



REFORÇO ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS METÁLICAS SOFRENDO COM PATOLOGIA DE CORROSÃO

JUNIOR, Nilo Inácio¹; OLIVEIRA, Júlio Hiroshi Tada de ¹

Orientador: Hélio Françaço Junior²

nilo.junior@mail.usf.edu.br

Resumo. O crescente mercado de estrutura metálica apresenta um vácuo no que se refere ao tema de patologia, especialmente na área das patologias ligadas a corrosão. O principal objetivo deste trabalho é reunir literaturas de diversos autores e consolidar com o disposto nas normas brasileiras ligadas a construção civil de forma a compreender e explicar a origem da patologia, metodologia para a identificação, metodologia para identificação do desempenho da estrutura danificada bem como sua recuperação, nos casos em que for possível. Para tal, utilizaremos uma indústria química da área de pintura e pigmentação sofrendo amplamente com patologia de corrosão tanto em estruturas metálicas quanto estruturas de concreto e utilizando essa última como referência devido à escassez de literatura específica sobre patologias de corrosão bem como reforço estrutural de estruturas metálicas.

Palavras-chave: corrosão, estrutura metálica, reforço estrutural.

Abstract. The growing niche of metallic structures shows a gap when it comes on the theme of pathology, especially the ones about corrosion. The main objective of this text is to gather literatures from many authors and consolidate with is shown in Brazilian norms linked to civil engineering in a way to understand and explain the origin of the pathology, methodology for identification, methodology for identification of the performance of the damaged structure and its recovery, when it is possible. In order to do that we will utilize a chemical industry from painting and pigmentation area suffering widely with this pathology as well in metallic structures and cement and using this last reference due to the scarcity of specific literature about corrosion pathology as well as the structural reinforcement of metallic structures.

Keywords: corrosion, metallic structure, structural reinforcement.

Introdução

Existe um crescente consumo de aço voltado para o uso estrutural dentro do mercado brasileiro, mas a literatura específica ainda é escassa.

Em suma, existe a necessidade de estudos e simplificações a cerca desses sistemas, bem como a compreensão da comunidade de engenheiros civis, que parece ter uma defasagem nos campos de conhecimento de química.

Queremos apresentar a patologia de corrosão podendo explicar sua ocorrência, prevenção e correção com a finalidade de tornar mais prático o acesso a informações relevantes deste campo.

A metodologia inicialmente escolhida conta com amplo levantamento técnico e como laboratório a visita técnica em uma empresa do ramo químico que trabalha com tintas e pigmentos que está sendo acometida amplamente por patologias de corrosão, tanto nas estruturas metálicas (que são o foco neste artigo) quanto nas estruturas de concreto que servirão de base e paralelo às ideias aqui constantes.

Tendo os engenheiros civis uma visão muito mais voltada para o “macro”, tende-se a ignorar os conhecimentos voltados ao “micro” e, portanto, este se torna um recurso técnico voltado para um público técnico.

Material e Métodos

Capítulo 1. Referencial teórico sobre corrosão

Corrosão é um fenômeno cujo a principal característica é a perda de material devido a um grupo de reações químicas e eletroquímicas que resulta na alteração da estrutura da matéria, este processo ocorre em função do material interagir com o ambiente.

Nas palavras de Jorge Torre:

De modo geral a corrosão pode ser entendida como série de alterações destrutivas de ligas metálicas ou metais por reações eletroquímicas com alguma substância sólida, líquida ou gasosa. O tipo de corrosão é determinado em grande parte pela ação combinada de vários fatores como por exemplo: a constituição do metal ou liga, condições de serviço, natureza química do meio, etc. (Manual prático de fundição e elementos de prevenção a corrosão, Torre Jorge, p235 2004)

Na engenharia civil é imprescindível se orientar pensando em custos, mas não podemos nos focar apenas em custos imediatos, deve-se levar em conta custos de manutenção também, e nesta incluem-se os reparos; no caso dos metais essa manutenção é profundamente influenciada pela corrosão, seja do metal puro ou de suas ligas.

Se tomarmos o ferro como exemplo, uma vez que é o principal metal utilizado na engenharia civil (geralmente sob a forma de aço), especialmente na área de estruturas metálicas, faz-se necessária manutenção periódica para que não oxide.

A maior parte dos processos corrosivos é decorrência da interação dissolução e oxidação, isto é: A dissolução produz um excesso de elétrons, isto é, o metal libera elétrons de sua camada de valência, e tende a recombinar-se em uma nova formação de compostos. (Manual prático de fundição e elementos de prevenção a corrosão, Torre Jorge, p235 a 236 2004).

Quando em contato com a atmosfera ele sofre reações que tem como produto o Fe_2O_3 (H_2O)_n, ou seja, ferrugem. Essa nova substância não apresenta grande adesão ou coesão e se desprende facilmente na forma de pó ou de escamas, além de apresentar maior volume que o ferro. (Falcão Bauer, L. A.; Materiais de construção vol. 2 p600 1994).

Devido a essas características da ferrugem, ela é um subproduto o qual nós, engenheiros, devemos evitar, mas para isso se faz necessário um simples entendimento de como ocorre essa oxidação, não apenas a nível químico, mas a nível de processo, uma vez que quando se entende isso podemos, por fim, começar a entender como evitar a corrosão e então trabalhar neste campo.

A perda e descarga de elétrons constitui-se em duas formas: a) Perda dos elétrons pelos átomos do metal na área da superfície metálica chamada ânodos b) descarga dos elétrons livres para os componentes da solução em outras áreas da superfície metálica chamada cátodo. (Manual prático de fundição e elementos de prevenção a corrosão, Torre Jorge, p236 2004).

Este movimento de elétrons cria uma DDP (diferença de potencial), ou seja, nas palavras de Falcão Bauer “(...) um movimento na eletricidade entre as áreas de potencial elétrico diferente sempre que exista um meio condutor externo (...)” (1994 p 600).

Este meio é, em geral, a água, essa por sua vez presente até mesmo no ar e quase impossível de ser eliminada, afinal, até nós somos vetores que carregam e dispersam umidade.

Toda substância tem um potencial elétrico diferente, quando alocada junto a outra substância, comumente usamos como referencial o hidrogênio, conforme tabela 1, logo abaixo.

Tabela 1. Exemplos de potenciais de eletrodos padrão.

Eletrodo	Potencial de Eletrodo Padrão, E° (V)
$\text{Li}^+ + e = \text{Li}$	-3,045
$\text{Na}^+ + e = \text{Na}$	-2,71
$\text{Mg}^{2+} + 2e = \text{Mg}$	-2,34
$\text{Al}^{3+} + 3e = \text{Al}$	-1,67
$\text{Ti}^{2+} + 2e = \text{Ti}$	-1,63
$\text{Cr}^{2+} + 2e = \text{Cr}$	-0,90
$\text{Zn}^{2+} + 2e = \text{Zn}$	-0,76
$\text{Fe}^{2+} + 2e = \text{Fe}$	-0,44
$\text{Ni}^{2+} + 2e = \text{Ni}$	-0,257
$2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2$	0
$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$	0,340
$\text{Ag}^+ + e = \text{Ag}$	0,799
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e = 2\text{H}_2\text{O}$	1,22
$\text{Au}^{3+} + 3e = \text{Au}$	1,42

Tabela 1 – Tabela de potencial eletroquímico das substâncias;

Fonte: PMT 2507- CORROSÃO E PROTEÇÃO DOS MATERIAIS - Neusa Alonso-Falleiros, copiado de http://www.pmt.usp.br/lpe/Corrosao/2_DCE-E-Eo-Eref-EqNernst.pdf

Vale observar que na tabela 1 os sinais não se referem a cargas positivas ou negativas, mas sim a sua posição relativamente ao hidrogênio que apresenta potencial 0, visto que ele é o referencial.

Conforme citado por Falcão Bauer “(...) quando dois metais ficam em contato, o de maior potencial tende a corroer o de menor potencial. A reação é tanto mais rápida quanto maior a diferença, e também é mais acentuada quanto mais baixo seus valores na tabela(...)” (1994, p 601).

Por exemplo, se colocássemos uma barra de alumínio ($\text{Al} = -1,67 \text{ V}$) preso a uma barra de magnésio ($\text{Mg} = -2,34 \text{ V}$), teríamos uma DDP de $0,67\text{V}$ e havendo veículo para a reação, que pode até mesmo ser a água atmosférica, o alumínio ocasionaria uma corrosão rápida do magnésio, afinal, ambos estão situados muito próximos do “limite negativo” na tabela 1.

Vale observar que isto também é válido para impurezas que possam estar presentes nos metais ou mesmo entre os metais de uma liga.

Na verdade, isso pode ocorrer mesmo em uma chapa metálica pura, onde uma região possa ter sofrido alguma lesão, como por exemplo um arranhão ou uma lesão de impacto.

“A diferença de potencial pode ocorrer até nos casos em que não haja contato de metais diferentes. Seja uma chapa de ferro com um ponto em que haja uma forte amassadura (encruamento) e sobre a qual haja uma gota ou película de água.” (Falcão Bauer, L. A.; Materiais de construção vol. 2 p602 1994).

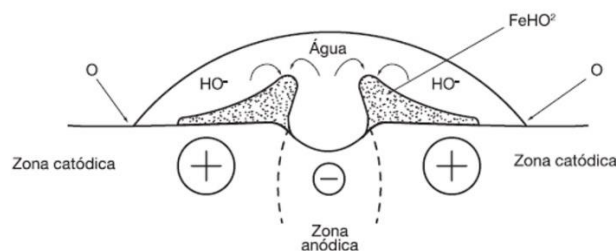


Figura 1 – Diferenças de potencial criando célula galvânica em superfície metálica com encruamento.

Fonte: Falcão Bauer, L. A.; Materiais de construção vol. 2 p602 1994

“Devido ao amassamento, também se formam zonas de potencial diferente: a zona comprimida fica com potencial mais baixo e torna-se anódica (cede elétrons). Nessa zona, $\text{Fe} - 2e = \text{Fe}^{++}$. Na zona catódica forma-se HO, e os elementos assim liberados reagem, dando $\text{Fe}(\text{HO})_2$. Pela ação do oxigênio do ar, o hidróxido ferroso se transforma em hidróxido férrico e finalmente em ferrugem.” (Falcão Bauer, L. A.; Materiais de construção vol. 2 p602 1994).

Bom lembrar que conforme Torre “A célula de oxidação acentua a corrosão nas regiões de baixa concentração de oxigênio.”

Para grande alegria dos engenheiros, é possível impedir esse processo de forma simples, e ambos os autores, Falcão Bauer e Jorge Torre, se mostram alinhados nos seus pareceres e em consonância com a norma ABNT NBR 8800/2008, que aqui trataremos somente como NBR 8800 ou simplesmente norma 8800.

De forma ideal, sempre que possível, deve-se utilizar um único tipo de metal, mas nem sempre trabalhamos nessas condições, neste caso deve-se utilizar algum isolante eletrolítico, conforme cita Torre em seu livro.

Capítulo 2. Corrosão em estruturas metálicas

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008) (toda essa parte peguei direto da NBR, alterei somente algumas poucas palavras), a proteção do aço contra a corrosão atmosférica, fenômeno que ocorre quando há ao mesmo tempo água e oxigênio, tem como objetivo garantir a durabilidade e a manutenção da estrutura durante sua existência. Diversos tipos de proteção estão disponíveis no mercado e sua escolha depende de fatores técnicos e econômicos.

Pode-se considerar uma corrosão significativa do aço, somente quando a umidade relativa do ar for superior a 80% e em temperaturas superiores a 0°C. Porém, se agentes poluentes ou sais higroscópicos estiverem presentes, a corrosão pode ocorrer em umidades relativas mais baixas. “Além desses fatores, devem ser considerados os fatores climáticos, como intensidade e direção dos ventos, variações cíclicas de temperatura e umidade, chuvas e insolação (radiações ultravioletas)” (Vicente Gentil, 2022, p. 72).

No entanto, em locais com velocidade elevada de corrosão devido à pouca ventilação, à alta umidade ou à possibilidade de condensação, deve-se prever um sistema adequado de proteção anticorrosiva para os elementos estruturais. “No Brasil, apesar de não existir unanimidade quanto ao método a ser adotado, estima-se que o custo total com a corrosão está entre 3,5 % e 4,0 % do PIB” (Vicente Gentil, 2022, p. 72).

Após avaliar o ambiente local e seu microclima, os ambientes podem ser classificados em seis categorias de corrosividade conforme a tabela abaixo retirada da NBR 8880:

Categoria de corrosividade	Perda de massa por unidade de superfície/perda de espessura (após um ano de exposição)				Exemplos de ambientes típicos	
	Aço baixo-carbono		Zinco		Exterior	Interior
	Perda de massa g/m ²	Perda de espessura μm	Perda de massa g/m ²	Perda de espessura μm		
C1 Muito baixa	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	-	Edificações condicionadas para o conforto humano (residências, escritórios, lojas, escolas, hotéis)
C2 Baixa	> 10 a 200	> 1,3 a 25	> 0,7 a 5	> 0,1 a 0,7	Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais	Edificações onde a condensação é possível, como armazéns e ginásios cobertos
C3 Média	> 200 a 400	> 25 a 50	> 5 a 15	> 0,7 a 2,1	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por dióxido de enxofre. Áreas costeiras de baixa salinidade	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica, como lavanderias, cervejarias e laticínios
C4 Alta	> 400 a 650	> 50 a 80	>15 a 30	> 2,1 a 4,2	Áreas industriais e costeiras com salinidade moderada	Ambientes como indústrias químicas e coberturas de piscinas
C5-I Muito alta (Industrial)	> 650 a 1500	> 80 a 200	>30 a 60	> 4,2 a 8,4	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição
C5-M Muito alta (marinha)	> 650 a 1500	> 80 a 200	>30 a 60	> 4,2 a 8,4	Áreas costeiras e offshore com alta salinidade	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição

Tabela 2 - Categorias de corrosividade atmosférica e exemplos de ambiente.

Fonte: ABNT NBR 8800, 2008, p. 164.

A limpeza e preparação da estrutura é de grande importância para que o revestimento tenha o desempenho esperado. Nesta etapa é necessário fazer uma descontaminação da superfície e garantir que ela tenha uma aderência satisfatória dos revestimentos.

Podemos analisar os casos em que há presença de sais na superfície, sendo os mais comuns os cloretos e os sulfatos. Estes aumentam exponencialmente a rápida degradação dos revestimentos. “Estes sais, em sua maioria higroscópicos, aumentam a taxa de absorção de umidade da atmosfera, facilitando a ocorrência de várias reações químicas ou eletroquímicas na interface metal/revestimento”. (Vicente Gentil, 2022, p. 72).

Nas situações em que a estrutura não necessite de proteção anticorrosiva adicional, quando precisar efetuar a limpeza para retirada de graxa e óleo, utilizar solventes, e de sujeira ou outros contaminantes, apenas escovar ou usar outros meios adequados após a fabricação da estrutura.

Nos locais em que há frestas estreitas e juntas sobrepostas, deve-se fazer a selagem com solda contínua para evitar a penetração de umidade e sujeira.

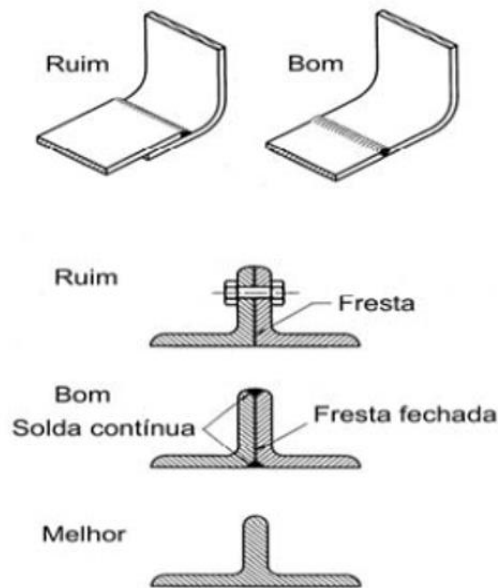


Figura 2 – Tratamento de frestas. Fonte: ABNT NBR 8800/2008 p.166

A Norma 8800 preconiza que em pontos de transição entre o metal e o concreto, deve-se evitar deixar frestas especialmente em estruturas sujeitas a processos severos de corrosão. Podemos ver facilmente isso retratado na Figura 3 abaixo:

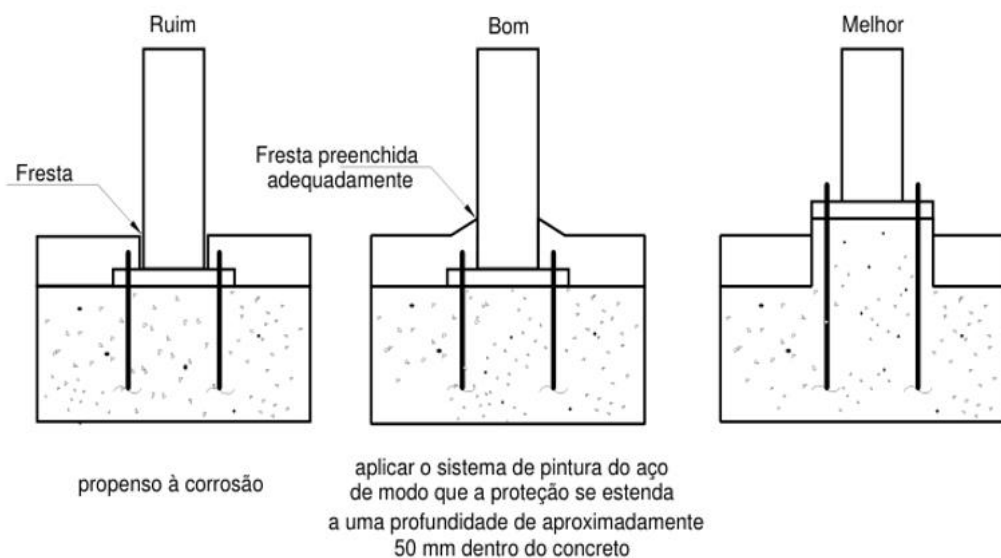


Figura 3 – Transição entre aço e concreto. Fonte: ABNT NBR 8800/2008 p.166

Componentes tubulares abertos, quando expostos à umidade condensada, precisam possuir aberturas de dreno e proteção efetiva contra a corrosão. Em estruturas totalmente fechadas, suas bordas devem ser seladas por meio de solda contínua para evitar entrada de ar e umidade.

Capítulo 3. Estudo de caso particular

Os agentes causadores das patologias podem ser vários como por exemplo, variação de umidade, variações térmicas, excesso de carga, incompatibilidade de materiais e outros.

As correções em patologias podem incluir desde pequenos reparos localizados ou até uma recuperação geral da estrutura e dependendo do dano e causa pode ser que necessite também de reforços em fundações, pilares, vigas e lajes.

O ideal é que após qualquer intervenção, sejam executadas medidas de proteção da estrutura, com a implantação de um plano de manutenções periódicas e vistorias. Estas devem levar em conta a importância da obra, a vida útil prevista, a agressividade ambiental e a natureza dos materiais.

A agressividade do meio ambiente é algo de suma importância ao se projetar uma estrutura tanto metálica quanto de concreto armado. A partir da classificação do meio ambiente podemos tomar as primeiras medidas em relação aos materiais que serão empregados na execução, tipos de revestimentos, espessura do cobrimento do concreto e outras. “A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto”. (NBR 6118, 2014, p. 16).

Abaixo temos as tabelas 3 e 4 da NBR 6118 que classificam a estrutura conforme a classe de agressividade ambiental e nos informa o cobrimento ideal para o ambiente:

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Tabela 3 – Classes de agressividade ambiental.

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014, p. 17.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Tabela 4 – Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal em milímetros.
Fonte: ABNT NBR 6118, 2014, p. 20.

Realizamos nosso estudo de caso em uma indústria, que fabrica pigmentos para tintas, desde tintas para papel até tintas automobilísticas. Nos deparamos com um ambiente altamente agressivo e úmido com muitos produtos químicos como o ácido acético, acetona, solventes e outros.

O ambiente se enquadra, segundo tabela da NBR 6118, com a classe IV, ou seja, um ambiente muito agressivo para estruturas de concreto armado. E na classificação da tabela da NBR 8880 de corrosividade atmosférica, na categoria C5-I, muito alta.

As estruturas tanto metálicas quanto de concreto armado estavam comprometidas, pois possuíam alto processo tanto de ferrugem quanto de corrosão da estrutura. Observamos que os estribos de pilares e vigas, bem como a armadura negativa das vigas, haviam sido comprometidos em vários pontos, chegando a sofrer redução do diâmetro das barras.

Após analisar adequadamente a estrutura e estabelecer o diagnóstico e as consequências do problema, concluímos que os agentes causadores dos problemas patológicos foram em grande parte por ação química sobre o concreto e sobre as estruturas metálicas e ação eletroquímica sobre a armadura. “O contato direto de concreto com soluções de ácidos, como clorídrico, fluorídrico, nítrico, sulfuroso e sulfúrico, ocasiona deterioração do concreto, pois eles reagem com componentes do concreto e diminuem o valor de pH” (Vicente Gentil, 2022, p. 262).

As estruturas metálicas estavam sem a proteção indicada para o ambiente em que estão instaladas, assim como também as estruturas de concreto armado que não possuíam o cobrimento ideal e provavelmente não foi utilizado o cimento indicado para um ambiente altamente agressivo com sulfatos.

A solução encontrada para as estruturas metálicas e de concreto armado, foi a limpeza e remoção utilizando jateamento com escória de fundição de cobre grau sa3, removendo totalmente qualquer ferrugem e contaminação na superfície. Após o jateamento a superfície deve ser limpa com ar comprimido seco, escovado com escova de aço e finalizado com aspirador de pó.

Nas estruturas de concreto armado, após a limpeza da área, reforçar a estrutura com novas armaduras realizando emendas para aumentar a seção da armadura através de transpasse. O cobrimento deverá ser de 5 centímetros e na concretagem utilizar concreto polímero.

Em estruturas metálicas, utilizar primeiramente uma tinta de fundo (primer), depois uma tinta epóxi intermediária seladora, que terá a função de selar a película de tinta porosa, e por fim utilizar uma tinta de acabamento rica em zinco à base de silicato.



Figura 4 – Estrutura metálica sofrendo processo corrosivo. Fonte: Autoral.



Figura 5 – Viga de concreto armado com armadura exposta sofrendo processo corrosivo. Fonte: Autoral.



Figura 6 – Viga metálica com processo de corrosão. Fonte: Autoral.



Figura 7 – Viga metálica com processo de corrosão. Fonte: Autoral.



Figura 8 e 9 – Pilares com armadura exposta e sofrendo processo de corrosão. Fonte: Autoral.



Figura 10 – Pilar com armadura exposta e com alto processo de corrosão da armadura. Fonte: Autoral.



Figura 11 – Laje com armadura exposta e sofrendo processo de corrosão. Fonte: Autoral.

Capítulo 4. Acerca da análise de desempenho da estrutura

Conforme norma a ABNT NBR 15575 de 2013 (partes de 1 a 6), que estabelece os métodos referentes ao desempenho de edificações habitacionais, e que aqui nos focaremos em sua segunda parte ABNT NBR 15575-2/2013 que rege especificamente os requisitos para o sistema estruturais e aqui chamaremos apenas de norma 15575-2 a para fins de facilitação do leitor, uma edificação deve ser avaliada para que se torne possível a decisão de qual ou quais caminhos tomar para sua manutenção, quando couber, reparo ou demolição.

Apesar de ter partes constituídas de concreto armado e nossa edificação, bem como suas lajes, algumas vigas e pilares, nosso foco principal é no reparo de suas estruturas metálicas, contudo, citamos brevemente ações que podem ser tomadas para sua análise, bem como seu reparo.

Conforme a norma 15575-2 a estrutura, bem como os demais elementos estruturais, devem apresentar um nível específico de resistência à ruína tendo em consideração as combinações de cargas mais prováveis, pois, estas refletem as condições do estado limite último, que aqui chamaremos comumente de ELU.

Devemos considerar as cargas permanentes, acidentais, de vento e deformações conforme as normas ABNT NBR 8681, ABNT NBR 6120, ABNT NBR 6122 e ABNT NBR 6123.

A norma 15575-2 também comenta sobre algumas condições de análise, são elas:

- Se os corpos de prova em laboratório, caso o índice de retração livre do material for inferior a 0,06%; às solicitações de retração por secagem podem ser desprezadas para o efeito do cálculo de ELU.
- Para efeitos do estado-limite último, podem ser desprezadas as solicitações devido à variação de temperatura, caso sejam empregados materiais com coeficientes de dilatação térmica linear $\leq 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$; para comprimentos em planta inferiores a 30 m, levar em consideração somente para valores acima de $2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.
- Para efeitos do estado-limite último, podem ser desprezadas as solicitações devido à variação da umidade relativa do ar, caso sejam empregados materiais que, no aumento da umidade relativa de 50 % para 100 %, estabilizam-se com expansão não superior a 0,1 %; da mesma

forma, o efeito da variação da umidade pode ser desprezado para estruturas cujos componentes foram protegidos com sistemas de impermeabilização que atendam aos requisitos da norma 15575-2.

Em nosso caso particular, nossa análise será feita com base na norma 8800 conforme manda a própria norma 15575-2.

Quando o modelo matemático do comportamento combinado dos materiais e componentes que compõem o sistema ou dos sistemas que compõem a estrutura não for conhecido e consolidado por meio de experimentos, ou quando não houver norma brasileira, permitida, para fins desta norma, desde que se aplique a edifícios residenciais de menos de cinco andares, Determinar a resistência mínima de projeto por meio de ensaios destrutivos e traçando o diagrama de carga x deslocamento correspondente, conforme mostrado no Anexo A da norma 15575-2, que consta também aqui, por coincidência, como anexo A.

A norma 15575-2 nos baliza também em relação ao estado limite de serviço, dizendo que sob as ações de diversos tipos de solicitações como recalque temperatura, vento, cargas ou quaisquer outras as estruturas não devem apresentar, em nosso caso particular, deslocamento superior ao determinado na norma 8800.

Caso estes valores não tenham sido atendidos, devemos prosseguir de duas formas, nos casos mais gerais podemos considerar apenas as ações de cargas permanentes e acidentais tomando os valores de 1,0 e 0,7 para os índices Ψ_g e Ψ_q respectivamente; ficando, portanto:

$$S_d = S_{gk} + 0,7 S_{qk}$$

Com relação aos ensaios de impacto de corpo mole e impacto de corpo duro, a norma 15575-2 estabelece que, devido ao nosso caso ser balizado pela norma 8800, a estrutura analisada está dispensada destes ensaios.

Para atingir a vida útil de projeto (VUP) da estrutura e seus componentes, a manutenção preventiva do sistema e, quando necessário, a manutenção corretiva ambas devem ser planejadas e executadas. Este último deve ser realizado assim que o problema surgir para evitar que pequenas falhas (às vezes rapidamente) se transformem em patologias generalizadas, o que de certa forma é o nosso caso.

Conforme diz Paulo Helene “Um diagnóstico adequado do problema deve indicar em que fase do processo construtivo teve origem o problema”, mas em nosso caso é difícil afirmar se o problema ocorreu na fase de projeto, uma vez que a disposição dos elementos estruturais e a escolha do material pode ter sido o adequado para a época de sua execução levando-se em conta o trabalho que seria executado na edificação, também pode ser que na fase de execução houve mudanças bem como imperícias das partes, até porque, como já citado os engenheiros civis têm algum grau de defasagem quando o assunto é química e portanto podem fazer pequenas trocas por questões como custos sem entender o impacto geral disto, mas, por fim, também ter ocorrido na fase de uso pela pouca manutenção (manutenção esta que não foi feita também para corrigir estes danos mais brevemente).

Helene nos sugere, a fim de facilitar nossas considerações, separar em dois tipos, sendo elas:

- As que comprometem as condições de segurança.
- As que comprometem as condições de utilização (estética, higiene, funcionalidade etc).

Falando um pouco da corrosão das armaduras que ocorre nas estruturas de concreto armado que temos nesta edificação, partimos de 3 hipóteses.

- Concreto de alta permeabilidade ou elevada porosidade.
- Cobrimento insuficiente das armaduras.
- Má execução.

Numa análise rápida, podemos determinar que se trata do primeiro caso mais provavelmente, pois, estamos tratando de uma indústria química que lida com produtos de pintura, muitas vezes esses componentes são de caráter orgânico, ácido ou básico, isto quando não apresentam duas características juntas (orgânico ácido e orgânico básico). Algumas substâncias comumente usadas nessas indústrias podem atacar substâncias de natureza metálica levando a oxidação e posteriormente a corrosão, como explicado no capítulo 1.

Seguindo ainda a metodologia proposta por Helene, devemos:

- Remover cuidadosamente o concreto afetado e os produtos da corrosão limpando bem a superfície.
- Reconstituir a seção original das armaduras.
- Em caso de início de corrosão sem comprometimento do concreto e das barras de aço, recuperar o componente estrutural mantendo as dimensões originais.
- Em casos avançados de corrosão, aumentar os componentes originais com reforço estrutural através de reforço em vigas, pilares e lajes.
- Aplicar revestimento de proteção.
- Eventualmente demolir e reconstruir.

No nosso caso, conforme pode ser visto na figura 10, por exemplo, cabe em vários momentos o reforço da estrutura aumentando a seção, pois, o corpo já se encontra em avançado estado de corrosão, claro que, é necessária uma análise mais criteriosa de todos os componentes isoladamente observando-se caso a caso.

Com nossas estruturas metálicas o procedimento não será muito diferente. O grande diferencial é o fato de que o aço, diferentemente do concreto, não apresenta porosidade, sendo, portanto, atacado em sua superfície.

Adaptando do que sugere Helene, devemos seguir os seguintes passos com uma estrutura metálica, uma vez que consigamos atestar sua funcionalidade estrutural utilizando os métodos de ELU supracitados.

- Remover cuidadosamente as partes afetadas e os produtos da corrosão limpando bem a superfície.

Este deverá ser feito removendo a pintura (quando houver) e posteriormente aplicar jato de areia ou escória (conforme o grau e necessidade), com a finalidade de remover a ferrugem presente na peça, eventualmente pode-se também aplicar lixa-ferro ou escova de aço e remover os detritos com ar comprimido. Após, deve-se proceder com hidrojateamento cuidadoso por toda a estrutura e secagem para evitar qualquer novo ponto de umidade causado pela limpeza, em locais de mais difícil acesso recomendamos o uso de ar comprimido para a secagem.

- Reconstituir a seção original das armaduras.

Isso dificilmente será possível, pois, diferentemente do concreto que se trata de um conjunto solúvel flexível que pode ser facilmente enxertado in loco, o aço não se mostra tão receptivo a essa ideia, não que seja impossível, mas seria um processo custoso, tanto do ponto de vista técnico quanto do financeiro.

- Em caso de início de corrosão sem comprometimento das estruturas de aço, recuperar o componente estrutural mantendo as dimensões originais.

Novamente lidamos com o problema anterior, pois, é possível parar a corrosão, aplicando-se uma carga, afinal, ela ocorre pelo processo galvânico gerado por uma DDP, logo, se essa carga for compensada encerra-se o processo corrosivo.

Numa fase inicial, essa técnica pode mostrar-se interessante, mas em uma estrutura como a nossa com um estado de corrosão avançado não se mostra efetiva, uma vez que as partes que se desprenderam não podem ser reconstituídas.

- Em casos avançados de corrosão, aumentar os componentes originais com reforço estrutural através de reforço em vigas, pilares e lajes.

Nestes casos, é conveniente observar que o novo elemento deve estar em total contato com o elemento preexistente, no caso de vigas, a nova tente a ficar de 2 a 3cm abaixo da viga original, podendo esta nova compensar isso de 3 formas:

- a. Execução de contra flecha para garantir o contato.
 - b. Perfuração do elemento estrutural (laje ou viga) para execução de grauteamento para preenchimento do vazio.
 - c. Utilização de argamassa tixotrópica para preenchimento do vazio.
- Aplicar revestimento de proteção.

Adaptando da literatura de Paulo Helene, que é voltada para estruturas de concreto, recomenda-se a aplicação de um primer a base de zinco (Zn) e esperar a secagem por 30 minutos, após este tempo, aplicar uma pintura epóxi intermediária e selante que servirá como proteção física e por fim uma tinta de acabamento.

O zinco (Zn) é um metal comumente utilizado na construção civil como metal de sacrifício e, portanto, melhorará a vida útil dessa estrutura, tendo ainda uma pintura de proteção essa vida útil será ainda mais prolongada.

- Eventualmente demolir e reconstruir.

Em último caso, quando não atender a norma 8800, a norma 15575, não for possível recuperar (seja por condição técnica ou por custo) e/ou apresentar algum risco de colapso, recomendamos a substituição total da peça e em seguida seguir o procedimento anterior de proteção.

Como citado outrora, essa análise deve ser criteriosa e vista caso a caso para trabalhar de forma eficiente a estrutura entendendo as partes que estão afetadas de forma fatal e as partes recuperáveis, e ainda decidir qual será o método utilizado nos casos cabíveis.

Resultados e Discussão

De acordo com as tabelas 2 e 3, o ambiente foi classificado como altamente agressivo para as estruturas que estavam no local. Nos deparamos com uma indústria que trabalha com materiais químicos e vapores nocivos tanto para o concreto quanto para a estrutura metálica.

Encontramos erros de execução nas estruturas como cobrimento nominal incorreto das vigas e pilares para o ambiente, em que, segundo a tabela 4, o ideal seria de 5 centímetros. Nas estruturas metálicas haviam vários pontos de corrosão, mostrando que a estrutura não havia recebido um tratamento ideal contra corrosão quando foi instalada.

Conforme a tabela 5 abaixo retirada da NBR 6118, o concreto deveria ser, no mínimo, maior ou igual a 40 mega pascal.

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Tabela 5 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014, p. 18.

Para realizar toda a limpeza das estruturas o método de jateamento com escória de fundição de cobre grau sa3, seria o mais ideal pois ele remove todas as partículas soltas e o material com patologia que pode vir a interferir na camada protetora.

Para recomposição da estrutura de concreto armado encontramos no mercado o concreto polimérico, que pode ser aplicado de forma projetada. Conferindo uma maior aderência e melhor aplicação. A vantagem de utilizarmos o concreto polimérico é que o mesmo possui maior trabalhabilidade e capacidade de conformação segundo ao molde ao qual é aplicado. Possui também ampla resistência aos solventes, óleos e sais ácidos.

Para as estruturas metálicas, o ideal seria utilizar um esquema de pintura contendo três camadas para garantir maior proteção, visto que um bom pedaço da estrutura está afetado por corrosão. Primeiro será aplicada uma tinta de fundo (primer), que possuem pigmentos anticorrosivos e precisa estar em contato direto com a estrutura. Em segundo uma tinta epóxi intermediária seladora, que aumentará a espessura do revestimento e melhorará a proteção da primeira camada e por fim utilizar uma tinta de acabamento.

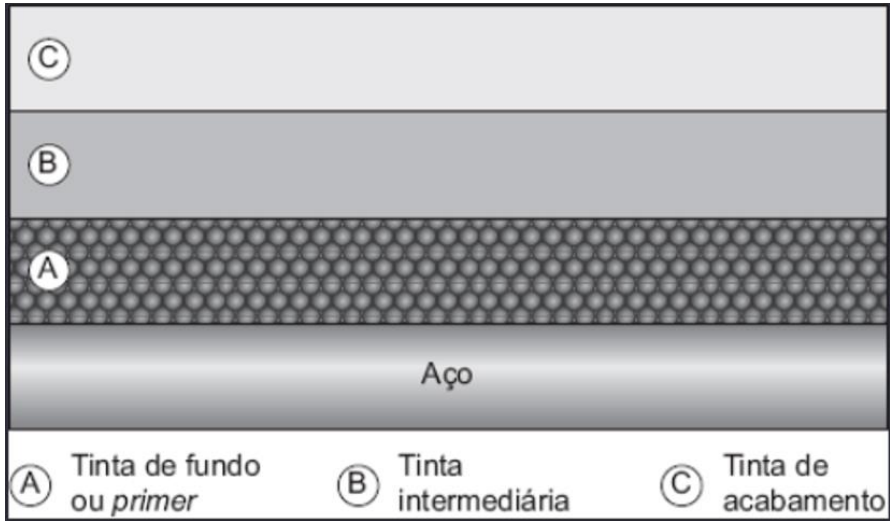


Figura 12 – Representação esquemática das tintas contendo três camadas. Fonte: GENTIL, Vicente, p.331

Conclusão

A pesquisa realizada, bem como o levantamento de dados teóricos e a compreensão de como os eventos ocorrem tanto para a ocorrência da patologia e sua recuperação, nos casos em que for possível.

Ficou evidente o grande vácuo existente de literaturas brasileiras voltadas a estruturas metálicas no que tange o tema de patologias, pois, foi necessário adaptar o tema de normas e literaturas voltadas especificamente para o tema de concreto e concreto armado.

Uma das grandes dificuldades que nos foram impostas foi a negativa frente ao nosso pedido de visita técnica que seria de grande valia para uma análise mais aprofundada que em uma situação diferente resultaria numa pesquisa mais prática e possivelmente numa análise individual das estruturas bem como uma solução personalizada para cada caso.

No geral, as fotos deram algum apoio, mas não supriram totalmente a diferença de fazer a visita técnica.

Possivelmente uma continuidade para esta peça poderia compor-se de um estudo técnico mais aprofundado de edificações similares a citada neste trabalho e um acompanhamento e



manutenção destas verificando-se os resultados ao longo de 10 anos e observando-se a curva financeira num sistema que leve em conta suas “n” variáveis para entender melhor as questões do trabalho com o aço no mercado brasileiro voltado especificamente para o reforço estrutural quando decorrente de patologia de corrosão.

Agradecimentos

Queremos agradecer aos nossos docentes, em especial nosso orientador que esteve presente realmente orientando sempre que solicitado, independente do dia e hora sempre que possível.

Também agradecer aos nossos colegas, amigos e familiares que nos deram suporte nesta empreitada.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8880: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-2: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro: 2013.

BAUER, L. A. Falcão. Materiais de Construção: Volume 1. 6º Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

GENTIL, Vicente. Corrosão. 7º Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

HELENE, Paulo. Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto. 2º Edição. São Paulo: Pini, 1992.

Anexos

Anexo A – Anexo A da NBR ABNT 15575-2/2013

Anexo A
(normativo)

Modelagem matemática do comportamento conjunto para a resistência mínima de projeto

A.1 Princípio

Ensaio destrutivo, com traçado de diagramas de carga \times deslocamento, e registros da história da carga conforme indicado na Figura A.1.

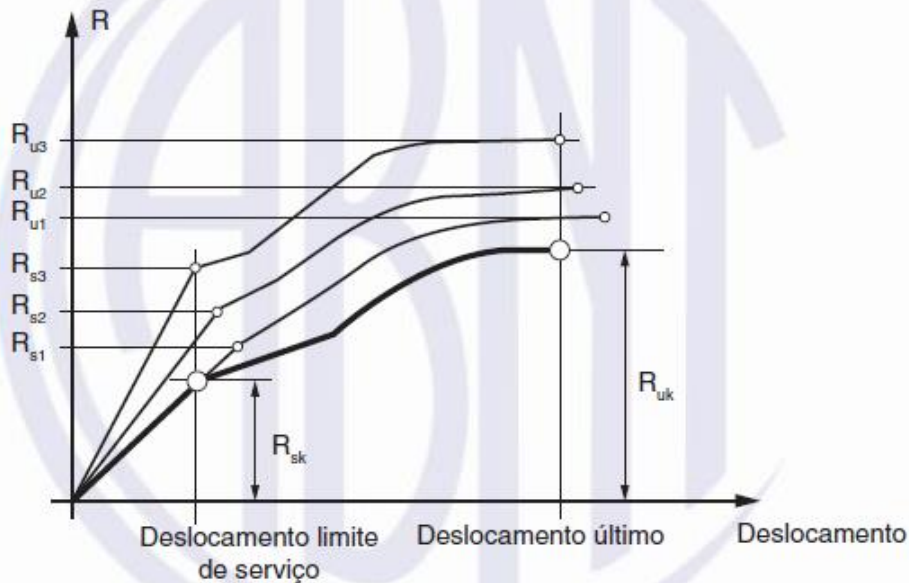


Figura A.1 – Gráfico carga \times deslocamento para determinação de R_{ud} e R_{sd} por meio de ensaios

A.2 Diretrizes

Estabelecer a resistência mínima de projeto para os sistemas estruturais ou componentes em que não há Norma Brasileira de projeto de sistemas, que não possuem modelagem matemática conhecida e consolidada por experimentação.

A.3 Aparelhagem

Devem ser empregados instrumentos que forneçam medição de centésimos de milímetro e que registrem toda a história da carga, principalmente a situação dos pontos e regiões mais solicitadas.

A.4 Preparação dos corpos de prova

A.4.1 Confeccionar os elementos estruturais com os mesmos materiais, procedimentos e controles normais do processo construtivo a ser adotado no canteiro de obras.

A.4.2 Para elementos estruturais comprimidos, as cargas devem ser aplicadas com excentricidade:

$$\frac{t}{30} \geq 1 \text{ cm}$$

Onde

t é igual à menor dimensão do elemento estrutural (normalmente a espessura).

A.4.3 A caracterização dos constituintes A, B, C etc. e o tipo de resistência que os caracteriza individualmente podem ser obtidos com a realização dos ensaios, examinando-se

minuciosamente o comportamento de ruptura do conjunto e sua dependência do comportamento dos materiais individuais.

A.5 Procedimento

A.5.1 Conduzir o ensaio com pelo menos dez etapas de carga, com repetição para três modelos geométricos idênticos e em escala real.

A.5.2 Caracterizar os componentes pelas resistências R_{u1} , R_{u2} e R_{u3} , resultados das resistências últimas observadas nos ensaios.

A.5.3 Ensaiar conforme as condições de solicitação a que se pretende submeter os sistemas estruturais ou componentes na edificação.

A.5.4 Ordenar as resistências em ordem crescente, conforme indicado na Figura A.1.

A.6 Expressão dos resultados

A.6.1 Resistência de projeto no estado-limite último (ELU)

A resistência permitida de projeto, com o seu valor já minorado, deve ser:

$$R_{ud} = \left[R_{u1} - \frac{R_{u3} - R_{u1}}{2} \cdot \xi \right] \frac{1}{\gamma_m} \leq (1 - 0,2 \cdot \xi) \cdot R_{u1} \cdot \frac{1}{\gamma_m} \quad (1)$$

com $\gamma_m \geq 1,5$

Onde

$$\xi = [(1 + *_{uA}) \cdot (1 + *_{uB}) \cdot (1 + *_{uC}) \dots] \quad (2)$$

Sendo

*_{uA} igual ao coeficiente de variação da resistência do material A, correlativa a R_{ud} ;

*_{uB} igual ao coeficiente de variação da resistência do material B, correlativa a R_{ud} ;

*_{uC} igual ao coeficiente de variação da resistência do material C, correlativa a R_{ud} .

A.6.2 Casos particulares

No caso de edificações térreas e sobrados cuja altura total não supere 6,0 m, não sendo possível realizar, por motivos técnicos ou de viabilidade econômica, o controle sistemático dos materiais A, B, C e outros, permite-se prescindir da obtenção estatística de *_{sA}, *_{sB}, *_{sC} etc., desde que se adote:

$$\xi = 1,5 \text{ e } \gamma_m = 2,0$$

A.6.3 Comprovação

Os materiais A, B, C etc. devem constituir e reger, de forma majoritária, o comportamento mecânico do componente em análise na composição da resistência R_{ud} . Desta forma deve-se comprovar a condição:

$S_d \leq R_{ud}$ com S_d determinado conforme ABNT NBR 8681.

A.6.4 Validade

Para conservar válida a expressão de R_{ud} , as resistências médias dos materiais A, B, C etc. devem estar caracterizadas para o ensaio, garantindo-se ainda a homogeneidade do processo de produção dos elementos estruturais, de forma que estas médias sejam mantidas.

A.6.5 Estatísticas

A.6.5.1 A resistência característica assumida para componentes de ligação e ancoragens, quando não existirem normas específicas, deve ser tomada como a correspondente ao quantil inferior a 5 %, ou seja, 95 % dos componentes devem apresentar para as propriedades escolhidas como representativas um valor igual ou acima do característico.

A.6.5.2 Na resistência de cálculo dos componentes de ligação e ancoragens, quando não existirem normas específicas, deve ser considerado um coeficiente de minoração com base na variabilidade dos resultados de ensaios; este coeficiente, contudo, não pode ser inferior a 2.

A.7 Relatório de ensaio

O relatório de ensaio deve conter no mínimo as seguintes informações:

- a) identificação do solicitante;
- b) identificação do fornecedor;
- c) identificação da amostra e de todos os corpos de prova;
- d) desenho do ensaio de tipo e sua geometria;
- e) caracterização dos constituintes;
- f) data do recebimento da amostra;