

4 ESTUDO EXPERIMENTAL

O estudo experimental foi dividido em fases distintas. Visando verificar a qualidade dos materiais empregados e metodologia de dosagem foi realizado um *ensaio piloto*. Após análise, foram dosados corpos de provas para resistências desejadas de 40 MPa, 60 MPa, 80 MPa, 100 MPa. A partir dos resultados desses corpos de prova, como será relatado, verificou-se a necessidade de estender-se o estudo a uma determinação mais precisa do ponto de saturação através de um estudo de compatibilidade entre aglomerante e superplastificante e de uma nova análise no critério de dosagem empregado.

Uma vez elaborados os corpos de prova, foram realizados os ensaios para estudar-se as suas propriedades mecânicas: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, assim como a propriedade física relacionada à durabilidade, que é o caso da porosidade.

A seguir, serão relatadas as diversas fases do estudo.

4.1 Método de Dosagem

O método de dosagem utilizado inicialmente, foi o proposto por Aïtcin[3], seguindo uma abordagem similar ao da norma ACI 211 [18], sendo este uma combinação de resultados empíricos e de cálculos matemáticos, baseado no método do volume absoluto. A incorporação de ar aos concretos elaborados a partir deste método pode ser realizada, desde que a redução em sua resistência seja previamente considerada.

O procedimento de dosagem está associado à elaboração de uma planilha, que prevê todas as etapas ao longo do processo. Inicialmente, a partir da resistência desejada, é obtido o fator água/material cimentante, através da curva da

figura 4.1. A partir daí, é determinada a quantidade de água para o ponto de saturação do superplastificante e sucessivamente o material cimentante, teor de agregado graúdo. O agregado miúdo é calculado pela diferença para completar 1m^3 de mistura, a partir dos outros materiais já calculados. Por fim, efetua-se a correção na quantidade total de água, abatendo-se a água existente no superplastificante e a água correspondente ao teor de umidade dos agregados que extrapolam a condição de agregado saturado com superfície seca. Tal condição para os agregados permite a confirmação de que a quantidade de água presente para uma mistura de CAD não será perdida sendo absorvida com os agregados ou não será acrescida devido à umidade previamente existente.

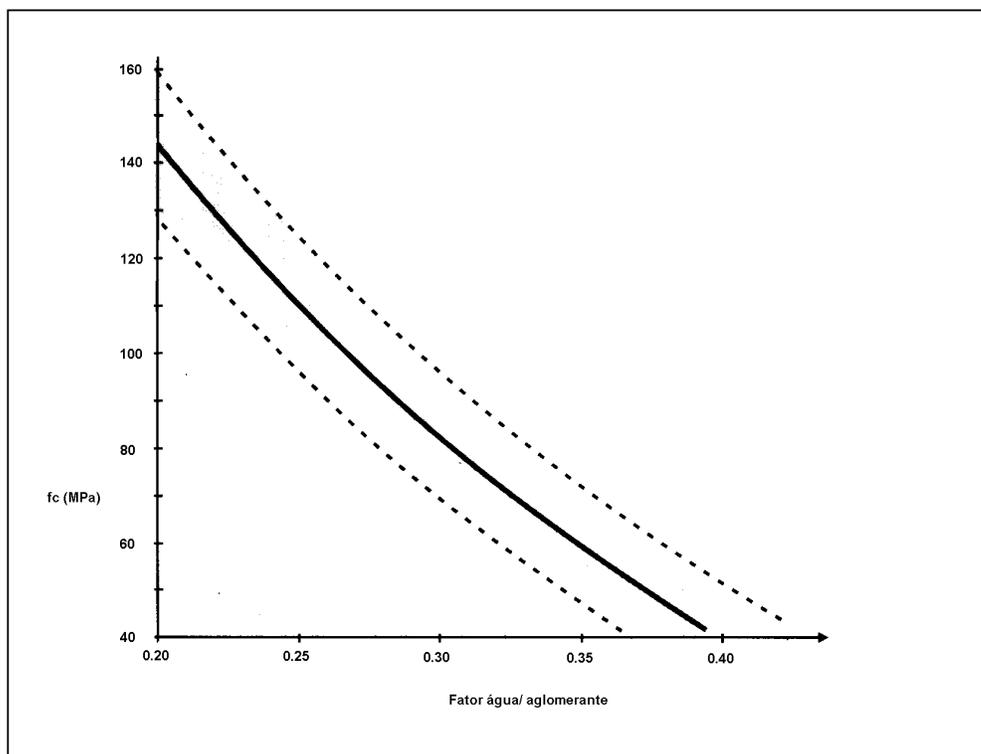


Figura 4.1 - Relações propostas entre o fator água/aglomerante e a resistência à compressão. Fonte: Aitcin[3]

Esta metodologia prevê ainda que para o caso onde o teor de saturação não está determinado, pode ser adotado um valor inicial de 1%. Da mesma forma, a determinação do agregado graúdo pode ser estimada para um valor inicial de 1000kg/m^3 , se sua forma não é conhecida.

As figuras 4.2 e 4.3 ilustram a determinação da quantidade total de água, assim como a determinação da quantidade de agregado graúdo respectivamente.

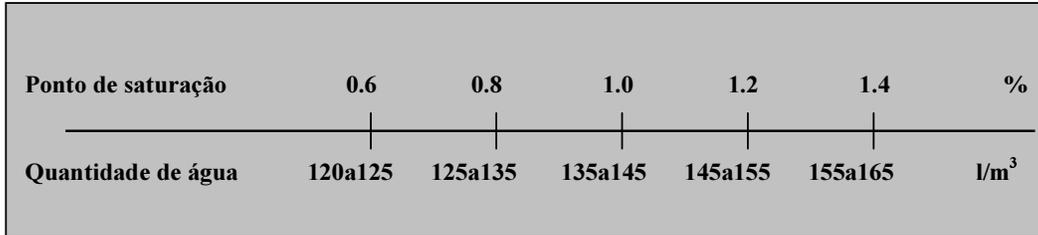


Figura 4.2 - Determinação da dosagem mínima de água. Fonte:Aïtcin

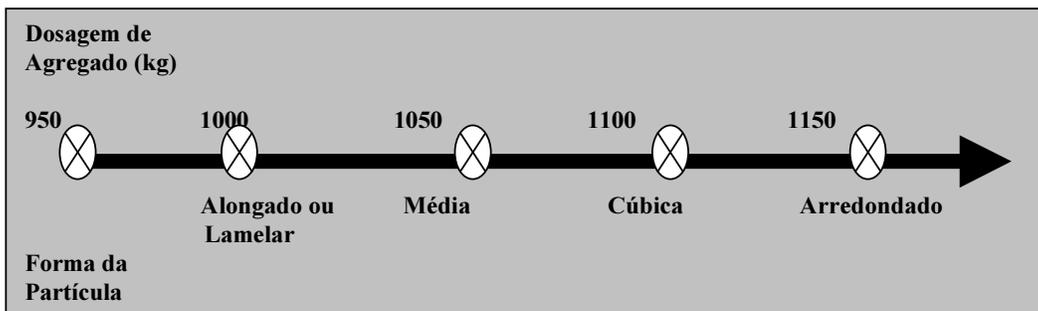


Figura 4.3 - Determinação do teor de agregado graúdo. Fonte : Aïtcin

4.2 Materiais Utilizados

A partir da escolha do método de dosagem, buscou-se adequar os materiais a serem utilizados na produção do CAD. Todos os materiais adotados ao longo de todo o estudo foram os disponíveis nas proximidades da cidade do Rio de Janeiro e amplamente utilizados na construção civil local.

A seguir, serão detalhadas as principais características dos materiais utilizados.

4.2.1 Cimento

O cimento utilizado na produção dos corpos de prova foi o cimento de alta resistência inicial, classificado segundo a norma brasileira como CPV. A escolha deste cimento deve-se, principalmente, por ser muito freqüente a sua aplicação em obras e pesquisas que envolvem o CAD. Foi utilizado o cimento Campeão de fabricação da *Lafarge do Brasil*.

As principais características do cimento utilizado regulamentadas pela EB-2/91, da ABNT são apresentadas nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Composição Química do CPV

Composição Química	Limites (% da massa)
Resíduo insolúvel	1.0
Perda ao fogo	4.5
Óxido de magnésio	6.5
Trióxido de enxofre	
• Quando C3A do clínquer <8%	3.5
• Quando C3A do clínquer >8%	4.5
Anídrido carbônico	3.0

Tabela 4.2 – Propriedades físicas e mecânicas do CPV

Características e Propriedades	Limites Superiores
Finura	
• Resíduo na peneira 75 μ m	6.0%
• Área específica	300 m ² /kg
Tempo de início de pega	1%
Expansibilidade a quente	5%
Resistência à compressão	
• 1 dia de idade	14%
• 3 dias de idade	24%
• 7 dias de idade	34%

4.2.2 Aditivo Químico

Ao longo do estudo experimental foram adotados dois tipos de aditivos. A base química dos dois aditivos era similar. No entanto, a utilização de uma marca de aditivo químico no ensaio piloto demonstrou resultados pouco satisfatórios, tanto pela consistência do concreto fresco, que apresentou-se completamente sem trabalhabilidade quanto pela resistência final à compressão obtida.

Desta forma, optou-se pela substituição do aditivo, procurando-se utilizar uma marca, cujo comportamento já era conhecido, evitando-se comprometer o objetivo das resistências almejadas por falta de confiabilidade no material.

Assim sendo, foi adotado o aditivo *Sikament 300* de fabricação da SIKA S/A. As principais características deste aditivo são descritas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Características do aditivo superplastificante. Fonte: SIKA S/A

Especificação	Melanina sulfonada
Densidade	1.21 g/cm ³
pH	9 a 11
Teor de sólidos	40%

4.2.3 Aditivo Mineral

O aditivo mineral adotado foi a sílica ativa em pó, da marca Silmix fornecida pela Camargo Correa S/A. A taxa de substituição de cimento por sílica foi de 10% do peso total de material cimentício em todos os concretos elaborados. Suas principais características físicas e químicas encontram-se relacionadas nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 - Características físicas da sílica ativa. Fonte: Silmix

Propriedades Físicas	Valores
Massa Específica (g/cm ³)	2,20
Superfície Específica (m ² / kg)	20000,00
Diâmetro médio (mm)	0,20

Tabela 4.5 - Características químicas da sílica ativa. Fonte: Silmix

Composição Química	Valores (%)
Óxido de silício (SiO ₂)	91,00
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,10
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,70
Óxido de cálcio (CaO)	1,10
Óxido de magnésio (MgO)	1,50
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,39
Óxido de potássio (K ₂ O ₅)	0,44
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,10
C (total)	0,50
Perda ao fogo	1,50

4.2.4 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi brita do tipo gnaise de forma lamelar, facilmente encontrada nas proximidades da cidade do Rio de Janeiro, oriunda da pedreira Mineração Santa Luzia Ltda. Optou-se por uma brita de dimensão pequena, devido à consideração de que quanto menor a dimensão do agregado, menos suscetível a imperfeições ele estará. As principais características do agregado graúdo adotado são demonstradas na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Características do agregado graúdo

ENSAIOS	ABERTURA DA PENEIRA (mm)	PORCENTAGEM RETIDA EM MASSA		NORMA
		Massa Retida (%) (%)	Acumulada	
Granulometria	9.5	4.51%	4.51%	7217
	6.4	35.86%	40.37%	
	4.8	31.70%	72.07%	
	2.4	19.58%	91.65%	
	1.2	4.03%	95.68%	
	0.6	1.66%	97.34%	
	0.3	0.70%	98.04%	
	0.15	0.56%	98.60%	
	Fundo	1.40 %	100 %	
DMC		9.52 mm		7217
Módulo Finura		5.58		7217
Massa Específica		2.70 g/cm ³		9776
Absorção d' água		0.8%		

4.2.5 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado para produção do CAD foi areia do tipo quartzosa, oriunda do fornecedor JO Minerais Ltda. A granulometria e demais características da areia foram determinadas conforme as normas vigentes, cujos resultados encontram-se na tabela 4.7.

Tabela 4.7- Características do agregado miúdo

ENSAIOS	ABERTURA DA PENEIRA (mm)	PORCENTAGEM RETIDA EM MASSA		NORMA
		Massa Retida (%) (%)	Acumulada	
Granulometria	4.8	0	0	7217
	2.4	0	0	
	1.2	3.9%	3.9%	
	0.6	77.6%	81.5%	
	0.3	15.9%	97.4%	
	0.15	2.3%	99.7%	
	0.075	0%	99.7%	
	Fundo	0.3%	100%	
DMC		1.2 mm		7217
Módulo Finura		2.82		7217
Massa Específica		2.65 g/cm ³		9776
Absorção d'água		1.2%		

4.2.6 Água

A água utilizada na produção dos concretos foi a fornecida pela rede de abastecimento público da cidade do Rio de Janeiro.

4.3 Procedimentos Experimentais

4.3.1 Ensaio Piloto

No ensaio piloto foram elaborados corpos de prova para resistências de 80 MPa, com intuito de avaliar o desempenho dos materiais adotados. A idéia inicial era que, se os resultados correspondessem às expectativas, o ensaio seria revertido em definitivo. Como será abordado mais adiante, infelizmente os resultados não foram satisfatórios para tal. A elaboração dos corpos de prova foi feita no Laboratório de Estruturas e Materiais LEM , da PUC-Rio.

O teor de umidade dos agregados foi determinado, efetuando-se as correções devidas no traço. Foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado e tambor giratório para produção dos concretos.

A seqüência de colocação de materiais na betoneira foi : primeiro os agregados miúdo e graúdo. Após mistura, foi adicionado todo o material cimentício composto por cimento e micro sílica, e em seguida parte da água. Por fim, foi adicionado o superplastificante, com o restante da água. A composição do traço adotado está apresentada na tabela 4.8.

Após a completa homogeneização da mistura, constatava-se que o concreto apresentava-se muito seco e sem trabalhabilidade. Foi realizado o teste do abatimento e encontrou-se um resultado igual a zero.

Tabela 4.8 - Dosagem para 1 m³ de CAD do ensaio piloto

Materiais	Composição (1m³)
Água	129 litros
Cimento	420 Kg
Sílica ativa	50 Kg
Agregado Graúdo	1016 kg
Agregado Miúdo	850 kg
Superplastificante	10 litros

RESISTÊNCIA DESEJADA: 80MPa
Fator a/mc = 0.30

O concreto foi moldado em 36 formas metálicas cilíndricas de 10cm de diâmetro por 20 cm de altura. A vibração dos corpos de prova foi extremamente difícil, só sendo esta possível devido ao auxílio de mesa vibratória.

O processo de cura foi à temperatura ambiente, mantendo-se os corpos de prova em local coberto e arejado, sem variações bruscas de temperatura. Tal processo foi adotado visando assemelhar-se mais à condição real de cura de um elemento estrutural, cuja imersão em tanque de água é inviável.

Após 7 dias, 12 corpos de prova foram ensaiados à compressão, para uma avaliação prévia. Visando-se eliminar irregularidades nas faces dos corpos de prova e para certificar-se de que a carga aplicada seria igualmente suportada por todo o elemento, seus topos foram capeados com massa plástica, a dois componentes.

Aos 28 dias, todo o procedimento para preparação para outros 12 corpos de prova foi repetido e os ensaios à compressão foram realizados.

Os ensaios foram realizados no Instituto Tecnológico da Universidade Católica, ITUC- PUC-Rio, em prensa AMSLER, de controle manual com taxa de aplicação de carga de 15 toneladas por minuto e célula de carga para 1000kN.

As tabelas 4.9 e 4.10, apresentam os resultados obtidos com os ensaios aos 7 e 28 dias, sendo cargas expressas em kN e tensão em MPa.

Tabela 4.9 - Resultados com corpos de prova aos 7 dias

AMOSTRA	CARGA DE RUPTURA(kN)	TENSÃO DE RUPTURA(MPa)
1	425	54.11
2	480	61.12
3	527	67.10
4	528	67.23
5	505	64.30
6	503	64.04
7	498	63.41
8	529	67.36
9	567	72.19
10	493	62.77
11	420	53.48
12	508	64.68

Tabela 4.10 - Resultados com corpos de prova aos 28 dias

AMOSTRA	CARGA DE RUPTURA (kN)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)
13	464	59.08
14	425	54.11
15	475	60.48
16	640	81.49
17	483	61.50
18	544	69.26
19	611	77.79
20	564	71.81
21	506	64.43
22	607	77.29
23	582	74.10
24	476	60.61

Pelos resultados demonstrados nas tabelas acima, constata-se que, a resistência média – f_c - aos 7 e 28 dias foi respectivamente 63,48 MPa e 67,66MPa. Como esses resultados ficaram muito aquém do almejado pela dosagem, aliando-se às características não satisfatórias do concreto fresco, optou-se por trocar o aditivo superplastificante, conforme já descrito anteriormente. Foi cogitada a possibilidade da causa das resistências inferiores ser devida ao agregado graúdo. No entanto, como uma tentativa de identificar exatamente qual era o problema, a opção de substituição de agregado graúdo foi deixada para uma segunda etapa, se surgisse a necessidade.

Os corpos de prova remanescentes foram descartados e novos procedimentos de concretagem foram iniciados.

4.3.2 Elaboração dos Corpos de Prova

Em seqüência aos procedimentos experimentais, foram elaborados 3 séries de corpos de prova, com resistências de 80 MPa, 100 MPa, e 40 MPa. A idéia de fazer as duas resistências maiores foi de tentar verificar de imediato o limite do

agregado e incluir a menor resistência verificaria o comportamento do método de dosagem adotado.

Assim sendo, foram elaborados os traços, conforme tabela 4.11, que demonstra os valores finais dos materiais componentes com a devida correção pelo teor de umidade dos agregados e volume de água contida no superplastificante. Para cada dosagem, foram moldados 36 corpos de prova de 10x20 cm e 12 corpos de prova de 15x30 cm. A classificação seguiu os mesmos padrões da elaborada no ensaio piloto. As planilhas de dosagem completas encontram-se no Anexo I.

Tabela 4.11 - Proporções de materiais para 1 m³ de concreto

MATERIAIS	40 MPa	80 MPa	100 MPa
Fator a/mc	0,39	0,31	0,26
Cimento	346 kg	420 kg	519 kg
Sílica Ativa	38 kg	47 kg	57 kg
Água	148 litros	148 litros	152 litros
Superplastificante	9,52 litros	9,70 litros	14,25 litros
Agregado Miúdo	925 kg	860 kg	745 kg
Agregado graúdo	992 kg	992 kg	992 kg

O teor de umidade dos agregados determinados imediatamente antes do início de todo o processo, para que as devidas correções na quantidade total de água na mistura pudessem ser realizadas. Visando melhorar o problema de trabalhabilidade no concreto fresco, o teor de saturação do superplastificante foi alterado para 1,2%.

Os concretos também foram elaborados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, em betoneira de eixo inclinado e tambor giratório e a ordem de colocação dos materiais em relação ao ensaio piloto foi alterada. Foi adotada a seguinte seqüência: inicialmente a brita e areia, misturando-se bem; todo o cimento, procedendo-se a nova mistura; 80% da água e em seguida os 20% restantes da água diluindo o superplastificante, mantendo-se ao longo de todo este tempo a betoneira em movimento. Por fim, adicionou-se a micro sílica e a mistura

prosseguiu por aproximadamente 5 minutos, até suas partículas estarem completamente integradas à mistura.

Ao término de cada procedimento de mistura, foi realizado o teste de abatimento, através do ensaio do tronco de cone invertido, para verificação da trabalhabilidade do concreto fresco. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Para dosagem de 80 MPa: 1,5 cm de abatimento
- Para dosagem de 100 MPa: 7,5 cm de abatimento
- Para dosagem de 40 MPa : zero de abatimento

Os moldes foram preenchidos com o concreto fresco e vibrados com auxílio de vibrador do tipo interno, ou seja, de mangote. Após 24 horas foram desformados e o procedimento de cura foi similar ao ensaio piloto, tendo sido realizado ao meio ambiente, protegidos de mudanças bruscas de temperaturas.

Após a execução dos primeiros ensaios de resistência à compressão, cujos procedimentos serão relatados em seguida, constatou-se que, para as resistências almeçadas de 80 MPa e 100 MPa, os resultados correspondiam às expectativas, encontrando-se em uma faixa razoável de variação ao valor almejado. No entanto, para os corpos de prova moldados para 40 MPa, o valor encontrou-se muito acima, obtendo-se na verdade valor médio de resistência em torno de 60 MPa. A análise de todos os resultados será elaborada detalhadamente no próximo capítulo.

Como este estudo também visa verificar as propriedades pertinentes a concretos com esta resistência, estes corpos de prova foram aproveitados para as análises de 60 MPa.

Desta forma, optou-se por fazer uma nova dosagem, adotando-se o fator água/ material cimentício no limite da utilização para o CAD, ou seja, igual a 0.40.

Considerando que 40 MPa representa o limite mais baixo dos concretos ditos de alto desempenho, nesta ocasião, cogitou-se em adotar um procedimento de dosagem, tal qual utilizado para concreto convencional em seu limite superior de resistência. No entanto, persistiu-se na idéia de tentar utilizar o mesmo método com o limite inferior do CAD, com intuito de equalizar da melhor forma possível todas as amostras preparadas.

Assim sendo, todas as hipóteses anteriores e os mesmos materiais foram mantidos para elaboração do traço. O teor de umidade foi determinado

imediatamente antes da mistura. Os procedimentos e equipamento utilizados para elaboração dos corpos de prova foram iguais aos anteriormente descritos, excetuando-se a ordem de colocação de materiais na betoneira que foi a seguinte: primeiro os agregados, posteriormente o cimento e a sílica ativa, parte equivalente a 40% do total da água, superplastificante e por fim o restante da água, deixando-se a betoneira ligada até a completa homogeneização da mistura. A composição da mistura está indicada na tabela 4.12, já com as devidas correções devidas ao teor de umidade dos agregados e volume de água existente no superplastificante.

Tabela 4.12 - Mistura experimental para 1m³

MATERIAIS	Resistência Desejada:
	40 MPa
Fator a/mc	0,40
Cimento	337.15 kg
Sílica Ativa	37.50 kg
Água	149 litros
Superplastificante	8,84 litros
Agregado Miúdo	948 kg
Agregado graúdo	992 kg

Foram moldados 32 corpos de prova de dimensões de 10 x 20 cm e 6 de 15 x 30cm . O processo de compactação também foi através de vibrador do tipo interno e a cura também foi ao meio ambiente, tal qual descrita anteriormente. O abatimento verificado para esta mistura foi zero.

4.4 Execução dos Ensaios

A preparação dos corpos de prova iniciou-se em torno de 2 dias antes do agendamento dos ensaios, quando seriam completados 28 dias de concretagem. A

preparação foi em concordância ao teste que cada qual seria submetido. Os ensaios foram realizados no ITUC-PUC/Rio.

4.4.1 Ensaio de Compressão Axial

Os corpos de prova que seriam destinados à compressão axial foram capeados com massa plástica de tal forma a garantir que a superfície estivesse completamente plana e isenta de irregularidades, conforme demonstrado na figura 4.4, evitando-se que ocorressem problemas com transmissão de tensões de maneira não uniforme. Os ensaios de compressão foram realizados em concordância com a NBR 5739[26] da ABNT, com taxa de aplicação de carga constante igual a 15 toneladas por minuto. Foram ensaiados 12 corpos de prova de cada diferente mistura de dosagem.

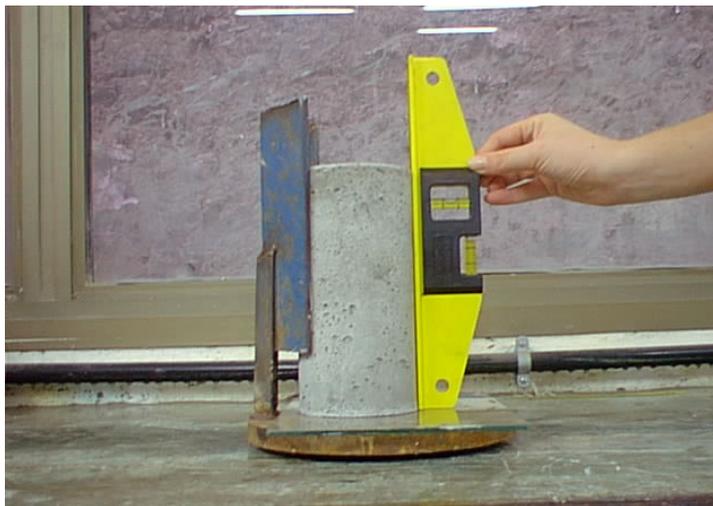


Figura 4.4 – Corpos de prova capeados para os ensaios

O equipamento utilizado para tal ensaio foi uma prensa AMSLER com célula de carga de 1000kN, de controle manual.

Os resultados serão apresentados e discutidos no próximo capítulo.

4.4.2 Ensaio de Tração por Compressão Diametral

O equipamento utilizado para execução de ensaios de compressão diametral é exatamente o mesmo que a utilizado para compressão axial.

Inicialmente, a idéia era de submeter ao ensaio de compressão diametral os corpos de prova de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura. No entanto, para o caso do CAD, com resistências elevadas, ocorreu uma dificuldade operacional no ensaio para corpos de prova com estas dimensões.

Em geral, utiliza-se um suporte para posicionar o corpo de prova na prensa, e através de um filete de madeira, posicionado sob uma chapa rígida conforme orientação da NBR-7222, garante-se a superfície de contato com o corpo de prova de tal forma que a distribuição da carga aplicada é uniforme ao longo de toda a extensão.

No entanto, face aos elevados valores de cargas necessários para romper os corpos de prova destas dimensões, o primeiro ensaio demonstrou claramente que não havia distribuição uniforme da carga, pois além de facionar-se em dois semi cilindros, cada parte ficou partida ao meio, conforme ilustrado na figura 4.5. Em paralelo, observou-se que a chapa rígida que garantiria a condição de distribuição uniforme de carga, apresentava-se deformada.



Figura 4.5 – Corpos de prova ensaiados à compressão diametral.

Desta forma, optou-se por continuar os procedimentos experimentais com os corpos de prova de 10x20cm, cuja utilização também está prevista em norma, já que a relação necessária estipulada para tal ensaio é que a altura seja igual a duas vezes o diâmetro.

Assim sendo, o suporte foi eliminado e o corpo de prova foi alocado na máquina através de dois pequenos gabaritos de madeira, que garantiam a posição centrada em relação ao ponto de aplicação de carga, ilustrado pela figura 4.6.

Desta forma, garantiu-se, então a aplicação da carga uniformemente ao longo das geratrizes inferior e superior. A figura 4.7 ilustra os corpos de prova rompidos. Foram ensaiados um total de 12 corpos de prova para cada série de resistência.



Figura 4.6 - Corpo de prova posicionado na máquina para ensaio de tração por compressão diametral.



Figura 4.7 - Corpos de prova ensaiados por compressão diametral

4.4.3 Ensaio para Determinação de Módulo de Elasticidade

A determinação de módulo de elasticidade para concreto é feita através de ensaios de compressão axial com medidas de deformação. Todos os ensaios realizados para sua determinação foram realizados no ITUC-PUC-Rio, sendo adotados dois procedimentos diferentes. A taxa de aplicação de carga foi mantida igual com valor de 15 toneladas por minuto nas duas situações. Ao todo, foram submetidos a ensaios oito corpos de prova de cada mistura.

Foram separados quatro corpos de prova de cada mistura para serem submetidos a ensaios em equipamento AMSLER, já qualificado anteriormente nos ensaios de compressão, com aquisição de base de dados de deformações de extensômetros elétricos, conforme ilustrado na figura 4.8.

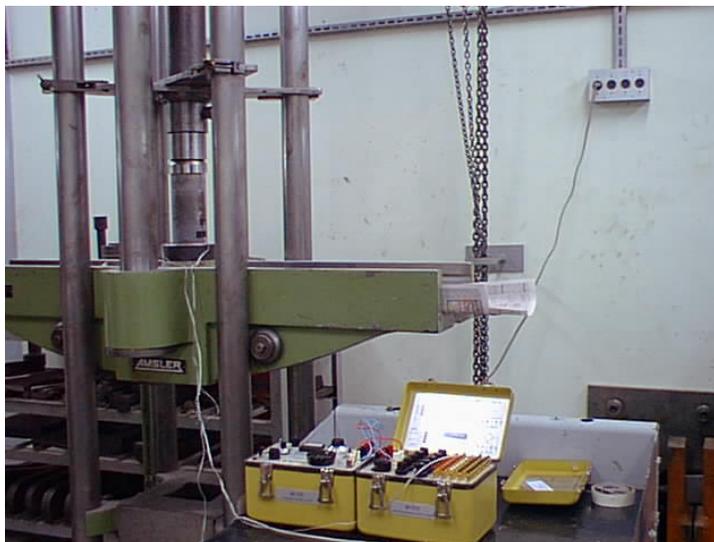


Figura 4.8 –Corpo de prova preparado para ser submetido a ensaio , com medições de deformações através de extensômetros.

Os quatro corpos de prova de cada mistura que seriam ensaiados na prensa AMSLER foram preparados com capeamento nas faces inferior e superior. Foram alocados extensômetros elétricos na face externa em pontos diametralmente opostos. Os pontos onde foram colocados os extensômetros tiveram sua superfície lixada e limpa com álcool para garantir a isenção total de falhas, rugosidades e pó no local onde deveriam ser fixadas as bases de medida. Foram

utilizados extensômetros do tipo PA-06-201BA-120-L, com comprimento de 6 cm de fabricação da Excel Sensores Indústria e Comércio Ltda.

O ensaio foi realizado conforme instrução normativa NBR 8522, para obtenção de um módulo tangente inicial, com traçado de diagrama e adotando-se o plano de carga número II. A taxa de carregamento foi mantida constante igual a 15 toneladas por minuto.

O plano de carga na norma prevê a simulação de estrutura previamente submetida a carregamento, com consideração de carga acidental grande, constituindo 5 ciclos sucessivos de carregamento e descarregamento que iniciam-se em 0.5 MPa até a tensão de 30% da carga de ruptura. A partir do sexto ciclo iniciam-se as medidas das deformações, tomando-se como primeira medida o valor da deformação equivalente a 0.5 MPa e de 30% da carga de ruptura do ensaio de compressão, procedendo-se a novo descarregamento. A partir do sétimo carregamento, há um incremento de carga constante, realizando-se leitura das deformações a cada incremento de 10% da tensão de ruptura no carregamento.

Os extensômetros foram previamente compatibilizados com a mesma leitura inicial. As leituras provenientes de todas as etapas ao longo do processo de carregamento do ensaio encontram-se no Anexo II.

Outros quatro corpos de prova de cada mistura foram separados para serem ensaiados em equipamento INSTRON, com célula de carga de 500kN, com controle de programa de ensaio através de painel eletrônico. Os corpos de prova neste equipamento tinham uma base de transmissão de carga rígida, isto é, não trabalhando com rótula. Para certificar que a transmissão de carga seria igual em todos os pontos da seção, os corpos de prova eram capeados com a mesma resina plástica na própria máquina. O procedimento para tal era o seguinte: misturava-se uma quantidade de material para capeamento, que era aplicado igualmente nas duas extremidades; o corpo de prova era posicionado na máquina, como observa-se nas figuras 4.9, e era aplicada uma pequena carga de ajuste para acomodação da camada de capeamento. Feito isso, aguardava-se em torno de 30 minutos para que a resina sofresse o processo de canalização no local, para dar início ao processo de aplicação de carga.



Figura 4.9 - Corpo de prova preparado para ensaio na máquina INSTRON

A medida de deformação era feita de forma automatizada pelo programa já existente no equipamento, SERIES IX, no equipamento, através da colocação de um clipe age

De fato, uma vez que este trabalho envolve concreto com resistências muito altas, a limitação de uma célula de carga, que atinge 500kN, trata-se de um obstáculo para obtenção de dados suficientes para traçado do diagrama tensão x deformação completo. Daí, ter-se feito em paralelo a leitura com extensômetros.

Apesar de toda cautela requerida para o ensaio, alguns problemas de ajuste ocorreram na máquina nos primeiros corpos de prova, ocasionando a perda de algumas amostras, como ilustrado na figura 4.10 devido a um controle de incidência de carga que ficou travado e acelerou muito a velocidade de carga.



Figura 4.10 – Corpos de prova rompidos indevidamente por problemas no ensaio.

4.4.4

Ensaio para determinação da porosidade através do índice de vazios

A determinação da porosidade total das amostras de concreto de alto desempenho visa avaliar o índice de vazios em um maciço de concreto e elaborar uma relação entre esta medida e a resistência à compressão, presumindo-se que a porosidade está diretamente relacionada à permeabilidade. Os ensaios foram realizados seguindo a instrução normativa NBR 9778-87[50], que estabelece a relação

$$IV = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 ,$$

onde:

IV = Índice de vazios;

M_{sat} = massa do corpo de prova saturado;

M_s = massa do corpo de prova seco em estufa;

M_i = massa do corpo de prova saturado, imerso em água .

Inicialmente foi verificado o tamanho necessário da amostra a ser ensaiada. A norma estabelece que para corpos de prova de concreto com agregado de dimensão máxima até 50mm, o volume da amostra deve ter 2500 cm³, no mínimo, e que o ensaio deve ser constituído de 3 amostras.

Foram separados os corpos de prova de 15 cm x 30 cm, com mais de 28 dias de concretagem e foram partidos ao meio através de serra especial para maciços de granito passando a ter , em média, 14.76 cm a 14.78 cm de altura, permanecendo inalterado o diâmetro original de 15 cm, conforme demonstrado na figura 4.11. Foram preparados 4 amostras de cada lote de resistência. Os corpos de prova foram numerados e pesados para efeito de referência futura.

Imediatamente após, foram colocados em estufa a uma temperatura de 100⁰C, conforme figura 4.12 por um período de 72 horas. Após o término do procedimento de secagem, foram determinadas as massas.



Figura 4.11 - Corpos de prova preparados para ensaio de porosidade



Figura 4.12 – Corpos de prova colocados na estufa.

Dando continuidade, as amostras foram submetidas ao processo de saturação por imersão em tanque com água, pelo período de 72 horas, sendo o processo executado da seguinte forma : $1/3$ do volume imerso nas primeiras 4 horas, $2/3$ do volume imerso nas 4 horas subsequentes e depois completando-se a imersão no período remanescente. A figura 4.13 ilustra este processo.



Figura 4.13 – Corpos de prova imersos em água.

Decorridas as 72 horas de imersão, as amostras foram retiradas da água e as respectivas massas foram medidas em balança hidrostática conforme figura 4.14.



Figura 4.14 – Balança hidrostática para pesagem dos corpos de prova imersos.

Por fim, as amostras foram secas com pano absorvente para remover-se a umidade superficial e os valores de suas massas na condição saturada com superfície seca foram determinadas.

4.4.5

Ensaio para verificação da compatibilidade entre superplastificante e material cimentício

A princípio é impossível conhecer o comportamento reológico de um concreto, a partir das especificações de um aditivo e de um tipo de cimento, com os baixos fatores água/material cimentício que são adotados para o CAD. No entanto, a trabalhabilidade do CAD é uma das suas principais características.

O ensaio de compatibilidade entre superplastificante e material cimentício visa basicamente verificar se as características de trabalhabilidade do concreto fresco poderá corresponder às expectativas, através da determinação do ponto de saturação ideal para uma determinada combinação cimentícia aliada a um superplastificante.

No caso específico deste estudo, apesar das resistências apresentarem-se dentro dos patamares esperados viabilizando o estudo de suas propriedades, um fator de relevante importância necessitou considerações complementares: o abatimento através do teste do tronco de cone invertido.

Todas as dosagens previam um abatimento de 18 cm, o que não foi obtido. Desta forma, optou-se por realizar um estudo de compatibilidade visando justamente investigar se a combinação de material cimentício com o superplastificante poderia ter influência no comportamento do concreto fresco.

Como realizar traços experimentais para verificação de tal comportamento é inviável, foram criados métodos avaliatórios, pelos quais é feita uma avaliação do comportamento reológico do concreto, através do estudo do comportamento da pasta.

Entretanto, considerando que as misturas entre todos os componentes de um concreto não é igual à mistura somente dos componentes da pasta, deve-se salientar que ocorrem situações onde o comportamento da pasta é muito bom e do concreto é regular, assim como casos onde o comportamento da pasta é razoável e o do concreto é muito bom.

O método que adotado neste estudo para verificação da compatibilidade é o do funil de Marsh. Esta metodologia consiste em verificar o tempo necessário para uma determinada pasta escoar através de um funil especial, com dimensões conforme ilustrado na figura 4.15.

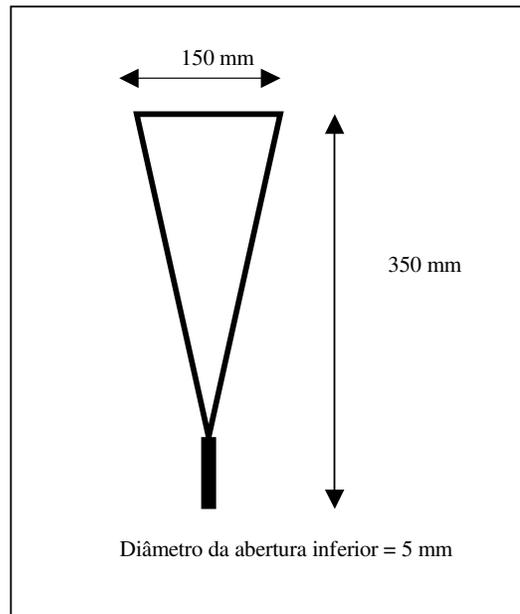


Figura 4.15 - Desenho esquemático do Funil de Marsh

Para realizar este ensaio, elabora-se 1,2 litros de pasta e mede-se o tempo necessário para preencher com 1 litro da mistura um recipiente logo abaixo do funil. Várias medições são realizadas a diversos tempos decorridos da mistura inicial : 5, 15, 30, 45, 60 e 75 minutos. Os materiais são considerados compatíveis se a pasta mantém sua fluidez em todos os tempos de sua medição, ficando as curvas, para diversos níveis de saturação de superplastificante, uma perto da outra. O ponto onde, para um determinado teor de superplastificante, o tempo de escoamento mantém-se constante é denominado *ponto de saturação*.

Conforme recomendação de Aïtcin[3], o procedimento experimental inicia-se na elaboração de uma pasta com fator água/ material cimentante igual a 0.35 e uma dosagem de superplastificante que corresponda a um teor de sólidos de 1% da massa de material cimentício. Se o tempo de escoamento desta pasta estiver entre 60 e 90 segundos, prossegue-se o estudo, alterando-se a dosagem de

superplastificante na razão de 0.2%, tanto para maior quanto para menor que 1%. Se o tempo de escoamento estiver acima de 90 segundos, deve-se então mudar o fator água/ material cimentício para 0.40. Caso a mistura ainda esteja apresentando um tempo de escoamento superior a 90 segundos, é recomendada a substituição do superplastificante ou do cimento. A temperatura da mistura deve ser controlada e sendo mantida entre 20⁰C e 23⁰C. Caso haja dificuldade em controlar-se a temperatura da mistura, deve-se utilizar água com temperatura menor que 10⁰C, evitando-se assim a elevação excessiva de temperatura.

No caso deste estudo, mesmo com os tempos iniciais recomendando uma troca de superplastificante ou de cimento, prosseguiu-se alterando os diversos níveis de saturação, na razão de 0.2% de teor de superplastificante, a partir de 1%, para os fatores água/material cimentício de 0.35 e 0.40, já que a intenção era de verificar o problema da falta de trabalhabilidade do concreto fresco, já elaborado. As misturas foram realizadas nas proporções indicadas na tabela 4.13. A razão de aumentar-se a partir de 1% o teor de saturação e não verificar-se os valores inferiores será descrita posteriormente na apresentação dos resultados.

Tabela 4.13 - Proporções das misturas para estudo de compatibilidade

Fator a/mc	Cimento	Sílica Ativa	Água	Aditivo
0.35	1800 g	200 g	670 ml	49.60 g
0.40	1800 g	200 g	770 ml	49.60g
0.35	1800 g	200 g	664 ml	60.50 g
0.40	1800 g	200 g	764 ml	60.50 g
035	1800 g	200 g	658 ml	70.18 g
0.40	1800 g	200 g	758 ml	70.18 g
0.35	1800 g	200 g	652 ml	79.86 g
0.35	1800 g	200 g	646 ml	89.99 g
0.35	1800 g	200 g	640 ml	99.99 g

Para execução deste ensaio foi utilizado o seguinte material e equipamento, que se encontra ilustrado na figura 4.16 e está relacionado a seguir:

- a) Cimento e sílica ativa, que constitui o material cimentante utilizado neste estudo;
- b) Misturador para a pasta, tendo sido utilizado um liquidificador doméstico;
- c) Cronômetro para leitura do tempo de escoamento;
- d) Funil de Marsh com tripé e proveta graduada

Desta forma, foram elaboradas misturas nas proporções acima indicadas e foram realizadas medições de tempo para escoamento no funil com intervalos de 15 minutos. Entre uma medição e outra, a mistura permanecia em repouso. Cerca de um minuto antes do horário para nova medição, a mistura era colocada no misturador e agitada por cerca de 15 segundos.



Figura 4.16 – Material e equipamento utilizados para estudo da compatibilidade

Os tempos de escoamento de cada mistura serão expressos no próximo capítulo, através de um gráfico de sua variação em função do teor de saturação de superplastificante.

A figura 4.17 ilustra o funil de Marsh com o suporte e a proveta graduada abaixo para captar o material.



Figura 4.17 – Funil de Marsh