"A LEI DOS CINCOS": AS REFERÊNCIAS DE SITTER

"THE LAW OF FIVES": THE REFFERENCES OF SITTER

B. A. SCARDUA
Engenheira Civil
TEX Engenharia
Espírito Santo; Brasil
brunna@texengenharia.ind.br

J. V. MARTINS
Engenheiro Civil
Recuperação Engenharia
São Paulo; Brasil
joao.v@recuperacao.com.br

M. HADDAD
Engenheiro Civil
Recuperação Engenharia
São Paulo; Brasil
michel@recuperacao.com.br

RESUMO

O estudo dos processos de degradação de estruturas e sistemas construtivos 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, 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 por W.R. de Sitter, em 1984. No entanto, em seu artigo, Sitter tratava especificamente da evolução dos custos de intervenção relacionados com as etapas de desenvolvimento da corrosão em armaduras, as quais foram separadas em 4 fases distintas, 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 artigo apresenta a pesquisa realizada através de levantamento bibliográfico e consulta a profissionais, incluindo autores de publicações internacionais como Kyosty Tuutti, cujos estudos e citações embasaram a formulação da Lei dos Cincos. O trabalho não tem como pressuposto esgotar os conhecimentos adquiridos ao longo do tempo, mas sim de contextualizar e fazer uma análise com base nos dados encontrados.

Palavras-chave: A Lei dos Cincos; De Sitter; Durabilidade do concreto; Corrosão de armaduras.

ABSTRACT

The study of the processes of degradation of structures and construction systems over the years has been of paramount importance for the knowledge of the preponderant factors for its initiation, in order to allow preventive action and, therefore, to increase the durability of the constructions. Such advances in the field of construction pathology are due, among other factors, to the costs involved in the intervention activities for the rehabilitation of these structures and systems. The main justification for cost reduction is based on the concept presented in the "Law of the Five", presented by W.R. De Sitter, in 1984. However, in his article, Sitter specifically dealt with the evolution of intervention costs related to the stages of corrosion development in reinforcements, which were separated into 4 distinct phases, namely: good practices (Good engineering practices in design and construction); Maintenance (interventions for cleaning, application of coating and increase of coverage on time); Repair and maintenance (small repairs with coating application); (Major repairs). This article presents the research carried out through bibliographical research and consultation to professionals, including authors of international publications such as Kyosty Tuutti, whose studies and citations are based on the formulation of the Law of Five.The work does not have as a presupposition to exhaust the knowledge acquired over time, but to contextualize and make an analysis based on the data found.

Keywords: The Law of Fives; De Sitter; Durability of concrete; Reinforcement corrosion.

1. INTRODUÇÃO

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).

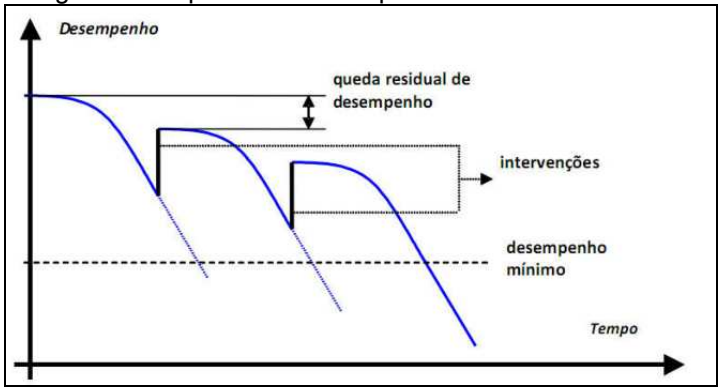
O concreto reforçado com barras de aço - concreto armado - surgiu como alternativa à alvenaria na metade do século XIX, quando as primeiras aplicações começaram na Inglaterra, França e Bélgica com Coignet e Wilkinson em 1854 e com Lambot em 1865. Este ganho de relevância se deve ao fato do contínuo progresso 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



Fonte: 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).

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 conceito 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).

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.

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.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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 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.

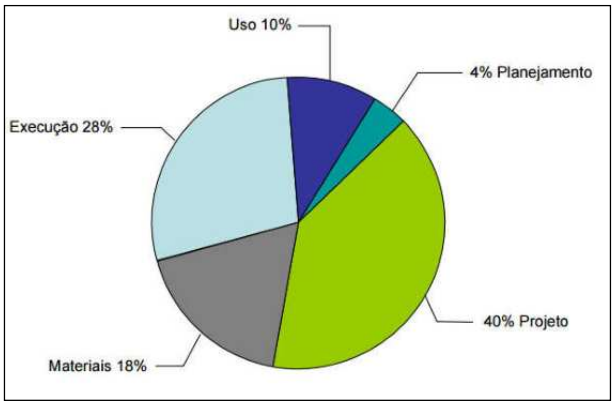
Assim, Ribeiro (2014) concorda que o concreto é considerado durável quando desempenha as funções que lhe foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade esperada durante um período previsto. Como qualquer tipo de material, a elevada durabilidade do concreto não implica em uma vida indefinida,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

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.

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



Fonte: Helene, 2014.

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. Esse fenômeno de natureza expansiva pode levar ao aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando a fissuração e o posterior rompimento do cobrimento do material.

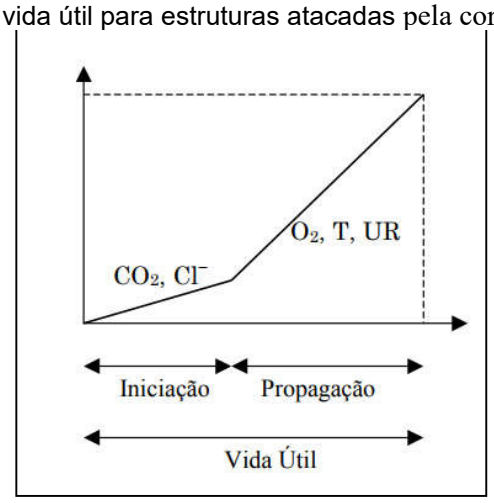
De acordo com Ribeiro (2014) as formas mais comuns de corrosão eletroquímica que as armaduras podem sofrer são: corrosão uniforme, em toda a extensão da armadura quando esta fica exposta ao meio corrosivo e; corrosão puntiforme ou por pite, em que os desgastes são localizados sob a forma de pequenas cavidades.

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 3, onde o pesquisador subdivide o processo corrosivo nas etapas de iniciação e propagação.

Figura 3 - Modelo de vida útil para estruturas atacadas pela corrosão de armaduras



Fonte: 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 cobrimento 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 (t1, t2 ou tf) 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. DESENVOLVIMENTO

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 Artigo comentado

"One of the main reasons for the increase in interest in the subject of durability of concrete is the regrettably frequente occurence 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 (t0) there is no corrosion and during the propagation time (t1) the corrosion proceeds towards the critical level Δ. The sum (t0 + t1 ≈ t2) may be interpreted as the lifetime".

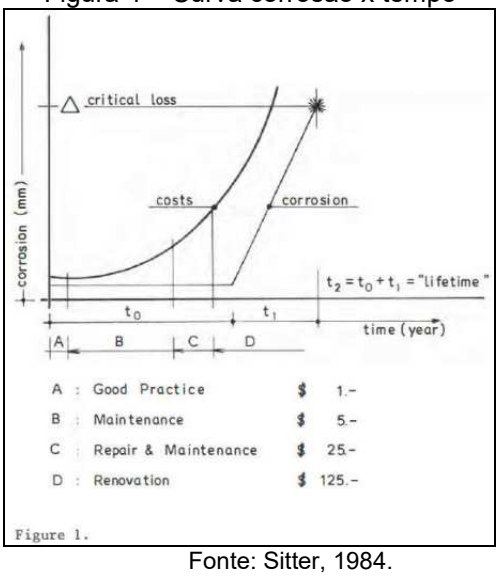
Neste parágrafo supracitado é apresentado o conceito de vida útil (t2), sendo ela a soma de t0 (período onde não há corrosão) e t1 (onde a corrosão avança até um nível crítico).

> *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 4, o modelo da corrosão ao longo do tempo é diferenciado em 4 fases, sendo de A a D.

Figura 4 – Curva corrosão x tempo



Fonte: 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.)*
- *Construcion (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 desplacado 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 ondertake, at high costs, in the cases where the deterioration has progressed to the fases 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 fases 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 fases C and D.*

Por fim, o autor salienta que já passou da hora de engenheiros trabalharem em conjunto com instituições cientificas, 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 witch could be used for better purposes." O autor finaliza dizendo que, desta forma, o dinheiro pode ser economizado para ser utilizado em melhores propósitos.

3.2 Outras abordagens sobre a Lei de Sitter

Neste item do trabalho são apresentadas 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.

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 6, 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, 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. 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 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 5 – Evolução dos custos de intervenção em função da fase da vida da estrutura



Fonte: 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*).

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.

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 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).

3.3 Análise 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 SEK[1] 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.

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

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, consequentemente, 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,
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 propoagação 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 Discordia, 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 cincos, ou são divisíveis ou são múltiplos de cinco, ou de alguma forma, direta ou indiretamente, são apropriadas para cinco. A lei dos cincos nunca está errada”.
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”.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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.

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.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

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.

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.

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.