

Conceitos essenciais sobre Patologias em Estruturas de Concreto

Conteudista:

Rogério Calazans Verly

Brasília, setembro de 2022.

Conceitos essenciais sobre Patologias em Estruturas de Concreto

Módulo 2

Processo de hidratação do cimento e variações volumétricas do concreto

Conforme estabelece O Art. 11 da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 03/DNIT SEDE, DE 1º DE ABRIL DE 2022, o servidor que optar por receber a GECC relativa à elaboração de material didático, cede, tacitamente e em caráter irrevogável, a titularidade dos direitos patrimoniais relativos aos materiais produzidos em decorrência dessa percepção. Desta forma, tendo em vista o contido no Processo nº 50600.021235/2022-68, o DNIT poderá revisar o material cedido, adaptá-lo e utilizá-lo livremente em outros eventos que venha a promover, bem como o ceder a outros órgãos e entidades federais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de hidratação por dissolução-precipitação	4
Figura 2 - Evolução da contribuição dos constituintes do cimento para a resistência mecânica.....	6
Figura 3 - Interação dos aluminatos com os sulfatos durante a hidratação do cimento	8
Figura 4 - Características das retrações química, autógena e por secagem	11
Figura 5 - Formação de um menisco entre duas placas	12
Figura 6 - Reversibilidade da retração por secagem	13
Figura 7 - Reversibilidade da fluência.....	14
Figura 8 - Deformação no tabuleiro da ponte sobre o Rio Uruguai (BR-158/RS)	15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Abreviação dos óxidos participantes do processo	3
Tabela 2 - Reações de hidratação do cimento - silicatos	4
Tabela 3 - Reações de hidratação dos silicatos e compostos hidratados	5
Tabela 4 - Reações de hidratação do cimento - aluminatos	7
Tabela 5 - Massa molar e massa específica dos produtos envolvidos na hidratação do C_3S	9

SUMÁRIO

1.	APRESENTAÇÃO.....	1
2.	HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	2
A.	HIDRATAÇÃO DOS SILICATOS.....	4
B.	HIDRATAÇÃO DOS ALUMINATOS.....	6
3.	VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS DO CONCRETO.....	8
A.	RETRAÇÃO QUÍMICA.....	8
B.	RETRAÇÃO AUTÓGENA E POR SECAGEM.....	10
C.	FLUÊNCIA.....	13
4.	REFERÊNCIAS.....	16

1. APRESENTAÇÃO

O Módulo 1 trouxe os principais conceitos sobre o diagnóstico das manifestações patológicas encontradas nas estruturas de concreto armado e protendido. Como as manifestações patológicas envolvem em algum momento os produtos de hidratação do cimento, o conhecimento das **principais reações de hidratação do cimento e os produtos formados** auxilia no estudo da patologia das estruturas de concreto.

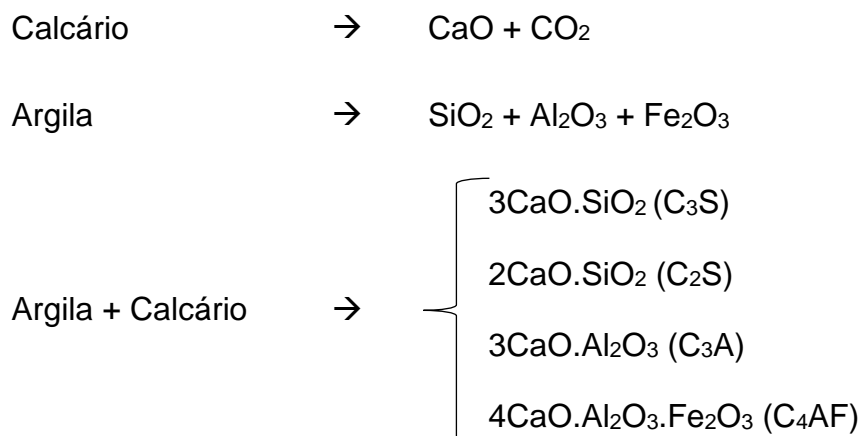
Este módulo apresenta as **principais reações de hidratação do cimento e as variações de volume envolvidas no processo**, consequência da diferença de volume entre os componentes do cimento e dos produtos de hidratação. Além dessa diferença direta, a formação da porosidade do concreto implica em reduções posteriores de volume, conforme será visto neste módulo.

2. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

As manifestações patológicas que são encontradas nas estruturas de concreto armado são fruto da **interação do material com o meio onde se encontra**. Algumas são explicadas por um grande conjunto de reações e outras mais simples, mas o que todas têm em comum é o envolvimento dos produtos existentes no interior do concreto. Por isso se torna fundamental o **conhecimento dos principais produtos de hidratação do cimento e o processo pelo qual são formados**, não só para o diagnóstico apropriado da manifestação patológica, mas também para a tomada de medidas preventivas.

O Cimento Portland é produzido a partir da mistura, calcinação e moagem de materiais calcários e argilosos em certas proporções. O calcário é o principal componente do processo e deve ser complementado por produtos que são encontrados na argila ou produzidos artificialmente (sílica, alumínio, ferro e magnésio). Como resultado do processo são obtidos silicatos de cálcio e alguns outros produtos em menor proporção. Esse material é denominado **clínquer**.

Os principais produtos vindos do calcário e da argila são mostrados nas equações abaixo. A combinação deles resulta em silicatos, aluminatos e ferroaluminatos, mostrados entre parêntesis com sua forma reduzida.



Geralmente a composição dos produtos participantes do processo são extensas. Para a simplificação da sua representação é usada a prática da abreviação dos óxidos participantes, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Abreviação dos óxidos participantes do processo

óxido	Abreviação
CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
MgO	M
SO ₃	S̄
H ₂ O	H

Fonte: Autor.

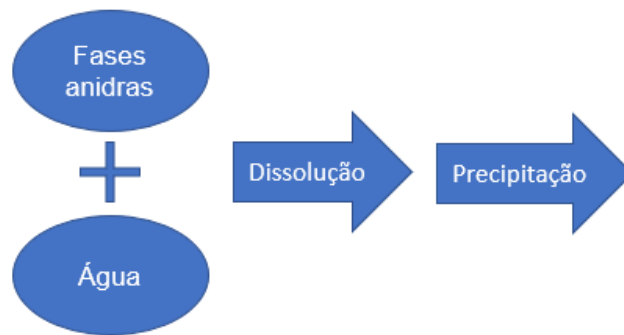
Ao final do processo de fabricação, é adicionado gesso para controlar a velocidade das reações, garantindo tempo para que o concreto seja manuseado em seu estado fresco e controlando o calor de hidratação.

O cimento, assim como é produzido, não tem capacidade aglomerante sobre os agregados. Para que desenvolva essa funcionalidade, é necessário que se adicione água para as reações de hidratação do cimento. Essas reações serão mostradas separadamente nos próximos tópicos da seguinte forma: **hidratação dos silicatos e hidratação dos aluminatos**.

Antes de passarmos às reações de hidratação propriamente ditas, convém conhecer os dois mecanismos de hidratação propostos, que são por **dissolução-precipitação e topoquímico** (no estado sólido). Esses processos serão necessários para o entendimento, dentre outros, do papel dos sulfatos, adicionados junto com o gesso, para controlar a velocidade de hidratação.

No caso da dissolução-precipitação ocorre a dissolução dos compostos anidros e a formação de hidratos em solução. Devido à sua baixa solubilidade, pode ocorrer a precipitação dos compostos formados (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Este mecanismo pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Mecanismo de hidratação por dissolução-precipitação



Fonte: Autor.

Pelo outro mecanismo, as reações acontecem diretamente na superfície dos compostos anidros, sem necessitar que os compostos entrem em solução.

TOME NOTA

Não há um momento exato em que um mecanismo deixa de acontecer e se inicia outro. O mecanismo da dissolução-precipitação é dominante nas idades iniciais do processo de hidratação do cimento. Com a redução da mobilidade iônica, o processo topoquímico passa a ser dominante.

a. Hidratação dos silicatos

Embora as reações ocorram de forma simultânea, é possível separar em grupos para uma abordagem mais didática. A Tabela 2 mostra as cinco principais reações que ocorrem ao longo do processo de hidratação, com destaque para as reações 1 e 2, que tratam da hidratação do C₃S (Alita) e do C₂S (Belita).

Tabela 2 - Reações de hidratação do cimento - silicatos

Reação 1	$C_3S + H \rightarrow C-S-H + CH + \text{calor}$
Reação 2	$C_2S + H \rightarrow C-S-H + CH + \text{calor}$
Reação 3	$C_3A + \bar{C}\bar{S}H_2 + H \rightarrow AFt + \text{calor}$
Reação 4	$C_4AF + \bar{C}\bar{S}H_2 + H \rightarrow AFt + CH + FH_3 + \text{calor}$



Fonte: Autor.

Alita e belita são estruturalmente similares, mas apresentam diferenças quanto à relação cálcio/sílica e na quantidade de água quimicamente combinada. Considerando que o **processo** de produção influi na **estrutura** dos materiais, e por consequência nas suas propriedades, podemos entender que a pequena diferença estrutural entre a alita e a belina não implica em grandes diferenças nas características físicas dos produtos formados nas reações 1 e 2.

Essas duas reações resultam em produtos semelhantes, mas com proporções diferentes, e ocorrem com velocidades distintas. As proporções dos dois principais produtos formados na hidratação dos silicatos são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Reações de hidratação dos silicatos e compostos hidratados

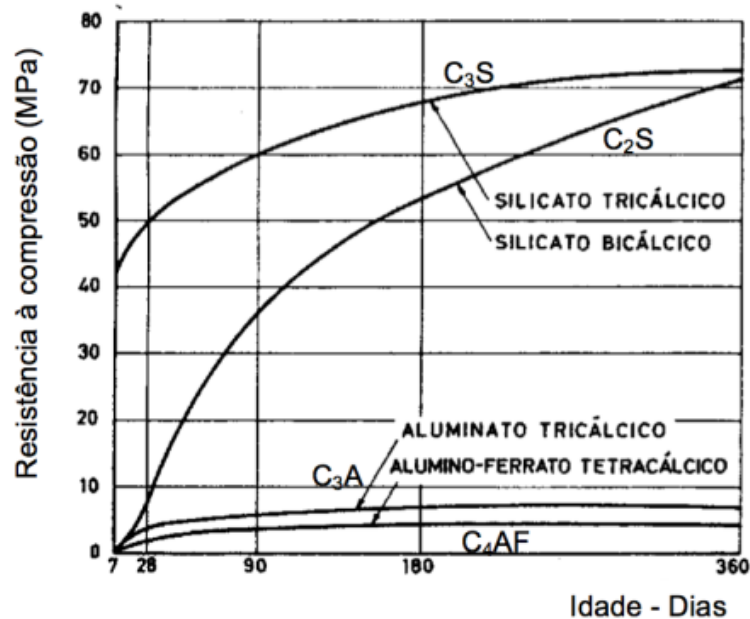
Composto anidro	Água necessária	Hidratação completa	Compostos hidratados
C ₃ S	24%	→	61% de C-S-H + 39% de Ca(OH) ₂
C ₂ S	21%	→	82% de C-S-H + 18% de Ca(OH) ₂

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

Nesse ponto cabe um comentário sobre a proporção dos compostos hidratados. O primeiro comentário é sobre a durabilidade. Como será apresentado nos próximos módulos, alguns dos processos químicos de deterioração do concreto atuam sobre o Ca(OH)₂, a exemplo das águas sulfatadas que solubilizam esse componente. Dessa forma, concretos com menores quantidades de Ca(OH)₂ são menos afetados por este processo.

O segundo comentário se refere à resistência. O C-S-H é o componente responsável por conferir resistência ao concreto, o que leva à conclusão de que cimentos com maiores teores de C₂S apresentarão maiores resistências finais. A maior parte dos cimentos comercializados atualmente possuem maior proporção de C₃S pelo fato de ganharem resistência mais rapidamente que o C₂S (Figura 2).

Figura 2 - Evolução da contribuição dos constituintes do cimento para a resistência mecânica



Fonte: Coutinho (1988).

A composição química dos silicatos de cálcio hidratado nas pastas de cimento em hidratação, varia com a relação água/cimento, temperatura e idade. Dessa forma é mais comum se referir a esses hidratos simplesmente como C-S-H, uma notação que significa que não existe uma composição química fixa. Vale reiterar que as diferenças de composição entre os diversos tipos de C-S-H têm pouco efeito nas suas características físicas, uma vez que a estrutura é quem determina as propriedades do material e ela é semelhante nas diferentes composições do C-S-H.

b. Hidratação dos aluminatos

Conforme dito anteriormente, o gesso é adicionado ao cimento para controlar a velocidade das reações, permitindo que o concreto seja trabalhado antes do início do seu endurecimento. A reação do C₃A com a água é imediata, formando grandes placas de hidratos cristalinos, provocando o enrijecimento imediato da pasta. Tudo isso mediante uma rápida liberação de calor de hidratação.

O rápido enrijecimento do concreto e a grande liberação de calor em pouco tempo inviabilizariam a utilização do cimento para aplicações práticas. Dessa forma, o gesso desempenha um papel importante nesse trabalho, conforme será mostrado

nos próximos parágrafos. A Tabela 4 mostra em destaque as reações de hidratação que envolvem os aluminatos.

Tabela 4 - Reações de hidratação do cimento - aluminatos

Reação 1	$C_3S + H \rightarrow C-S-H + CH + \text{calor}$
Reação 2	$C_2S + H \rightarrow C-S-H + CH + \text{calor}$
Reação 3	$C_3A + \bar{C}\bar{S}H_2 + H \rightarrow AFt + \text{calor}$
Reação 4	$C_4AF + \bar{C}\bar{S}H_2 + H \rightarrow AFt + CH + FH_3 + \text{calor}$
Reação 5	$(C_3A / C_4AF) + AFt + H \rightarrow AFm + CH + FH_3$

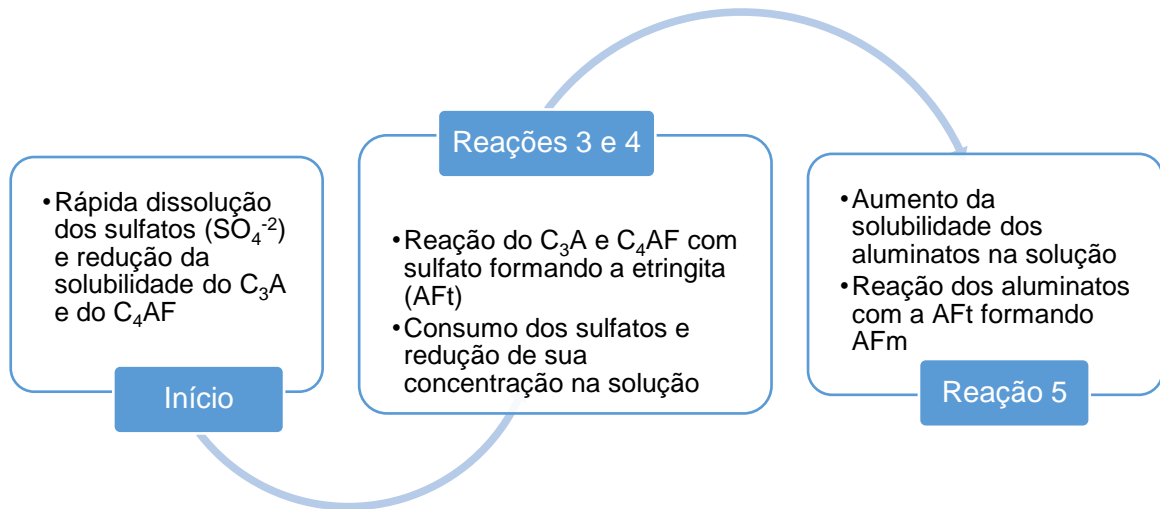
Fonte: Autor.

O mecanismo de retardo das reações do C_3A pelo gesso é explicado por diversas teorias. De uma forma bastante simplificada, como o gesso ($\bar{C}\bar{S}H_2$ na Reação 3) apresenta maior solubilidade em relação aos demais componentes do cimento, ele entra em solução primeiro e aumenta sua concentração na solução. Por consequência, a solubilidade dos aluminatos reduz ainda mais, evitando que a pasta enrijeça rapidamente.

Em que pese a solubilidade dos aluminatos ter reduzido, nas Reações 3 e 4 são mostrados os compostos com alumínio reagindo com os sulfatos (gesso), produzindo a etringita (AFt). À medida que os sulfatos são consumidos pelas reações com o C_3A e com o C_4AF , a concentração dos sulfatos reduz, permitindo que a solubilidade dos aluminatos aumente, uma vez que eram os sulfatos que reduziam sua solubilidade.

Na sequência, com o aumento da solubilidade dos aluminatos, estes passam a reagir com a etringita, formada nas reações 3 e 4, tendo como resultado o monossulfato (AFm). Embora essas reações ocorram de forma simultânea, a sequência didática é mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Interação dos aluminatos com os sulfatos durante a hidratação do cimento



Fonte: Autor.

Como dito anteriormente, o objetivo deste módulo não é fazer uma revisão bibliográfica aprofundada sobre cimento Portland ou tecnologia do concreto, mas apresentar os principais componentes do cimento envolvidos nas manifestações patológicas. Nos próximos módulos serão retomados alguns assuntos tratados aqui.

3. VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS DO CONCRETO

Muitos dos sintomas identificados nas estruturas de concreto podem ser explicados pelas variações volumétricas do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Nos próximos módulos serão tratadas as manifestações patológicas propriamente ditas, algumas delas envolvendo variações volumétricas do concreto. O objetivo deste item é apresentar dois conceitos que servirão de base para os próximos módulos do curso.

a. Retração química

A complexa rede de reações químicas de hidratação do cimento se inicia imediatamente após ser adicionada água ao cimento. À medida que as reações vão

ocorrendo, a composição inicial da mistura (água + cimento) vai, gradativamente, dando lugar a uma mistura com água + cimento + produtos de hidratação. Considerando que o volume final dos produtos de hidratação é menor que a soma dos volumes da água e do cimento, elementos originais da mistura, pode-se concluir que ocorrerá redução de volume ao final do processo.

Essa afirmativa pode ser comprovada pelo equilíbrio estequiométrico das reações que envolvem o C_3S de forma isolada. Ele reage com a água dando lugar ao C-S-H, um produto que não tem sua composição bem definida e que pode variar em função do processo e das matérias primas utilizadas na sua produção. Em que pese essa observação, neste trabalho serão considerados os valores da Equação 1 para aplicação didática.



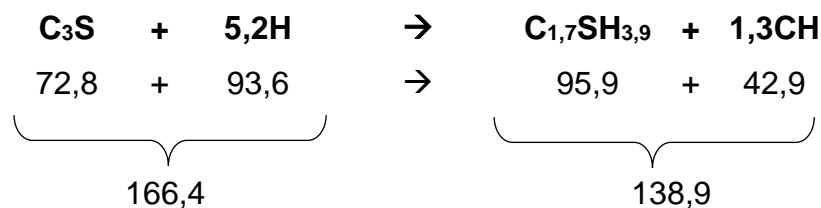
A Tabela 5 apresenta os valores de massa molar e massa específica dos componentes envolvidos na hidratação do C_3S .

Tabela 5 - Massa molar e massa específica dos produtos envolvidos na hidratação do C_3S

Compostos	Massa molar (g)	Massa específica (g/cm ³)
C_3S	228	3,13
$C_{1,7}SH_{3,9}$	225,4	2,35
CH	74	2,24
H	18	1,0

Fonte: Adaptado de Silva (2007), apud Boivin (2001).

De acordo com Silva (2007), o balanço molar volumétrico da Equação 1 implica em uma redução de 16,53%, conforme mostrado a seguir:



A hidratação do C_3S segue ao longo do tempo conforme mostrado na Figura 2, de forma que as variações volumétricas podem ser divididas em retração química (contração *Le Chatelier*) e retração autógena (autodessecação), conforme detalhado a diante.

A **retração química**, também denominada contração *Le Chatelier*, ocorre enquanto não são formados produtos suficientes para estabelecer um “esqueleto” que imponha restrição à redução de volume. Nessa fase, o material (concreto fresco) se comporta como uma suspensão, podendo reduzir ou aumentar seu volume sem restrições. Isso implica em dizer que não são formadas fissuras no concreto nessa fase, uma vez que não há restrição à deformação e, por consequência, não são gerados esforços internos.

b. Retração autógena e por secagem

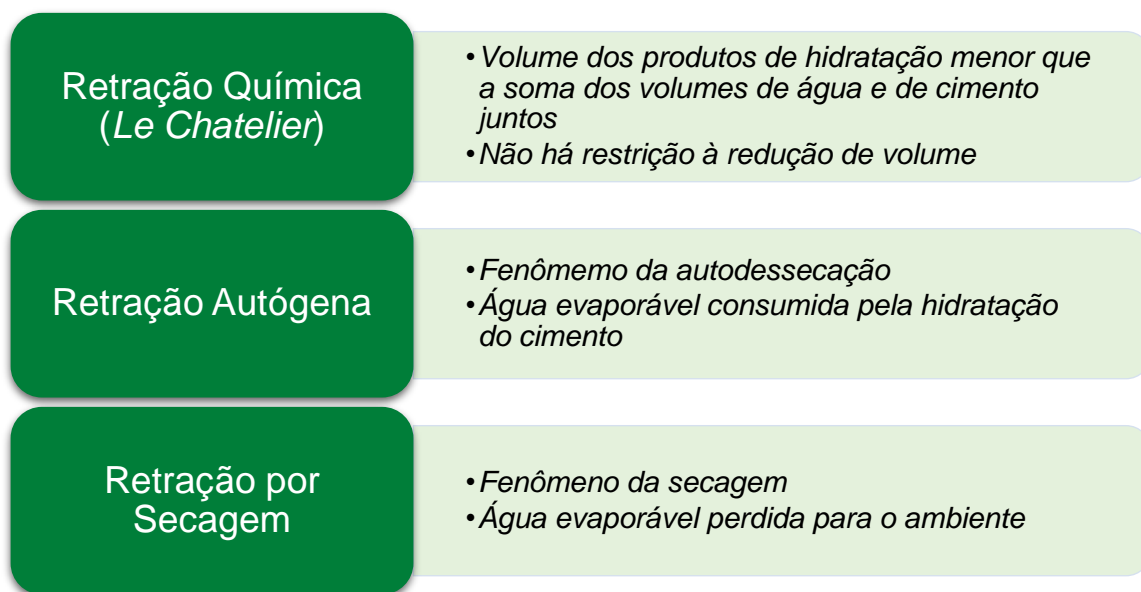
Com a formação e constante enrijecimento de uma estrutura composta pelos produtos de hidratação (“esqueleto”), a redução de volume se torna incompatível com as deformações mecanicamente admissíveis. Como consequência, considerando que essa restrição de movimento não interrompe as reações mostradas na Equação 1, a redução de volume da pasta de cimento continua a ocorrer, o que provoca o aumento do volume de vazios no interior do concreto.

De acordo com Silva (2007), este “fenômeno, que sucede à Contração *Le Chatelier*, é chamado de autodessecação. Ele se traduz fisicamente por uma redução da umidade relativa interna (UR) do material e, mecanicamente, por uma retração global do material”.

Falou-se até aqui da evolução das reações do cimento, passando por um período em que o concreto ainda está plástico (antes da pega), quando a redução de volume não gera esforços internos, seguida por um período em que já se nota uma estrutura formada por uma rede que se conecta e já consegue se contrapor à tendência de redução. No primeiro momento ocorre a **retração química** (contração *Le Chatelier*) e no segundo ocorre a **retração autógena**, provocada pelo mecanismo da autodessecação. A autodessecação pode ser entendida como o consumo da água evaporável pela reação de hidratação do cimento.

Com o passar do tempo, e com o conseqüente ganho de resistência do concreto, surge um novo termo para descrever o mesmo mecanismo da retração autógena, que é a **retração por secagem**. Neste caso, a variação ocorre pela perda de água para o ambiente, e não para a hidratação do cimento. Um resumo das retrações apresentadas até aqui pode ser encontrado na Figura 4.

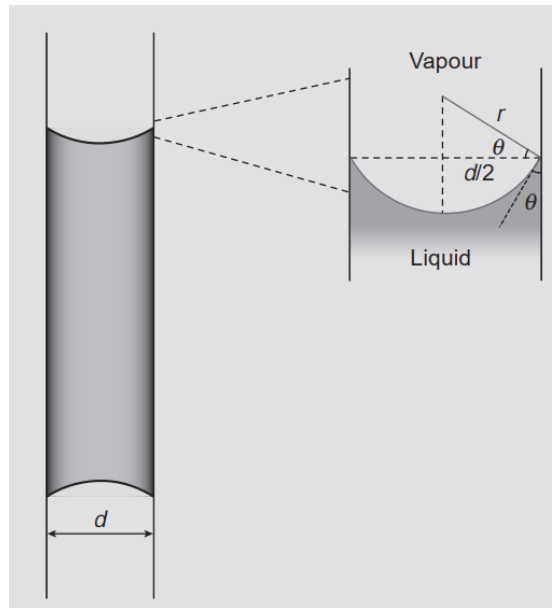
Figura 4 - Características das retrações química, autógena e por secagem



Fonte: Autor.

O simples consumo de água, pela hidratação ou para o ambiente, não explica a redução de volume para as retrações autógena e por secagem. Nesse caso é preciso recorrer aos conceitos de química da superfície. A Figura 5 mostra a formação de um menisco (superfície entre líquido e ar). Se o menisco é côncavo, a pressão interna do líquido é menor que a pressão externa, fazendo com que as superfícies laterais se aproximem (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Figura 5 - Formação de um menisco entre duas placas



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Um exemplo da vida cotidiana é quando se coloca um canudo dentro de um copo com água e se observa que o líquido no interior do canudo fica em posição mais elevada que o restante do líquido dentro do copo. Da mesma forma que a água é “puxada” para cima, há uma reação em sentido contrário nas paredes do canudo, tentando encurtar a distância entre as paredes. A força que une as superfícies laterais do canudo (poro do concreto) é obtida pela Equação 2.

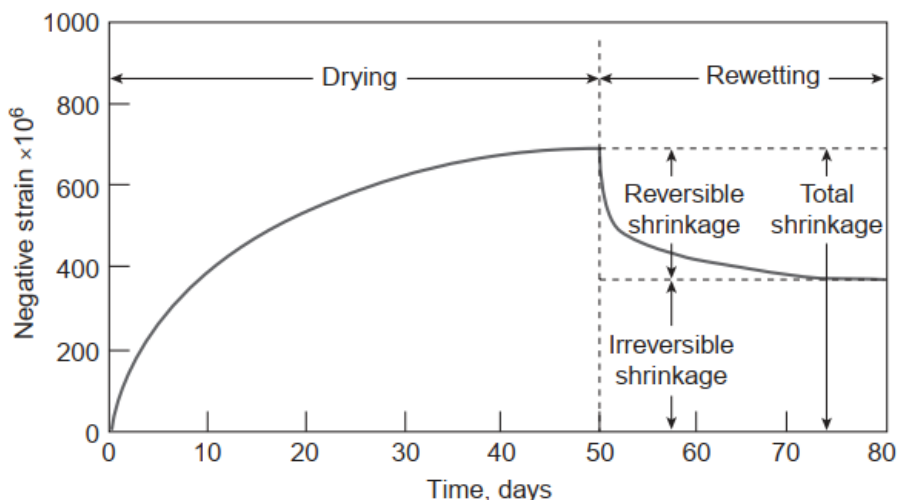
$$F = \frac{2\alpha \cos \theta}{r}$$

Equação 2

Nesse caso, considerando r o raio do poro, quanto menor o raio, maior a força. Outro aspecto a ser observado é que em um concreto completamente saturado não haverá menisco, uma vez que não há interface água-ar dentro dos poros. Se não há menisco, o ângulo será zero, fazendo com que o esforço seja também igual a zero.

Fica evidente que a motivação principal para a ocorrência da retração por secagem é a perda de água para o ambiente, por evaporação, sendo esperado que o concreto retorne à sua dimensão original quando for novamente saturado e os meniscos desaparecerem. Mas, não é o que ocorre, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Reversibilidade da retração por secagem



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Após a secagem inicial, o concreto volta a ser molhado no 50º dia, recuperando parte do encurtamento que sofreu e permanecendo com um encurtamento irreversível.

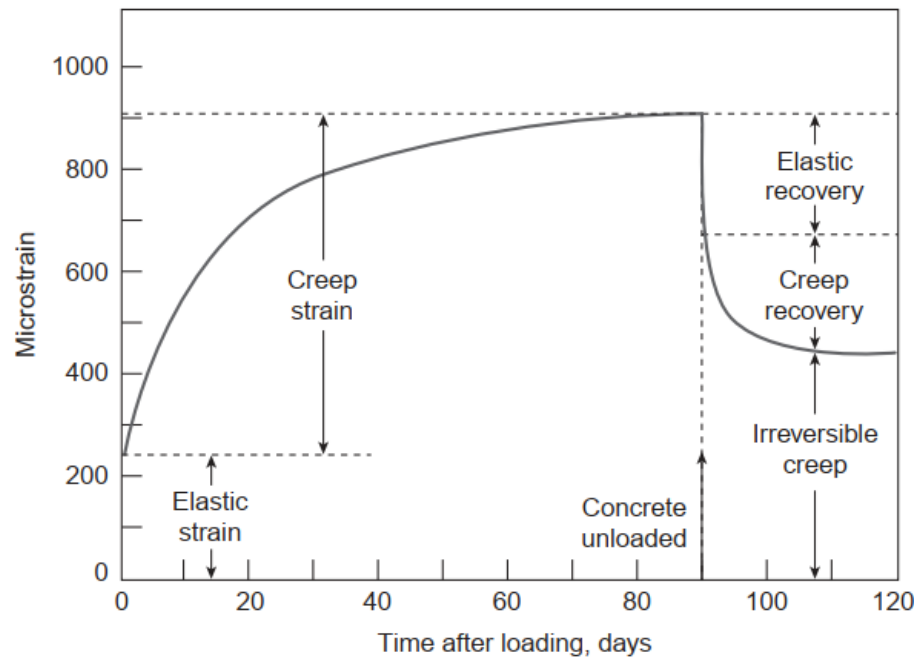
c. Fluência

Uma outra variação volumétrica importante em elementos de concreto é a fluência, muitas vezes denominada deformação lenta e confundida com a retração. De fato, o comportamento é bastante parecido, mas provocado por mecanismos distintos.

A fluência ocorre também por perda de água, mas se trata da água fisicamente adsorvida ao C-S-H. Essa perda ocorre quando a pasta de cimento hidratada fica submetida à pressão por algum tempo. Dependendo da idade, da resistência do concreto quando colocado em carga, umidade relativa do ar e de outros fatores, a redução de volume pode ser maior ou menor (Mehta e Monteiro, 2008).

Enquanto a retração por secagem é provocada pela perda de água para o ambiente, por diferença na umidade relativa, a perda de água por fluência é provocada por tensão. Assim como a retração por secagem, há uma parcela da deformação por fluência que é irreversível (Figura 7).

Figura 7 - Reversibilidade da fluência



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Tanto a retração quanto a fluência são mecanismos inevitáveis, mas que podem ser minimizados com cuidados adequados. Em pontes e viadutos, estruturas geralmente com grandes vãos, as deformações por retração e fluência atingem valores absolutos mais elevados, facilitando sua visualização, como no caso mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Deformação no tabuleiro da ponte sobre o Rio Uruguai (BR-158/RS)



Fonte: Autor.

Outras variações volumétricas, como a provocada pela aplicação de cargas e pela variação de temperatura, embora tenham influência no comportamento da estrutura e no possível surgimento de manifestações patológicas, ocorrem sob regras já bem conhecidas e não serão abordadas neste material.

4. REFERÊNCIAS

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**, Volume 1, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 332p.