente e o outro, denominado *backward chainer*, utiliza a inferência com encadeamento para trás (KAPPA MANUAL, 1992).

O mecanismo de inferência utilizado na manipulação das regras modeladas durante o desenvolvimento do sistema EDIFICAR foi o *backward chaining*, também chamado raciocínio dirigido ao *goal*, por ser uma solução indicada aos problemas de diagnose.

Assim, considerando-se as regras Laje1A e Laje1B, existentes na base de regras do sistema EDIFICAR, apresentadas a seguir:

Regra Laje1.B

```
IF PARALELA_ARMADURA:CORTANTE #= SECCIONA
AND PARALELA_ARMADURA:ELETRODUTO #= NAO_EXISTE
THEN "A fissura ocorreu devido à retração térmica e/ou hidráulica"
```

Regra Laje1.L

```
IF PARALELA_ARMADURA:LOCALIZAÇÃO #= INFERIOR
AND PARALELA_ARMADURA:MANCHAS #= SIM
THEN " Provavelmente, a fissura surgiu devido à corrosão da armadura."
```

O raciocínio que o sistema utiliza para fornecer a resposta ao problema é o seguinte:

Para que a fissura tenha ocorrido devido à retração térmica e/ou hidráulica, que fatos devem ser verdadeiros?

- a fissura deve seccionar o elemento e

- não deve existir eletroduto atravessando o elemento, na direção da fissura.

Para que a fissura tenha ocorrido devido à corrosão da armadura, que fatos devem ser verdadeiros?

- a fissura deve estar localizada na face inferior da laje e
- devem existir manchas de coloração marrom-avermelhada na direção da fissura.

O processo inicia, portanto, quando as partes IF das regras ou os valores dos pares objeto-*slot* são avaliados, para que satisfaçam o *goal*. Após determinar se o *goal* foi satisfeito, o sistema solicita ao usuário o valor do *slot*, questionando-o através da caixa de diálogo, utilizada durante as sessões de consulta, no Kappa-PC.

5.4 Interface

O principal passo para a construção da interface com o usuário foi a escolha da ferramenta para o desenvolvimento do protótipo. O sistema Kappa-PC é constituído por um ambiente sofisticado para a criação de sistemas baseados no conhecimento, apresentando interface com o ambiente *Windows*. Apresenta facilidades e ferramentas adequadas ao desenvolvimento de aplicações, sendo extremamente úteis tanto ao projetista do sistema como ao usuário final.

Procurou-se considerar alguns aspectos importantes durante a construção da interface, utilizando-se os recursos existentes na *shell* de forma a obter um produto final adequado às reais necessidades do usuário.

Uma das preocupações, durante a implementação do protótipo, foi fornecer todas as instruções de uso necessárias para que, mesmo usuários não familiarizados, possam realizar sessões de forma eficaz, sem que seja imprescindível a leitura prévia do manual do usuário. A figura 5.3, a seguir, apresenta uma das telas de instruções ao usuário, no EDIFICAR.

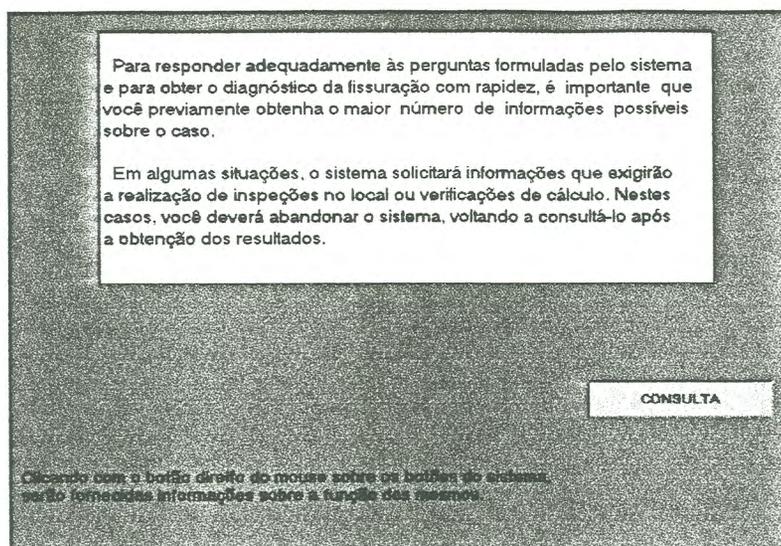


Figura 5.3 Tela na qual são apresentadas instruções ao usuário do sistema

Um ponto fundamental para o sucesso da aplicação foi o uso de figuras para representar as diversas configurações de fissuras, cuja descrição através de palavras poderia conduzir à incidência de erros e impediria, também, que o usuário comparasse o caso real a ser diagnosticado com os tipos de fissuras abordados pelo sistema. Além de facilitar o processo de escolha do usuário, este recurso busca uma aproximação com a realidade, na qual, durante a execução da tarefa, o especialista realiza inspeções visuais preliminares no elemento estrutural fissurado.

Foram criados quatro botões para acionar os quatro módulos (LAJE, VIGA, PILAR e LAJE_BALANÇO) que constituem a base de conhecimento do sistema e para acionar os diversos submódulos de regras. Os botões que acionam cada um dos submódulos correspondem aos desenhos representativos da respectiva fissura, bastando que o usuário clique com o *mouse* sobre a configuração escolhida para que inicie a sessão de consulta. A figura 5.4, a seguir, apresenta a tela que possibilita ao usuário escolher o elemento estrutural a consultar.

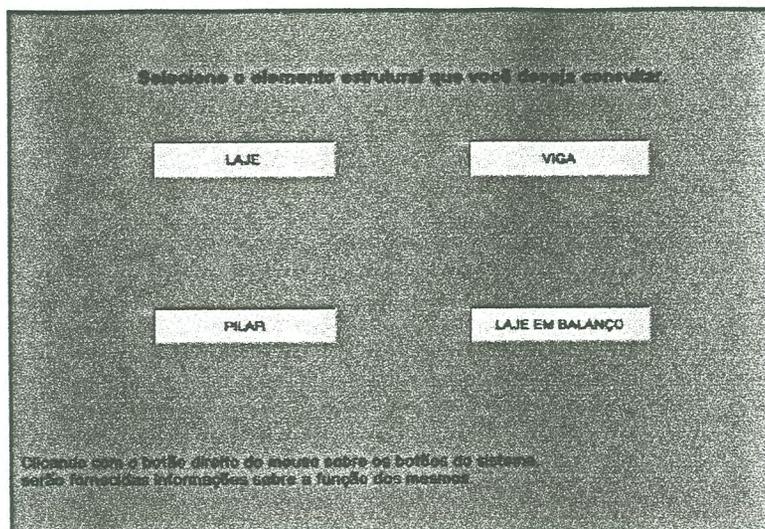


Figura 5.4 Tela principal do sistema, através da qual o usuário seleciona o assunto a consultar

A figura 5.5, a seguir, apresenta a tela para escolha entre os diversos tipos de configurações típicas de fissuras em lajes.

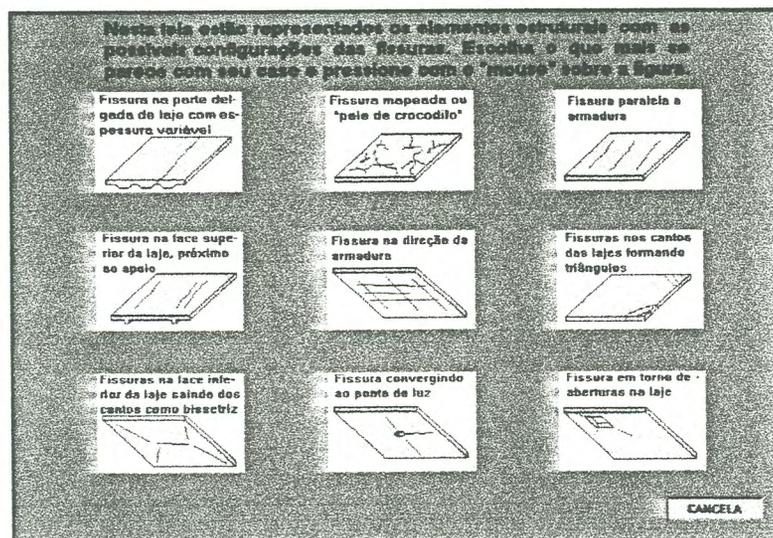


Figura 5.5 Tela que apresenta as configurações mais comuns em lajes

Buscou-se possibilitar uma interação adequada do usuário com o sistema, formulando perguntas simples e objetivas.

Não foi possível obter grande flexibilidade durante a realização da consulta, permitindo um controle total do usuário. Tendo em vista que o conhecimento foi modelado e a base representada a partir de árvores de decisão, a consulta desenvolve-se a partir das opções selecionadas pelo usuário e cada seção corresponde a um "galho" da respectiva árvore. O sistema não salva consultas parciais, ou seja, caso seja necessário abandonar o sistema para

buscar informações complementares, o usuário deve reiniciar a sessão de consulta, após obter os dados. Não é possível retroceder ou mudar o caminharmento de uma sessão, caso seja necessário realizar alterações. No sentido de minimizar este problema, evitando que sejam cometidos erros por falta de atenção, o usuário deve clicar com o botão do *mouse* sobre a alternativa correta e, em seguida, esta resposta deve ser confirmada clicando-se sobre o botão *OK*. Só então a próxima pergunta será dirigida ao usuário.

Outra medida realizada com a finalidade de auxiliar o usuário durante a consulta, buscando minimizar a incidência de erros, consistiu na elaboração de comentários para elucidar cada pergunta formulada. Estes comentários podem ser obtidos durante a sessão de consulta, através do botão *Comment*, existente na janela de diálogo com o usuário. A janela de diálogo com o usuário do Kappa-PC apresenta, também, um botão denominado *Unknown*, para uso em caso de respostas desconhecidas. Este botão não tem função prevista nesta versão do sistema, sendo as questões que abordam incerteza diretamente tratadas na árvore de decisão, através da eliminação de hipóteses. Não foi possível eliminar este botão da janela de diálogo do EDIFICAR e, embora exista uma mensagem avisando o usuário para que não utilize este botão, pode haver o descumprimento desta observação, gerando um erro no sistema. Este aspecto deve ser revisto nas próximas versões do sistema, a fim de contornar o problema.

A figura 5.6 apresenta um exemplo de pergunta formulada ao usuário, durante uma sessão de consulta e podem ser observados os dois botões mencionados anteriormente.

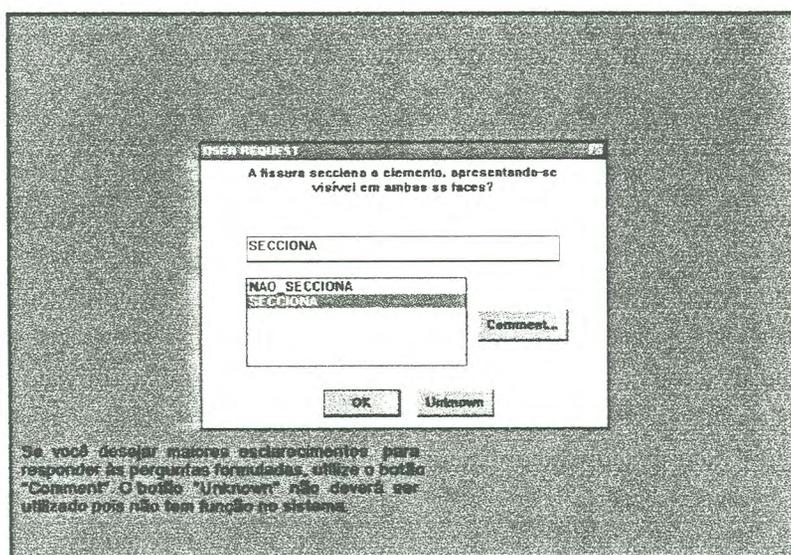


Figura 5.6 Exemplo de pergunta utilizada pelo sistema em uma sessão de consulta

Outro aspecto muito importante a ser considerado na construção da interface consiste na capacidade do sistema em fornecer explicações ao usuário (BERRY & BROADBENT, 1987).

Os textos elaborados com a finalidade de justificar o raciocínio utilizado pelo sistema no diagnóstico, os textos para consulta e o fornecimento da linha de raciocínio (ver seção 5.1) indicam que este aspecto não foi negligenciado.

Se ao final de uma consulta o usuário não lembrar quais as opções escolhidas, pode obter a inferência utilizada pelo sistema para diagnosticar o problema, através do botão "Linha de Raciocínio".

Cada regra possui o texto a ser acessado ao acionar o botão "Linha de Raciocínio", em sua cláusula THEN, conforme ilustra o exemplo a seguir:

THEN

```
SetValue(ELEMENTOS:CAUSA,LAJEIB);
DisplayText(DIAGNOSTICO, FormatValue("\n%", "A fissura ocorreu devido
à retração térmica/hidráulica."):
DisplayFile(EXPLICACAO, LAJEIB.TXT):
DisplayText(LINHA_RACIOCINIO, FormatValue("%". "A linha de raciocínio
do sistema foi a seguinte:"). FormatValue("\n\n%s".
"- a fissura secciona o elemento estrutural;"). FormatValue("\n%s"."- não
existe eletroduto na direção da fissura."));
```

Outro módulo que compõe a estrutura do sistema (ver seção 5.1) pode ser acionado pelo usuário, ao final de cada consulta, através do botão "Por que?". Foram elaborados cerca de 250 textos em linguagem natural, correspondentes às justificativas de cada diagnóstico fornecido pelo sistema. Embora exigindo muito trabalho e dispendendo um tempo considerável para elaboração e implementação dos textos no microcomputador, considerou-se esta etapa fundamental para assegurar maior credibilidade ao sistema, além de facilitar o processo de comunicação com o usuário.

Existem algumas diferenças básicas entre o módulo de explicações e o módulo acionado pelo botão "Linha de Raciocínio", mencionado anteriormente. Enquanto o botão "Linha de Raciocínio" fornece a inferência do sistema, através de itens, de forma esquemática e objetiva, o botão "Por que?" fornece uma explicação através de textos, de um modo mais detalhado, buscando justificar o diagnóstico, além de apresentar algumas definições que possam esclarecer melhor a conclusão obtida. A figura 5.7, apresentada a seguir, mostra a tela final do sistema, na

qual é fornecido o diagnóstico provável da fissuração e onde estão disponíveis os botões auxiliares.

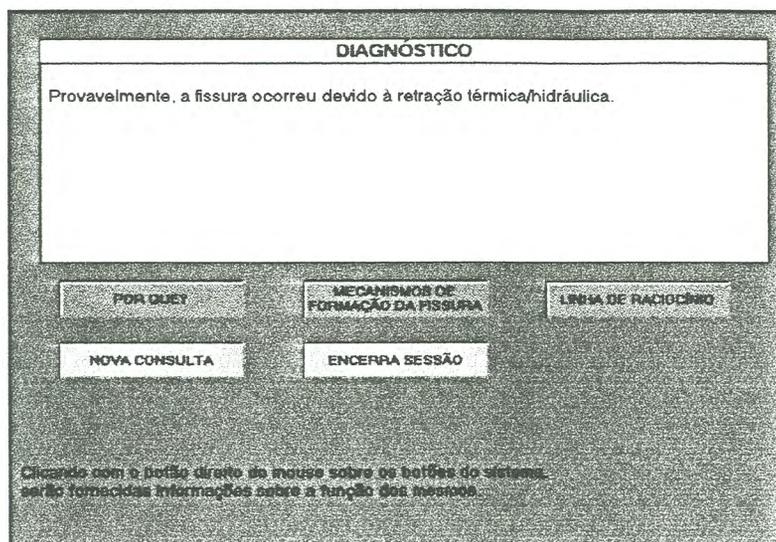


Figura 5.7 Tela final na qual o sistema fornece o diagnóstico da fissura ao usuário

Após obter a causa provável da fissuração, o usuário pode sair do sistema através do botão “Encerra Sessão”, voltando ao ambiente *Windows*. Pode, também, consultar novamente o sistema através do botão “Nova Consulta”, indo diretamente para a tela principal na qual deverá selecionar o novo assunto, sem precisar percorrer as telas iniciais do sistema.

As figuras 5.8 e 5.9 contêm telas com a explicação e a linha de raciocínio, respectivamente, fornecidas pelo sistema, após a regra Laje I B ter sido disparada.

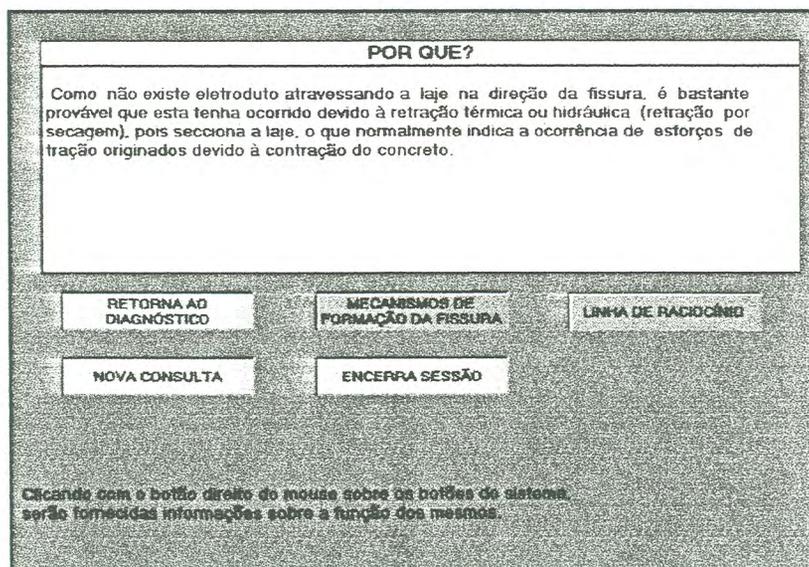


Figura 5.8 Explicação fornecida pelo sistema EDIFICAR para a regra Laje I B

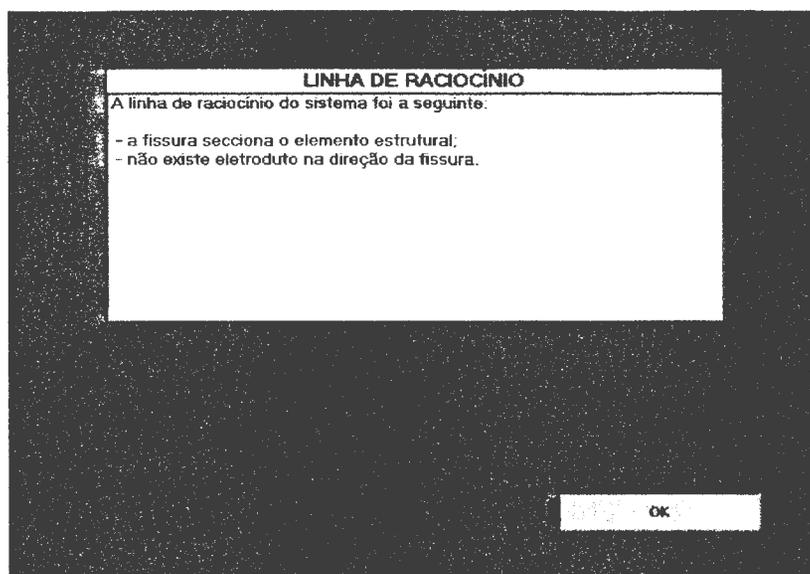


Figura 5.9 Linha de raciocínio fornecida pelo sistema EDIFICAR para a regra Laje I B

Para consultar textos abordando, de forma mais aprofundada, as causas apresentadas e os métodos preventivos mais indicados a cada caso (ver seção 5.4), o usuário deve acionar o botão "Mecanismos de Formação de Fissura" e o sistema apresenta uma lista com as causas dos diversos tipos de fissuras em CA, abordadas no sistema. A partir da seleção do assunto, o usuário obtém um texto contendo os principais mecanismos de formação das fissuras e, através de outro botão, denominado "Métodos preventivos", o usuário pode consultar outro texto contendo os principais cuidados que devem ser tomados no sentido de evitar, diminuir ou prevenir a ocorrência da fissuração.

As figuras 5.10 e 5.11 apresentam telas do EDIFICAR com textos que abordam os mecanismos de formação de fissuras causadas por retração térmica e os métodos que devem ser utilizados para prevenir este tipo de fissuras, respectivamente.

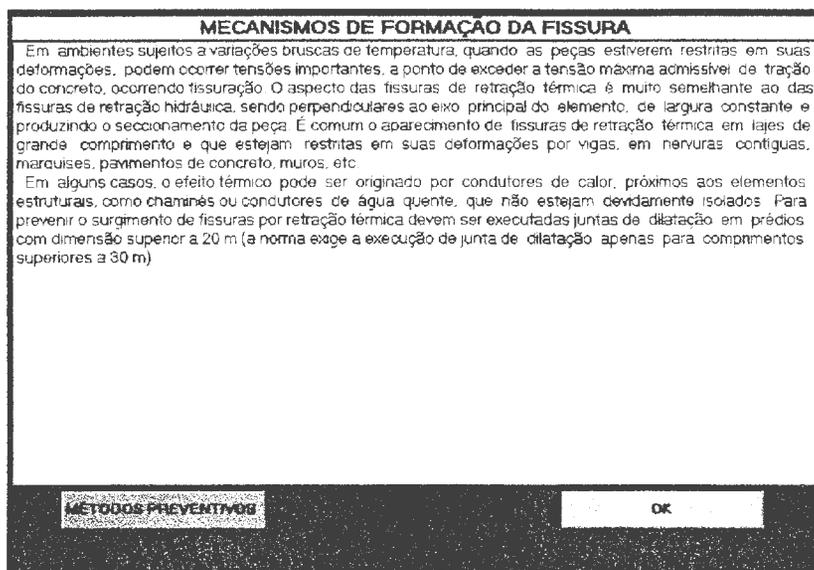


Figura 5.10 Tela contendo resumo para consulta, abordando o assunto retração térmica, no sistema EDIFICAR

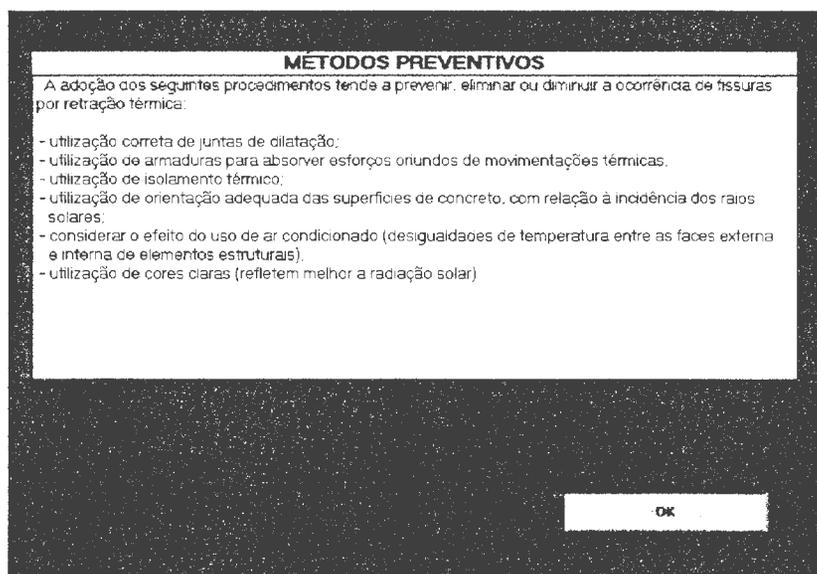


Figura 5.11 Tela contendo sugestões de medidas para prevenir problemas ligados à retração

Após obter a causa provável da fissuração, o usuário pode sair do sistema através do botão "Encerra Sessão", voltando ao ambiente *Windows*. Pode, também, consultar novamente o sistema através do botão "Nova Consulta", indo diretamente para a tela principal na qual deverá selecionar o novo assunto, sem precisar percorrer as telas iniciais do sistema.

6 VALIDAÇÃO DA APLICAÇÃO

6.1 Avaliação de SE

O processo de avaliação é de fundamental importância para que sejam obtidos SE com desempenho adequado.

A qualidade de um SE está intimamente ligada ao processo de avaliação realizado e a confiabilidade transmitida ao usuário depende do rigor com que este processo é desenvolvido (GUPTA, 1993).

Existem características básicas, relativas à qualidade de sistemas, que estão diretamente vinculadas a decisões ou restrições assumidas durante a etapa de projeto. Portanto, é importante identificar tais características e avaliar os efeitos das decisões de projeto, tendo em vista que o comportamento e desempenho de um sistema é determinado durante as diversas fases de seu desenvolvimento (BERRY & HART, 1990).

Normalmente, apesar de ser referida como validação de sistemas, a avaliação corresponde a uma tarefa muito mais ampla, cujo objetivo consiste em estimar o valor do sistema como um todo (O'KEEFE & BALCI, 1987).

A avaliação, assim como ocorre com a aquisição de conhecimento, é considerada um processo crucial no desenvolvimento de SE.

É bastante freqüente a avaliação de SE apenas nos estágios finais de seu desenvolvimento, sem a participação do usuário do sistema e com a utilização de métodos empregados de forma não rigorosa ou formal (BERRY & HART, 1990).

Um aspecto importante a ser considerado é o custo do processo de avaliação, que normalmente é elevado, devido ao grande consumo de tempo e esforço necessários. O custo envolvido pode ser controlado através do uso de métodos formais de validação, aplicados de forma integrada ao processo de desenvolvimento do sistema (O'KEEFE & BALCI, 1987).

Outro problema consiste na necessidade de desenvolvimento de critérios mensuráveis para a avaliação, fornecendo garantias de desempenho aos SE (GUPTA, 1993). Contudo, a utilização de testes ou uso de casos já resolvidos pode-se constituir em um bom meio de verificar o conhecimento adquirido e analisar o desempenho de SE, permitindo evidenciar seus aspectos positivos e deficiências, quando aplicados à resolução de problemas reais (CHOUICHA & SILLER, 1994).

Na seção 6.1.1, serão abordam-se as etapas de verificação e validação (V&V) de SE, identificando-se as principais diferenças entre estes dois conceitos.

6.1.1 Verificação e validação de SE

As etapas correspondentes à V & V são essenciais ao desenvolvimento de SE e devem ocorrer ao longo de toda a construção do sistema (SPRING et al., 1991). Um processo confiável de V & V tem sido reconhecido como fundamental na consolidação e aceitação da tecnologia utilizada em IA (CHAU & YANG, 1993).

Embora muitas vezes os termos V & V sejam empregados como sinônimos, possuem implicações diferentes na engenharia de *software* (GUPTA, 1993). LOCKWOOD & CHEN (1995) consideram que, em geral, a validação determina se o sistema certo foi construído e a verificação indica se o sistema foi construído certo.

Através da validação, é realizada uma comparação do modelo com o sistema. A validação refere-se à exatidão do modelo, enquanto que a verificação corresponde a uma tarefa mais específica, na qual se busca assegurar a consistência interna do sistema, em termos computacionais, além de verificar possíveis erros de sintaxe e lógica (O'KEEFE & BALCI., 1987).

Bases de conhecimento inexatas são consequência de um processo falho de aquisição de conhecimento, através do qual o conhecimento do especialista não foi capturado corretamente, enquanto que bases de conhecimento incompletas são obtidas quando não foi adquirido todo o conhecimento do especialista no domínio (LOCKWOOD & CHEN, 1995).

Genericamente, a base de regras deve fornecer as regras apropriadas para serem disparadas pelo mecanismo de inferência, ou seja, todas as regras criadas devem ter a mesma chance de serem utilizadas. No entanto, podem ocorrer anomalias e, através de processos de verificação, é possível identificar se existem regras redundantes, inconsistentes, inatingíveis, que são regras que nunca são disparadas, ou ciclos. Os ciclos promovem um tipo de "classe superior" de regras que são disparadas mais vezes do que deveriam, constituindo-se em uma espécie de "elite" e exigindo que outras regras, menos especializadas, não sejam utilizadas (LOCKWOOD & CHEN, 1995).

A validação objetiva assegurar se os requisitos funcionais e de desempenho foram obtidos (GUPTA, 1993), além de determinar se o sistema atende às necessidades dos usuários (LOCKWOOD & CHEN, 1995).

Para FORMOSO (1991), os objetivos específicos da fase de validação consistem em testar se o sistema alcançou um nível de raciocínio de qualidade ao final de seu desenvolvimento, além de indicar a necessidade de realização de melhorias identificando, também, aspectos da base de conhecimento que necessitam ser mais aprofundados através de pesquisas.

Os SE podem ser validados utilizando-se resultados previamente conhecidos sobre o problema, ou contra o desempenho do próprio especialista. Podem, também, ser utilizados casos já resolvidos por especialistas, dependendo do domínio. Nem sempre são disponíveis um número adequado de testes e a escolha dos mesmos tem grande influência no sucesso da validação. Os testes utilizados devem ser selecionados randomicamente, considerando-se os tipos de resultados fornecidos pelo sistema e evitando-se utilizar um excessivo número de casos padrão. Com relação ao número de casos, o importante é garantir a maior cobertura, ou seja, garantir que a amostra de casos seja significativa, refletindo adequadamente o domínio (O'KEEFE & BALCI, 1987).

Tipicamente, SE devem apresentar desempenho adequado nos estágios iniciais de seu desenvolvimento, embora o nível de aceitação possa ser diferente, dependendo do tipo de sistema. Assim, o desempenho de um protótipo de pesquisa é diferente daquele exigido para uma aplicação que envolva um certo grau de risco, por exemplo (O'KEEFE & BALCI, 1987).

Podem ocorrer influências durante o processo de validação, tanto do especialista do qual o conhecimento foi adquirido, como do próprio projetista do sistema. A utilização de especialistas externos, participando da avaliação sem distinguir entre os resultados fornecidos pelo especialista ou pelo sistema, bem como a utilização de testes estatísticos, podem minimizar o problema (O'KEEFE & BALCI, 1987). Também pode haver influências relativas aos especialistas envolvidos durante a validação, contra ou a favor dos resultados produzidos por sistemas computacionais. Este problema pode ser minimizado utilizando-se um processo de validação blindada, na qual o especialista não pode distinguir entre os resultados fornecidos pelo sistema ou pelos resultados de especialistas (FORMOSO, 1991).

A seguir, são apresentados alguns métodos recomendados e usualmente empregados em V & V.

6.1.2 Métodos utilizados na verificação e validação de SE

Dois importantes conceitos da engenharia de *software* são V & V (LOCKWOOD & CHEN, 1995). Neste sentido, a engenharia de conhecimento e a engenharia de *software* apresentam características semelhantes (BERRY & HART, 1990).

Embora as técnicas aplicadas na programação convencional sejam ricas e valiosas, não podem ser diretamente transferidas à V & V de SE (GUPTA, 1993). Os métodos utilizados para validar SE devem ser diferentes dos utilizados em sistemas convencionais, pois os problemas abordados em SE não podem ser modelados de uma forma predizível (SPRING et al., 1991). O mecanismo de resolução em um SE busca imitar o raciocínio de especialistas humanos, enquanto que na programação convencional busca-se capturar a rotina e a natureza altamente estruturada de processos decisórios (GUPTA, 1993).

Contudo, apesar dos métodos convencionais de V & V não serem totalmente apropriados para SE, algumas idéias têm sido exploradas, tais como a preparação de documentos contendo os requisitos básicos e as especificações do sistema antes de se iniciar sua construção, para determinar o que o sistema deve executar e permitir a adequada avaliação do mesmo.

Um grande número de métodos têm sido propostos e todos referem-se à fase de teste no final do ciclo de desenvolvimento de SE (GUPTA, 1993). Embora a etapa de testes seja muito intensa no final do desenvolvimento do sistema (GUPTA, 1993), a avaliação deve ser integrada a outras fases do desenvolvimento da base de conhecimento, como: especificação, aquisição de conhecimento, implementação e manutenção (PREECE, 1990).

Tipicamente, SE têm sido validados rodando-se casos e comparando-se os resultados fornecidos pelo sistema com as soluções obtidas pelo especialista. Posteriormente, EC calculam a porcentagem de acertos do sistema e usam julgamento subjetivo para analisar e explicar as falhas verificadas no sistema. Este método apresenta algumas limitações, pois a porcentagem obtida depende da escolha dos casos e a exatidão depende do número de casos utilizados. Quando o sistema é comparado com o especialista de quem o conhecimento foi adquirido, o processo de avaliação pode ter uma validade duvidosa (O'KEEFE & BALCI, 1987).

PREECE (1990) divide os métodos utilizados na avaliação de SE em métodos empíricos e lógicos. Os métodos empíricos, mais amplamente utilizados que os lógicos, derivam-se do uso experimental de SE em situações controladas, envolvendo a utilização de casos selecionados para testar o protótipo. Os resultados obtidos devem ser analisados, buscando-se avaliar sua

exatidão. A análise pode ser realizada comparando-se os resultados fornecidos pelo protótipo com as respostas de um especialista. PREECE (1990) menciona, ainda, que os métodos empíricos também podem ser utilizados para avaliar a aceitação do protótipo pelos usuários, em laboratórios ou no próprio local de trabalho. O usuário pode ser observado ao utilizar o sistema e pode ser questionado, buscando-se avaliar como se sente em relação aos resultados obtidos e quanto à interface.

Os métodos lógicos têm origem na lógica formal, podendo ser utilizados para determinar a consistência e completude de bases de regras, através de análises sintáticas e pela manipulação de regras como expressões lógicas. A base de regras de um SE é considerada consistente, somente se não existir possibilidade das regras declararem contradições após a introdução dos dados e é considerada completa, somente se abordar todas as possíveis situações que podem ocorrer no domínio. Muitos dos métodos lógicos podem ser automatizados através de ferramentas (PREECE, 1990).

O número de caminhos possíveis através de uma base de conhecimento pode ser um fator limitante, considerando-se o número de testes que devem ser feitos e, dependendo do tamanho da base de regras, a verificação manual não é viável (LOCKWOOD & CHEN, 1995).

De acordo com PREECE (1990), os métodos empíricos e os métodos lógicos são complementares, pois detectam diferentes tipos de problemas na base de conhecimento, devendo ambos ser utilizados no processo de avaliação de SE. Os métodos lógicos são adequados e eficientes na análise da consistência e completude de SE, cobrindo um maior número de problemas na base de conhecimento. São, portanto, mais indicados para a etapa de verificação do sistema e apresentam custos mais baixos de aplicação se comparados aos métodos empíricos, devendo ser utilizados desde os estágios iniciais de desenvolvimento do sistema. Os métodos empíricos são mais adequados à validação e realização de testes para avaliação da aceitação do sistema pelos usuários. Em comparação aos métodos lógicos, apresentam eficiência e cobertura menores, são mais caros, já que envolvem a participação de especialistas e/ou usuários e devem ser aplicados nos estágios finais da avaliação, após a realização da verificação através de métodos lógicos.

6.1.3 Validação da Interface com o usuário

Provavelmente, a maior causa da disparidade entre o grande número de SE bem sucedidos, desenvolvidos em laboratórios, e o pequeno número de SE que realmente são

utilizados para a resolução de problemas reais, consiste na falta de avaliação das necessidades dos usuários (BERRY & BROADBENT, 1987).

BERRY & HART (1990) salientam a importância da avaliação da usabilidade do sistema e de sua eficácia em organizações. A maior condição para o sucesso de um SE é a consideração de que será realmente utilizado pelo usuário em seu ambiente de trabalho e não apenas pelos seus projetistas. Sem um perfeito entendimento das necessidades e requisitos dos usuários, os projetistas do sistema não são capazes de desenvolver ferramentas com as potencialidades necessárias, resultando em sistemas de limitada utilidade (BERRY & BROADBENT, 1987).

Os usuários devem ser envolvidos durante o desenvolvimento do sistema e suas avaliações são muito importantes para determinar se o sistema produz resultados úteis, se apresenta fácil interação, se é eficiente, rápido e confiável (BERRY & HART, 1990).

Para BERRY & BROADBENT (1987), devem ser considerados alguns aspectos importantes na avaliação da interface com o usuário, como o controle do diálogo, que se refere ao modo com o qual o usuário interage com o sistema. A forma de diálogo existente nos SE não deve ser rígida e exaustiva, permitindo pouca flexibilidade durante a consulta. Muitas vezes, é necessário responder a um número excessivo de perguntas e algumas questões dirigidas ao usuário parecem ser irrelevantes. O projetista do sistema, ao desenvolver a interface, deve assegurar-se que o diálogo criado vai ao encontro das necessidades do usuário e atende às restrições impostas pela realização da tarefa.

Outro aspecto muito importante a considerar são as explicações disponíveis ao usuário. Uma boa capacidade de fornecer explicações assegura a usuários mais experientes que o conhecimento e processos de raciocínio inseridos no sistema são apropriados e permite, a usuários menos experientes, obter conhecimento sobre o domínio. A forma mais utilizada para fornecer explicações em SE consiste em realizar um rastreamento das regras que estão sendo usadas e responder a perguntas do tipo *why* e *how*. Embora este rastreamento seja extremamente útil para identificar possíveis falhas do sistema durante seu desenvolvimento, além de ilustrar certos aspectos do sistema durante a consulta, dificilmente fornece uma explicação aceitável para o usuário. Muitas vezes, quando o usuário utiliza o comando *why*, não está interessado em visualizar a regra que gerou o resultado, desejando saber porque o sistema chegou à conclusão fornecida. A justificativa do raciocínio do sistema é uma parte muito importante e deve estar inserida no conjunto de explicações disponíveis ao usuário. Existem sistemas que dispõem de textos prontos, antecipando possíveis perguntas de usuários durante a consulta, armazenados em linguagem natural, a fim de facilitar o processo de comunicação. Este

tipo de procedimento possibilita um maior entendimento em relação ao rastreamento de regras, principalmente a usuários menos experientes. Várias organizações recomendam a utilização das duas abordagens para possibilitar explicações aos usuários (BERRY & BROADBENT, 1987).

O desenvolvimento de aplicações com a utilização de ferramentas que apresentem interface em ambiente *windows* permite, também, vantagens consideráveis, conduzindo a uma interação mais eficiente e mais interessante ao usuário. A criação de sistemas dinâmicos, que possibilitem interação com outros aplicativos quando necessário, o uso de ferramentas gráficas e desenhos, além de explicações úteis e concisas, desde que adequadamente adaptados, são fatores que tendem a envolver o usuário, tornando a sessão de consulta menos tediosa.

De acordo com BERRY & HART (1990), após a consideração dos vários aspectos a serem abordados na avaliação da usabilidade do sistema, deve-se determinar quais os métodos a serem utilizados. Alguns métodos manipulam informações objetivas, outros abordam informações subjetivas, como entrevistas, questionários ou diários. Uma técnica de abordagem subjetiva, utilizada para a avaliação da aceitação de SE, consiste em aplicar questionários, o que pode consumir um tempo excessivo do usuário. Considerando-se que muito poucos SE são usados individualmente, também devem ser avaliados os efeitos que causam dentro de organizações, verificando-se como interferem na comunicação, integração e níveis de centralização e burocracia existentes.

6.2 Métodos utilizados no processo de avaliação do EDIFICAR

O processo de avaliação do EDIFICAR foi desenvolvido através de vários estágios e teve, como principal objetivo, avaliar os seguintes itens: (i) qualidade do sistema como ferramenta de apoio à decisão; (ii) qualidade da base de conhecimento modelada; (iii) qualidade do processo de interação usuário/sistema e (iv) eficiência do sistema, de um modo geral.

A base de conhecimento do EDIFICAR foi constantemente verificada, à medida em que o conhecimento foi sendo adquirido e durante a fase de implementação, buscando-se corrigir possíveis erros de sintaxe e lógica. O processo de validação da base de conhecimento foi realizado junto com os especialistas internos ao projeto, dos quais o conhecimento foi adquirido e objetivou comparar o sistema com o modelo.

Posteriormente, foi realizada uma fase mais formal de validação, dividida em duas etapas: (i) validação da base de conhecimento, rodando-se casos já resolvidos e (ii) análise do desempenho do protótipo por especialistas externos.

Nas seções 6.2.1 a 6.2.4 são descritos os métodos utilizados e os resultados obtidos, com maior nível de detalhes.

6.2.1 Validação Informal do protótipo

Após a construção das árvores de decisão (ver seção 3.3.2.2), o especialista A realizou a validação do modelo proposto, analisando cada árvore de decisão quanto à: (i) consistência, buscando verificar se o modelo proposto representava, adequadamente, o conhecimento utilizado durante a realização da tarefa; (ii) robustez, avaliando se todos os possíveis casos de fissuração em lajes, vigas, pilares e balanços de edificações correntes foram abordados pelo protótipo; (iii) adequação ao uso, verificando se a seqüência adotada para representar os passos utilizados durante a realização da tarefa, conduzia a resultados exatos e adequados às necessidades do usuário.

Depois de ouvir as críticas formuladas pelo especialista A, foram realizadas as correções necessárias, procurando-se obter o refinamento da base.

A possibilidade de existirem regras redundantes, conflitantes ou inatingíveis foi eliminada através: (i) da organização das regras em módulos, não estando dispostas aleatoriamente na base e (ii) da representação do modelo de conhecimento, possibilitando a implementação de cada regra diretamente dos “galhos” ou “braços” da árvore de decisão, admitindo-se somente um caminhamento possível, a partir da escolha do usuário.

Na etapa de aquisição detalhada de conhecimento, após a implementação, foi realizada a validação do modelo proposto, de modo mais aprofundado, com a participação do especialista B (ver seção 3.3.2.2).

O modelo foi novamente validado quanto à consistência, exatidão e robustez. Houve somente a necessidade de serem realizados pequenos ajustes, obtendo-se resultados bastante favoráveis.

6.2.2 Validação da base de conhecimento

Após o término de todas as modificações e ajustes efetuados no protótipo, foi iniciada a fase de validação formal. Para tanto, buscou-se obter o maior número de casos reais resolvidos por especialistas, a fim de rodá-los e avaliar o desempenho do protótipo.

Para validar a base de conhecimento, foram rodados casos reais, obtidos do acervo técnico da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC, correspondentes ao período

compreendido entre janeiro de 1990 e julho de 1996. A pesquisa foi realizada durante um período de 10 dias, com uma carga horária de 2 horas de trabalho por dia, realizando-se a análise e coleta de dados diretamente dos processos arquivados na CIENTEC.

O objetivo principal desta etapa da validação consistiu em realizar uma análise quantitativa do desempenho do protótipo, verificando-se o percentual de acertos para um dado número de casos.

De todos os casos pesquisados, muitos não foram aproveitados para a avaliação do desempenho do protótipo, devido às seguintes razões: (i) grande parte dos casos existentes estão relacionados à análise de outros tipos de problemas abordando, principalmente, patologias em alvenaria de tijolos; (ii) dos problemas relativos a estruturas de CA, muitos casos estão somente documentados nos processos, não sendo diagnosticados pelos especialistas.

O método utilizado para a obtenção dos casos consistiu em selecionar os processos relacionados com fissuração nos elementos estruturais de interesse ao trabalho. A partir de então, através das fotos existentes nos processos e, de acordo com as descrições contidas nos laudos, os problemas foram decompostos, considerando-se cada configuração de fissura como um caso específico. Os dados coletados foram tabulados e organizados por módulos, de acordo com o tipo de elemento estrutural.

A figura 6.1 apresenta os percentuais de casos validados por elemento estrutural.

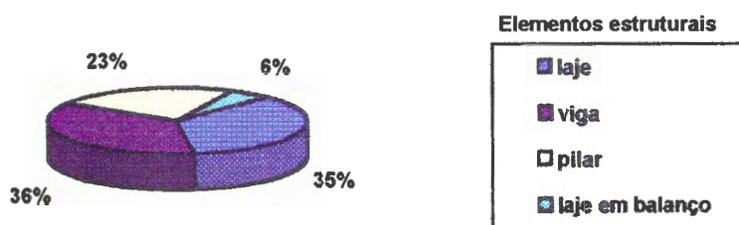


Figura 6.1 Percentuais correspondentes às configurações validadas, considerando-se os elementos estruturais abordados no protótipo

Como pode ser observado, foi obtido um maior número de casos relativos à fissuração em vigas (36%) e lajes (35%). Os casos de fissuração em pilares aparecem em menor percentual (23%), sendo obtidos poucos casos relativos à fissuração em lajes em balanço (6%).

Salienta-se que, do total de casos validados por elemento, nem todas as configurações de fissuras abordadas no sistema foram testadas, havendo uma nítida predominância de alguns tipos em relação aos demais.

As figuras 6.2 a 6.5 ilustram o processo de validação da base de conhecimento do protótipo, apresentando os percentuais relativos às diversas configurações validadas, considerando-se o total de 202 casos obtidos.

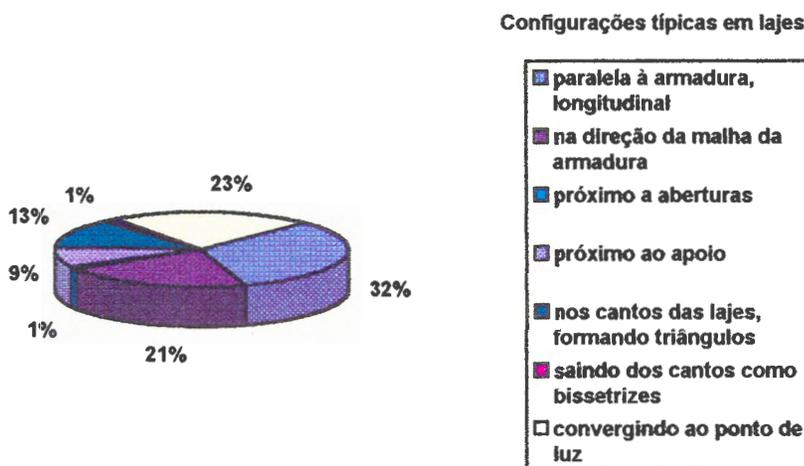


Figura 6.2 Percentuais correspondentes às configurações validadas em lajes

Como pode ser observado, o maior número de casos validados em lajes corresponde a fissuras paralelas à armadura (32%), seguido pelos casos de fissuras convergindo ao ponto de luz (23%) e, ainda, casos de fissuras acompanhando a malha da armadura (21%).

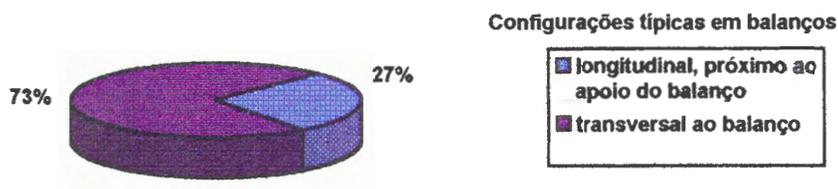


Figura 6.3 Percentuais correspondentes às configurações validadas em lajes em balanço

Em relação aos casos validados em balanços, foi obtido um maior número de casos de fissuras transversais (73%).

Como pode ser observado, a amostra obtida para lajes em balanço não é significativa, abordando apenas duas configurações de fissuras.

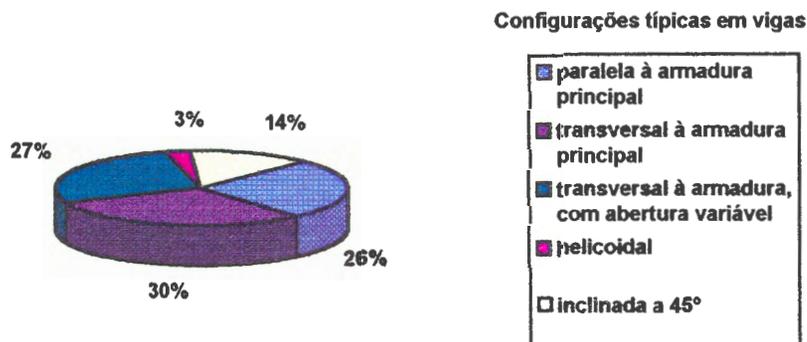


Figura 6.4 Percentuais correspondentes às configurações validadas em vigas

Em relação aos casos validados em vigas, as fissuras paralelas à armadura principal correspondem ao maior percentual (30%), seguidas por fissuras transversais à armadura principal (27%) e por fissuras transversais à armadura principal com abertura variável (26%).

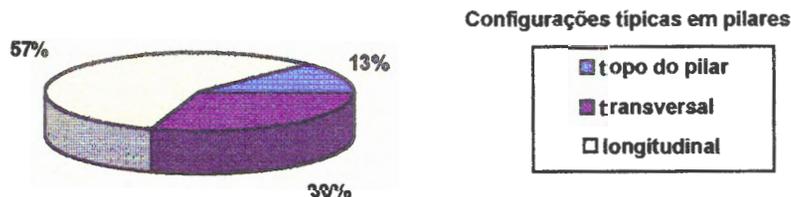


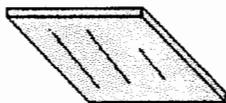
Figura 6.5 Percentuais correspondentes às configurações validadas em pilares

Em relação aos casos validados em pilares, foi obtido o maior número de casos de fissuras longitudinais (57%).

Os quadros 6.1 a 6.18, elaborados a partir dos dados coletados, apresentam o número de casos observados, o diagnóstico do especialista e o diagnóstico do EDIFICAR, identificando-se com "OK", quando o protótipo fornece a mesma conclusão que o especialista, e com "X", nos casos em que fornece uma conclusão diferente.

6.2.2.1 Validação de fissuras em lajes

a) Fissuras paralelas à armadura

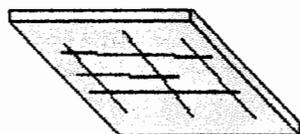


Quadro 6.1 Casos de lajes com fissuras paralelas à armadura

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
1	Falha de execução	Cobrimento insuficiente OK	Armadura exposta na face inferior da laje; falta de cobrimento; falhas de concretagem.
9	Cobrimento insuficiente/corrosão	Corrosão OK	Indícios de corrosão na face inferior da laje, provocados por cobrimento insuficiente.
3	Cobrimento insuficiente/corrosão	Cobrimento insuficiente OK	Presença de manchas claras (carbonatação); armadura exposta na face inferior da laje.
8	Corrosão	Corrosão OK	Fissuras ao longo da armadura na face inferior da laje; presença de manchas ferruginosas e manchas de umidade.
1	Retração	Retração térmica e/ou hidráulica OK	Fissura próximo à junta de dilatação do prédio
1	Sobrecarga	Falha uso/manutenção (sobrecarga) OK	Excessiva fissuração na face inferior; existência de jardim sobre a laje.

Total: 23 casos

b) Fissuras na direção da malha da armadura

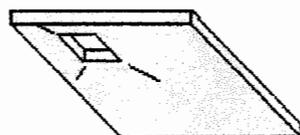


Quadro 6.2 Casos de lajes com fissuras na direção da armadura

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
5	Cobrimento insuficiente/corrosão	Cobrimento insuficiente OK	Armadura exposta na face inferior da laje; falta de cobrimento.
5	Cobrimento insuficiente	Cobrimento insuficiente OK	Armadura exposta na face inferior da laje; fissuras.
1	Cobrimento insuficiente/corrosão	Corrosão OK	Indícios de corrosão na face inferior da laje; cobrimento insuficiente.
3	Corrosão	Corrosão OK	Armaduras expostas e corroídas; manchas de corrosão
1	Falhas de execução	Cobrimento insuficiente OK	Armaduras expostas; ninhos de concretagem; excesso de agregado graúdo; concreto desagregado.

Total: 15 casos

c) Fissuras em torno de aberturas

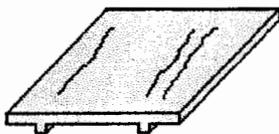


Quadro 6.3 Casos de fissuras em torno de aberturas em lajes

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
1	Tensões em torno da abertura	Tensões em torno da abertura OK	

Total: 1 caso

d) Fissuras próximas ao apoio, na face superior

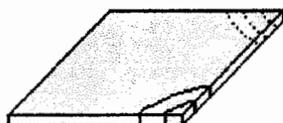


Quadro 6.4 Casos de fissuras próximas ao apoio, na face superior da laje

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
6	Falha de projeto	Falha de projeto OK	Inexistência de armadura negativa nos apoios; lajes concebidas como simplesmente apoiadas, na prática não funcionam como tal

Total: 6 casos

e) Fissuras nos cantos de lajes

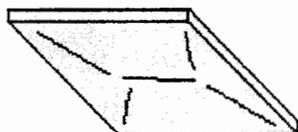


Quadro 6.5 Casos de fissuras nos cantos de lajes, formando triângulos

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
8	Comportamento deficiente do elemento frente aos esforços originados por momentos volventes	Momentos volventes ou expansão térmica da viga de apoio OK	Laje de forro apoiada em alvenaria.
1	Retração	Momentos volventes ou expansão térmica da viga de apoio OK	Posterior corrosão, com estalactites

Total: 9 casos

f) Fissuras saindo dos cantos como bisetritz, na face inferior

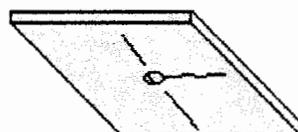


Quadro 6.6 Casos de fissuras saindo dos cantos de lajes, como bisetritz

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
1	Possível comportamento deficiente da laje frente aos esforços de flexão.	Fissura por flexão Falha de cálculo, execução ou sobrecarga. OK	Possível sobrecarga, embora não haja informações sobre o período de surgimento. Manifestação estabilizada.

Total: 1 caso

g) Fissuras convergindo ao ponto de luz

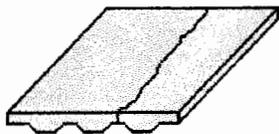


Quadro 6.7 Casos de fissuras na direção de eletrodutos

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
16	Eletroduto	Eletroduto OK	Fissuras convergindo ao ponto de luz

Total: 16 casos

h) Fissuras na parte delgada de lajes com espessura variável

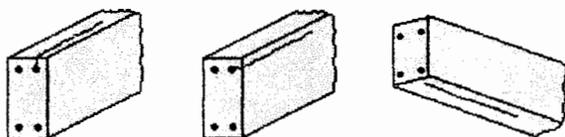


Não foi possível validar esta configuração por inexistência de casos.

Foram validados 71 casos de fissuras em lajes e o protótipo forneceu as mesmas conclusões que o especialista, para todos.

6.2.2.2 Validação de fissuras em vigas

a) Fissuras paralelas à armadura



Quadro 6.8 Casos de fissuras paralelas à armadura, em vigas

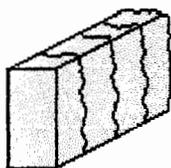
N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
3	Corrosão/cobrimento insuficiente	Corrosão OK	Armadura longitudinal exposta; alguns pontos com corrosão avançada; espaçamento mínimo dos estribos não segue recomendações da NBR-6118
3	Corrosão	Corrosão OK	Fissura na face inferior da viga; manchas de umidade e ferruginosas
1	Falha de concretagem	Cobrimento insuficiente OK	Exposição da armadura longitudinal na face inferior da viga
1	Cobrimento insuficiente/corrosão	Cobrimento insuficiente OK	Fissura horizontal ao longo da armadura, na face inferior, sem presença de manchas.
2	Cobrimento insuficiente, falha de execução, corrosão	Cobrimento insuficiente OK	Armadura longitudinal exposta, falhas de concretagem, presença de matéria orgânica no concreto.
2	Cobrimento insuficiente	Cobrimento insuficiente OK	Armadura longitudinal totalmente exposta.
7	Movimentação diferenciada entre a viga e alvenaria (retração)	X	Fissura horizontal na face lateral da viga.

Total: 19 casos

Dos 19 casos de fissuras paralelas à armadura em vigas, o protótipo forneceu uma conclusão diferente da indicada pelo especialista para 7 casos, correspondentes a fissuras horizontais causadas por movimentação diferenciada entre a viga e a alvenaria. Ao abordar o problema, durante o desenvolvimento do modelo, considerou-se que essas fissuras normalmente ocorrem na interface entre a viga e a alvenaria e não na própria viga, não sendo prevista esta possibilidade na base de conhecimento.

Após a validação, concluiu-se que a base de conhecimento do protótipo deveria ser ajustada.

b) Fissuras transversais à armadura



Quadro 6.9 Casos de fissuras transversais à armadura, em vigas

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
2	Falha de execução, cobrimento insuficiente, corrosão	Corrosão OK	Estribos aparentes e corroidos; falhas de concretagem
2	Retração	Retração térmica e/ou hidráulica OK	Fissura na face lateral da viga, desaparecendo na região próxima às armaduras longitudinais junto à face inferior
2	Corrosão	Corrosão OK	Estribos corroidos
2	Provável retração	Retração térmica e/ou hidráulica OK	Fissura correspondente à junta de dilatação entre dois blocos de edifícios
2	Retração hidráulica	Retração térmica e/ou hidráulica OK	Fissuras verticais na face lateral da viga
2	Falhas de execução, cobrimento insuficiente, corrosão	Cobrimento insuficiente OK	Armadura transversal exposta; falhas de concretagem; matéria orgânica no concreto.
2	Cobrimento insuficiente	Cobrimento insuficiente OK	Armadura transversal totalmente exposta.
5	Cobrimento insuficiente, corrosão avançada	Corrosão OK	Armadura transversal exposta e corroida na face lateral.
1	Causa associada a efeitos térmicos ou devido à ancoragem de canto entre as vigas	Retração térmica e/ou hidráulica OK	Fissura vertical no encontro de duas vigas de platibanda.
1	Falha na execução	Cobrimento insuficiente OK	Falhas de concretagem, estribos expostos, espaçados irregularmente.
1	Corrosão	Corrosão OK	Fissuras transversais na face inferior.

Total: 22 casos

c) Fissuras transversais com abertura variável

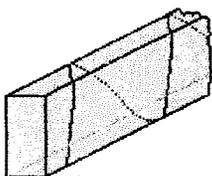


Quadro 6.10 Casos de fissuras transversais à armadura, com abertura variável

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
2	Possível fissura por flexão, mas aparentemente não ocorreu sobrecarga	Fissura por flexão Falha de projeto ou execução OK	Fissura localizada aproximadamente no centro do vão da viga. Provavelmente, não foi sobrecarga. Pelo aspecto da fissura, supõe-se que surgiu na época da construção do prédio.
16	Comportamento deficiente do elemento frente aos esforços originados por flexão Falha de projeto e/ou execução	Fissura por flexão Falha de projeto ou execução OK	Fissuras seccionando a viga, no meio do vão. Necessita-se mais esclarecimentos para indicar se é falha de projeto ou de execução
1	Comportamento deficiente do elemento frente aos esforços originados por flexão	Fissura por flexão Falha de projeto ou execução ou sobrecarga OK	Fissuras generalizadas nas duas faces laterais da viga, no meio do vão. Necessita-se mais esclarecimentos para indicar se a falha é de projeto, execução ou sobrecarga
1	Comportamento deficiente do elemento frente aos esforços originados por flexão	Fissura por flexão Falha de projeto, ou execução ou sobrecarga OK	Fissura transversal, com abertura mais pronunciada embaixo. Necessita-se mais esclarecimentos para indicar se a falha é de projeto, execução ou sobrecarga

Total: 20 casos

d) Fissuras helicoidais

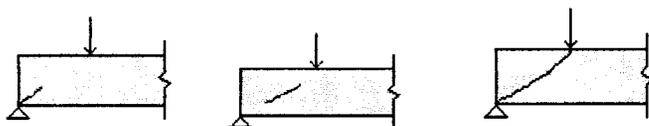


Quadro 6.11 Casos de fissuras helicoidais em vigas

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
2	Fissura por torção Falha de projeto ou execução	Fissura por torção Falha de projeto, ou execução, ou sobrecarga OK	Vigas com dimensões consideráveis: 35 x 100 cm e 45 x 100 cm com várias fissuras Reavaliar cálculo quanto à flexão e torção

Total : 2 casos

e) Fissuras inclinadas



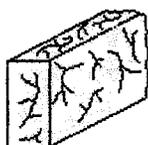
Quadro 6.12 Casos de fissuras inclinadas em vigas

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
1	Fissura por cisalhamento	Fissura por cisalhamento OK	Fissura a 45º, junto ao apoio
4	Fissura por cisalhamento	Fissura por cisalhamento Falha cálculo, execução, sobrecarga OK	Fissura a 45º, junto ao apoio (pilar)
1	Fissura por cisalhamento sobrecarga ou falha de execução	Fissura por cisalhamento Falha de execução ou sobrecarga OK	Fissuras inclinadas a 45º próximas ao apoio (pilar).
2	Movimentação diferenciada entre viga e alvenaria	Fissura por cisalhamento Falha de cálculo, execução ou sobrecarga ?	Viga executada diretamente sobre a alvenaria.
2	Fissura por cisalhamento Projeto e/ou execução	Fissura por cisalhamento OK	Fissura na face lateral, junto ao apoio.

Total: 10 casos

Dos 10 casos de fissuras inclinadas em vigas, o protótipo forneceu uma conclusão diferente da indicada pelo especialista para 2 casos. Ao consultar um dos especialistas internos ao projeto (especialista A) não houve consenso, decidindo-se não alterar a base de conhecimento do protótipo, até que sejam obtidos mais casos semelhantes para validar.

f) Fissuras mapeadas

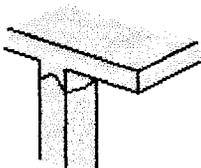


Não foi possível validar esta configuração por inexistência de casos.

Foram validados 73 casos de fissuras em vigas e o protótipo forneceu as mesmas conclusões que o especialista, para 64.

6.2.2.3 Validação de fissuras em pilares

a) Fissuras no topo de pilares

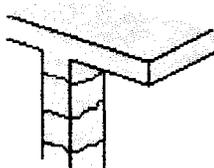


Quadro 6.13 Casos de fissuras no topo de pilares

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
3	Junta de concretagem	Assentamento plástico, junta de concretagem mal executada ou retração térmica e/ou hidráulica OK	Fissura no topo do pilar.
1	Provável descontinuidade na junta de concretagem do pilar	Assentamento plástico, junta de concretagem mal executada ou retração térmica e/ou hidráulica OK	Descontinuidade na concretagem do pilar
2	Falha de execução	Assentamento plástico, junta de concretagem mal executada ou retração térmica e/ou hidráulica OK	juntas de concretagem no pilar; falhas de concretagem

Total: 6 casos

b) Fissuras transversais

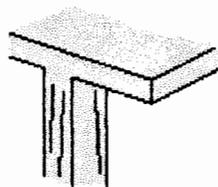


Quadro 6.14 Casos de fissuras transversais em pilares

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
1	Estribo exposto	Cobrimento insuficiente OK	Estribo exposto na junta de concretagem.
2	Corrosão, cobrimento insuficiente e falha de execução	Corrosão OK	Armaduras transversais expostas e corroídas.
5	Corrosão e cobrimento insuficiente	Corrosão OK	Fissuras na armadura transversal, com lascamentos no concreto.
4	Corrosão	Corrosão OK	Armadura trasversal exposta e corroída.
2	Cobrimento insuficiente	Cobrimento insuficiente OK	Armadura transversal exposta

Total : 14 casos

c) Fissuras longitudinais

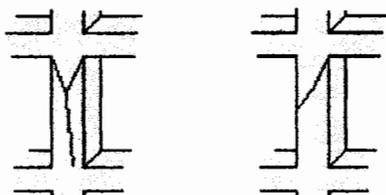


Quadro 6.15 Casos de fissuras longitudinais em pilares

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
21	Corrosão	Corrosão OK	Fissura longitudinal ao longo da armadura principal, com lascamento.
1	Falha de execução, corrosão	Corrosão OK	Corrosão
2	Corrosão, cobrimento insuficiente e falha de execução	Corrosão OK	Armadura longitudinal exposta e corroída; falhas de concretagem
2	Cobrimento insuficiente	Cobrimento insuficiente OK	Armadura principal exposta.
1	Corrosão	Corrosão OK	Fissura ao longo da armadura principal. Produtos de corrosão identificados através de escarificação do concreto.

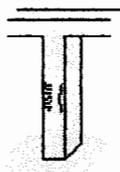
Total: 27 casos

d) Fissuras em pilares esbeltos



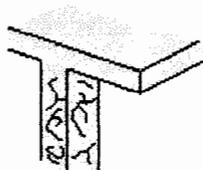
Não foi possível validar estas configurações por inexistência de casos.

e) Fissuras centrais em pilares esbeltos



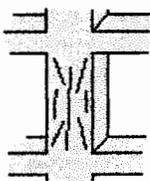
Não foi possível validar esta configuração por inexistência de casos.

f) Fissuras mapeadas



Não foi possível validar esta configuração por inexistência de casos.

g) Fissuras seguindo as isostáticas de primeira espécie

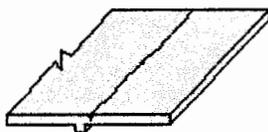


Não foi possível validar esta configuração por inexistência de casos.

Foram validados 47 casos de fissuras em pilares e o protótipo forneceu as mesmas conclusões que o especialista para todos.

6.2.2.4 Validação de fissuras em lajes em balanço

a) Fissuras longitudinais, próximas ao apoio

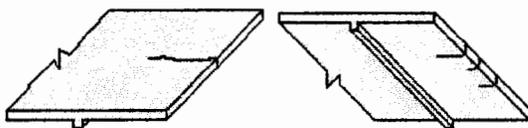


Quadro 6.16 Casos de fissuras longitudinais, próximas ao apoio de balanços

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
2	Provável início de colapso	Fissura por flexão. Falha de projeto, execução ou sobrecarga OK	Necessidade de maiores esclarecimentos para indicar a origem da fissuração por flexão
1	Falha de execução	Fissura por falha de execução OK	Verificou-se que a armadura negativa foi rebaixada, por má fixação durante a concretagem

Total: 3 casos

b) Fissuras transversais

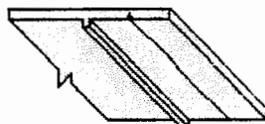


Quadro 6.17 Casos de fissuras transversais em balanços

N.º de casos	Diagnóstico do especialista	Diagnóstico do EDIFICAR	Observações
1	Cobrimento insuficiente	Cobrimento insuficiente OK	Armadura principal exposta.
2	Corrosão	Corrosão OK	Manchas de umidade; armadura negativa corroída
5	Movimentações térmicas	Retração térmica/ hidráulica OK	Fissuras transversais seccionando lajes de beirais.

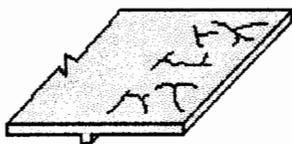
Total: 8 casos

c) Fissuras no meio do vão



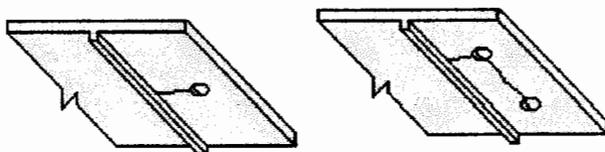
Não foi possível validar esta configuração por inexistência de casos.

d) Fissuras mapeadas



Não foi possível validar esta configuração por inexistência de casos.

e) Fissuras na direção do eletroduto



Não foi possível validar estas configurações por inexistência de casos.

Foram validados 11 casos de fissuras em balanços e o protótipo forneceu as mesmas conclusões que o especialista, para todos.

Foram validados 202 casos relativos às fissuras abordadas no estudo. O protótipo forneceu conclusões diferentes das indicadas pelo especialista em 9 casos, dos quais 7 correspondem a fissuras horizontais, causadas por movimentações diferenciadas entre a viga e a alvenaria e 2, a fissuras inclinadas em vigas, para os quais o protótipo indicou comportamento deficiente da viga frente aos esforços causados por cisalhamento e o especialista indicou que a causa do problema estava ligado a movimentações térmicas. Após a validação, a base de conhecimento do protótipo foi ajustada, de modo a abranger fissuras horizontais causadas por movimentações diferenciadas entre vigas e alvenaria. Quanto à outra situação de conflito, decidiu-se obter maiores subsídios, antes de alterar a base de conhecimento.

6.2.3 Análise dos resultados da validação da base de conhecimento

Para validar a base de conhecimento do protótipo, foram selecionados 202 casos de fissuras em lajes, vigas, pilares e balanços de edificações correntes. Não foi possível validar todas as regras integrantes da base de conhecimento, por inexistência de casos e, dentre as regras validadas, algumas não foram testadas suficientemente.

Contudo, considera-se que a amostra obtida expressa a realidade, na medida em que muitas configurações relatadas na literatura dificilmente são identificadas por especialistas, na prática.

Tendo em vista que, após os ajustes efetuados, o protótipo é capaz de resolver 200 casos da amostra e considerando-se que a situação conflitante ainda não pode ser identificada como falha do protótipo, pode-se concluir que existe uma forte indicação de que o modelo desenvolvido é capaz de representar, de forma eficaz, o domínio de conhecimento.

6.2.4 Demonstração do protótipo para especialistas externos

O principal objetivo de realizar a validação com especialistas externos (ver seção 6.1.1), consiste em avaliar o modelo construído, a interface com o usuário e o desempenho global do protótipo, evitando-se influências relativas aos especialistas envolvidos no projeto e do próprio projetista da aplicação.

Devido a limitações de tempo, não foi possível realizar um processo de validação formal com especialistas externos. Contudo, foram realizadas entrevistas com alguns especialistas de áreas correlacionadas com o domínio, com a finalidade de apresentar o protótipo, suas potencialidades de uso, além de se buscar uma familiarização do especialista com a tecnologia empregada no desenvolvimento de SE.

Nestas condições, o protótipo foi avaliado por um especialista em corrosão que, além de testar a linha de raciocínio relativa à resolução do problema, fez algumas sugestões interessantes com relação à base de conhecimento e à interface, possibilitando um aprimoramento maior do protótipo.

Posteriormente, o protótipo foi submetido à opinião de um especialista na área de tecnologia do concreto. O especialista avaliou o protótipo como uma ferramenta de grande potencial de uso, considerando viável a sua utilização no treinamento de profissionais ligados à área e de estudantes.

Por fim, o protótipo foi avaliado por especialistas em cálculo estrutural, que foram extremamente receptivos, demonstrando inclusive interesse em participar de um processo formalizado de validação, fornecendo casos para testar o modelo.

Não foi possível realizar um processo formal de validação junto a possíveis usuários, para avaliar alguns aspectos importantes relacionados à interface, devido a limitações de tempo. É interessante avaliar o envolvimento do usuário durante as consultas, verificando-se o seu modo de interação com o protótipo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral da pesquisa consistiu na modelagem do conhecimento existente e disponível sobre o diagnóstico de fissuras em CA, desenvolvendo-se um protótipo de SE capaz de auxiliar o usuário na resolução deste tipo de problema, além de contribuir para o aprimoramento de engenheiros e arquitetos não especialistas em patologia das edificações.

A pesquisa objetivou, também, oferecer contribuições à formação acadêmica na área, através do treinamento de estudantes e, ainda, buscou avaliar o emprego da engenharia de conhecimento na abordagem de problemas patológicos.

A hipótese que conduziu o desenvolvimento desta pesquisa estabeleceu que os SE podem ser utilizados como eficazes ferramentas de apoio à decisão, auxiliando os profissionais ligados à construção civil na resolução de problemas ligados ao diagnóstico da fissuração em CA, o que tende a diminuir a incidência de falhas e, conseqüentemente, trazer reflexos positivos na manutenção da qualidade das edificações, a médio e longo prazos.

A aplicação resultante pode ser considerada como um protótipo de SE, desenvolvido a nível experimental, denominado sistema EDIFICAR (sistema Especialista para o Diagnóstico de Fissuras em Concreto Armado). Como subproduto da pesquisa desenvolveu-se, também, o manual do usuário.

Para realizar a avaliação global do protótipo, apresentam-se os resultados parciais obtidos em cada uma das fases de desenvolvimento da aplicação, apontando as principais dificuldades verificadas.

7.1 Avaliação das fases de desenvolvimento do protótipo

7.1.1 Fase conceitual

Os objetivos principais da fase conceitual foram plenamente atingidos, ao serem estabelecidos os requisitos básicos do sistema, definindo-se o tipo de usuário, as funções do sistema e benefícios esperados com o seu desenvolvimento. Foram estabelecidos, também, os limites do domínio, determinando o nível de profundidade que o conhecimento deveria atingir, ao se realizar o processo de aquisição.

As definições estabelecidas na fase conceitual foram importantes também durante a fase de validação. Através da análise dos requisitos pré-estabelecidos, foi possível fundamentar o processo de validação, avaliando-se os resultados alcançados.

7.1.2 Fase de aquisição de conhecimento

Através da fase de aquisição de conhecimento, buscou-se adquirir o conhecimento existente e disponível no domínio, a fim de possibilitar a construção do modelo. Durante o processo de aquisição, foi possível contar com a colaboração efetiva dos especialistas, havendo clareza e transparência durante a transmissão do conhecimento necessário.

A utilização de dois especialistas durante a aquisição de conhecimento, atuando em duas etapas distintas (aquisição preliminar e aquisição detalhada), foi considerada uma boa estratégia. O conhecimento foi adquirido de um dos especialistas, em uma etapa inicial, sendo profundamente revisado pelo segundo especialista, posteriormente.

Ao realizar uma avaliação criteriosa dessa fase, concluiu-se que o número de horas de trabalho foi grande e o tempo total consumido durante o processo foi extremamente longo. Este fato pode ser explicado pela pouca disponibilidade de tempo dos especialistas, em função de seus inúmeros compromissos, havendo intervalos muito grandes entre as sessões de entrevistas.

Na realização de futuras pesquisas, devem ser avaliadas e experimentadas novas abordagens. A aplicação do raciocínio baseado em casos (ver seção 3.2) apresenta características vantajosas em relação ao raciocínio baseado em modelos e pode representar um considerável avanço com relação ao desenvolvimento de aplicações, facilitando os processos de aquisição de conhecimento e manutenção do sistema.

7.1.3 Fase de desenvolvimento do modelo

O processo de desenvolvimento do modelo exigiu grande esforço, sendo necessários vários ajustes até que a base de conhecimento representasse, de forma efetiva, o conhecimento dos especialistas. Buscou-se compatibilizar a seqüência das etapas utilizadas pelos especialistas, durante a realização da tarefa de diagnóstico, com as reais necessidades do usuário.

A representação intermediária do modelo no papel mostrou-se muito eficiente, servindo como documentação do processo de aquisição de conhecimento e importante meio de comunicação com os especialistas, além de possibilitar a implementação da base de conhecimento, no microcomputador.

Os dois especialistas que participaram do desenvolvimento do protótipo são profissionais extremamente competentes e atuantes na área de aplicação. A participação dos

especialistas foi de fundamental importância para garantir a necessária credibilidade ao protótipo.

Os resultados das fases de aquisição e modelagem de conhecimento podem ser avaliados através da análise dos resultados obtidos com a validação do protótipo, considerando-se os requisitos básicos estabelecidos inicialmente.

7.1.4 Fase de implementação do protótipo

A ferramenta computacional do tipo *shell* (Kappa 2.1) utilizada para a implementação do protótipo correspondeu às expectativas, apresentando uma série de recursos e facilidades para a adequada construção da base de conhecimento e da interface com o usuário.

Como foi mencionado na introdução deste estudo, a transparência é uma das características que diferenciam os SE de sistemas computacionais convencionais.

Este aspecto não foi negligenciado durante a construção da interface, fornecendo-se, ao usuário, textos contendo a linha de raciocínio utilizada na resolução do problema, além de explicações e definições sobre o assunto. A criação da interface exigiu um consumo considerável de tempo, tendo em vista que foram elaborados cerca de 250 textos para consulta. No entanto, considerou-se este recurso muito importante, contribuindo para a aceitação do sistema EDIFICAR como uma ferramenta eficiente no aperfeiçoamento técnico de profissionais e treinamento de estudantes.

Os recursos utilizados na construção da interface com o usuário são relativamente simples, salientando-se que novas versões podem ser desenvolvidas, fornecendo-se outras opções de auxílio, tais como: bancos de fotos, interface com outros aplicativos (principalmente na área de verificação estrutural), possibilidade de consulta a normas técnicas, métodos de ensaio, entre outras.

Também podem ser utilizadas funções que permitam armazenar os resultados das consultas, com a finalidade de possibilitar análises estatísticas quanto à ocorrência dos diversos tipos de fissuras e quanto às causas mais frequentes, retro-alimentando o estudo da patologia das edificações.

7.1.5 Fase de validação

Durante o processo de validação foram verificadas algumas dificuldades com relação à disponibilidade de casos. A amostra utilizada não contemplou várias configurações típicas e alguns casos foram pouco testados.

Após serem realizados alguns ajustes na base de conhecimento, o protótipo aumentou o índice de acertos. Dos 202 casos testados, são verificadas divergências em apenas 2 casos que ainda não podem ser indicativos de falha do protótipo. Deve ser rodado um maior número de casos análogos, permitindo indicar a necessidade de alterações na base de conhecimento do protótipo.

Embora não seja objetivo da pesquisa discutir a ocorrência dos diversos tipos de fissuras em CA atendidos pela CIENTEC, no período de 1990 a 1996, foi possível concluir que algumas configurações típicas predominam sobre as demais.

Dos 202 casos validados, 53% estão relacionados à corrosão e ao cobrimento insuficiente da armadura e, para estas situações, pode-se admitir que o desempenho do protótipo é satisfatório, pois o índice de acertos é de 100%.

O protótipo também foi avaliado por especialistas externos, buscando-se obter uma avaliação qualitativa do modelo desenvolvido, da interface com o usuário e do potencial de uso do sistema na resolução de problemas do domínio.

Os resultados desta avaliação externa foram animadores e os especialistas foram unânimes em ressaltar a potencialidade de utilização do sistema como ferramenta de apoio à decisão. Houve boa receptividade e alguns especialistas colocaram-se à disposição para testar mais profundamente o modelo e avaliar o desempenho do protótipo.

O protótipo deve estar disponível para testes, por um período suficiente de tempo, prosseguindo-se a validação externa.

Devido à limitação de tempo, o processo de validação da interface assumiu um caráter menos formal, restringindo-se a obter a opinião do usuário quanto ao potencial de uso do sistema. Apesar de existirem fortes indícios da aceitação do sistema como ferramenta de apoio à decisão, há necessidade de se verificar a interação do usuário com o protótipo, avaliando o seu envolvimento durante a consulta.

O protótipo encontra-se em fase experimental não se constituindo, ainda, em um sistema de trabalho. Segundo a escala de Brandon (1993), poderia ser definido como um *sistema produzindo resultados* e, para que possa atingir melhores classificações, como *sistema em uso*, deve-se intensificar o processo de validação (BRANDON, 1993, apud OLIVEIRA, 1994).

7.2 Conclusões finais

É indiscutível que a incidência de problemas patológicos está direta ou indiretamente ligada à qualidade de cada uma das etapas do processo construtivo e que a adoção de medidas que busquem prevenir tais problemas deve considerar um controle adequado de qualidade das atividades relacionadas com a construção civil.

A engenharia de conhecimento, ao pesquisar técnicas e processos que permitam desenvolver sistemas capazes de auxiliar na resolução de problemas, realizando tarefas habitualmente desenvolvidas por especialistas, através de sua inteligência e conhecimento, pode oferecer contribuições valiosas ao estudo dos problemas patológicos.

Consideram-se atingidos os objetivos propostos para a pesquisa, visto que o protótipo mostrou-se eficiente na resolução de uma amostra significativa de casos e, de uma forma geral, obteve uma boa avaliação por parte de especialistas ligados à área.

O sistema EDIFICAR pode ser utilizado como ferramenta auxiliar em tarefas de diagnóstico de fissuras em CA. Não se pretende substituir a atuação de um especialista, mas busca-se contribuir para o aprimoramento técnico e treinamento dos usuários e, de uma forma indireta, influir positivamente na prevenção de problemas ligados à fissuração do CA.

7.3 Sugestões para novos trabalhos

Considerando-se (i) as facilidades disponíveis na ferramenta computacional utilizada; (ii) a disponibilidade de especialistas na área de patologia das edificações e (iii) o potencial de uso de SE para o desenvolvimento de aplicações em engenharia civil, são apresentadas algumas sugestões para continuidade do estudo:

- Ampliação dos módulos de consulta do sistema EDIFICAR, podendo-se abordar fissuração em alvenaria ou em outros elementos de CA, como por exemplo: reservatórios, muros, pontes, entre outros;
- Modelagem do conhecimento na área de recuperação de estruturas de CA;
- Utilização de novas abordagens, como CBR (Case Based Reasoning) para diagnóstico da fissuração em CA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEL, M. *Introdução aos sistemas especialistas*. Porto Alegre: Instituto de Informática da UFRGS, 1993.
- ABEL, M. et al. Avaliação dos métodos de aquisição de conhecimento no Projeto Geoexpert. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE INFORMÁTICA, 18., 1992, Las Palmas de Gran Canaria. *Actas...* Las Palmas de Gran Canaria, 1992. p. 9-16.
- ALLEN, R. H. Knowledge representation: an engineering overview. In: ALLEN, R. H. (Ed.) *Expert systems for civil engineers: knowledge representation*. New York: ASCE, 1992, p. 1-14.
- ALONSO, F. et al. Knowledge engineering versus software engineering. *Data & Knowledge Engineering*, Amsterdam, v. 5, p. 79-91, 1990.
- ALTY, J. L. Expert system building tools. In: GUIDA, G.; TASSO, C. (Ed.) *Topics on expert systems design*. Amsterdam: Elsevier Science, 1989, p. 181-204.
- ALWOOD, R. J. *Techniques and applications of expert systems in the construction industry*. Chichester: Ellis Horwood, 1989.
- ARANHA, P. M. S. *Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica*. Porto Alegre, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGEC/UFRGS.
- ASCE - American Society of Civil Engineers *Guidelines of Failure Investigation* Task Committee on Guidelines for Failures Investigations of the Technical Council on Forensic Engineering. ASCE, 1989.
- BERRY, D.; BROADBENT, D. E. Expert systems and the man-machine interface. Part two: the user interface, *Expert Systems*, v.4, n.1, p. 18 - 27, february 1987.
- BERRY, D. C.; HART, A. E. Evaluating expert systems. *Expert Systems*, v. 7, n. 4, p. 199 -207, nov. 1990.

- BOURDEAU, L. et al. Computer aided system for breakdown diagnoses and repairing assistance of HVAC components. In: FINNISH FRENCH COLLOQUIUM FOR INFORMATION TECHNOLOGY IN CONSTRUCTION, 2., 1990, *Proceedings...* Pekka Huovila, 1990, p.14-15.
- BRANDON, P. S. et al. Expert systems: the strategic planning of construction projects. In: THE ROYAL INSTITUTION OF CHARTERED SURVEYORS. *RICS/ALVEY research for chartered quantity surveyors*. London, 1988.
- BRANDON, P. S. Knowledge based systems: markets and methodologies. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ECONOMIC EVALUATION AND THE BUILDING ENVIRONMENT, 1993, Lisbon. *Proceedings...* Lisbon: Keynote Papers, 1993. v.6, p.11-27.
- BRATKO, I. Fast prototyping of expert systems using prolog. In: GUIDA, G.; TASSO, C. (Ed.) *Topics on expert systems design*. Amsterdam: Elsevier Science, 1989, p.69-86.
- BREUKER, J.; WIELINGA, B. Models of expertise in knowledge acquisition. In: GUIDA, G.; TASSO, C. (Ed.) *Topics on expert systems design*. Amsterdam: Elsevier Science, 1989, , p. 265-295.
- CAMPBELL-ALLEN, D.; ROPER, H. *Concrete structures: materials: maintenance and repair*. New York: Longman Scientific & Technical, 1991.
- CÁNOVAS, M. F. *Patología y terapeutica del hormigon armado*. Madrid: Dossat, 1977.
- CHAU, K. W.; YANG, W. An integrated expert system for fluvial hydrodynamics. *Advances in Engineering Software*, v. 17, n. 3, p. 165-172, 1993.
- CHOUICHA, M. A.; SILLER, T. J. An expert suestem approach to liquefaction analysis Part I: developepment and implementation. *Computers and Geotechnics*, v. 16, n. 1, 1994.
- CLANCEY, W. J. Viewing knowledge bases as qualitative models. *IEEE Transactions on Computers*, New York, p. 9-23, Summer 1989.
- COHN, L. F. et al. Knowledge acquisition for domain experts. *Journal of Computing in Civil Engineering*, New York, ASCE, v. 2, n. 4, p. 107-120, Apr. 1988.

- DAL MOLIN, D. C. C. *Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGEC/UFRGS,
- DAL MOLIN, D. C. C.; CAMPAGNOLO, J. L. A importância do controle de qualidade e seu papel na prevenção de patologias em marquises. In: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES - PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO, 1993, Porto Alegre, *Anais...* Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p. 33-51.
- DE LA GARZA, J.; IBBS, C.W. Knowledge elicitation study in construction scheduling domain. *Journal of Computing in Civil Engineering*, New York, ASCE, v. 2, n. 4, p. 135-153, Apr. 1990.
- DHAWAN, S. C. et al. Knowledge processing efficiency of expert system in structural design, *Computers & Structures*, v. 41, n. 3 p. 531-545, 1991.
- DIEDERICH, J.; LINSTER, M. Knowledge based knowledge elicitation. In: GUIDA, G.; TASSO, C. (Ed.) *Topics on expert systems design*. Amsterdam: Elsevier Science, 1989, p. 323-350.
- DUCE, D.; RINGLAND, G. Background and introduction. In: RINGLAND, G.; DUCE, D. (Ed.) *Approachs to knowledge representation: an introduction*, 1988. p. 1-11.
- DYM, C. L.; LEVITT, R. E. *Knowledge-based systems in engineering*. New York: McGraw-Hill, 1991.
- ELDRIDGE, H. J. *Construcción, defectos comunes*. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.
- FERRADA, J. J.; HOLMES, J. M. Developing expert systems. *Chemical Engineering Progress*, New York, v. 86, n. 4, Abr. 1990.
- FIGUEIREDO, E. et al. *Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto*. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1993. 22 p. (BT/PCC/129).
- FIGUEIREDO, E. Concreto com armaduras corroídas: avaliação de reparos através de técnicas eletroquímicas (Rp). In: SEMINÁRIO SOBRE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, Porto Alegre, 1993. *Anais...* Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1993, p. 34-48.

- FIKES, R.; KEHLER, T. The role of frame-based representation in reasoning. *Communications of the ACM*, New York, v. 28, n. 9, p. 904-920, 1985.
- FORMOSO, C. T. *A knowledge based framework for planning house building projects*. Salford, 1991. Tese (Doutorado), Department of Quantity and Building Surveying, University of Salford,.
- GARRET, J. H.; MAHER, M. L. Knowledge-based systems in design and planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, v. 4, n. 4, p. 1-3, Oct. 1990.
- GIARRATANO, J.; RILEY, G. *Expert systems*. principles and programming. Boston: PWS Kent, 1989.
- GIORNO, F. A. C. et al. Methods and techniques for knowledge elicitation. In: *Technical Report*, Rio Scientific Center, IBM Brasil, Rio de Janeiro, Dec. 1988.
- GUAZZELLI, A.; LEÃO B. Incorporating semantics to ART. In: International Conference on Neural Networks, 1994, Orlando. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 1994. v. 3, p. 1726-1731.
- GUIDA, G.; TASSO, C. Building expert systems: from life cycle to development methodology. In: GUIDA, G.; TASSO, C. (Ed.) *Topics in expert system design*. Amsterdam: Elsevier Science., 1989, p.3-24.
- GUPTA, U. G. Validation and verification of knowledge-based systems: a survey, *Journal of Applied Intelligence*, n.3, p. 343-363, 1993.
- GURU MANUAL - *GURU version 2.0*, Micro Data Based Systems, 1989.
- HABERMANN, A. N. Engineering large knowledge-based systems, *Data & Knowledge Engineering*, v. 5, p. 105-117, 1990.
- HARMON, P.; KING, D. *Expert systems*. artificial intelligence in business. New York: John Willey, 1985.
- HART, A. Knowledge elicitation: issues and methods. *Computer Aided-Design*, v. 17, n. 9, Nov. 1985.
- HART, A. *Knowledge acquisition for expert systems*. London: Kogan Page, 1986.

- HELENE, P. R. L. Corrosão de armaduras para concreto armado. *A Construção- Região Sul*, n. 201, jul. 1985.
- IOSHIMOTO, E. Incidência de manifestações patológicas em edificações habitacionais. In: *Tecnologia de Edificações*. São Paulo: PINI: IPT, 1988, p. 545-548.
- JOHNSON, S. M. *Deterioro, conservación y reparación de estructuras*. Madrid: Blume, 1973.
- KAHN, G. S; BAUER, M. Prototyping tools and motivations. In: GUIDA, G.; TASSO, C. (Ed.) *Topics in expert system design*. Amsterdam: Elsevier Science., 1989, p.47-68.
- KALYANASUNDARAM, P. et al. REPCON: expert system for building repairs. *Journal of Computing in Civil Engineering*, New York, ASCE, v. 4, n. 2, p. 84-101, Apr. 1990.
- KAPPA MANUAL - *KAPPA version 2.1*, IntelliCorp, Inc., 1992.
- KARTAM, N. A. et al. Extending artificial intelligence techniques for hierarchical planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, New York, ASCE, v. 5, n. 4, p. 464 - 477, Oct. 1991.
- KASMIERCKZACK, C.; HELENE, P.R.L. Estimativa e determinação da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto. In: SEMINÁRIO SOBRE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1993, p. 49-61.
- KIDD, A.; WELBANK, M. Knowledge acquisition. In: FOX, J. *Expert system* Berkshire: Pergamon Infotech 1984, p. 71-80. (State of the art report, 7).
- LEÃO, B.; ROCHA, A. F. Proposed methodology for knowledge acquisition: a study on congenital heart disease diagnosis, *Methods of Information in Medicine*, n. 29, p. 30-40, 1990.
- LEÃO, B. et al. *Hybrid systems: promising solution to better decision support tools*. Trabalho apresentado na World Conference on Medical Informatics, 1995.
- LOCKWOOD, S.; Chen, Z. Knowledge validation of engineering expert systems. *Advances in Engineering Software*, n. 23, p. 97-104, 1995.

- LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. *Construções de concreto*. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. v. 3
- MEDSKER, L. et al. Knowledge acquisition and the expert system life cycle, *IEEE Transactions on Computers*, New York, 1990.
- MEHTA, P. K. Durability of concrete - Fifty years of progress? In: SEMINÁRIO SOBRE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1993. Anexo.
- MENDONÇA, E. A. et al. HYCONES II: uma ferramenta para a construção de sistemas especialistas conexionistas híbridos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA EM SAÚDE, 1994, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: H.Clínicas/UFRGS, 1994. v. 2, p. 163-167.
- MERRIT, D. Deceptive user interfaces impede AI. *AI Expert*, p.19-23, Aug. 1994.
- MITTAL, S.; DYM, C. L. Knowledge acquisition from multiple experts. *The AI Magazine*, San Francisco, Ca, v. 6, n. 2, p. 32-36, Summer 1985.
- MOTTA, E. et al. *Knowledge acquisition as a process of model refinement*. Milton Keynes: The Open University, 1989. 30 p. (HCRL Technical Report n. 40).
- MURLIDHARAN, T. L. et al. Expert tower analysis and design system.I: architecture and heuristics, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, v. 5, n.2, p. 175-192, Apr. 1991.
- NARAZAKI, H. et al. An AI tool and its applications to diagnosis problems. *Journal ISIJ International*, v.30, n.2, p. 98-104, 1990.
- NORONHA, M. A. A. Considerações sobre a durabilidade do concreto. *A Construção-Região Sul*, n. 193, nov. 1984.
- O'KEEFE, R. M.; BALCI, O. Validating expert system performance, *IEEE Transactions on Computers*, New York, p. 81 - 90, Winter 1987.
- ORTOLANO, L. et al. Expert system for sewer network maintenance: validation issues. *Journal of Computing in Civil Engineering*, New York, ASCE, v. 4, n. 1, p.37- 54, Jan. 1990.

- PASTORELLO, M. A. *Sistemas baseados em conhecimento: formas de representação de conhecimento, sistemas especialistas e paradigmas de inferência*. Porto Alegre: PGCC/UFRGS, 1991, (Caderno Técnico).
- PREECE, A. D. Towards a methodology for evaluating expert systems. *Expert Systems*, v. 7, n. 4, Nov. 1990.
- PRERAU, D. S. Choosing an expert system domain. In: GUIDA, G.; TASSO, C. (Ed.) *Topics in expert system design*. Amsterdam: Elsevier Science, 1989, p. 27-43.
- PRICE, C.; HUNT, J. Using qualitative reasoning to build diagnostic expert systems. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE OF THE BRITISH COMPUTER SOCIETY, 9., 1989, London. *Proceedings...* London: Nigel Shadbolt, 1989. p. 12-23.
- PRUDÊNCIO, L. Durabilidade do concreto frente ao ataque de cloretos e sulfatos. In: SEMINÁRIO SOBRE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1993, p. 1-12.
- RAMAMOORTHY, C.V. Object-oriented systems, *IEEE Transactions on Computers*, New York, p. 9-15, Fall 1988.
- RANSOM, W. H. *Building failures: diagnosis and avoidance*, Cambridge: SPON, 1987.
- RICHARDSON, B. A. *Defects and deterioration in buildings*, Cambridge: SPON, 1991.
- ROGERS, J. L. Knowledge-based tool for decomposing complex design problems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, New York, ASCE, v. 4, n. 4, p. 298 - 312, Oct. 1990.
- ROSS, T. J. et al. DAPS: expert system for structural damage assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 4, n. 4, p. 327- 348, Oct. 1990.
- SLAGLE, J. R.; WICK, M. R. A method for evaluating candidate. *AI Magazine*, p. 45-53, Winter 1988.
- SLATTER, P. E. *Building expert systems: cognitive emulation*. Chinchester: Ellis Horwood, 1987.
- SOH, C. K.; SOH, A.K. High fidelity knowledge systems. *Advances in Engineering Software*, v. 18, p. 15-29, 1993.

- SOUZA, R. Avaliação de desempenho aplicada a novos componentes e sistemas construtivos para a habitação. *A Construção-Região Sul*, n. 180, out. 1983.
- SPRING, G. et al. Testing, verification, and validation of expert systems, *Journal of Transportation Engineering*, v. 117, n. 3, p. 350 - 360, May/June 1991.
- STOCKLEY, J. E. Knowledge acquisition for expert systems. In: BRANDON, P. S. (Ed.) *Building cost modelling and computers*. London, 1987, p. 447-480.
- SZYSZKO, S. *Using expert systems for non-destructive testing and technical diagnostics*, Manchester, University of Manchester Institute of Science and Technology, Department of Instrumentation and Analytical Science, 1987. (Research Report).
- TERRY, P. C. Expert systems: manager's perspective. *Journal of Management in Engineering*, v. 7, n.1, p. 119-131, Jan. 1991.
- THOMAZ, E. *Trincas em Edificações*. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1980.
- THOMAZ, E. *Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação*. São Paulo, 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da USP.
- YEH, Y. C. et al. Expert system for diagnosing damage of prestressed concrete pile. *Journal of Construction Engineering and Manager*, v. 117, n. 1, p. 13-26, 1991.
- YOUNG, R. M. Role of intermediate representations in knowledge elicitation. In: (Ed.) *Research and development in expert systems IV*. Journal of Cambridge University, 285-296. (British Computer Society Workshop Series), 1989.
- YUEN, H. K. RICHARDS, T. Knowledge engineering meets qualitative methodology. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, 10., 1993, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação: Instituto de Informática da UFRGS, 1993. p. 197 a 209.
- WATSON, I et al. A knowledge analysis methodology using a intermediate knowledge representation based on conceptual graphs. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON EXPERT SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS, 9., 1989, Avignon. *Proceedings...* Avignon, 1989. v. 1, p. 183-198.
- WATSON, I et al. *The client-centred approach: developing expert systems for the construction industry*. Final report of the research project supported by The Royal

Institution of Chartered Surveyors, the Department of Trade and Industry and the Science and Engineering Research Council. Salford: University of Salford, 1994.

WATSON, I; MARIR, F. Case-based reasoning: a review. *The Knowledge Engineering Review*, v. 9, n. 4, p. 327-354, 1994.