



“LEI DOS CINCOS”: AS REFERÊNCIAS DE SITTER

SÃO PAULO
2018



BRUNNA ALVES SCARDUA MARIANO

JOÃO VICTOR MARTINS

“LEI DOS CINCOS” : AS REFERÊNCIAS DE SITTER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Patologia das Obras Cíveis, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca.

Coorientador: Prof. Esp. Michel Haddad

SÃO PAULO
2018

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Msc. De Luca pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível dar continuidade a esse trabalho.

Também somos gratos ao professor Michel Haddad que nos deu suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e apoio.

Aos pesquisadores Hugo Corres e Kyosti Tuutti pela valiosa atenção e envio de informações que tornaram possível o desenvolvimento do estudo.

E, por fim, nosso muito obrigado a Thomaz Ripper pela disponibilização de materiais e pelos esclarecimentos que vieram a enriquecer nossa pesquisa. Sua perspectiva nos fez amadurecer com relação ao tema proposto.

FOLHA DE APROVAÇÃO

“LEI DOS CINCOS”: AS REFERÊNCIAS DE SITTER

Por

BRUNNA ALVES SCARDUA MARIANO

JOÃO VICTOR MARTINS

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS
OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

São Paulo (SP) 26 de Janeiro de 2018.

André Tadeu Moreno Figueiró

Ricardo Tadeu Pinto de Faria

Carla Castro de Paula

RESUMO

O estudo dos processos de degradação de estruturas e sistemas ao longo dos anos, tem sido de suma importância para o conhecimento dos fatores preponderantes para sua iniciação, de maneira a permitir que se possa agir preventivamente e, assim, aumentar a durabilidade das construções. Tais avanços no campo da patologia das construções se deve, entre outros fatores, principalmente aos custos envolvidos nas atividades de intervenção para reabilitação destas estruturas e sistemas. A principal justificativa para a redução de custos, se baseia no conceito apresentado na “Lei dos Cincos”, apresentada inicialmente por W.R. de Sitter, em 1984. No entanto, em seu artigo, Sitter tratava especificamente das etapas de desenvolvimento da corrosão em armaduras, quais sejam: *boas práticas* (boas práticas de engenharia no projeto e construção); *manutenção* (intervenções para limpeza, aplicação de revestimento e aumento de cobrimento pontualmente); *reparo e manutenção* (pequenos reparos com aplicação de revestimento); *renovação* (reparos de grande magnitude). Este trabalho apresenta uma pesquisa bibliográfica, incluindo consulta a profissionais, e até mesmo autores de publicações internacionais como Kyosty Tuutti, cujos estudos embasaram a formulação da Lei dos Cincos. Tem-se como pressuposto contextualizar e fazer uma análise com base nos dados encontrados.

Palavras chave: durabilidade de estruturas de concreto, corrosão das armaduras, vida útil, leis dos cincos, custos, princípio de discórdia.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Expressão gráfica da queda de desempenho natural de uma edificação com o tempo (LICHETENSTEIN, 1985)	14
Figura 2. Origem dos problemas patológicos (HELENE, 1988)	22
Figura 3. Modelo de corrosão das armaduras no concreto (ANDRADE, 2001).....	25
Figura 4. Modelo de vida útil para estruturas atacadas pela corrosão de armaduras (TUUTTI, 1982)	26
Figura 5. Sistematização da pesquisa (AUTORES, 2018)	30
Figura 6. Curva corrosão x tempo (SITTER, 1984)	32
Figura 7. Evolução dos custos de intervenção em função da fase da vida da estrutura (Comitê CT 301, 2003).....	38
Figura 8. Influência das principais fases da vida do ativo nos custos totais do ciclo de vida (FIB, 2002).....	40
Figura 9. Proposta 1 de modelo para relacionar os investimentos realizados ao longo da vida útil de uma estrutura (AUTORES, 2017).....	50
Figura 10. Proposta 2 de modelo para relacionar os investimentos realizados ao longo da vida útil de uma estrutura (AUTORES, 2017).....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Representação cronológica	47
---	----

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
FOLHA DE APROVAÇÃO	6
RESUMO	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE TABELAS.....	9
SUMÁRIO.....	10
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	16
1.2. OBJETIVO GERAL	16
1.3. HIPÓTESE.....	16
1.4. JUSTIFICATIVAS	16
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	19
2.2. CORROSÃO DAS ARMADURAS	24
2.2.1. Iniciação da Corrosão.....	26
2.2.2. Propagação da Corrosão.....	28
3. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA, DOCUMENTAL E TESTEMUNHAL.....	29
3.1. SISTEMATIZAÇÃO DA PESQUISA	29
3.2. ARTIGO COMENTADO	31
3.3. OUTRAS ABORDAGENS SOBRE A LEI DE SITTER	35
3.4. ANÁLISE DOCUMENTAL.....	41
3.5. PROCEDIMENTO DE PESQUISA	46
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48

4.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho possui como temática principal a “Lei dos Cincos”, regra que correlaciona custos com fases da vida útil das estruturas de concreto, em função da corrosão das armaduras. Visto a grande importância da proposta publicada por Sitter, em 1984, tal lei permanece sendo aplicada na área.

Melhado (2001) afirma que nos últimos dez anos, a Construção Civil tem apresentado mudanças contínuas e progressivas em direção a um patamar mais alto de evolução, como indústria. Apesar das influências da globalização, como a crescente importação de equipamentos e materiais de construção e alguns casos de projetos elaborados no exterior, a atividade central da indústria da construção no Brasil mantém-se a cargo de empresas de capital nacional, com mão-de-obra brasileira e uso de tecnologia predominantemente própria.

Diante das profundas mudanças na conjuntura setorial, as empresas construtoras vêm sendo pressionadas a alterarem seus processos de produção no sentido de reduzir custos e adequar a realidade dos produtos ofertados às condições de mercado. (MELHADO, 2001).

Entre os materiais de construção, o concreto é o mais utilizado no mundo, estima-se que seu consumo anual está na ordem de 11 bilhões de toneladas métricas. Suas principais vantagens comparando-se com outros materiais de construção, como o aço, por exemplo, é a sua grande resistência à água, a facilidade e a versatilidade das formas e tamanhos nas quais ele pode ser moldado e seu desempenho econômico, sendo de fácil produção e de baixo custo. Além disso, também apresenta baixo custo de manutenção, boa resistência ao fogo e a cargas cíclicas, características que fazem do concreto um importante material de construção (MEHTA & MONTEIRO, 2006).

O concreto reforçado com barras de aço - concreto armado - surgiu como alternativa à alvenaria na metade do século XIX, quando as primeiras aplicações começaram na Inglaterra, França e Bélgica com Coignet e Wilkinson

em 1854 e com Lambot em 1865. Este ganho de relevância se deve ao fato do contínuo progresso no desenvolvimento dos materiais que compõem o concreto armado, nas técnicas de construção e no aperfeiçoamento de projetos (SCHEERER *et al.*, 2015).

As ótimas propriedades do concreto armado são muito difundidas há muito tempo, porém quando se trata de vida útil e manutenção das estruturas constituídas por esse material essa pauta não é tão antiga. É bem possível que a década de 1980 venha a ficar lembrada, na história das estruturas de concreto, como “a década da durabilidade”. Dentre os estudos desenvolvidos sob esta égide, esteve incluído, com o destaque merecido e até pouco tempo atrás não reconhecido (não consta da NBR 6118, nem do revolucionário C.E.B. de 1970), o capítulo da manutenção estrutural, talvez a última das intervenções, em termos sequencias, de um largo conjunto que observado sob a ótica da durabilidade, deve principiar já na etapa da concepção (SOUZA & RIPPER, 1998).

Hoje é de amplo conhecimento que devido às suas interações com o ambiente no qual estão expostas, as estruturas de concreto sofrem alterações que podem, com o passar do tempo, comprometer além de sua durabilidade, também é possível que sejam afetadas a sua estabilidade e a sua funcionalidade.

A avaliação técnico-econômica dos sistemas de recuperação a adotar e a oportunidade (época apropriada) para a execução dos serviços são elementos determinantes para a definição da decisão a ser tomada. Assim, quanto mais apropriada for a política de manutenção, mais fundamentada será a decisão.

As inspeções técnicas e a estratégia de manutenção visam definir como e a que razão uma determinada estrutura está a degradar-se, de forma a estabelecer a necessidade dos eventuais reparos, e quando estes devem suplantar o desempenho inicialmente esperado para a estrutura, e, por fim, para que se mantenha ou até se estenda a vida útil da mesma, como se pode observar no esquema da Figura 1.

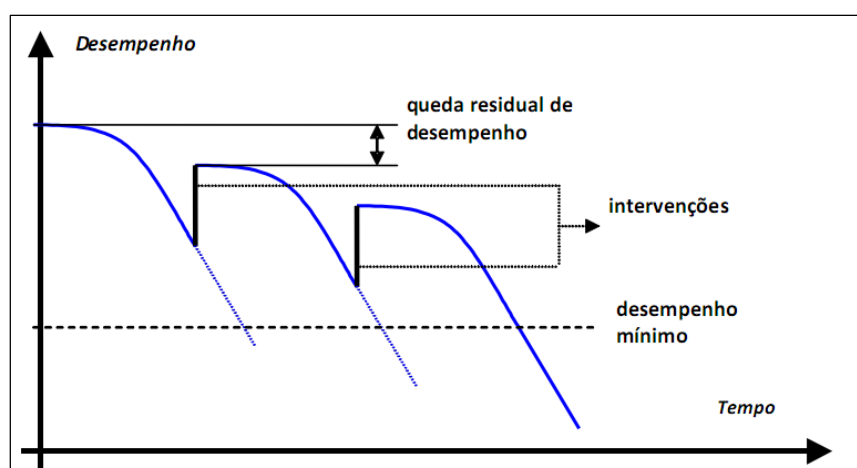


Figura 1. Expressão gráfica da queda de desempenho natural de uma edificação com o tempo
(LICHETENSTEIN, 1985)

Souza e Ripper (1998) anunciam que no Brasil os problemas associados à durabilidade tendem a se acentuar nos próximos anos, visto que grande parte das edificações das principais metrópoles brasileiras foi construída nas décadas de 70 e 80, isto é, estão completando entre 30 e 40 anos de vida, idade em que gastos com manutenção e reparos tornam-se mais constantes.

Assim, a saúde de uma estrutura passa por um projeto bem fundamentado, uma execução esmerada e uma manutenção cuidadosa. Segundo Datta (1978), “trabalho de recuperação não é um trabalho agradável de ser feito, mas é essencial e requer muito cuidado”. Esta afirmação mostra-se cada vez mais válida, e deve ser estendida aos trabalhos de manutenção preventivos, que podem evitar ou retardar a necessidade de trabalhos de recuperação ou de reforço das estruturas (SOUZA & RIPPER, 1998).

Para evitar a ocorrência de corrosão em obras novas, por exemplo, é necessário o conhecimento técnico atualizado e abrangente do problema. No caso de reparos e recuperações, as exigências de conhecimento são ainda maiores, requerendo materiais e técnicas específicas a cada caso, sendo, dessa forma, o estudo da corrosão de armaduras um tema de grande importância atual para o desenvolvimento da engenharia (HELENE, 2014).

Assim é que R. E. Rowe (1989), presidente do C.E.B., refere-se no prólogo do “Guia para Projeto de Estruturas de Concreto Duráveis”, que todos os envolvidos nas várias etapas do processo de construção devem estar cientes de que “uma estrutura, durante a vida para a qual foi projetada, deve ser utilizada segundo as premissas de projeto e estar sempre sujeita à manutenção mais apropriada”.

Ribeiro (2014) relata que a evolução da construção civil, com o aperfeiçoamento dos sistemas construtivos e dos métodos de cálculo, apresentou duas faces diferentes de uma mesma moeda: ao que permitiu maior produtividade e menores custos, de acordo com as premissas capitalistas que impunham, também foi responsável pelo aumento da esbelteza das estruturas, com redução do cobrimento das armaduras e aumento substancial das tensões de trabalho, o que contribuiu decisivamente para uma menor durabilidade das edificações.

Ainda segundo o autor, uma das grandes questões contemporâneas é levar todo o conhecimento gerado nas instituições de pesquisa ao setor construtivo. No entanto, existe uma grande barreira quanto a essa aproximação, uma vez que a indústria da construção é, certamente, uma das mais conservadoras e menos abertas a inovações, principalmente quando essas realizações trazem impactos econômicos na cadeia. É preciso entender que gastos com manutenção e reparo consomem parcela significativa dos orçamentos dos países, o que pode ser atenuado, além de se evitar a perda de vidas humanas, de valor inestimável, decorrente de acidentes provocados por falhas nos materiais.

Com base nos conceitos apresentados, deve-se refletir sobre o embasamento e a abrangência relacionada a “Lei dos Cincos”. Essa regra, apresentada por W. R. de Sitter em 1984, tratava apenas de casos de corrosão de armaduras nas estruturas de concreto, identificando-se 4 fases: *good practices* (boas práticas de engenharia no projeto e construção); *maintenance* (intervenções para limpeza, aplicação de revestimento e aumento de cobrimento pontualmente); *repair and maintenance* (pequenos reparos com atribuição de revestimento); *renovation* (reparos de grande magnitude).

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Com que embasamento foi enunciada a “Lei dos Cincos”?

1.2. OBJETIVO GERAL

Estudar o embasamento que deu origem a “Lei dos Cincos” que correlaciona custos com as fases da vida útil de estruturas.

1.3. HIPÓTESE

Presume-se que a “Lei dos Cincos”, publicada por Sitter em 1984, tenha sido um estudo fundamentado em um extenso levantamento de informações reais, de projetos consolidados, configurando um detalhado banco de dados. Nesse sentido, supõe-se que foram correlacionados os valores gastos com intervenções em diferentes momentos da vida útil de estruturas, originando a progressão geométrica de razão 5, difundida pelos pesquisadores.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Utilizando-se do conceito de filosofia, de que a pergunta é mais importante que a resposta, este trabalho questiona uma relevante regra criada na década de 1980 pelo pesquisador W. R. de Sitter.

A conhecida “Lei dos Cincos” ou “Lei de Sitter” tomou tamanha proporção no âmbito nacional, que vem sendo utilizada a mais de trinta anos por diversos pesquisadores e docentes da área de patologia das construções, que citam-

na como verdade absoluta. Nela se retrata o aumento dos custos de intervenção ao decorrer da vida útil de uma estrutura.

Sendo assim, o estudo justifica-se, tendo em vista, a falta de informações sobre a maneira que Sitter encontrou os valores pronunciados na regra e a repercussão do tema. Para um melhor entendimento do contexto da época em que ela foi declarada e do objetivo de sua criação são necessários também conceitos relevantes contidos ao decorrer desta pesquisa.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método utilizado para elaboração do trabalho foi a pesquisa bibliográfica, a partir do levantamento e análise de referências já publicadas e estudadas sobre o tema proposto. Somado a isso, fez-se também uma pesquisa exploratória, através de entrevistas com pessoas que tiveram experiências com o problema pesquisado e análise de exemplos que estimularam a compreensão. Sendo assim, foi realizada investigação e interpretação do artigo original de Sitter “A Lei dos Cincos”.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi estruturado em quatro capítulos, cujo conteúdo básico está descrito a seguir.

O **Capítulo 1** introduz o tema, apresenta o problema de pesquisa e seu objetivo geral, bem como delinea as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica que discorre sobre a durabilidade das estruturas de concreto e o efeito de corrosão das armaduras.

O desenvolvimento do trabalho vem no **Capítulo 3**, com a análise bibliográfica, documental e testemunhal. Nesse item será apresentada a “Lei dos Cincos”, através do artigo original comentado, as abordagens dos pesquisadores nacionais e uma análise documental das informações obtidas ao longo da pesquisa. O capítulo ainda retrata o procedimento investigativo, resumo das principais referências consultadas.

No **Capítulo 4** apresentam-se as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros. Finalizando, no **Capítulo 5** tem-se as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresentará a revisão bibliográfica da pesquisa, em que serão abordadas as principais temáticas associadas ao tema proposto, sendo elas: durabilidade das estruturas de concreto e corrosão das armaduras. Sendo assim, é possível vincular a pesquisa e análise das referências com o desenvolvimento do trabalho.

Conforme Andrade (2005), a construção civil começou a se confrontar com um grande aumento dos danos causados pela deterioração das estruturas a partir da segunda metade do século XX, quando os gastos com reparos foram significativamente acentuados. Assim, os mecanismos de deterioração passaram a ser mais estudados, gerando normas e parâmetros de projeto que estivessem diretamente associados à durabilidade.

Num sentido geral, o termo “deterioração” é antônimo de “durabilidade”, sendo definida como a perda de capacidade do material em suportar as condições para as quais foi concebido ao longo de um determinado período (RIBEIRO, 2014).

2.1. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Souza e Ripper (1998) explicam que com o envelhecimento das estruturas e a constatação de diferentes comportamentos de peças idênticas, desde que sujeitas a ambientes diversos, veio a consequente possibilidade de colecionar dados quanto à performance das mesmas ao longo de anos. Além disto, houveram os vários casos de insucesso acontecidos ou, na mesma ótica, de sucesso condicionado pela necessidade de reabilitação/reforço em um prazo surpreendentemente curto ou a custo elevado.

Sendo assim, a Engenharia de Estruturas viu-se, em particular na virada da década de 60 para 70, confrontada com a necessidade técnica, econômica e social de pesquisar outros critérios, que não apenas o da capacidade resistente, para garantir o êxito das construções (SOUZA & RIPPER, 1998).

Atenta a esse panorama, o meio acadêmico através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua NBR 6118:2014, dedica dois capítulos à durabilidade, nos quais são definidos, entre outras questões, os parâmetros de projeto, em função da agressividade do meio em que está inserida a estrutura e do seu tipo (armada ou protendida).

Ela define durabilidade como a capacidade da estrutura em resistir às influências previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, ainda no planejamento (ABNT, 2014).

De acordo com o CEB (1997), durabilidade é a propensão de uma estrutura apresentar o desempenho requerido durante o período de vida útil desejado, de acordo com a influência dos fatores de degradação.

Uma antiga diretriz encontrada na literatura técnica diz que a durabilidade da estrutura de concreto é determinada por quatro fatores, identificados por Helene (1993) como regra dos 4C:

- Composição ou traço do concreto;
- Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- Cura efetiva do concreto na estrutura e;
- Cobrimento ou espessura do concreto de cobrimento das armaduras.

Atualmente, sabe-se que para se definir de forma mais adequada a durabilidade, além desses fatores, é necessário definir o desempenho mínimo requerido para o material, em um determinado intervalo de tempo desejado, em função de um meio ambiente específico.

Assim, Ribeiro (2014) concorda que o concreto é considerado durável quando desempenha as funções que lhe foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade esperada durante um período previsto. Como qualquer tipo de material,

a elevada durabilidade do concreto não implica em uma vida indefinida, nem em suportar qualquer tipo de ação, pois, as interações com o meio ambiente, a microestrutura e as propriedades dos materiais mudam ao longo do tempo.

Segundo a NBR 6118, as estruturas de concreto armado devem ser projetadas e construídas de modo que conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil, estabelecida pelo contratante (ABNT, 2014).

Ribeiro (2014) afirma que a partir das definições apresentadas, entende-se que a durabilidade de uma estrutura é função de certos parâmetros básicos como: características da construção, agressividade ambiental, critérios de desempenho desejados e do tempo, ou seja, da vida útil requerida para uma estrutura em particular. Numa analogia simplista, costuma-se dizer que a vida útil está para a durabilidade, assim como a resistência do concreto está para o projeto estrutural.

Dessa forma, a vida útil de uma estrutura é definida pelo código FIP-CEB (Cômite Euro-internacional du Béton) de 1989 como o tempo em que a estrutura mantém um limite mínimo de comportamento em serviço, para o qual foi projetada, sem elevados custos de manutenção e reparo.

A NBR 6118 utiliza o conceito de vida útil de projeto para definir desde atendidos os requisitos de uso e manutenção previstos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais (ABNT, 2014).

Para Roque e Moreno (2005), é comum atribuir-se o problema atual da pouca durabilidade das construções à carência de informações quanto aos materiais e componentes das estruturas de concreto. No caso daqueles tradicionalmente utilizados, o conhecimento do seu uso constitui uma fonte preciosa de dados para a estimativa de vida útil desses produtos.

No entanto, quando se trata de materiais e componentes inovadores, é necessário recorrer a métodos de ensaio que simulem o seu uso em obra. Para estes, a durabilidade é uma das exigências do usuário que tem sido menos atendida. Isso

ocorre, pois a durabilidade não é simplesmente uma característica dos materiais, mas um resultado da interação dos mesmos com o meio ambiente. Essa interação provoca alterações na capacidade de atendimento das demais necessidades dos usuários, ou seja, pode provocar uma degradação (ROQUE & MORENO, 2005).

Para Oliveira (2005), o projeto possui influência determinante sobre o desempenho de uma edificação durante seu uso. Mais que isso, ele determina grande parte da possibilidade de ganhos financeiros reais durante a sua construção, por meio da redução de desperdício, das patologias construtivas e através da melhoria da imagem das empresas participantes do empreendimento

Helene (1988) ressalta que os problemas de durabilidade causados por deficiência de projeto e que podem ser reproduzidos em obras são múltiplos e variados. Reconhece-se que uma elevada percentagem das manifestações patológicas tem origem nas etapas de planejamento e projeto, conforme Figura 2. As falhas de planejamento ou de projeto são, em geral, mais graves que as falhas de qualidade dos materiais ou de má execução, motivo pelo qual é sempre preferível investir mais tempo no detalhamento e estudo da estrutura que, por falta de previsão, tomar decisões apressadas a ou adaptadas durante a execução.

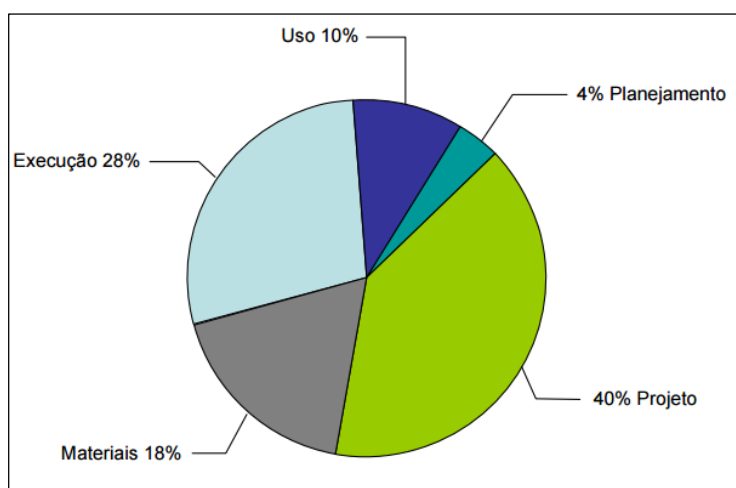


Figura 2. Origem dos problemas patológicos (HELENE, 1988)

Brandão (1998), afirma que o projeto para durabilidade deve definir formas estruturais, dimensões e arranjos de armadura apropriados, apresentar

especificações adequadas para os materiais, propor recomendações para a execução, com vistas à garantia da qualidade do concreto produzido e, finalmente, fornecer aos usuários planos de inspeção e de manutenção preventiva.

Em sua palestra principal da segunda Conferência Internacional sobre Durabilidade do Concreto, realizada em 1991, no Canadá, Metha abordou a questão da durabilidade das estruturas de concreto nos últimos 50 anos enfocando todos os aspectos do problema: corrosão de armaduras, ação de congelamento e descongelamento, reações álcali-agregados, reações com sulfatos, dosagem e composição do concreto e aspectos químicos em geral.

Para tal, o autor supracitado reviu os anais de vários Congressos Internacionais demonstrando claramente o aumento significativo de pesquisas sobre durabilidade. Na sua extensa e minuciosa análise, dedicou especial atenção ao capítulo de corrosão de armaduras citando os seguintes fatos:

- 253.000 tabuleiros de pontes rodoviárias e ferroviárias, nos Estados Unidos, estavam com problemas de durabilidade, conforme levantamento publicado em 1986;
- Vários túneis de concreto armado construídos em diferentes países apresentaram problemas de vazamentos e infiltrações, associados à corrosão de armaduras;
- A análise de 27 edifícios que ruíram, total ou parcialmente, na Inglaterra durante o período de 1974 a 1978 mostrou que a causa principal de falha de pelo menos 8 deles, com idades entre 12 e 40 anos, foi corrosão de armaduras;
- O custo da recuperação das estruturas de concreto armado destinadas a garagens e estacionamentos no Canadá que apresentam problemas de corrosão de armaduras atinge mais de 3 bilhões de dólares americanos;
- A reduzida vida útil das estruturas de concreto como, por exemplo, o reparo da estrutura de concreto, com problemas de corrosão de armaduras, da

ponte San Mateo-Hayward na Califórnia, sobre as águas da Baía de San Francisco, efetuada após 16 anos da inauguração;

- Recuperação de túnel em Dubai, junto ao Golfo pérsico, ao custo equivalente ao dobro do custo de construção devido a problemas de infiltrações de água agressiva e conseqüente corrosão de armaduras.

2.2. CORROSÃO DAS ARMADURAS

Helene (2014) assume o termo corrosão como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, como resultado de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de deterioração.

A corrosão das armaduras caracteriza-se por ser um processo físico-químico gerador de óxidos e hidróxidos de ferro, denominados de produtos de corrosão, que ocupam um volume significativamente superior ao volume original das barras metálicas (HELENE, 2014).

De acordo com Gentil (1996), o mecanismo de corrosão nos metais pode ocorrer basicamente de duas formas. A primeira está relacionada com a corrosão de caráter puramente químico chamada de oxidação, o fenômeno vai acompanhado de uma perda de elétrons por parte do metal. Tal reação ocorre por uma reação gás/sólido na superfície do material, e é caracterizada pela formação de um filme delgado de produtos de corrosão na superfície do metal.

A segunda forma é chamada de corrosão eletroquímica que é o tipo de deterioração observada das estruturas de concreto armado, sempre na presença de água. Esse fenômeno de natureza expansiva pode levar ao aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando a fissuração e o posterior rompimento do revestimento do material (HELENE, 2014).

De acordo com Ribeiro (2014) as formas mais comuns de corrosão eletroquímica que as armaduras podem sofrer são:

- Corrosão uniforme: corrosão em toda a extensão da armadura quando esta fica exposta ao meio corrosivo;
- Corrosão puntiforme ou por pite: os desgastes são localizados sob a forma de pequenas cavidades, também chamadas alvéolos.

Andrade (2001) explica que o mecanismo de corrosão eletroquímica é baseado na existência de um desequilíbrio elétrico entre metais diferentes ou entre distintas partes do mesmo metal, configurando o que se chama de pilha de corrosão ou célula de corrosão, conforme pode-se observar na Figura 3.

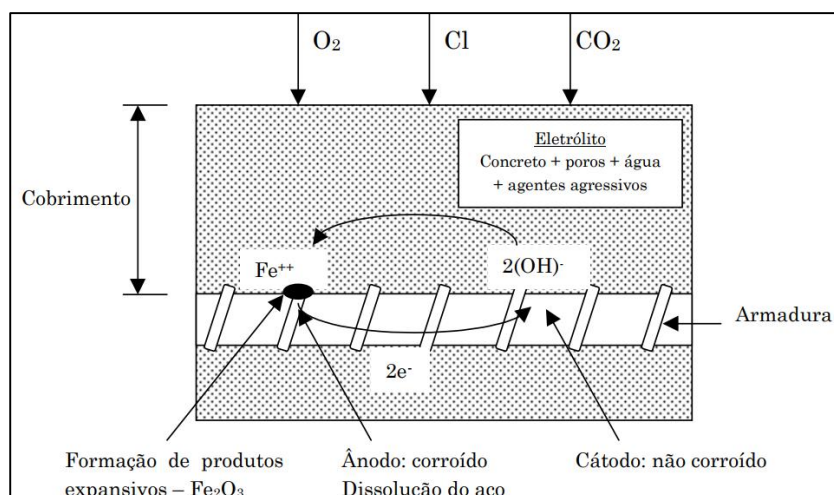


Figura 3. Modelo de corrosão das armaduras no concreto (ANDRADE, 2001)

Segundo Helene (1993), as armaduras inseridas nos componentes estruturais de concreto normalmente encontram-se protegidas da corrosão devido à alta alcalinidade deste material (pH entre 12,7 e 13,8). Esse nível de pH favorece a formação de uma camada passivante compacta e aderente sobre a superfície da armadura, protegendo a mesma de qualquer sinal de corrosão, desde que as condições de potencial de pH mantenham-se estáveis. No entanto, esta passividade pode ser destruída pela penetração de agentes agressivos que podem alterar as condições acima referidas, com a alteração do pH junto à armadura de forma generalizada ou pontual.

O problema da corrosão metálica é bastante significativo: estima-se que cerca de 5% da receita de uma nação industrializada são gastos na prevenção da corrosão e na manutenção ou substituição de produtos perdidos ou contaminados como resultado de reações de corrosão. De acordo com a NACE International (National Association of Corrosion Engineers), os custos diretos associados à corrosão na economia americana foi estimado em 276 bilhões de dólares, correspondendo a 3,14% do PIB. Os custos indiretos foram considerados na mesma ordem de grandeza aos custos diretos, totalizando, assim, 552 bilhões de dólares, correspondendo a 6% do PIB (HELENE, 2014).

O mecanismo de corrosão das armaduras pode ser representado através do modelo proposto por Tuutti (1982), conforme esquematizado na Figura 4, onde o pesquisador subdivide o processo corrosivo nas etapas de iniciação e propagação.

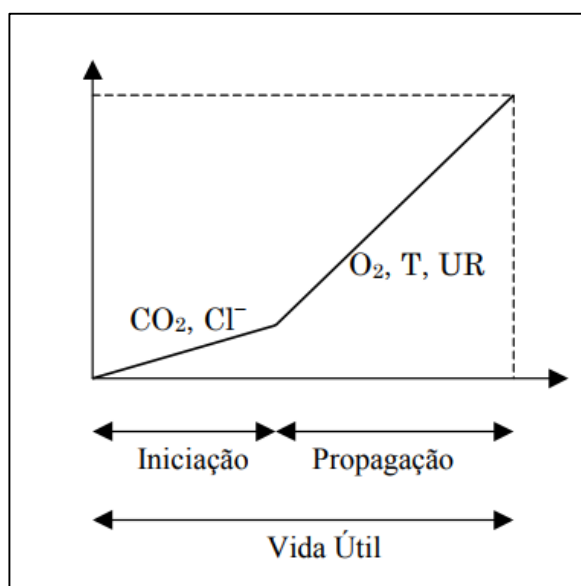


Figura 4. Modelo de vida útil para estruturas atacadas pela corrosão de armaduras (TUUTTI, 1982)

2.2.1. Iniciação da Corrosão

Define-se o período de iniciação como o intervalo de tempo necessário para que os diversos agentes agressivos penetrem através do revestimento do

concreto até atingir as armaduras. Quando uma certa quantidade destes elementos chegam até o nível das barras provocam a despassivação das mesmas, isto é, ocorre a quebra da camada protetora existente (ANDRADE, 2001).

Conforme Helene (2014), a perda da passividade natural da armadura do concreto pode ser ocasionada pela presença de íons cloreto em quantidades suficientes para destruir de forma localizada a camada passivadora ou pela redução do pH do concreto devido ao efeito da carbonatação.

Segundo estudos de Gonzalez *et al.* (1996), no caso da ação de cloretos, a dissolução da camada de óxidos é pontual e ocorre quando há algum oxigênio e existem fissuras ou algum tipo de heterogeneidade geométrica na interface aço-concreto. O início do processo de despassivação ocasionado pelos íons cloreto ocorre, em geral, por meio de uma aeração diferencial nas fissuras que resulta em uma acidificação local gradual até que a camada passivadora seja destruída.

Santos (2006) lembra que a despassivação da armadura também pode ser provocada pela carbonatação do concreto. Nesse caso, a despassivação ocorre de forma generalizada em função da redução da alcalinidade do concreto nas regiões próximas à armadura. A redução da alcalinidade ocorre devido à penetração de substâncias ácidas, como o dióxido de carbono (CO_2), o gás sulfídrico (H_2S) e o dióxido de enxofre (SO_2) no concreto e à sua reação com os hidróxidos alcalinos presentes na solução dos poros.

O processo de iniciação da corrosão envolve, além da despassivação da armadura, o mecanismo de transporte dos íons cloreto e do CO_2 através da rede de poros do concreto e as suas interações com as fases sólidas do cimento. Nesse sentido, são importantes as características da estrutura dos poros e a capacidade de fixação dessas substâncias (SANTOS, 2006).

Para Helene (2014), outro fator importante de influência na iniciação da corrosão é a fissuração do concreto. As fissuras no concreto constituem um caminho rápido de penetração dos agentes agressivos até a armadura e facilitam o acesso do oxigênio e da umidade, fatores necessários à iniciação da corrosão.

2.2.2. Propagação da Corrosão

Após a despassivação da armadura, o desenvolvimento do processo de corrosão depende de diversas condições termodinâmicas, que determinam a intensidade e a velocidade da corrosão. Assim o teor de umidade do concreto é o principal parâmetro de controle deste processo (FIGUEIREDO; HELENE; ANDRADE, 1993).

O período de propagação está associado ao período de tempo (t_1 , t_2 ou t_f) que corresponde ao tempo até a ocorrência de uma deterioração significativa, tanto do ponto de vista estético quanto de segurança, podendo ser o tempo correspondente ao aparecimento de manchas de produtos de corrosão, ao aparecimento de fissuras, à ocorrência de destacamentos do concreto de cobrimento ou até à ruptura parcial ou total da estrutura (CARMONA, 2005).

De acordo com Tuutti (1982), as velocidades de corrosão máximas ocorrem em concretos com elevados conteúdos de umidade (porém não saturados), nos quais o oxigênio pode chegar livremente até a armadura, e a resistividade é suficientemente baixa para permitir elevadas velocidades de reação.

3. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA, DOCUMENTAL E TESTEMUNHAL

Como já dito anteriormente, a década de 1980 teve participação massiva em estudos sobre a durabilidade do concreto. Sob a perspectiva de que o assunto deveria ser abordado o mais cedo possível, ainda em fase de projeto, W. R de Sitter, em 1984, publicou o artigo “*Costs for service life optimization “The Law of Fives”*”, reforçando ainda mais a importância da temática.

A “Lei dos Cincos” ou “Lei de Sitter”, popularmente conhecida, é uma progressão geométrica de razão 5 acerca de custos de intervenção. Conforme será retratado, o artigo original propõe que a regra seja aplicada ao processo de corrosão das armaduras, baseado no estudo de Kyosti Tuutti.

3.1. SISTEMATIZAÇÃO DA PESQUISA

Para organizar e apresentar a ideia, tendo em vista a distinção da pesquisa realizada, foi desenvolvida uma sistematização a partir de um fluxograma de simples entendimento. Em suma, a Figura 5, se caracteriza pela organização de dados, etapas e conceitos do presente trabalho, que resulta numa reflexão e estruturação do raciocínio.

O fluxograma explora o melhoramento de um método, e que busca interpretar os caminhos percorridos durante a pesquisa com o intuito de atingir o objetivo principal.

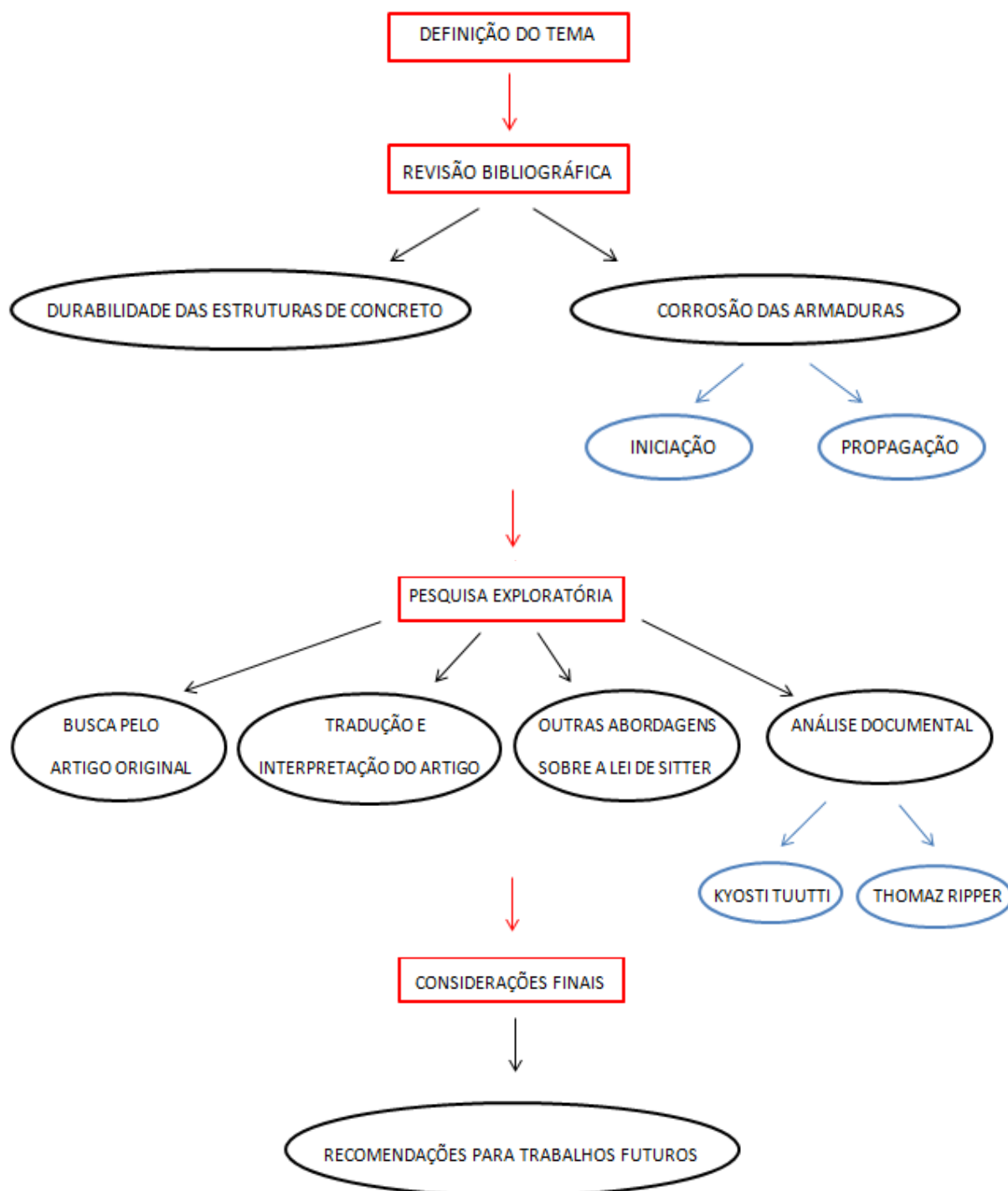


Figura 5. Sistematização da pesquisa (AUTORES, 2018)

3.2. ARTIGO COMENTADO

“One of the main reasons for the increase in interest in the subject of durability of concrete is the regrettably frequente occurrence of damage due to corrosion of reinforced steel”.

O início do artigo busca trazer razões que contribuíram para o grande número de pesquisas realizadas sobre a durabilidade do concreto, sendo a principal causa a frequente ocorrência de casos de corrosão de armaduras.

“Tuutti has introduced the concept which is reproduced in figure 1. The vertical axis indicates the loss of material (steel) and the damage criterium Δ ”. Em sequência, o autor introduz o conceito desenvolvido por Tuutti, em que é relacionada a perda de seção do aço e um critério de dano.

“During the initiation time (t_0) there is no corrosion and during the propagation time (t_1) the corrosion proceeds towards the critical level Δ . The sum ($t_0 + t_1 \approx t_2$) may be interpreted as the lifetime”.

Neste parágrafo supracitado é apresentado o conceito de vida útil (t_2), sendo ela a soma de t_0 (período onde não há corrosão) e t_1 (onde a corrosão avança até um nível crítico).

Of course the situation of the concrete in the exposed parts of a structure will differ from point to point. In the context of the present argument it is assumed however that figure 1 shows a picture which is representative for the whole structure in question.

A seguir, de Sitter deixa claro que a estrutura possui diferentes exposições e, portanto, sua vida útil será distinta ponto a ponto. Porém, assume que o comportamento é representativo para toda a estrutura em questão.

“Now we can distinguish four different fases A through D in the corrosion/time model according to figure 1”.

Conforme observado na Figura 6, o modelo da corrosão ao longo do tempo é diferenciado em 4 fases, sendo de A a D.

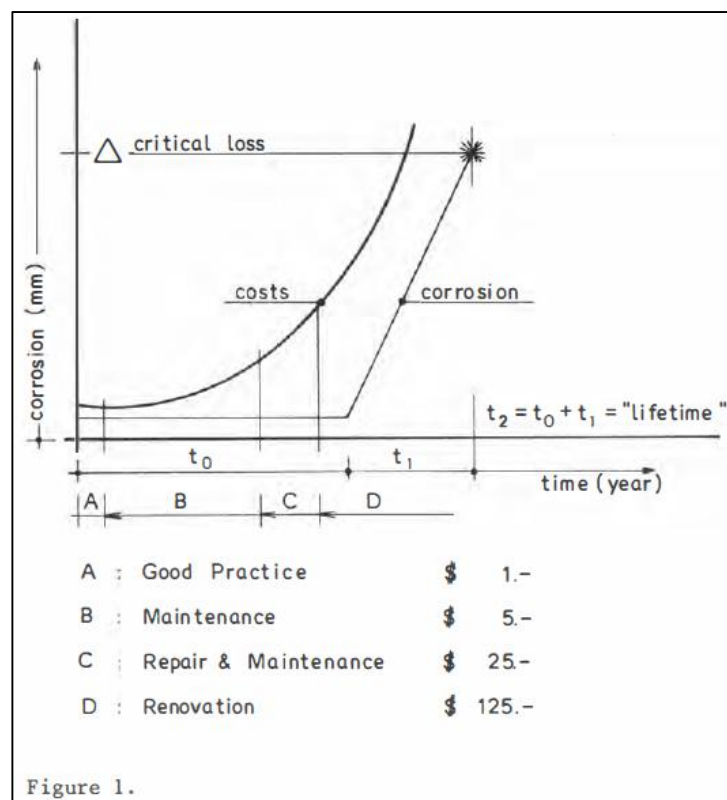


Figura 6. Curva corrosão x tempo (SITTER, 1984)

fase A: The first fase consists of the design-, construction- and curing-period. In this case we can achieve a certain desired level of durability with respect to lifetime by taking measures with respect to:

- *Design (cover; mix; spacing of reinforcement; ... etc.)*
- *Construction (placement; compaction; mix; workmanship; ... etc.)*
- *Curing and Protection*
- *Protective coatings*
- *Quality Control*

These aspects may be summarized by the concept of "Good engineering practice".

Fase A seria o período de desenho, construção e cura. Segundo Sitter, é possível alcançar um determinado nível de durabilidade desejado em relação à vida útil, tomando medidas com relação a:

- Projeto;
- Construção;
- Cura e proteção;
- Revestimento protetor;
- Controle de qualidade.

Em resumo esse conceito é conhecido pelas “Boas práticas de engenharia.”

fase B: In this fase some carbonation has taken place and maybe chlorides and/or aggressive agents have penetrated into the cover. We may still achieve the desired lifetime by taking measures such as:

- *Cleaning*
 - *Coating and/or impregnation*
- Local increase of cover by gunniting.*

Nessa fase ocorreu alguma carbonatação e talvez cloretos e/ou agentes agressivos penetrem na cobertura.

Pode-se alcançar o tempo de vida desejado tomando medidas como:

- Limpeza;
- Revestimento e/ou impregnação;
- Aumento local do cobrimento por concreto projetado.

fase C: Now the carbonation front has reached the reinforcement at a number of spots. Corrosion has started locally and the cover has started to spall.

To ensure the continued use of the structure during the desired lifetime we must take measures of the following kind:

- *Removal of bad concrete*
- *Gunniting*
- *Coating*

These measures may be indicated by “Repair and Maintenance”.

Agora a frente de carbonatação atingiu o reforço em vários pontos e, assim, a corrosão iniciada localmente começou a espalhar. Para assegurar o uso continuado da estrutura durante a vida desejada tomar medidas do seguinte tipo:

- Remoção do concreto ruim;
- Cobertura de concreto;
- Revestimento.

Essas medidas são indicadas como: Reparo e Manutenção

fase D: The reinforcement has started to corrode in large area. The cover has spalled in many places, cracking is occurring on a large scale. The structure can be saved only by taking major measures.

- *Almost complete renewal and replacement of the cover*
- *Demolition, removal and replacement of parts of the structure.*

The measures constitute:

“Major repairs and renovation”.

Para a fase D tem-se corrosão das armaduras em grandes áreas. Cobrimento de concreto deslocado em muitos trechos da estrutura e fissuração em larga escala. A estrutura só pode ser salva tomando medidas importantes:

- Renovação e substituição quase completa do cobrimento;
- Demolição, remoção e substituição de partes da estrutura.

As medidas constitui: grandes reparações e renovações.

With respect to costs the author has recklessly introduced the “Law of Fives”, stating that: “One dollar spent in fase A equals five dollars in fase B equals twenty-five dollars in fase C equals a hundred and twenty-five dollars in fase D”.

Neste trecho o autor do artigo introduz imprudentemente, conforme suas próprias palavras a “Lei dos Cincos”, afirmando que: Um dólar gasto na fase A é igual a 5 dólares gastos na fase B que é igual 25 dólares na fase C e é igual a 125 dólares na fase D.

Sitter se apoia no modelo de propagação da corrosão desenvolvido por Tuutti e realiza uma citação de grande força semântica, porém, como pôde ser notado, não a sustenta com uma base de dados.

Meaning that the same lifetime may be achieved by a little extra attention to “Good engineering practice” in fase A, costing \$ 1, - per unit area, as costly measures in fase C with respect to “Repair and Maintenance” costing maybe \$ 25, -. The cost-curve in relation to the different fases A through D is also indicated in figure 1.

Nesse momento Sitter reforça a ideia de que uma atenção extra nas “Boas práticas de engenharia” custa apenas \$1 por unidade de área, enquanto para essa mesma unidade de área os custos com a etapa de “Reparo e Manutenção” seria correspondente a \$25.

Of course the figures in dollars must not be taken too exactly. However, the serve to indicate where the focus of attention should be; the fases A and B.

Apesar da citação da regra nos parágrafos anteriores, o autor agora explica que os valores apresentados podem não ser exatamente aqueles. Contudo, é uma ótima indicação de onde deve ser o foco do meio técnico: nas fases A e B.

Much attention has been given by many firms active in the field of repair and renovation to measures which they are prepared to undertake, at high costs, in the cases where the deterioration has progressed to the phases C and D.

Com base no que foi dito acima, as atenções deveriam estar nas fases A e B, porém Sitter critica a preocupação de muitas empresas em buscar medidas no campo de “Reparo e Renovação”, onde a deterioração já avançou para as fases C e D, e os custos de intervenção serão maiores.

It is high time that engineers working in scientific institutions, engineering consultants and contractors take up the challenge and concentrate on phases A and B.

- Quality Control and intelligent Codes and Rules should be able to ensure “Good engineering practice”

Inspection and maintenance techniques must be developed and introduced to ensure that existing structures do not progress into the phases C and D.

Por fim, o autor salienta que já passou da hora de engenheiros trabalharem em conjunto com instituições científicas, consultores e construtoras, assumindo o desafio de concentrar-se nas fases A e B de um projeto.

Sitter recomenda que sejam pensados métodos de controle de qualidade e que sejam desenvolvidos guias e códigos bem elaborados para garantir as “Boas Práticas de Engenharia”. Além de incluir conceitos como técnicas de inspeção e manutenção preventiva, assunto ainda pouco citado até a década de 1980, contudo, importantes para evitar que as estruturas evoluam para as fases C e D.

“Money may be saved which could be used for better purposes:”

O autor finaliza dizendo que, desta forma, o dinheiro pode ser economizado para ser utilizado em melhores propósitos.

3.3. OUTRAS ABORDAGENS SOBRE A LEI DE SITTER

Neste item do trabalho são apresentadas diversas citações e interpretações sobre o trabalho de Sitter por importantes pesquisadores e docentes,

onde, de certa forma, cada um traça suas interpretações conforme o avanço de estudos a respeito do assunto.

É importante perceber que ao descrever a “Lei dos Cincos”, de Sitter usa como base o modelo de propagação da corrosão de armaduras, contudo, nos dias atuais tem-se conhecimento de diversos outros mecanismos de degradação de estruturas de concreto.

Diante desse contexto, Helene (1992) descreve que se elementos deficientes geradores de manutenção e as intervenções preventivas necessárias ao longo da vida útil da edificação forem antevistos na etapa de projeto, os custos com manutenção podem ser minimizados, conforme demonstra a Lei de Sitter. Segundo essa lei, os custos devidos a intervenções tardias em estruturas ascendem em projeção geométrica de razão 5 (cinco) em relação aos custos com medidas preventivas adotadas na etapa de projeto.

Apesar dos custos descritos terem caráter genérico e aproximados, esta lei é aceita como indicativa do potencial de gastos que podem ser evitados quando se previnem os danos, desde o princípio, e quando se intervém a tempo através da manutenção preventiva (ROSTAM *apud* CASTRO, 1994).

Conforme Andrade (1997), quando a estrutura começa a perder a sua funcionalidade em função de algum tipo de deterioração, pode haver a necessidade da realização dos reparos ou reforços, dependendo da gravidade da degradação. Cabe salientar que, à medida que os danos evoluem, os custos necessários para as correções dos mesmos aumentam exponencialmente, através da chamada Lei de Sitter ou Lei dos Cinco.

Ainda segundo o autor, cada dólar gasto por unidade de área construída empregado corretamente na etapa de projeto das estruturas corresponde a 5 dólares gastos nas atividades de manutenção. No caso de reparos em pequenas extensões tal valor sobe para 25 dólares e, no caso dos grandes reforços, substituições e/ou demolições o valor chega a 125 dólares.

De acordo com Helene (1997), o significado da “Lei dos 5”, ou regra de Sitter, Figura 7, pode ser assim exposto, conforme a intervenção ocorra na:

- a. **Fase de Projeto:** toda medida tomada em nível de projeto com o objetivo de aumentar a proteção e a durabilidade da estrutura, como, por exemplo, aumentar o cobrimento da armadura, reduzir a relação água / cimento do concreto ou aumentar o f_{ck} , especificar certas adições, ou tratamentos protetores de superfície, e outras tantas implica um custo que pode ser associado ao número 1 (um);
- b. **Fase de Execução:** toda medida extra projeto, tomada durante a fase de execução propriamente dita, implica um custo cinco vezes superior ao custo que acarretaria tomar uma medida equivalente na fase de projeto, para obter-se o mesmo nível final de durabilidade ou vida útil da estrutura. Um exemplo típico é a decisão em obra de reduzir a relação água / cimento para aumentar a durabilidade. A mesma medida tomada na fase de projeto permitiria o redimensionamento automático da estrutura considerando um novo concreto de resistência à compressão mais elevada, de maior módulo de deformação e de menor fluência. Esses predicados permitiriam reduzir as dimensões dos componentes estruturais, reduzir as formas e o volume de concreto, reduzir o peso próprio e reduzir as taxas de armadura. Essas medidas tomadas em nível de obra, apesar de eficazes e oportunas do ponto de vista da vida útil, não mais podem propiciar economia e otimização da estrutura;
- c. **Fase de Manutenção Preventiva:** as operações isoladas de manutenção do tipo; pinturas frequentes, limpezas de fachada sem beirais e sem proteções, impermeabilizações de coberturas e reservatórios mal projetados, e outras, necessárias a assegurar as boas condições da estrutura durante o período da sua vida útil, podem custar até 25 vezes mais que medidas corretas tomadas na fase

de projeto estrutural ou arquitetônico. Por outro lado podem ser cinco vezes mais econômicas que aguardar a estrutura apresentar problemas patológicos evidentes que requeiram uma manutenção corretiva;

- d. **Fase de Manutenção Corretiva:** corresponde aos trabalhos de diagnóstico, reparo, reforço e proteção das estruturas que já perderam sua vida útil de projeto e apresentam manifestações patológicas evidentes. A estas atividades pode-se associar um custo 125 vezes superior ao custo das medidas que poderiam e deveriam ter sido tomadas na fase de projeto e que implicariam um mesmo nível de durabilidade que se estime dessa obra após essa intervenção corretiva.

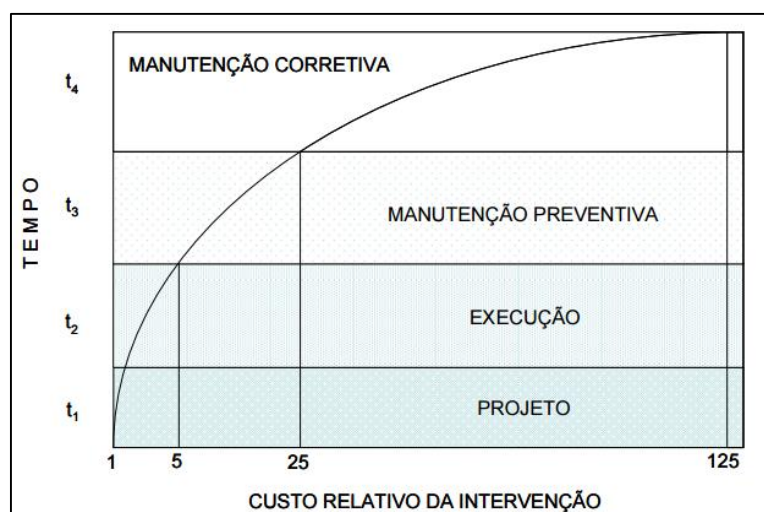


Figura 7. Evolução dos custos de intervenção em função da fase da vida da estrutura (Comitê CT 301, 2003)

Ripper e Custódio (1998) dizem que será fundamental o estabelecimento, no seu devido tempo, de uma correta estratégia de manutenção, ou, quando isto não tiver sido possível, da época apropriada para se levar a cabo as operações de recuperação, para que não se incorra no erro de maximizar os custos com a manutenção estrutural, como explica Sitter (C.E.B. – *Design Guide for concrete durable structures*), na famosa “Lei dos Cincos”.

Laner (2001) diz que quando se trata de custos, considerando a regra de Sitter pode-se afirmar como sendo obras que, na sua maioria, estão na fase de iminência de manutenção corretiva, o que significa dizer que o custo de intervenção, definido pela referida regra, ficaria em torno de 125 vezes o custo das medidas que poderiam e deveriam ter sido tomadas na fase de projeto. No entanto, se proceder a manutenção preventiva, pode ser gasto 5 vezes menos do que aguardar as estruturas apresentarem problemas patológicos evidentes que requeiram uma manutenção corretiva.

Tendo identificado os mecanismos de deterioração, deveria ser possível fazer uma análise do custo do ciclo de vida. No entanto, existem outros parâmetros que influenciarão os resultados. Os custos de ativos, sem dúvida, dependerão do tipo dos mesmos e a modelagem econômica precisa envolver a determinação de todos os custos atribuíveis a cada estágio. Assim, o conceito e o estágio de projeto podem incluir custos relacionados a: estudos de viabilidade, pesquisa, planejamento, programação, projeto básico e detalhado e documentação. Na fase de construção: a licitação, fabricação, construção, administração de contratos, controle de qualidade, garantia de qualidade e financiamento, contribuem para os custos (FIB, 2002).

Além das considerações financeiras, há também aqueles associados a fatores ambientais. Deve estar ciente de que, à medida que o ciclo de vida da estrutura prossegue através do conceito e do projeto, construção, operação e uso e as fases de disposição, a influência nos custos do ciclo de vida é progressivamente reduzida conforme conceitualizado na Figura 8. Isso enfatiza a importância do conceito e das fases de planejamento e projeto (FIB, 2002).

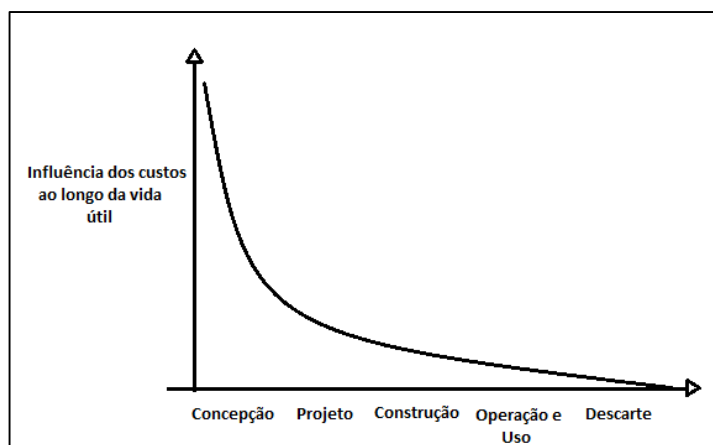


Figura 8. Influência das principais fases da vida do ativo nos custos totais do ciclo de vida (FIB, 2002)

Os mesmos princípios são expressos no bem conhecido "*de Sitter's Law of Fives*": "US \$ 1 passou a obter a estrutura projetada e construída corretamente, é tão eficaz quanto \$ 5 gastos na manutenção preventiva subsequente na fase de pré-corrosão enquanto a carbonação e os cloretos estão penetrando para dentro do reforço de aço. Além disso, este \$ 1 é tão efetivo como US \$ 25 gasto em reparo e manutenção quando ocorre corrosão ativa local e isso é tão efetivo como US \$ 125 gasto onde ocorre a corrosão generalizada e onde são necessárias grandes reparações, possivelmente incluindo a substituição de membros completos .

Helene e Figueiredo (2003) relatam que aproximadamente 68% das manifestações patológicas, em estruturas de concreto, são causadas por falhas nas fases de planejamento e projeto. Uma vez que os resultados dos ensaios para a avaliação do potencial reativo dos agregados não sejam confiáveis, a escolha de materiais a serem utilizados na confecção de concretos estruturais seria prejudicada, não permitindo ações eficazes para a mitigação da reação deletéria.

Os custos das medidas de intervenção em estruturas crescem em projeção geométrica de razão 05 (cinco), quando adiados em relação ao custo de uma medida preventiva na etapa de projeto (HELENE & FIGUEIREDO, 2003).

Os altos custos associados a intervenções corretivas não deixam de ser um fator que justifique este tipo de estudo, fato já alertado na década de 1980 por

Sitter, que mostrou os altos custos envolvidos nessas intervenções em estruturas de concreto (PEÑA & HELENE, 2005).

Em geral, os problemas patológicos são evolutivos e tendem a se agravar com o passar do tempo. A demora em iniciar a manutenção de uma obra torna os reparos mais trabalhosos e onerosos, portanto, é possível afirmar que as correções dos problemas provocados pelas manifestações patológicas serão mais duráveis, mais fáceis de executar e muito mais econômicas, quanto antes elas forem feitas (PEÑA & HELENE, 2005).

Medeiros (2008) afirma que a deterioração prematura das estruturas de concreto armado devido à corrosão de armaduras tornou-se um dos maiores problemas da construção civil nos últimos anos. Sitter (1984) *apud* Helene (1993) na sua consagrada “lei dos cinco” mostra que o custo destas intervenções pode chegar a ser superior ao da construção da estrutura nova, devido ao elevado custo de uma intervenção para aumentar a durabilidade de uma estrutura no período de manutenção corretiva. O impacto econômico de serviços de manutenção e reparo pode ser representativo na economia de um país, onde verifica-se que alguns países europeus gastam por volta de 50% do que investem em construções e serviços de manutenção e reparo (UEDA & TAKEWAKA, 2007).

3.4. ANALISE DOCUMENTAL

Visto a influência de Tuutti na publicação de “*The Law of Fives*” foi estabelecido um contato com o pesquisador, via e-mail, para investigar se algum trabalho haveria sido utilizado como base para o desenvolvimento do artigo de Sitter e entender quais os procedimentos e coeficientes foram adotados para conclusão da lei. Obteve-se sucesso com o contato e o texto foi transcrito abaixo.

*Dear Scientists,
I have not been active in research the past 20 years as I had a role as
Research Director for a huge company.*

Your request about costs for different fases would not be accurate as everything depends on why the structure would be deteoriated.

I would like to give two experiences:

1) A long bridge was constructed and finished 1972 and we could see serious problems with corrosion of reinforcement 1981. The reason for this was a low quality concrete as the authorities thought that the cost could be reduced by less cement and a higher water cement ratio. All other bridges had higher quality and we did know that the service life for those were 50 years before repair were needed. This decision lowered the cost by 1 million SEK and the total cost for the bridge was 70 million SEK. The maintenance and repair started about 1990 and the cost for that became 500 million SEK. However, we had during that period increasing construction costs and the value of SEK was reduced, 1 SEK 1972 was equal to 4,4 SEK 1990.

2) We have problems with corrosion in concrete garage slabs. Normally the service life of a specific quality would be 20 to 30 years with cars driving on concrete slabs without a water barrier. By installing a water barrier on top of the slab and a protecting material on the barrier (bitumen or concrete) the service life will be 200 years for the slab. Such a barrier and the different design would increase the cost for the garage by 2 to 3 % of the total cost. Smart solutions are important and we need to know mechanisms of deterioration and how to avoid problems.

This is two specific examples and demonstrates the problem to answer your question. However, we always know that repair actions are much more difficult to execute with higher costs than construction of a new building.

I wish you both a successful continuous life.

Best regards

Kyosti Tuutti

Segue a tradução:

Caros cientistas,

Eu não estou ativo na pesquisa acadêmica nos últimos 20 anos, já que eu desempenhava o papel de Diretor de Pesquisa para uma grande empresa.

Seu pedido de custos para diferentes fases não seria preciso, pois tudo depende do por que a estrutura foi deteriorada, portanto, qual seria o mecanismo de degradação.

Gostaria de dar duas experiências:

1) Uma ponte longa foi construída e terminada em 1972 e poderíamos ver sérios problemas com a corrosão de armaduras em 1981. A razão para isso era um concreto de baixa qualidade, pois as autoridades

achavam que o custo poderia ser reduzido ao se utilizar menos cimento e uma maior razão de água/cimento. Todas as outras pontes tiveram maior qualidade e sabíamos que a vida útil dessas eram 50 anos antes de qualquer obra de recuperação. Esta decisão reduziu o custo em 1 milhão de SEK¹ e o custo total para a ponte foi de 70 milhões de SEK. A manutenção e o reparo começaram em 1990 e o custo para isso se tornou 500 milhões de SEK. No entanto, tivemos durante esse período o aumento dos custos de construção e o valor de SEK foi reduzido, 1 SEK em 1972 era equivalente a 4,4 SEK em 1990.

2) Temos problemas com a corrosão em lajes de garagem de concreto. Normalmente, a vida útil de uma laje de qualidade especificada seria de 20 a 30 anos com os carros trafegando em lajes de concreto sem barreira da água. Ao instalar uma barreira de água (impermeabilização) sobre a laje e um material de proteção como barreira (betume ou concreto), a vida útil passa a ser 200 anos para a laje. Tal barreira e o projeto diferente aumentariam o custo da garagem em 2 a 3% do custo total. Soluções inteligentes são importantes e precisamos conhecer mecanismos de deterioração e como evitar problemas.

Estes são dois exemplos específicos e demonstra o problema para responder a sua pergunta. No entanto, sempre sabemos que as ações de reparo são muito mais difíceis de executar com custos mais elevados do que a construção de um novo edifício.

Desejo a ambos uma longa vida bem sucedida.
Cumprimentos,
Kyosti Tuutti.

Kyosti Tuutti foi um grande pesquisador da área de corrosão, com grande relevância no meio técnico e, conseqüentemente, estudou os custos relativos a intervenções em diferentes momentos da vida útil da estrutura. Acredita-se, com isso, que suas pesquisas contribuíram diretamente para a abordagem de Sitter, porém, não foi ele o responsável pelo procedimento e embasamento que culminou na “Lei dos Cincos”.

Na continuidade, outros pesquisadores e entusiastas sobre o assunto foram contatados, via e-mail, por telefone e até mesmo pessoalmente. Tendo como principal e surpreendente resposta, a do professor português-brasileiro Thomaz Ripper, co-escritor do livro *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*, de 1998. A seguir, sua mensagem foi transcrita na íntegra:

Meus caros,

¹ SEK é a moeda vigente na Suécia, local onde Tuutti desenvolveu sua pesquisa.

Peço desculpas pela demora na resposta.

Não é bem assim. O trabalho de Tuutti é revolucionário para a durabilidade das estruturas de concreto – e para a predição da sua vida útil – na medida em que desenvolve, comprovadamente, as ideias de formação e propagação do mecanismo de corrosão.

A Lei dos Cinco é antiga, no seu estrito senso, constituindo a essência do chamado “Princípio da Discórdia”:

“All things happen in fives, or are divisible by or are multiples of five, or are somehow directly or indirectly appropriate to 5. The Law of Fives is never wrong.”.

O holandês De Sitter juntou as duas coisas num paper publicado no Boletim 152 do CEB, publicação que foi posteriormente muito bem aproveitada por Steen Rostam no “Durable Concrete Guide”, o primeiro texto a abordar a durabilidade verdadeiramente valorizado, internacionalmente.

Naturalmente os não illuminati discordarão da generalidade da afirmação, como eu próprio discordo. Mas o que interessava, na época, era valorizar a concepção das estruturas a pensar na durabilidade no mesmo pé de igualdade que a resistência, robustez, ductilidade e servicibilidade, não por mero acaso 5 vertentes...

Anexo, caso não possua, tanto a tese de Tuutti quanto o paper de De Sitter.

Abraço e boa sorte no vosso trabalho.
Thomaz Ripper.

O Princípio da Discórdia, citado por Ripper, é um texto sacro escrito por Greg Hill e Kerry Thornley do Discordianismo, religião baseada na adoração de Eris (deusa greco-romana da discórdia e da confusão). Foi publicado originalmente em uma edição limitada de apenas 5 cópias em 1965; e por anos foi distribuído como um “Clássico underground” humorístico do Absurdismo, filosofia que advém do paradoxo entre a busca individual por sentido e a falta de sentido provida pelo universo.

A “Lei dos Cincos” é resumida na página 16 do Principia Discordia: *“All things happen in fives, or are divisible by or multiples of five, or are somehow directly or indirectly appropriate to 5. the law of fives is never wrong”.*

Em tradução livre tem-se: “Todas as coisas acontecem em cinco, ou são divisíveis ou são múltiplos de cinco, ou de alguma forma, direta ou indiretamente, são apropriadas para cinco. A lei dos cinco nunca está errada”.

A Lei dos Cinco surge parecendo ser algum tipo de brincadeira estranha ou supernaturalismo bizarro, mas, com isso, pode ajudar a esclarecer a visão Discordiana, de como a mente humana funciona; Lord Omar é citado mais adiante na mesma página do Principia Discordia, dizendo: “Quanto mais atentamente eu olho para as coisas mais eu vejo a Lei dos Cinco se manifestar”.

A conjuntura naquele momento da década de 1980 proporcionou um cenário em que um trabalho, mesmo que baseado em uma conceituação filosófica, que nada tem relação com conceitos de engenharia, fosse bem aceito pelo meio técnico. Tendo tamanha força que mesmo após 34 anos de sua publicação ainda tem grande influência em trabalhos na área de patologia e durabilidade das construções.

Segundo conceituação do próprio Ripper (1998), um modelo é definido pelo conjunto de hipóteses que idealizam os diversos aspectos relevantes para o equacionamento e a solução do problema em questão. A escolha dos modelos, no campo da engenharia civil, depende mais da sua utilidade do que da sua “exatidão”. Os valores a serem considerados na escolha de um modelo podem ser de três tipos: de coerência lógica (valorização sintática), de poder descritivo (valorização semântica) e de utilidade prática (valorização pragmática).

Do ponto de vista da coerência lógica, ou da valorização sintática, os modelos são encarados como teorias que relacionam um conjunto de proposições a um conjunto de hipóteses, sendo sintaticamente correto quando esse relacionamento obedecer às regras da matemática ou da lógica.

O poder descritivo de um modelo, ou seja, sua valorização semântica, envolve as correspondências entre as variáveis do modelo e os aspectos da realidade que ele pretende descrever. Assim, necessariamente, o desenvolvimento desta valorização deve ser feito pela experimentação.

Por fim, a valorização pragmática de um modelo relaciona-se à sua utilidade prática no apoio à tomada de decisões.

3.5. PROCEDIMENTO DE PESQUISA

A Tabela 1, apresentada a seguir, expõe as ações tomadas pelos autores deste trabalho, em ordem cronológica, com o intuito de facilitar o entendimento da pesquisa e as principais referências consultadas.

Mês/Ano	Ação
Setembro/16	Problema inicial sugerido pelos autores: "Os coeficientes 1-5-25-125 da Lei de Sitter permanecem os mesmos?"
Setembro - Outubro/2016	Realizada pesquisa sobre o tema e busca pelo artigo publicado por Sitter, sem sucesso
Outubro/16	Na 1ª orientação foram expostas as dificuldades e disponibilizados pelo orientador e professor De Lucca outros contatos para novas tentativas
Novembro/16	Pesquisadores contatados: - Thomaz Ripper - Hugo Corres Peiretti - Antônio Carmona - Paulo Helene Envio do artigo original e outros materiais de apoio: Corres e Ripper
Novembro/16 – Junho/17	Investigação da “Lei dos Cincos” e autor W. R. de Sitter ²

² Prof. Ir. Wolter Reinold de Sitter (Outubro 17, 1936) graduado em engenharia civil em 1961 pela Delft University of Technology. Entre 1970 e 1997 foi empregado da H.B.G. A partir de 1980 como diretor de Desenvolvimento de Tecnologia. Em 1986, foi nomeado professor em design de estruturas em concreto na Eindhoven University of Technology. Em 1997 por ocasião da sua aposentadoria da H.B.G., de Sitter foi premiado de Oficial na Ordem de Orange-Nassau. No mesmo ano, de Sitter começou a revisar os documentos pertencentes a seu avô Willem de Sitter, nos arquivos do Observatório da Leiden University.

Mês/Ano	Ação
Junho/17	<p>Durante a 2ª orientação, em leitura mais aprimorada do material, foi constatado que o autor menciona o estudo de Tuutti, relacionado a corrosão, e coloca a lei em aspas, sugerindo citação direta.</p> <p>Com base no currículo, verificou-se que Kyosti Tuutti é membro da The Royal Swedish Academy of Engineering (IVA). Foi, então, enviado um e-mail para o vice-presidente executivo, Johan Weigelt, que retornou com o contato do pesquisador Tuutti.</p> <p>Foi encaminhado um e-mail e Tuutti respondeu explanando o seu ponto de vista sobre o tema apresentado, contudo, o pesquisador não deixou claro com que fundamento foi elaborada a regra apresentada por Sitter.</p>
Outubro/17	<p>Ainda permaneciam dúvidas com relação ao embasamento do trabalho “Lei dos Cincos”.</p> <p>Portanto, através de um novo contato com Thomaz Ripper foram discutidas possíveis abordagens do pesquisador de Sitter.</p>

Tabela 1. Representação cronológica

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentar-se-á as considerações finais deste trabalho, bem como as sugestões para novos estudos na área.

4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, refuta-se a hipótese proposta no começo deste trabalho (Item 1.3), na qual acreditava-se que o artigo de Sitter possuía grande embasamento técnico, tanto quanto estatístico. Onde, através de um levantamento grandioso, diversas informações de projetos com diferentes características teriam sido reunidas, abrangendo um cenário representativo para a engenharia civil da época. Posteriormente a isso, imaginou-se que um tratamento estatístico fora realizado, para que, ao fim, culminasse na progressão geométrica de razão 5 difundida pelo autor.

Através das informações coletadas, ficou clara a importância da década de 1980 para os estudos de durabilidade de estruturas de concreto e isso se torna relevante no momento em que inserimos o artigo de Sitter nessa análise. Como é de conhecimento mundial, as pessoas apenas dão atenção a algum assunto, quando este tema lhe produz alguma perda financeira.

Ainda nesse contexto, sabe-se que diversos trabalhos foram desenvolvidos na época: corrosão de armaduras, reação álcali-agregado, casos de fissuração, ataque de sulfatos, penetração de cloretos, entre outros. A dimensão e autoridade dessas publicações são reconhecidos até hoje, porém, para que o tema tivesse um alcance ainda maior, alguém precisava fazer um estudo sobre custos ao longo da vida útil de uma edificação.

Nesse panorama que se insere o trabalho escrito por Sitter, com muita coragem para introduzir uma Lei que une conceitos de corrosão de armaduras e um pensamento filosófico, onde tudo acontece em função de “cincos”. Desta forma, Sitter tem participação fundamental na difusão dos estudos sobre durabilidade das estruturas de concreto e após 34 anos o seu artigo continua sendo um dos mais citados por docentes, pesquisadores e estudantes da área.

Considera-se que de Sitter em seu artigo *“Costs for Service Life Optimization The “LAW OF FIVES”*”, não utilizou da coerência lógica e nem do poder descritivo. Porém, ao utilizar-se da valorização pragmática ao descrever um modelo, obteve grande sucesso em seu objetivo de demonstrar a evolução de custos pela negligente preocupação com assuntos relacionados a durabilidade em estruturas de concreto. Sendo assim, criou-se um modelo de utilidade prática, sem grandes detalhamentos, contudo muito importante no apoio à tomada de decisões na engenharia civil.

O impacto econômico de serviços de manutenção e reparo pode ser representativo na economia de um país. Tendo em vista essa posição de destaque, após a publicação de Sitter em 1984, renomados pesquisadores brasileiros fizeram interpretações sobre o a projeção que a “Lei dos Cincos” preconizou. Observa-se que houve uma maior abrangência do assunto, enquanto o foco de Sitter foi o modelo de propagação da corrosão em estruturas de concreto, as novas pesquisas abrangeram outros mecanismos de degradação das estruturas fazendo com que as etapas de vida útil fossem editadas, passando a ser dividida da seguinte maneira: projeto, execução, manutenção preventiva e manutenção corretiva (Item 4.2).

Desta forma, seguem algumas sugestões para futuros trabalhos e pesquisas.

4.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Acredita-se que a nova abordagem possui um viés correto quando se divide a vida útil de uma edificação em 4 grandes etapas, porém não são levados em conta outros fatores que interferem na suposição de um modelo. Portanto, os autores propõem duas perspectivas de análise. Sendo elas:

a) Estudo de um tipo de intervenção, por exemplo, recuperação estrutural - devido a corrosão de armaduras - em edificações de características distintas: residencial, comercial, infraestrutura e industrial. Dispondo dois cenários possíveis, os quais são apresentados no Gráfico da Figura 9.

Cenário 1 – Obra de engenharia de simples execução, sem grande complexidade em questões de detalhamento e logística e fácil liberação do local onde as intervenções serão realizadas.

Cenário 2 – Obra de engenharia complexa, com diversas considerações de trabalho em altura e espaço confinado por se tratar de uma obra em ambiente industrial, com paralisação de produção e logística de grande dificuldade.

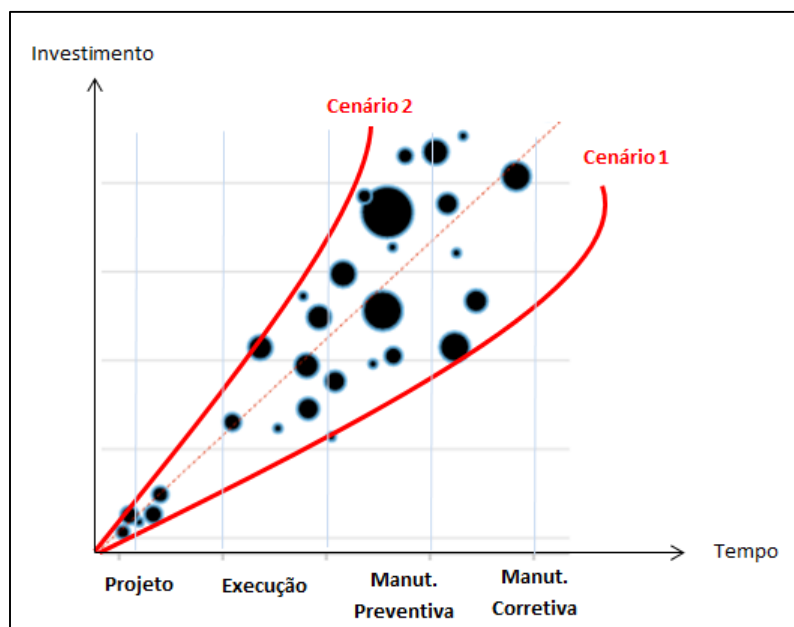


Figura 9. Proposta 1 de modelo para relacionar os investimentos realizados ao longo da vida útil de uma estrutura (AUTORES, 2017)

b) Estudo utilizando apenas uma tipologia de obra (residencial ou comercial ou infraestrutura ou industrial) e analisando as diferentes metodologias de intervenção que podem ser utilizadas. Apresentando os tipos de metodologias, podendo-se utilizar tipos mais simples e, em teoria, com menor durabilidade, até sistemas mais elaborados, como mostra o Gráfico da Figura 10.

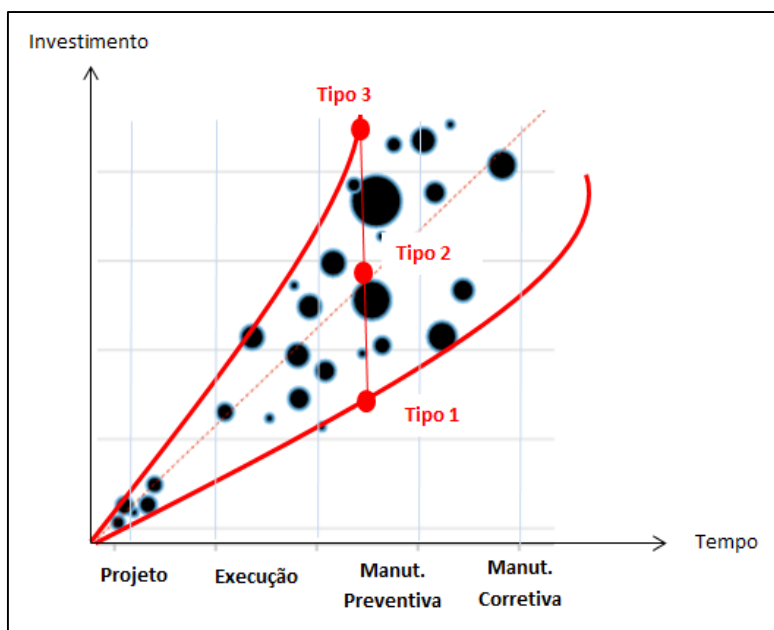


Figura 10. Proposta 2 de modelo para relacionar os investimentos realizados ao longo da vida útil de uma estrutura (AUTORES, 2017)

Sugere-se um estudo mais aprofundado dos modelos propostos no tópico anterior, onde seja realizado um levantamento de dados suficiente para representar uma maior amplitude de cenários. Imagina-se uma abordagem considerando diferentes tipos de mecanismos de degradação de estruturas de concreto e as diversas intervenções existentes, observando a característica da edificação: residencial, comercial, infraestrutura e industrial.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, T. Tópicos sobre Durabilidade do Concreto. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1ed. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 25, p. 753-92.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118/2014: Projetos de estruturas de concreto armado – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

BRANDÃO, A. M. S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1998. 149 p.

CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. São Paulo, Universidade de São Paulo - PCC. USP, 2005.

CASTRO, E. K. **Desenvolvimento de Metodologia para Manutenção de Estruturas de Concreto Armado**. Brasília, 1994. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, UnB.

FIGUEIREDO, E.J.P.; HELENE, P.; ANDRADE, C. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1993. (Boletim Técnico, n. 121).

GONZÁLEZ, J.A. et al. **Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when, how and how much steel corrodes**. Materials and Structures, v.29, jan-feb, p. 40-46, 1996.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: USP, 1993. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da universidade de São Paulo, 1993. 271p.

LANER, F. J. **Manifestações patológicas nos viadutos, pontes e passarelas do município de Porto Alegre**. Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2001.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2008.

MELHADO, S.B. **Gestão, cooperação e integração para um novo modelo voltado à qualidade do processo de projeto na construção de edifícios**. São

Paulo: 2001. 235p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MEHTA, P. K. **Durability of concrete – Fifty years of progress?** ACI-SP 125, 1991 – pp. 1-3.

RIBEIRO, D. V. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Técnicas de Análise** – Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

ROQUE, J. A.; MORENO JUNIOR, A. L. Considerações sobre a vida útil do concreto. In: **Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado**, São Paulo, nov, 2005.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 161p. Dissertação (mestrado em estrutura), Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SITTER, W. R. Costs for service life optimization. The Law of fives. In: **International CEBRILEM workshop on durability of concrete structures**. Proceedings... Copenhagen: CEBRILEM, 1984, p.18-20.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de estruturas de concreto** – São Paulo: Pini, 1998.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete. Research Institute, 1982. 469p.