

3

PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Neste capítulo será realizada uma análise das propriedades mecânicas que estão sendo estudadas ao longo deste trabalho. Como será contemplado adiante, para determinação destas propriedades, ainda há necessidade de dados experimentais, obtidos através de dosagens com materiais nacionais, como é o caso do módulo de elasticidade e resistência à tração.

Segundo Gomes, Shehata e Almeida[20], tem-se conhecimento de que algumas das fórmulas empíricas geralmente utilizadas nem sempre fornecem valores adequados ao CAD, e mesmo assim, acabam sendo adotadas como parâmetros para projetos estruturais.

Os dados experimentais obtidos podem ser utilizados para verificar a validade das fórmulas propostas na literatura.

3.1

Resistência à compressão

De uma forma geral, entende-se como resistência a capacidade de resistir à tensão sem ruptura. Cabe ressaltar que a resistência é a primeira propriedade especificada para projeto, sendo tal afirmação ilustrada com uma citação de Mehta e Monteiro[21].

“No projeto de estruturas de concreto, a resistência é a propriedade geralmente especificada. Isto porque comparada com a maioria das propriedades do concreto a resistência é relativamente fácil de ser ensaiada. Contudo, muitas propriedades do concreto como o módulo de elasticidade, estanqueidade, impermeabilidade e resistência às intempéries incluindo águas

agressivas, são diretamente relacionadas com a resistência e podem, portanto, ser deduzidas dos dados da resistência.”

Exemplificando a importância dos valores de resistência à compressão, Aïtcin[3] classifica os concretos de alto desempenho pelos seus devidos valores conforme tabela 3.1.

Tabela 3-1 - Classes diferentes de Concreto de Alto Desempenho

Classe do Concreto	Resistência à Compressão (MPa)
Classe I	50 – 75 MPa
Classe II	75 – 100 MPa
Classe III	100 – 125 MPa
Classe IV	125 – 150 MPa
Classe V	Maior que 150 MPa

Para considerações de parâmetros de resistência à compressão, deve-se diferenciar as diversas nomenclaturas existentes na literatura, que ao longo deste trabalho serão tratadas conforme as designações dos locais de origem. Assim sendo, será adotado:

- $f_c = f'_{cr}$ = média dos valores das resistências dos corpos de prova

ensaiados;

- $f_{ck} = f_c - 1.645 \sigma$, relação recomendada pela norma brasileira;
- $f'_c = f'_{cr} - 1.34 \sigma$, relação recomendada pelo ACI 363 [15], onde:

σ = desvio padrão em MPa;

f'_c = valor da resistência característica à compressão segundo a norma do

ACI;

f_{ck} = valor da resistência característica à compressão, segundo a norma brasileira.

A resistência inicial à compressão do CAD pode demorar mais a desenvolver-se do que nos concretos convencionais devido ao tempo de início da reação de hidratação do cimento, que é um pouco mais demorada devido ao uso de superplastificantes. Como acontece em alguns casos, até mesmo a associação de plastificantes e retardadores, para viabilizar todo o processo de elaboração, transporte e lançamento contribui para que tal tempo se estenda. No entanto, a partir do momento em que se inicia a hidratação do cimento, a reação desenvolve-se rapidamente, sendo que resistências de 30 MPa podem ser obtidas em até 24 horas, se os traços forem elaborados de forma satisfatória. A obtenção de resistências maiores nas primeiras horas torna-se muito difícil devido à perda rápida de abatimento.

Para obtenção de dados comparativos, a data de 28 dias para que testemunhos sejam ensaiados, seguindo um consenso de alguns autores, citando-se Aïtcin[3], Mindess[2], dentre outros. Para tanto, devem ser bem observadas as condições de cura, com sua devida influência nos testemunhos a serem ensaiados. Corpos de prova submetidos a tempo demasiado de cura de imersão em tanques com água, podem ter a penetração e/ou difusão de certa quantidade de líquido em seu interior, que propiciem uma hidratação adicional, gerando um aumento de resistência à compressão nas regiões afetadas.

Em contra partida, corpos de prova curados ao meio ambiente podem apresentar decréscimo de resistência, principalmente aqueles com sílica ativa, devido a secagem da camada externa que resulta em um gradiente de tensões que pode afetar os valores da resistência. Esta perda é relatada na literatura como “regressão de resistência”.

Mesmo assim, deve ser observado que esta regressão de resistência pode ser relevante para um pequeno corpo de prova de 100x200 mm e não significativa para um pilar com seção transversal convencional.

Os fatores que afetam a resistência à compressão são :

- Características e proporção dos materiais

- Fator água/cimento

Abrams enunciou, no início do século XX, a agora conhecida como Lei de Abrams, relacionando a resistência à compressão ao fator água/cimento. Desta forma, para o CAD também funciona a relação de que quanto menor o fator água/material cimentante, maior a resistência. No entanto, valem as observações de que, ao se passar de 60 MPa, fica mais difícil estabelecer uma relação precisa e que a relação água/aglomerante só vale até o ponto onde o agregado tenha resistência superior à matriz. A partir deste ponto, deve-se voltar a atenção para o agregado.

- Ar Incorporado

Dependendo da quantidade de ar incorporado à mistura, poderá obter-se um aumento ou diminuição da resistência. Em geral, o CAD sempre tem uma certa quantidade de ar aprisionado, em torno de 0.5% a 2.5%, ou pode-se incorporar algum. O ASTM C606[22] prevê a necessidade de incorporar-se ar ao CAD para melhor desempenho a situações de congelamento e degelo. No entanto, experiências comprovam que taxas de 4% a 6% de ar incorporado enfraquecem o concreto. Segundo Lessard et al [23], uma diferença de 1% no teor de ar incorporado resulta em uma perda de 4% a 5% na resistência à compressão.

- Tipo de cimento

Conforme o tipo de cimento adotado, há influência significativa na resistência, principalmente nas primeiras idades.

- Agregados

A resistência, o tamanho e a forma dos agregados devem ser compatíveis com a matriz, sendo fundamental, no caso de CAD, que estes fatores sejam bem avaliados, evitando-se os efeitos indesejáveis de problemas na interface matriz - agregado.

- Água de amassamento e aditivos

O excesso de impurezas na água pode provocar problemas na resistência, assim como o uso inadequado de aditivos.

• Condições de Cura

Entende-se pelo termo cura, como um conjunto de procedimentos que visa promover a hidratação do cimento, com controle do tempo, temperatura e condições de umidade, após o lançamento do concreto. Desta forma, percebe-se a influência do

processo de cura adequado na resistência, evitando-se efeitos de retração por secagem com aumento excessivo da temperatura.

Há uma grande importância do controle da temperatura nas primeiras 24 a 48 horas após o lançamento, para evitar tais efeitos. No entanto, cabe ressaltar que a elevação da temperatura não é função do teor de cimento, o que poderia levar a uma consideração errônea do problema, mas, sim, da quantidade de cimento que está sendo hidratada. Como no caso do CAD, o fator água/aglomerante é muito baixo, a falta de água torna um fator limitante na quantidade de cimento que é hidratada.

De uma forma geral, sugere-se que corpos de prova para trabalhos científicos sejam mantidos sob cura em tanques com água. No entanto, cabe ressaltar a influência que tal imersão pode representar em um corpo de prova de 10 cm x 20 cm.

Agostini [24] realizou ensaios com 72 corpos de prova com diferentes proporções de sílica e teores de superplastificante, submetidos a situações distintas de cura, considerando diferentes tempos de imersão e cura ao meio ambiente e recobrimento com lonas de PVC e plásticas. Deste estudo concluiu-se primordialmente que: a cura ao meio ambiente para corpos de prova com um teor de sílica até 10% da composição cimentícia teve bom desempenho, ou seja, maior resistência à compressão, em comparação com as curas úmidas; para corpos de prova com quantidades superiores a 10% de micro sílica em sua composição cimentícia, a selagem com lonas plásticas ou de PVC teve melhor resultado do que a cura com imersão em água, principalmente para idades mais avançadas.

- Parâmetros de Ensaio

Nos procedimentos de ensaio de resistência à compressão, os parâmetros essenciais para determinação da resistência do concreto são: as dimensões do corpo de prova, idade do corpo de prova e modalidade de aplicação de carga, isto é, se a taxa de carregamento é constante ou trata-se de um carregamento cíclico. No Brasil, os métodos de ensaio definidos pela ABNT para realização de tais testes estão regulamentados através da NBR 5738[25] e NBR 5739[26].

Os resultados de um estudo de resistência de uma determinada peça são plotados de forma a oferecer uma visualização gráfica através de diagrama tensão x deformação, que nos indica claramente a evolução das deformações à medida que

incrementos de carga são introduzidos. A figura 3.1 ilustra a curva tensão x deformação para diferentes valores de resistências. Ao longo dos anos, várias expressões foram propostas para representar estas curvas. No entanto, a dificuldade em encontrar uma equação adequada reflete o problema de se obter uma expressão única, que consiga relacionar não só as propriedades do concreto de alto desempenho, mas também ajustá-las aos parâmetros experimentais.

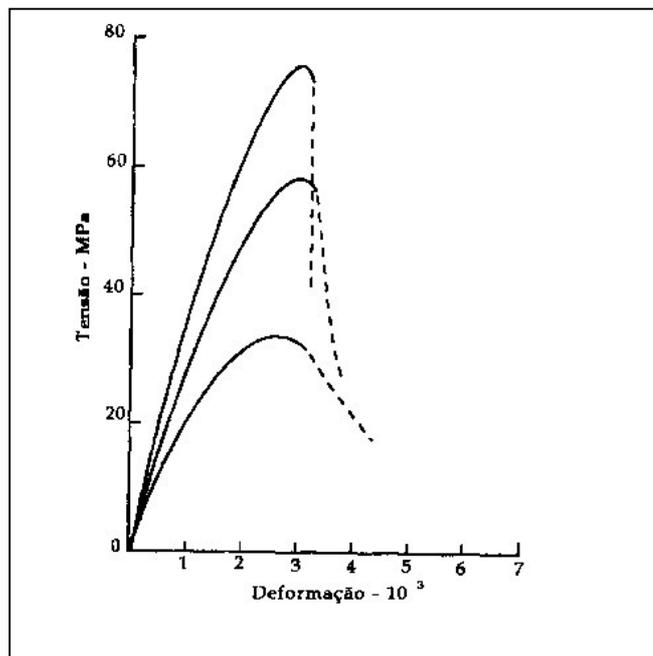


Figura 3.1- Curvas de tensão x deformação para diversas resistências.
Fonte: Dissertação Marcelo Luiz Oliveira Silva.

Com uma rápida análise das curvas acima, percebe-se que o ramo ascendente não é sempre linear e depende de vários fatores como: interface matriz/ agregado, composição da matriz, natureza do agregado e velocidade de deformação, dentre outros. A deformação correspondente a tensão máxima no CAD (aproximadamente 3‰) é maior que nos concretos convencionais (cerca de 2‰), enquanto a deformação correspondente à ruptura é bem menor no CAD do que no concreto

convencional. Com base nesta observação, constata-se um comportamento aparentemente frágil do CAD.

3.2 Resistência à tração

Apesar de aparentemente desprezada pelos projetistas, a resistência à tração é uma propriedade do concreto de suma importância no que diz respeito ao controle de fissuração e na resistência ao cisalhamento, ancoragem de armaduras, dentre outros.

Sem dúvida alguma, ainda há uma falta de dados que traduzam o comportamento de peças em concreto de alto desempenho quando submetidas a esforços de tração, daí a freqüente utilização de resultados obtidos através de fórmulas empíricas, baseadas em resultados de resistência à compressão. De acordo com alguns trabalhos publicados, como é o caso dos resultados apresentados por W.H. Price[27], que relatam que a resistência à tração é cerca de 10% a 11% para concreto com baixas resistências, 8% a 9% para concretos com média resistência e em torno de 7% para concretos com alta resistência.

Para determinação da resistência à tração, existem 3 tipos distintos de ensaios regulamentados, a saber:

- Resistência à tração direta: Trata-se de um ensaio de difícil execução por problemas de fixação do corpo de prova ao equipamento, que ao aplicar-se a carga são introduzidas tensões secundárias indesejadas nesta região.

- Resistência à tração indireta ou compressão diametral: Nesta modalidade de ensaio, desenvolvida pelo Prof. Lobo Carneiro os cilindros dos corpos de prova devem seguir a recomendação de que a altura deve ser igual a duas vezes o diâmetro, sendo submetidos a cargas de compressão ao longo de suas linhas axiais diametralmente opostas. A carga é aplicada continuamente, a uma velocidade constante. Este procedimento está regulamentado pela norma brasileira NBR-7222[28].

- Resistência à tração na flexão: Neste procedimento de ensaio, uma pequena viga de concreto com seção de 15 cm x 15 cm, tendo um vão de 50 cm é submetida a uma carga em cada terço do vão com taxa de aplicação de carga de 0,8 a 1,2 MPa/min. No Brasil, a norma que regulamenta este procedimento de ensaio é a NBR 12142[29].

Os resultados obtidos de ensaios por tração indireta e tração na flexão superam a resistência à tração direta na ordem de 13% e 10%, respectivamente.

Neste estudo, todos os corpos de prova serão submetidos ao ensaio de tração indireta, ou seja, compressão diametral, por acreditar-se ser este o método de maior aplicabilidade para referências futuras em estudos de CAD.

A ASTM C78 também prevê a obtenção de resistência à tração por via indireta, denominada módulo de ruptura (MOR), com elaboração de corpos de prova de forma cúbica de 150 x 150 x 150 mm.

Para o concreto convencional não é muito difícil determinar a relação entre os valores para MOR e compressão diametral. Entretanto, para o caso do CAD, fica difícil relacionar estes valores, não só pelo tipo de solicitação, que, no primeiro caso, apresenta uma superfície de ruptura na interface argamassa/ agregado graúdo em contrapartida a um esmagamento do agregado graúdo do segundo caso, mas também pelas variações referentes às diferentes composições cimentícias.

O CEB-FIP/90[30], apresenta as seguintes fórmulas através das quais, estão relacionadas a resistência à tração mínima, média e máxima.

$$f_{ctk,\min} = 0,95 \left(\frac{f_{ck}}{f_{ck0}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad f_{ctk,\max} = 1,85 \left(\frac{f_{ck}}{f_{ck0}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad f_{ctm} = 1,40 \left(\frac{f_{ck}}{f_{ck0}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

onde:

f_{ctm} = valor médio da resistência à tração;

$f_{ctk,\min}$ = valor mínimo da resistência à tração;

$f_{ctk,\max}$ = valor máximo da resistência à tração

f_{ck0} = 10 MPa.

No entanto, cabe a consideração de que a aplicação de tais fórmulas a concretos com resistências à compressão acima de 60 MPa ainda é fator de estudo.

Assim sendo, diversos pesquisadores e algumas normas internacionais sugeriram diferentes expressões para a resistência à tração por compressão diametral, usualmente representada na literatura como f_{sp} , relacionando seu valor com f'_c , conforme apresentado na tabela 3, cada qual aplicada a determinadas faixas de abrangência, sendo todos os valores expressos em MPa.

Tabela 3.2 - Relações entre resistências à compressão e compressão diametral

Relação entre f_{sp} e f'_c (MPa)	Autor	Limitação
$f_{sp} = 0.335 f'_c{}^{2/3}$	CEB/90[32]	Sem limitação
$f_{sp} = 0.54 f'_c{}^{1/2}$	Carrasquillo et al[33]	21 < f'_c < 83 MPa
$f_{sp} = 0.56 f'_c{}^{1/2}$	ACI 318[34]	$f'_c < 57$ MPa
$f_{sp} = 0.59 f'_c{}^{0.55}$	Gomes[35]	Sem limitação
$f_{sp} = 0.462 f'_c{}^{0.55}$	Ahmad e Shah[2]	$f'_c < 84$ MPa
$f_{sp} = 0.61 f'_c{}^{0.5}$	Tachibana et al[36]	Sem limitação

De acordo com a norma brasileira NBR 6118[31], que não contempla concretos de alto desempenho, a fórmula estimativa da resistência à tração para concretos até 18 MPa é :

$$f_{tk} = 0.06f_{ck} + 0.7 \text{ , em MPa}$$

onde:

f_{tk} = resistência característica à tração

f_{ck} = resistência característica à compressão

O novo projeto de norma da NBR 6118, sugere uma relação para resistência à tração, a partir da resistência à compressão de parâmetros idênticos à relação proposta pelo CEB-FIP/90[37], transcrita de forma diferente.

3.3 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade ou de deformação constitui uma das propriedades mais importantes, devido à necessidade da determinação das deformações dos elementos estruturais existentes nos projetos. Tal conhecimento só é possível devido à avaliação da rigidez, traduzida através do módulo de deformação.

Analogamente ao que acontece para obtenção de valores de resistência à tração, são usadas fórmulas de abrangência limitada para obtenção de valores que representem o módulo de elasticidade. Atualmente, ainda é extremamente difícil a determinação de um valor para o módulo de elasticidade. Segundo Aïtcin [3], o que o concreto de alto desempenho ganhou em qualidade, perdeu em simplicidade para determinação do valor desta propriedade que, dependendo do tipo de obra e do volume de concreto utilizado, caberia um estudo específico para a situação, avaliando-se o real módulo de elasticidade, com todos os materiais a serem utilizados. Desta forma, acredita-se poder otimizar o projeto em termos de modelo estrutural adotado e, conseqüentemente, custo para execução e futura manutenção.

A princípio, sabe-se que o diagrama tensão x deformação do concreto apresenta um comportamento não linear, devido a uma fissuração progressiva e de outros diversos fatores, dentre eles, os principais citados são exsudação, resistência da zona de transição e procedimentos de cura.

Mesmo assim, é necessária uma estimativa do módulo de deformação do material para que seja viabilizado o conhecimento de tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais para calcular as tensões, momentos e deformações em elementos estruturais.

O estudo desta propriedade foi abordado na literatura sob dois aspectos : uma abordagem teórica e outra empírica.

A abordagem teórica visa estabelecer modelos que representem o comportamento do concreto. Os modelos mais simples foram apresentados por Illston et al[38], que são aqueles de duas fases: uma da pasta da argamassa de cimento hidratado e outra do agregado. Assim, em uma das modalidades, supõe-se que os

constituintes suportem a mesma deformação (Modelo de Voigt) ou que desenvolvam a mesma tensão (Modelo de Reuss), com módulos de elasticidade distintos para a pasta de cimento e agregado graúdo e volumes relativos também distintos.

Apesar de toda a complexidade dos modelos desenvolvidos, a dificuldade permanece em prever um valor preciso do módulo de elasticidade devido às hipóteses vinculadas a estes de que : a carga aplicada permanece uniaxial e de compressão em todo o modelo; é ignorado o efeito da descontinuidade transversal das diversas camadas que constituem o material; nenhuma ruptura ou esmagamento local das ligações afeta a deformação.

Baalbaki[39], propôs um modelo com um maior êxito, tendo uma comprovação experimental com erro de 5%, onde se considera a pasta de cimento hidratada, contemplando ou não a utilização de sílica ativa e agregados.

Desta forma, considerando a diversidade dos estudos já existentes, a grande importância de verificar-se a abordagem teórica do módulo de deformação é a real compreensão dos principais fatores que o afetam, relacionados abaixo:

- Agregado graúdo – Sua forma, tamanho e porosidade devido à natureza da rocha-mãe. Sabe-se que agregados densos (pouco porosos) têm alto módulo de elasticidade;
- Porosidade – Quanto menor a porosidade, maior será o módulo de deformação do concreto, ou seja, maior será a capacidade de restringir deformações. Neste ponto, cabe esclarecer que a porosidade do material é controlada por um conjunto de condições de influência direta, sendo eles: fator água/cimento, aditivos minerais, grau de hidratação da pasta de cimento, índice de vazios, micro fissuras e cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição da matriz.

A abordagem empírica visa relacionar o módulo de deformação à resistência à compressão. No entanto, este tipo de consideração deve ser cautelosa devido à tendência em assimilar que os mesmos parâmetros influenciem tanto uma como outra propriedade. Para o concreto usual, tal pode ser assumida como uma realidade devido à porosidade da pasta que transforma o agregado no elo mais resistente do concreto. Para o CAD, tal situação deve ser abordada com maior atenção as suas particularidades.

Como o módulo de deformação representa a declividade da curva tensão x deformação, e sabendo-se que a tal curva para o concreto apresenta um comportamento não linear, existem diferentes métodos para consideração de seu valor.

De uma forma geral, distinguem-se três tipos diferentes de módulos de deformação, a saber:

- *Módulo de deformação tangente inicial estático e instantâneo*: trata-se da declividade da reta, tangente à curva na origem (inicial), conforme ilustrado esquematicamente na figura 3.2 pela reta OT. Este valor pode ser obtido através de métodos de ensaio já determinados conforme NBR 8522[40] (Determinação do Módulo de Deformação Estático e Diagrama Tensão Deformação), ISO 6784 (Concrete – Determination of Static Modulos of Elasticityin Compression), ou ainda Mercosul 05:03-0124/1997;

- *Módulo de deformação secante estático*: declividade da corda traçada da origem até um ponto da curva, que em geral, correspondente a 40% de f_c , , ilustrada na curva esquematicamente através da reta OS na figura 3.2. Este valor de módulo de elasticidade é de grande importância pois trata-se da tensão de serviço normalmente recomendada nos códigos e normas de projeto. O carregamento previsto para sua determinação, segundo a NBR 8522[40] é do tipo III, que será melhor detalhado posteriormente nos procedimentos de ensaio;

- *Módulo de deformação corda*: declividade da reta entre dois pontos da curva, representado pela reta genérica OM, que representam uma tensão ou uma deformação específica. É pouco utilizado para projeto.

Observando a figura 3.2, percebe-se a haverá um espectro de variação entre os valores dos módulos tangente inicial e secante. O trecho inicial da curva tensão x deformação, até tensões de cerca de 40% da de ruptura apresenta um comportamento aproximadamente linear. O módulo tangente inicial por ser considerado até 30% da carga de ruptura representará sempre um valor maior que o módulo secante, que é considerado até 40% da carga de ruptura. Para utilização em projeto estrutural, recomenda-se o uso do módulo secante, que aumenta as deformações, tendendo a favorecer a segurança. De uma forma geral, estima-se o valor do módulo secante

como sendo 90% do tangente. O novo projeto da NBR 6118 sugere que o módulo secante seja adotado como igual a 85% do módulo tangente.

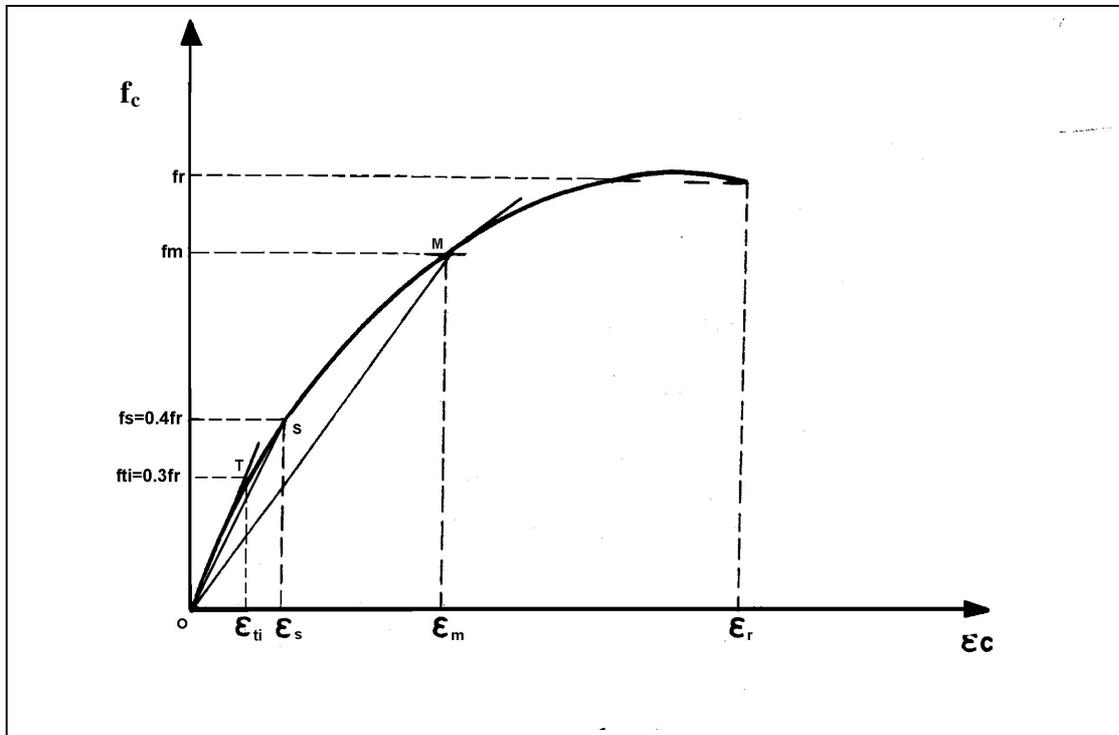


Figura 3.2 – Gráfico tensão x deformação com os módulos tangente inicial, secante e corda.

Outros módulos de deformação, para determinação sob condições específicas de solitação, são os sob efeitos dinâmico, de carga de longa duração, e de impacto.

Cabe ainda citar que a ABCP[1] (Associação Brasileira de Cimento Portland) recomenda a obtenção de Módulos de Deformação segundo “Estudo da Variação do Módulo de Elasticidade do Concreto com a Variação de Composição e Características do Concreto Fresco e Endurecido”[41], estudo de Paulo Helene, elaborado para o CB-18 (Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados). Neste estudo, relaciona-se o tipo de agregado, consistência do concreto fresco e ainda sua resistência à compressão através da fórmula:

$$E_{ci} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot 21,5 \cdot \left[\frac{(f_{ck} + 8)}{10} \right]^{\frac{1}{3}}, \text{ em MPa}$$

onde:

α_1 e α_2 = índices relacionados à natureza do agregado e consistência do concreto fresco apresentados conforme tabela 3.3;

f_{ck} = resistência à compressão, expressa em MPa.

Tabela 3.3 - Valores para α_1 e α_2

Natureza do Agregado	α_1	Consistência Concreto Fresco	α_2
Basalto e diabásio	1.1	Fluída	0.9
Granito e Gnaise	1.0	Plástica	1.0
Cálcereo, arenito e metasedimento	0.9	Seca	1.1

Baseados em experiências diversas, Aïtcin[3] sugere uma relação da forma genérica:

$$E_c = \Psi (f_c^{1/n}),$$

onde Ψ e n representam um fator genérico, variando conforme a origem do código que o prescreve.

A seguir, serão ainda relacionadas, na tabela 3.4, algumas fórmulas pertinentes à obtenção de valores para o módulo de elasticidade, baseadas em experiências de pesquisadores oriundos de diversas nacionalidades.

No entanto, cabe ressaltar que as fórmulas previstas pelo CEB 1995 e MC 90, prevêem a utilização de agregado à base de quartzo. Para outros tipos de agregado, E_c deve ser multiplicado por um fator que depende da sua natureza podendo ser 1.2, 0.9, 0.7 para basalto, calcário ou arenito respectivamente.

No Brasil, a NBR 8522[40] regulamenta os ensaios para obtenção de módulo de deformação.

Tabela 3.4 – Relações encontradas na literatura entre E_c e f'_c

Relação entre E_c e f'_c (MPa)	Autor	Limitação
$E_{c28} = 4250(f'_c)^{1/2}$	Shehata et al[42]	Módulo Secante
$E_c = 3320f'_c^{1/2} + 6900$	Carrasquillo et al e comissão ACI 363[33]	21MPa < f'_c < 83MPa Módulo Secante
$E_c = 4730 f'_c^{1/2}$	ACI 318[34]	$f'_c < 57$ MPa Módulo Secante
$E_c = 6600 f'_c^{0.50}$	NBR 6118-78[31]	Módulo Tangente
$E_c = 10000 f'_c^{0.33}$	CEB- MC 90[32]	$f'_c < 80$ MPa Módulo Tangente

Neste estudo serão determinados, experimentalmente, valores de diferentes módulos de deformação. Estes resultados serão comparados com aqueles obtidos nas relações das instruções normativas disponíveis.

3.4 Permeabilidade

Nas estruturas de concreto armado, é de fundamental importância o estudo dos mecanismos de transporte de fluidos em seu interior. Desta forma, pode-se avaliar da melhor forma as condições de durabilidade às quais elas estarão submetidas, uma vez que segundo o ACI 201[43] “*durabilidade do concreto é definida como sua capacidade de resistir a ações das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração*” .

O CEB/90[32] define a existência de quatro mecanismos de transporte de líquidos, gases ou íons através do concreto: a permeabilidade, a difusividade, a

absorção capilar e o quarto mecanismo pode ser oriundo da combinação de um ou mais dos três primeiros citados.

Sabe-se que um concreto durável é aquele que conserva, ao longo do tempo, sua forma original, qualidade e capacidade portante. No entanto, obviamente nenhum material é inerentemente durável face às interações ambientais que têm efeito sobre a microestrutura e que podem modificar as suas propriedades ao longo do tempo.

Desta forma, o fim da vida útil ocorre no momento em que as propriedades deterioram-se de tal forma que inviabilizam a continuação do uso do material, quer por razões econômicas, quer por razões de segurança. Atualmente, segundo dados de estudos em recuperações ou substituições de estruturas, há um constante crescimento nos custos de manutenção. Países desenvolvidos gastam 40% dos recursos de construção em recuperação de estruturas. Segundo trabalho recente de Paulo Monteiro[8] só nos EUA, os dados do Departamento de Transportes indicam que os custos para recuperar e reabilitar redes viárias em estruturas de concreto subiram de U\$ 90.9 bilhões em 1991, para U\$ 212 bilhões, em 1997.

Assim sendo, ao estudar-se a permeabilidade e seus fatores relevantes, acredita-se estar acrescentando dados para que possa ser feita uma estimativa de maior relevância na determinação da vida útil do concreto, pois a água é um agente primário, tanto para sua criação, quanto para sua destruição.

No que se relaciona a sólidos porosos como o concreto, a água tem papel de destaque como agente de deterioração não só devido aos inúmeros processos físicos de degradação, como, também, pela possibilidade de tornar-se um veículo de transporte de íons agressivos, que geram também processos químicos de deterioração. Sabe-se que o concreto é um material básico, composto por alcalinos de cálcio, daí a clara tendência de águas ácidas serem prejudiciais ao concreto.

O comportamento da água como tal agente de deterioração é de fácil compreensão após uma simples revisão de suas características básicas. A água é um material com moléculas pequenas, capazes de penetrar em cavidades e em poros muito pequenos. A estrutura da formação de sua molécula é através de uma ligação covalente e apresenta uma das maiores temperaturas de ebulição entre os líquidos comuns. Por fim, cabe ainda citar que trata-se de um grande solvente, sendo sempre

possível a existência de íons e gases dissolvidos em seu interior, possibilitando que a composição química do concreto seja afetada.

O papel da água no concreto é de fundamental importância, pois trata-se do ingrediente necessário às reações de hidratação e como um agente que dá plasticidade aos componentes. Dependendo das condições e da espessura das peças, toda a água capilar e absorvida será perdida, deixando-se os poros vazios. A água evaporável também é passível de congelamento e é livre para movimentos internos, daí afirmar-se que o concreto não fica vulnerável a fenômenos destrutivos relacionados à água, se sua quantidade for pequena na mistura e não houver ressaturação dos poros. Neste ponto específico ressalta-se a utilização de baixo fator água/cimento nas misturas de concreto de alto desempenho como um fator que beneficia as condições de durabilidade do concreto.

É extremamente difícil determinar no concreto uma propriedade de transporte de fluido devido a mudanças imprevisíveis na estrutura dos poros, isto é, o material muda continuamente devido a sucessivos ciclos de estreitamento e alargamento de poros e micro fissuras, a partir das interações físico-químicas entre o fluido que penetra e os materiais da pasta de cimento.

De uma forma geral, define-se *permeabilidade* como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido ao escoar através de um sólido.

Define-se como *Coefficiente de Permeabilidade (k)* a taxa de fluxo viscoso através da estrutura de poros de um determinado meio.

Para uma taxa de fluxo contínuo, esta percolação em um meio sólido é regida pela Lei de Darcy, que é expressa na forma abaixo:

$$\frac{dq}{dt} = k \cdot \frac{\Delta H \cdot A}{L \cdot \mu} ,$$

onde:

$\frac{dq}{dt}$ = taxa de fluxo do fluido ;

k = coeficiente de permeabilidade;

ΔH = gradiente de pressão;

A = área de superfície;

L = espessura do sólido;

μ = viscosidade do fluido

O CEB –FIP[32] apresenta também uma relação que estima a permeabilidade através da resistência apresentada a seguir:

$$\log\left(\frac{k_w}{k_{w0}}\right) = -0.7 \frac{f_{ck}}{f_{ck0}},$$

onde:

k_w = coeficiente de permeabilidade à água (m/s);

f_{ck} = resistência característica;

$k_{w0} = 10^{-10}$ m/s;

$f_{ck0} = 10$ MPa

Define-se como *Difusividade* a taxa de difusão de líquidos, gases e íons através dos poros. O CEB- FIP[32] ainda define diversas relações de difusividade que são regidas pela primeira Lei de Fick. Toda a formulação apresentada é desmembrada para os diversos tipos de difusividade previstos, quer sejam a gás, a líquido ou a íons.

Define-se a *absorção capilar*, particularmente a da água, como uma relação também dependente da resistência, através da fórmula:

$$\log\left(\frac{M_w}{M_{w0}}\right) = -0.2 \frac{f_{ck}}{f_{ck0}},$$

onde:

M_w = coeficiente de absorção de água (m/s);

f_{ck} = resistência característica;

$M_{w0} = 10^{-4}$ m/s;

$f_{ck0} = 10$ MPa

Na verdade, todos estes mecanismos de transferência, assim como as outras propriedades, também apresentam uma dependência de seus materiais constituintes, incluindo a composição cimentícia da mistura, tamanho e porosidade do agregado.

Neste estudo é objetivada basicamente uma relação entre estes mecanismos de transporte, em particular a permeabilidade, através da sua porosidade, com a variação da sua resistência.

Dependendo da composição cimentícia adotada, com substituição de parte do cimento por um ou mais elementos, encontram-se diferentes resultados quanto à permeabilidade. Exemplifica-se esta relação, segundo Khan e Lynsdale[43], para um estudo de sistemas binários e ternários de composições cimentícias, com diferentes proporções de cimento, sílica ativa e cinzas volantes, para um fator água /cimento de 0.27 e utilizando-se um permeômetro a gás. Importantes pontos foram observados, dentre os quais destacam-se:

- Para a faixa de substituição de 10% de material cimentício por sílica, reduz-se significativamente a permeabilidade, para qualquer nível de adição de cinzas volantes, e ainda para esta substituição entre 8% a 12%, obtêm-se valores ótimos para resistência à compressão e permeabilidade simultaneamente;
- A incorporação de cinzas volantes à composição cimentícia induz a uma redução desprezível de permeabilidade, em comparação à redução observada com a utilização de sílica fume;

Apesar de não haver uma determinação normativa específica de qual seria a melhor forma de medir a permeabilidade no concreto, diversos modelos de permeômetros são encontrados na literatura. As figuras 3.3 e 3.4 ilustram modelos mais simples de permeômetros, podendo ser utilizados para medições em campo citados por Paulmann e Molin[44]: o ISAT (Initial Surface Absorption Test) e o Figg Test.

Outros equipamentos mais sofisticados, com câmaras pressurizadas, também são utilizados para medição da permeabilidade conforme ilustra a figura 3.5. A norma brasileira NBR 10786 [45] - Concreto endurecido – Determinação do coeficiente da permeabilidade à água, prevê um equipamento com reservatório submetido a um sistema de pressurização de 3.5 MPa, forçando-se a água a percolar pelo corpo de prova.



Figura 3.3 – Fotografia do equipamento que constitui o ISAT teste.



Figura 3.4 – Fotografia do equipamento que constitui o In-situ teste.



Figura 3.5 – Fotografia de tipo de permeâmetro com capacidade para testar 3 amostras simultaneamente.

No entanto, é de extrema controvérsia a utilização destes equipamentos medindo-se a permeabilidade do CAD, pois o seu funcionamento, que é baseado na Lei de Darcy, não tem boa aplicabilidade ao concreto de alto desempenho.

Para melhor compreensão de tal situação, cabe um paralelo entre o concreto convencional e o concreto de alto desempenho em relação à sua estrutura capilar. O concreto convencional é uma estrutura muito porosa e com seus capilares interligados, permitindo que a água possa fluir. Desta forma, tem-se certeza de que à medida que o fator água/ cimento decresce, a permeabilidade também. Esta situação ocorre até um limite da relação água/cimento igual a 0,40.

Assim sendo, mesmo continuando a existir uma rede de poros, esta é de tamanha finura e as forças elétricas desenvolvidas dentro destes capilares são fortes o suficiente que fica difícil poder realizar uma avaliação, forçando a água a fluir através de procedimentos convencionais dos permeâmetros existentes, que, dependendo do equipamento, utilizam baixos gradientes de pressão.

Apesar desta dificuldade em realizar este tipo de teste, não se pode assumir que o concreto de alto desempenho seja impermeável. Mesmo que a água não consiga percolar pelo concreto, íons agressivos conseguem. Segundo Perraton et al[46], há casos comprovados onde não se consegue medir o fluxo de água por uma superfície de concreto, mas há diferentes graus de permeabilidade aos íons cloreto.

Face à dificuldade da medição desta propriedade, sugere-se, então que, para o caso particular do CAD, suas medições sejam feitas através de permeabilidade ao gás ou permeabilidade aos íons cloreto.

Segundo Aïtcin[3], a melhor forma de medir a permeabilidade para o CAD é através da medição de sua suscetibilidade aos íons cloreto. São indicadas duas metodologias de ensaio, sendo elas AASHTO T-277 – “Standart Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete”, ou sua equivalente ASTM C 1202 – “Test Method for Eletrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”.

Este ponto de vista é reforçado por Gjorv[47] quando ele expressa, em seu trabalho *Concrete Performance Criteria Based on Migration Testing*, que este tipo de ensaio demonstrou prover uma rápida e apropriada base, não só para avaliação da permeabilidade aos íons cloreto, como também uma boa avaliação da penetração de íons em geral e da permeabilidade do sistema.

Este ensaio é simples de ser executado, e não necessita de aparelhos onerosos, funciona muito bem para o concreto usual e pode ser bem relacionado à permeabilidade à água. As amostras são preparadas com dimensões de 95mm de diâmetro por 50mm de espessura e colocadas entre duas soluções com quantidades definidas de cloreto de sódio e hidróxido de sódio. O ensaio consiste em aplicar uma diferença de potencial de 60 Volts durante 6 horas e registrar a corrente que se desenvolve. A permeabilidade é expressa em Coulombs e relacionada através de um quadro comparativo desenvolvido por Whiting[48].

A medição de permeabilidade à água, para o CAD, é um estudo muito difícil, com equipamento sofisticado, tanto para execução do ensaio, quanto para aquisição de dados. Foram realizados estudos com concreto de misturas cujas resistências variaram de 29.60 MPa a 74.6 MPa, aos 28 dias, utilizando células pressurizadas

triaxiais, com base de aquisição de dados automatizada de medição de permeabilidade à água. Segundo El-Dieb e Hooton[49], este tipo de equipamento tornou possível a avaliação de graus de permeabilidade que variaram da ordem de 10^{-12} m/s a 10^{-16} m/s. No entanto, há de se considerar que tal estudo data de 1995, e que, depois de tal, ao longo da elaboração desta dissertação, não mais foram encontradas outras pesquisas validando o uso de tal equipamento, seja pela sua complexidade ou por ser oneroso em demasia.

Considerando as dificuldades aqui expostas para avaliação da permeabilidade, devido aos problemas de equipamentos disponíveis em laboratórios de pesquisa, e como temos conhecimento de que tal dificuldade se deve-se à esbelta estrutura de poros existente no CAD, ao longo desta dissertação, será elaborado um estudo sobre a porosidade das diversas amostras de CAD que foram utilizadas para determinação das outras propriedades. Através de tal estudo, poderá ser determinado o índice de vazios, que é sem dúvida um fator relevante para a permeabilidade.

A determinação da porosidade em conformidade com a instrução normativa vigente apresenta uma relação massa do corpo de prova seco em estufa, saturado e imerso em água.

Inicialmente, as terminologias adotadas podem provocar controvérsia com relação as grandezas físicas. Por isso, abaixo será feita uma pequena demonstração de como tal relação foi obtida através da relação entre volumes.

Para isso, inicialmente é definido como índice de vazios:

$$\text{Índice de vazios } (I_v) = \frac{V_0}{V_T}, \quad (i)$$

onde:

V_T = Volume total do corpo de prova;

V_0 = Volume de vazios do corpo de prova.

No entanto, sabe-se que :

$$V_T = V_0 + V_S \quad (ii)$$

onde:

V_S = Volume de sólido do corpo de prova

Substituindo-se (ii) em (i), teremos que:

$$I_v = \frac{V_0}{V_0 + V_S}$$

Multiplicando-se o numerador e o denominador pela expressão $g\tilde{\alpha}_A$, onde

g = aceleração da gravidade;

$\tilde{\alpha}_A$ = densidade da água, teremos que :

$$I_v = \frac{g\gamma_A V_0}{g\gamma_A V_0 + g\gamma_A V_S}$$

Se somarmos e subtraímos ao numerador e denominador o termo $g\tilde{\alpha}_C V_S$, onde $\tilde{\alpha}_C$ é a densidade do concreto teremos que:

$$I_v = \frac{g\gamma_C V_S + g\gamma_A V_0 - g\gamma_C V_S}{g\gamma_C V_S + g\gamma_A V_0 - (g\gamma_C V_S - g\gamma_A V_S)} \quad (iii)$$

Analisando os termos da expressão (iii), pode-se verificar que:

- $g\tilde{\alpha}_C V_T + g\tilde{\alpha}_A V_0 = g (\tilde{\alpha}_C V_T + \tilde{\alpha}_A V_0) = g M_{sat}$, correspondendo ao peso do corpo de prova saturado ou seja, aquele onde todos os vazios encontram-se preenchidos com água;
- $g\tilde{\alpha}_C V_S = g M_{seco}$, correspondendo ao peso do corpo de prova com os vazios totalmente secos;
- $g\tilde{\alpha}_C V_S - g\tilde{\alpha}_A V_S$, correspondendo a diferença entre o peso do corpo de prova e ao peso do volume de água deslocado por este corpo (ou seja, seu empuxo) quando totalmente imerso em água. Simplificando : $g (\tilde{\alpha}_C V_S - \tilde{\alpha}_A V_S) = g M_{im}$

Substituindo todas as expressões em (iii), teremos que:

$$I_v = \frac{gM_{sat} - gM_{seco}}{gM_{sat} - gM_{im}}$$

Simplificando a expressão, teremos a relação que é a proposta pela instrução normativa.

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_{seco}}{M_{sat} - M_{im}}$$