



Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto
Abril / 2006 ISBN 85-86686-36-0
Monitoração e Manutenção de Estruturas Existentes
Trabalho SIMP0221 - p. 1466-1476

Manutenção Centrada na Confiabilidade de Edificações

Reliability-Centered Maintenance of Buildings

Carlos W. Pires Sobrinho (1); Iony P. Siqueira (2)

(1) *Título do Autor, Universidade/Empresa*
email: (1) MsC, POLI / Instituto de Tecnologia de Pernambuco
email: carlos@itep.br

(2) MsC, UNIBRATEC/Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
email: iony@tecnix.com.br

Endereço para correspondência

(1) Rua Ministro Nelson Hungria 159, apto 1203, Boa Viagem, Recife, PE, Brasil, 51020-100

(2) Rua José Nunes da Cunha, 5336, Apto 701ª, Candeias, Jaboatão, PE, Brasil, 54440-030

Resumo

Constitui objetivo deste trabalho apresentar a aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade na definição de planos de manutenção de edificações, condizentes com padrões e requisitos preconizados nas normas nacionais e internacionais. Com base na consequência das falhas (ambientais, de segurança, funcionais e econômicas) a metodologia propõe, através de uma lógica estruturada, as tarefas mais aplicáveis e efetivas para combater cada modo de falha, entre serviços de rotina, inspeções preventivas, ensaios funcionais e de caracterização de patologias, restaurações, substituições, reforços e reprojatos em edificações..

Palavras-Chave: *Manutenção Centrada na Confiabilidade, MCC, RCM*

Abstract

This paper aims to present the application of Reliability-Centered Maintenance to define maintenance plans for buildings, obeying requirements established by national and international standards. Based on failure consequences (on environment, security, functionality and economy), the methodology suggests, through a structured logic, the tasks most applicable and effective to combat each failure mode, among operating services, preventive inspections, functional inspections and pathology identification, restoration, substitution, refurbishment and buildings redesign.

Keywords: *Reliability-Centered Maintenance, RCM.*

1 Introdução

1.1 Problema Analisado

1.1.1 Histórico

Os casos recentes de desmoronamentos de edificações residenciais têm despertado o interesse de engenheiros e legisladores, considerando suas conseqüências humanas e econômicas para a sociedade. Mesmo quando não há fatalidades envolvidas, os danos econômicos são impositivos, comprometendo investimentos familiares vitais ou quando não, submetendo os moradores a conviverem com risco de acidente permanente. A causa da degradação das edificações está associada á falta de um plano eficiente de manutenção, ou sua execução por leigos que, por não sanarem os problemas críticos, podem encobrir e/ou agravar a degradação da estrutura. A correta elaboração de um plano de manutenção, em especial nas partes estruturais e de revestimento, exige a conjunção de tecnologias da engenharia civil e da engenharia de manutenção.

Entre as tecnologias contemporâneas de manutenção, a MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) tem expandido sua aplicação a praticamente todos os setores industriais. Originária da indústria aeronáutica americana, é hoje aplicada em muitos outros setores da economia, inclusive o terciário e de serviços. O setor da construção civil merece atenção especial, principalmente o segmento das edificações residenciais, que ficam órfãs de profissionais responsáveis pela manutenção e os “manuais” de manutenção e conservação são mal estruturados com relação a processos de análise e decisão, para escolha das atividades de manutenção.

Constitui objetivo deste trabalho apresentar a aplicação da MCC na definição de um plano de manutenção de edificações, condizente com padrões e requisitos preconizados nas normas nacionais e internacionais. Além de recomendar atividades preventivas, a MCC define um modelo consistente para obtenção de respostas a um conjunto estruturado de questões que identificam, seqüencialmente, os seguintes aspectos da edificação:

1. Sistemas funcionais;
2. Funções principais;
3. Falhas funcionais possíveis na edificação;
4. Modos de falhas ou patologias que provocam as falhas funcionais;
5. Conseqüências das falhas, no restante da edificação; e
6. Impactos resultantes nos usuários.

Com base na conseqüência das falhas (ambientais, de segurança, funcionais e econômicas) a metodologia propõe, através de uma lógica estruturada, as tarefas mais aplicáveis e efetivas para combater cada modo de falha, entre serviços de rotina, inspeções preventivas, ensaios funcionais e de caracterização de patologias, restaurações, substituições, reforços e reprojatos.

A seção 2 revisa a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade, propondo, na seção 3, uma classificação das patologias em edificações, condizente com a MCC. Na seção 4, Modelagem, propõe-se uma classificação dos sistemas físicos típicos de edificações civis, adequada à análise das funções, falhas e modos de falha da MCC, e das atividades propostas e seus impactos nos resultados empresariais. Na seção 5, Análise, serão correlacionadas as diversas patologias típicas de edificações, com a classificação adotada na MCC, conduzindo, na seção 5, à escolha da melhor alternativa para combate às conseqüências.

2 Manutenção Centrada na Confiabilidade

Em vários dos pilares do trecho supracitado foram detectadas fissuras passantes, as quais se situavam nos consolos das vigas, como pode ser observado na figura 2. Estas fissuras propagavam-se de forma aproximadamente vertical, em direção à base do pilar. Existia a incerteza quanto à manutenção desta direção de propagação.

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) constitui-se em uma metodologia de identificação de necessidades de manutenção em processos físicos ou industriais (6,7). Originária da indústria aeronáutica na década de 70, a MCC, após adoção pela indústria bélica americana, estendeu-se às áreas nuclear e de energia, atingindo hoje praticamente todos os setores da indústria moderna. Além de recomendar atividades preventivas, a MCC define um modelo consistente para associar cada atividade ao modo de falha subjacente. O processo utilizado consiste na resposta a um conjunto estruturado de questões que identificam, seqüencialmente, os seguintes aspectos da instalação:

Funções principais - O que o usuário espera da edificação e de seus sistemas;

Falhas funcionais - Perdas de funcionalidade dos subsistemas da edificação;

Modos de falhas - Patologias causadoras das falhas funcionais;

Efeitos das falhas - Desdobramento das falhas no restante da edificação;

Conseqüências das falhas - Impactos resultantes dos efeitos das falhas.

Com base nas conseqüências das falhas (no ambiente, segurança, operação e na economia da instalação), a metodologia propõe, através de uma lógica estruturada, as tarefas mais aplicáveis e efetivas para combater cada modo de falha, entre as seguintes opções:

Serviço Operacional – Manter o funcionamento dos sistemas que compõem a edificação;

Inspeção Preditiva - Detectar fissuras, destacamentos, fontes de umidade e outras patologias incipientes, passíveis de observação ou mensuração;

Inspeção Funcional - Localizar falhas ocultas, tais como perdas de funcionalidade ou outras patologias em estágio avançado;

Restauração Preventiva - Recuperar os elementos em estágio avançado de degradação antes que evolua para uma falha;

Substituição Preventiva - Substituir instalações degradadas que apresentam perda de funcionalidade, antes que a patologia evolua para uma falha;

Reparo - Recuperar ou substituir a parte de sistemas da edificação só após a falha.

A tabela 1 resume a lógica utilizada pela MCC para associar cada tipo de manutenção ao comportamento da falha. O fluxograma do Anexo detalha a lógica utilizada pela MCC para realizar esta associação, e que serve de base para os softwares que automatizam o processo da MCC.

Tabela 1 – Correlação entre Patologias e Manutenção

Comportamento da Falha	Ação	Tipo de Manutenção
Confiável	Nenhuma	Desnecessária
Mensurável	Detectar	Preditiva
Previsível	Antecipar	Recuperação ou Substituição
Controlável	Controlar	Serviço Operacional
Oculto	Descobrir	Inspeção Funcional
Aleatória	Corrigir	Aguardar a Falha

Na impossibilidade técnica-econômica de uma ou mais destas atividades, a MCC recomenda operar até que a falha ocorra e reparar, ou, em casos de ameaça à segurança ou ao meio-ambiente, realizar uma revisão do projeto.

3 Modelagem de Edificações

Seguindo a seqüência típica da MCC, a Tabela 2 ilustra uma possível modelagem dos sistemas, funções e falhas presentes em uma edificação residencial típica.

Tabela 2 – Sistemas, Funções e Falhas de Edificações

Sistema	Funções	Falhas
Fundações	Fixar a estrutura ao solo	Perda da capacidade resistente do solo
		Solapamento das bases
		Movimentação do maciço
	Transferir cargas da edificação ao solo	Ruptura/movimentação estacas
		Rompimento de sapatas
		Esmagamento dos pilares
Estrutura	Suportar e transferir as cargas da edificação	Colapso parcial ou global de elementos estruturais
		Apresentar fissuras acima de limites de norma
	Manter a estabilidade com deformações compatíveis	Deformações acima de limites de norma
		Perda de funcionalidade de elementos
Alvenaria	Vedar a edificação	Fissurar, colapsar
	Dividir fisicamente os ambientes	Fissurar, colapsar
	Isolar termicamente o ambiente	Aquecer/esfriar excessivamente
	Isolar acusticamente o ambiente	Ruído excessivo
Revestimento	Impermeabilizar os ambientes	Permitir passagem de umidade
	Manter a estética do ambiente	Perda de aderência
		Mudança de cor
Cobertura	Isolar edificação contra o sol	Aquecimento excessivo
		Esfriamento excessivo
	Isolar edificação contra a chuva	Infiltração de água
Sistema Hidráulico	Armazenar água para consumo	Vazamento de água
		Contaminação da água
		Entupimento de tubulação
	Distribuir água para consumo	Vazamento em tubulação
		Entupimento de tubulação
	Coletar água consumida	Vazamento em tubulação
Sistema Elétrico	Distribuir energia elétrica	Curto-circuito elétrico
		Circuito aberto
	Iluminar áreas comuns	Falta de iluminação
Sistema Sanitário	Coletar dejetos residenciais	Entupimento de tubulação
		Vazamento em tubulação
	Tratar dejetos residenciais	Tranbordamento de fossa
Sistema de Comunicação	Comunicar entre unidades	Ausência de intercomunicador
	Distribuir sinais de TV e internet	Ausência de sinais TV e internet

Esta tabela apenas exemplifica os tipos de sistemas, funções e falhas em edificações. Um estudo completo de cada sistema, específico de cada edificação, deveria ser realizado, para identificar todas as falhas funcionais possíveis.

4 Patologias em Edificações

Seguindo a metodologia MCC, em edificações, é necessário identificar todos os modos de falhas ou patologias existentes, e classificá-los segundo os critérios da MCC. A Tabela 3 ilustra algumas patologias típicas de edificações e sua classificação segundo estes critérios, permitindo identificar a atividade mais adequada de manutenção.

Tabela 3 – Modos de Falha e Manutenção em Edificações

Falha	Modo de Falha	Comportamento	Atividade
Perda de capacidade resistente ou colapso da estrutura	Deterioração por ação da corrosão nas arma-duras (a falha na qualidade e/ou espessura do recobrimento do concreto na região de armadura potencializa o ataque a armadura por corrosão)	Mensurável	Inspeção Preditiva (por observação visual se detecta indicativos de inicio de cor-rosão e destacamento do cobrimento, por investigação, destacamento e aplicação de fenofalaina se verifica a extensão da falha)
Perda de impermeabilidade ou aderência	Final de vida útil do revestimento (as juntas de movimentação e re-juntas tem período de vida e necessitam substituição periódica)	Oculto	Inspeção Funcional (Em períodos programados são vê-rificadas, por inspeção direta, as características dos mas-tiques das juntas e rejuntas, sendo verificadas outras características (rejunte, aderência)
Perda de impermeabilidade , aderência e beleza da pintura	Final de vida útil da pintura (Cada tipo de tinta, associada as ca-racterísticas de exposi-ção, tem uma vida útil prevista e necessitam nova aplicação)	Previsível	Restauração Preventiva (neste caso ha necessidade de periodicamente uma nova aplicação de pintura)
Desmoronamento de tetos de gesso	Deterioração por ação da corrosão dos tiran-tes (a falha na perda de resistência dos tirantes por corrosão e;ou mandamento e destacamento da pintura)	Mensurável	Inspeção Preditiva (por observação visual se detecta indicativos de inicio de corrosão, formação de manchas e destacamento da pintura, se verifica a extensão da falha)
Fissura horizontais e inclinadas nos platibandas	Movimentação higo-termica diferenciada entre estrutura de concreto e alvenaria	Mensurável	Inspeção Preditiva (por observação visual se detecta a extensão da fissuração e se faz necessário a restauração)

5 Frequência de Manutenção

Estabelecidas as atividades preventivas de manutenção, é necessário a definição de sua frequência de execução, através de modelos adequados. O desenvolvimento de um modelo matemático que represente a Manutenção Centrada na Confiabilidade prioriza a representação dos conceitos de falha potencial e falha funcional. O primeiro, como evento detectável de início da degradação funcional, corresponde aproximadamente ao conceito de defeito adotado pela ABNT (10), enquanto o segundo corresponde ao conceito de falha (“término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”). Estes estados podem ser melhor visualizados através de uma curva típica de degradação da resistência a falhas, em função do tempo, ilustrada na Figura 1, onde são identificadas as três condições típicas de um modo de falha:



Figura 1 – Curva de Resistência a Falha

Normal - Antes da Falha Potencial ou da instalação da patologia;
Defeito - Entre a Falha Potencial e a Funcional, com a patologia em estado inicial;
Falha - Após a Falha Funcional.

Além destas condições, a instalação pode se encontrar em manutenção preventiva ou corretiva, segundo a classificação da MCC. Desta forma, pode-se conceituar, a priori, os seguintes estados mais prováveis em uma da edificação:

Normal – sem apresentar manifestações patológicas;
Preventivo – sob inspeção e em estado de manutenção periódica;
Falha – após falha funcional de um elemento construtivo;
Defeito – com presença de patologias e falha potencial;
Corretivo – sob ações de recuperação, após descoberta de patologia.

Pode-se listar, a priori, os seguintes eventos que mudam o estado de cada componente, e sua segurança:

Preventiva - inspeção ou manutenção programada;
Corretiva - Correção de falha potencial;
Reparo - Correção de falha funcional;
Defeito - Degradação parcial do funcionamento;
Falha - Interrupção forçada do funcionamento.

Estes eventos disparam as transições entre os estados, conforme ilustrado na Figura 2.

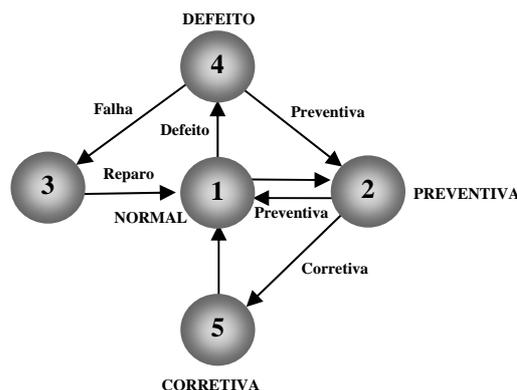


Figura 2 – Modelo de Estados

A Tabela 4 resume as interpretações de cada um destes estados, para cada uma das atividades padronizadas da MCC.

Estabelecido o modelo, pode-se utilizar as equações clássicas de Chapman-Kolmogorov (2,8), para quantificar as probabilidades de cada estado, com a numeração indicada:

$$dP_i/dt = \sum_j (P_j \lambda_{ji}) - P_i \sum_j \lambda_{ij} \quad [1]$$

onde P_i = probabilidade do estado i ; e λ_{ij} = taxa de transição entre os estados i e j .

Para que os modelos sejam utilizados, é necessário determinar os valores dos parâmetros, especialmente as taxas de falha e defeito. O método adotado depende diretamente do tipo de atividade da MCC.

Nas Atividades Operacionais, os parâmetros principais correspondem às taxas de consumo de materiais, para atividades de ressuprimento de consumíveis, ou como atividades preditivas ou preventivas, quando o modo de falha for adequado a este tipo de atividade. Nas Inspeções Preditivas, a parametrização se dará pelos limites de detecção e taxas de falhas potenciais e funcionais. Ou seja, os parâmetros adotados serão função

dos limites estabelecidos para caracterização dos estados de falha potencial e funcional. Nas Inspeções Funcionais, os parâmetros dos modelos serão dados pelas taxas de falhas de dispositivos ocultos e dos eventos que provocam falhas múltiplas. Finalmente, nas Restaurações e Substituições Preventivas, os parâmetros serão definidos pelos limites de detecção de desgaste, vida segura ou vida econômica, e taxas de falhas potenciais e funcionais dos componentes.

Tabela 4 – Correlação entre Estados e Atividades

ATIVIDADE	ESTADO NORMAL 1	ESTADO PREVENTIVO 2	ESTADO DE FALHA 3	ESTADO DE DEFEITO 4	ESTADO CORRETIVO 5
Serviço Operacional	Nível inicial ou adequado do consumível	Ressuprimento do consumível	Correção de falha após falta de consumível	Consumível abaixo do nível de reposição	Não aplicável
Inspeção Preditiva	Desempenho adequado da função	Medição do nível de desempenho funcional	Correção do defeito após falha funcional	Degradação excede nível p/ falha potencial	Correção da degradação da falha potencial
Restauração Preventiva	Desempenho adequado da função	Recuperação antes do final da vida útil	Correção após falha no final da vida útil	Degradação excede nível de restauração	Não aplicável
Substituição Preventiva	Desempenho adequado da função	Substituição antes do final da vida útil	Correção após falha no final da vida útil	Degradação excede nível de substituição	Não aplicável
Inspeção Funcional	Desempenho adequado, sem falhas ocultas	Realização de ensaio funcional	Correção após falha oculta e outro evento	Falha funcional de uma função oculta	Correção de falha oculta após ensaio
Manutenção Corretiva	Desempenho adequado da função	Não aplicável	Correção após falha funcional aleatória	Tempo de permanência nulo	Não aplicável

Os dois parâmetros que definem o comportamento do equipamento são traduzidos pelas taxas de defeito e falha generalizadas, assim definidas:

Taxa de Defeito - Densidade de probabilidade de defeito ou falha potencial no intervalo dt , condicionada à ausência de defeito até o instante t .

Taxa de Falha - Densidade de probabilidade de falha funcional no intervalo dt , condicionada à ausência de falha até o instante t e presença de defeito ou falha potencial no instante 0 .

A identificação destes parâmetros em cada sistema que compõe a edificação é uma atividade complexa, já que grande parte dos defeitos dependem da qualidade do material, da mão de obra e da técnica utilizada na aplicação, bem como a correta especificação e adequação a nível de projeto. Métodos estatísticos de otimização matemática existem para parametrizar estes modelos, e determinar a frequência ótima de manutenção para

cada modo de falha da edificação (SIQUEIRA, 2001), que minimize o custo relativo da manutenção.

6 Custo relativo da manutenção

Os custos de intervenção na edificação para atingir um certo nível de desempenho satisfatório crescem de forma geométrica, com taxa média de crescimento da ordem de 5, também conhecida como lei de Sitter (Sitter, 1984). A figura 3 mostra a evolução dos custos em função do estado de cada sistema da edificação.

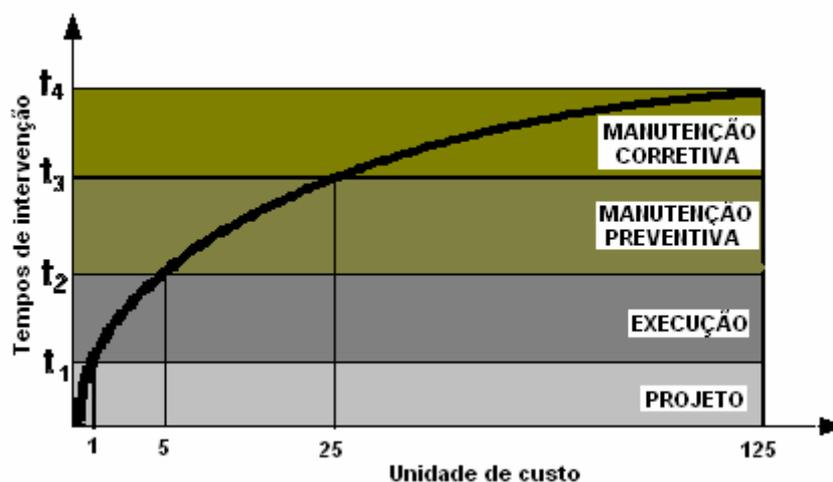


Figura 3- Custo relativo de intervenção por estágio de construção/utilização

Segundo esta lei, apud Helene (Helene, 1997), admitindo um valor de custo associado a cada estágio, tem-se:

- Fase de projeto:** Toda medida tomada no nível de projeto com o objetivo de aumentar a proteção e durabilidade da estrutura, como por exemplo, aumentar o cobrimento da armadura, reduzir a relação água/cimento ou aumentar o F_{ck} , implica em um custo que pode ser associado ao número 1.
- Fase de execução:** toda medida extra-projeto, tomada durante a fase de construção propriamente dita, implicaria num custo 5 vezes superior ao custo que equivaleria ter sido tomado na fase de projeto. Assim reduzir o fator água/cimento na fase de construção, provavelmente aumentaria o f_{ck} mas não permitiria redimensionar a estrutura.
- Fase de manutenção preventiva:** as operações isoladas de manutenção do tipo proteção superficial de produtos de fácil degradação submetidos a ambientes agressivos equivale a um custo 5 vezes maior que sua preparação na fase construtiva, porém custará 5 vezes menos que não proteger e recuperar após iniciar sua degradação;
- Fase de manutenção corretiva:** corresponde a necessidade de diagnóstico, reparo, reforço e ou substituição, custo este equivalente a 125 vezes do custo de fosse projetado materiais ou minimizado a fonte agressiva de deterioração.

Métodos de otimização matemática existem (SIQUEIRA, 2001) para minimização destes custos, uma vez que se tenha modelado e parametrizado o modelo da seção da Figura 2 .

7 Conclusão

Este artigo introduz o conceito da Manutenção Centrada na Confiabilidade a edificações no setor da construção civil, modelo este já praticado a bastante tempo em diversos setores industriais. As generalidades do modelo e solução propostas permitem sua aplicação a praticamente qualquer tipo de edificação e atividade industrial. Sua implantação na indústria de construção civil deve ser acompanhada por seminários onde engenheiros de manutenção analisem os resultados descritos e outras simulações de interesse, como suporte do processo decisório.

A disponibilidade de um modelo permite obter-se ganhos adicionais na gestão da manutenção. Na modelagem regional, por exemplo, além das condições ambientais, pode-se comparar (a) o desempenho das equipes de manutenção, pelos tempos de manutenção corretiva, reparo e taxas de accidentalidade; (b) a eficiência operacional, através dos tempos de retomada da funcionalidade da instalação; (c) as deficiências da própria instalação, pelas perdas de produção, nos casos de edificações industriais; e (d) os custos marginais da manutenção e lucros cessantes. O desempenho de famílias de edificações pode ser analisado na modelagem por classe, comparando os indicadores com padrões de eficiência estabelecidos no setor industrial correspondente. A estrutura uniforme do modelo, independente da classe da edificação modelada ou modo de falha, facilita o intercâmbio de experiências entre equipes, e a adoção de políticas uniformes pela indústria.

8 Referências

SAE INTERNATIONAL, “**Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes**”, SAE JA1011, Warrendale, PA, USA, 1999.

SAE INTERNATIONAL, “**A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard**”, SAE JA1012, Warrendale, PA, USA, 2002.

MOUBRAY, J., “**Reliability-Centered Maintenance**”, Butterworth Heinemann, Oxford, 1994.

HELENE, P.R.L- “**Vida útil das estruturas de concreto**”, IV CONPAT, pg 1-30, UFRGS 1997

PIRES SOBRINHO, C.W.A- “**PATOLOGIAS NAS EDIFICAÇÕES**”, notas de aula do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPE 2002

PIRES SOBRINHO, C.W.A- “**DIAGNÓSE E DIAGNÓSTICO DA PATOLOGIAS EM EDIFICAÇÕES**”, notas de aula de curso de extensão ITEP para CODECIR, 2004

SMITH, A.M., HINCHELIFFE, G.R., “**Reliability-Centered Maintenance – Gateway to World Class Maintenance**”, Elsevier, New York, USA, 2004

SIQUEIRA, I. P., “**Manutenção Centrada na Confiabilidade – Manual de Implementação**”, Notas de Aula do Curso de Pós-Graduação em Gestão da Manutenção, UFPE, 2004.

SIQUEIRA, I. P., “**Auditoria de manutenção Centrada na Confiabilidade**”, XVIII SNTPEE, CIGRÉ, 2005.

SIQUEIRA, I. P., “**Otimização da Frequência de Manutenção**”, Capítulo do Livro “Gestão da Manutenção – Na Direção da Competitividade”, ISBN 85-7315-273-7, Instituto de Desenvolvimento da Engenharia de Produção – Recife, PE, 2001

SITTER, W.R.- “**Costs for service life optimization. The “Law of Fives” in. CEB-RILEM Durability of Concrete Structures**”, Proceeding of the International Workshop held in Copenhagen, 18-20 may 1983, CEB, 1984.

ANEXO I

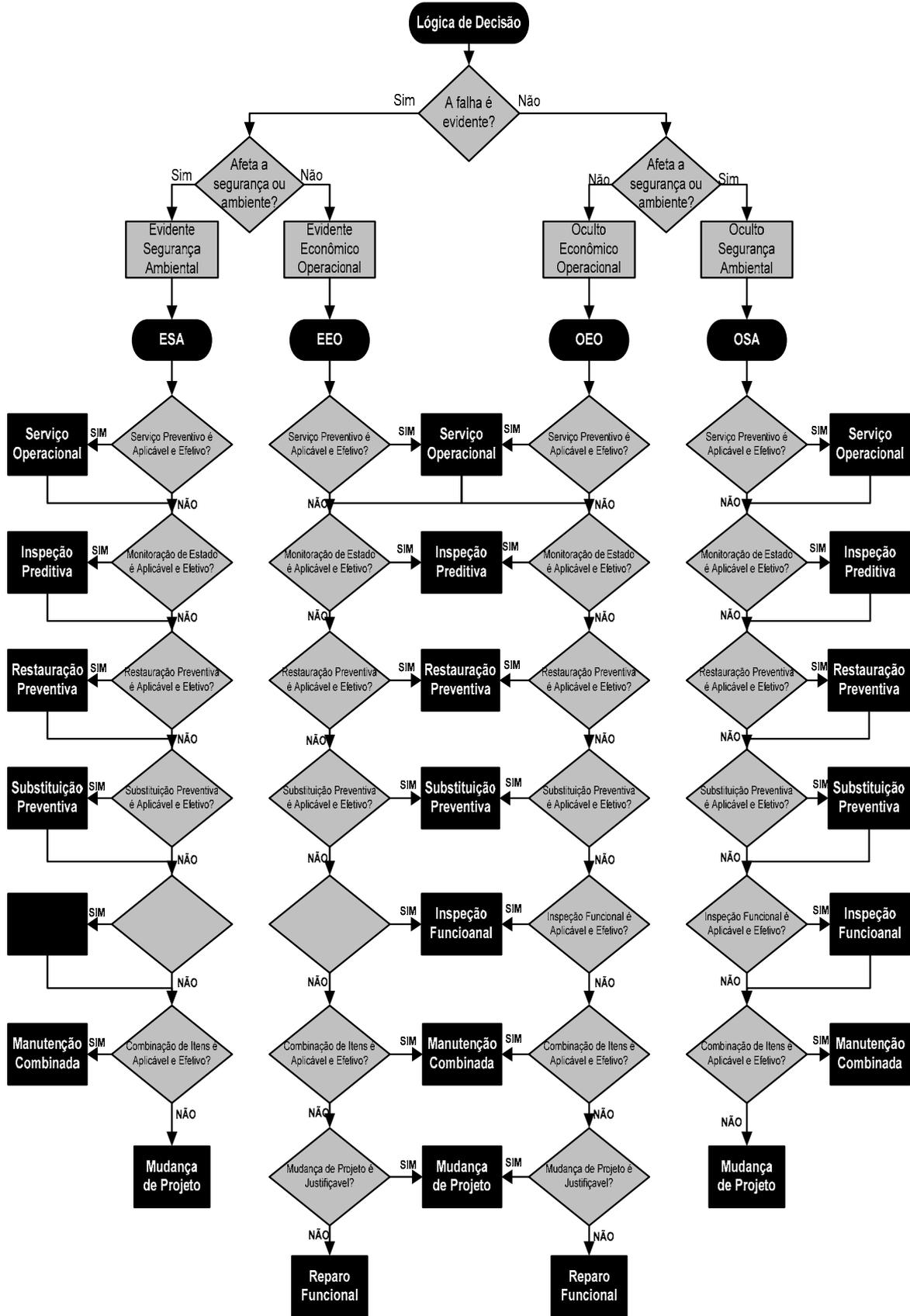


Figura 6 – Lógica de Decisão da MCC