

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

THAMIRYS LUYZE VIEIRA

**FISSURAS EM CONCRETO: ESTUDOS DE CASO EM
FLORIANÓPOLIS.**

Florianópolis

2017

THAMIRYS LUYZE VIEIRA

**FISSURAS EM CONCRETO: ESTUDOS DE CASO EM
FLORIANÓPOLIS.**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.

Florianópolis

2017

Thamirys Luyze Vieira

**FISSURAS EM CONCRETO: ESTUDOS DE CASO EM
FLORIANÓPOLIS.**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pela Comissão Examinadora e pelo curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 23 de novembro de 2017.

Banca Examinadora:



Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Lucas Onghero, Me

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernanda Fernandes Marchiori, Dr^a.

Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me proporcionar forças para que eu possa sempre correr atrás dos meus objetivos.

Agradeço aos meus pais por priorizar os meus estudos, me ensinando o seu valor e por todo o suporte a mim disponibilizado durante toda a minha graduação. Obrigada por estarem sempre dispostos a me ajudar no decorrer de todos esses anos.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da UFSC pelos ensinamentos durante a graduação, principalmente ao professor Wellington Longuini Repette pela orientação neste trabalho, conferindo ao mesmo uma melhor qualidade.

Àqueles que me autorizaram o acompanhamento das fissuras e os seus registros fotográficos.

A todos que de alguma forma contribuíram com a elaboração do meu TCC, muito obrigada.

RESUMO

O concreto é um dos produtos mais utilizados no mundo. No Brasil, a maioria das estruturas é constituída por esse material. Por conseguinte, é de grande importância a compreensão de como o meio e determinadas ações o afetam. No presente trabalho está sendo abordada especificamente a manifestação patológica denominada fissura. O trabalho teve como principal motivador o fato de que uma identificação adequada das causas de fissuração gera reparos efetivo além de a compreensão das consequências de um erro construtivo tem como consequência uma melhora na qualidade desse processo. Este problema pode reduzir a sua eficiência do elemento no qual se encontra e possui variadas causas. Suas soluções se diversificam conforme o caso, seja como o material foi empregado, a magnitude do dano e o seu agente causador. Neste trabalho, descreveu-se os mecanismos de fissuração no concreto bem como o tratamento dessas fissuras. A escolha das fissuras foi de acordo com a sua tipologia, visando exemplificá-las com variabilidade. Por conseguinte, foram analisadas seis fissuras, duas por corrosão de armadura, uma por falta de junta serrada para redução dos efeitos de retração térmica e higroscópica, uma por diminuição da capacidade de suporte do solo, uma por ataque de sulfatos e uma por álcalis-agregado. As suas causas, bem como seus correspondentes reparos, foram determinadas por um processo eliminatório o qual analisa o formato das fissuras e ambiente o qual se encontra. Esse processo teve como base a revisão bibliográfica.

Palavras-Chaves: Causas de fissura; concreto; reparos em fissuras, patologia em concreto.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MICROGRAFIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE CRISTAIS HEXAGONAIS TÍPICOS DE MONOSSULFATO HIDRATADO E CRISTAIS ACICULARES DE ETRINGITA.	20
FIGURA 2 – MODELO DE UMA PASTA DE CIMENTO PORTLAND BEM HIDRATADA.	21
FIGURA 3 – VARIAÇÃO DA POROSIDADE CAPILAR COM DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/CIMENTO E GRAU DE HIDRATAÇÃO.	27
FIGURA 4 – CONFIGURAÇÕES DE FISSURAS EM FUNÇÃO DO TIPO DE SOLICITAÇÃO.	29
FIGURA 5 - FISSURAÇÃO POR PUNÇIONAMENTO	29
FIGURA 6 – INFLUENCIA DA FALTA DE DETALHAMENTO	30
FIGURA 7 - FORMAÇÃO DE FISSURAS POR ASSENTAMENTO PLÁSTICO DO CONCRETO	31
FIGURA 8 - EXEMPLOS DE FISSURAÇÃO POR MOVIMENTAÇÃO DE FÔRMAS E ESCORAMENTOS	32
FIGURA 9 – FISSURAS DE RETRAÇÃO PLÁSTICA	34
FIGURA 10 - ILUSTRAÇÃO DE UMA FISSURA EM UMA LAJE DEVIDA AOS MOVIMENTOS TÉRMICOS	37
FIGURA 11 - GRAU DE RESTRIÇÃO	38
FIGURA 12 – PERFIL DA JUNTA DE CONSTRUÇÃO	44
FIGURA 13 - JUNTA SERRADA	45
FIGURA 14 - JUNTA DE ENCONTRO.	45
FIGURA 15 - FISSURAS DECORRENTES DE ATAQUE DE SULFATO	47
FIGURA 16 - FISSURAS DECORRENTES DE REAÇÃO ÁLCALIS-AGREGADO	48
FIGURA 17 - BLOCO DE FUNDAÇÃO COM FISSURAS DE REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA	49
FIGURA 18 - MODELO DA CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO	51
FIGURA 19 - FISSURAS DECORRENTES DE RECALQUE DIFERENCIAL	55
FIGURA 20 – PREPARAÇÃO DA FENDA PARA O PROCEDIMENTO DE INJEÇÃO	59
FIGURA 21 – INJEÇÃO DE FISSURAS	60
FIGURA 22 – SELAGEM DE FISSURAS	62
FIGURA 23 – COSTURA DE FISSURAS	63
FIGURA 24 – ANULAÇÃO DAS TENSÕES DE TRAÇÃO PELA INTRODUÇÃO DE PRETENSÃO EXTERIOR	64
FIGURA 25 – REPOSIÇÃO DA SEÇÃO ORIGINAL DE AÇO POR ADIÇÃO DE NOVAS BARRAS	65
FIGURA 26 – ADIÇÃO DE NOVAS BARRAS EM UMA VIGA AFETADA POR CORROSÃO	66
FIGURA 27 – EMENDA ENTRE BARRAS DE ARMADURA CORROÍDA E DE COMPLEMENTAÇÃO	67
FIGURA 28 – FACHADA DO PRÉDIO	74
FIGURA 29 – LOCALIZAÇÃO DO CONDOMÍNIO	75
FIGURA 30 - LAJE IMEDIATAMENTE ACIMA DA MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA	75
FIGURA 31 – FISSURA NA LAJE	76
FIGURA 32 – CASA ONDE ESTÁ LOCALIZADA A FISSURA	77
FIGURA 33 – LOCALIZAÇÃO DO CONDOMÍNIO	77
FIGURA 34 – FISSURAS NO PILAR	78
FIGURA 35 – LOCALIZAÇÃO DO TRECHO EM QUE CONTIDA A FISSURA EM ANÁLISE.	80
FIGURA 36 – CALÇADA ONDE ESTÃO PRESENTES AS FISSURAS	81
FIGURA 37 – CALÇADA ONDE ESTÃO PRESENTES AS FISSURAS	81
FIGURA 38 – MEDIÇÕES RELATIVAS À FISSURA.	82
FIGURA 39 – CROQUI EM CENTÍMETROS.	83
FIGURA 40 – DIMENSÕES PARA CÁLCULO DE TENSÃO EM CENTÍMETROS	85
FIGURA 41 – LOCALIZAÇÃO DA FISSURA EM ANÁLISE.	89
FIGURA 42 – FISSURAS	90
FIGURA 43 – FISSURAS	90
FIGURA 44 – LOCALIZAÇÃO DA CALÇADA	92
FIGURA 45 – CALÇADA QUE CONTÉM AS FISSURAS	92

FIGURA 46 – FISSURAS	93
FIGURA 47 – PONTE COLOMBO SALLES	94
FIGURA 48 – LOCALIZAÇÃO DAS FISSURAS	95
FIGURA 49 – FISSURAS POR ATAQUE DE SULFATOS	95
FIGURA 50 – FISSURAS POR ATAQUE DE SULFATOS	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TIPOS DE CIMENTO PORTLAND	25
TABELA 2 - VALORES CARACTERÍSTICOS SUPERIORES DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE RETRAÇÃO $ECS(T_{\infty}, T_0)$ E DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA $\Phi(T_{\infty}, T_0)$	41
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DAS FISSURAS	72
TABELA 4 - CLASSE E AGRESSIVIDADE AMBIENTAL (CAA)	107
TABELA 5 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE A CLASSE DE AGRESSIVIDADE E A QUALIDADE DO CONCRETO	108
TABELA 6 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE A CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL E O COBRIMENTO NOMINAL PARA $\Delta C = 10$ MM	109
TABELA 7 - VALORES DOS COEFICIENTES Γ_C E Γ_S	110
TABELA 8 - NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DE SANTA CATARINA (1961-1990) - UMIDADE RELATIVA DO AR MÉDIA COMPENSADA (%)	111

LISTA DE SIMBOLOS

α = coeficiente linear de expansão térmica;

A_g = área bruta da seção transversal concreto;

A_F = área de fundação ou outro elemento que restringe o encurtamento do elemento, geralmente tomado como uma superfície plana em contato;

A_B = área do elemento que sofre variação de volume;

$2Ac/u$ = espessura fictícia;

A_c = área da seção transversal;

$\beta_s(t)$ ou $\beta_s(t_0)$ é o coeficiente relativo à retração, no instante t ou t_0

β_1 = coeficiente de minoração de resistência nas idades iniciais do concreto;

cP = centiPoison, 10-2 Poise (Poise é unidade de viscosidade no SI)

ΔT = variação da temperatura do elemento;

δ_T = variação do comprimento do elemento;

E = Modulo de elasticidade;

E_c = Modulo de elasticidade do concreto;

E_F = módulo de elasticidade de fundação ou de restrição elemento;

ϵ = deformação especifica;

$\epsilon_{cs}(t^\infty, t_0)$ = deformação específica de retração;

F = força;

F_{at} = força de atrito;

f_{ctd} = resistência de cálculo do concreto a tração;

ϕ = coeficiente de fluência;

g = aceleração da gravidade (9,8 m/s²)

γ = massa especifica;

γ_c = coeficiente de minoração de resistência do concreto;

h = altura;

H = altura total;

I_c = momento de inercia e respectiva altura dos dois membros de suporte;

K_r = Grau de restrição;

L = comprimento;

m : massa especifica;

N = força normal;

δ = *máximo que o atrito na interface solo-concreto pode atingir.*

S = coeficiente de variação do tipo de cimento para obtenção de β_1 .

$\sigma_{\text{retração}}$ = tensão de retração;

σ_t = tensão de tração;

u = perímetro da seção em contato com a atmosfera;

V = volume;

ω = abertura da fissura.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Cimento Portland	15
2.1.1	Materiais	16
2.1.2	Composição Química	17
2.1.3	Pega e endurecimento.....	18
2.1.4	Adições de cimento	22
2.2	Agregado.....	25
2.2.1	Durabilidade	26
2.3	Causas de Fissuras em concreto	28
2.3.1	Ações aplicadas.....	28
2.3.2	Assentamento e falta de aderência entre o concreto e a armadura	31
2.3.3	Movimentação de escoramento e/ou formas.....	32
2.3.4	Retração	33
2.3.4.1	Retração plástica:	33
2.3.4.2	Retração por carbonatação.....	35
2.3.4.3	Retração térmica.....	35
2.3.4.4	Retração por secagem:.....	40
2.3.4.5	Juntas:.....	42
2.3.5	Reações expansivas.....	46
2.3.5.1	Ataque de sulfatos	46
2.3.5.2	Reação álcalis-agregado:.....	48
2.3.6	Corrosão das armaduras	50
2.3.7	Recalques diferenciais.....	55
2.4	Recuperação de Fissuras em Concreto	56
2.4.1	Técnica de Injeção de Fissuras	57
2.4.2	Selagem de Fissuras	61
2.4.3	Costura ou Grampeamento de fissuras	62

2.5	Recuperação de Corrosão em Armaduras de Concreto	64
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	70
4	ESTUDOS DE CASO	73
4.1	Corrosão de armadura	73
4.2	Falta ou ineficiência de junta de dilatação.....	80
4.3	Reação álcalis-agregado.....	89
4.4	Ações aplicadas	92
4.5	Ataque de Sulfatos	94
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	98
5.1	Conclusões	98
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	99
6	REFERÊNCIAS	100
7	ANEXOS.....	107
7.1	ANEXO 1.....	107
7.2	ANEXO 2.....	108
7.3	ANEXO 3.....	109
7.4	ANEXO 4.....	110
7.5	ANEXO 5.....	111

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material de construção mais empregado no mundo, perdendo apenas para a água. É composto de cimento Portland, que é resultado da transformação de matérias primas naturais como calcário e argila, em elevada temperatura, obtendo-se compostos que, após sofrerem hidratação, apresentam resistência mecânica e boa estabilidade frente à ação da água (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Pelo fato de sua resistência à tração ser aproximadamente dez vezes menor que a sua resistência a compressão, geralmente é empregado aliado a uma armadura – aço – que possui grande resistência tanto a tração quanto a compressão. À união desses materiais dá-se o nome de concreto armado.

Por esse motivo, a maior causa de fissuras em concreto é o desenvolvimento de algum tipo de esforço de tração no mesmo, tendo uma grande variabilidade no processo que originou esse esforço.

As fissuras podem ser definidas como descontinuidades de pequena abertura induzidas pela ação de forças que provocam o aparecimento de tensões de tração que superam a capacidade resistente do material componente da estrutura. (HELENE; Andrade, 2010)

Com a ocorrência de fissuras, há o receio de que a estrutura ou elemento construtivo deixe de cumprir com os seus critérios de desempenho ¹ ou que tenha a sua vida útil² reduzida. Neste ponto, salienta-se a importância do estudo das causas de fissuras no concreto, pois enquanto há fissuras que são apenas esteticamente desagradáveis, há fissuras que podem culminar na ruína ou inutilização do elemento construtivo. Por consequência, é necessária uma identificação adequada para que reparo seja efetivo.

Outro fator que destaca a importância do tema é o fato que a maioria dos problemas de fissuração encontrados no concreto podem ser prevenidos nas fases de projeto e execução. Sendo que, com a compreensão das consequências de ações, há uma melhora na qualidade das construções.

¹ Comportamento em uso de um a edificação e de seus sistemas. (NBR 15575)

² Período de tempo durante o qual o edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento dos níveis de desempenho previstos nesta norma (NBR 15575)

Neste trabalho serão apresentadas as possíveis causas de fissuração no concreto, seus mecanismos de ocorrência, bem como o tratamento de fissuras. Após isso, são analisados alguns casos de fissuras em concreto, nos quais são delineadas as causas e o tratamento adequado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é analisar qualitativamente os casos de fissuração em concreto encontrados em mais de uma edificação, buscando identificar suas causas e reparos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Elaborar fundamentação teórica sobre o as fissuras em concreto, assim com a sua forma de reparo;
- b) Busca de obras as quais apresentem fissuras em concreto de forma a proporcionar uma variabilidade de causas no estudo de caso;
- c) Identificar as causas das fissuras em concreto nas edificações fruto de estudo;
- d) Apresentar sugestões de melhorias contendo as ações necessárias para o reparo das fissuras encontradas;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são tratados os fundamentos teóricos considerados relevantes para a compreensão das fissuras incidentes em concreto. Para o discernimento dos eventos que causarão fissuras no concreto, é fundamental a compreensão da influência que cada uma de suas parcelas pode desempenhar.

O concreto é resultado da mistura entre cimento Portland, agregado fino, agregado graúdo e água. Nessa conjuntura, tem-se como encetamento, a descrição do cimento Portland, o principal composto do concreto, bem como a sua composição, as reações químicas, adições e a influência destes quanto às características da pasta endurecida. Com esse embasamento teórico, a compreensão de alguns processos de fissuração, como a formação de etringita tardia, se torna mais fácil, bem como o processo de justificativa para as soluções adequadas.

Seguiu-se com a explicação de como o agregado pode influir características do concreto, bem como em seu processo de fissuração. Posteriormente, é abordada a durabilidade do concreto, a qual é afetada pela relação água/cimento.

Por fim, aborda-se as causas, bem como as características, de cada tipo de fissura, finalizando com o tratamento de cada uma delas.

2.1 Cimento Portland

Para o trabalho em questão foram analisadas construções de concreto de cimento Portland, por conseguinte é substancial a discriminação das suas propriedades e de sua composição.

Segundo Battagin (ABCP), a palavra cimento vem da palavra *caementu*, que, na Roma antiga, denotava uma espécie de pedra natural. O cimento Portland foi inventado em 1824 pelo construtor inglês Joseph Aspdin, o mesmo queimou conjuntamente pedras calcárias e argila e o produto da combustão foi um pó fino. Este pó, após misturado à água e secar, resultou em um produto duro e indissolúvel em água, assim como as pedras empregadas na construção até tal período. A descoberta foi patenteada com o nome de cimento Portland pelo fato de apresentar cor, durabilidade e solidez análogos às rochas arenosas presentes na ilha britânica de Portland.

O Cimento Portland é um aglomerante pulverulento constituído de silicatos e aluminatos de cálcio. Quando esse produto é associado à água, transcorrem sucessivas reações químicas que o fazem endurecer e adquirir grande resistência mecânica. Posteriormente ao seu endurecimento, o material não é mais solúvel a água. (BAUER, 1987)

O cimento Portland é composto por clínquer e adições. O clínquer é o principal constituinte do cimento Portland. O mesmo é o resultado da queima de rocha calcária e argila, em proporções pertinentes. A cal presente na mistura, após o seu cozimento, é combinada aos compostos argilosos, isso faz com que a mistura tenha pouca quantidade de cal livre, de forma a não prejudicar a mistura (METHA e MONTEIRO, 2008).

2.1.1 Materiais

O cimento Portland, em sua forma mais básica, é constituído calcário, argila e gesso. O calcário é um composto encontrado na natureza com prevalência de carbonato de cálcio (CaCO_3) e impurezas como óxido de magnésio (MgO). O interessante é ter o mínimo de MgO no cimento, pois este é um composto de características expansivas (METHA e MONTEIRO, 2008).

Os argilominerais são silicatos de alumínio complexos compostos por duas unidades básicas: tetraedro de sílica e octaedro de alumina. Ou seja, de forma substancial, a argila é constituída de silicato de alumínio, ferro e outros minerais em menor proporção. Por conseguinte, extrai-se desse composto os consecutivos óxidos: dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro III (Fe_2O_3) que são basilares na concepção do cimento (DAS, 2012),

O gesso tem a incumbência de controlar o tempo de pega, em outras palavras, o início do endurecimento da mistura de clínquer e água. Na hipótese de não se empregar gesso à moagem do clínquer endureceria quase que instantaneamente quando misturado à água, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Desse modo, uma pequena parcela de gesso está presente em todos os tipos de cimento Portland, aproximadamente 3% em massa (ABCP, 2002).

Não se deve adicionar muita quantidade de gipsita (gesso) pois, além de retardar demasiadamente a pega, o elemento pode gerar reações que originam um

produto expansivo após a pasta já endurecida, a etringita secundária. (METHA e MONTEIRO, 2008).

2.1.2 Composição Química

Segundo Neville (2016) fusão da argila e do calcário origina o clínquer. Este possui quatro compostos principais em sua composição química os mesmos são:

- Silicato tricálcico - $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$;
- Silicato bicálcico – $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$;
- Aluminato tricálcico – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$;
- Ferro aluminato tetracálcico – $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Quando se trata de química do cimento/concreto, os compostos acima recebem outra nomenclatura, uma forma de abreviação (NEVILLE, 2016). A mesma se encontra listada abaixo:

- $\text{CaO} = \text{C}$;
- $\text{SiO}_2 = \text{S}$;
- $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$;
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe}$;
- $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$.

Dessa forma, ao longo do texto quando se quiser referenciar os compostos supracitados, o faremos com a seguinte simbologia:

- Silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) = **C_3S** ;
- Silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) = **C_2S** ;
- Aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) = **C_3A** ;
- Ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) = **C_4AFe** .

Cada composto atribui à pasta de cimento uma característica, influenciando nas propriedades do cimento endurecido. O silicato tricálcico (C_3S) é o maior responsável pela resistência do concreto em todas as idades principalmente até o primeiro mês de cura. Os cimentos de alta resistência inicial possuem uma maior concentração de C_3S . O composto reage com a água em poucas horas e nesse processo libera uma

grande quantidade de calor de hidratação, sendo o segundo entre os compostos do cimento na liberação de calor (METHA e MONTEIRO, 2008).

O silicato bicálcico (C_2S) adquire maior importância no processo do endurecimento do cimento em idades mais avançadas. Por se tratar de uma reação lenta, possui um baixo calor de hidratação (METHA e MONTEIRO, 2008).

O aluminato tricálcico (C_3A) tem pega instantânea e, por possuir a mais alta velocidade de reação, é o componente que mais emite calor de hidratação. Além disso, possui baixa resistência e sofre com a ação de águas sulfatadas. Sua concentração no cimento deve ser pequena. Esse composto é o responsável pela rapidez da pega (METHA e MONTEIRO, 2008).

O ferro aluminato tetracálcico (C_4AFe) nada contribui para a resistência, mas tem a importante função de fixar parte da alumina, diminuindo os índices C_3A e, conseqüentemente, aumentando a resistência a águas sulfatadas. Dessa forma, a alumina pode desempenhar a sua função de fundente na formação do clínquer sem prejudicar o seu desempenho (METHA e MONTEIRO, 2008).

2.1.3 Pega e endurecimento

Pode-se definir a *pega* como reações químicas sucessivas responsáveis pelo endurecimento da pasta de argamassa ou de concreto após o seu contato com a água.

O fenômeno da pega do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta do início do processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas, conseqüentemente, entretanto, um processo químico de hidratação. É um fenômeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que a torna imprópria para o trabalho. (BAUER, 1987)

O processo de enrijecimento do cimento Portland pode ser resumido nesses termos: hidratação dos aluminatos e hidratação dos silicatos. Nesta etapa do estudo, compreende-se a microestrutura do cimento e suas reações.

O enrijecimento da pasta é caracterizado pela hidratação dos aluminatos e a evolução da resistência (endurecimento) é realizada pelos silicatos. (METHA e MONTEIRO, 2008).

De maneira expandida, o processo ocorre da seguinte forma:

a) Hidratação dos aluminatos:

Dentre os componentes do cimento, o C_3A é o detentor de maior reatividade. Caso houvesse a inexistência de gesso ou gipsita no cimento Portland, a hidratação desse composto seria praticamente instantânea o que geraria uma grande quantidade de calor e prejudicaria significativamente a trabalhabilidade do material. (METHA e MONTEIRO, 2008).

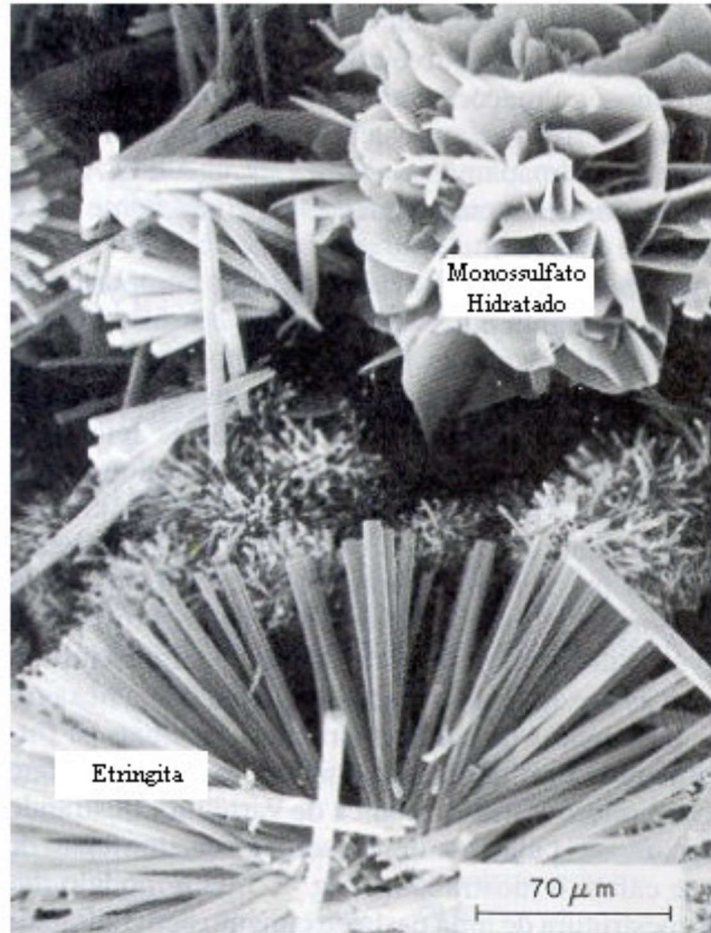
Dessa forma, a primeira etapa do processo de hidratação do cimento consiste na interação do C_3A , o sulfato presente na gipsita ($CaSO_4$) e a água, esta denominada, na química do concreto, de **H**. A reação entre elementos gera um composto nomeado de etringita ($C_6AS_3H_{32}$). Esta, por sua vez, se deposita nos grãos anidros formando pequenos cristais em formato de agulha. (METHA e MONTEIRO, 2008).

A formação das agulhas de etringita começa minutos após o início da hidratação, sendo responsável pelo fenômeno da pega e desenvolvimento da resistência inicial (METHA e MONTEIRO, 2008).

O C_4AF aliado aos sulfatos, produz compostos similares à etringita em seu processo de hidratação, afetando a velocidade de hidratação do C_3S (METHA e MONTEIRO, 2008).

A Figura 1 representa graficamente a microestrutura formada no processo de hidratação dos aluminatos:

Figura 1 - Micrografia eletrônica de varredura de cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita.



Fonte: MEHTA E MONTEIRO, 2008.

b) Hidratação dos silicatos:

Durante as primeiras horas após o contato do cimento com a água não há muitas reações. O que é conhecido como tempo de dormência. Passada esta fase, a pasta de cimento passa a aumentar sua viscosidade e temperatura que é denominado início de pega (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

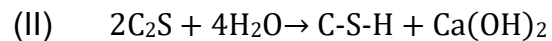
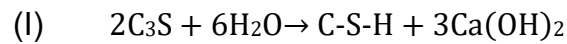
Mesmo após a pega, o concreto continua ganhando resistência, desde que não falte água para continuar as reações de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A hidratação dos silicatos acontece algumas horas após o contato do cimento com a água, após o período de dormência. A hidratação do C_3S origina silicatos de

cálcio hidratados, chamado genericamente de C-S-H por não possuir química bem definida. Esses compostos foram identificados como gel envolvente às partículas de cimento anidro e comportam-se como uma cola entre partículas densas. Além do C-S-H, há também a produção Ca(OH)_2 e um aumento da quantidade de etringita (MORANVILLE-REGOURD (1992).

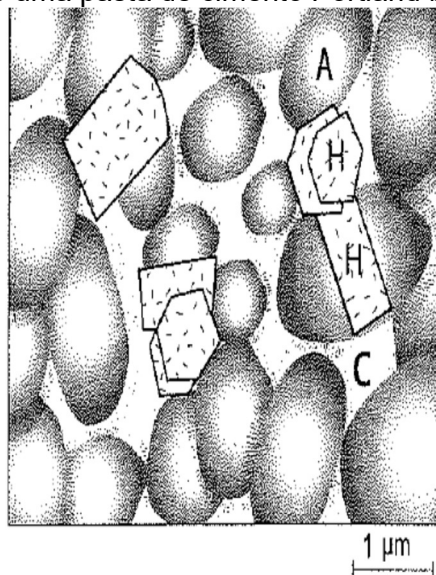
Os cristais de C-S-H formados são pequenos e fibrilares e o Ca(OH)_2 forma grandes cristais prismáticos. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O C_2S também produz C-S-H e Ca(OH)_2 , porém, sua reação é mais lenta e perdura até as idades mais avançadas do cimento. As reações de hidratação podem ser escritas como (NEVILLE, 2016):



A Figura 2 ilustra o processo de hidratação da pasta de cimento, onde a letra “A” representa as partículas de C-S-H, a letra “H” simboliza os produtos cristalinos hexagonais, a letra “C” retrata cavidades capilares ou vazias que existem quando os espaços originalmente ocupados por água não estão completamente preenchidos com produtos de hidratação do cimento.

Figura 2 – Modelo de uma pasta de cimento Portland bem hidratada.



Fonte: MEHTA E MONTEIRO, 2008

Os C-S-H são compostos com morfologia semelhante a uma malha reticulada e os principais responsáveis pela resistência da pasta em seu estado endurecido. Além disso, é o composto sólido de maior concentração no cimento hidratado, representa entre 50 e 60 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O Ca(OH)_2 é o único composto solúvel resultante da hidratação. Esse fato faz que o composto, quando em contato com águas puras, seja lixiviado e quando em contato com o CO_2 do ar forme CaCO_3 , um carbonato insolúvel que gera eflorescências. O composto também gera problemas ao cimento ou concreto quando em contato com água do mar. Os sulfatos da água do mar reagem como o Ca(OH)_2 formando em sulfato de cálcio, este, em contato com a alumina do C_3A forma etringita. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A etringita nas fases iniciais é um composto importante para o processo de endurecimento do cimento, porém, quando este composto é formado em uma pasta já endurecida, pode prejudicar a mesma, fissurando-a. Isso acontece porque a etringita é um composto expansivo, e se nesse processo de expansão o composto encontrar-se aprisionado serão originadas tensões que podem desagregar o cimento.

O único aspecto positivo a presença do hidróxido de cálcio é a alcalinidade conferida ao meio, responsável pela passivação da armadura (MOLIN, 1995)

Analisando as equações de NEVILLE (2016), percebe-se que o C_3S produz a mesma quantidade de C-S-H e maior quantidade de Ca(OH)_2 que o C_2S . Já é de conhecimento que o C_3S tem velocidade de hidratação maior que o C_2S . Dessa forma, quando o cimento possui uma maior concentração de C_3S adquire resistência mais rapidamente, porém, produz maior quantidade de Ca(OH)_2 que pode prejudicar a resistência do cimento. Dessa forma, quando o intuito é possuir um cimento com maior resistência, utiliza-se cimento com maior concentração de C_2S e quando o intuito é aumentar a resistência inicial, utiliza-se um cimento com maior concentração de C_3S . esse pensamento é útil se analisar que quanto a quantidade de Ca(OH)_2 influi num tipo de fissuração chamado de ataque por sulfatos.

2.1.4 Adições de cimento

As adições são os diferenciais entre as tipologias do cimento Portland. Essas adições são materiais que, quando aliados ao clínquer o modificam, aperfeiçoando

algumas de suas características. As adições mais comuns dos cimentos são: gesso, presente em todos os tipos de cimento Portland, pozolana, escória de auto forno e filer. As adições têm a finalidade de melhorar algumas propriedades, tais como: aumentar a trabalhabilidade e a resistência e retardar a velocidade das reações químicas que ocorrem no concreto. (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2010)

a) Pozolanas:

As pozolanas são materiais silicosos, ou silico-aluminosos. Esses materiais, quando pulverizados em partículas muito finas, apresentam pouco valor aglomerante. Porém, na presença de água e hidróxido de cálcio (cal), as pozolanas formam um composto de propriedades aglomerantes. O clínquer é um dos materiais que, em contato com a pozolana, faz acontecer o processo de hidratação. Isso acontece pois no seu processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (cal), que reage com a pozolana, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis pela resistência mecânica do cimento. O produto da hidratação da pozolana têm menor relação CaO/SiO_2 . Assim, são menos básicos que os produtos da hidratação do clínquer e, portanto, mais estáveis a meios agressivos (BATTAGIN, ABCP).

A adição de pozolana propicia ao cimento maior resistência a meios agressivos como esgotos, água do mar, solos sulfurosos e a agregados reativos. Diminui também o calor de hidratação, permeabilidade, segregação de agregados e proporciona maior trabalhabilidade e estabilidade de volume, tornando o cimento pozolânico adequado a aplicações que exijam baixo calor de hidratação, como concretagens de grandes volumes (MARTINS, 2008).

b) Materiais Carbonáticos – Fíler calcário

Os materiais carbonáticos são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição, tais como o próprio calcário. Tal adição serve também para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como um verdadeiro lubrificante. Quando presentes no cimento são conhecidos como filer calcário. (ABCP,

2002). O filer tem efeitos benéfico, além da trabalhabilidade, na densidade, permeabilidade, capilaridade e exsudação³ (BATTAGIN, ABCP).

c) Escória de alto-forno:

As escórias de alto-forno são resíduos da produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. Apresenta a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, que reage em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. Essa descoberta tornou possível adicionar a escória de alto-forno à moagem do clínquer como gesso, guardadas certas proporções, e obter como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final. As escórias atuam de forma diferente das pozolanas. São aglomerantes de baixíssima reatividade, e para ter um aumento em sua velocidade de reação necessitam de um ambiente alcalino, assim como o ambiente proporcionado pela pasta de cimento hidratada. (ABCP, 2002).

³ Quando há falta de finos, o concreto não consegue reter a água, que por possuir densidade inferior a pasta, sobe e se aloca na superfície livre do concreto ainda fresco. A esse acúmulo de água na superfície, após o concreto ter sido lançado e adensado, dá-se o nome de exsudação. (GIAMUSSO, 1992)

O que muda em cada tipo de cimento Portland é a quantidade e o tipo de adição. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o cimento Portland tem seis tipos que podem ser verificados na Tabela 1:

Tabela 1 - Tipos de Cimento Portland

Sigla	COMPONENTES (% em massa)			
	Clínquer +sulfatos de cálcio	Escoria de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP I	100	--	--	--
CP I-S	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II-E	94-56	6 - 34	--	0-10
CP II-Z	94-76	--	6-14	0-10
CP II-F	94 - 90	--	--	6-10
CP III	65-25	35 - 70	--	0-5
CP IV	85-45	--	15-50	0-5
CP V-ARI	100-95	--	--	0-5

Fonte: a tabela foi elaborada com as informações presentes em: NBR 5732/1991, NBR 11578/1991; NBR 5735/1991; NBR 5736/1991; NBR 5733/1991.

2.2 Agregado

O agregado pode ser influir no processo de fissuração do concreto da seguinte forma: sendo menos resistente que o concreto, o que gera ponto de fraqueza e tendo uma composição que fere reações expansivas. Os agregados podem conter substâncias nocivas ao concreto que devem ser limitados para não prejudicar sua resistência. Essas se apresentam sobre a forma de torrões de argila, materiais pulverulentos e impurezas orgânicas (MONTEIRO, 2008).

A porosidade, massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial dos agregados, determinam as propriedades do concreto no estado fresco. A porosidade e a composição mineralógica do agregado afetam sua resistência, e sua dureza como também módulo de elasticidade por sua vez, influenciam várias propriedades do concreto endurecido que contenha o agregado. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.2.1 Durabilidade

A exposição do concreto a meios agressivos, como águas ácidas, pode ser prejudicial ao mesmo. Por consequência, a impermeabilidade desse material está diretamente atrelada à sua durabilidade (Metha e Monteiro, 2008).

No decorrer do processo de hidratação do cimento há a formação de poros⁴,⁵ no mesmo. O tamanho e a continuidade dos poros na microestrutura do concreto determinam sua permeabilidade e a sua resistência, podendo essas duas características serem relacionadas, uma vez que ambas têm estreita relação com a porosidade (Metha e Monteiro, 2008).

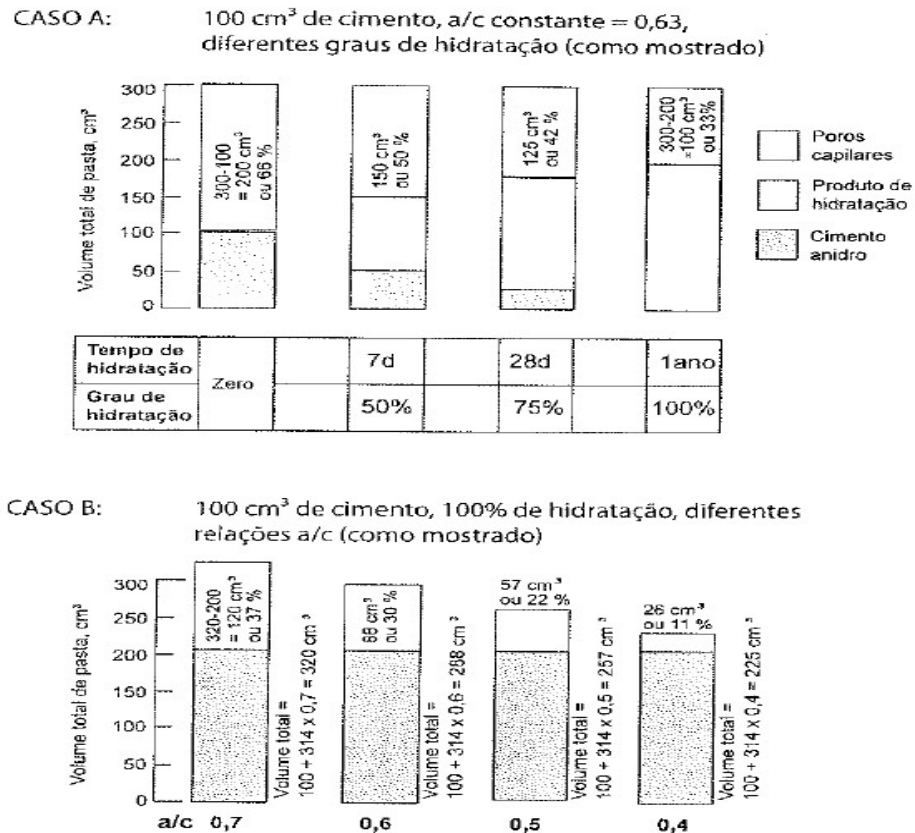
De acordo com Neville (2016), a relação água/cimento, é determinante para a porosidade da pasta de cimento endurecida independente do estágio de hidratação. No decorrer do processo de hidratação do cimento, parte dos vazios é preenchido por sólidos. Desta forma, pode-se afirmar que tanto a relação água/cimento, quanto o grau de hidratação exercem influência no volume de vazios do concreto (Metha e Monteiro, 2008).

Demonstrou-se que a relação água/cimento (isto é espaço capilar entre as partículas de cimento) e o grau de hidratação determinam a porosidade capilar total, que diminui com o decréscimo da relação água/cimento e/ou aumento do grau de hidratação. (Metha e Monteiro, 2008).

⁴ Os vazios representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da hidratação do cimento.

⁵ Segundo (METHA e MONTEIRO, 2008) há três tipos de vazios: poros de gel, poros de ar incorporado e vazios capilares, sendo que o último é o mais significativo.

Figura 3 – Variação da porosidade capilar com diferentes relações água/cimento e grau de hidratação.



Fonte: MEHTA, MONTEIRO; 2008.

A NBR 6118/2014 traz consigo a preocupação com a durabilidade do concreto. A referida norma atribui uma classificação quanto à agressividade do meio no qual o concreto se encontra. Essa classificação vem em forma de tabela, presente no anexo 1.

Associando a classe de agressividade ambiental e as tabelas dos anexos 3 e 4, é possível determinar a classe⁶ do concreto, sua relação água/cimento e seu cobrimento. Desta forma, a norma impõe uma barreira mínima para os agentes agressivos atravessarem (cobrimento), diminui a porosidade e aumenta a resistência conforme a agressividade do meio se intensifica.

⁶ Classificação do concreto conforme sua resistência. Tendo como sigla Cx, onde x corresponde ao fck.

2.3 Causas de Fissuras em concreto

Como mencionado, o concreto possui a sua resistência a tração aproximadamente dez vezes inferior à sua resistência a compressão. Dessa forma, as fissuras em concreto têm como sua principal causa os esforços em tração. Apesar de que, com essa frase, pareça ser simples e limitada a identificação da causa de uma fissura, existem diversas possíveis.

Em seu livro SOUZA e RIPPER (2009) apontam que as causas de deterioração das estruturas podem ser divididas em intrínsecas e extrínsecas. Onde as causas intrínsecas têm origem nos materiais e peças estruturais durante a fase de execução e utilização da obra. Já as causas extrínsecas, entende-se por determinação que não depende do corpo estrutural nem da composição dos materiais, as mesmas ocorrem no meio externo, avançando para o meio interno.

Nos subitens a seguir foram retratadas as causas elencadas pelos autores.

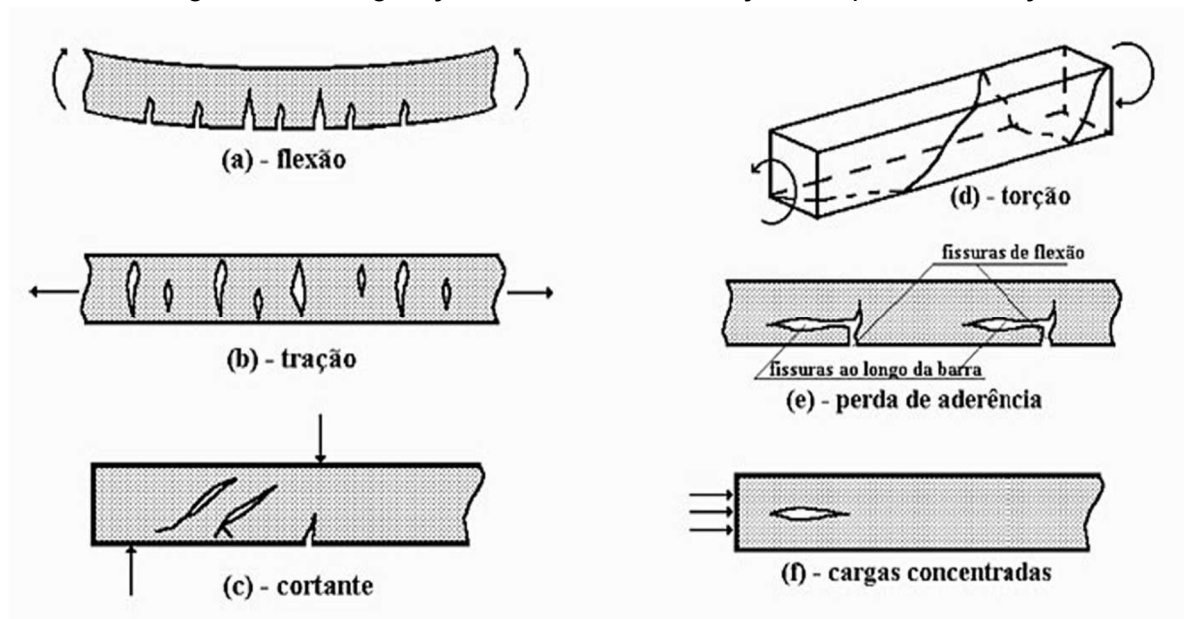
2.3.1 Ações aplicadas

Para que as solicitações de uma estrutura gerem fissuras, aquelas precisam ser maiores que a sua resistência. Para tal, há três possíveis situações: erro de projeto, erro de execução, mudança de uso ou que algum esforço imprevisível passe a exercer influência sobre a estrutura (RIPPER E SOUZA, 1998).

Quando um projeto não é bem elaborado ou detalhado, pode ter como consequência a fissuração da estrutura. Como já mencionado, o aço é o responsável por resistir aos esforços de tração de uma peça de concreto armado. Dessa forma, a insuficiência da armadura diminui a capacidade de resistência à tração e flexão da estrutura, aumentando a chance de colapso. (RIPPER E SOUZA, 1998)

Outro erro de projeto é o cálculo inadequado dos esforços solicitantes ou a falta de identificação de todos os esforços que ocorrem em um determinado elemento (RIPPER E SOUZA, 1998). Alguns exemplos de fissura por uma solicitação superior à suportada pela estrutura podem ser vistos na Figura 4.

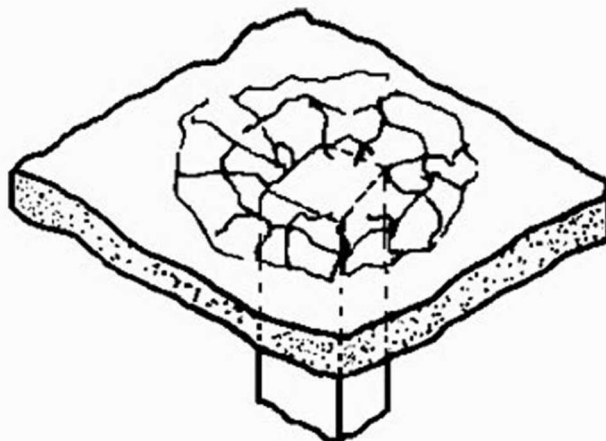
Figura 4 – Configurações de fissuras em função do tipo de sollicitação.



Fonte: Souza E RIPPER, 1998

A punção é uma forma de ruptura por cisalhamento que pode ocorrer em elementos de placa submetidos a uma carga ou reação concentrada aplicada transversalmente e caracteriza-se por ocorrer de forma brusca, podendo levar a estrutura à ruína através do colapso progressivo (RIPPER E SOUZA, 1998). As características da fissura por puncionamento estão ilustradas na Figura 5:

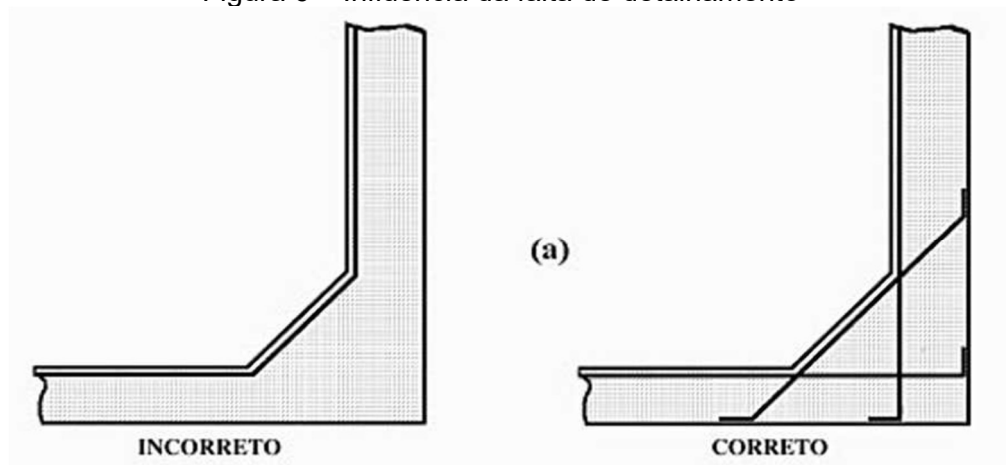
Figura 5 - Fissuração por puncionamento



Fonte: Souza E RIPPER, 1998

Um detalhamento insuficiente ou a falta de detalhamento também pode prejudicar a resistência de uma peça. Essa falta pode induzir a erros de execução, uma vez que a disposição da armadura está sujeita a interpretação de quem está executando o projeto. Tendo, assim, a possibilidade de comprometer a resistência e a durabilidade da construção (RIPPER E SOUZA, 1998).

Figura 6 – Influencia da falta de detalhamento



Fonte: Souza E RIPPER, 1998

A Figura 6 mostra um exemplo de como pode ser executada de maneira inadequada um projeto sem detalhamento. Na qual é de suma importância o acompanhamento da armadura até o fim da peça e evitar o empuxo no vazio.

Erros de execução podem ocasionar em fissuras. Esse tipo de fissura, de forma geral é semelhante àquelas apresentadas por erro de projeto. Essa semelhança pode ser explicada utilizando o exemplo da deficiência de armadura, se a deficiência for resultado de um erro de projeto ou for originada pelo não cumprimento do projeto na execução, a fissura ocorrerá da mesma forma. (RIPPER E SOUZA, 1998)

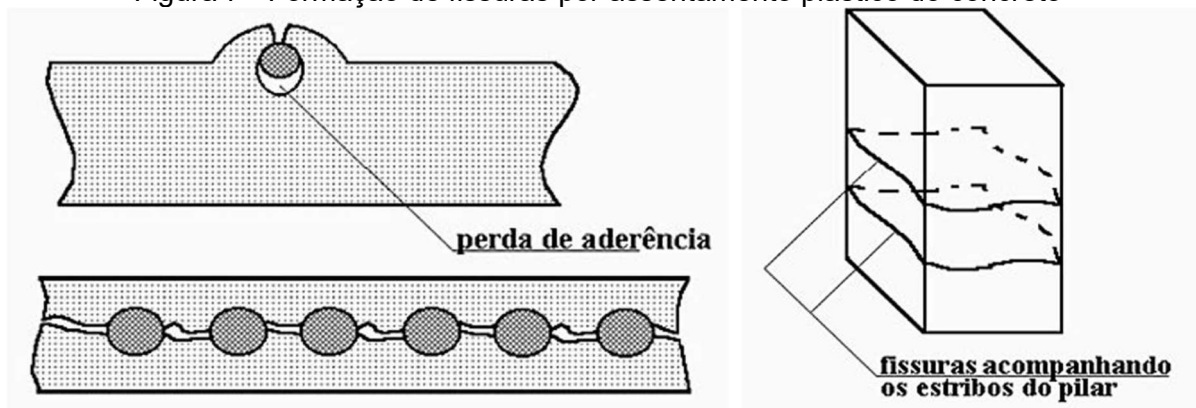
2.3.2 Assentamento e falta de aderência entre o concreto e a armadura

Segundo Ripper e Souza (1998), nos elementos de concreto armado, o concreto deve cobrir a armadura e obedecer às dimensões orientadas pelo projeto. Quando a presença de fôrmas ou a disposição das armaduras dificulta, ou mesmo impede, a massa de concreto de alcançar o espaço que a mesma estaria suposta a preencher, são gerados problemas a estrutura.

Entre os problemas atrelados a esse inconveniente estão: perda de aderência, fissuras, diminuição da capacidade estrutural. As fissuras causadas pelas falhas de assentamento tendem a acompanhar a armadura. Esse tipo e fissura é, em geral, acompanhada a um vazio embaixo da armadura, chamado efeito de parede (RIPPER, SOUZA; 1998).

A situação ainda pode ser agravada pela proximidade das barras, podendo haver uma conexão entre as fissuras e uma perda de aderência total entre a armadura e o concreto. Um ponto a ser salientado é que as fissuras ampliam o acesso a agentes nocivos tanto ao concreto quanto à armadura (RIPPER, SOUZA; 1998).

Figura 7 - Formação de fissuras por assentamento plástico do concreto



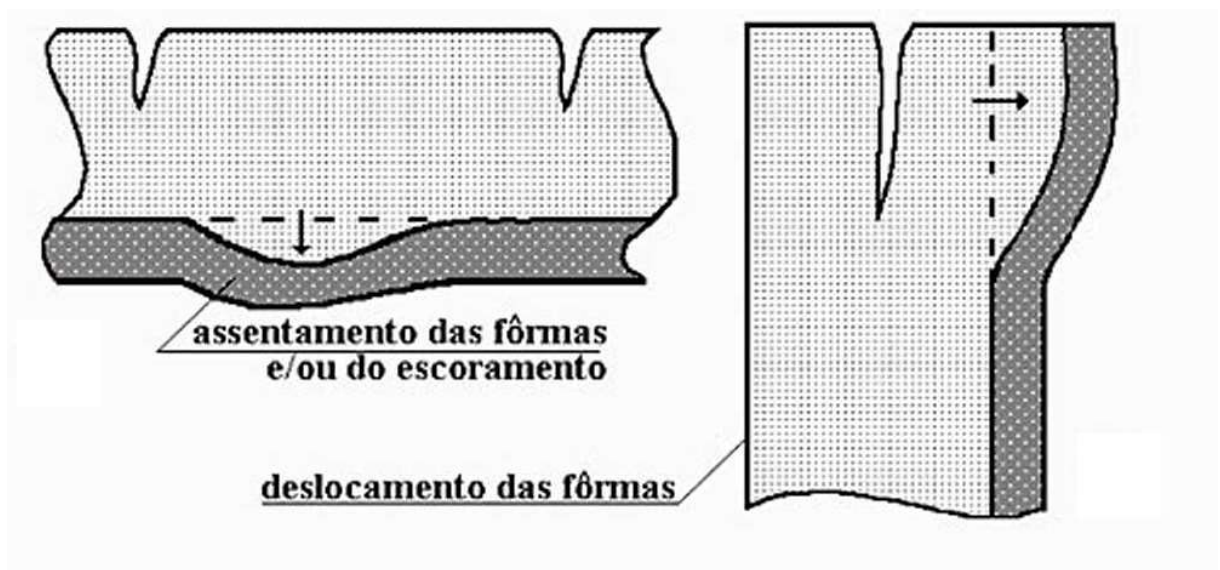
Fonte: Souza E RIPPER, 1998

2.3.3 Movimentação de escoramento e/ou formas

Em casos de movimentação das fôrmas ou do escoramento antes que o concreto tenha resistência necessária para manter sua forma inalterada, pode trazer danos às estruturas. Isso pode ser explicado pelo fato da resistência do concreto estar atrelada às ligações internas na sua microestrutura. Se as ligações não geram resistência o suficiente para o concreto se manter unido de forma a não estar desempenhando essa função, a tensão gerada pela gravidade em uma massa que não está inteiramente endurecida gera fissuras (RIPPER; SOUZA, 1998).

A fôrma pode ainda absorver a água constituinte do concreto, formando fissuras semelhantes às aquelas apresentadas do lado direito da Figura 8.

Figura 8 - Exemplos de fissuração por movimentação de fôrmas e escoramentos



Fonte: Souza E RIPPER, 1998

2.3.4 Retração

O processo de retração consiste na contração tridimensional do concreto, tendo como principal causa a perda de água. Quando restrita, essa contração pode resultar em fissuras no material. A retração pode ser dividida em cinco tipos diferentes, quais sejam: retração plástica, retração por secagem, retração autógena, retração térmica e retração por carbonatação.

2.3.4.1 Retração plástica:

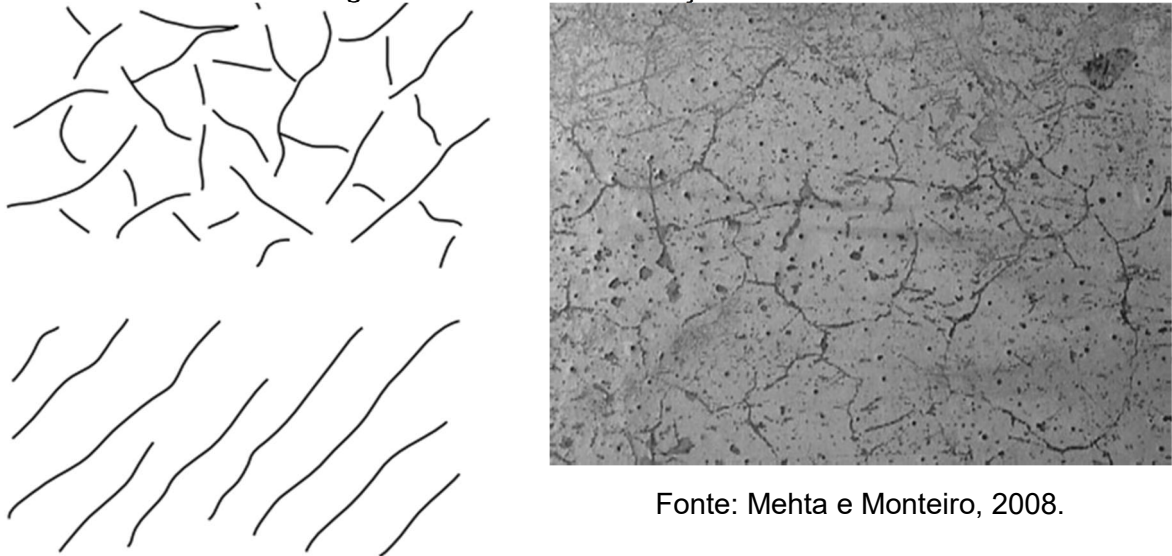
A retração plástica é a redução do volume do concreto devido à perda de água para o meio, ainda em seu estado fresco. Esse tipo de evento é mais comum em lajes em climas quentes e/ou com vento. A retração plástica não é bem quista na construção civil, uma vez que a água que estava destinada para o processo de hidratação da pasta é perdida para o meio, tendo como consequência a diminuição da resistência e a ocorrência de fissuras. (Ripper, Souza, 1998)

Esse tipo de fissura é ocasionado pela falta de cura⁷ ou inadequação desse processo. Essas fissuras são mais comuns em lajes e superfícies extensas, tendo como padrão fissuras paralelas a 45° próximas aos cantos ou com aspecto de mapa (Ripper, Souza, 1998).

A retração plástica não implica em danos sérios ao concreto, porém a aparência é muito comprometida e, além disso, fissuras mais profundas podem trazer problemas sérios com infiltração de água (Ripper, Souza, 1998).

⁷ Processo que dificulta a perda de água do concreto para o meio. Podendo ser dos seguintes tipos: Molhagem constante; Aspersão; Irrigação; Alagamento; Cobertura com tecidos/mantas úmidos (as); Cura química (compostos formadores de membranas de cura).

Figura 9 – Fissuras de retração Plástica



Fonte: Civil Engineering Portal

Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.

a. Retração autógena:

A retração autógena, definida como a mudança de volume sob temperatura e massa constantes, sem perda de umidade do concreto para o meio ambiente e sem ser submetido a esforços externos, é causada pela redução da umidade relativa no interior dos poros em decorrência da evolução da hidratação do cimento. (Cincotto *et al*, 2003)

Essa retração ocorre devido a diminuição de umidade relativa na pasta do cimento. De forma simplificada, os poros mais finos, para continuação do seu processo de hidratação, drenam a água dos capilares e dos poros maiores do concreto. A partir do momento no qual não há mais água suficiente, são geradas tensões capilares no concreto, tendo como consequência a diminuição do volume ou um processo de fissuração. Esse tipo de retração é mais significativo em concretos de alto desempenho por possuírem poros menores devido à baixa relação água/cimento (DANTAS; SILVA, 2005)

2.3.4.2 Retração por carbonatação

O processo de carbonatação do concreto consiste, de maneira simplificada, na transformação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) em carbonato de cálcio (CaCO_3) pela ação do gás carbônico (CO_2) do meio. Esse processo acompanha uma redução de volume, nomeada de retração por carbonatação. Dessa forma, para diminuição desse efeito é recomendado um concreto pouco poroso, com baixa relação água/cimento (THOMAZ, 1989).

2.3.4.3 Retração térmica

Os materiais da, principalmente os sólidos, estão sujeitos a deformações por origem térmica. Essas deformações, segundo HIBBELER (2010), obedecem a seguinte equação

$$(I) \quad \delta_T = \alpha * \Delta T * L$$

Onde:

δ_T : variação do comprimento do elemento;

α : coeficiente linear de expansão térmica⁸;

ΔT : variação da temperatura do elemento;

L : comprimento inicial do elemento.

De acordo com Hibbeler (2010), para materiais elásticos, a fórmula da tensão pode ser escrita pela Lei de Hooke:

$$(II) \quad \sigma = E \varepsilon$$

E = Módulo de elasticidade⁹;

ε = deformação específica¹⁰.

⁸ Variação de comprimento que um material sofre a ser submetido a um diferencial de temperatura de 1°C (MOLIN; 1988)

⁹ Módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido (HIBBELER, 2010)

¹⁰ Deformação por unidade de comprimento (HIBELLER, 2010)

Apesar do concreto não ser um material elástico, faz-se essa aproximação utilizando apenas a parte retilínea da curva tensão-deformação ou, quando não existir uma parte retilínea, a expressão é aplicada à tangente da curva na origem.

Como:

$$(III) \quad \varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

Substituindo δ da equação I na equação III. Obtém-se o seguinte resultado:

$$(IV) \quad \varepsilon = \alpha * \Delta T$$

Dessa forma, substituindo a equação IV na equação II, a tensão por variação volumétrica de maneira simplificada seria da seguinte forma:

$$(V) \quad \sigma_t = E \alpha \Delta T$$

Mehta e Monteiro (2008) levam em consideração a fluência¹¹ e o grau de restrição da peça, tendo como resultado a seguinte equação:

$$(VI) \quad \sigma_t = Kr \frac{E}{1+\phi} \alpha \Delta T$$

σ_t = tensão de tração

Kr = Grau de restrição

E = Modulo de elasticidade¹²

α = coeficiente de expansão térmica¹³

ΔT = variação de temperatura¹⁴

ϕ = coeficiente de fluência¹⁵

¹¹ Acréscimo de deformação com o tempo, se a carga permanecer (PINHEIRO, 2009).

¹² Pode ser assumido como 20 GPa (Mehta e Monteiro, 2008)

¹³ Assume-se $10 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (Mehta e Monteiro, 2008)

¹⁴ Assume-se a variação de temperatura com a hidratação do concreto: $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ (Mehta e Monteiro, 2008)

¹⁵ Há um relaxamento na tensão por fluência. Os valores estão na Tabela 2, página 40.

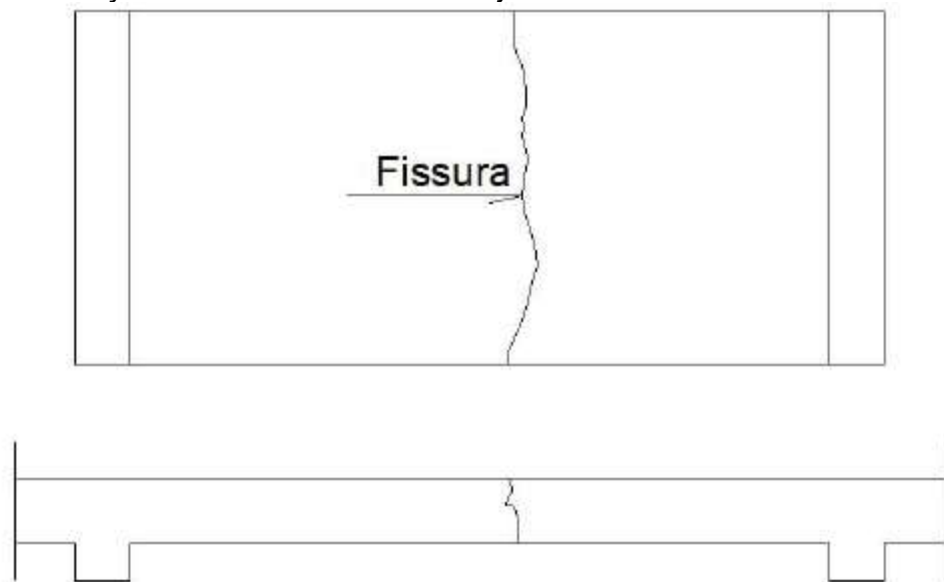
As tensões referentes a temperatura são desenvolvidas quando, além de haver uma variação dimensional pela temperatura, o elemento de concreto tenha algum tipo de restrição no movimento. Uma vez que a movimentação se encontra livre não há o desenvolvimento de tensões (MEHTA e MONTEIRO,2008).

As diminuições de temperatura relativas provocam contrações das peças que, se tiverem restritas em suas deformações, criarão tensões que poderão fissurá-las. (COUTINHO e GONÇALVES, 1994)

Neste caso, as tensões geradas pela restrição da movimentação térmica normalmente geram fissuração, posto que, criam-se tensões superiores à capacidade resistente ou de deformação das peças.

O aspecto das fissuras de retração térmica é muito parecido ao das fissuras de retração hidráulica, sendo perpendiculares ao eixo principal dos elementos, de largura constante, produzindo o seccionamento do elemento, ou seja, são fissuras essencialmente de tração incidentes na seção transversal do elemento estrutural (THOMAZ, 1989).

Figura 10 - Ilustração de uma fissura em uma laje devida aos movimentos térmicos



Fonte: CARASEK; CASCUDO, 2013.

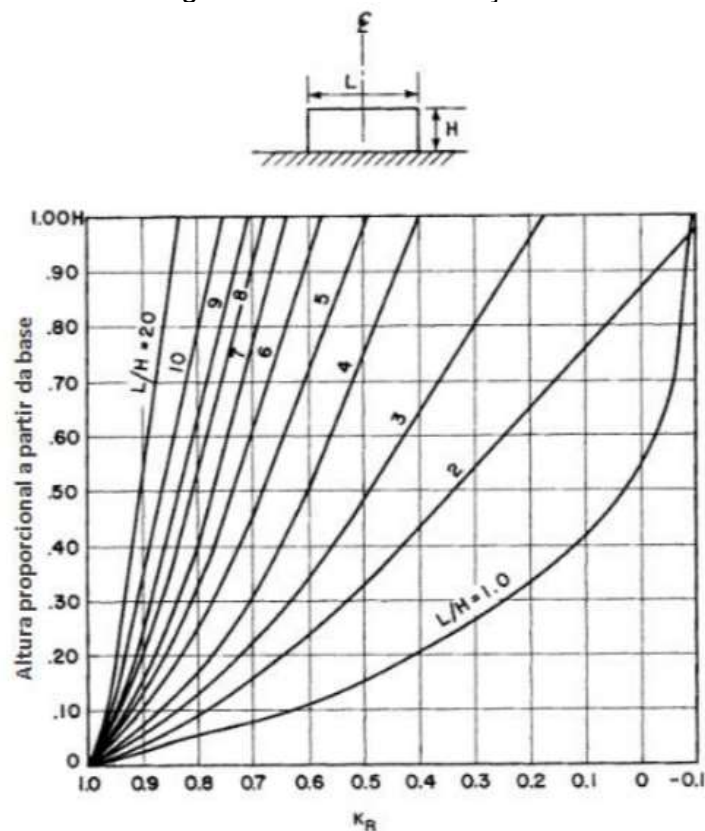
a. Grau de restrição:

Segundo o ACI 207.2R-95, sempre há alguma restrição fornecida por os elementos de suporte ou por diferentes partes do próprio elemento de concreto. O Instituto define grau de restrição, K_r , como a proporção da tensão da tensão gerada pela variação de volume caso a peça estivesse totalmente contida. Por consequência, seu valor varia de 0,0 (peça livre - 0%) a 1,0 (peça totalmente restrita - 100%).

A restrição contínua existe ao longo da superfície de contato do concreto com qualquer material contra a qual o concreto foi fundido. O grau de restrição depende principalmente das dimensões relativas, a força e o módulo de elasticidade do material de concreto e de restrição (ACI 207.2R-95).

De acordo com o instituto, o grau de restrição para restrições externas e contínuas pode ser obtido através da Figura 11 ou através das equações VII e VIII:

Figura 11 - Grau de restrição



Fonte: ACI207.2R, 1995.

Para L/H maior ou igual a 2,5, o coeficiente de restrição K_r em qualquer ponto em uma altura h acima da base pode ser calculado aproximadamente por:

$$(VII) \quad K_r = [(L/H - 2) / (L/H + 1)]^{h/H}$$

Para L/H menor que 2,5, o coeficiente de restrição K_r em qualquer ponto em uma altura h acima da base pode ser calculado aproximadamente por:

$$(VIII) \quad K_r = [(L/H - 1) / (L/H + 10)]^{h/H}$$

De acordo com o ACI, as tensões no concreto devido à retração têm relação direta com a diminuição da rigidez do material que o restringe. Conseqüentemente, há a necessidade de adequar o grau de restrição com essa propriedade. Para tal é utilizado um multiplicador para determinar o KR:

$$(IX) \quad \text{Multiplicador} = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_c}{A_F E_F}}$$

Onde:

A_g = área bruta da seção transversal concreto;

A_F = área de fundação ou outro elemento que restringe o encurtamento do elemento, geralmente tomado como uma superfície plana em contato;

E_c = Modulo de elasticidade do concreto;

E_F = módulo de elasticidade de fundação ou de restrição elemento.

Há também a restrição não continua. Essa é aplicada para membros que não são suportados verticalmente ao longo do seu comprimento, de forma a estar sujeito a esforços de flexão, bem como tensões devido às alterações de comprimento. Quando a diminuição do volume ou do comprimento ocorre em conjunto com os membros de flexão abrangendo entre os suportes, a rotação adicional das seções transversais deve ocorrer. Os momentos finais assim induzidos vão aumentar tensões de tração na face inferior e diminuir tensões de tração na face superior da variação de

volume. A grandeza da tensão induzida depende da rigidez relativa do elemento de concreto sob restrição e dos membros de suporte (ACI 207.2R-95). O grau de restrição nesse caso é:

$$(X) \quad KR = \frac{1}{1 + \frac{A_B h^3}{4L I_C}}$$

Onde:

A_B = área do elemento que sofre variação de volume;

h = altura média dos dois membros de suporte;

L = comprimento do elemento que sofre variação de volume;

I_C = momento de inercia e respectiva altura dos dois membros de suporte.

O último tipo de contenção, segundo o ACI, é a contenção interna existe em membros com mudança de volume não uniforme em uma seção transversal. Isto ocorre, por exemplo, dentro de paredes e lajes com temperaturas das faces interiores maiores do que as temperaturas de superfície ou com encolhimento diferencial de secagem a partir de fora para dentro. A restrição interna depende da mudança de volume diferencial dentro de um mesmo elemento. Seus efeitos são adicionados algebricamente aos efeitos da restrição externa, exceto que o seu somatório nunca excederá os efeitos de 100% de restrição externa. Portanto, sempre que existam condições de elevada retenção externos os efeitos de retenção interna podem ser insignificantes.

O instituto não fornece formulas para o cálculo do grau de restrição interno, entretanto, em um de seus exemplos deste caso, a mesma faz comparação com o KR da superfície e de outras profundidades, tornando possível o cálculo de tensão.

2.3.4.4 Retração por secagem:

Thomaz (1989) define a retração por secagem da seguinte maneira:

A quantidade excedente de água, empregada na preparação do concreto ou argamassa, permanece livre no interior da massa, evaporando-se

posteriormente; tal evaporação gera forças capilares equivalentes e compressão isotrópica de massa, produzindo a redução do seu volume.

A retração por secagem difere da retração plástica por ocorrer no concreto em seu estado endurecido. Também consiste na perda de água por evaporação, em ambientes com umidade relativa é inferior a 100%.

A NBR 6118/2014 fornece uma tabela simplificando a determinação da deformação específica de retração por secagem (ϵ_{cs}):

Tabela 2 - Valores característicos superiores da deformação específica de retração $\epsilon_{cs}(t^\infty, t_0)$ e do coeficiente de fluência $\phi(t^\infty, t_0)$

Umidade ambiente %		40		55		75		90		
Espessura fictícia $2A_c/u$ cm		20	60	20	60	20	60	20	60	
$\phi(t^\infty, t_0)$	t_0 dias	5	4,4	3,9	3,8	3,3	3,0	2,6	2,3	2,1
		30	3,0	2,9	2,6	2,5	2,0	2,0	1,6	1,6
		60	3,0	2,6	2,2	2,2	1,7	1,8	1,4	1,4
$\epsilon_{cs}(t^\infty, t_0)$ ‰	t_0 dias	5	-0,44	-0,39	-0,37	-0,33	-0,23	-0,21	-0,10	-0,09
		30	-0,37	-0,38	-0,31	-0,31	-0,20	-0,20	-0,09	-0,09
		60	-0,32	-0,36	-0,27	-0,30	-0,17	-0,19	-0,08	-0,09

Fonte: NBR 6118/2014.

$\epsilon_{cs}(t^\infty, t_0)$ - deformação específica de retração;

$\phi(t^\infty, t_0)$ - coeficiente de fluência;

$2A_c/u$ - espessura fictícia;

A_c - área da seção transversal;

u - perímetro da seção em contato com a atmosfera.

A NBR 6118/2014 recomenda a equação IX para casos que requerem maior precisão.

$$(XI) \quad \varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs,\infty} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

$\beta_s(t)$ ou $\beta_s(t_0)$ é o coeficiente relativo à retração, no instante t ou t_0

$\varepsilon_{cs,\infty}$ é o valor final da retração;

Podendo-se também utilizar nesse caso a lei de Hooke para obtenção de tensão. Apesar de não ter sido encontrada qualquer equação para a determinação de tensão de retração por secagem, foi feita uma analogia com a retração térmica resultando em:

$$(XII) \quad \sigma_{cs} = Kr \frac{E}{1+\phi} \varepsilon_{cs}$$

Unindo a equação VI e a equação X, obtém-se a fórmula da tensão total gerada por retração:

$$(XIII) \quad \sigma_{\text{retração}} = Kr \frac{E}{1+\phi} (\varepsilon_{cs} + \alpha \Delta T)$$

Segundo o ACI, quando a restrição da variação do volume do concreto atinge a resistência à tração do concreto, uma fissura vai se formar. De forma que a fissuração vai iniciar onde o elemento se encontra restrito. O progresso da fissura acontece até que é atingido um ponto em que a tensão é insuficiente para continuar a fissura. Após a ruptura inicial, a tensão causada por restrição na região da fissura é transferida para a porção não fissurada do membro, aumentando, desse modo, as tensões de tração acima da fenda. A retenção máxima de base não ocorre até que a fenda se propaga para uma altura de 0,2 a 0,3 vezes a altura da seção. Nesse ponto, a fissura é livre para propagar a sua altura completa, sem uma redução no volume.

2.3.4.5 Juntas:

Para evitar as fissuras por retração térmica e hidráulica, a NBR 6118/2014 recomenda a utilização de juntas cuja definição atribuída pela referente norma é: *“qualquer interrupção do concreto com a finalidade de reduzir tensões internas que possam resultar em impedimentos a qualquer tipo de movimentação da estrutura”*.

Ou seja, essas juntas são fissuras programadas de forma a não comprometer esteticamente o elemento construtivo, ou sua integridade, visto que é aplicado selante na mesma para não haver penetração de água e outros agentes nocivos ao concreto e a mesma é preenchida por materiais elastômeros para absorver as tensões da estrutura.

Segundo o ACI, utiliza-se juntas de dilatação e contração para reduzir o tamanho e o número de fissuras. Tem sido utilizada também a formação de sulcos em calçadas e pavimentos em construção para criar planos de fraqueza e, assim, induzir o fissuramento de forma a coincidir com as linhas das ranhuras.

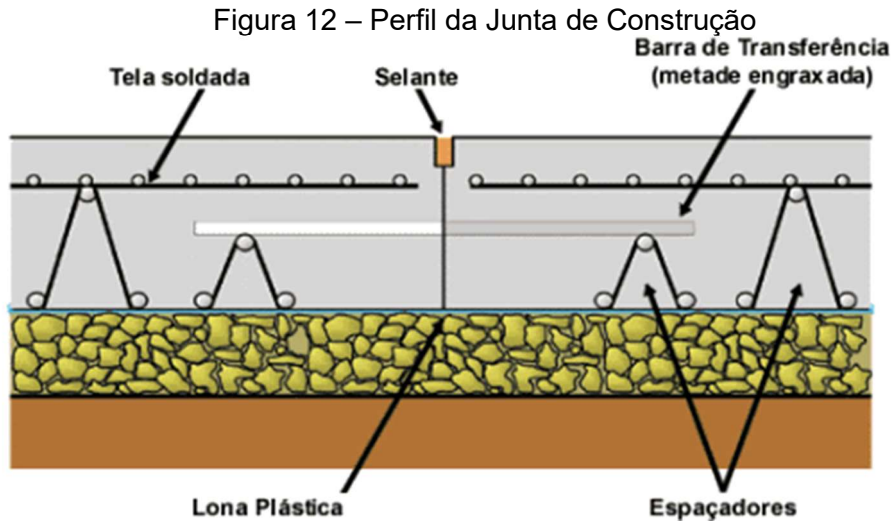
Segundo Rodrigues (1999) existem três tipos de juntas de concreto, quais sejam.

a. Junta de construção (JC):

Esse tipo de junta tem o intuito de delimitar as faixas de concretagem, nos sentidos longitudinal e transversal, geralmente de acordo com um esquema previamente estipulado. Se por qualquer motivo a concretagem de uma faixa é interrompida, pode ser criada uma junta de construção (RODRIGUES, 1999).

O espaçamento desse tipo de junta está limitado pelo tipo de equipamento utilizado, geometria da área e aos índices de planicidade a serem obtidos. Além disso os autores salientam que essas juntas devem ser executadas com dispositivos de transferência de carga, como as barras de transferência (BRAGA e PEREIRA, 2014).

A NBR 6118/2014 determina que o espaçamento mínimo entre as juntas de construção deve ser de 15 metros. No caso de ser necessário afastamento maior, devem ser considerados no cálculo os efeitos da retração térmica do concreto, da retração hidráulica e das variações de temperatura. Além disso, no caso de existência de armaduras, estas devem terminar pelo menos a 6 cm das juntas.



Fonte: Site do PET UFJF

b. Junta serrada (JS):

Segundo Braga e Pereira (2014), a junta serrada tem como função permitir a acomodação das tensões geradas pela retração do concreto. Os autores também afirmam que é importante o emprego de barras de transferência para o controle do empenamento da placa.

Segundo o artigo Execução de juntas de piso de concreto, da revista Técnica, o corte geralmente é feito entre seis e doze horas após o lançamento do concreto. A matéria também define as características do corte:

Para que a junta serrada trabalhe na seção planejada, é necessário que o corte tenha profundidade de no mínimo 40 mm e pelo menos $1/3$ da espessura do piso. A abertura do corte é definida pelo disco de corte utilizado, normalmente próximo a 3 mm.

Quanto ao revestimento, a mesma matéria faz a seguinte afirmação:

No caso de operação de empilhadeiras de rodas rígidas, o preenchimento das juntas deve ser realizado com epóxi semirrígido. Nos demais casos, o preenchimento pode ser feito, por exemplo, com selante de poliuretano. O momento do preenchimento deverá ser retardado o máximo possível, para evitar problemas com os materiais de preenchimento.

Figura 13 - Junta Serrada



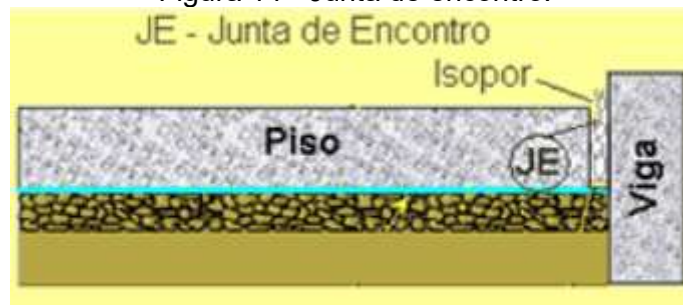
Fonte: Site do PET UFJF

c. Junta de encontro ou de expansão (JE):

Esse tipo de junta tem o intuito de separar pisos e lajes de partes da estrutura, por exemplo, pilares (onde é comumente usada uma junta de expansão com formato diferente, chamada de diamante) e vigas-baldrames. Isso faz com que o piso trabalhe independente das outras estruturas existentes (RODRIGUES,1999).

Seu preenchimento pode ser constituído por materiais como borrachas, plásticos ou materiais betuminosos. Esse tipo de junta pode possuir ou não barras de transferência. Para sua execução são usadas placas de isopor de 10 mm de largura como gabarito de distanciamento (RODRIGUES,1999).

Figura 14 - Junta de encontro.



Fonte: Site do uniontech

2.3.5 Reações expansivas

O concreto pode sofrer reações expansivas ligadas ao ataque de sulfatos ou relacionadas aos agregados. Entretanto, em ambos os casos, há a formação de um produto com volume superior ao vazio em que o mesmo foi originado, essa expansão tende a pressionar o meio que o cerca, tendo como consequência a fissura do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as reações químicas envolvendo a formação de produtos expansivos podem danificar o concreto. Com a expansão há o aumento das tensões internas no concreto, resultando nas seguintes manifestações: fechamento de juntas de expansão; deformações; deslocamentos em diferentes partes da estrutura; fissuração; lascamento e pipocamento.

De forma geral, as fissuras por reações expansivas possuem aspecto mapeado/craquelado, sendo possível a sua distinção pelas características do meio e por análise química do concreto.

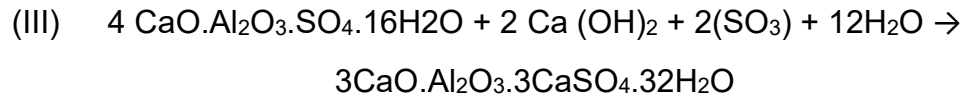
2.3.5.1 Ataque de sulfatos

No tópico 2.1.2 e 2.1.3 foi explicada a composição do cimento e sua reação de hidratação, bem como a formação de etringita secundária, aquela que é formada na fase de hidratação dos silicatos ou quando o cimento já estiver endurecido.

Para ocorrer o ataque por sulfatos, o concreto precisa de dois requisitos: ter porosidade o suficiente para os sulfatos penetrarem e estar em um ambiente com alta concentração de sulfatos. Segundo as notas de aula de Thomaz (2003), alguns ambientes propícios para essa reação são: água do mar, alguns solos argilosos, ambientes de esgoto doméstico e industrial e lençol freático contaminado por alguns pesticidas

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os componentes da pasta de cimento mais vulneráveis ao ataque pelos íons sulfato são o hidróxido de cálcio e as fases que contêm alumina. Os sulfatos penetram nos poros do concreto e entram em contato como o Ca(OH)_2 , produzido pelo processo de hidratação do C_3S . Quando isso acontece, forma-se sulfato de cálcio que, por sua vez, reage com as aluminas do concreto resultado na formação de etringita. Entretanto, diferente da etringita formada

na fase de hidratação do concreto, quando o composto é formado na fase endurecida, está rodeado por componentes sólidos e, como o composto possui volume maior que o volume do poro, o concreto é fissurado. O autor descreve o processo segundo a equação III:



A pressão de cristalização desse componente é muito grande, com expansão de mais de 300%. Assim, quando essa pressão atinge a resistência à tração do concreto, ocorrem as fissurações e o processo de deterioração do concreto se intensifica. (Nakamura, 2004 *apud* BATTAGIN, 2004).

Este quadro não costuma manifestar-se antes de um ano após a concretagem.

Além da etringita, o ataque de sulfatos também pode originar outros produtos expansivos como a taumasita e o gesso, entretanto a etringita é o que possui efeitos mais significativos.

Os sulfatos também podem estar envolvidos em reações com agregados. Quando o mesmo entra em contato com rochas caulinizadas, ou feldspatos calcosódicos, que contêm alumina pode resultar na formação de etringita e outros sólidos expansivos.

Figura 15 - Fissuras decorrentes de ataque de sulfato



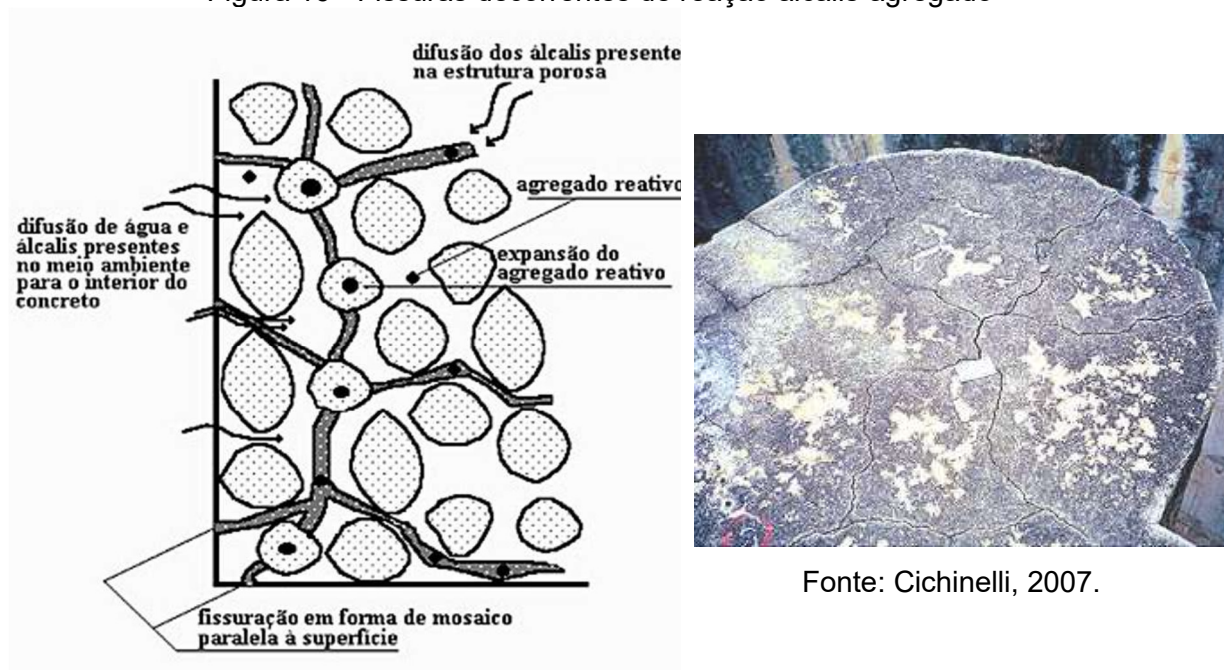
Fonte: Thomaz, 2003

2.3.5.2 Reação álcalis-agregado:

A interação química entre o concreto e o agregado faz parte da adesão dos mesmos. Apesar de, em geral, essas reações serem benéficas a resistência do concreto, podem originar produtos expansivos. Essas reações são entre a interação dos elementos que garantem a alcalinidade do cimento (os hidróxidos) e componentes dos agregados.

Segundo SOUZA e RIPPER (2009), a reação álcalis-agregados resulta da interação entre a sílica reativa de alguns tipos de minerais utilizados como agregados e os íons álcalis (Na^+ e K^+) presentes nos cimentos (quando em percentagem superior a 0.6%), libertados durante a hidratação dos mesmos, ou ainda pela penetração de cloretos, contendo estes mesmos íons, no meio concreto. A fissuração causada por reação álcalis agregado possui um aspecto mapeado, conforma a Figura 16:

Figura 16 - Fissuras decorrentes de reação álcalis-agregado



Fonte: Cichinelli, 2007.

Fonte: Souza E RIPPER, 1998

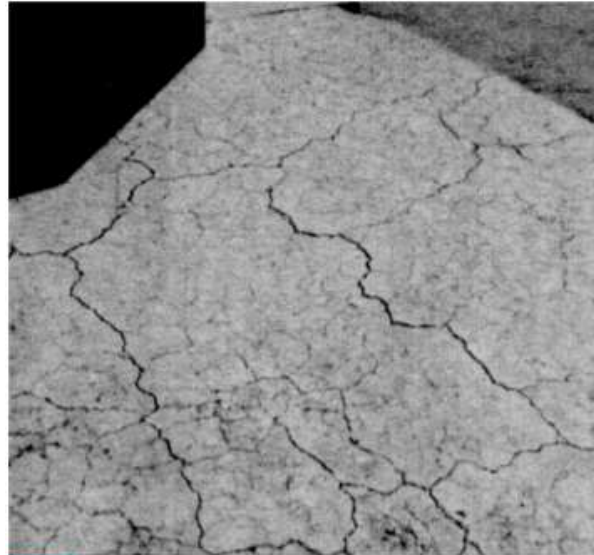
a. Reação álcali-sílica

A reação entre os silicatos e os íons álcalis gera um gel expansivo que absorve água por osmose e se expande entre os poros do concreto. Quando os vazios do concreto estão todos preenchidos por esse gel, gera-se uma tensão interna e o concreto é fissurado. Esta reação se desenvolve lentamente, podendo mesmo levar vários anos para surgir, sendo o sintoma mais aparente a fissuração desordenada nas superfícies expostas (GOMES; BARRETO, 2013).

Esse tipo de problema pode ser evitado com a adição de pozolanas, como o metacaulim, e poderá ser um recurso, sempre que não for possível prevenir com a utilização de cimentos com baixo teor de álcalis;

Estudos como o de Ramlochan (2004) comprovaram a eficiência do metacaulim em controlar a expansão causada pela reação álcali-sílica quando adicionado em substituição parcial ao cimento Portland. Os ensaios realizados em prismas de concreto indicaram que 10 a 15% de adição de metacaulim são suficientes para mitigar a reação, dependendo do tipo de agregado.

Figura 17 - Bloco de fundação com fissuras de reação álcalis-sílica



Fonte: Thomaz, 2003.

b. Reação álcalis-dolomita:

O calcário dolomítico é aquele que tem entre 2,1% a 10,8% de MgO em sua composição. Como foi visto no tópico 2.1.1, esse composto não é interessante no concreto por ser expansivo.

A reação álcalis-dolomita, o hidróxido de sódio presente no cimento reage com o calcário dolomítico, e como produto da reação obtém-se novos sólidos sendo que a estrutura dos cristais do reagente permanece inalterada, ou seja, o resultado é expansivo. A única forma de combater essa reação é a utilização de cimentos com mínima quantidade de álcalis e a prévia avaliação da reatividade dos calcários. (SOUZA e RIPPER, 2009)

2.3.6 Corrosão das armaduras

A ISO 8044/2015 define *corrosão* como interação físico-química entre o metal e o meio, resultando em mudanças nas propriedades do metal, sendo prejudiciais a sua função ou ao sistema onde ocorra.

A corrosão conduz à formação de óxidos e hidróxidos de ferro, produtos de avermelhados, pulverulentos e porosos, denominada ferrugem (ALMEIDA, 2013)

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

HELENE (1986) informa que para a ocorrência corrosão nas armaduras no interior do concreto são necessárias as seguintes condições:

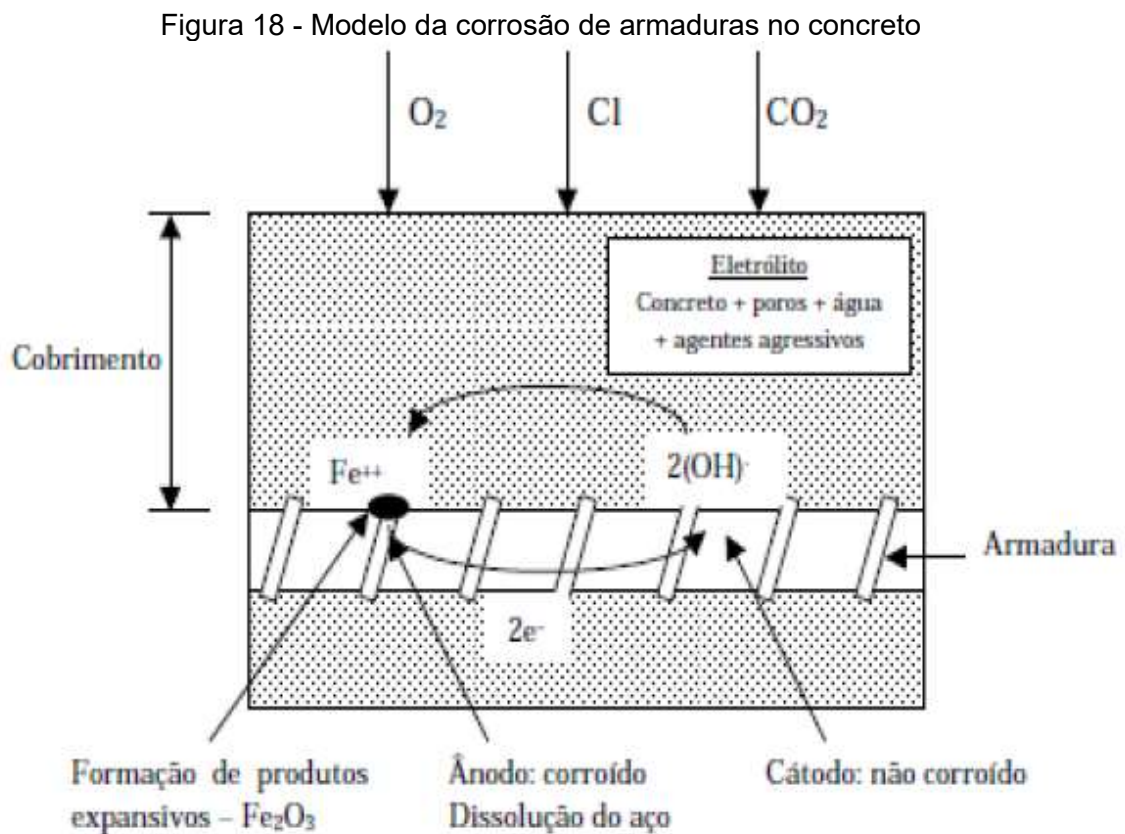
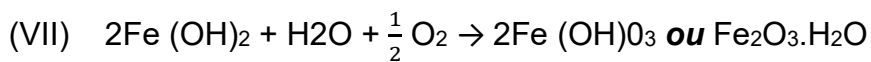
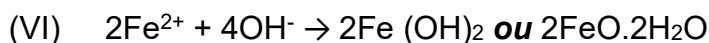
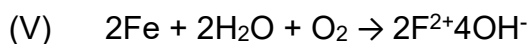
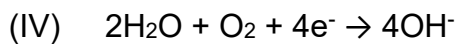
- Deve existir um eletrólito - Meio que permite a dissolução e movimento de íons ao longo das regiões anódicas e catódicas, gerando uma corrente de natureza iônica e, também, para dissolver o oxigênio. No concreto, podem ser eletrólitos: a água presente no concreto em grandes quantidades; alguns produtos da hidratação do cimento como portlandita e hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .
- Deve existir diferença de potencial (ddp) - entre dois pontos aleatórios da armadura, seja pela diferença de umidade, aeração, concentração salina,

tensão do concreto e/ou no aço, impurezas no metal, heterogeneidades inerentes ao concreto, pela carbonatação ou pela presença de íons.

- Deve existir oxigênio - Que regulará todas as reações de corrosão, dissolvido na água presente nos poros do concreto.

Há, ainda, a presença de agentes agressivos no eletrólito que podem acelerar a corrosão, como, por exemplo, os íons sulfetos (S^{2-}), os íons cloretos (Cl^-) e o dióxido de carbono (CO_2) (CUNHA; HELENE, 2001).

Segundo ALMEIDA et al. (2013), a corrosão se desenvolve na forma das seguintes reações:



O concreto oferece ao aço uma dupla proteção. Primeiro uma proteção física, a qual evita o contato do aço com o meio externo e, segundo, uma proteção química. O concreto possui um pH elevado e este resulta na formação de uma película passivadora que envolve o aço (Figueiredo; Meira, 2013).

O elevado pH da solução dos poros do concreto se deve, principalmente, aos hidróxidos de sódio (NaOH) e de potássio (KOH), conferindo pHs da ordem de 13 a 14 à fase líquida do concreto (ANDRADE; PAGE, 1986).

Segundo POURBAIX (1987), a película passivadora é formada a partir de reações eletroquímicas que resultam na formação de uma fina camada de óxidos, transparente e aderente ao aço. Como a potencialidade da corrosão depende do pH do meio, a ação de proteção exercida pela película passivadora é garantida pela alta alcalinidade do concreto e um adequado potencial eletroquímico.

A perda de estabilidade da camada passivadora resulta no processo de corrosão do ferro. Essa perda tem como origem a penetração de substâncias agressivas que atuam através dos seguintes mecanismos (BAKKER, 1988):

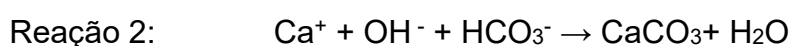
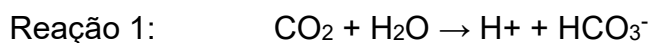
- a carbonatação do concreto, que reduz seu pH a níveis insuficientes para manter o estado passivo das armaduras;
- a presença do agente despассивador íon cloreto em quantidade suficiente para romper localizadamente a camada passivadora.

a) Carbonatação:

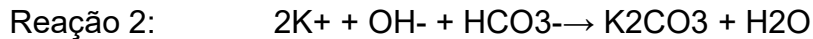
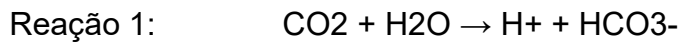
Segundo Poglialli (2009), gás carbônico (CO₂), o dióxido de enxofre (SO₂) e o ácido sulfídrico (H₂S) podem penetrar os poros do concreto e diminuir o pH do mesmo. O autor ainda cita o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH) como os compostos hidratados do cimento mais suscetíveis à carbonatação, assim como os silicatos alcalinos.

Segundo Cunha e Helene (2001), reações de despassivação por carbonatação ocorrem de seguinte forma:

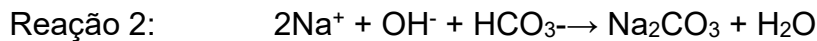
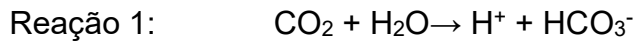
Hidróxido de cálcio:



Hidróxido de potássio



Hidróxido de sódio



A carbonatação tem como ponto inicial a superfície e avança progressivamente para o interior do concreto formando uma “frente de carbonatação”; onde o processo ainda não se perfectibilizou, o pH é próximo a 13, já nos pontos percorridos pela carbonatação, o pH é próximo a 8 (HELENE, 1986).

Nas reações de carbonatação percebe-se a obtenção de sais como produtos. Esses sais vão permanecendo no concreto, diminuindo o índice de vazios e retardando o próprio processo de carbonatação. A esse fechamento dos poros, dá-se o nome de colmatação (REPETTE, 2017).

Danos causados pela corrosão das armaduras por carbonatação, manifestam-se sob a forma de expansão, fissuração, destacamentos do cobrimento, perda da aderência e redução significativa de seção da armadura, subtraindo o comportamento da vida em serviço da estrutura para qual foi projetada, elevando assim os custos de manutenção e reparo (HELENE, 1986).

b) Ação de cloretos

Os íons cloreto (Cl⁻) penetram nos poros do concreto, conjuntamente com a água e o oxigênio e, ao encontrar a película passivadora da armadura, lhe provocam desestabilizações pontuais. Apesar de haver incertezas, acredita-se que a ruptura da película passivadora é algo dinâmico, com eventos repetidos de despassivação e repassivação, até a despassivação definitiva da armadura, bem como que este efeito ocorre de forma localizada. Essa é uma característica que faz com que a corrosão desencadeada por cloretos seja tipicamente por pites, diferindo do que ocorre devido à carbonatação (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).

Os íons cloreto que ingressam para o interior do concreto são responsáveis pelo aumento da condutividade elétrica do eletrólito facilitando a corrosão das armaduras (MEDEIROS; HELENE, 2003).

Segundo GENTIL (2003), a ação do cloreto pode ser minimizada pela formação de cloroaluminato de cálcio que é formado na reação entre os cloretos e os aluminatos constituintes do concreto. Dessa forma, diminui-se o cloreto livre-os mais prejudiciais para o processo de corrosão. Então, se o concreto contém níveis elevados de aluminato tricálcico (C3A), se favorece a proteção contra os cloretos.

A despassivação das armaduras por penetração de íons cloreto pode ocorrer quando (SOUZA; RIPPER, 1998):

- Há um elevado teor de cloreto, que pode estar dentro dos materiais que compõem o concreto;
- O concreto entra em contato com a água do mar;
- Utiliza-se sal marinho (NaCl) para degelo da neve em estruturas de concreto;
- Estruturas enterradas têm contato com solos contaminados;
- Evaporação do cloro através de processos de limpeza da água em reservatórios atingindo a superfície interna do concreto;
- Há tratamentos de limpeza realizados com ácido muriático nas estruturas.

A penetração de íons cloreto não é visível, não reduz a resistência do concreto e não altera a sua aparência superficial. Para identificar a profundidade de um teor crítico de cloreto são necessários ensaios específicos (MEDEIROS; HELENE, 2003).

A taxa de penetração de cloreto no concreto depende, entre outros fatores, de o local onde esta estrutura de concreto se encontra, a situação de contato com o cloreto, a água e o oxigênio, que são os fatores que contribuem para todo o processo de corrosão (MEDEIROS; HELENE, 2003).

As fissuras por corrosão de armadura possuem um aspecto característico, podendo vir acompanhadas de um desprendimento do concreto, podem apresentar manchas de escorrimento de ferrugem, possuem desenho similar ao da armadura corroída, estão presentes nas posições onde deve ter armadura no concreto e as

fissuras podem estar em posição a gerar planos diferentes em relação ao plano do elemento fissurado.

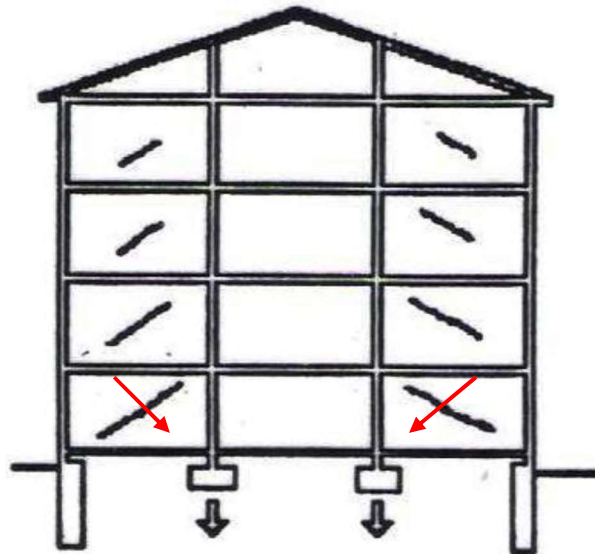
2.3.7 Recalques diferenciais

A NBR 6122 define recalque como: movimento vertical descendente de um elemento estrutural e quando o movimento for ascendente, denomina-se levantamento. Quando há o recalque na estrutura quer-se dizer que a capacidade de carga do solo é inferior à solicitação que a estrutura impõe ao mesmo.

O recalque diferencial é aquele que os elementos recalcam de maneiras diferentes entre si, gerando tensões na estrutura. Esse tipo de recalque pode ter origem na fase de projeto, na fase de execução ou de utilização.

As fissuras por recalque diferencial formam um ângulo de 45° , de forma que passando uma reta perpendicular à fissura, essa reta aponta para a fundação recalçada.

Figura 19 - Fissuras decorrentes de recalque diferencial



Fonte: PADARATZ (modificado).

2.4 Recuperação de Fissuras em Concreto

Como o presente trabalho aponta as soluções para as fissuras nos estudos de caso, é de grande importância abrir uma seção sobre o como se deve repará-las, listando os métodos e os materiais necessários. Entretanto a primeira etapa do processo de reparo de fissuras em concreto é a identificação da causa, pois se apenas tratar a fissura e não o seu agente causador, a medida acaba se tornando paliativa e não há solução para o problema.

O tratamento de peças fissuradas está diretamente ligado à perfeita identificação da causa da fissuração, ou, dito de outra forma, do tipo de fissura com que se está a lidar, particularmente no que diz respeito à atividade (variação de espessura) ou não da mesma, e da necessidade ou não de se executar reforços estruturais (casos em que as fissuras resultam de menor capacidade resistente da peça). (RIPPER e SOUZA, 1998)

Além da causa, o tratamento de fissuras depende de sua profundidade, sendo que nas fissuras mais superficiais há a possibilidade de tratamentos mais simplificado.

[...]o tratamento será normalmente mais simples nos casos superficiais, não sendo mesmo, em algumas situações, necessário recorrer-se às resinas epoxídicas, que são mais caras, podendo-se ficar pela utilização de nata de cimento Portland incorporada com aditivo expensor, nos casos de obstrução rija. (RIPPER e SOUZA, 1998)

Segundo Ripper e Souza (1998), se a causa da fissura estiver ligada a agressividade do meio há ainda a necessidade da criação de uma barreira ao transporte nocivo de líquidos e gases para dentro das fissuras, impedindo a contaminação do concreto e até das armaduras.

Para tratar apenas as fissuras tem-se as seguintes opções: injeção de fissuras, selagem de fissuras e costura de fissuras.

2.4.1 Técnica de Injeção de Fissuras

De acordo com Ripper e Souza (1998), a técnica de injeção de fissuras garante o seu preenchimento, sendo que nas passivas, aquelas que não se desenvolvem com o tempo, indica-se materiais rígidos como epóxi ou grouts, e para fissuras ativas injeta-se resinas acrílicas e poliuretânicas.

Os autores ressaltam que essa técnica deve ser utilizada em fissuras com abertura superior a 0,1 mm, geralmente o procedimento ocorre sob baixa pressão. Em casos de fissuras com abertura superior a 3,0 mm e com profundidade pequena, é admissível o seu enchimento por gravidade.

Em conformidade com Ripper e Souza (1998), para a técnica ter o seu objetivo alcançado, deve-se fazer a correta seleção dos materiais, o aplicado deve ser experiente e a bomba deve ter a pressão adequada à espessura da fissura.

Thomaz (2003) separa o uso de resina epóxi e poliuretano da seguinte forma: a resina epóxi é utilizada para ligação rígida e muito resistente aos esforços mecânicos podendo ser usada em elementos que requerem esforços estruturais. Já o poliuretano e a espuma de poliuretano são utilizados para fechamento elástico e vedação de fissuras secas, de fissuras úmidas ou de fissuras com água percolando, não podendo ser utilizado em elementos estruturais. Caso haja água percolando, sob pressão, deve ser usado inicialmente uma espuma de Poliuretano de pega rápida para parar o fluxo da água.

Os materiais mais utilizados na injeção de fissuras inativas, segundo Ripper e Souza (1998), são as resinas epoxídicas. O motivo da preferência encontra-se na baixa viscosidade, nas altas capacidades de resistência e aderência e o bom comportamento em presença de agentes agressivos, além de endurecerem rapidamente. São usualmente fornecidas em dois componentes líquidos (a resina e o endurecedor). Para a seleção do tipo de resina epoxídica, deve-se levar em consideração, além dos fatores de qualidade (ausência de retração, aderência, resistência, etc.), os seguintes elementos:

- Viscosidade;
- Módulo de elasticidade;
- "pot-life" da mistura, ou seja, coeficiente de polimerização, a ser regulado em função da temperatura ambiente, principalmente.

Para Pimentel e Teixeira (1978) a viscosidade deve seguir as indicações:

- Para abertura de fissuras $\omega < 0,2$ mm, resinas epóxi líquidas bastante fluidas, com viscosidade em torno dos 100 cP a 20°C;
- Para $0,2 \text{ mm} < \omega < 0,6$ mm, resinas epóxi líquidas com viscosidade máxima de 500 cP a 20°C;
- Para $0,6 \text{ mm} < \omega < 3,0$ mm: resinas epóxi líquidas com viscosidade máxima de 1500 cP a 20°C;
- Para ($\omega > 3,0$ mm, resinas epóxi puras ou com carga.

Conforme Ripper e Souza (1998), o processo de injeção propriamente dito deve seguir os seguintes passos:

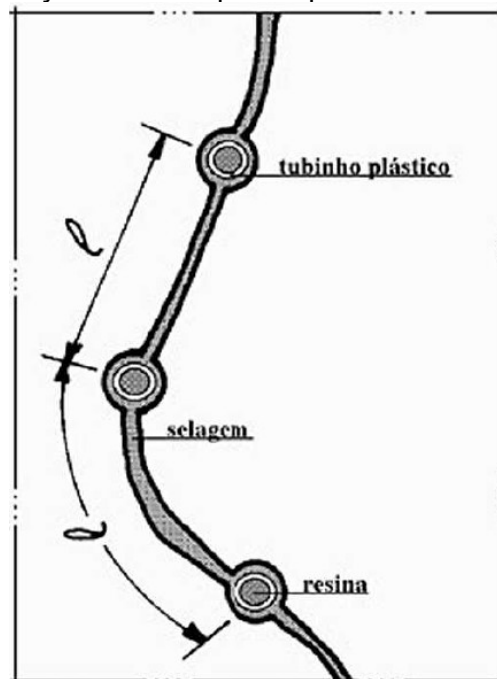
- 1º. *Abertura de furos ao longo do desenvolvimento da fissura, com diâmetro da ordem dos 10 mm e não muito profundos (30 mm), obedecendo a espaçamento l que deve variar entre os 50 mm e os 300 mm, em função da abertura da fissura;*
- 2º. *Limpeza da fenda e dos furos, com ar comprimido, por aplicação de jatos, seguida de aspiração, para remoção das partículas soltas;*
- 3º. *Fixar tubinhos plásticos nos furos de diâmetro imediatamente inferior ao da furação, com parede pouco espessa, através dos quais será injetado o produto. A fixação é feita através do próprio adesivo que selará o intervalo de fissura entre dois furos consecutivos;*
- 4º. *A selagem¹⁶ é feita pela aplicação de uma cola epoxídica bicomponente, em geral aplicada a espátula ou colher de pedreiro. Ao redor dos tubos plásticos, a concentração da cola deve ser ligeiramente maior, de forma a garantir a fixação deles.*
- 5º. *Antes de se iniciar a injeção, a eficiência do sistema deve ser comprovada, o que pode ser feito pela aplicação de ar comprimido, testando então a intercomunicação entre os furos e a efetividade da selagem. Se houver obstrução de um ou mais tubos, será indício de que*

¹⁶ A selagem tem o objetivo de arrematar a injeção, protegendo a própria resina. Assim, a cola deve ser aplicada com cuidado, apertando-se com firmeza, através da espátula, todo o material aplicado, cuja espessura deve ser da ordem de 1 mm a 5 mm, sendo tão mais fina quanto mais elevada for a temperatura. É fundamental que a cola epoxídica tenha resistência ao intemperismo e à ação dos agentes agressivos, de aderência às bases sobre as quais foi aplicada, de deformabilidade e de recuperação elástica. A selagem deve ser protegida de agressões mecânicas por um período de 12 horas (Ripper e Souza, 1998);

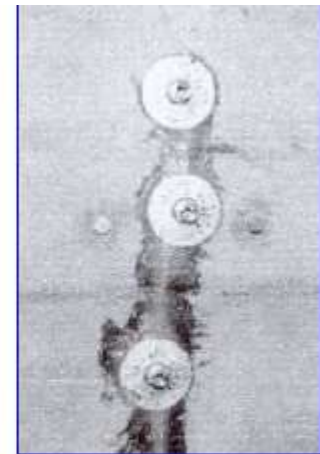
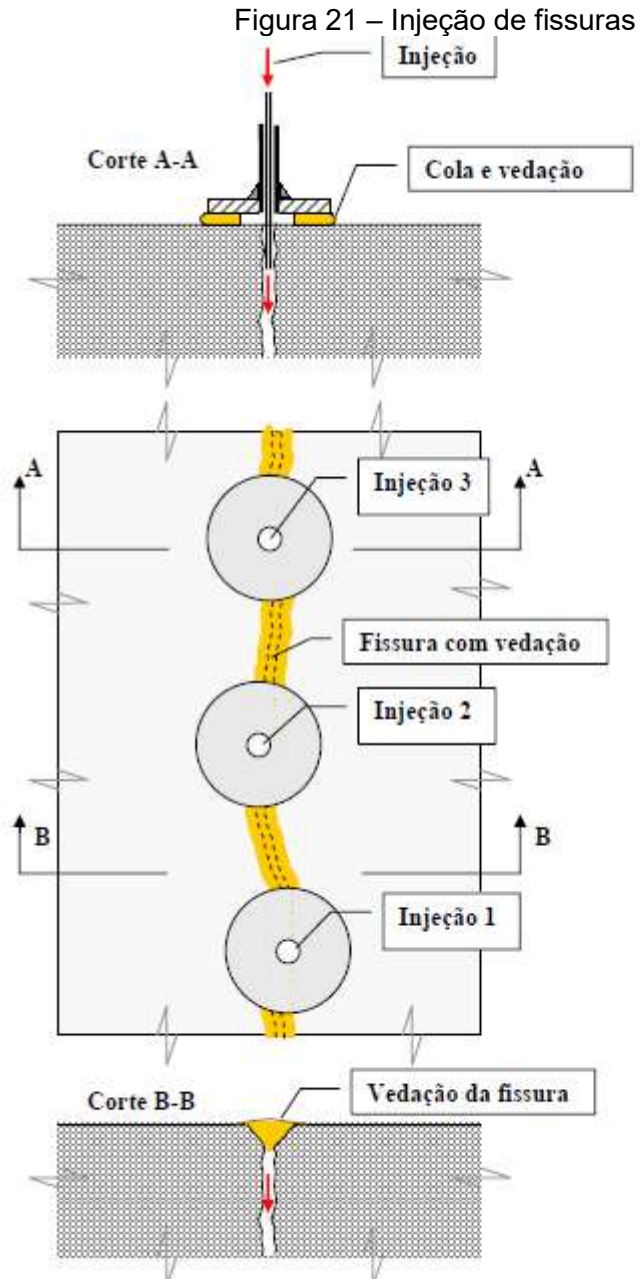
haverá necessidade de reduzir-se o espaçamento entre eles, inserindo-se outros a meio caminho;

- 6°. *Testado o sistema e escolhido o material, a injeção pode então iniciarse, tubo a tubo, sempre com pressão crescente, escolhendo-se normalmente como primeiros pontos aqueles situados em cotas mais baixas.*

Figura 20 – Preparação da fenda para o procedimento de injeção



Fonte: Souza E RIPPER, 1998



Injetar de baixo para cima.

Fonte: THOMAZ, 2003

Os autores salientam que no momento da injeção de um tubo, o próximo tubo deve estar aberto, devendo-se prosseguir a injeção até a evidencia da saída do material por ele, e terminando o tubo, o mesmo deve ser vedado. Os tubos devem ser mantidos de 12 horas a um dia após o término da injeção, e, em sua remoção, deve-se promover a regularização dos locais onde estavam fixados com a própria cola de injeção.

2.4.2 Selagem de Fissuras

Conforme Ripper e Souza (1998), a selagem é utilizada para vedação de fissuras ativas pela utilização de um material necessariamente aderente, resistente mecânica e quimicamente, não retrátil e com módulo de elasticidade suficiente para adaptar-se à deformação da fenda. Em fissuras com abertura superior a 10 mm, Ripper e Souza (1998) indicam proceder da seguinte forma:

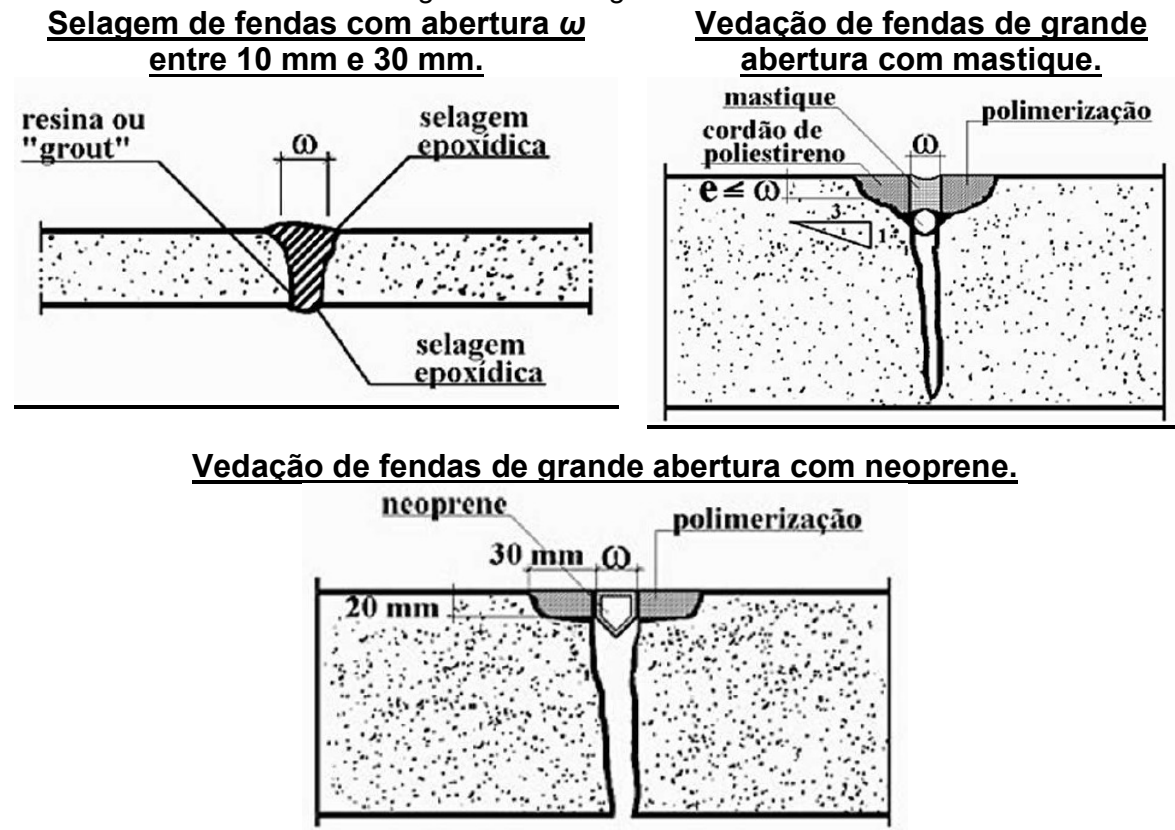
- 1°. *10 mm < ω < 30 mm - enchimento da fenda, sempre na mesma direção, com grout, podendo, em alguns casos, haver a adição de carga, procedendo-se a selagem convencional das bordas, com produto à base de epóxi (ver Fig. 3.15);*
- 2°. *$\omega > 30$ mm - a selagem aqui já passa a ser encarada como se fosse a vedação de uma junta de movimento e que prevê a inserção de um cordão em poliestireno extrudado, ou de uma mangueira plástica, para apoio e isolamento do selante do fundo da fenda. Uma outra hipótese é a colocação de juntas de neoprene, que deverão aderir aos bordos da fenda, devidamente reforçados para o efeito.*

Segundo Ripper e Souza (1998), quando se utiliza o mastique como selante é necessária a prévia colocação de um cordão de poliestireno no fundo do entalhe, que serve como material de preenchimento. Esse procedimento tem como intuito impedir que o mastique venha a aderir ao fundo da fissura, o que comprometeria não só a sua durabilidade, mas o seu próprio trabalho. Para melhor aderir o material de preenchimento ao substrato, indica-se a pincelagem com epoxidicos, permitindo assim, a aplicação do produto com o bico da bisnaga. Após o que a superfície final deverá ser cuidadosamente alisada com espátula.

Os autores também esclarecem que, na hipótese de recurso à vedação com junta em borracha neoprene especial, a mesma cumprirá as funções do mastique e do cordão, sendo aderida aos bordos da fenda através de adesivos epoxídicos, e, em alguns casos, sendo merecedora de uma discreta pressurização posterior.

Ripper e Souza (1998) ainda enfatizam que em qualquer caso é necessário o fortalecimento da superfície mais externa dos bordos das fendas, para garantir que o reparo seja efetivo. Se tal reforço não for previsto, pode haver perda de aderência.

Figura 22 – Selagem de fissuras



Fonte: Souza E RIPPER, 1998

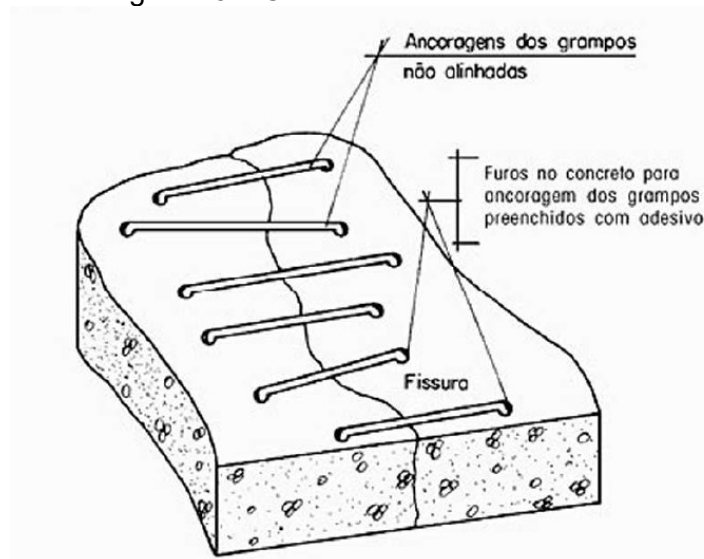
2.4.3 Costura ou Grampeamento de fissuras

Segundo Ripper e Souza (1998), essa técnica é utilizada em fissuras cuja causa se encontra na capacidade resistente. Dessa forma, é utilizado um reforço na estrutura por armaduras a fim de aumentar a resistência à tração. Em função do seu aspecto e propósito, essas armaduras são chamadas grampos, sendo este o processo de costura das fissuras.

Os autores afirmam que há controversas sobre a aplicação da técnica, visto que a mesma aumenta a rigidez de maneira pontual na estrutura e, caso o esforço continue, pode haver a formação de uma fissura adjacente ao local de aplicação da técnica. Desse modo, para minorar os efeitos dos grampos são recomendados os seguintes procedimentos:

- 1°. *Sempre que possível, descarregamento da estrutura, pois o processo em questão não deixa de ser um reforço;*
- 2°. *Execução de berços na superfície do concreto, para assentamento das barras de costura, incluindo, se a opção for por ancoragem mecânica, a execução de furação no concreto para amarração das extremidades dos grampos, sendo estes buracos devidamente cheios com adesivo apropriado;*
- 3°. *Se a opção for esta, injeção da fenda com resinas epoxídicas ou cimentícias, fazendo a selagem a um nível inferior ao do berço executado. O grampeamento deve ser, sempre e necessariamente, posterior à injeção;*
- 4°. *Colocação dos grampos e complementação dos berços executados com o mesmo adesivo utilizado para a selagem;*
- 5°. *As fendas devem ser costuradas nos dois lados da peça, se for o caso de se estar lidando com peças t racionadas.*

Figura 23 – Costura de fissuras

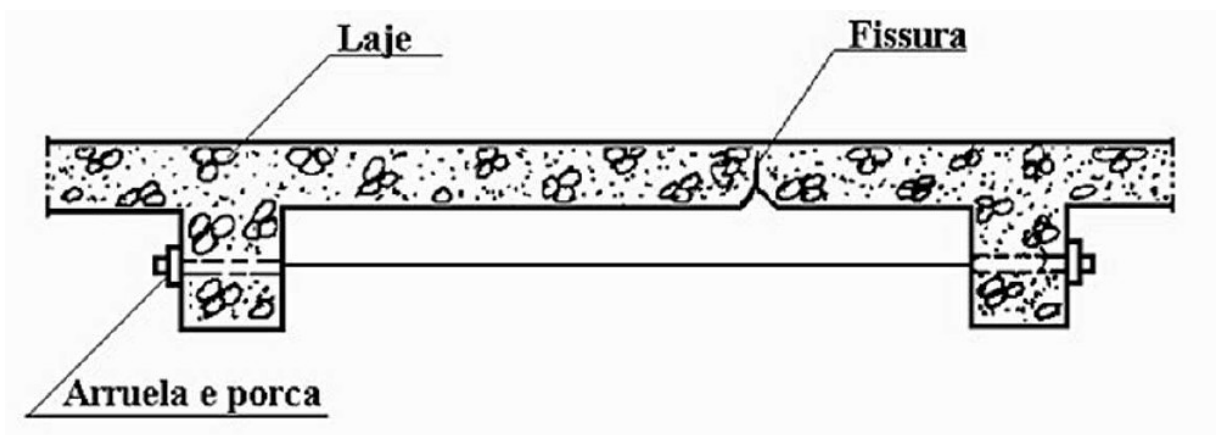


Fonte: Souza E RIPPER, 1998

Ripper e Sousa (1998) ainda sugerem, como opção à costura, a introdução de um reforço de compressão por aplicação de cabos de aço ou barras comuns, para compensar a tração imposta ao elemento. Os autores afirmam que esse processo é

muito mais relacionado com o dimensionamento estrutural de um reforço do que propriamente com o tratamento de fissuras como uma técnica em si. Para a aplicação dessa técnica deve-se levar em consideração os esforços localizados nas regiões de ancoragem das barras ou cabos.

Figura 24 – Anulação das tensões de tração pela introdução de pretensão exterior



Fonte: Souza E RIPPER, 1998

2.5 Recuperação de Corrosão em Armaduras de Concreto

Quando há a corrosão de armadura com concreto, pode haver ou não a necessidade de troca ou reforço da armadura.

Segundo Ripper e Souza (1998), pode haver a possibilidade da diminuição de seção transversal da armadura, sem que implique na necessidade de complementação da armadura. Isso pode vir do fato de haver coeficientes de segurança, lançando mão da possibilidade de que se conviva com alguma flexibilidade relativamente ao coeficiente de segurança global que se irá obter, após a recuperação. Essa aceitação pode ser mais interessante, uma vez que a adição de armadura complicar o processo de recuperação da peça, principalmente em termos de colocação do material cimentício. Os autores afirmam que essa prática é viável quando a redução da seção da barra corroída não tiver ultrapassado 15% ou a perda de diâmetro da armadura seja inferior a 10%, sendo que em casos mais sérios, esse critério não deve ser utilizado. Exemplos de casos em que não fazer alterações para

um somatório de perdas inferior a 15% do somatório das armaduras de projeto, que podem resultar em problemas sérios, é o caso de estribos e armaduras de lajes e paredes. A análise desses elementos é feita por metro, conseqüentemente, pode haver a perda integral de uma barra, o que pode ser bastante perigoso para a integridade localizada da estrutura.

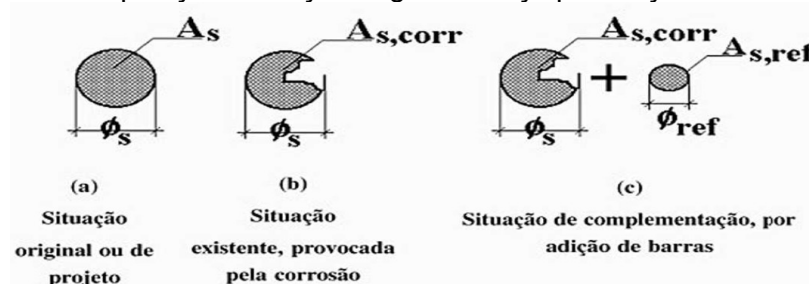
a. Reforço:

De acordo com Ripper e Souza (1998), o reforço de armadura serve como complementação para que as condições de segurança e desempenho sejam restabelecidas. O processo exige cuidados no rearranjo das armaduras, uma vez que elas serão um obstáculo à concretagem, independentemente do material de preenchimento. Salientando que para a garantia de boa execução dos serviços, deverão estar perfeita e totalmente envolvidas pelo novo material alcalino que se irá aplicar. Por esse motivo, para as obras de recuperação ou de reforço é indispensável que o detalhamento tenha representação gráfica e escrita que contenha:

- *cobrimento das armaduras;*
- *espaçamento entre barras;*
- *sistemas de ancoragem e emendas;*
- *ângulos de dobramento e curvatura.*

Conforme Ripper e Souza (1998), a complementação das armaduras existentes que tiveram sua seção diminuída sucede como apresentado na Figura 25.

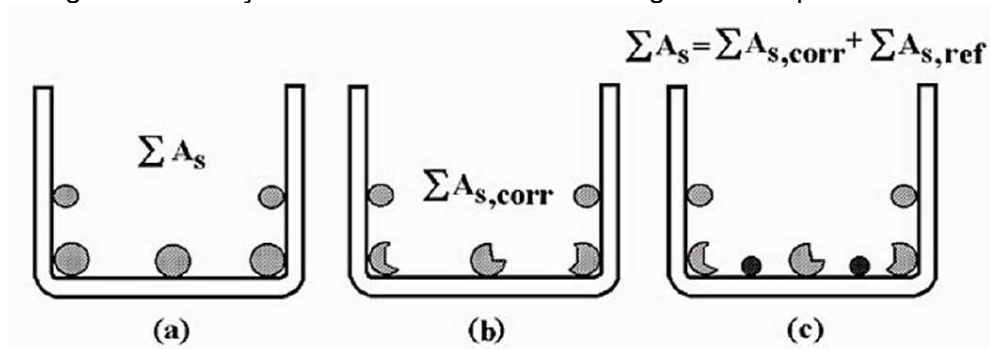
Figura 25 – Reposição da seção original de aço por adição de novas barras



Fonte: Souza E RIPPER, 1998

Sendo que a armadura adicionada pode somente complementar a seção corroída, como mostra a Figura 26:

Figura 26 – Adição de novas barras em uma viga afetada por corrosão



Fonte: Souza E RIPPER, 1998

Os autores ainda destacam a importância da análise da excentricidade relativa no reforço de armadura de pilares, cabendo uma análise do que seria mais conveniente: não colocar barra; adicionar uma; ou, ao invés disto, adicionar duas ou quatro (números pares).

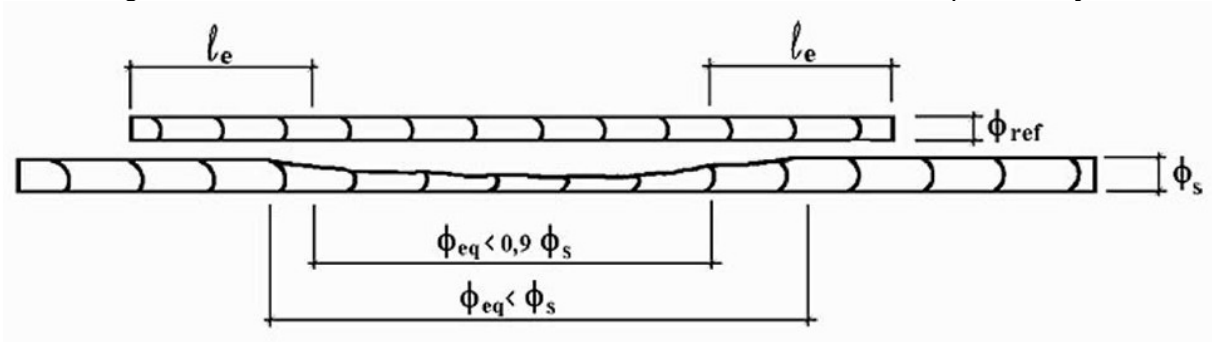
b. Emendas

Segundo Ripper e Souza (1998), o processo de emenda de armadura de recuperação é mais importante do que o nos casos de construção. Isso decorre do fato de que é importante não retirar mais concreto que o necessário da estrutura, bem como a nova armadura deva ocupar o mínimo espaço transversal e longitudinal. A soldagem pode ou não ser necessária, dependendo da armadura; no caso de armaduras mais novas, a probabilidade dessa solda não ser viável é maior. Se a solda for possível, implicará que a armadura de complementação também seja do mesmo tipo. Destaque-se que o traspasse de armadura é o tipo de emenda mais recomendado, desde que haja disponibilidade de espaço

Os autores alertam para a necessidade de análise longitudinal para se melhor escolher os pontos de início e fim da emenda, admitindo as indicações da Figura 27 e as seguintes hipóteses:

- Admitir que a emenda se promova já a partir do trecho que, ainda com redução de seção, admite $A_{s,corr} \geq 0,85 A_s$, ou seja, $\phi_{eq} \geq 0,90 \phi_s$;
- Admitir que a emenda se promova apenas no trecho são.

Figura 27 – Emenda entre barras de armadura corroída e de complementação



Fonte: Souza E RIPPER, 1998

Os autores salientam que o comprimento de emenda deve garantir que os esforços que solicitam a barra corroída sejam transferidos para a barra de complementação. Onde a defasagem entre os pontos de emenda deve ser considerada da mesma forma que para as construções originais.

As experiências demonstram que o comprimento de ancoragem necessário pode ser significativamente inferior ao tradicional, sendo normalmente, em média, $0,4l_b$ para os casos em que o embebedimento é em resina, e $0,7l_b$ para as situações de enchimento com grout (RIPPER E SOUZA, 1998).

c. Alcalinidade do meio

Os autores ainda afirmam que, além da retirada do concreto danificado, é importante a limpeza da armadura com jatos de areia, água e/ou ar sob pressão até o aço adquirir coloração acinzentada. Esse procedimento tem como intuito de melhorar a aderência da armadura ao concreto e garantir maior controle de qualidade sobre as características mecânicas dos aços.

Entretanto isso não é o bastante para garantir a eficiência do reforço. Como já abordado no item 2.3.6, as armaduras têm a necessidade de um meio alcalino a fim

de melhorar a sua durabilidade, prevenindo o aumento de corrosão, para tal Ripper e Souza (1998) indicam os seguintes métodos:

- Obedecer às condições de cobrimento estabelecidas na NBR 6118 / 2014;
- Garantir que o concreto contaminado esteja afastado da armadura, a fim de não destruir a alcalinidade do meio adjacente a armadura;
- Pode-se aplicar sobre as barras uma pintura adesiva, que as protege e isola, sendo, também, responsável pela aderência com o material cimentício de reposição;

A proteção localizada de barras de armadura através de resinas de injeção pode tanto isolar eletricamente a parte não corroída da barra, resultando em uma baixa taxa de corrosão, como isolar eletricamente a parte corroída da mesma barra, aumentando a corrosão. O efeito do tratamento de uma barra de aço com resina de injeção é imprevisível (Steen Rostam, 1989 apud Ripper e Souza, 1998)

d. Reparo no Concreto:

Segundo Ripper e Souza (1998), os reparos no concreto podem ser pelos seguintes materiais:

Argamassas:

Indicada para reparos superficiais (máximo 5 cm de profundidade). Esta técnica é comumente empregada para os casos em que a deterioração se encontra na camada de cobrimento. São três os tipos de argamassas que podem ser utilizadas: argamassa de cimento e areia; argamassas com polímeros; e argamassas epoxídicas.

- i. **Argamassas de cimento e areia:** para melhorar a sua adesão, é geralmente aplicada sobre uma fina camada de adesivo epoxídico. Entretanto, o adesivo pode ser dispensado, quando executado um cuidadoso enrugamento da superfície existente.

- ii. **Argamassas com polímeros:** os polímeros são geralmente PVA e adesivo acrílico. Tem seu uso recomendado para reparos superficiais em grandes áreas e para reparos semiprofundos. Os reparos executados com a utilização destas argamassas devem estar localizados em ambientes internos, livres da presença constante de água.

- iii. **Argamassas epoxidicas:** por possuir elevadas resistências mecânica e química, além de apresentar excepcional aderência ao aço e ao concreto, esse material é indicado para recuperar superfícies as quais essas características se apresentam relevantes, enfatizando elementos estruturais expostos a agentes agressivos e onde há corrosão de armadura. Seu uso também é adequado para os reparos nos quais haja a necessidade de liberação da estrutura poucas horas após o reparo. A superfície de aplicação deve estar seca.

Concreto:

Utilizado para casos de preenchimento de vazios ou de ninhos de agregados nos elementos, ou ainda em estruturas deterioradas, desde que a extensão das falhas seja de grande profundidade, ou seja, pelo menos se estendam para além das armaduras. Sua resistência deve ser igual ou superior à do concreto existente na estrutura, sua granulometria e diâmetro do agregado devem ser compatíveis com o serviço. É importante molhar a superfície antes de sua aplicação para o concreto da base não retirar água do concreto do reparo.

Grout:

O *grout* é uma argamassa de grande fluidez, auto-adensável, de alta resistência e não apresenta retração. É indicado para reparos profundos e sua aplicação deve ser em uma superfície preparada a úmido. Este procedimento é indicado para elementos estruturais onde é necessária rapidez de desforma e/ou de utilização, uma vez que o material atinge altas resistências rapidamente (RIPPER E SOUZA, 1998).

3 MÉTODO DE PESQUISA

Os estudos dos problemas patológicos se baseiam em coleta de dados, projetos e estudos para compreensão do fenômeno ocorrido. Para facilitar a obtenção de um diagnóstico Norberto B. Lichtenstein, em 1986, elaborou um fluxograma de forma a nortear as etapas de obtenção do diagnóstico de patologias¹⁷. O fluxograma apresenta as seguintes etapas:

1. **Vistoria do local:** utilização dos sentidos humanos e/ou de instrumentos para caracterização das patologias;
2. **Anamnese:** entrevista e/ou coleta de informações formalizadas;
3. **Exames complementares:** são ensaios que podem ser destrutivos ou não, in loco e/ou em laboratório, tem a finalidade de fornecer características da construção, até então não conhecidas;
4. **Pesquisa:** procurar em bibliografias, inovações na tecnologia tecnológica e/ou científica que auxiliem o entendimento do processo patológico;
5. **Diagnóstico:** determinação das causas e mecanismos de ocorrências da patologia;
6. **Conduta recomendada:** determinação da intervenção.

Os estudos realizados neste trabalho têm como alicerce o fluxograma supracitado de maneira a, inicialmente descrever o ambiente o qual as construções se encontram, bem como os agentes agressores aos quais a estrutura está sujeita e, posteriormente, a descrição da forma e a orientação das fissuras, podendo assim, definir, ou apontar as hipóteses mais prováveis de causas para as fissuras.

O passo 2 do fluxograma só é utilizado quando é possível o contato com alguém que tenha conhecimento sobre a construção fruto de estudo. O passo 3 não foi realizado por falta de necessidade, falta de autorização de extração de testemunho,

¹⁷ É a não conformidade que se manifesta no produto em função de falhas no projeto, na fabricação, na instalação, na execução, na montagem, no uso ou na manutenção bem como problemas que não decorram do envelhecimento natural. (NBR 15575).

ou complexidade dos exames. Sendo que os exames mais simples não eram pertinentes na maioria dos casos.

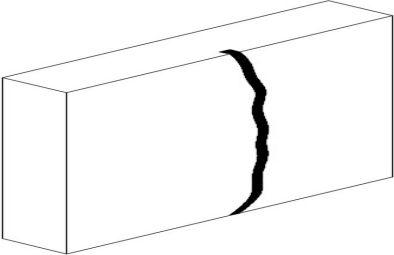
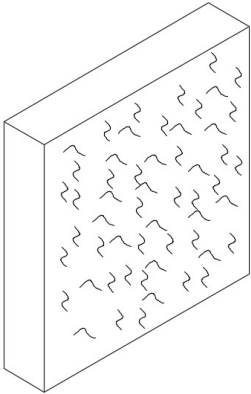
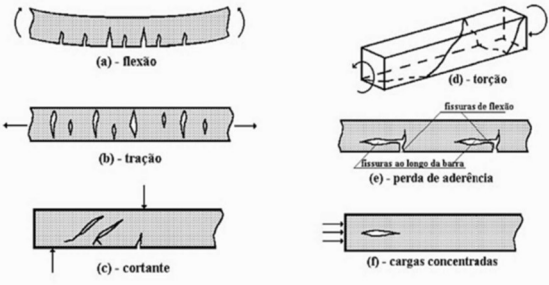
Para verificar se um edifício apresenta algum problema relacionado às manifestações patológicas deve-se realizar uma vistoria cuidadosa e detalhada, para que seja determinada qual a real condição de uso da estrutura. Esta etapa visa avaliar as anomalias existentes, identificando suas causas, providências e a escolha dos melhores métodos para o reforço ou recuperação da estrutura (SOUZA; RIPPER, 1998).

O principal elemento do fluxograma para a análise de fissuras deste método é o passo 1, vistoria do local. Nesta etapa são analisadas as características físicas da fissura e do meio em que a mesma se encontra. O método é pautado num sistema eliminatório, visando a localização da fissura, orientação, como está a superfície ao seu redor, onde estão posicionadas as armaduras, o que acontece naquele tipo de ambiente e qual é a situação mais provável.

Foi elaborado um quadro resumo para entender o processo de avaliação das causas de fissuras. Apesar de não possuir todas as variáveis de circunstâncias de fissuras, o mesmo auxilia na metodologia eliminatória tratada no estudo de caso. Ele pode ser analisado na Tabela 3.

Apesar de haver itens com apenas uma causa, é importante fazer uma análise detalhada de toda a conjuntura da fissura, pois pode haver uma sobreposição de causas ou fatores não considerados detalhadamente ao longo desse trabalho e do quadro.

Tabela 3 – Características das fissuras

Fissura	Possíveis causas
<p style="text-align: center;">Retilínea</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão de armadura; • Retração térmica;
<p style="text-align: center;">Mapeado</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Retração plástica • Reação álcalis-agregado; • Ataque por sulfatos
 <p style="text-align: center;">Fonte: Souza E RIPPER, 1998</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ações aplicadas
<p style="text-align: center;">Fissura com saliência em relação a superfície</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão de armadura
<p style="text-align: center;">Fissura com rebaixamento em relação a superfície</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Recalque + ações aplicadas

Fonte: Autor

4 ESTUDOS DE CASO

Como a identificação de grande variedade de fissuras em concreto em uma mesma obra é um caso de mais difícil obtenção, optou-se por descrever casos de fissuras em concreto presentes em diferentes construções de forma a representar o conteúdo abordado.

A partir das informações da revisão bibliográfica foram analisados sete casos de fissuração, os casos foram escolhidos de forma a haver uma maior variabilidade de causas e não haver a necessidade de exames complementares para a determinação das causas, onde os aspectos das fissuras, conforme a revisão bibliografia, fossem os principais parâmetros de identificação.

Almejou-se a diversificação das causas fissuração, entretanto algumas tipologias são mais difíceis de encontrar que outras, dessa forma o estudo realizado englobou cinco causas diferentes, na sequência.

4.1 Corrosão de armadura

A corrosão em armadura é uma causa de fissuração recorrente em Florianópolis. O motivo para esse tipo de fissura ser recorrente na região pode ser explicado de maneira simplificada por dois fatores.

O primeiro deles é que até 2003 não havia norma que regularizasse parâmetros como relação água/cimento e classe do concreto mediante a agressividade do meio. Sem parâmetro mínimos, essas variáveis ficavam a cargo das construtoras. A norma que rege o projeto de estruturas de concreto, NBR 6118, teve se torna importante, nesse contexto, pois a mesma traz consigo parâmetros que visam a durabilidade da estrutura, vinculando o meio o qual ela se encontra com a relação água/cimento, que, por sua vez, encontra-se correlacionado com a permeabilidade da estrutura e sua resistência final. Como consequência, os concretos antes dessa norma podiam ter sua permeabilidade desconforme com a agressividade do meio.

O segundo é o ambiente o qual Florianópolis se encontra. Sendo uma ilha, por definição a cidade é cercada por mar. Isso significa que a cidade, de forma generalizada, está em contato com íons de cloreto (Cl^-). Como já mencionado na

revisão bibliográfica, a ação de cloretos e a carbonatação são os fatores que geram despassivação de armadura, possibilitando a corrosão.

Para o trabalho em questão serão analisadas duas fissuras quanto a corrosão de armadura.

I. Caso 1:

A fissura estudada encontra-se em um condomínio não registrado (em cartório de imóveis), desta forma, não há matrícula com a data da construção do mesmo. Segundo os moradores do condomínio, foi construído há mais de 20 anos. Trata-se de uma estrutura de concreto armado com vedações em alvenaria e revestida interna e externamente com argamassa.

Figura 28 – Fachada do prédio



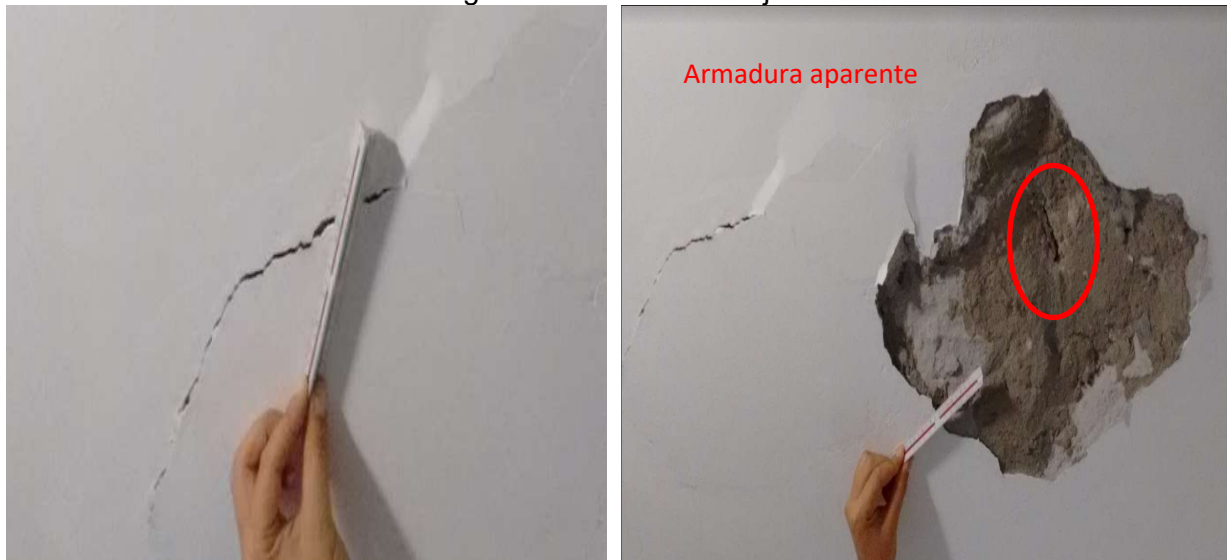
Fonte: Autor.

O condomínio edilício está localizado na rua Amarílis, 68, Ingleses, Florianópolis, Santa Catarina, sua localização está ilustrada na Figura 29,.

Por anamnese, descobriu-se que o apartamento em estudo padece com infiltrações (goteiras) quando o clima apresenta chuvas em demasia. Desta forma, pode-se dizer que a água percola pela laje de concreto.

A fissura em questão possui as seguintes características: é adjacente a um destacamento da laje, com aproximadamente 40 centímetros de diâmetro, cuja armadura encontra-se aparente. A fissura avança destacando-se do plano da laje, isso evidencia que a parte do concreto a qual mesma se encontra vai se desprender. Essa descrição pode ser verificada na Figura 31.

Figura 31 – Fissura na laje



Fonte: Autor.

O agente causador da fissura em análise foi caracterizado como corrosão de armadura pelos seguintes fatores: primeiramente pela proximidade do mar, dessa forma a água que percola a laje tem a presença de cloretos, os quais, como já dito, constituem os agentes causadores de corrosão em armadura.

Outro fator está na forma que a fissura acontece, a mesma encontra-se ao redor da armadura e com sinais de destacamento do concreto de dentro para fora. Entre as fissuras apresentadas na revisão bibliográfica, as únicas que geram uma expansão internas e localizada são provenientes da corrosão de armadura.

II. Caso 2

A fissura fruto de estudo encontra-se em uma casa que, segundo os moradores do local foi construída há mais de 35 anos. Trata-se de uma estrutura de concreto armado com vedações em alvenaria e revestida interna e externamente com argamassa. Está destacado em vermelho na Figura 32 a localização das fissuras na casa.

Figura 32 – Casa onde está localizada a fissura



Fonte: Autor.

A casa está localizada na rua Bento Góia, 32 - Coqueiros, Florianópolis, Santa Catarina, sua localização está ilustrada na Figura 33.

Figura 33 – Localização do Condomínio

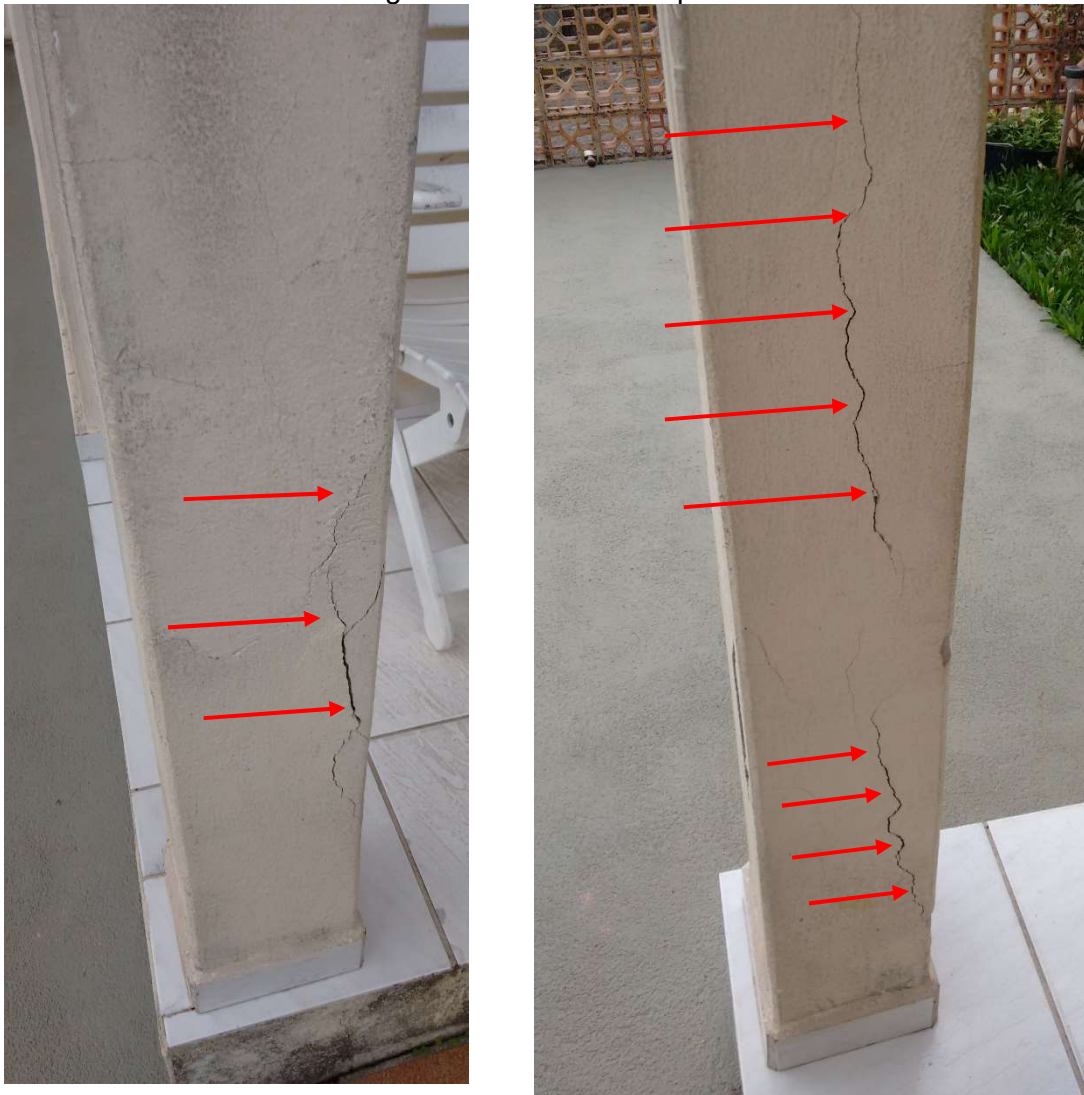


Fonte: Google (modificado)

De acordo com verificação feita com o auxílio da ferramenta Google Earth, a casa dista cerca de 130 metros do mar. Devido a isso, podemos afirmar que a edificação está sujeita a ação de cloretos.

A fissuras em questão possuem as seguintes características. Em algumas partes a parte fissurada não se encontra no mesmo plano que o pilar. Se assemelham a retas verticais nas posições onde se encontram as armaduras de um pilar. Essa descrição pode ser verificada na Figura 34.

Figura 34 – Fissuras no pilar



Fonte: Autor.

O agente causador da fissura em análise foi caracterizado como corrosão de armadura pelos seguintes fatores: primeiramente pela proximidade do mar, os íons de

cloreto presentes no ar penetram nos poros do concreto alcançando a armadura e corroendo-a.

Outro fator está na forma que a fissura acontece, as fissuras encontram-se próximas aos locais onde a armadura de pilar deve ficar e de maneira que segue o seu comprimento, na vertical. Além disso, o aspecto das fissuras evidencia que elas acontecem por uma expansão interna ao decorrer de uma linha, isso evidencia corrosão de armadura.

Recuperação para ambos os casos:

Para estes casos a correção é conforme o indicado na sessão 2.6. Primeiramente, é retirado o concreto degradado, de forma que o mesmo não possa mais ter contato com a armadura, depois da retirada de todo o concreto, deve-se analisar a seção da armadura. Depois, deve-se fazer uma limpeza com ou água e/ou ar comprimido, podendo também ser com jato de areia, até que a peça apresente a tonalidade acinzentada. O próximo passo é a análise da armadura, caso a área após a corrosão seja maior ou igual a 85% da seção original, a bibliografia já sugere o reforço da armadura, avançando para a etapa de reparo do concreto. Lembrando de analisar os casos especiais presentes no corpo do texto, como, por exemplo, essa corrosão de 85% signifique a preda de uma armadura inteira.

Caso a área seja menor que 85% da seção, ou diâmetro menor que 90% do diâmetro original, deve-se fazer o reforço de armadura, lembrando que nos pilares deve-se considerar a excentricidade. Após o reforço, indica-se a proteção da armadura quanto aos meios agressivos, para tal, aplica-se uma pintura de proteção, com um material que pode ser epóxi.

A partir desse momento faz-se a recuperação do concreto. Para a laje, poderia ser indicado uma argamassa epóxi pois este atende a finalidade estrutural e é resistente a meios agressivos. Lembrando que, como há um problema de infiltração na mesma, antes de recuperar a fissura, deve-se corrigir a infiltração.

Já o pilar terá grande parte do seu concreto retirado, dessa forma é mais econômico fazer a recuperação com concreto que atenda os critérios de durabilidade da NBR 6118/2014.

4.2 Falta ou ineficiência de junta de dilatação

Como já mencionado na sessão 2.3.4, as juntas de dilatação servem para absorver os efeitos de retração do concreto, ou evitar que os esforços de um elemento afetem outro, como a junta diamante, que serve para que, no caso dos pilares, a sua trabalhabilidade vertical não gere fissuras nos pisos e lajes de concreto.

Não é apenas a ausência de juntas que pode acarretar em fissuras, essa manifestação patológica pode ocorrer por ineficiência da mesma, seja pelo local, seja pelo seu preenchimento.

A fissura está presente na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no trecho de ligação entre a rua Deputado Antônio Edu Vieira e a Reitoria I da instituição. O trecho em questão está destacado em amarelo na Figura 35:

Figura 35 – Localização do trecho em que contida a fissura em análise.



Fonte: Google Maps (Modificado).

A calçada onde a fissura se encontra possui trechos com e sem junta serrada, esses trechos aparecem de forma intercalada ao longo de sua extensão, como pode ser observado na Figura 36:

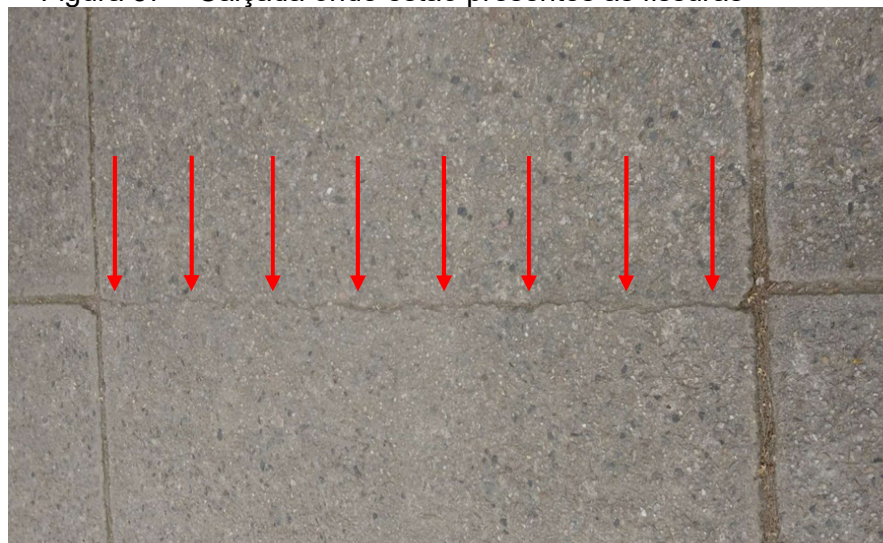
Figura 36 – Calçada onde estão presentes as fissuras



Fonte: Autor.

As fissuras dessa calçada acontecem exatamente nas placas onde não há junta, de forma retilínea e alinhadas às juntas adjacente, como pode ser visto na Figura 37. Essa disposição facilitou o processo de identificação da causa das fissuras, visto que, se as mesmas ocorrem onde não há junta, sua causa é a falta de junta. Uma outra causa que pode ser apontada para esse caso é a flexão gerada pela passagem de veículos leves nessa calçada. Entretanto primeira causa se apresenta mais provável, pois além da resistência da placa há a resistência do solo, havendo a necessidade de grandes esforços para fletir.

Figura 37 – Calçada onde estão presentes as fissuras



Fonte: Autor.

Entretanto, para melhor fundamentar e escolha da causa, foi elaborado o cálculo da tensão gerada no processo de retração da peça.

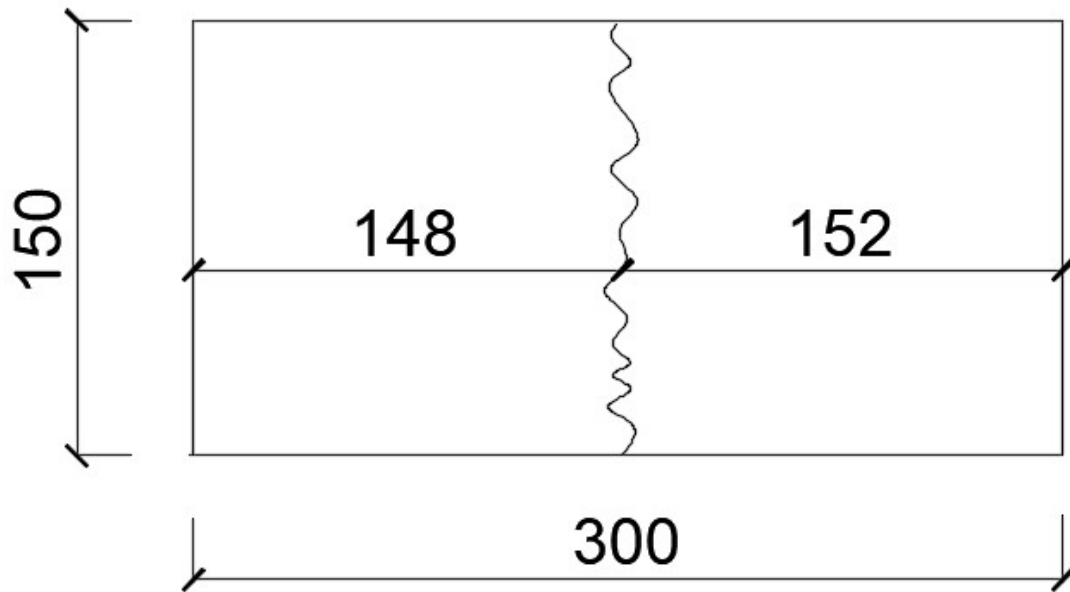
Para facilitar o entendimento das dimensões das peças de concreto e do posicionamento da fissura em relação às mesmas, foi elaborado um croqui a partir de medições no local. As medições são elucidadas na Figura 38 e o croqui está presente na Figura 39:

Figura 38 – Medições relativas à fissura.



Fonte: Autor.

Figura 39 – Croqui em centímetros.



Fonte: Autor.

Neste caso, o concreto está sendo restrito pelo solo no qual está apoiado. Esta situação em específico não foi prevista pelos estudos do ACI 207.2R-95. Apesar de ter sido previsto um fator de multiplicação para alterar o de grau de restrição quando o elemento estiver restrito por um material pouco rígido, isso não se aplica ao caso, uma vez que quem está restringindo o movimento é o atrito entre o solo e o concreto.

Primeiramente foi determinada a resistência à tração do piso. Para isso, utilizou-se as fórmulas da NBR 6118/2014, tem-se:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

Considerando as informações presentes no site *usinamix*, é indicado que o concreto de calçadas seja da classe C10, C15 ou C18, dessa forma, utilizou-se a classe C15:

$$f_{ct,m} = 0,3 * 15^{2/3} = 1,82 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 * 2,56 = 1,28 \text{ MPa}$$

$$f_{cta} = \frac{1,79}{1,4} = 0,91 \text{ MPa}$$

De acordo com a revisão bibliográfica, a tensão originada pela retração obedece a seguinte formula:

$$\sigma_{\text{retração}} = Kr \frac{E}{1+\phi} (\epsilon_{cs} + \alpha \Delta T)$$

Conforme as indicações de Mehta e Monteiro¹⁸ obtém-se os valores de ΔT , α , E:

$$\begin{aligned} \Delta T &= 15^{\circ}\text{C} \\ \alpha &= 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \\ E &= 20 \text{ GPa} \end{aligned}$$

Para a extração dos valores da Tabela 2¹⁹, assumiu-se uma espessura fictícia igual a 20 e o valor de a umidade relativa de Florianópolis e região como 80%, tendo como fonte uma série cronológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), presente no Anexo 5. Fazendo a interpolação entre os valores das umidades 75% e 90% com t_0 igual a 5 dias foram obtidos os seguintes valores:

$$\begin{aligned} \Phi &= 2,77 \\ \epsilon &= 1,87 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Com esses valores é possível determinar a parcela da equação considerando a peça totalmente restrita:

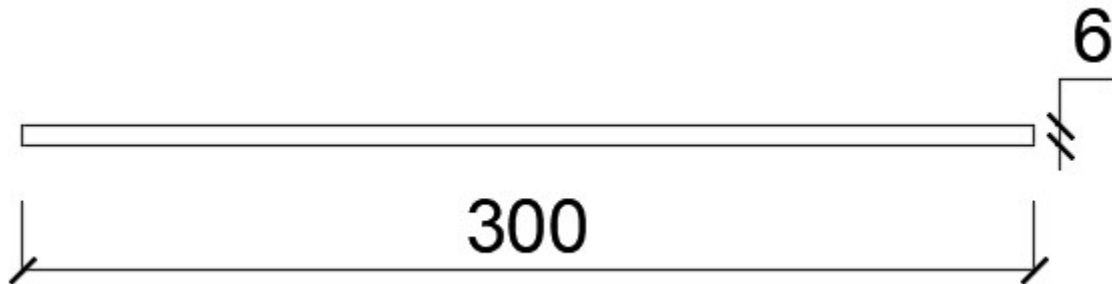
$$\frac{E}{1+\phi} (\epsilon_{cs} + \alpha \Delta T) = 1,79 \text{ MPa}$$

¹⁸ Valores retirados da página 36 deste documento.

¹⁹ Presente na página 40

Conforme o SINAPI (2016), as calçadas podem possuir 6, 8 ou 10 cm de espessura, para este caso foi atribuído 6 centímetros, como mostra o esquema da Figura 40:

Figura 40 – Dimensões para cálculo de tensão em centímetros



Para a obtenção do grau de restrição, primeiramente deve-se determinar a razão entre L e H, que neste caso é:

$$\frac{L}{H} = \frac{300}{6} = 50$$

Como descrito na revisão bibliográfica, quando a fissura em um elemento com L/H igual ou maior a 2,5 avança até h entre 0,2 e 0,3 H, o elemento fatura por completo. Desta forma, h/H adotado nos cálculos será 0,2.

$$K_r = \left[\frac{(L/H - 2)}{(L/H + 1)} \right]^{h/H}$$

$$K_r = \left[\frac{(50 - 2)}{(50 + 1)} \right]^{0,2} = 0,988$$

Para calcular o fator de multiplicação da equação da equação (IX) deve-se possuir quatro variáveis:

$$A_g = 150 \cdot 6 = 900 \text{ cm}^2;$$

$$A_F = 150 \cdot 300 = 45000 \text{ cm}^2;$$

$$E_c = 20 \text{ GPa};$$

$$E_F^{20} = 0,1 \text{ GPa}.$$

²⁰ Valor supondo um solo de areia compactada. Fonte: Marangon (2009)

$$\text{Multiplicador} = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_c}{A_F E_F}}$$

$$\text{Multiplicador} = \frac{1}{1 + \frac{900 \cdot 20}{45000 \cdot 0,1}} = 0,2$$

$$\text{Multiplicador} * KR = 0,2 * 0,988 = 0,197$$

$$\sigma_{\text{retração}} = 0,197 * 1,79 = 0,35 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 0,91 \text{ MPa}$$

Considerando dessa forma não haveria fissuração, entretanto, analisando o resultado, foi percebido que quem é responsável pela restrição do movimento é o atrito com o solo. Dessa forma, foi feita a verificação para o atrito do solo.

A tensão caso o movimento fosse totalmente restrito é de 1,79 Mpa, como já descrito.

A força de atrito é descrita da seguinte forma:

$$F_{\text{at}} = \mu * N$$

O valor δ é o máximo que o atrito na interface solo-concreto pode atingir.
(Moura, 2015)

Onde:

$$\text{tg } \delta = \mu$$

O δ do concreto rugoso com a areia pode ser considerado igual a 44° (POTYONDY, 1961 *apud* Moura, 2015).

Desta forma:

$$\mu = \text{tg } 44^\circ = 0,966.$$

O volume da peça de concreto é de:

$$V = \text{área da base} * h$$

$$V = 3 * 1,5 * 0,06 = 0,27 \text{ m}^3$$

Sabendo que a massa específica (γ) do concreto simples é de 2400 kg/m^3 (Pinheiro, 2007), obtém-se a seguinte massa:

$$m = \gamma * V$$

$$m = 2400 * 0,27 = 648 \text{ kg}$$

Consequentemente a força normal é:

$$N = m * g$$

$$N = 648 * 9,8 = 6350,4 \text{ N}$$

O que resulta em:

$$F_{at} = 0,966 * 6350,4 = 6134,5 \text{ N}$$

Com isso, obtém-se uma tensão:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{6134,5}{(1,5 * 0,06)} = 102241,44 \text{ Pa ou } 0,102 \text{ Mpa}$$

Análise do Resultado

Os resultados apresentados, tanto considerando as suposições do ACI quanto pela fórmula de atrito indicam que não deveria haver a fissuração no concreto. Esse fato pode ser explicado por haver uma grande liberação de calor no processo de hidratação do concreto. Com isso, houve uma grande variação térmica e consequentemente, uma grande retração nas fases iniciais do concreto, quando o mesmo ainda não possui integralmente a resistência à tração considerada nos cálculos. Para dar mais fundamento à teoria, utilizou-se a seguinte equação da NBR 6118 para encontrar a resistência à tração do concreto na idade de um dia:

$$f_{cd} = \frac{f_{ckj}}{\gamma_c} \cong \beta_1 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\beta_1 = \exp \{ s [1 - (28/t)^{1/2}] \}$$

Onde:

$s = 0,38$ para concreto de cimento CIII e IV;

$s = 0,25$ para concreto de cimento CI e II;

$s = 0,20$ para concreto de cimento CPV-ARI;

t é a idade efetiva do concreto, em dias.

Considerando um cimento CIII ou CP IV obtém-se:

$$\beta_1 = 0,196.$$

Aplicando na formula de obtenção de resistência a tração obtém-se:

$$f_{ct,m} = 0,3 * (15 * 0,196)^{\frac{2}{3}} = 0,615 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 * 0,615 = 0,43 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \frac{0,43}{1,4} = 0,308 \text{ MPa}$$

Neste caso, a peça fissuraria utilizando as considerações do ACI, pois a sua resistência à tração na idade de 1 dia é inferior à tensão de tração considerado no estudo do ACI.

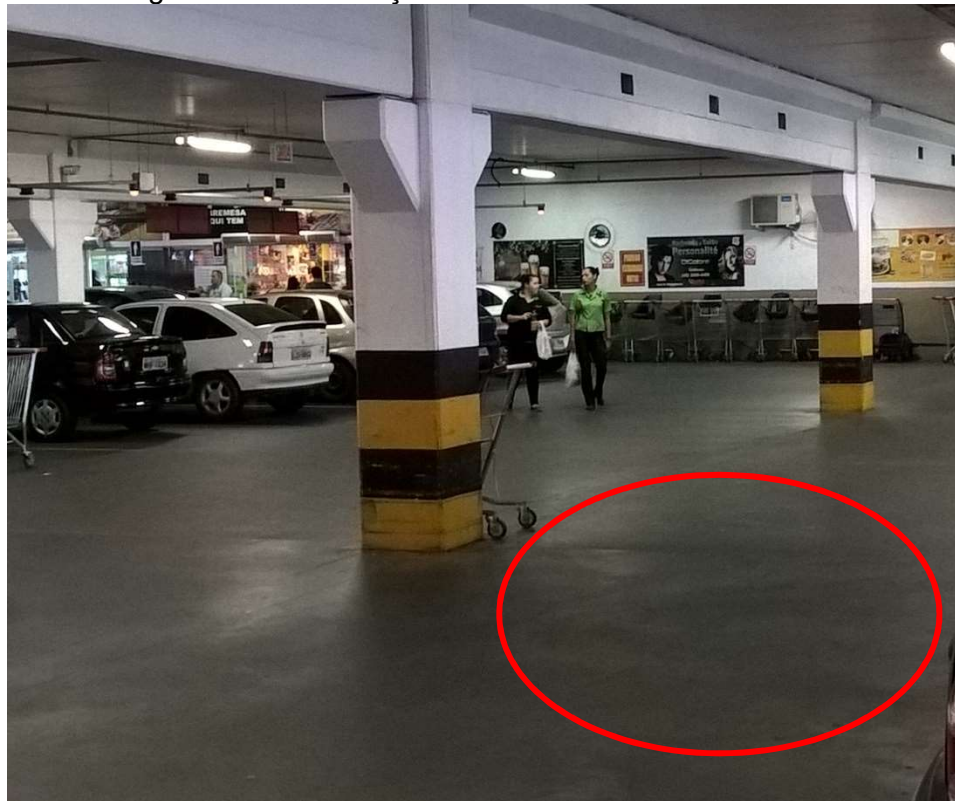
Recuperação da fissura

Como essa fissura acontece exatamente onde deveria ser a junta de dilatação, a solução apontada é: serrar onde há a fissura e preenchida com poliuretano, uma vez que o preenchimento com epóxi só seria necessário se houvesse tráfego de empilhadeiras ou elementos muito pesados. Outro ponto importante desse preenchimento é o fato dele ser um material elastômero, absorvendo, assim, as movimentações da peça.

4.3 Reação álcalis-agregado

A fissura que representa álcalis-agregado neste estudo se encontra presente no estacionamento do supermercado Bistek, localizado no bairro Costeira do Pirajubaé, Florianópolis, como indica a Figura 41:

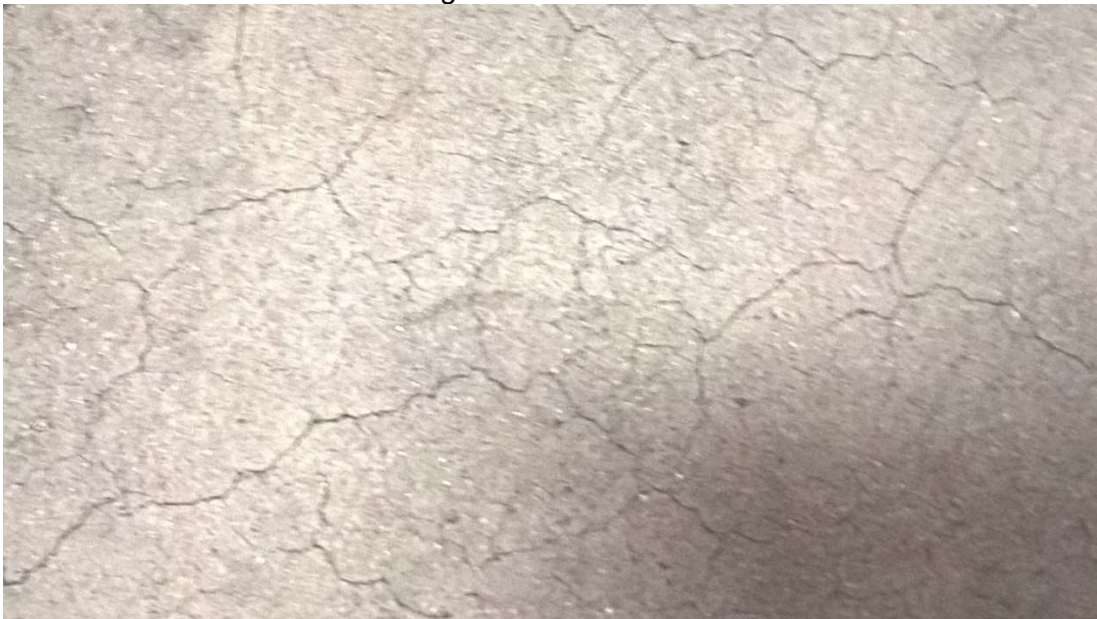
Figura 41 – Localização da fissura em análise.



Fonte: Autor.

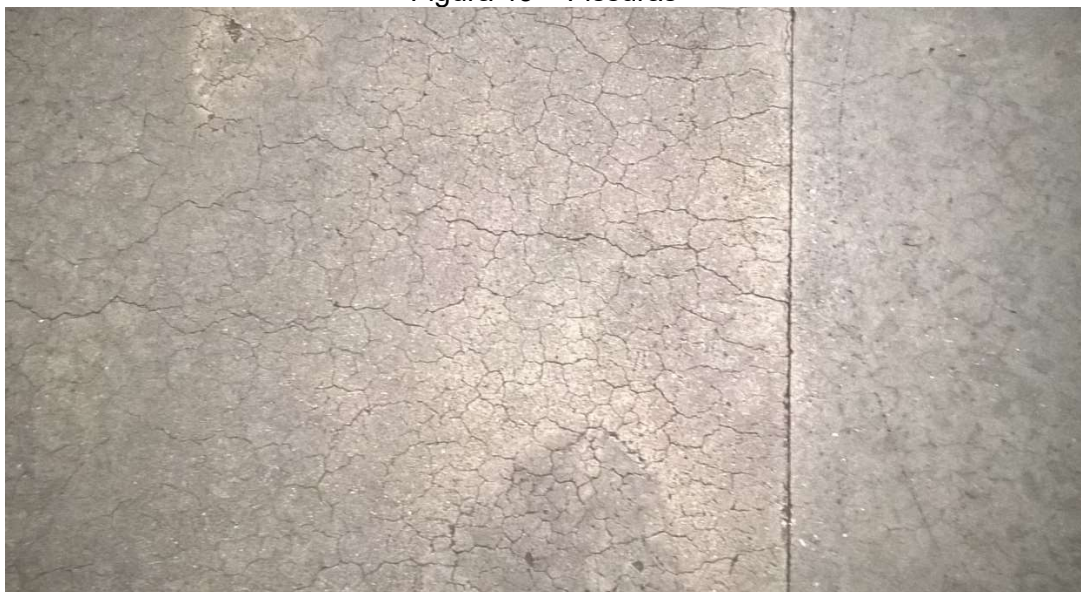
As fissuras possuem aspecto mapeado com pequena espessura, além disso, elas se apresentam uniformes apenas na superfície de algumas placas, não estando presentes em todas. Há placas nas quais observou-se que o processo de fissuração está apenas começando, de forma a serem percebidas somente com uma grande ampliação das fotos do local, passando despercebidas a olho nú. A Figura 42 representa essas fissuras:

Figura 42 – Fissuras



Fonte: Autor.

Figura 43 – Fissuras



Fonte: Autor.

As fissuras são finas e mapeadas, dessa forma as mesmas podem ter três causas possíveis: reação álcalis-agregado, ataque por sulfatos e retração plástica. Prosseguindo com o método eliminatório de fissuras, pode-se afirmar que não se trata de um caso de retração plástica, pois a mesma é decorrente de um processo de cura ineficiente da peça e é perceptível logo após o período de cura. Como a cura acontece por igual em pisos de concreto, se houvesse problemas com esse processo, isso aconteceria por toda a superfície de maneira uniforme.

Apesar do ataque por sulfatos ser possível nesse caso, uma vez que o supermercado, segundo o google maps, se encontra a aproximadamente 300 metros do mar, tendo influência dos sulfatos marítimos, a concentração de sulfatos se apresenta em menor quantidade do que nos meios onde essa patologia se mostra mais característica.

Atribuiu-se como mais provável a reação álcalis-agregado, uma vez que os lugares com maior concentração de fissuras são as placas as quais possuem maior circulação de carros. Em dias de chuva, as rodas de carro transportam água para dentro do estacionamento e, como diz a revisão bibliográfica, o gel formado por esse tipo de reação necessita de água para expandir. Além disso a revisão também ressalta que esse tipo de reação se desenvolve lentamente, podendo levar anos para acontecer, o que explica o fato de ainda haver fissuras em desenvolvimento nas placas.

Recuperação da fissura

Para este caso se indica a selagem de fissuras, pois esta se apresenta como a única alternativa efetiva de correção. A injeção de fissuras não pode ser utilizada nesse local, uma vez que quando aplicados os furos dessa técnica não há uma conectividade entre os mesmos.

O material de selagem pode ser o tanto poliuretano como epóxi, dado não se tratar de uma fissura com necessidades estruturais. Entretanto, pelo fato do piso se encontrar sobre uma laje de concreto e o ambiente ser suscetível à ação por cloretos, recomenda-se a utilização de epóxi que é mais resistente aos cloretos, diminuindo a probabilidade de os mesmos alcançarem a armadura da laje pelas fissuras.

4.4 Ações aplicadas

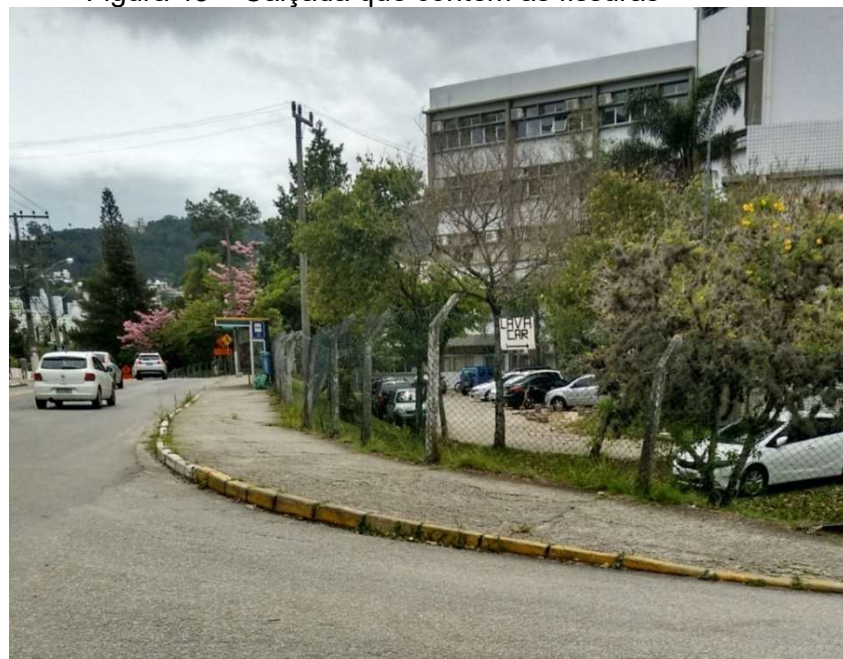
A fissura desse caso está presente nas calçadas dos arredores do prédio da Engenharia Civil da UFSC, no bairro Córrego Grande, Florianópolis. Sua localização pode ser identificada na Figura 44 e na Figura 45:

Figura 44 – Localização da calçada



Fonte: Google Maps (modificado)

Figura 45 – Calçada que contém as fissuras



Fonte: Autor.

Essas fissuras vêm acompanhadas com um afundamento do solo o qual a calçada se encontra apoiada, como mostra a Figura 46. Esse é o motivo para serem classificadas como fissuras por ação aplicada, o solo não teve resistência o suficiente para suportar as cargas sem deformações excessivas. Já o concreto não suporta a flexão gerada pelo conjunto de deformação e carga, gerando fissuras em sua estrutura. Nenhum outro motivo de fissuração apresentaria essas deformações no solo.

Figura 46 – Fissuras



Fonte: Autor.

Recuperação da fissura:

Neste caso a solução não está no concreto, pois não é ele o principal agente causado de fissuras, o meio para solucionar esse problema está na remoção de toda a calçada, um cálculo da carga passante na calçada e do peso da estrutura, a compactação do solo de forma a evitar mais deformações, se possível, deixar um sobrepeso para adensar a estrutura, bem como a aplicação de uma camada de base granular a fim de melhorar o desempenho do piso. Após, deve-se fazer a impermeabilização da interface base concreto para não haver a interferência entre a umidade da base e o concreto, aplicar armadura para resistir a eventuais flexões, dimensionando-se previamente, e concretar. Por fim, deve-se fazer as juntas serradas para evitar a fissuração por secagem e térmica.

4.5 Ataque de Sulfatos

O ataque de sulfatos é, como já mencionado, um processo químico que prejudicial ao concreto. Considerando o fato de ambientes marítimos terem altas concentrações de sulfatos, infere-se que em regiões litorâneas, como Florianópolis, são afetadas por esse tipo de processo.

A fissura deste cenário se encontra na ponte Colombo Salles, o acesso da parte insular à continental de Florianópolis. A ponte em questão encontra-se destacada na Figura 47.

Figura 47 – Ponte Colombo Salles



Fonte: Site Panorama, 2009 (Modificado).

As fissuras estão localizadas na base dos pilares de concreto que suportam a estrutura da ponte, representados na Figura 48.

Figura 48 – Localização das fissuras



Fonte: Autor.

As fissuras em análise possuem configuração de “mapas” e sem apresentar desníveis com o resto da superfície. Seguindo o método identificação de causas das fissuras por eliminação, esse tipo de configuração denota as seguintes possibilidades: retração, reação álcalis agregado e ação de sulfatos.

Figura 49 – Fissuras por ataque de sulfatos



Fonte: Autor.

Figura 50 – Fissuras por ataque de sulfatos



Fonte: Autor.

A primeira hipótese foi eliminada pelos fatos: como não há distinção no processo de cura num mesmo elemento estrutural, caso a fissura em questão fosse por retração plástica, as fissuras seriam praticamente homogêneas por toda a superfície, havendo pouca diferença nos pontos onde há menor incidência de vento e sol. Situação semelhante aconteceria com a retração por carbonatação, como possui o mesmo concreto ao longo da estrutura, o efeito de carbonatação dar-se-ia de forma homogênea. Nas retrações térmica e de secagem a fissura seria diferente, como os acenos do item 4.2, ou se fosse por efeito repetido de secagem em molhagem (retração e expansão) também seria homogêneo, pois toda a estrutura teve contato com a mesma variação de temperatura e umidade. Por último, a retração autógena tem maior incidência em concretos de auto desempenho por possuir maior

homogeneidade no tamanho dos poros, como o concreto de toda a estrutura é o mesmo, a falta de água nos poros daria por igual e as fissuras aconteceria em toda a estrutura.

Apesar da possibilidade de ocorrência de reações álcalis-agregado, optou-se pela ação de sulfato por sua maior probabilidade, uma vez que este é um meio característico desse tipo de fissuração.

Recuperação da Fissura

Para este caso se indica a selagem de fissuras, pois esta se apresenta a única alternativa efetiva de correção. A injeção de fissuras não pode ser utilizada nesse local uma vez que quando aplicados os furos dessa técnica, não há uma conectividade entre os mesmos.

O material de selagem pode ser o tanto poliuretano como epóxi, tendo-se em vista não se tratar de uma fissura com necessidades estruturais. Porém, o material recomendado é o epóxi, uma vez que se trata de um meio agressivo, com altas concentrações de sulfatos e cloretos, com isso é interessante a utilização de um material resistente a esse tipo de agente agressor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Durante a realização desse trabalho foram encontradas muitas fissuras com causa repetida que aqui não foram reproduzidas, sendo que as fissuras de maior incidência foram a corrosão de armadura e a falta de juntas nos pisos.

Inicialmente, constata-se que a corrosão de armadura é fato que se encontra vinculado à proximidade do mar, o que gera um ambiente agressivo pela ação de cloretos, fato bem ressaltado pela preocupação da norma em estabelecer critérios de durabilidade de acordo com a agressividade do meio ser relativamente recente (antigamente não havia qualquer normatização nesse sentido). Sua causa foi facilmente identificada pelo fato de ser o único tipo de fissura retilíneo, acompanhando a armadura, com protuberância em relação à superfície. E é exatamente o que ocorreu com os casos 1 (laje do apartamento) e 2 (pilar da casa).

Na sequência, apurou-se problemas decorrentes de falta ou ineficiência de junta de dilatação em estudo de caso de uma calçada nas imediações da reitoria da UFSC. A ausência de tal medida, ou seu uso inadequado, eventualmente ocasiona fissuras por retração do concreto. Apuramos que a calçada em observação apresentou fissuração apenas nos lances (placas) desprovidas de junta serrada, e linearmente no centro da peça. Apesar dos resultados pautados pelas suposições da ACI ou da fórmula de atrito não indicarem a ocorrência de fissuração, ainda sustentamos a origem na retração, mas com foco nas fases iniciais do processo em razão da grande liberação de calor e consequente variação térmica relevante.

No tocante ao caso 3, referente às fissurações localizadas no piso do estacionamento do supermercado Bistek, constatou-se a ocorrência de reações álcalis-agregado, seja pelo seu aspecto “mapeado”, seja pela descontinuidade, não apresentando homogeneamente em todos os lances no mesmo andar. Tal conclusão ainda se reforça pela presença de água, trazida nas rodas de veículos, dado que a maior incidência de fissuras se encontra nas partes de passagem.

No caso 4 apontou-se a presença de fissuras em calçada (ECV-UFSC) decorrentes de ações aplicadas, dada a presença de afundamento do solo onde apoiada a estrutura, sendo característica própria de tal patologia. O caso é típico de

inadequada preparação da superfície previamente à concretagem, com o devido adensamento do solo. Com o afundamento do mesmo, o concreto não suporta a flexão gerada, resultando nas fissuras observadas. Aqui a estrutura está completamente comprometida, sendo apontado como solução a sua completa remoção e refeitura, com a sugestão de aplicação de uma camada granular a fim de melhorar o desempenho do piso.

Interessante caso foi observado em pilar da Ponte Colombo Salles, com fissuras em forma de “mapas”, mas sem qualquer desnível em relação à superfície. Afastadas as demais possibilidades de fissuração de mesmo aspecto, apontamos a causa como sendo por ação de sulfatos, tendo-se em vista que a localização da estrutura (proximidade com o mar) possui típica incidência desta patologia.

Assim, foram expostas as diferentes patologias com ocorrência em concreto, com explicação de suas causas, consequências e aspectos típicos. Com os casos específicos aqui analisados pudemos exemplificar a ocorrência de tais patologias, bem como o método de identificação e a apresentação das soluções pertinentes

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Determinação do grau de restrição que o solo impõe aos pisos de concreto sobrepostos;
- Estudo de reação álcalis-agregado em pisos de garagem;
- Determinação do local de juntas de dilatação;
- Influência da proximidade do mar no processo de fissuração;
- Consequências dos erros de projeto nas construções.

6 REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2007. 60-p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991. 5-p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991. 5-p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991. 5-p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991. 6-p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991. 6-p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6122 – Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010. 91-p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014. 250-p.

Almeida, F.R.; Cunha, M.; Helene, P.; Lourenço, M.; Ribeiro, D.; Sales A., Sousa C. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**, Elsevier, 1ed Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 207.2R: Effect of restraint, volume change, and reinforcement on cracking of mass concrete**. Farmington Hills, American Concrete Institute, USA, 2002.

ANDRADE, M. C.; PAGE, C. L. **Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts: a study of cation specific effects.** British Corrosion Journal, v. 21, n.1, p. 49-53, 1986.

ANDRADE, J.J.O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos.** Tese de doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001, 249 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7.ed. São Paulo: ABCP, 2002.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland.** Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso: 01/08/2017

BAUER L.A.F. **Materiais de construção.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Tecnicos e Cientificos. 3. Ed, 1987, 403p

BRAGA R. E., PEREIRA, W. A. **Método Executivo De Piso Industrial,** Revista Pensar Engenharia, v.2, n. 2, Jul./2014.

Cabeceira Continental das Pontes Gov. Pedro Ivo Campos e Colombo Salles Disponível em: <<https://www.panoramio.com/photo/21232239>> Acesso: 01/11/2017

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FL, Jasson Rodrigues de. **Calculo e detalhamento de estruturas de concreto armado** São Carlos: Edufscar, 2010. 367p

Cichinelli, G. C. **Reação perigosa,** 2007 Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285390-1.aspx>> Acesso: 20/09/2017

CINCOTTO, M. A.; MELO NETO, A. A.; REPETTE, W. L. **Influência do teor de ativador e da idade de exposição na retração por secagem de argamassas com cimentos de escória ativada com silicato de sódio**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, 2003.

COUTINHO, A S.; GONÇALVES. A. **Fabrico e propriedades do betão**. Volume III. 2.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil 1994. 368 p.

CUNHA, A.C.Q.; HELENE, P.R.L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – BT/PCC/283. São Paulo, 2001.

DAS, B. M., **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**, Cengage Learning, 7 ed. 2012, 632p

DANTAS, A. B.; SILVA, F. G. S. **Estudo sobre retração autógena em concretos de alto desempenho (CADs)**. In: IX ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E V ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓSGRADUAÇÃO. Anais eletrônicos... Paraíba: Universidade do Vale do Paraíba. 2005. Disponível em: Acesso em: 20 /09/2017.

Execução de juntas de piso de concreto. Disponível em:

<<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/151/melhores-praticas-execucao-de-juntas-de-piso-de-concreto-285780-1.aspx>> acesso 28/10/2017

FIGUEIREDO E.P.; MEIRA G.; Boletim Técnico: **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto** ALCONPAT Internacional, 2013.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 341 p.

GOMES NETO, D.P; BARRETO, L.S **Uma discussão sobre a reação álcali-adregado (RAA), seu mecanismo e fatores que a influenciam**. Congresso internacional de patologia e reparação de estruturas (CINPAR), 2013

HELENE, P.R.L. **Corrosão das Armaduras para Concreto Armado**. São Paulo. IPT, PINI, 1986.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. São Paulo. 2 ed. IBRACON,.2010.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**, São Paulo. 7ed, Pearson, 2010

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: ISO 8044: **Corrosion of metals and alloys**, 2015.

Juntas em lajes de concreto- expansão; Retração; Dilatação. Disponível em: <<https://engciv.wordpress.com/2012/11/10/juntasdilatacao-juntas-em-lajes-concreto/>> Acesso 26/10/2017

Juntas em Estruturas de Concreto. Disponível em: <<https://blogdopetcivil.com/2012/04/13/juntas-em-estruturas-de-concreto/>> acesso 28/10/2017

Juntas – Definições. Disponível em:<<http://www.uniontech.com.br/juntas-definicoes>> Acesso: 20/10/2017

Kishore K. **Visual Inspection of Concrete Structure**. Disponível em: <<http://www.engineeringcivil.com/visual-inspection-of-concrete-structure.html>> Acesso: 10/08/2017.

LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das construções. Boletim técnico n.06**. São Paulo: USP, 1986.

MARANGON, M. **Geotecnia das Fundações**, Notas de aula. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009.

MARTINS, A. et al. **Apostila de treinamento de mão de obra para construção civil: Cimento**. Cia. de Cimento Itambé. Curitiba, 2008.

MEDEIROS, Marcelo Henrique F., HELENE, Paulo. **Migração de íons cloreto no concreto - Influência da consistência, relação água/cimento e consumo de cimento**. Revista IBRACON, São Paulo, ano XI, n. 32, 53-65 p., Fev/Mar/Abr 2003.

MEHTA, P. Kumar & MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo, IBRACON, 2008. 660p.

MOLIN, D. C. C. D. **Contribuição aos estudos de propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. São Paulo, 1995, 286 p. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia de Construção civil. USP.

MORANVILLE-REGOURD, P.J.M. **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**. Berkeley, California, 1985. 153p. Tese (Doutorado) – University of California. Berkeley

MOURA, M. V. S. **Estudo do atrito na interface areia-concreto**. Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

Nakamura, J. **Cuidados para resistir à maresia**, Técnica, 88 ed, 2004. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/88/artigo286302-1.aspx>>. Acesso: 20/10/2017.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912p.

PADARATZ, Ivo José. **Notas de aula da disciplina Patologia das Construções - ECV 5355**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

PIMENTEL, C. C. D., TEIXEIRA L., **Patologia do concreto e recuperação de estruturas – injeções de resina em estruturas de concreto**. Ibracon, 1978.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS Departamento de Engenharia de Estruturas, 2007.

POURBAIX, Maciel. **Lições de Corrosão Eletroquímica**. Bruxelas: CEBELCOR 1987. 421 p.

PRUDENCIO JR, L. R. Apostila da disciplina ECV5302 - Materiais de Construção Civil I, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

RAMLOCHAN, T.; THOMAS, M. D. A.; HOOTON, R. D. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part II: Microstructural and microchemical investigations. *Cement and Concrete Research*. v. 34, 2004.

REPETTE, W. L. Notas de aula da disciplina Patologia das Construções - ECV 5355. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

RIPPER, T.; SOUZA, V. C. M. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998. 255 p.

RODRIGUES, P. P. F. **Juntas em pisos industriais de Concreto**, 1999. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/42/artigo287180-1.aspx>> Acesso: 28/10/2017

SINAPI, **Cadernos Técnicos De Composições Para Passeios De Concreto**, CAIXA, 2016.

Tipos De Fck Concreto Mias Usados Para Alguns Tipos De Obra, Disponível em: <<http://www.usinamixconcreto.com.br/tipos-de-concreto-para-cada-obra/>> Acesso: 15/10/2017.

THOMAZ, E. C. S., **Ataque de Sulfatos ao Concreto de Cimento Portland**. Notas de aula. 2003. Disponível em:

<http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/ataque_por_sulfatos.pdf> Acesso: 20/10/2017

THOMAZ, E. C. S., **Fissuração - 168 Casos Reais**, Rio de Janeiro, 2003.

THOMAZ, Érico. **Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: Pini, 1989. 194 p.

Umidade Relativa do Ar Média Compensada (%). Instituto Nacional de Meteorologia. aput **Predefinição: Tabela climática de Florianópolis**, Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Predefini%C3%A7%C3%A3o:Tabela_clim%C3%A1tica_de_Florian%C3%B3polis> Acesso em 20/10/2017.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO 1

Tabela 4 - Classe e Agressividade Ambiental (CAA)

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	Maninha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de Maré	

Fonte: NBR6118/2014.

- 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.

7.2 ANEXO 2

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

Concreto ²¹	Tipo ^{22,23}	Classe de agressividade			
		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

Fonte: NBR6118/2014.

- 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.

²¹ O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

²² CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

²³ CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

7.3 ANEXO 3

Tabela 6 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ²⁴
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ²⁵	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ²⁶	30		40	50
Concreto protendido ²⁷	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

Fonte: NBR6118/2014.

Onde Δc é a tolerância de execução e o cobrimento nominal (cobrimento mínimo acrescido de Δc) respeita as seguintes regras:

- $c_{nom} \geq \Phi$ barra;
- $c_{nom} \geq \Phi$ feixe = $\Phi_n = \Phi \sqrt{n}$;
- $c_{nom} \geq 0,5 \Phi$ bainha.

Φ – diâmetro das barras da armadura;

Φ_n – diâmetro equivalente de um feixe de barras;

n – número.

²⁴ 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.

²⁵ 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 ³ 15 mm.

²⁶ No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ³ 45 mm.

²⁷ Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

7.4 ANEXO 4


Tabela 7 - Valores dos coeficientes γ_c e γ_s

Combinações	Concreto	Aço
	γ_c	γ_s
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,0

Fonte: NBR6118/2014.

7.5 ANEXO 5

Tabela 8 - Normais Climatológicas de Santa Catarina (1961-1990) - Umidade Relativa do Ar Média Compensada (%)

<p style="text-align: center;">Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 Umidade Relativa do Ar Média Compensada (%)</p> 															
Código	Nome da Estação	UF	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Ano
83921	Araranguá	SC	81,8	84,2	84,2	83,4	83,6	82,7	82,7	82,3	83,9	81,7	79,9	78,5	82,4
83898	Camboriú	SC	83,1	85,1	85,3	85,7	86,6	87,2	87,7	87,4	87,0	84,7	83,1	82,4	85,4
83887	Campos Novos	SC	75,9	78,8	79,5	77,7	78,8	79,2	76,0	74,1	75,1	72,0	71,4	73,3	76,0
83883	Chapecó	SC	73,0	75,0	75,0	76,0	78,0	77,0	74,0	71,0	72,0	71,0	69,0	71,0	73,5
83897	Florianópolis	SC	81,0	82,0	82,0	82,0	83,0	83,0	84,0	83,0	83,0	81,0	80,0	80,0	82,0
83872	Indaial	SC	76,0	78,0	79,0	79,0	80,0	80,0	80,0	78,0	79,0	77,0	76,0	75,0	78,1
83865	Irineópolis	SC	80,4	82,2	83,9	83,8	84,9	85,7	84,9	82,6	82,5	80,2	77,3	78,9	82,3
83891	Lages	SC	77,4	79,8	80,8	80,8	81,5	83,2	83,0	80,5	80,6	78,5	76,6	76,6	79,9
83924	Laguna	SC	80,9	82,6	82,8	80,7	82,7	82,5	83,0	83,5	84,3	81,8	80,3	80,0	82,1
83922	Orleans	SC	82,8	84,4	85,5	85,2	85,9	85,9	85,4	84,6	83,8	82,8	82,9	82,9	84,3
83864	Porto União	SC	78,0	81,0	81,0	83,0	86,0	87,0	85,0	81,1	81,0	77,0	75,0	76,0	80,9
83874	São Francisco do Sul	SC	87,2	88,1	88,6	87,6	88,9	87,7	89,0	88,6	89,8	87,6	85,7	85,7	87,9
83920	São Joaquim	SC	82,0	83,0	84,0	83,0	80,0	78,0	77,0	76,0	78,0	79,0	79,0	80,0	79,9
83923	Urussanga	SC	80,9	82,9	84,2	83,9	85,4	85,4	84,4	82,5	82,5	79,9	78,4	78,7	82,4
83858	Xanxerê	SC	80,3	80,7	81,0	79,9	79,7	80,2	77,1	76,9	76,2	76,2	75,1	77,4	78,4

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia, modificado