

EMPREGO DE ARMADURAS DE AÇO INOXIDÁVEL PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Leonel Tula¹

Paulo Helene²

Resumo

O emprego dos aços inoxidáveis para garantir elevada durabilidade a determinadas estruturas de concreto armado, que ficam expostas a ambientes muito agressivos, tem sido alvo de numerosas pesquisas em alguns países da Europa e América do Norte. As pesquisas confirmam o adequado desempenho destes aços quanto às suas propriedades mecânicas iniciais e resistência à corrosão.

Neste trabalho apresenta-se uma breve revisão bibliográfica atualizada sobre o tema e a metodologia experimental de uma pesquisa que está sendo desenvolvida no Departamento de Construção Civil da USP que tem por objetivo, avaliar o desempenho de armaduras de aço austenítico 316L. As avaliações são baseadas em ensaios de corrosão acelerada tipo imersão parcial, e corrente impressa, com presença de diferentes teores de cloretos no concreto e diferentes condições de tensão das armaduras.

1. Introdução

1.1. Importância do tema.

O concreto garante, em princípio, uma perfeita proteção contra a corrosão das armaduras nele inseridas. A alta alcalinidade da solução aquosa dos poros capilares proporciona condições para a passivação do aço carbono das armaduras convencionais. Por outro lado, o cobrimento forma uma barreira física ao ingresso de agentes externos que garante a manutenção dessas condições de passivação durante um período de tempo chamado de vida útil de projeto.

A má qualidade do concreto, problemas de execução, fissuras de qualquer que seja a origem e, a elevada umidade e a presença de cloretos na atmosfera, são entre outros as causas principais da perda de proteção. Em meios agressivos, a despassivação por carbonatação, ou por presença de cloretos, mesmo localizada, pode desencadear um processo de deterioração progressivo e sinérgico. Nestas condições bastam oxigênio e umidade disponíveis, e diferença de potenciais entre regiões da barra, para que a corrosão aconteça.

A corrosão é um processo eletroquímico que se manifesta com perda de massa e formação de produtos de corrosão. Nas armaduras de aço carbono a corrosão normalmente apresenta-se de forma generalizada com perda de seção e formação de produtos expansivos (óxidos e hidróxidos de ferro). O avanço da corrosão nas

¹ Pesquisador Doutorando, Universidade de São Paulo, Departamento de Construção Civil PCC/USP. Prof. do Instituto Superior Politécnico da Havana, Cuba. e-mail: **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

armaduras compromete a integridade do concreto de cobrimento, prejudica o conforto visual da edificação, e ameaça a segurança estrutural. Isto, porque os produtos expansivos formados não encontram espaços suficientes dentro dos poros do concreto, causando a fissuração do cobrimento, processo que em estágio avançado conduz ao descolamento.

A ação expansiva dos produtos de corrosão causam primeiro uma intensa microfissuração na interface concreto/armadura. Essa danificação da zona de contato dos dois materiais, unido à perda de seção ocorrida com a corrosão generalizada, provocam a deterioração da capacidade portante das peças estruturais, porque, diminui a carga máxima resistente das barras corroídas e a aderência entre estas e o concreto.

Segundo vários especialistas (HELENE, 1993), a corrosão das armaduras constitui um dos problema patológico que em maior medida afeta a durabilidade das obras civis, e é o problema econômico de maior importância na construção. A melhora da qualidade dos projetos, dos materiais usados, da execução e manutenção constitui a única forma de atingir um incremento na durabilidade das estruturas que se encontram nas mais diferentes condições de agressividade ambiental.

As medidas de prevenção contra corrosão têm sido abordadas por três vertentes fundamentais: a melhoria das qualidades, do ponto de vista físico-químico, do concreto de cobrimento, a proteção catódica das barras, e, mais recentemente, o emprego de novos tipos de aços e ligas metálicas para conseguir o melhor comportamento à corrosão das armaduras. Esta última vertente tem-se desenvolvido pelas limitações associadas à eficiência que ainda apresentam os métodos mais comuns de proteção, como a galvanização, a deposição epoxídica, o emprego de inibidores e a proteção catódica.

1.2. Pesquisas na área.

A pesquisa bibliográfica sobre o tema das armaduras de aços inoxidáveis levantou 38 publicações. Dessas, 29 são de carácter científico, envolvendo 56 especialistas de pelo menos nove países, entre os quais se destacam pela quantidade e profundidade das publicações os da Alemanha, Canadá, Dinamarca, EUA, Itália e Reino Unido.

Entre 1925 e 1930, apenas pouco mais de uma década da aparição dos aços inoxidáveis, foram reforçados com armaduras deste metal, os pilares da Catedral de São Paulo em Londres, que conservam-se até hoje, sem os mínimos sintomas de corrosão (COCHRANE³, 1996). Mas a primeira aplicação realmente importante de armaduras de aço inoxidável atribui-se aos países escandinavos. Entre 1967 e 1968 foram empregadas barras de aço inoxidável na construção de uma série de edifícios altos para o poder público (STAINLESS STEEL FOCUS, 1997). Aplicações posteriores abrangeram vários países principalmente em estruturas marinhas como cais, plataformas *offshore*, pontes, túneis, viadutos, suportes de restauração para prédios históricos, pontas de ancoragem em solos, juntas de concretagem, reparos localizados em obras de arte, etc (STAINLESS STEEL FOCUS, 1997). É recomendável a aplicação destes aços em peças estruturais onde não é possível garantir o

² Prof. Titular, Universidade de São Paulo, Departamento de Construção Civil PCC/USP. e-mail: **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

³ David J. Cochrane – Especialista consultante do Nickel Development Institute, Toronto, Canada.

cobrimento suficiente que exige por exemplo um ambiente com elevado teor de cloretos, e, onde se procura uma elevada vida útil de projeto com mínimos custos diretos e indiretos de manutenção.

O início das pesquisas na área aconteceu paralelamente às primeiras aplicações (FLINT, 1988; McDONALD, 1995; Nürnberger, 1996). No começo foram pesquisas prolongadas que apareceram publicadas uma década depois. Inclusive até hoje aparecem publicações (COCHRANE, 1996) com resultados de amostras de 22 anos.

No congresso de 1982 da Sociedade Inglesa do Concreto, apresentaram-se dois trabalhos tratando das aplicações práticas (PARKIN apud Nürnberger, 1996) das armaduras inoxidáveis. Estas parecem ser as primeiras publicações sobre o tema. Bem cedo em 1986, aparece na Inglaterra a norma BS 6744-86. Em 1995 McDONALD et al e em 1996 NÜRNBERGER et al, apresentam dois trabalhos que dão uma importante e oportuna contribuição ao estabelecimento do Estado da Arte das armaduras de aços resistentes à corrosão.

De modo geral observa-se nos últimos anos, um incremento do número de publicações sobre o tema e do número de firmas produtoras de barras inoxidáveis, que disputarão segundo previsões de COCHRANE, 1996, um mercado que poderia em breve atingir, nos países desenvolvidos, a ordem de 0,2% do mercado de barras para concreto armado.

A seguir resumem-se a freqüência com que foram tratados os principais aspectos de interesse em 19 trabalhos revisados com conteúdo experimental:

- Estudos comparativos: 19/19 (No de trabalhos que fazem estudos comparativos/No. de trabalhos revisados)
- Aço carbono como referência: 19/19 (Ident. acima)
- Aço de estudo - galvanizado: 2/19
- Aços de estudo - revestido com resina epóxica: 1/19
- Aço de estudo – 304 ou 304L: 7/19
- Aço de estudo – 316 ou 316L: 13/19
- Outros aços resistentes à corrosão: 8/19
- Ensaio eletroquímico: 11/19
- Ensaio físico e químico sem ensaio eletroquímico: 5/19
- Estudo de aderência concreto/armadura: 1/19
- Estudo de fissuração: 1/19
- Outros ensaios mecânicos: 6/19
- Emprego de corrente impressa: 2/19
- Ensaio acelerado de corrosão: 9/19
- Exposição natural: 12/19
- Estudos de viabilidade econômica: 4/19

1.3. Aspecto Econômico

A medida que aumentam os materiais de liga, aumenta o custo do metal. Por isso é imprescindível o estudo de viabilidade econômica para aplicar em cada caso o tipo de armadura que satisfaça melhor às condições de projeto e viabilidade econômica.

Dos dados de custos recopilados da literatura consultada (NÜRNBERGER, 1996; McDONALD, 1995; STAINLESS STEEL FOCUS, 1997), conformou-se a seguinte Tabela 1 comparativa:

TABELA 1 . Relação de custos de diferentes variantes em relação ao custo da variante com aço carbono.

Tipo de aço	Relação de custo do aço	Relação de custo inicial do projeto*
Aço carbono	1	1
Revestido com resina epóxica	1,4	1,01 – 1,02
Série do 304	5,5	-
Série do 316	6 – 9	1,06 – 1,16
Duplex	12	-

* McDONALD, 1995.

Observe-se que apesar de ser o aço 316 aproximadamente 7 vezes mais caro que o aço carbono, o aumento nos custos da edificação não passam do 16% de incremento, sendo que outros autores (STAINLESS STEEL FOCUS, 191/1997) apontam para valores bem menores, de entre 0,6 – 3% de incremento dos custos. Isto depende da massa de aço inoxidável que substitui o aço carbono em todo o projeto. Em geral estes materiais são empregados em obras com custos de execução elevados, onde o aumento do custo do aço representa só uma pequena parcela do custo total inicial.

1.4. Aspectos menos estudados das barras inoxidáveis

Segundo NÜRNBERGER (1996), existem três questões ainda abertas à investigação:

Efeito da temperatura: Efeito das temperaturas máximas atingidas durante o verão ou acidentalmente durante um incêndio, na expansibilidade térmica das armaduras dentro do concreto e, nas propriedades eletroquímicas do aço afetado.

Corrosão galvânica: Pelo elevado custo do aço inoxidável, se faz necessária a sua combinação com o aço carbono, substituindo este só nos pontos chaves da estrutura que sofrem mais intensamente o ataque dos agentes agressivos. De modo que, ambos aços ficarão ligados eletricamente no concreto formando um par galvânico.

Corrosão Sob tensão: Tipo de corrosão que pode sofrer o aço inoxidável tracionado em presença de elevados teores de cloretos, e alta temperatura.

Na realidade observam-se outros aspectos pouco definidos, que não permitem dar ainda respostas concretas as questões de definição da armadura a ser utilizada numa obra ou num determinado reparo. Vários destes aspectos são motivo de estudo num projeto que vem-se desenvolvendo no Laboratório de Corrosão da Escola Politécnica da USP desde Junho de 1996.

2. Avaliação do desempenho de armaduras de aço inoxidável para estruturas de concreto armado.

2.1. Pesquisa em andamento na EPUSP.

A rigor a avaliação da adequação do aço para armaduras passa por ensaios mecânicos, físicos e químicos. As armaduras para seu adequado funcionamento devem garantir o trabalho conjunto com o concreto e, portanto, deverão responder à avaliação da aderência concreto/armadura.

O campo de avaliação da durabilidade das armaduras no concreto é muito vasto e envolve análise da fadiga de barras de aço, da resistência ao fogo, da resistência à corrosão e dos efeitos advindos dessa corrosão tais como: redução da aderência concreto/armadura e fissuração do cobrimento.

Temas como a resistência à fadiga e resistência ao fogo, que mesmo normalizados, requerem de estudos independentes pela sua complexidade, não são alvo desta pesquisa, que concentra-se apenas no fenômeno da corrosão e suas manifestações patológicas.

A avaliação da corrosão basicamente pode ser feita mediante métodos visuais, gravimétricos e eletroquímicos. Especificamente no caso de corrosão por pites, uma análise pertinente é a observação da alteração da propriedade mecânica de resistência à tração com a evolução da corrosão.

Dentre as técnicas eletroquímicas, vale destacar o estudo Potenciodinâmico (Levantamento de Curvas de Polarização). Método destrutivo que além de fornecer informação da cinética do processo, permite fazer uma avaliação do comportamento do aço no meio em que está sendo analisado. Os registros periódicos do Potencial Eletroquímico e da Resistência de Polarização, são técnicas não destrutivas que permitem acompanhar o processo eletroquímico ao longo da pesquisa.

Para avaliar a redução da aderência com a corrosão está sendo utilizado o ensaio de Arrancamento (RILEM/CEB/FIP RC 6, 1978), e para o estudo do comportamento da capacidade máxima à tração das barras com a corrosão, o ensaio de tração de barras estabelecido pela NBR 6152.

Quanto à expansibilidade dos produtos de corrosão, este não é um tema tão aprofundado se comparado à aderência concreto/armadura. A maioria dos trabalhos neste sentido tem sido orientados a estudar a fissuração do cobrimento como consequência direta da ação provocada pelas forças de expansão gerada pelos produtos de corrosão. Empregam-se corpos-de-prova prismáticos de concreto armado. Acelera-se a corrosão das barras através de diversos agentes, induzindo-se a fissura no lado onde o cobrimento é menor. Mede-se a quantidade de fissuras e a abertura delas.

Conseguir padronizar um ensaio de expansibilidade ou de fissuração seria de grande interesse, porém podem ser utilizados ensaios comparativos para avaliar o desempenho de diferentes armaduras como os propostos nesta pesquisa, baseados nos trabalhos de ANDRADE et al (1993) e CASCUDO et al (1996).

Os métodos acelerados de corrosão empregados na pesquisa seguem as recomendações formuladas pela ASTM E 632. No caso do estudo do processo eletroquímico (Parte 1 da pesquisa) a molhagem parcial dos corpos-de-prova, e para o estudo das manifestações físico-mecânicas da corrosão (Parte 2 da pesquisa) empregou-se corrente impressa de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

A metodologia de avaliação proposta, encontra-se resumida na Figura 1 a seguir, e baseia-se nos conceitos modernos de desempenho e durabilidade.

2.2. Objetivo da Pesquisa

Estudar o desempenho das armaduras nervuradas de aço inoxidável 316L para estruturas de concreto armado, avaliando requisitos de segurança estrutural e conforto visual relacionados com a durabilidade de estruturas submetidas a ambiente com presença de cloretos.

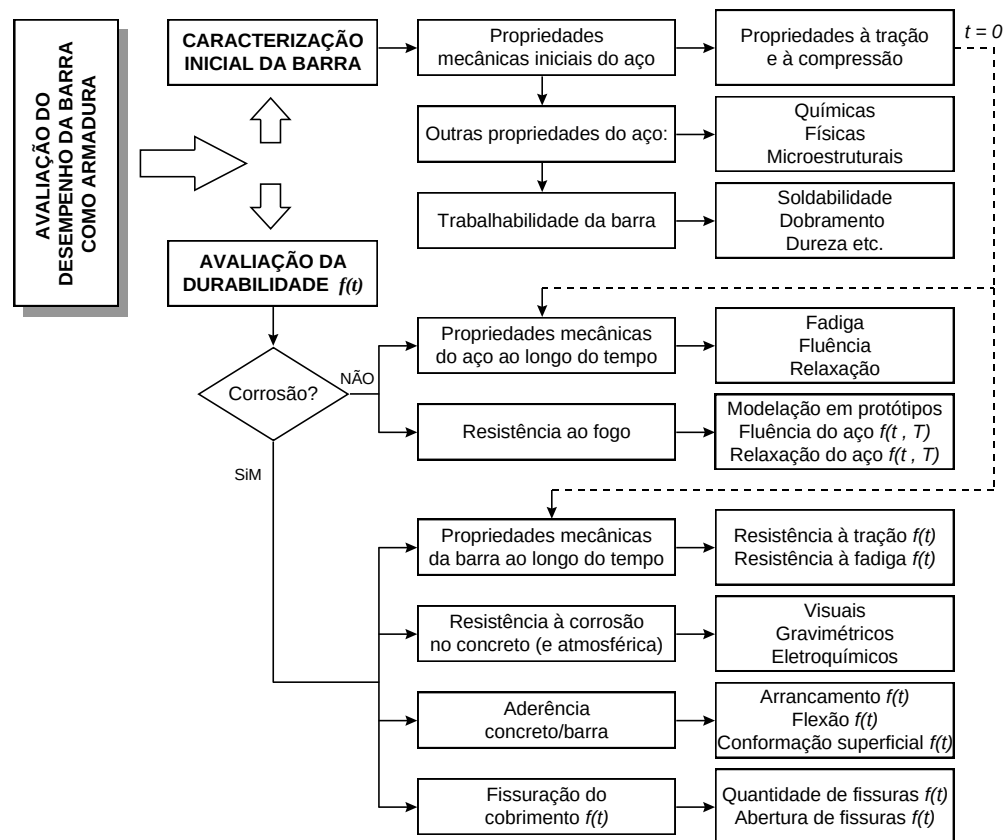


FIGURA 1. Fluxograma da metodologia de avaliação da barra destinada a armadura para concreto armado. $f(t)$ - função do tempo. $f(t, T)$ - função do tempo e da temperatura. (TULA, 1996).

2.3. Programa Experimental da Pesquisa

A fase experimental da pesquisa visa inferir o desempenho das armaduras de aço inoxidável 316L, através do estudo comparativo entre o comportamento destas barras e de barras de aço comum de construção (aço carbono) de propriedades mecânicas equivalentes⁴, ante situações que modelam condições extremas de agressividade do ambiente com presença de cloretos, e que determinam a vida útil das estruturas de concreto armado em tais condições.

A duração dos ensaios é de 60 semanas (15 meses).

As propriedades que serão alvo do estudo de desempenho são:

- A resistência à corrosão (dada através de propriedades eletroquímicas)
- A resistência à tração das barras
- A aderência concreto/armadura
- ação expansiva dos produtos de corrosão

Para melhor organização e controle dos diferentes estudos envolvidos o escopo da pesquisa é dividido em 2 partes (ver Figura 2):

Parte 1: Avaliação da resistência à corrosão através das manifestações eletroquímicas;

1.A.Avaliação das características termodinâmicas do processo

1.B.Avaliação das características cinéticas do processo

Parte 2: Avaliação da resistência à corrosão através das manifestações físico-mecânicas da corrosão das barras no concreto:

2.A.Avaliação da aderência concreto/armadura com o avanço da corrosão;

2.B.Avaliação do efeito expansivo dos produtos de corrosão.

2.C.Avaliação da resistência à tração⁵ das barras com o avanço da corrosão;

2.4. Hipóteses da Pesquisa

Em concordância com as propriedades conhecidas dos aços especiais resistentes à corrosão, e com base nos resultados publicados na literatura consultada (PANOSSIAN, 1993; TREJO, 1994, e outros) na avaliação do emprego de barras deste tipo no concreto, propõe-se as seguintes conjecturas a serem comprovadas experimentalmente:

⁴ Barras com valores de Módulo de Deformação e Limite de Escoamento similares.

⁵ Trata-se da determinação da carga máxima resistente à tração.

Hipóteses da Parte 1

1) A resistência à corrosão das barras de aço inoxidável no concreto é maior que a do aço comum CA50.

1.1. A presença de íons cloretos em determinadas condições de concentração, pH, umidade e temperatura, vai provocar a despassivação das barras de aço inoxidável no concreto.

1.2. Valores de tensão superiores ao 10% do Limite de Escoamento, poderão provocar corrosão sob tensão nas barras de aço inoxidável em presença de altos teores de cloretos.

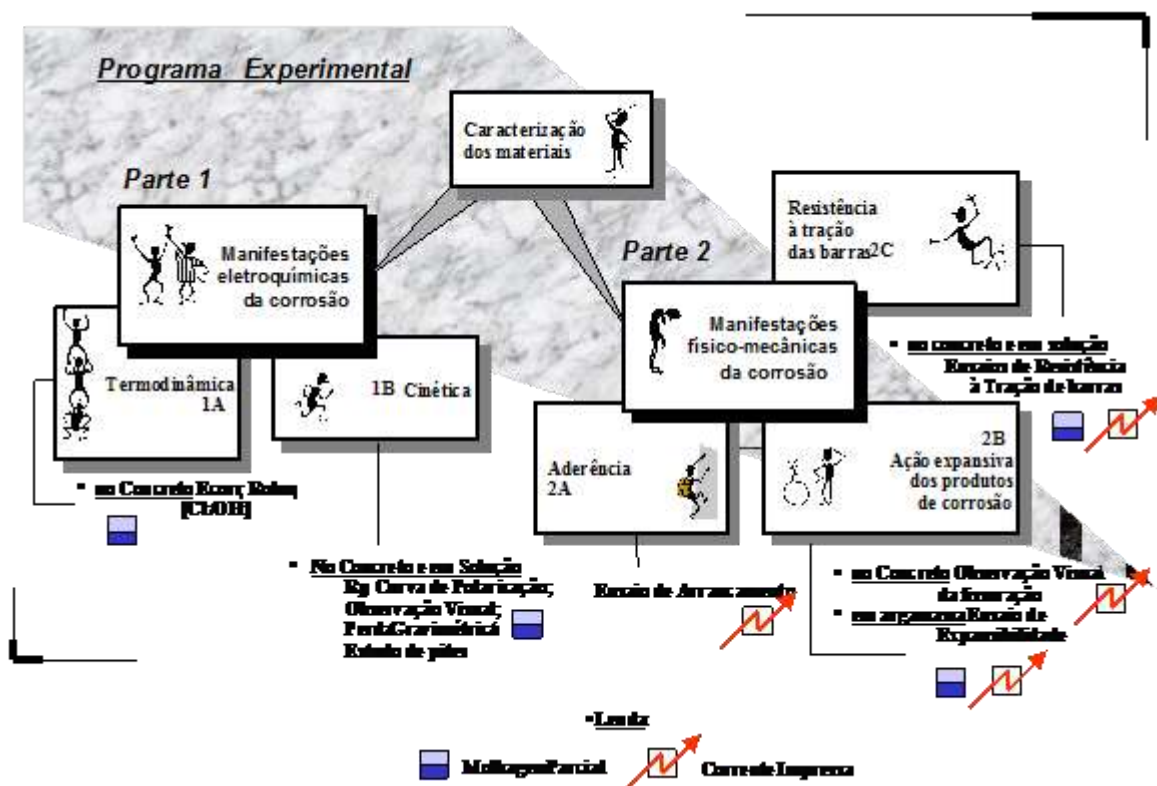


FIGURA 2. Programa experimental

1.3. A presença de zonas afetadas por altas temperaturas provocadas durante a solda por arco elétrico, poderão acelerar a deterioração por corrosão localizadas das barras de aço inoxidável.

1.4. A presença de íons cloretos, a sob tensão, os efeitos da alta temperatura devido à solda, e as combinações do primeiro com um dos outros, diminuem a resistência à corrosão das barras de aço inoxidável.

1.5. A taxa de deterioração por corrosão das barras de aço inoxidável em condições de despassivação, será muito menor que a do aço comum de construção.

Hipóteses da Parte 2

2) O desempenho à aderência durante a vida útil da estrutura das barras de aço inoxidável será superior às de aço comum.

2.1. A aderência das barras não corroídas de aço inoxidável pode ser ligeiramente inferior a do aço comum de construção CA50.

2.2. A deterioração da aderência das barras de aço inoxidável durante o processo de corrosão será pequeno em função do tipo de corrosão localizada que estará acontecendo.

2.3. A aderência das barras corroídas de aço inoxidável será significativamente superior a do aço comum de construção CA50.

3) A deterioração durante a corrosão do concreto de cobrimento das barras de aço inoxidável será menor do que no caso das barras de aço comum.

3.1. O volume ocupado pelos produtos de corrosão que se formarão nos interstícios da zona de transição será muito menor no caso das barras de aço inoxidável do que nas barras de aço carbono, provocando esforços expansivos desprezíveis. Como consequência, diminuirão as fissuras na superfície do cobrimento ⁶.

4) A perda da resistência à tração da seção das barras de aço inoxidável pela aparição de pites, será menor que nas barras de aço comum pela diminuição da seção devido à corrosão generalizada.

2.5. Variáveis Independentes da Pesquisa

No caso dos ensaios eletroquímicos de resistência à corrosão (Parte 1), trabalha-se com três variáveis independentes (ver Figura 3): o tipo de aço, o teor de cloretos no concreto, e o estado de tensão em que se estuda o aço. Nos outros ensaios que conformam a Parte 2 da pesquisa, as variáveis independentes se reduzem a duas, sendo que as barras estão todas em estado relaxado.

Considerações Finais

O trabalho em questão apresentou de maneira resumida o Estado da Arte na temática do emprego de armaduras de aços resistentes à corrosão. Nos últimos cinco anos vem-se incrementando o emprego destas armaduras, principalmente em países onde existe uma grande preocupação com o uso eficiente dos recursos investidos em obras de significativa importância econômica e social, localizadas em ambientes altamente agressivos. Com isso, pretende-se atingir níveis desejáveis de durabilidade e valores mínimos de manutenção.

⁶ Diminuindo também o efeito sinérgico que durante o processo de corrosão e a formação de produtos que causam expansão é condicionado pela deterioração (fissuração) do cobrimento.

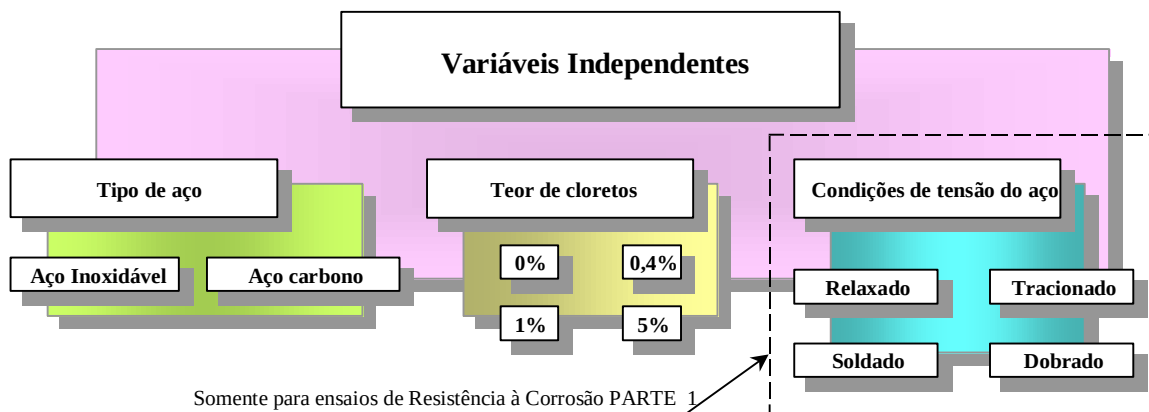


FIGURA 3. Variáveis independentes da pesquisa

Apresentou-se de forma breve as justificativas, objetivo do trabalho e alguns elementos gerais do experimento que neste tema está-se desenvolvendo na EPUSP desde junho de 1996, com início da fase experimental no mês de outubro desse mesmo ano.

Referências

- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; MOLINA, F.J. Cover Cracking as a Function of Bar Corrosion: Part 1 - Experimental Test. Materials and Structures, V. 26, 1993, pp. 453-464.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Practice for Developing Accelerated Test to Aid Prediction of the Service of Building Components and Materials; E 632 - 82. Annual Book of ASTM Standard, V. 14.02, 1995.
- BS 6744. British Standard Specification for Austenitic Stainless Steel Bars for the Reinforcement of Concrete; British Standards Institution, London
- CASCUDO, O.; HELENE, P.; FRANCINETE, P.; GAMBALE, E. Avaliação do comportamento mecânico do concreto de cobertura a partir da geração dos produtos de corrosão das armaduras. In: International Congress on High-Performance Concrete, Florianópolis, 1996. Anais, Universidade Federal de Santa Catarina, 1996. p. 367 - 78.
- COCHRANE, D.J.; Making the Infrastructure Work; 1996; (copia do artigo sem identificação).
- COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. RC 6: Essais Portant sur L'adhérence des Armatures du Beton 2. Essais par Traction. Bulletin d'Information No 118. Paris, 1978.
- FLINT, G.N. e COX, R.N.; The Resistance of Stainless Steel Partly Embedded in Concrete to Corrosion by Seawater. Magazine of Concrete Research; 40 No142;; 1988, pp 13-27.
- HELENE P. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo, 1993. 231 p. Tese de Livre Docente - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. pp. 92 - 98.
- MCDONALD, D.B.; SHERMAN, M.R.; PFEIFER, D.W.; e VIRMANI, Y.P.; Stainless Steel Reinforcing as Corrosion Protection. Concret International. May, 1995.
- NÚRNBERGER, U. Stainless Steel in Concrete – State of the Art Report – European Federation of Corrosion Publications, N 18, The Institute of Materials, 1996, pp 30.
- State of the art: stainless steel reinforcement. Stainless Steel Focus; No. 191; 1997, pp. 12 - 13
- TREJO, D.; MONTEIRO, P.; THOMAS, G.; Mechanical Properties and Corrosion Susceptibility of Dual-Phase Steel in Concrete; Cement and Concrete Research; Vol.24; No.7; pp. 1245-1254; 1994.

TULA, L.; CASCUDO, O.; HELENE, P. Qualidade de Armaduras para Estruturas de Concreto; Anais do VI Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções; Vol. 2; Porto Alegre; Brasil; 1996; pp. 547 - 554

PANOSSIAN, Z; Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas; IPT; 1993.