

## **5**

### **Equipamentos e Técnicas Experimentais**

De acordo com Castro (2007), quando as propriedades reológicas são determinadas em laboratório, diz-se que se está realizando ensaios de reometria. Para isso, existem diversas técnicas experimentais disponíveis que variam de acordo com o material ensaiado, podendo fornecer um ou dois parâmetros reológicos, a saber: viscosidade e/ou tensão de escoamento, determinados de forma direta ou indireta.

Conforme ressaltado anteriormente, o presente estudo almeja o desenvolvimento de uma metodologia alternativa para a determinação da viscosidade de solos. Desta forma, análises envolvendo a definição da tensão de escoamento dos materiais estão fora do escopo deste trabalho.

De um modo geral, o presente capítulo fornece maiores detalhes acerca de cada uma das técnicas experimentais empregadas, apresentando não somente seus procedimentos, como também as limitações dos equipamentos utilizados.

#### **5.1.**

##### **Medida direta da viscosidade**

De acordo com Pinheiro (2007), a medição direta é aquela cujo resultado é obtido diretamente dos dados experimentais. Nesta definição enquadram-se o reômetro e o viscosímetro de Brookfield, apresentados a seguir.

##### **5.1.1.**

###### **Viscosímetro de Brookfield**

De acordo com Vidal-Bezerra (2000), equipamentos para medições reológicas que seguem o método Brookfield são frequentemente encontrados nos laboratórios industriais. Estes equipamentos permitem medidas sob várias velocidades de rotação e fornecem uma primeira ideia sobre o comportamento reológico.

Os ensaios foram realizados no viscosímetro de Brookfield, modelo DVI Primer, fabricado pela BrasEq®, ilustrado na Figura 26.



Figura 26 - Viscosímetro Brookfield modelo DV I Primer

O procedimento experimental adotado seguiu algumas operações preliminares: inicialmente o solo foi colocado em estufa a 60°C, destorroado e passado na peneira #40. Ao todo foram separados aproximadamente 100g do material passante.

Após pesado, o solo seco foi misturado, com o auxílio de uma espátula, a uma quantidade de água, sendo colocado no recipiente apresentado na Figura 27 a). Em seguida, o mesmo foi encaixado no equipamento e uma determinada rotação por minuto foi imposta à haste utilizada, Figura 27 b). Através do visor acompanhavam-se as oscilações no valor da viscosidade até que a mesma atingisse um valor constante. A partir deste momento, uma nova rotação poderia ser imposta.

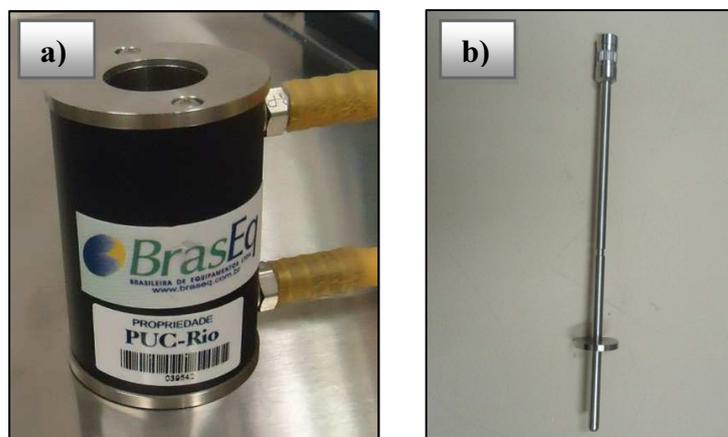


Figura 27 - a) Recipiente utilizado para colocar o material a ser ensaiado; b) Haste utilizada nos ensaios (splinder 31)

De acordo com Kiryu (2006), a principal limitação deste viscosímetro está relacionada à falta de garantia da precisão dos dados coletados abaixo de  $10 \text{ s}^{-1}$  de taxa de cisalhamento.

### 5.1.2. Reômetro

Os ensaios foram realizados no reômetro rotacional Haake Mars, Figura 28, fabricado pela Thermo Scientific®. Este equipamento permite análises de tensão controlada, quando se impõe uma tensão pré-definida e determina-se a taxa de cisalhamento resultante, ou de deformação controlada, quando uma taxa de cisalhamento é imposta e a tensão resultante é determinada.

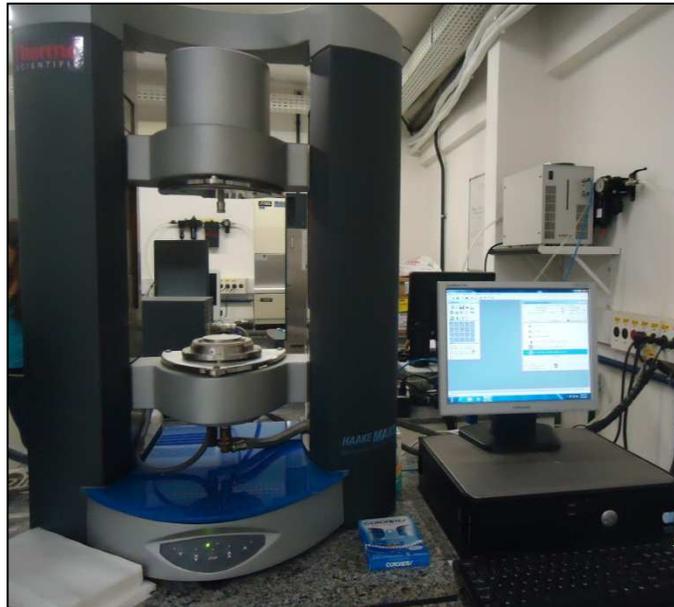


Figura 28 - Reômetro Haake Mars utilizado neste trabalho

De acordo com Naccache (2012), a escolha do tipo de geometria a ser utilizada em reômetros rotacionais, a saber: couette, cone-placa e placa-placa, depende basicamente de três fatores: o tipo de fluido, a faixa de viscosidade e a taxa de deformação.

A geometria de Couette, ou cilindros concêntricos, ilustrada na Figura 29 a), é utilizada para fluidos pouco viscosos e altas taxas de deformação. A geometria cone-placa, Figura 29 b), não é indicada para suspensões, uma vez que a inclinação da placa reduz a quase zero a folga no centro da geometria, podendo

ocasionar a retenção de material neste ponto. Desta forma, optou-se por utilizar a geometria de discos paralelos, ou placa-placa, pois, além de ser a mais apropriada para suspensões, esta configuração permite a variação da folga e a execução de ensaios em materiais com uma ampla faixa de viscosidade.

Dentre as os tipos de placas disponíveis, optou-se por utilizar a placa-placa do tipo *cross hatch*. Conforme ilustrado na Figura 29 c), a referida geometria apresenta ranhuras em suas faces internas, evitando assim o deslizamento do material, observado quando uma geometria lisa foi utilizada (Figura 29 d).

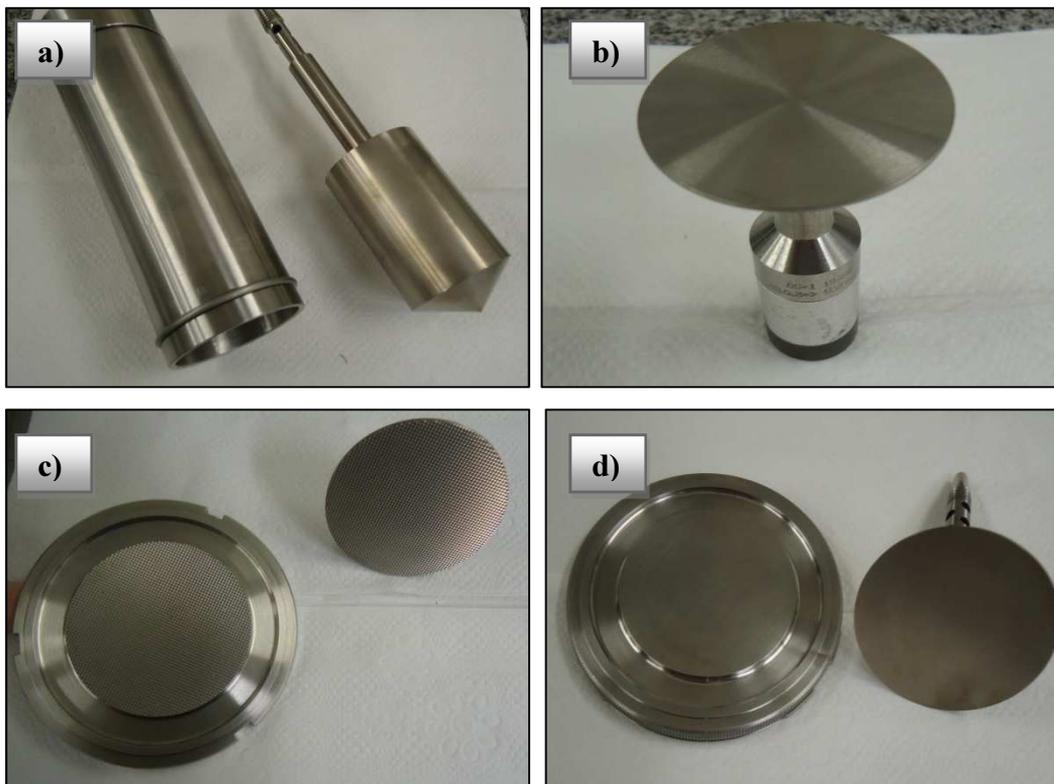


Figura 29 - Tipos de geometrias disponíveis: a) couette; b) cone-placa; c) placa-placa do tipo *cross hatch*; d) placa-placa do tipo lisa

De acordo com O'Brien & Julien (1988) , a folga existente entre as placas deve ser de dez vezes o diâmetro da maior partícula existente no material ensaiado. Como o reômetro utilizado apresenta uma folga máxima de 4,0mm, optou-se por utilizar materiais passantes na peneira #40, cuja abertura é de 0,42mm. Tal fato justifica a escolha da referida peneira para as análises no abatimento do tronco de cone.

Entretanto, durante a realização dos ensaios, observou-se que, nos solos mais viscosos, a utilização da folga máxima forçava o motor do reômetro, e nos

menos viscosos, propiciava o extravasamento do material além dos limites da geometria, Figura 30. Assim, optou-se por utilizar uma folga de 2,0mm.



Figura 30- Extravasamento de material no ensaio utilizando uma folga de 4,0mm

Os testes realizados foram tipo CD (deformação controlada), ou seja, uma taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) era imposta, a tensão resultante ( $\tau$ ), decorrente do torque aplicado para rotacionar a haste, era determinada e a razão  $\tau/\dot{\gamma}$  fornecia a viscosidade em função do tempo.

O tempo de execução do ensaio foi determinado com base no ressecamento ou sedimentação do material. De acordo com a Figura 31, o teste realizado com o ponto mais seco do material BQP ( $w= 81,50\%$ ) indicou uma grande dispersão da viscosidade a partir de 200s, provavelmente associada ao início do ressecamento do material, ratificada pela Figura 32.

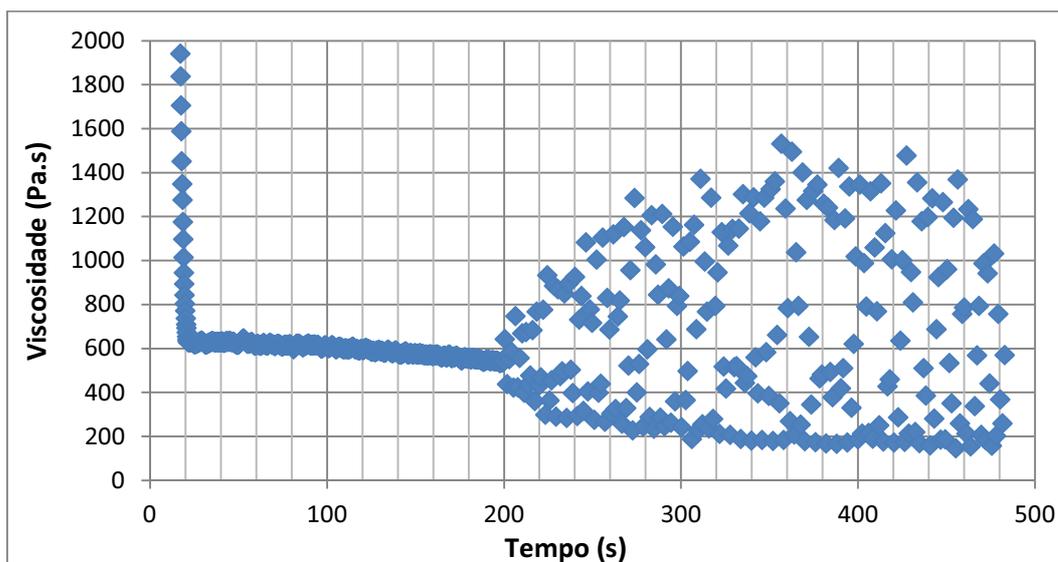


Figura 31 - Grande dispersão encontrada a partir de 200s no ensaio realizado para o ponto mais seco da BQP ( $w= 81,50\%$ )



Figura 32 - Indicativo do ressecamento do material durante o ensaio: espaço vazio entre as placas

A análise dos dados obtidos a partir de um dos pontos mais úmidos do CAT ( $w= 103,46\%$ ), Figura 33, também indica uma mudança de comportamento do material a partir dos 200s, neste caso, observa-se a diminuição da viscosidade do material, associada, conforme observado na Figura 34, a sedimentação do mesmo. Desta forma, a duração dos ensaios foi limitada a 200s.

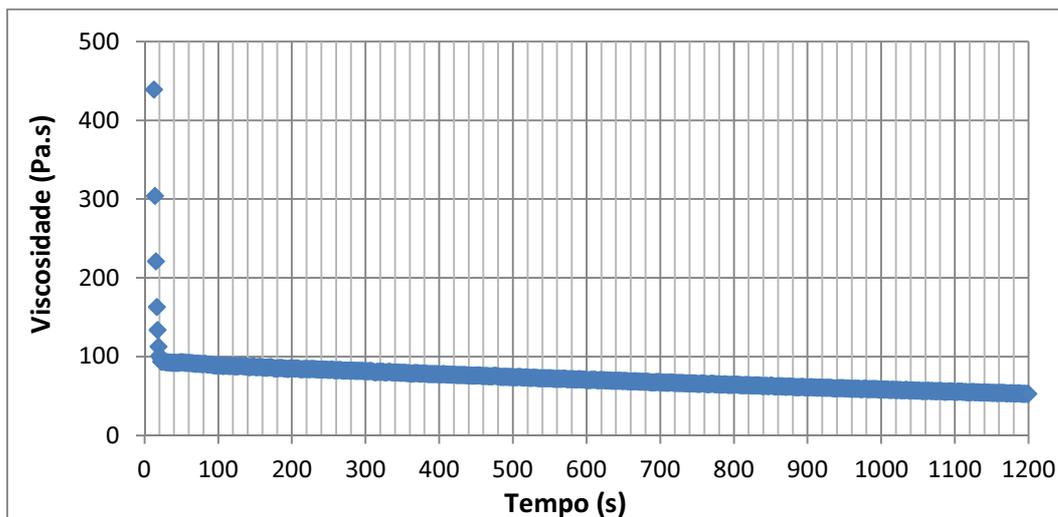


Figura 33 - Diminuição da viscosidade do material a partir de 200s no ensaio realizado para um dos pontos mais úmidos do CAT ( $w= 103,46\%$ )



Figura 34 - Lâminas de água formadas pela sedimentação do material

No intuito de minimizar a aceleração do processo de ressecamento, provocada pela exposição da amostra ao ar condicionado, utilizou-se uma capa protetora de acrílico, apresentada na Figura 35.



Figura 35 - Capa protetora de acrílico utilizada para minimizar a exposição da amostra ao ar condicionado

As observações e os testes iniciais supracitados definiram o procedimento experimental adotado (Figura 36):

- 1) regular a temperatura do banho (25°C) e iniciar a programação do ensaio, fornecendo como dados de entrada: a folga (2,0mm) e a taxa de cisalhamento a serem utilizadas;
- 2) com o auxílio de uma batedeira, homogeneizar, por aproximadamente 10 minutos, 1kg de solo seco (passante na peneira #40) com a quantidade de água calculada para o primeiro ponto do ensaio;
- 3) coletar uma quantidade do material para verificar sua umidade;
- 4) utilizar uma seringa para conduzir o material até o reômetro;
- 5) diminuir o tamanho da folga (2,1mm) para promover o espalhamento do material;
- 6) retirar o excesso de material, promovendo a limpeza da lateral da geometria;
- 7) ajustar a folga (2,0mm), colocar a capa protetora de acrílico e iniciar o ensaio;
- 8) repetir os procedimentos anteriores (3 a 7) mais duas vezes para garantir a repetitividade do ensaio;
- 9) para a análise de uma nova umidade deve-se recolocar o material na batedeira, acrescentar a quantidade de água correspondente, bater por 10 minutos e repetir os passos anteriormente apresentados.



Figura 36 - Etapas do procedimento experimental estabelecido para os ensaios no reômetro: a) regularização da temperatura; b) homogeneização do material; c) colocação da amostra na placa inferior; d) espalhamento do material; e) limpeza da lateral da geometria; f) colocação da capa protetora e início do ensaio

## **5.2. Medida indireta da viscosidade**

De acordo com Pinheiro (2007), a medição indireta é aquela cujo resultado é obtido através de medições diretas de outras grandezas, ligadas por uma dependência conhecida com a grandeza procurada. Nesta definição enquadram-se os equipamentos de abatimento de tronco de cone tradicional e modificado.

### **5.2.1. Abatimento do tronco de cone tradicional**

O *slump test*, conhecido no Brasil como ensaio de abatimento de tronco de cone, é um dos mais famosos e mais antigos ensaios de trabalhabilidade para concreto. Devido à sua simplicidade, este método é amplamente utilizado em todo o mundo.

Desenvolvido nos Estados Unidos por volta de 1910, acredita-se que o *slump* foi utilizado pela primeira vez por Chapman, embora em muitos países o aparelho seja associado à Abrams (Bartos *et al.*, 2002).

Apresentado por Castro (2007) como uma excelente ferramenta para o controle da qualidade do concreto, o ensaio permite detectar pequenas mudanças na composição da mistura, tais como variações no teor de água a partir da especificação da dosagem original.

Sua desvantagem está no fato deste método de ensaio poder fornecer respostas diferentes para uma mesma amostra de concreto quando realizado por diferentes operadores e mesmo quando repetido por um mesmo operador, verificando-se uma grande dispersão entre suas medidas (Reis, 2008).

O equipamento utilizado consiste, basicamente, de um tronco de cone metálico aberto em ambas as extremidades (altura de 300 mm, diâmetro inferior de 200 mm e diâmetro superior de 100 mm), que é mantido firmemente apoiado sobre uma placa metálica não-absorvente (de 500 mm x 500 mm) por meio do posicionamento do operador sobre os apoios laterais fixados ao molde metálico. Ele é preenchido com concreto seguindo um procedimento padrão e, em seguida, levantado verticalmente. Com isso, o concreto sofre um abatimento, o qual é medido.

No Brasil, este ensaio é regulamentado pela NBR *NM 67/98 – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*, que prescreve os seguintes passos:

1) após a limpeza e umedecimento interno do molde, este deve ser colocado sobre a placa de base que deve estar igualmente limpa e umedecida, disposta sobre uma superfície rígida, plana, horizontal e livre de vibrações;

2) o molde é fixado através de suas aletas pelos pés do operador e preenchido em três camadas aproximadamente iguais. Cada camada é adensada com 25 golpes uniformemente distribuídos, aplicados com uma haste de socamento;

3) terminado o adensamento, o excesso de concreto é removido e uma limpeza da placa metálica de base é promovida;

4) o operador deve retirar o molde do concreto cuidadosamente, levantando-o na direção vertical com um movimento constante para cima, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral. Esta operação deve ser feita no tempo de 10 ± 2 s;

5) imediatamente após a retirada do molde, deve-se medir o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova, como ilustrado na Figura 37.

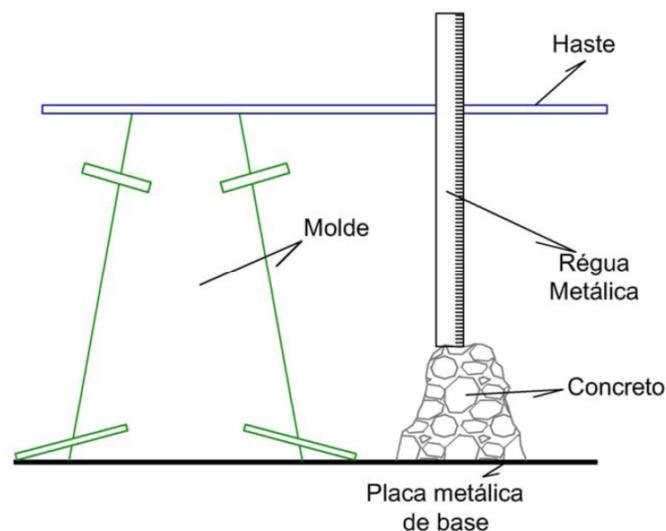


Figura 37 - Ensaio de abatimento do tronco de cone (Reis, 2008)

Neste ensaio, a tensão que promove a mobilização do material, consiste no peso próprio do concreto por área. O concreto apenas se move caso a sua tensão de escoamento seja excedida e, assim que a tensão aplicada for menor que a tensão de escoamento do mesmo, ele estabiliza.

### 5.2.2. Abatimento do tronco de cone modificado

Uma vez que o ensaio de abatimento de tronco de cone tradicional era capaz de medir apenas a propriedade reológica relacionada com a tensão de escoamento do concreto fresco, Tanigawa *et al.* (1991) propuseram modificações que tornariam possíveis a obtenção de medidas relacionadas com a viscosidade plástica do material.

O equipamento adaptado por estes autores, apresentado na Figura 38, era formado por um medidor de deslocamento associado a um aquisitor de dados que armazenava o abatimento com o tempo.

Para validar o novo método experimental proposto, Tanigawa & Mori (1989) e Tanigawa *et al.* (1991) desenvolveram estudos analíticos através da aplicação de elementos finitos para simular o fluxo e a deformação do concreto fresco, que foi assumido como fluido Binghamiano.

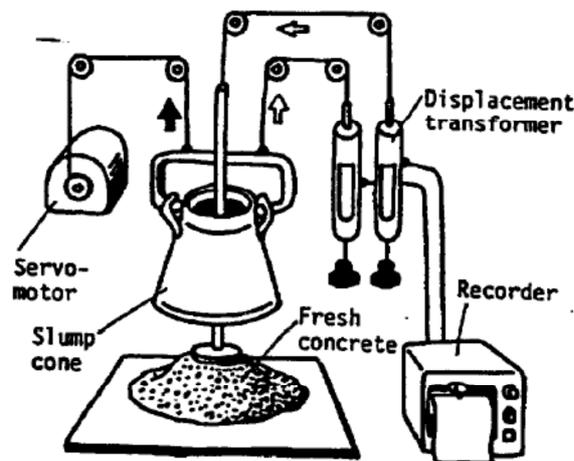


Figura 38 - Ensaio de abatimento de tronco de cone modificado proposto por Tanigawa *et al.* (1991)

Com o objetivo de deixar o equipamento mais simples e robusto para ser usado em trabalhos de campo, Ferraris & De Larrard (1998) fizeram algumas alterações e tentaram caracterizar a viscosidade plástica através de uma taxa média de abatimento.

Dessa maneira, intervalos de tempo necessários para se alcançar uma altura intermediária entre os valores inicial e final de abatimento pareceram, à priori, uma boa maneira para descrever a viscosidade dos concretos.

Segundo Ferraris & De Larrard (1998), durante a escolha da altura intermediária de abatimento, dois problemas potenciais foram levados em consideração: primeiro, abatimentos muito baixos poderiam levar a tempos de abatimento muito pequenos e, assim, resultariam em baixa precisão nas medidas; e segundo, um abatimento parcial que fosse muito alto poderia excluir todos os concretos com abatimentos finais menores. Assim, como a variação de abatimento dos concretos capazes de serem avaliados com reômetros é maior que 100 mm, este valor foi adotado como o valor do abatimento parcial.

A principal modificação feita no equipamento original consistiu na introdução de uma haste localizada centralmente na placa de base horizontal e no uso de um disco deslizante, conforme a Figura 39.

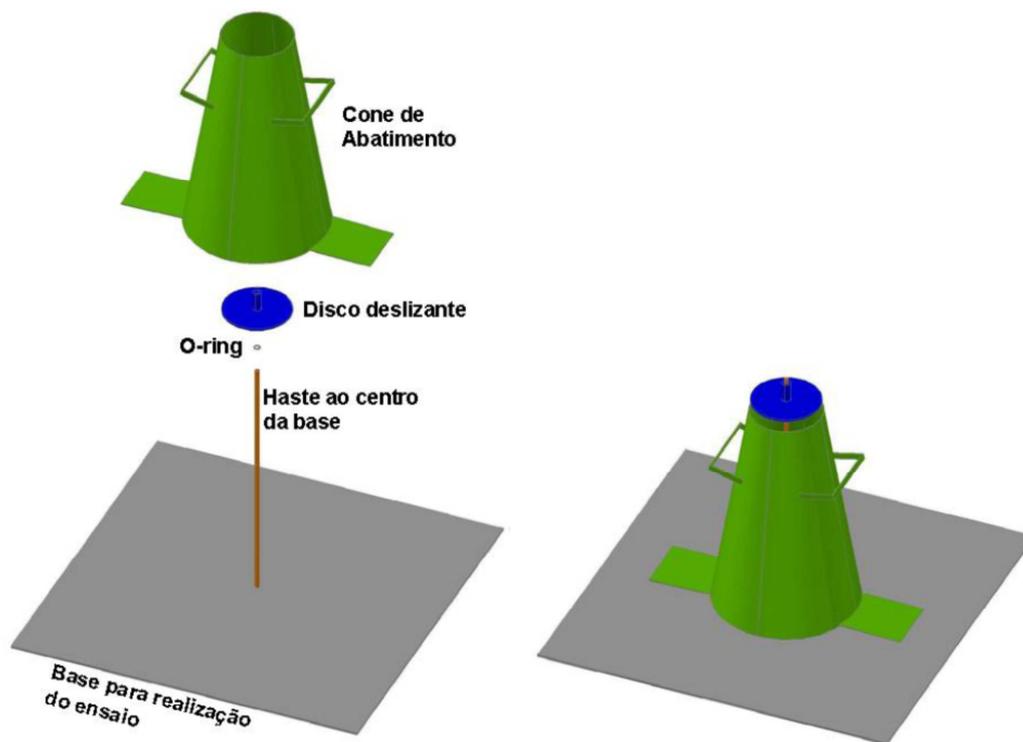


Figura 39 - Aparelho do abatimento do tronco de cone modificado (Reis, 2008)

O procedimento para a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado, Figura 40, é simples e semelhante ao ensaio padrão. As etapas de execução do ensaio são (Ferraris & De Larrard, 1998):

- 1) limpar cuidadosamente a haste central e aplicar algum desmoldante para facilitar o deslizamento do disco;
- 2) umedecer a base e a parede do molde usando uma esponja úmida;
- 3) colocar o molde na base, assegurando que o seu eixo está coincidindo com o da vara;
- 4) fixar o molde através de suas aletas pelos pés do operador e preenchê-lo com três camadas aproximadamente iguais, adensando cada camada com 25 golpes;
- 5) fazer o acabamento na superfície do concreto usando uma espátula e limpar a parte da haste localizada acima da amostra de concreto;
- 6) deslizar o disco pela haste até que este entre em contato com o concreto;
- 7) levantar o tronco do cone verticalmente e começar a cronometrar simultaneamente;
- 8) parar de cronometrar assim que o disco atingir a marca do abatimento de 100mm, travando nesta posição;
- 9) uma vez estabilizado o abatimento, ou no máximo um minuto após a realização do ensaio, remover o disco e medir o abatimento com a régua.

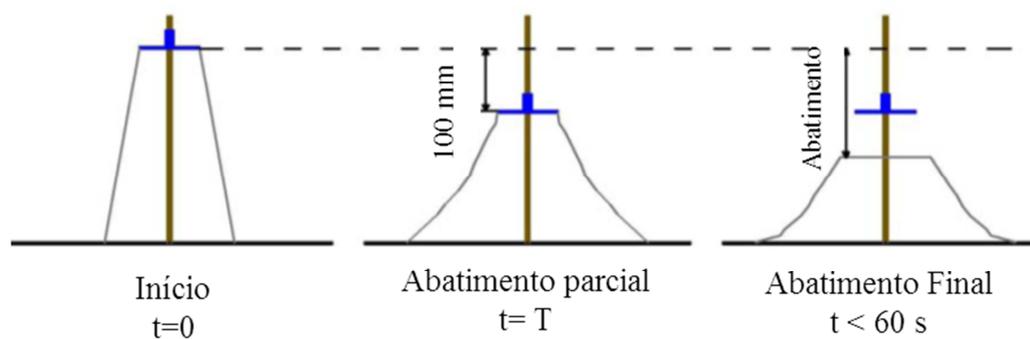


Figura 40 - Procedimento experimental do ensaio de abatimento do tronco de cone modificado (Ferraris & De Larrard, 1998)

Baseado em análises de elementos finitos dos ensaios de abatimento de tronco de cone e nas medidas da tensão de escoamento, usando um reômetro e o *slump test*, Hu (1995) propôs uma fórmula geral, expressa pela Equação 8, relacionando o abatimento com a tensão de escoamento.

$$\tau_0 = \frac{\rho}{270} (300 - s) \quad (8)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do concreto ( $\text{Kg/m}^3$ ),  $\tau_0$  é a tensão de escoamento (Pa) e  $s$  é o abatimento (mm).

Avaliando a tensão de escoamento prevista por este modelo, Ferraris & De Larrard (1998) encontraram um erro médio de 195Pa para tensões no intervalo entre 100 e 2000Pa. Na tentativa de reduzir este erro, tais autores fizeram ajustes na equação proposta por Hu (1995), mudando a declividade da reta e introduzindo um termo constante, obtendo assim a Equação 9.

$$\tau_0 = \frac{\rho}{347} (300 - s) + 212 \quad (9)$$

Ferraris & De Larrard (1998) também propuseram equações para determinar a viscosidade plástica de concretos com abatimentos menores que 260mm, conforme apresentado a seguir.

$$\mu = 1,08 \cdot 10^{-3} * \rho T (s - 175) \quad \text{para } 200\text{mm} < s < 260\text{mm} \quad (10)$$

$$\mu = 25 \cdot 10^{-3} * \rho T \quad \text{para } s < 200\text{mm} \quad (11)$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade plástica em Pa.s e T é o tempo de abatimento em s.