

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

“Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso.”

João Felipe Araujo Reis

Orientador: *Profa. Dra. Mônica Pinto Barbosa*

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação

Ilha Solteira – SP
Dezembro/2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

R375d Reis, João Felipe Araujo.
Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado : estudo de caso / João Felipe Araujo Reis. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008
177 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2008

Orientador: Mônica Pinto Barbosa
Bibliografia: p. 164-177

1. Concreto fresco. 2. Reologia. 3. Viscosidade. 4. Tensão de escoamento.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS REOLOGICOS DE CONCRETOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE MODIFICADO: ESTUDO DE CASO

AUTOR: JOÃO FELIPE ARAUJO REIS

ORIENTADORA: Profa. Dra. MONICA PINTO BARBOSA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. MONICA PINTO BARBOSA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE
Departamento de Engenharia de Construção Civil / Universidade de São Paulo

Data da realização: 11 de dezembro de 2008.

*“Aos meus pais, Dorival e Alice,
pelo amor, esforço e dedicação
por toda a minha vida.”*

Agradecimentos

A Deus, por ser o autor da vida, o dono de toda a ciência e conhecimento. Pela oportunidade de realizar este trabalho com força, alegria e dedicação. Agradeço por quem Ele é, por tudo o que Ele fez e por tudo e que Ele fará.

À Prof.^a Mônica Pinto Barbosa, pela orientação, estímulo, paciência e compreensão ao longo do trabalho realizado.

Ao Prof. Geraldo de Freitas Maciel e ao Prof. Edson Del Rio Vieira pelo apoio, críticas e sugestões para melhoria do trabalho, sobretudo na parte de reologia e visualização científica.

Ao engenheiro Flávio Moreira Salles por ceder as instalações do Laboratório CESP de Engenharia Civil – LCEC. Aos técnicos do LCEC e aos amigos e integrantes do grupo RMVP por serem tão prestativos e não pouparem esforços para a realização do trabalho.

Ao Prof. Victor Pandolfelli por ceder as instalações do Laboratório de Cerâmicas e Refratários da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e o uso do reômetro de concreto.

À engenheira Alessandra Lorenzetti de Castro, pelas dicas, dedicação e esforço para o avanço do trabalho, sobretudo referente ao uso do reômetro de concreto.

À minha família, pelo apoio e incentivo durante este período. Por estarem sempre presentes em minha vida.

Aos amigos por estarem ao meu lado, por me ajudarem nos momentos de dificuldade. Por estarem presentes nos momentos de alegria e de tristeza, por dividirem momentos de muita importância comigo.

“E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.”

(I Corintios 13:2)

REIS, J. F. A. **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado**: Estudo de Caso. Ilha Solteira, 2008. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

RESUMO

As propriedades reológicas do concreto no seu estado fresco são importantes principalmente no período em que o material é lançado nas fôrmas e podem ser determinadas em qualquer momento durante o período de indução da hidratação do cimento. Entretanto, o uso da reologia para estudar a taxa de fluidez ou trabalhabilidade do concreto não é muito comum. Geralmente, o abatimento de tronco de cone é o único parâmetro medido e, mesmo em laboratório, os estudos raramente fornecem informações adicionais sobre o comportamento ao escoamento desses materiais. O ensaio do tronco de cone modificado proposto de LARRARD permite avaliar a tensão crítica e a viscosidade plástica do concreto, de maneira simples e sem grandes custos, uma vez que reômetros de laboratórios são aparelhos sofisticados e relativamente com custos elevados.

Este estudo avalia a tensão de escoamento e a viscosidade plástica obtida pelo teste de abatimento de tronco de cone modificado para dois tipos distintos de concreto, a saber: o concreto fresco convencional e o concreto de alto desempenho (CAD), elaborados com cimento CPV ARI-Plus. E também foi realizado correlações entre o ensaio de abatimento de tronco de cone modificado e o ensaio de reometria clássica. Os resultados obtidos mostraram-se bastante satisfatórios para o cálculo da tensão e da viscosidade dos concretos avaliados.

Palavra-Chave: Concreto fresco, reologia, viscosidade, tensão de escoamento.

REIS, J. F. A. **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado**: Study of Case. Ilha Solteira, 2008. 169 f. Thesis (Master in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

ABSTRACT

The concrete rheological properties in fresh state are mainly important in the period that the material is thrown in the molds and it can be certain in any moment during the induction period of the cement hydration. However, the use of the rheology to study the fluidity rate or concrete workability is not very common. Usually, the slump is just an unique measured parameter and, even in laboratory, the studies rarely supply additional information about the flow behavior of those materials. The slump modified test proposed by LARRARD it allows to evaluate the critical tension and concrete plastic viscosity so simply and without significant costs, because rheometers of the laboratories are very sophisticated and relatively expensive apparels.

This study evaluates the yield stress and the viscosity obtained by the slump modified test for two different types of concrete, like to: the conventional fresh concrete and the concrete of high acting (CAD), elaborated with cement CPV ARI-Plus. And it was done to test the correlation between slump modified test and test classical rheometer. For the concretes of high performed starting from the specific line the addictive volume addition superplastificante was varied obtaining initial slumps that varied between 100mm and 260mm. The initial results obtained have proved very satisfactory in tension and viscosity calculus of the evaluated concretes.

Keywords: Fresh concrete, rheology, viscosity, yield stress.

Lista de Figuras

Figura 2. 1: Remanescente de um barco de Lambot. (KAEFER, 1998).....	24
Figura 2. 2: Desenho típico de um projeto e construção de edifícios com estruturas de concreto armado de acordo com a patente de Hennebique em 1892 (HELENE & ANDRADE, 2007).....	25
Figura 2. 3: Complexo Olímpico de Barcelona. (HELENE 2002).	28
Figura 2. 4: Torre de Comunicação de Barcelona com 268m de altura. (HELENE 2002).....	28
Figura 2. 5: Arco de la Defense em Paris (WIKIPÉDIA).	29
Figura 2. 6: Edifício Taipei 101 na Tailândia, utilizando estrutura mista aço/concreto. (WIKIPÉDIA).....	29
Figura 2. 7: Museu de Arte Contemporânea de Niterói. (www.almacarioca.com.br)	29
Figura 2. 8: Superior tribunal de justiça de Brasília. (WIKIPÉDIA).	29
Figura 2. 9: Centro empresarial das nações unidas em São Paulo. (WIKIPÉDIA). ..	30
Figura 2. 10: Edifício E- Tower em São Paulo. (METHA, 2008).....	30
Figura 2. 11: Equipamento para o ensaio de fator de compactação (METHA & MONTEIRO, 2008).	42
Figura 2. 12: Equipamento para o ensaio Vebe (METHA & MONTEIRO, 2008).	43
Figura 2. 13: Diagrama tensão por deformação do concreto para diferentes resistências.....	48
Figura 2. 14: Curva de distribuição normal do concreto.	51
Figura 3. 1: Componentes do Tensor Tensão.	59
Figura 3. 2: Conceito de deformação: (A) rotação sem deformação; (B) Deformação por cisalhamento; (C) deformação por alongação. (BRETAS E D'AVILA, 2000).....	61
Figura 3. 3: Movimentação de uma discordância dentro de uma rede cristalina, devido à aplicação de tensões tangenciais (ou de cisalhamento).....	61
Figura 3. 4: Deformação de um fluido (SCHRAMM, 2006).....	62
Figura 3. 5: Lei de Newton para viscosidade de um fluido.	64
Figura 3. 6: Reograma de diferentes tipos de fluidos em regime permanente.....	67
Figura 3. 7: Curva de escoamento para um fluido Binghamiano. (FERRARIS, 1996).	73

Figura 3. 8: Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento teórica; (c) deficiência de partículas dispersas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas. (PANDOLFELLI, 2000).	81
Figura 3. 9: Reologia do concreto: tensões críticas iguais com diferentes viscosidades. (FERRARIS, 1996; 1999).	93
Figura 3. 10: Reologia do concreto: viscosidades iguais com diferentes tensões críticas. (FERRARIS, 1996; 1999).	94
Figura 3. 11: Ensaio de abatimento de tronco de cone.	101
Figura 3. 12: Aparelho de abatimento de tronco de cone modificado. Haste no centro da base e disco deslizante. (FERRARIS & de LARRARD, 1998).	103
Figura 3. 13: Aparelho de abatimento de tronco de cone modificado. Posicionamento do equipamento para realização do ensaio.	103
Figura 3. 14: Esquema de ensaio de abatimento de tronco de cone modificado. (FERRARIS & de LARRARD, 1998).	104
Figura 3. 15: Comparação entre a tensão de escoamento experimental medida com o reômetro e para o modelo de Hu (equação 3.5). (FERRARIS & de LARRARD, 1998).	106
Figura 3. 16: Comparação entre a tensão de escoamento experimental medida com o reômetro e para a equação 3.6. (FERRARIS & de LARRARD, 1998).	106
Figura 3. 17: Ábacos para estimar a tensão de escoamento e a viscosidade do concreto para os valores do abatimento de tronco de cone modificado (concreto com densidade de 2400 kg/m ³). (FERRARIS & de LARRARD, 1998).	107
Figura 3. 18: Representação esquemática do plastômetro de Powers e Wiler. (HOPPE et al, 2006).	108
Figura 3. 19: Reômetro BTRHEOM, baseado no conceito placa/placa. (FERRARIS, 1999).	109
Figura 3. 20: Perfil reológico obtido através do reômetro. (PILEGGI et al, 2006).	110
Figura 3. 21: Esquema do reômetro utilizado na presente pesquisa (PILEGGI, 2001).	111
Figura 3. 22: Reômetro utilizado na pesquisa.	113
Figura 4. 1: Curva granulométrica da areia natural	117
Figura 4. 2: Curva granulométrica da brita de 16mm.	119

Figura 4. 3: Curva granulométrica da brita de 9,5mm.	120
Figura 4. 4: Análise da sílica ativa por microscopia eletrônica de varredura.....	122
Figura 4. 5: Análise da sílica ativa por microscopia eletrônica de varredura.....	122
Figura 4. 6: Procedimento de mistura adotado para o Concreto Convencional. AG = agregado graúdo, AM = agregado miúdo, A = água, C = cimento.	125
Figura 4. 7: Procedimento de mistura adotado para os concretos alto desempenho (CAD's). AG = agregado graúdo, AM = agregado miúdo, A = água, C = cimento, SA = sílica ativa, SP = superplastificante.....	125
Figura 4. 8: Procedimento de mistura adotado para o Micro concreto Alto Desempenho (MCAD). AG = agregado graúdo, AM = agregado miúdo, A = água, C = cimento, SA = sílica ativa, SP = superplastificante.	125
Figura 4. 9: Resistência à compressão (MPa) x Idade (dias) dos concreto ensaiados.	126
Figura 4. 10: Módulo de elasticidade (GPa) x Idade (dias) dos concretos.	127
Figura 4. 11: Esquema de montagem do aparato de filmagem.....	130
Figura 4. 12: Diversas fases do ensaio de abatimento dos concretos ensaiados...	131
Figura 4. 13: Reômetro de concreto utilizado no ensaio com o MCAD (Fonte: DEMa – UFSCar).....	133
Figura 4.14: MCAD sendo ensaiado no reômetro de concreto.....	134
Figura 4. 15: Computador utilizado para aquisição dos dados obtidos pelo reômetro.	134
Figura 5. 1:: Curvas do abatimento obtido pelo ensaio de tronco de cone em função do tempo para concretos ensaiados.	136
Figura 5. 2: Abatimento contínuo e gradual durante o tempo de medida do ensaio.	138
Figura 5. 3: Curva tensão de escoamento versus tempo para os quatro concretos ensaiados.	139
Figura 5. 4: Evolução dos tempos de abatimentos dos concretos ensaiados.....	140
Figura 5. 5: Curva viscosidade versus tempo para os concretos ensaiados utilizando-se as equações propostas por De Larrard (1998).	141
Figura 5. 6: Curva viscosidade versus tempo para os concretos ensaiados.....	142
Figura 5. 7: Curva ascendente de cisalhamento do MCAD, com 5 minutos de descanso.	145

Figura 5. 8: Curva de Cisalhamento do MCAD. As setas indicam o sentido de aplicação do cisalhamento.	146
Figura 5. 9: Curva de "torque de escoamento x tempo de descanso do concreto" do MCAD ensaiado.....	148
Figura 5. 10: Curva de "viscosidade de torque x tempo de descanso do concreto" do MCAD ensaiado.....	148
Figura 5.11: Relação entre a tensão de escoamento (t_o) e o toque de escoamento (g).....	150
Figura 5. 12: Relação entre a tensão de escoamento (t_o) e o abatimento de tronco de cone.	150
Figura 5. 13: Relação entre o torque de escoamento (g) e o abatimento de tronco de cone.	151
Figura 5. 14: Relação entre a viscosidade plástica (μ) e a viscosidade de torque (h).	151
Figura 5. 15: Relação entre a viscosidade plástica (μ) e o abatimento de tronco de cone.	152
Figura 5. 16: Relação entre a viscosidade de torque (h) e o abatimento de tronco de cone.	152
Figura 5. 17: Relação entre o abatimento e a tensão de escoamento em relação ao tempo de abatimento.....	153
Figura 5. 18: Relação entre o abatimento e o torque de escoamento em relação ao tempo de abatimento.....	153
Figura 5. 19: Relação entre a viscosidade plástica e de torque em relação ao tempo de abatimento.	154
Figura 5. 20: Cone de acrílico.	156
Figura 5. 21: Equipamentos utilizados para visualização do abatimento do concreto.	156
Figura 5. 22: Posição da filmadora em relação ao cone de acrílico.	157
Figura 5. 23: Seqüência do ensaio de abatimento utilizando o tronco de cone de acrílico.	158

Lista de Tabelas

Tabela 3. 1: Modelos reológicos aplicados ao concreto no estado fresco. (FERRARIS, 1996).	73
Tabela 3. 2: Evolução dos parâmetros reológicos durante a utilização do concreto fresco. Interpretação e correção do problema encontrado. (CASTRO, 2007).	79
Tabela 3. 3: Esquema da nomenclatura para trabalhabilidade [TATTERSALL & BANFILL (1983); TATTERSALL (1991b)].	88
Tabela 4. 1: Caracterização do cimento CPV-ARI-Plus. 116	
Tabela 4. 2 Caracterização da areia natural	117
Tabela 4. 3: Valores da porcentagem retida acumulada da brita 16 mm.	118
Tabela 4. 4: Caracterização da brita 16 mm.	118
Tabela 4. 5: Valores da porcentagem retida acumulada da brita 9,5 mm.	119
Tabela 4. 6: Caracterização da brita 9,5mm.	119
Tabela 4. 7: Características físicas e químicas da sílica ativa utilizada.	121
Tabela 4. 8: Comparativo do tamanho das partículas dos materiais.....	122
Tabela 4. 9: Composição padrão do concreto de alto desempenho.	123
Tabela 4. 10: Composição dos concretos utilizados nesta pesquisa.	124
Tabela 4. 11: Resistência à compressão dos concretos ensaiados nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias.	126
Tabela 4. 12: Módulo de Elasticidade dos concretos ensaiados nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias.	127
Tabela 5. 1: Resultados do abatimento obtido pelo ensaio de tronco de cone para os quatro concretos ensaiados. Abatimentos medidos em [mm]. 136	
Tabela 5. 2: Resultados da tensão de escoamento dos quatro concretos ensaiados.	138
Tabela 5. 3: Tempos de abatimento parcial dos concretos ensaiados.....	140
Tabela 5. 4: Resultados da viscosidade dos concretos ensaiados utilizando-se as equações propostas por De Larrard (1998).	141
Tabela 5. 5: Resultados da viscosidade dos concretos ensaiados.	142
Tabela 5. 6: Valores de g e h para o MCAD, considerando a parte ascendente da curva de cisalhamento.....	147
Tabela 5. 7: Valores das incertezas máximas medidas no sistema.	160

Sumário

1 Introdução	17
2 Materiais Compósitos à Base de Cimento: Concretos.....	22
2.1 Definição, Histórico e Aplicações	22
2.2 Materiais constituintes	30
2.2.1 Cimento	31
2.2.2 Agregados	32
2.2.3 Água	34
2.2.4 Aditivos superplastificante	35
2.2.5 Sílica	37
2.3 Principais propriedades	39
2.3.1 Concreto fresco	39
2.3.2 Concreto endurecido	46
2.4 Classificações.....	51
2.4.1 Tipos principais de concreto.....	51
2.4.2 Concreto convencional.....	52
2.4.3 Concreto de alto desempenho	52
3 Reologia dos Materiais Cimentícios.....	55
3.1 Definição.....	55
3.2 Principais Conceitos	58
3.2.1 Tensão.....	58
3.2.2 Deformação	60
3.2.3 Viscosidade	63
3.3 Modelos reológicos.....	65
3.3.1 Fluidos Newtonianos	65
3.3.2 Fluidos não-Newtonianos	66
3.4 A Reologia do Concreto	71
3.4.1 A Reologia do Concreto Fresco	72
3.4.2 Reologia da pasta de cimento.....	75
3.4.3 Reologia da argamassa.....	77
3.5 Fatores que Influenciam no Comportamento Reológico do Concreto.....	78

3.5.1 Distribuição Granulométrica e Empacotamento das Partículas	80
3.5.2 Estado de dispersão das partículas	82
3.5.3 Efeito da Vibração	85
3.6 Trabalhabilidade do concreto fresco	87
3.6.1 Definição de trabalhabilidade	87
3.6.2 Metodologias de avaliação existentes	89
3.7 Principais parâmetros reológicos: Tensão de escoamento e viscosidade plástica	91
3.7.1 Influência dos materiais nos parâmetros reológicos do concreto	94
3.7.2 Métodos de Ensaio existentes.....	97
4 Programa Experimental.....	114
4.1 Dosagem do Concreto.....	115
4.1.1 Caracterização dos materiais.....	115
4.1.2 Composição.....	123
4.1.3 Procedimento de mistura	124
4.1.4 Propriedades Mecânicas	126
4.2 Caracterização reológica do concreto.....	127
4.3 Obtenção dos parâmetros reológicos através do ensaio de tronco de cone modificado.	128
4.4 Obtenção dos parâmetros reológicos através do ensaio Reométrico – Reômetro de modelo Planetário.....	132
5 Resultados Obtidos	135
5.1 Determinação dos parâmetros reológicos através do tronco de cone modificado	136
5.1.1 Determinação e avaliação da tensão de escoamento	136
5.1.2 Determinação e avaliação da viscosidade	140
5.2 Determinação dos parâmetros reológicos utilizando o reômetro de concreto ..	143
5.2.1 Determinação e avaliação da trabalhabilidade do MCAD através dos parâmetros reológicos obtidos com o reômetro de concreto.....	146
5.3 Correlação entre os resultados do MCAD obtidos com o ensaio de tronco de cone modificado e com o reômetro de concreto.	149
5.3.1 Correlação entre o abatimento de tronco de cone, tensão de escoamento (t_0) e torque de escoamento (g).	149

5.3.2 Relação entre o abatimento de tronco de cone, viscosidade plástica (μ) e viscosidade de torque (h).	151
5.3.3 Correlação entre os parâmetros reológicos, abatimento de tronco de cone e tempo de abatimento.	153
5.4 Obtenção, por visualização, da curva de abatimento de tronco de cone tradicional	154
5.5 Análise de Incertezas dos Resultados Experimentais	159
6 Conclusões e etapas futuras	161
6.1 Sugestões para pesquisas futuras	163
7 Referências.....	165

1

Introdução

IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Desde o surgimento do concreto, no início do século XIX (VASCONCELOS, 1992), até os dias de hoje, o aparecimento de novas tecnologias e de novos materiais para a construção civil possibilitou um grande desenvolvimento nesta área. Nos últimos anos, com o surgimento dos aditivos químicos – superplastificantes – e a utilização das adições minerais – sílica – na indústria do concreto, esse avanço acelerou consideravelmente. Hoje em dia, é grande a variedade de tipos de aditivos, e muitos deles visam melhorar a trabalhabilidade do concreto.

Durante muitos anos produziram-se concretos para fins estruturais com resistências a compressão aos 28 dias entre 15 e 25 MPa, adequado para serem usados em um grande número de obras. Entre as décadas de 70 – 80 surge os Concretos de Alto Desempenho (CAD), cuja característica é a de um concreto com um baixo fator água/cimento (a/c) e uma resistência acima da habitual. No Brasil seu uso começa após 1984, com a introdução da sílica ativa no concreto. Daí em diante sua utilização vem se multiplicando e, segundo Helene (2003), um dos edifícios empregando o CAD obteve o recorde mundial na resistência à compressão do concreto colorido – Edifício E-Tower, construído no Brasil.

Sendo o concreto um material compósito, entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento), em termos reológicos, a exigência por parâmetros que melhor definam suas características fez com que novos estudos fossem iniciados.

Entretanto, a pasta de cimento não se configura como um líquido homogêneo, sendo composta por partículas (grãos de cimento) e um líquido (água). Considerar o concreto como um fluido com comportamento reológico não é recente (FERRARIS, 1996, 1999). Para se estudar o seu comportamento à deformação no estado fresco, é adequado buscar os conceitos da reologia. Nos últimos anos a importância do estudo reológico do concreto fresco toma proporções cada vez maiores.

As propriedades reológicas do concreto no estado fresco são importantes para a indústria da construção, pois o concreto é utilizado em sua forma fluida dentro de formas e podem ser determinadas em qualquer momento durante o período de indução da hidratação do cimento (CHAPPUIS, 1991).

Tradicionalmente, o comportamento do concreto no estado fresco é resumido em uma única palavra: trabalhabilidade, que não corresponde a uma propriedade intrínseca do material. Ela está relacionada ao tipo de construção e aos métodos de lançamento, adensamento e acabamento do material.

A trabalhabilidade é uma propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade do concreto fresco; e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação. A qualidade do concreto fresco é determinada por sua homogeneidade e pela facilidade com a qual esse material pode ser misturado, transportado, adensado e acabado. As propriedades da trabalhabilidade estão associadas a qualidade do material, ou seja a sua capacidade de escoamento (fluidez), que está relacionada com a consistência e a coesão, que é uma medida da compactabilidade e da capacidade de acabamento, e descreve a resistência à exsudação ou à segregação. Dessa maneira, a importância da trabalhabilidade na tecnologia dos concretos é bastante óbvia, independente da sofisticação usada nos procedimentos de dosagem e de outras considerações, tais como o custo. Uma mistura de concreto, que não pode ser lançada facilmente ou adensada em sua totalidade, provavelmente não apresentará as características de resistência e durabilidade inicialmente desejadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Muitos métodos de ensaio foram desenvolvidos para medir a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Todos esses métodos dependem da consideração implícita de que o número de constantes no conjunto de variáveis é apenas um, de maneira que a trabalhabilidade possa ser expressa em termos de um valor unitário. Embora esses métodos de ensaio sejam úteis como ferramentas para o controle de

qualidade do concreto, eles são, em grande parte, medidas qualitativas baseadas em escalas definidas arbitrariamente (SAAK; JENNINGS; SHAH, 2004).

Em sua maioria as normas técnicas especificam diferentes métodos de ensaio para a avaliação da trabalhabilidade, e a razão para isso é que nenhum deles é capaz de abranger a grande variação de trabalhabilidade utilizada na prática. Entre os métodos de ensaio existentes está o ensaio de abatimento de tronco de cone (NBR NM 67/98).

No caso dos concretos de alto desempenho a trabalhabilidade é avaliada principalmente pelo ensaio de abatimento de tronco de cone, que é uma medida da estabilidade ou da coesão da mistura sob condições estáticas de ensaio e cuja análise de resultados não passa de uma avaliação qualitativa (JOHNSTON, 1990, SAAK; JENNINGS; SHAH, 2004) Entretanto, o ensaio de abatimento de tronco de cone assume pouca relevância com relação à estabilidade ou com a compactabilidade, sobretudo quando o concreto está submetido a condições de vibração de lançamento, o que não deixa de ser uma condição freqüentemente empregada na prática.

O ensaio de abatimento do tronco de cone é recomendado para concretos com abatimentos variando entre 25 mm e 175 mm, o que corresponde a consistências variando entre os estágios de consistência média a mole; dessa maneira, esse método de ensaio não parece caracterizar corretamente a trabalhabilidade dos CAD com consistência fluida, uma vez que seus abatimentos geralmente são maiores que 200 mm (CASTRO, 2007). Além disso, sabe-se que, na prática, concretos com mesmo abatimento ou mesma fluidez poderão apresentar diferentes trabalhabilidades (YEN et al., 1999).

Entretanto, a investigação reológica direta do concreto não é difícil apenas devido à escala envolvida (necessidade de uma grande quantidade de material), mas também porque dispositivos de leitura para tais operações em grande escala nem sempre são muito sofisticados e são caros, como é o caso dos reômetros. Assim, não é muito comum o uso da reologia para se estudar trabalhabilidade do concreto. Geralmente, o abatimento é o único parâmetro medido e, está relacionado com a tensão de escoamento. Os estudos raramente fornecem informações adicionais sobre o comportamento ao escoamento desses materiais, ou seja, sobre o comportamento do concreto sob maiores taxas de cisalhamento. Além do mais, o ensaio de abatimento de tronco de cone é uma avaliação empírica.

Buscando um equipamento que suprisse a necessidade de se fornecer os dois parâmetros reológicos que caracterizam o comportamento de um concreto no estado fresco, foi proposto por De LARRARD em 1998, o ensaio de abatimento do tronco de cone modificado, que tem sido usado como um método de ensaio capaz de determinar os dois parâmetros reológicos do concreto.

O ensaio do tronco de cone modificado permite avaliar a tensão crítica e a viscosidade plástica do concreto, de maneira simples e sem grandes custos, uma vez que reômetros de laboratórios podem ser aparelhos sofisticados e relativamente caros.

Dessa maneira, o presente trabalho faz parte do conjunto das pesquisas que vem sendo desenvolvidas pelo Grupo de Pesquisas da UNESP de Ilha Solteira intitulado Reologia dos Materiais Viscosos e Viscoplasticos (RMVP) e tem como objetivo avaliar a trabalhabilidade de concretos de alto desempenho a partir de conceitos reológicos. Com isso, a influência de alguns fatores pode ser observada com uma maior precisão. Para isso, pretende-se determinar o melhor comportamento para as misturas de alto desempenho, ou seja, a mistura que apresenta a menor perda da sua trabalhabilidade ao longo do tempo.

A avaliação da tensão crítica e da viscosidade obtida pelo teste do tronco de cone modificado de compósitos à base de cimento, foram avaliados para misturas de concreto convencional (CC) e de concreto de alto desempenho (CAD), elaborados com cimento CPV ARI-Plus. Este teste foi escolhido por ser um método utilizado em campo e com custo baixo, se comparado com o reômetro de concreto.

Para a avaliação da tensão crítica e da viscosidade plástica do concreto, foram feitas correlações entre os resultados obtidos no reômetro de concreto e os resultados obtidos com o ensaio do abatimento modificado. As limitações do reômetro de concreto utilizado, reômetro de modelo planetário, exigiram um concreto com agregados graúdos de granulometria específica de 9,5 mm. Foi desenvolvido, portanto, um concreto com as mesmas especificações dos demais, porém com brita de granulometria de 9,5mm, para o qual foram realizados ensaios reométricos e com o cone de Abrams modificado, cujos resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que o torque de escoamento apresentou boa correlação com o abatimento.

Com o intuito de determinar a curva de abatimento em função do tempo foi realizado um ensaio do abatimento normal, utilizando um cone de abatimento de concreto feito de material acrílico transparente, construído especificamente para este

fim, que possibilitou a filmagem da “descida” do concreto.. Esta ferramenta proporcionou obter a visualização do movimento do abatimento do concreto. Com os dados da filmagem que permitiu obter o tempo exato de descida foi traçado uma curva de abatimento por tempo de abatimento e, através dela foi possível compreender melhor o comportamento dinâmico do concreto.

ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, este trabalho, apresenta outros seis capítulos, distribuídos da seguinte maneira:

Capítulo 2 – Aborda uma revisão sobre os materiais compósitos à base de cimento: Concreto: definição, histórico do concreto, abordando aspectos referentes às suas definições, aplicação, vantagens. Também neste capítulo, apresentam-se os materiais constituintes e as principais propriedades e classificação do material concreto.

Capítulo 3 – Apresenta os principais conceitos relacionados à Reologia dos Materiais Cimentícios: conceitos de reologia, a classificação dos modelos reológicos e a reologia dos materiais concreto fresco, argamassa e pasta de cimento. Também serão abordados os fatores que influenciam o comportamento reológico do concreto, a trabalhabilidade e os principais parâmetros reológicos. A reometria clássica é apresentada neste item, com a abordagem sobre os tipos e modelos de reômetros.

Capítulo 4 – O procedimento experimental adotado é apresentado no presente capítulo através da apresentação da metodologia dos ensaios necessários à realização desse trabalho. Entre estes procedimentos destacamos o ensaio de abatimento de tronco de cone modificado e o ensaio com o reômetro de concreto.

Capítulo 5 – Os resultados principais obtidos até então são apresentados, neste capítulo, bem como as discussões necessárias ao entendimento dos mesmos. A visualização da imagem do abatimento do concreto em tempo real para elaboração da curva de abatimento em função do tempo é apresentada neste item, assim como o levantamento estatístico realizado neste caso.

Capítulo 6 – São apresentadas as conclusões do projeto de estudo e as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 7 – A bibliografia utilizada e consultada para realização deste trabalho é apresentada neste capítulo.

2

Materiais Compósitos à Base de Cimento: Concretos

2.1 Definição, Histórico e Aplicações

A mistura, em proporções prefixadas, de um aglomerante (cimento) com água e agregados (areia, brita e cascalho), formando uma massa viscosa e de consistência plástica é denominada de concreto. Essa massa deve endurecer e ser capaz de suportar cargas com o passar do tempo.

“O concreto surgiu com o desejo de se criar uma pedra artificial resistente, econômica e durável como a pedra natural, e que apresentasse como vantagem a possibilidade de ser moldada nas dimensões e nas formas desejadas” (PINHEIRO et al., 1986).

Seu histórico está intimamente ligado ao histórico do cimento. Segundo relata Kaefer (1998) a utilização de cimento e do concreto ao longo da história pode ser assim resumida:

12.000.000 a.C. – Israel: reações entre calcário e argila xistosa durante combustão espontânea formaram um depósito natural de compósitos de cimento. Este é o cimento natural, o primeiro a ser utilizado pelo homem;

4.000 a.C. – Iraque: escavações arqueológicas revelaram vestígios de uma construção de aproximadamente 4.000 a.C. executada parcialmente em concreto;

3.000 a.C. a 2.500 a.C. – Egito: uso de barro misturado com palha para fabricação de tijolos (secos ao ar livre) e de argamassas de gipsita e de cal na construção das pirâmides;

500 a.C. – Atenas: apesar de o cimento e a argamassa não terem sido usados na Grécia para a construção de paredes ou fundações, o cimento hidráulico já era conhecido desde o começo do século V a.C. e foi utilizado para revestir fontes atenienses desse período;

300 a.C. a 476 d.C. – Império Romano: o concreto foi usado na construção dos muros de uma cidade romana no século IV a.C. situada a 64 km de Roma. No século II a.C. este material começou a ser usado em edificações em Roma. A pozolana de Pozzuoli, Itália, localidade próxima ao Monte Vesúvio, foi utilizada em argamassas para construir a Via Ápia, os banhos romanos, o Coliseu e o Pantheon.

Idade Média: os arquitetos medievais utilizaram pedras na maioria de suas construções. Somente nos edifícios mais importantes eram utilizadas fundações com um concreto resistente constituído por pedregulhos e argamassa de cal. Este período não trouxe inovações para o emprego de argamassas e concretos, pelo contrário, a qualidade dos materiais cimentícios decaiu, extinguindo-se o uso da cal pozolânica. Inovações expressivas só começaram a ocorrer no século XVIII no que se refere ao uso de cimentos e argamassas.

Segundo Olin et al. (1995), um fabricante de tijolos, Joseph Aspdin, residente na cidade de Leeds, Inglaterra, formulou um novo tipo de cimento a partir da queima de calcário e argila, moídos e misturados a altas temperaturas até que o gás carbônico (CO₂) fosse retirado. O material obtido era moído, adquirindo a aparência de pó.

Aspdin (1924) denomina este cimento como cimento Portland em homenagem às jazidas de excelente pedra para construção existentes em Portland, Inglaterra. Porém, é duvidoso que esse cimento tenha sido queimado a uma temperatura suficiente para se produzir o clínquer, como são os cimentos Portland atuais.

O cimento Portland atual é produzido a partir da queima de uma mistura definida de rocha calcária e argila, finamente moídas, resultando no clínquer. Além disso, nos relatos que constam desta época, não há nada especificando proporções dos ingredientes empregados na mistura para afirmar se o cimento produzido por Aspdin em 1924 possui as mesmas características do cimento produzido atualmente.

O barco construído pelo francês Joseph Lambot em 1849 é um marco na história do concreto por ser tido como o surgimento oficial do concreto armado (VASCONCELOS, 1992). Numa tentativa de evitar os problemas com a manutenção de canoas de madeira, optou-se pela durabilidade e pouca manutenção do concreto em meios aquáticos. Na Figura 2. 1 é ilustrado um dos barcos de Lambot, com aproximadamente 4 m de comprimento por 1,3 m de largura e 4 cm de espessura. Joseph Monier também é considerado um dos precursores do uso do concreto com a construção de vasos em 1867 (e postes e vigas em 1878), basicamente em argamassa armada.

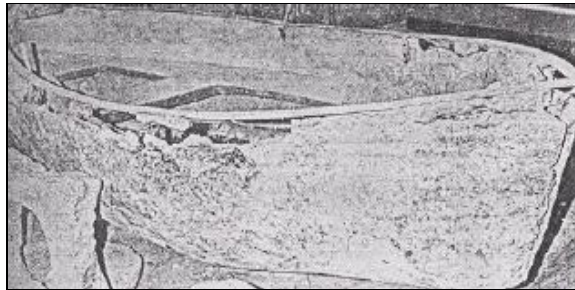


Figura 2. 1: Remanescente de um barco de Lambot. (KAEFER, 1998).

Ainda no século XIX, pesquisadores do quilate de Louis Vicat, Henry Le Châtelier e René Féret trataram de tornar esse novo material, o concreto de cimento Portland, mais conhecido e mais confiável, resultando no interesse de seu uso generalizado em estruturas (HELENE; ANDRADE, 2007).

Com o embasamento teórico e experimental sobre a confiabilidade desse novo material estrutural, assegurado por esses e outros pesquisadores, e, dispondo de um produto industrializado, o francês François Hennebique, construtor, desenvolveu o sistema e obteve uma patente, em 1892, para o completo projeto e construção de edificações com base num novo processo construtivo por ele denominado de “béton armé” (Figura 2. 2) (HELENE; ANDRADE, 2007).

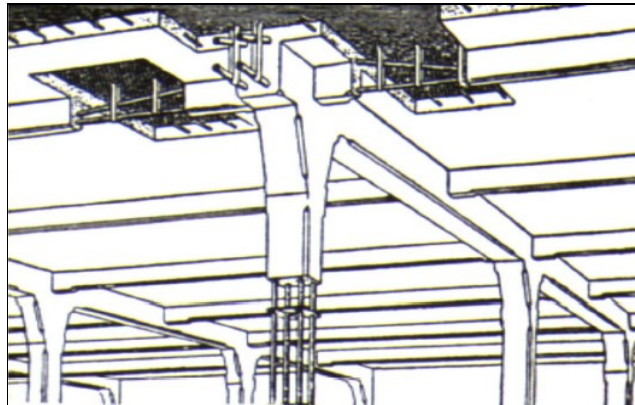


Figura 2. 2: Desenho típico de um projeto e construção de edifícios com estruturas de concreto armado de acordo com a patente de Hennebique em 1892 (HELENE & ANDRADE, 2007).

O alto índice de utilização do concreto, ao longo da história, se deve a diversos fatores. A facilidade de se encontrar material para a sua composição a um custo baixo é o principal fator, além de sua facilidade de execução, resistência à água e adaptação a vários tipos e tamanhos de fôrma.

O concreto, também, é um material que apresenta agressão ao meio ambiente relativamente baixa e exige pouco consumo de energia em sua produção, além de poder reciclar restos industriais ou, até mesmo, permitir a adição de novos materiais tais como as fibras de aço e polipropileno, fibras de borracha entre outros materiais.

Segundo Metha (1994), *“o concreto é o material estrutural dominante hoje em dia. No futuro, para selecionar os materiais de construção os engenheiros considerarão não somente os atrativos técnicos e econômicos dos materiais, mas também as implicações ecológicas e de conservação de energia do uso destes materiais. A julgar pelos parâmetros possíveis de estimar, o futuro do concreto deverá ser ainda melhor, porque o material parece possuir as mais fortes qualificações gerais para uso estrutural. Comparado a outros materiais de construção, o concreto não é apenas energeticamente mais eficiente, mas também ecologicamente harmônico. A aplicação em larga escala dos princípios da ciência dos materiais à tecnologia de produção do concreto oferece a expectativa de que no futuro o produto será consideravelmente superior em resistência, elasticidade e tenacidade do que o disponível atualmente”*.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO: CONCRETO

O desenvolvimento da construção civil permitiu o aprimoramento de técnicas empregadas em edificações, assim como o surgimento de novas tecnologias e materiais possibilitaram o surgimento de novos tipos de concretos.

Esses concretos visam fornecer ou melhorar características do material concreto, aumentando, assim, a vida útil das peças e estruturas. A adição de novos materiais tais como sílica ativa, superplastificantes, pozolanas entre outros causaram uma revolução no concreto, melhorando muito o seu desempenho se comparado aos concretos sem adições.

Segundo Aïtcin (2000), um concreto de alto desempenho (CAD) é essencialmente um concreto que apresenta uma relação água/aglomerante baixa. O valor de 0,40 é sugerido como limite entre concreto convencional e concreto de alto desempenho. Esse valor se aproxima do valor teórico proposto por Powers (1968).

As propriedades do CAD são superiores às propriedades do concreto convencional. À medida que a relação água/aglomerante se distancia de 0,40, as propriedades dos concretos começam a apresentar bastante diferença. Essa diferença não está relacionada apenas a resistência mecânica, mas também à sua microestrutura.

Além da alta resistência à compressão, o CAD apresenta baixa porosidade e permeabilidade tornando-se um material de alta resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, de modo a oferecer resistência contra ataques à armadura. Também apresenta maior resistência a carbonatação, por dificultar o ataque de agentes agressivos gasosos como o CO₂. A resistência à abrasão do CAD é maior que a dos concretos convencionais, não somente devido à alta resistência do concreto, mas também devido à boa aderência entre o agregado graúdo e a matriz, que impedem o desgaste diferencial da superfície (NEVILLE, 1997).

A utilização do concreto de alto desempenho se deu no início dos anos 60, na cidade de Chicago, Estados Unidos, quando pequenas quantidades desse concreto foram usadas em estruturas importantes que estavam sendo construídas: usando a estratégia de concretar de maneira alternada as colunas principais da edificação eram executadas com o concreto experimental, isto é, com concreto de resistência à compressão de 10 MPa a 15 MPa superior ao concreto até então utilizado. Com esse estratégia conseguiu-se triplicar a quantidade de concretos usados nos

edifícios da cidade de Chicago devagar e progressivamente durante dez anos, aumentando a resistência de 15MPa / 20 MPa para 45MPa/60MPa (AÏTCIN, 2000).

No Brasil, o CAD começou a ser pesquisado e introduzido a partir de 1985, ocasião em que foram produzidos os primeiros elementos estruturais de alto desempenho (pilares, vigas e lajes) para a então CDH – Companhia de Desempenho Habitacional, a atual CDHU – Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (LIBÓRIO, 1985).

Este tipo de concreto apresenta inúmeras vantagens técnicas e econômicas sobre o concreto convencional. Dentre as vantagens técnicas, alguns autores ressaltam as altas resistências à compressão quer seja nas primeiras idades como nas idades mais avançadas; menor retração de secagem; redução da deformação lenta (fluência) sob cargas de longa duração; excelente aderência ao substrato de concreto já endurecido, adequado para retomada de concretagens, pisos, revestimentos, reparos e reforços; reduzida carbonatação; alto módulo de elasticidade. Além disso, a bibliografia mostra que o CAD apresenta vantagens econômicas que são estruturas duráveis com baixo custo de manutenção; elementos estruturais de menores dimensões; economia nas fundações, em fôrmas de pilares e vigas e em armaduras para pilares; maior resistência para a mesma dimensão de fundação, o que possibilita aumento do número de pavimentos; prazos curtos de desfôrma.

O CAD transforma o concreto convencional em um material com melhor desempenho, o que permite aos projetistas usarem-no eficientemente em estruturas cada vez mais esbeltas, além de ser esteticamente mais interessante. O gosto dos empreiteiros pelo seu uso deve-se à desfôrma mais rápida dos elementos estruturais (AÏTCIN, 2000).

Como exemplo de sua utilização tem-se, a construção do Complexo Olímpico de 1992 em Barcelona Espanha, ilustrado na Figura 2. 3; a torre de comunicações de Barcelona com 268 m de altura, que foi estaiada para sua maior segurança, a qual é apoiada sobre uma coluna vazada de concreto com cerca de 185 m de altura e 3,0 m de diâmetro ilustrado na Figura 2. 4; o Arco de la Defense em Paris. (LEVY, 2002), Figura 2. 5 e o edifício Taipei 101 (Taipei/Taiwan –2004), Figura 2. 6.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO: CONCRETO

No Brasil, tem-se como exemplo o Museu de Arte Contemporânea em Niterói, ilustrado na Figura 2. 7; o Centro Empresarial Nações Unidas em São Paulo, ilustrado na Figura 2. 9; o Superior Tribunal de Justiça em Brasília (Figura 2. 8); e o edifício E-Tower, Figura 2. 10, considerado um recorde em concreto colorido de alto desempenho (resistência à compressão de 125 MPa e relação água/cimento de 0,19 – (HELENE, 2003), concluído em 2005.



Figura 2. 3: Complexo Olímpico de Barcelona. (HELENE 2002).



Figura 2. 4: Torre de Comunicação de Barcelona com 268m de altura. (HELENE 2002).

2 MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO: CONCRETO



Figura 2. 5: Arco de la Defense em Paris (WIKIPÉDIA).



Figura 2. 7: Museu de Arte Contemporânea de Niterói. (www.almacarioca.com.br)



Figura 2. 6: Edifício Taipei 101 na Tailândia, utilizando estrutura mista aço/concreto. (WIKIPÉDIA).



Figura 2. 8: Superior tribunal de justiça de Brasília. (WIKIPÉDIA).



Figura 2. 9: Centro empresarial das nações unidas em São Paulo. (WIKIPÉDIA).



Figura 2. 10: Edifício E- Tower em São Paulo. (METHA, 2008).

2.2 Materiais constituintes

Os componentes de um CAD não são apenas os quatro materiais básicos que compõem um concreto convencional – cimento, água, areia e agregado graúdo. Para se alcançar as características mecânicas, a durabilidade e as propriedades reológicas desejadas, aditivos superplastificantes, sílica ativa ou filers são utilizados para o controle da densidade de empacotamento desses concretos (CHOPIN; LARRARD; CAZACLIU, 2004).

Para o CAD, a qualidade dos materiais constituintes é de fundamental importância para o melhor desempenho do concreto. As propriedades dos agregados no CAD são muito mais importante que para o concreto convencional.

2.2.1 Cimento

O cimento é de extrema importância para o desempenho do CAD. Este material é responsável pela resistência da pasta e da aderência agregado-pasta. A natureza, dosagem e uniformidade são os principais fatores que influenciam neste concreto.

Quando se vai produzir uma pasta, argamassa ou concreto, especialmente de alto desempenho, a primeira escolha a ser feita é quanto ao tipo de cimento a ser empregado, mesmo quando um ou mais materiais cimentícios suplementares são incorporados à mistura. Isto porque seu desempenho em termos de reologia e de resistência torna-se um item crítico à medida em que a resistência à compressão desejada aumenta (AİTCIN, 2000).

O cimento Portland definido como um cimento hidráulico produzido pela pulverização do clínker consiste essencialmente em silicatos hidráulicos de cálcio, e contém usualmente uma ou mais formas de sulfato de cálcio como forma de adição.

Segundo (ALMEIDA, 2005), existem indicações de que o cimento deva possuir baixo teor de C_3A e altos teores de C_2S e C_3S . os teores de SO_3 não afeta significativamente a resistência à compressão do concreto.

Os diferentes tipos de cimento existentes não apresentam o mesmo desempenho quando se produz um CAD. Alguns possuem bom desempenho em termos de resistência mecânica, mas um péssimo comportamento reológico, o que dificulta o lançamento e o adensamento do material produzido; outros apresentam um ótimo desempenho em termos de reologia, porém seu desempenho quanto à resistência mecânica deixa a desejar. Assim, devido à grande variabilidade nas propriedades químicas e físicas do cimento, deve-se esperar que diferentes cimentos se comportem de diferentes maneiras na presença de um mesmo aditivo (CASTRO, 2007).

O cimento mais utilizado na elaboração do CAD é do tipo Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), cujos ensaios realizados para a caracterização físico-química são: Determinação da finura através de peneiramento NBR – 9202 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND-ABCP, 1985); Determinação da finura – Método de Blaine NBR NM – 76 (1998); Determinação do

tempo de pega NM – 65 (ABCP,1996); Massa específica aparente NBR – 7810 (ABCP, 1983); Massa específica absoluta NM – 23 (ABCP, 2000); Resistência à compressão do cimento NBR – 7215 (1996).

O Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) é definido pela norma brasileira NBR-5733/91 como “aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem do clínquer Portland, constituído em sua maior parte por silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais carbonáticos no teor especificado”.

O nome ARI vem de alta resistência inicial à compressão aos 7 dias, onde o mínimo é de 34,0 MPa. A composição deste tipo de cimento deve obedecer aos limites fixados pela NBR-5733/91.

2.2.2 Agregados

A escolha do agregado é de fundamental importância para a preparação do concreto de alto desempenho ou de elevadíssima resistência: no estado fresco, os agregados têm papel fundamental na determinação do custo e da trabalhabilidade das misturas de concreto; no estado endurecido, eles podem influenciar a resistência, a estabilidade dimensional e a durabilidade do material. Assim, é necessário conhecer macroscopicamente sua forma e sua textura superficial, visando melhorar e aumentar a aderência entre o agregado e a pasta de cimento, além de buscar a resistência mecânica adequada para o uso afim (CASTRO, 2007).

O conhecimento de algumas características dos agregados é uma exigência para a dosagem do concreto, enquanto outras são responsáveis pela determinação das propriedades do material no estado fresco. A composição mineralógica dos agregados afeta sua resistência à compressão, dureza, módulo de elasticidade e durabilidade que, por sua vez, interferem nas propriedades do concreto no estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

No CAD, o agregado constitui a parte mais frágil do sistema, isto porque esses concretos se comportam como compósitos, onde a tensão é compartilhada por seus dois componentes: agregados e pasta de cimento. Sob essas circunstâncias, a fase agregado se torna um fator limitante (SILVA, 2000), de maneira que o agregado a ser empregado na produção desses concretos deverá ser resistente, isento de alterações mineralógicas e provido de características cristalinas finas (CASTRO,2007). Mesmo com um agregado de alta resistência à compressão, a pasta pode ser o fator limitante para alto desempenho do concreto, ocorrendo ruptura na ligação agregado-pasta. Portanto, a resistência do agregado é uma condição necessária, porém não é suficiente (ALMEIDA, 2005).

A influência dos agregados no concreto começa no ato da mistura: a granulometria, a forma e a textura desses agregados definirão a compacidade e o consumo de água para uma dada trabalhabilidade. Com o avanço da hidratação, outras propriedades importantes do concreto, como porosidade, permeabilidade, resistência à tração, estrutura cristalina, coeficiente de expansibilidade térmica, dureza e composição química também serão influenciadas pelos mesmos (CASTRO,2007)

Muitos pesquisadores recomendam que a dimensão máxima do agregado graúdo a ser empregado na produção de um concreto seja inferior a 12,5 mm e com índice de forma adequado, argumentando que o uso de agregados com dimensões características maiores ($D_{m\acute{a}x} = 19 \text{ mm}$) influencia na resistência mecânica de várias maneiras. Porém essa é uma situação que deve ser analisada com bastante cuidado, pois sabe-se que em laboratório tem-se produzido, satisfatoriamente, CAD com agregados de dimensão máxima característica igual a 25 mm e com resistência à compressão acima de 100 MPa medida em corpos-de-prova cilíndricos.

Outra recomendação sugerida por Almeida (2005) quanto aos agregados é que sejam de alta resistência à compressão, com tensões superiores a 150 MPa. Isto se deve ao fato de existirem concentrações de tensão em torno das partículas de agregados, excedendo a tensão nominal de compressão aplicada ao concreto.

Sabe-se que a forma e a textura superficial das partículas de agregado influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que no estado endurecido. Devido ao entrelaçamento mecânico, a ligação da matriz pasta de

cimento e agregado é de responsabilidade da textura superficial do agregado graúdo (SILVA, 2000). Alguns estudos revelam que a forma ideal do agregado é a cúbica.

No caso do agregado miúdo, sua forma e textura têm um efeito significativo sobre a demanda de água de uma mistura; enquanto a lamelaridade e a forma do agregado graúdo geralmente tem um efeito apreciável sobre a trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 1997). As areias naturais e as artificiais têm sido empregadas com sucesso na confecção do CAD. Porém, para Almeida (2005) algumas referências de substituição da fração fina da areia natural por materiais calcários moídos podem elevar em até 40% a resistência à compressão e 15% da resistência à flexão.

Resumindo, o agregado ideal deve ser resistente, britado, cúbico, angular, bem graduado, limpo e possuir um mínimo de partículas alongadas ou achatadas (ALMEIDA, 2005).

2.2.3 Água

A água é um componente fundamental para o concreto, pois possui duas funções importantíssimas: uma química, que consiste em produzir as reações de hidratação; e outra física, onde estabelece determinadas características reológicas ao concreto para sua manipulação.

Sua qualidade desenvolve um papel importante na produção do concreto: impurezas contidas na água podem influenciar negativamente a resistência do concreto, causar manchas na superfície concretada e desenvolver um processo de corrosão da armadura (NEVILLE, 1997). Dessa maneira, deve-se dar atenção tanto à qualidade da água de amassamento quanto à da água utilizada na cura do concreto.

Segundo Aïtcin e Neville (2003) a relação água/cimento pode ser subdividida em duas partes: a primeira representa a quantidade de água necessária para a completa hidratação do cimento; e a segunda representa a quantidade de água adicional necessária para se obter uma trabalhabilidade adequada (água de trabalhabilidade). Dessa maneira, o concreto ideal deve conter água suficiente para

desenvolver a resistência máxima do cimento e, ao mesmo tempo, fornecer as propriedades reológicas necessárias ao seu lançamento (GRZESZCZYK; KUCHARSKA, 1990).

2.2.4 Aditivos superplastificante

Os aditivos superplastificantes (SP) foram utilizados pela primeira vez em concreto no final dos anos 60, simultaneamente no Japão e na Alemanha. Durante os anos 80, suas dosagens foram aumentadas pouco a pouco, até que se percebeu que eles poderiam ser usados como excelentes redutores de água (AÏTCIN, 2000). Assim, com o avanço da tecnologia dos concretos, o uso de adições químicas se tornou essencial para a produção de misturas de alto desempenho. Esses aditivos melhoram as propriedades do concreto nas primeiras idades sem apresentar efeitos adversos em idades avançadas.

A NBR 11768/92 define os aditivos superplastificantes também chamados de aditivos redutores de água, como produtos que aumentam o índice de consistência do concreto mantendo-se a quantidade de água de amassamento constante, ou ainda, como os produtos que possibilitam a redução mínima de 12% da água de amassamento na produção de um concreto com uma dada consistência. A dosagem deste aditivo pode variar, para os CAD's, entre 1% e 3% em relação à massa de cimento.

Neville (1997) define os superplastificantes como sendo polímeros orgânicos hidrossolúveis obtidos sinteticamente através de um processo de polimerização complexo utilizado na produção de moléculas longas e de massa molecular elevada, sendo, portanto, relativamente caros. Entretanto, suas características em relação ao comprimento das moléculas, ao serem produzidos para um fim específico, são otimizadas para um mínimo de entrelaçamento necessário, tornando, assim, a aplicação do produto viável.

O aumento da fluidez das argamassas e dos concretos no estado fresco é causado pelo efeito redutor de água promovido pela incorporação dos aditivos. Segundo Uchikawa et al., (1992). A adição desses aditivos orgânicos produz uma

camada de adsorção com cargas de mesmo sinal sobre as partículas de cimento e de hidratos, dispersando-as por meio de repulsão eletrostática.

Chiocchio e Paolini (1985) concluíram que o efeito fluidificante do SP depende de vários fatores, tais como a natureza e a concentração do aditivo, a composição e a temperatura da mistura fresca, o procedimento de mistura e o tempo de adição do polímero. Sua eficiência não está condicionada apenas por sua compatibilidade com o cimento, mas também pelas técnicas de mistura e transporte, pela correta dosagem, pela metodologia de incorporação, pelas condições ambientais e por uma total compreensão de todas as vantagens que podem ser obtidas com o seu uso.

Segundo Silva (2000) apud Castro (2007), a reologia do concreto de alto desempenho é influenciada por dois fenômenos contrapostos: a velocidade com a qual os diferentes componentes do cimento fixam as moléculas de água e a velocidade com que as moléculas de SP são fixadas pelos novos compostos que se formam nos primeiros instantes, isto é, logo após o início da hidratação do cimento. Existe, portanto, necessidade de se considerar dois conceitos fundamentais: a reatividade reológica de um cimento, definida como a rapidez com que suas partículas consomem a água nos primeiros instantes que seguem a mistura; e a compatibilidade cimento/SP, relacionada com a quantidade de moléculas de SP consumidas durante a hidratação (CASTRO, 2007).

A pasta de cimento deve ser suficientemente fluida para ser despejada no seu estado fresco, enquanto uma compacidade ótima, com teor de água limitado, tem que ser alcançada para a obtenção de uma alta resistência mecânica. O aperfeiçoamento do empacotamento de partículas obtido pela adição de agregado miúdo pode ser neutralizado pelo teor de água necessário para se obter uma pasta com a trabalhabilidade desejada (CASTRO, 2007) Deve-se, pois, fazer uso da incorporação de aditivos para ajustar a dosagem do concreto à sua finalidade (moldagem, bombeamento, vibração). Assim, é necessário controlar a influência dos aditivos sobre o comportamento reológico do concreto fresco.

A escolha do SP deve ser baseada na relação custo-eficiência, obtida por meio de comparações entre a curva *“tempo de escoamento versus dosagem de SP”* e através da determinação do ponto de saturação desse aditivo (AGULLÓ et al., 1999). É bom ressaltar que nem todos os cimentos que cumprem as especificações regulamentares têm o mesmo comportamento reológico com um dado SP quando se

trabalha com baixas relações água/aglomerante. Da mesma maneira, nem todos os SP que cumprem as normas interagem da mesma forma com um dado cimento. Assim, nunca se deve perder de vista o objetivo final da produção de concreto, que é cumprir as especificações exigidas pelo cliente, otimizando os recursos existentes e utilizando os materiais disponíveis na região.

2.2.5 Sílica

Segundo Aitcin (2000), a sílica é um produto decorrente do processo de fabricação do silício metálico ou do ferro silício, de onde é gerado o gás SiO, que ao sair do forno elétrico oxida-se, formando o SiO₂, sendo então captado por filtros manga e devidamente armazenado em silo para a sua comercialização. A Sílica age ativamente em concretos e argamassas, conferindo-lhes alta resistência e durabilidade.

As partículas de sílica ativa possuem cor que pode variar de cinza claro a escuro, dependendo do excesso de carbono residual proveniente do carvão combustível ou da madeira usados na carga do forno. Quando os gases ascendentes da zona de produção da liga esfriam muito rapidamente, uma parcela de carvão pode ficar sem se queimar no conduto de exaustão, produzindo uma sílica ativa de cor cinza mais escura em função da porcentagem de carvão residual. Caso a temperatura na parte superior do forno seja mantida em níveis elevados, a maior parte do pó de carvão ascendente queimará, originando uma sílica de cor mais clara. O conteúdo de ferro, em menor grau, parece também influenciar a cor da sílica ativa (MALHOTRA et al., 1992).

Sua utilização no concreto se deu a partir do final dos anos 70, na Escandinávia, e no Brasil a partir de 1984, essa adição mineral era importada pelo Engenheiro Epaminondas Melo do Amaral Filho, passando a ser coletada industrialmente em 1989 (CASTRO, 2006). Sua incorporação no concreto tem como objetivo melhorar a durabilidade do mesmo. Além disso, por se tratar de um rejeito industrial, o benefício ambiental de sua utilização, reduzindo as emissões perigosas lançadas na atmosfera durante a produção do cimento, fazendo com que matérias-

primas sejam preservadas e que haja economia de energia, deve ser também considerado.

Nas primeiras idades, a sílica ativa pode ser considerada um inerte, um material muito fino, mas não um aglomerante, uma vez que suas reações químicas não ocorrem na mesma taxa que as reações do cimento (AÏTCIN; NEVILLE, 2003).

A sílica, quando finamente subdividida e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (liberado pela hidratação do cimento), formando silicatos estáveis que têm propriedades cimentícias (NEVILLE, 1997). Essa reação entre a pozolana (sílica ativa) e o hidróxido de cálcio é denominada reação pozolânica. O efeito filer corresponde ao processo de refinamento dos poros associado à reação pozolânica: os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando, assim, a resistência e a impermeabilidade do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Os efeitos benéficos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto ocorrem devido à reação pozolânica e ao efeito filer, além de seu efeito químico relacionado com o desenvolvimento de cristais de portlandita (AÏTCIN, 2000).

O uso de sílica ativa resulta em concretos mais coesos (sem exsudação ou segregação) e é muito eficiente na produção de concretos fluidos. As pequenas partículas de sílica agem como esferas rolantes no concreto e passam a fazer parte da solução de água do poro, o que, conseqüentemente, promove o aumento da fluidez da mistura. Embora o concreto incorporado com sílica apresente uma aparência “pegajosa”, ele é mais fluido que grande parte dos concretos lançados em molde (ZAIN; SAFIUDDIN; YUSOF, 1999).

Assim, com a introdução de sílica ativa nos concretos, as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade dos mesmos são melhoradas, enquanto a permeabilidade e a porosidade capilar são reduzidas.

2.3 Principais propriedades

2.3.1 Concreto fresco

O concreto no estado fresco tem como principais propriedades a trabalhabilidade, segregação, exudação e tempo de pega. É considerado um fluido homogêneo e incompressível, que pode ser estudado pela ciência da reologia, desde que obedeça aos seguintes critérios:

- Não segregue durante o escoamento;
- Que seu volume permaneça constante durante o processo de cisalhamento, isto é, seja incompressível;
- Tenha abatimento maior que 100 mm.

Segundo Castro (2007), o comportamento do concreto no estado fresco é resumido, de forma tradicional, em uma única palavra: trabalhabilidade, que não corresponde a uma propriedade intrínseca do material.

Alguns autores dizem que o termo trabalhabilidade é usado como forma de abranger todas as qualidades necessárias a uma mistura, o que pode incluir, sob a mesma denominação geral, o requisito estabilidade, que significa dizer que a mistura é capaz de resistir à segregação e à exsudação (TATTERSALL; BANFILL, 1983). Obviamente, o nível de trabalhabilidade exigido para um concreto depende da situação para a qual o material será empregado.

A trabalhabilidade do concreto pode ser definida como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. É considerada a propriedade do concreto fresco que se refere à sua aptidão em ser facilmente misturado, transportado, colocado em formas e compactado, mantendo a sua integridade e homogeneidade, ou seja, evitando a segregação. É uma definição relativa, pois dependem também das dimensões, forma e armaduras das peças que com ele serão moldadas. É um termo que se refere às propriedades do concreto no estado fresco, isto é, às propriedades do concreto antes que se inicie a pega e seu endurecimento.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO: CONCRETO

A ASTM C 125-93 define a trabalhabilidade como a energia necessária para manipular o concreto fresco sem perda considerável da homogeneidade. Outra definição, dada pelo ACI 116R-90 descreve a trabalhabilidade como a facilidade e homogeneidade com que o concreto fresco pode ser manipulado desde a mistura até o acabamento.

Sendo a trabalhabilidade uma propriedade física, ela pode ser formalmente definida como sendo descrita por um conjunto de uma ou mais constantes que devem satisfazer certos critérios (TATTERSALL; BANFILL, 1983, TATTERSALL 1991b, CASTRO, 2007). São eles:

- A trabalhabilidade é só uma propriedade do concreto;
- A trabalhabilidade será expressa quantitativamente em termos de uma ou mais constantes físicas;
- Todas as constantes físicas devem ser expressas em termos de unidades fundamentais de massa, comprimento e tempo ou de unidades derivadas delas, tais como tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento. Em outras palavras, os resultados devem ser independentes do equipamento utilizado para determiná-los;
- As constantes devem ser tais que os valores de todas elas sejam numericamente os mesmos para dois ou mais materiais. Esses materiais se comportarão exatamente da mesma maneira para qualquer circunstância prática, ou seja, se dois concretos têm os mesmos valores numéricos para todas as constantes necessárias, seus comportamentos deverão ser iguais em qualquer situação.

Definir a trabalhabilidade com o rigor dos critérios acima listados, permitiria que a mesma fosse realmente expressa em termos quantitativos, entretanto, é difícil de se obter o rigor necessário. Assim sendo, o termo deve ser restrito ao uso mais geral, sem qualquer quantificação. É comum e válido, portanto, referir-se ao concreto em termos de trabalhabilidade, definindo-o como um concreto de baixa, média ou alta trabalhabilidade, sem tentar impor valores numéricos à descrição.

Castro (2007) sugere que duas classes de termos devem ser consideradas: uma geral ou qualitativa; e uma específica ou quantitativa relacionada aos resultados dos ensaios empíricos. Uma terceira é definida por Tattersall (1991b) incorporando

os termos de quantidades fundamentais rigorosamente definidos e que não devem ser usados em qualquer outra situação

É a homogeneidade e a facilidade com que o concreto no seu estado fresco pode ser misturado, transportado, adensado e acabado, que define a sua qualidade. Assim, a capacidade de escoamento, capacidade de moldagem, coesão e compactabilidade são propriedades da trabalhabilidade que estão associadas à qualidade do material.

Capacidade de escoamento determina a facilidade com que o concreto escoar, estando, portanto, diretamente relacionado à sua consistência. A coesão é uma medida da compactabilidade e da capacidade de acabamento, podendo ser avaliada, segundo (MEHTA; MONTEIRO, 1994) pela facilidade de alisamento e pelo julgamento visual da resistência à segregação.

Segundo Guimarães (2005) a trabalhabilidade do concreto deve ser estabelecida em função da geometria da peça estrutural, do tipo de forma, da taxa de armadura, dos equipamentos de mistura, de transporte, de lançamento e de adensamento, bem como da técnica e tipo de acabamento desejado.

Pode-se, pois, afirmar que independente do procedimento de dosagem do material, a trabalhabilidade do concreto é de extrema importância para a sua tecnologia, estando diretamente relacionada também ao seu custo, uma vez que se torna trabalhoso e muitas vezes impossível a manipulação de concretos que não pode ser lançado com facilidade ou até mesmo adensado.

2.3.1.1 Avaliação da trabalhabilidade do concreto fresco

Considera-se o índice de consistência, medido pelo abatimento do tronco de cone ou pela mesa de espalhamento, um dos parâmetros mais adequados para a verificação das características associadas à trabalhabilidade dos concretos no estado fresco ASTM C 125 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1993, MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Entre os inúmeros métodos de ensaio desenvolvidos para avaliar a trabalhabilidade do concreto no seu estado fresco estão: o ensaio de abatimento de tronco de cone (NBR NM 67/98), a mesa de consistência (NBR 7215/96), o fator de compactação (ACI Standard 211.3), o consistômetro de Ve-Be (DNER-ME 094/94) e

o ensaio de penetração Kelly ball (ASTM C 360/92). Embora esses métodos de ensaio sejam úteis como ferramentas para o controle de qualidade do concreto, eles são, em grande parte, medidas qualitativas baseadas em escalas definidas arbitrariamente (SAAK; JENNINGS; SHAH, 2004).

O ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR NM 67/98) é muito simples. A sua principal função é fornecer um método simples e conveniente para controlar a uniformidade da produção de concreto de diferentes betonadas (METHA; MONTEIRO, 2008). Para Neville (1997), este ensaio é muito útil como uma verificação nas variações dos materiais componentes com o tempo ou entre remessas.

O ensaio do fator de compactação (ACI Standard 211.3) mede o grau de compactação alcançado quando uma mistura de concreto está sujeita a um esforço padrão. Este fator é obtido pela relação entre a massa específica obtida no ensaio de Vebe e a massa específica do mesmo concreto em condições ideais de compactação total (METHA; MONTEIRO, 2008). A compactação é obtida em um aparelho com três recipientes com os pontos centrais alinhados verticalmente (Figura 2. 11).

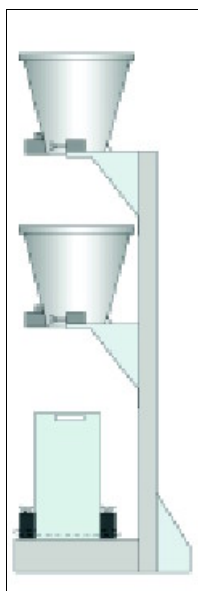


Figura 2. 11: Equipamento para o ensaio de fator de compactação (METHA & MONTEIRO, 2008).

O ensaio do consistômetro de Ve-Be (DNER-ME 094/94), Figura 2. 12, visa a determinação da consistência do concreto fresco pela avaliação da capacidade

desse concreto mudar de forma quando submetido à vibração. Segundo Neville (1997), é um ótimo ensaio para misturas muito secas e, também, tem a vantagem de estar muito relacionado com o método de aplicação do concreto na prática devido à vibração imposta ao ensaio.

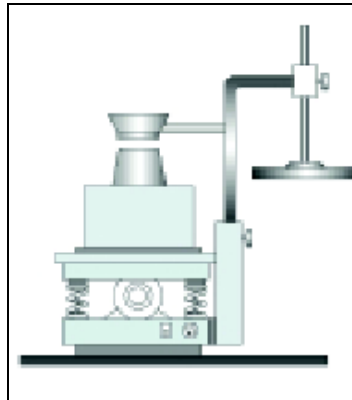


Figura 2. 12: Equipamento para o ensaio Vebe (METHA & MONTEIRO, 2008).

Outro ensaio muito utilizado é o ensaio de Kelly ball (ASTM C 360/92). Ele é uma alternativa do ensaio de abatimento. A vantagem deste ensaio para o ensaio de abatimento é que ele além de ser mais simples e rápido, este ensaio pode ser aplicado na forma que se encontra o concreto. Este ensaio é utilizado para acusar variações da mistura (NEVILLE, 1997).

2.3.1.2 Perda de trabalhabilidade

Uma determinação realizada no concreto fresco é a da perda de trabalhabilidade do concreto com o tempo. Sua importância deriva de três aspectos principais:

- Nem sempre é possível lançar o concreto nas fôrmas imediatamente após a mistura. Geralmente há um tempo de transporte que pode ser pequeno ou não dependendo do caso. Esse tempo pode chegar a ser bastante significativo, como, por exemplo, no caso de concreto pré-misturado em central e fornecido às obras em caminhões-betoneira (que estão sujeitos ao fluxo de trânsito das cidades). Regra geral, quanto maior o tempo de

2 MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO: CONCRETO

transporte, maior a perda de trabalhabilidade do concreto. Neste caso, um aditivo retardador de pega pode ajudar;

- Existem locais onde a temperatura ambiente é elevada. Regra geral, quanto mais elevada a temperatura ambiente, maior a perda de trabalhabilidade do concreto. Neste caso, é boa prática trabalhar com os materiais nas temperaturas mais baixas possíveis, evitando o trabalho com cimento quente, recém chegado da fábrica, e protegendo a água e os agregados da insolação direta. Em casos especiais, pode-se substituir parte da água de amassamento do concreto por gelo, ou resfriar a massa de concreto já misturado com nitrogênio líquido;
- A utilização crescente de aditivos químicos nos concretos, principalmente no caso de superplastificantes, regra geral, apresenta como efeito colateral uma perda acelerada de trabalhabilidade do concreto. O abatimento inicial de um concreto pode, com o auxílio do superplastificante, ser até de 25 cm, mas a perda de trabalhabilidade desse concreto será mais rápida do que a de um concreto corrente.

O fenômeno da perda de trabalhabilidade pode ser combatido com a dosagem do superplastificante em conjunto com um aditivo retardador de pega, ou com uma re-dosagem do mesmo superplastificante quando o concreto chega ao local de destino, imediatamente antes do seu lançamento nas fôrmas.

No caso prático de uma obra, é importante que este comportamento do concreto seja experimentado nas condições reais da própria obra, dentro do canteiro e do seu meio ambiente (ou seja, nas mesmas condições de aeração, umidade, insolação, temperatura, etc., às quais o concreto estará sujeito).

A segregação é definida como sendo a separação dos componentes do concreto fresco de tal forma que a sua distribuição não é uniforme (METHA; MONTEIRO, 2008).

A exsudação dos concretos é um caso particular de segregação, quando os componentes sólidos mais pesados depositam-se no fundo das fôrmas ou moldes, e o componente mais leve, a água, sobe para a superfície das peças concretadas. Metha e Monteiro (1994) define a exsudação como sendo um fenômeno cuja manifestação externa é o aparecimento de água na superfície após o concreto ter sido lançado e adensado, antes de ocorrer a sua pega.

A subida da água ocorre com a formação de canais capilares, que começam como uma rede de "riachos", que se agrupam em "rios", e que, nas proximidades das superfícies do concreto, formam "estuários" e deságuam em "oceanos" no exterior das peças concretadas (ALMEIDA, 2003).

Como consequência da exsudação, a parte superior do concreto torna-se excessivamente úmida, ocorrendo a formação de nata porosa. Com a evaporação dessa água, o concreto endurecido tenderá a ser poroso na superfície e, conseqüentemente, menos resistente aos esforços mecânicos e à penetração de agentes químicos agressivos. Além disso, a água, no seu movimento de ascensão, pode carregar partículas de cimento, formando, na superfície das peças concretadas, a chamada nata de cimento, que dificulta a ligação de novas camadas de concreto com as antigas (aderência de concreto velho – concreto novo). Essa nata deve ser cuidadosamente removida quando foram abordadas as juntas de concretagem.

A exsudação pode também ser interna à massa de concreto. Este é o caso de um determinado volume de água que sobe pela massa de concreto, mas que, entretanto, não consegue atingir a sua superfície, concentrando-se em alguns pontos pelo caminho. Metha e Monteiro (1994) descrevem que grande parte da água da exudação fica retida embaixo dos agregados maiores e nas barras da armadura.

Segundo Almeida (2003), a exsudação excessiva é um fenômeno geralmente indesejado nas obras, apesar de ocorrer com muita freqüência. A sua intensidade pode ser atenuada de várias formas:

- Proporcionamento (dosagem) adequada dos componentes do concreto;
- Especificação adequada da trabalhabilidade do concreto para a execução de um determinado serviço;
- Utilização de traços de concretos mais ricos em cimento;
- Emprego de cimentos mais finos;
- Emprego de agregados de grãos arredondados;
- Adição de materiais finos ao concreto, como, por exemplo, as adições minerais.

A água que exsuda é apenas aquela que não foi capaz de se imiscuir na mistura dos outros componentes do concreto e lá permanecer, ou seja, é uma água

livre, a mais na composição do concreto, que ali está apenas por uma questão de trabalhabilidade do material (ALMEIDA, 2003).

A pega do concreto é definida como o início da solidificação de uma mistura fresca de concreto. São manifestações físicas das reações progressivas de hidratação do cimento. O início de pega representa aproximadamente o tempo a partir do qual o concreto fresco não pode mais ser misturado, lançado e compactado. O final de pega representa aproximadamente o tempo após o qual inicia-se o desenvolvimento da resistência a uma taxa significativa (METHA; MONTEIRO, 2008).

Os tempos de início e fim de pega são características intrínsecas dos cimentos, e existem normas para as suas medidas. A duração da pega é influenciada por vários fatores, sendo os mais importantes a composição química do cimento, a finura do cimento, o fator A/C , a temperatura ambiente, bem como a presença de aditivos químicos e/ou minerais no concreto (ALMEIDA, 2003).

A determinação dos tempos de pega dos concretos é importante, pois são eles que indicam a disponibilidade de tempo para o concreto ser transportado, lançado, compactado e começar a ser curado, como já se mencionou.

2.3.2 Concreto endurecido

O concreto endurecido tem como principais propriedades o seu peso específico, deformações, coeficiente de Poisson, resistência à compressão, resistência à tração.

2.3.2.1 Peso específico

O peso específico do concreto endurecido depende de muitos fatores, principalmente da natureza dos agregados, da sua granulométrica e do método de compactação empregado. Será tanto maior quanto maior for o peso específico dos agregados usados e tanto maior quanto mais quantidade de agregado gráudo contiver. A variação do peso específico, contudo, é pequena, podendo-se tomar para o concreto simples um valor de $2,3 \text{ tf/m}^3$ e para o concreto armado de $2,5 \text{ tf/m}^3$.

2.3.2.2 Deformações

As deformações do concreto podem ser de duas naturezas:

- Deformações causadas por variação das condições ambientes: retração e deformações provocadas por variações de umidade e temperatura ambiente;
- Deformações causadas pela ação de cargas externas: deformação imediata, deformação lenta, deformação lenta recuperável e fluência.

2.3.2.2.1 Retração

A retração é a diminuição de volume do concreto desde o fim da cura até atingir um estado de equilíbrio compatível com as condições ambientes. A retração se processa mais rapidamente até uns 3 a 4 meses e depois mais lentamente.

2.3.2.2.2 Influência da temperatura

A variação da temperatura ambiente não se transmite instantaneamente ao concreto, mas tem uma ação retardada sobre a variação da temperatura deste, sendo de amplitude tanto menor quanto mais afastado da superfície exposta ao ar estiver o ponto considerado.

O coeficiente de dilatação térmica para o concreto armado, segundo a NBR 6118/2003, é considerado igual a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, salvo quando determinado especificamente para o concreto a ser usado.

Em peças permanentemente envolvidas por terra ou água e em edifícios que tenham, em planta, dimensão ou juntas de dilatação não superior a 30 m, dispensa-se à consideração da influência da variação da temperatura.

2.3.2.2.3 Deformação imediata

Deformação imediata é aquela observada por ocasião da aplicação da carga.

2.3.2.2.4 Deformação lenta

Deformação lenta é o acréscimo de deformação que ocorre no concreto se a solicitação for mantida, e com a manutenção da carga ao longo do tempo.

2.3.2.3 Diagrama tensão-deformação

O diagrama tensão por deformação do concreto é obtido em ensaio à compressão axial de um corpo de prova cilíndrico com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura.

A Figura 2. 13 apresenta exemplos típicos diagramas de tensão por deformação do concreto para diferentes resistências.

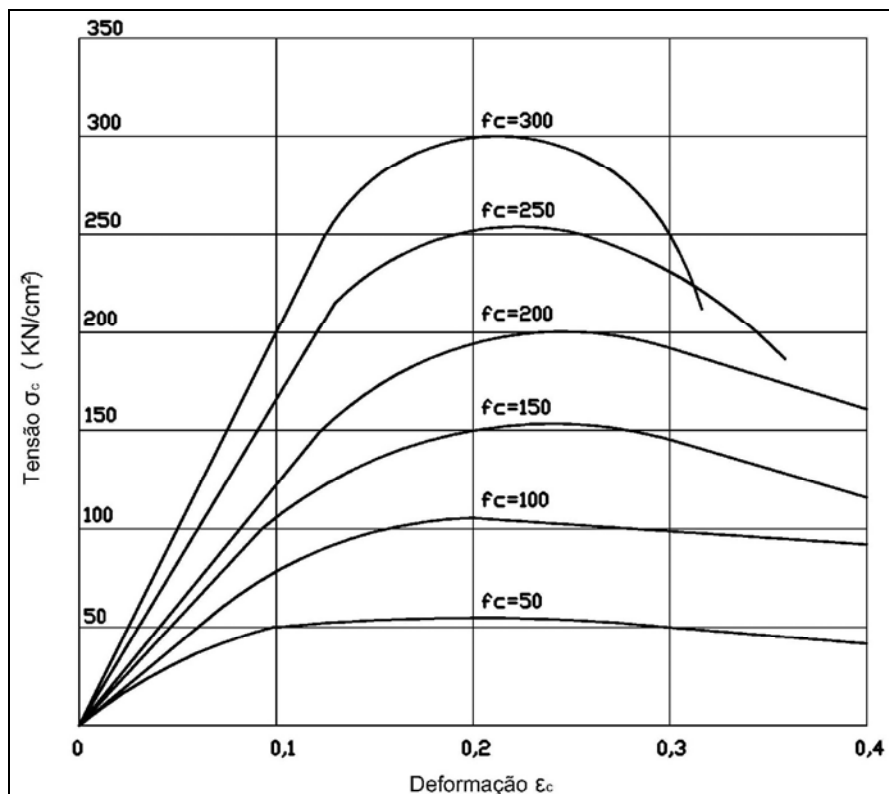


Figura 2. 13: Diagrama tensão por deformação do concreto para diferentes resistências.

Todas as curvas são de características similares. Consistem de um trecho inicial relativamente reto, correspondendo a um comportamento elástico do concreto

para tensões baixas, onde deformação é linearmente proporcional à tensão. Depois o diagrama começa a curvar, passando por um ponto de máxima tensão, que corresponde à resistência do concreto à compressão na sua idade, apresentando no final um ramo decrescente.

A deformação de ruptura do concreto está, na maioria dos casos, entre 0,3% e 0,6%. A deformação correspondente à tensão máxima é da ordem de 0,2%.

2.3.2.4 Módulo de elasticidade

Segundo a NBR 6118/2003, o módulo de elasticidade deve ser obtido segundo ensaio descrito na ABNT NBR 8522/2008, sendo considerado nesta Norma o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30% f_c , ou outra tensão especificada projeto. Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 d, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade usando a expressão:

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \rightarrow \text{em MPa} \quad (2.1)$$

Onde: E_{ci} e f_{ck} são dados em megapascal (MPa).

O módulo de elasticidade numa idade $j = 7$ dias pode também ser avaliado através dessa expressão substituindo-se f_{ck} por f_{ckj} .

Quando for o caso, é esse o módulo de elasticidade a ser especificado em projeto e controlado na obra.

O módulo de elasticidade secante a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, deve ser calculado pela expressão (6).

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci} \quad (2.2)$$

Onde: E_{cs} e E_c são dados em MPa.

2.3.2.5 Coeficiente de Poisson

Toda a força ou tensão provoca, ao mesmo tempo, deformação no seu sentido de aplicação e também uma deformação no sentido transversal. A relação entre os valores absolutos da deformação transversal e da longitudinal é o coeficiente de Poisson ν . A experiência tem demonstrado que o coeficiente de Poisson do concreto varia entre 0,11 a 0,21. A NBR 6118/2003 admite para o concreto um coeficiente de Poisson relativo às deformações elásticas igual a 0,2.

2.3.2.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão simples é a característica mais importante de um concreto no estado endurecido. É determinada em corpos de prova padronizados para possibilitar que resultados de diferentes concretos possam ser comparados. É através desta característica que são associados as demais características e propriedades do concreto.

Observa-se que resultados da tensão ruptura (f_{cj}) obtidas no ensaio de diversos corpos de prova são mais ou menos dispersos em torno da resistência média (f_{cm}), conforme o rigor com que se confeccione o concreto.

Colocando-se uma série de valores de resistências de corpos de prova do mesmo concreto em um gráfico de distribuição, com as tensões medidas no eixo horizontal e as freqüências de ocorrência de um dado valor (ou intervalo de valor) no eixo vertical, obtém-se uma curva de distribuição normal, conforme mostrado na Figura 2. 14. A área entre a curva e o eixo horizontal é igual a 1. Um valor qualquer da resistência divide esta área nas probabilidades de ocorrência de valores menores e maiores do que este valor. O valor de resistência que tenha 95% de probabilidade de ser ultrapassado denomina-se resistência característica à compressão do concreto, f_{ck} .

A resistência do concreto à compressão, para um mesmo cimento, sofre influência de alguns fatores, como: fator água/cimento, idade do concreto, forma e dimensão do corpo de prova, condições de cura, aditivos, adições minerais e qualidade dos materiais.

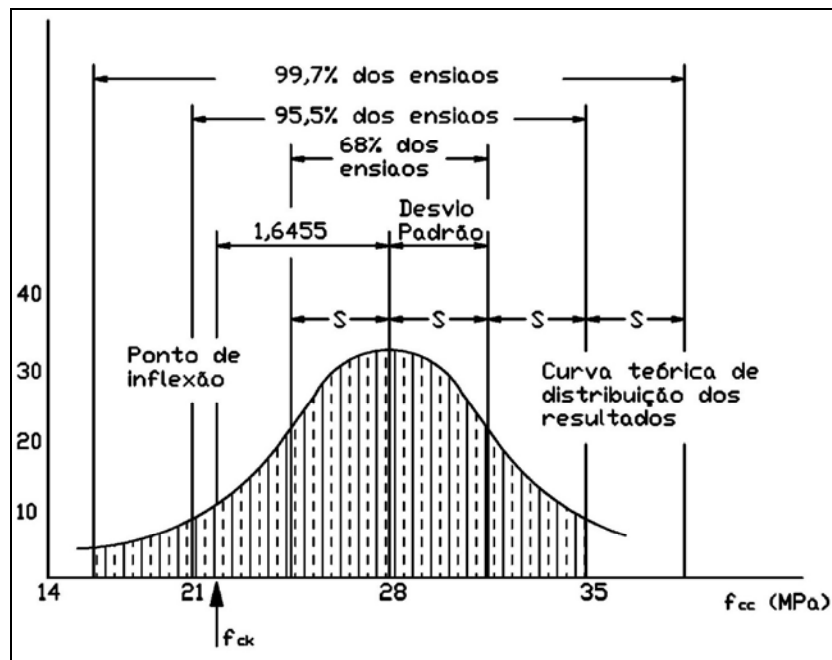


Figura 2. 14: Curva de distribuição normal do concreto.

2.3.2.7 Resistência à tração

A resistência à tração depende de vários fatores, principalmente da aderência dos grãos dos agregados com a argamassa. De acordo com o método de ensaio obtém-se diferentes valores para a resistência à tração axial, resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral.

2.4 Classificações

2.4.1 Tipos principais de concreto

À medida que aconteciam avanços tecnológicos, diferentes tipos de concreto foram sendo desenvolvidos. Entre eles podemos citar: concreto armado, concreto protendido, concreto compactado com rolo, concreto projetado, concreto massa, concreto leve, concreto pesado, concreto com fibras, concreto de alto desempenho,

concreto auto-adensável e concreto pré-moldado, entre outros, com características que visam atender às condições de projeto da estrutura.

2.4.2 Concreto convencional

Pode-se dizer que o concreto convencional (CC) é aquele sem qualquer tipo de adição mineral/química, utilizados na maioria das pequenas e médias obras da construção civil. A faixa de resistência deste tipo de concreto varia até 35 MPa.

Embora seja considerado um concreto usual, requer como qualquer outro um estudo prévio de seus materiais componentes para a determinação de uma composição mais econômica, obedecendo às normas da ABNT, para sua elaboração, execução e controle tecnológico da estrutura.

Neste tipo de concreto, os fatores que influenciam nas características reológicas são menores. Isto porque nenhuma adição química e/ou mineral está presente em sua composição.

A composição química do cimento influi significativamente sobre o comportamento reológico do concreto. Entretanto, segundo discorrido por Castro (2007) o teor e a morfologia do C_3A estão entre as principais componentes do cimento que influem na fluidez da mistura, e conseqüentemente no comportamento reológico do concreto.

2.4.3 Concreto de alto desempenho

O CAD é um material com resistência à compressão muito superior à dos concretos usuais. Esta resistência é elevada devido a estrutura interna dos materiais.

Esta resistência proporciona uma grande redução da dimensão dos elementos estruturais, principalmente dos pilares. Isso permite projetos com áreas úteis mais amplas, principalmente nos térreos e subsolos onde os pilares apresentam as cargas mais elevadas.

O CAD bem proporcionado pode apresentar boa trabalhabilidade, mesmo com baixa relação A/C, o que possibilita concretagens mais fáceis, mesmo com fôrmas complexas, peças esbeltas ou armaduras muito densas. As características reológicas do CAD permitem também este ser lançado por bombeamento.

Kalintzis (2000) afirma que devido a menor quantidade de água disponível e a melhoria conseguida na qualidade da pasta, a fluência, a retração por secagem e as deformações lentas são menores no CAD se comparadas ao concreto convencional.

Segundo Aïtcin (2000), o aumento da resistência à compressão do CAD com a diminuição da relação água/aglomerante não é válida após a resistência de ruptura do agregado tornar-se o elo mais fraco.

A durabilidade pode ser citada como uma das principais vantagens da utilização do CAD. Como o CAD exige menor manutenção no sentido de controlar o processo de carbonatação da matriz e de oxidação das armaduras, este material permite o emprego de estruturas de concreto aparente. As superfícies aparentes do CAD são menos porosas, reduzindo a absorção de umidade e a formação de fungos, assim como mantendo por muito mais tempo o aspecto original. A menor permeabilidade confere maior proteção às armaduras evitando o aparecimento de óxido de ferro na superfície (SERRA, 1997). Como exemplo de uso do CAD podemos citar estruturas marítimas, onde devido ao seu desempenho é muito utilizado por atuar em ambiente agressivo.

Dentre as vantagens da utilização do CAD, as principais são: maior durabilidade, ganho de área útil, redução do peso total da estrutura, redução do número de pilares, redução global no custo da obra.

Estas vantagens tornaram a utilização do concreto um material viável em projetos onde apenas era possível o uso de estruturas metálicas ou protendidas.

Para o concreto de alto desempenho, vários são os fatores considerados na avaliação dos parâmetros reológicos. Esse concreto, além de sofrer as influencias do tipo do cimento utilizado, também as influencias ocasionadas pela adição dos aditivos superplastificantes e aditivos minerais.

O efeito da sílica ativa, quando incorporado no concreto é nítido. A sílica ativa constitui de partículas muito finas (material pulverulento) de superfície arredondada que favorece o empacotamento das partículas. Segundo a literatura, a incorporação

de sílica melhora o desempenho da mistura ao longo do tempo, mesmo reduzindo a trabalhabilidade inicial desses materiais.

Quando a sílica ativa é incorporada a uma mistura de concreto, uma maior quantidade de superfícies sólidas é introduzida na mistura. Como a sílica constitui de partículas muito pequenas e, conseqüentemente, possui uma área superficial elevada, suas partículas são reativas quimicamente e adsorvem moléculas de SP. Como resultado, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica tendem a aumentar. Porém, como as partículas de sílica são bem arredondadas, elas favorecem o empacotamento dos materiais aglomerantes e diminuem o imbricamento entre os agregados, resultando em uma redução dos parâmetros reológicos (CASTRO, 2007).

A adição de superplastificante ao concreto, acarreta, segundo a literatura, em uma diminuição da tensão crítica, porém a viscosidade do concreto permanece praticamente a mesma. Segundo Tattersall (1991b) e Petrou (2000), esse fato está relacionado com a defloculação das partículas de cimento.

Um fator importante que deve ser levado em consideração é que o efeito do superplastificante varia de acordo com o procedimento de mistura. Segundo Castro (2007), uma melhor trabalhabilidade é obtida quando o aditivo é incorporado em atraso ou dividido em parcelas durante o processo de mistura do concreto.

3

Reologia dos Materiais Cimentícios

3.1 Definição

Isaac Newton, em 1687, definiu a viscosidade de um fluido como a resistência ao deslizamento de suas moléculas devido à fricção interna e, quanto maior o grau de fricção interna de um fluido, maior é a sua viscosidade. Embora date desta época o conhecimento da reologia, o termo “reologia” somente veio a ser definido por E. C. Bingham em 1929. Ele tem sua origem na palavra grega rhein que significa “escorrer” e corresponde ao estudo da deformação e do escoamento da matéria Van Wazer et al., (1966), Tanner, (988), Manrich e Pessan, (1987).

Reologia é a ciência que estuda materiais ditos complexos e que não podem ser classificados somente como gás, líquido ou sólido. É dita também como a ciência da deformação e fluidez da matéria com relação direta entre tensão, deformação e tempo. Pode-se também dizer que a reologia tem por finalidade predizer a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento em um corpo (MANRICH; PESSAN, 1987). Se ela é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, sua importância é grande para a Ciência dos Materiais e, de modo particular, para a Química, a Física e as Engenharias.

A reologia é a ciência que estuda as propriedades mecânicas dos materiais que determinam seu escoamento quando solicitados por forças externas. O campo da reologia estende-se desde a mecânica de fluidos Newtonianos até a elasticidade de Hooke (BIRD et al., 1960).

Na prática, a reologia está preocupado com materiais cujas propriedades ao escoamento são mais complicadas do que as de um fluido simples (líquido ou gás) ou as de um sólido elástico ideal, embora possa ser observado que, para um material, um comportamento considerado simples sob uma restrita variação da condição de ensaio, poderá exibir um comportamento muito mais complexo sob outras condições (TATTERSALL; BANFILL, 1983). De acordo com Whorlow (1980) e Barnes et al. (1989), o estudo da deformação e fluxo da matéria, os quais envolvem fenômenos de elasticidade, plasticidade e viscosidade, constitui-se no principal objetivo da reologia.

Fluidos reais (ideais) deformam-se irreversivelmente, ou seja, quando tensões são aplicadas sobre esses materiais, eles escoam. A energia da deformação é dissipada dentro dos fluidos em forma de calor e não pode ser recuperada se a tensão aplicada for cessada. Aqui é importante ressaltar que devido ao escoamento, esses materiais são estudados na reologia, pela relação entre sua taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento (BARNES et al., 1989).

A reversibilidade e a irreversibilidade são fenômenos ligados às propriedades reológicas de uma substância, que exibem mudanças consideráveis com o tempo ou com uma deformação prolongada. Castro (2007) coloca que a reologia quantitativa está relacionado com as relações entre a tensão, a deformação, o tempo e a influência de fatores, como a temperatura, sobre os materiais.

O efeito da temperatura sobre as propriedades de um material é significativo e, muitas vezes, pode encobrir os efeitos não-Newtonianos no escoamento (TANNER, 1988). De acordo com Tanner (1988), os efeitos reológicos do material analisado estão diretamente ligados aos efeitos da temperatura local. Assim pode-se também acrescentar que a variação da temperatura e da umidade, durante os ensaios, pode causar diferenças tanto na viscosidade do material como também na tensão de escoamento.

As curvas de escoamento da reologia deverão ser sempre usadas para medidas envolvendo escoamento laminar, condição em que a velocidade varia apenas na direção da altura da lamina líquida considerada e não nas duas direções perpendiculares a essa altura (VAN WAZER, 1966).

Sabe-se que existe, ligado ao escoamento, um limite de escoamento do material, o que significa dizer que o material, quando submetido a uma tensão de cisalhamento acima do limite de escoamento tende a escoar rapidamente sob uma superfície. Entretanto, se este mesmo material for submetido a uma tensão de cisalhamento abaixo do limite de escoamento, ele não irá escoar. Se este limite for excedido, a taxa de cisalhamento poderá ser proporcional à tensão de cisalhamento, como no caso dos fluidos Newtonianos. Materiais que exibem esse tipo de comportamento são denominados de substâncias plásticas ou fluidos Binghamianos (CASTRO, 2007).

A presença de um limite de escoamento introduz dificuldades experimentais nas medidas do escoamento de todas as geometrias no qual a taxa de cisalhamento não é uniforme ao longo do corpo fluido (VAN WAZER, 1966). Essa dificuldade é encontrada principalmente em fluidos de fase simples, nos quais os limites de escoamento reais nunca são encontrados.

Para materiais com uma ou mais fases dispersas, o limite de escoamento é encontrado em valores reais. Esse limite está associado às emulsões e às pastas semi-fluidas, assim como em materiais com partículas ou bolhas em fase contínua.

Sabe-se que a grande maioria das substâncias não apresenta comportamento nem de sólidos ideais (Hookeano), nem de líquidos ideais (Newtonianos) (BARNES et al., 1989, LAPASIN; PRICIL, 1995a). Eles exibem ambos os comportamentos, elástico e viscoso e são então denominados de materiais viscoelásticos.

A teoria da viscoelasticidade linear constitui um fundamento necessário para a compreensão do comportamento reológico e mecânico para certos tipos de matérias fluidas (os que apresentam tensão de escoamento), tais como concretos, argamassas entre outros.

A teoria constitui uma generalização da mecânica do corpo perfeitamente elástico e do fluido puramente viscoso, compreendendo como caso limite. Um material é dito viscoelástico quando se manifestam simultaneamente a natureza de sólido elástico e de um líquido viscoso. De acordo com Bretãs e D'Ávila (2000), a distinção entre um sólido e um líquido normalmente é feita com base em uma comparação subjetiva do tempo de relaxação e do tempo de observação.

O comportamento viscoelástico, sob condições de estado estacionário, muitas vezes não é distinguível e, quando observado, é difícil de ser interpretado em termos de constantes físicas do material (VAN WAZER, 1966). No estado fresco, o concreto comporta-se como um fluido, razão nos quais os conceitos reológicos, a ele relacionados, são descritos a seguir.

Muitos produtos alimentícios não são líquidos puros ou sólidos puros, mas possuem propriedades reológicas que são parcialmente viscosas e parcialmente elásticas, comportamento viscoelástico. Quase todas as soluções, de polímeros, mesmo diluídas, apresentam comportamento viscoelástico, e muitas vezes, este comportamento não é detectado por instrumentos não preparados para essas medidas (MCCLEMENTS, 2005).

3.2 Principais Conceitos

A seguir serão descritos os principais conceitos relacionados à reologia dos concretos no estado fresco. Para a compreensão deste fenômeno é necessária a compreensão do conceito de tensão, deformação e viscosidade.

3.2.1 Tensão

Quando um fluido está em movimento, vários tipos de forças atuam sobre ele. Essas forças surgem devido ao seu movimento, à ação da gravidade, aos gradientes de pressão e às interações entre as moléculas do fluido (BRETAS; D'ÁVILA, 2000).

Definindo um material homogêneo e isotrópico. O estado de solitação de um corpo posto num campo tencionado é definido como tensor tensão.

A tensão é definida como uma força por unidade de área e é dada pela equação:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (3.1)$$

A unidade de tensão no Sistema Internacional de unidades (SI) é dada por [Pa].

Considerando um cubo elementar de volume unitário e tomando as direções 1, 2 e 3 do sistema paralelo de referencia das faces do cubo (Figura 3. 1), o tensor tensão é definido como uma matriz:

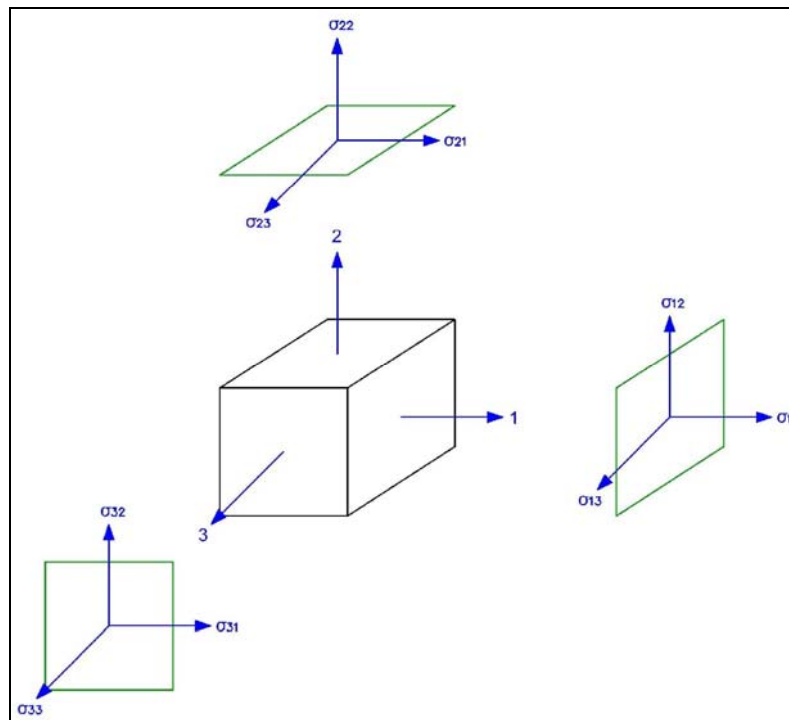


Figura 3. 1: Componentes do Tensor Tensão.

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

Onde os componentes normais têm índices iguais, e os componentes tangenciais tem índices diversos: o primeiro índice se refere à direção do componente normal ao plano onde age a tensão, o segundo à direção da tensão. Será assumido que o componente será positivo na tração e negativo na compressão.

As componentes do tensor tensão s_{ij} com $i=j$, são denominados componentes normais de tensão (tensões normais). Já as componentes s_{ij} , com $i \neq j$ são chamados componentes de cisalhamento (tensões de cisalhamento) e atuam na direção paralela a uma dada face do elemento do fluido. O tensor tensão tem a propriedade de simetria $s_{ij} = s_{ji}$.

3.2.2 Deformação

A deformação pode ser conceituada como uma modificação da forma primitiva da matéria. A Figura 3. 2 mostra diferentes posições relativas de um corpo em que pode ou não apresentar deformações.

Segundo Van Wazer (1966), a deformação de um corpo pode ser arbitrariamente dividida em dois tipos: elasticidade ou deformação espontaneamente reversível, e escoamento ou deformação irreversível.

A deformação espontaneamente reversível (elasticidade) ocorre no nível atômico. O efeito macroscópico observado é resultado da variação no espaço interatômico necessário para equilibrar as cargas externas, levando a movimentos de átomos reversíveis na rede cristalina, ou seja, o arranjo inicial, sem carga, é restaurado após a retirada da carga externa.

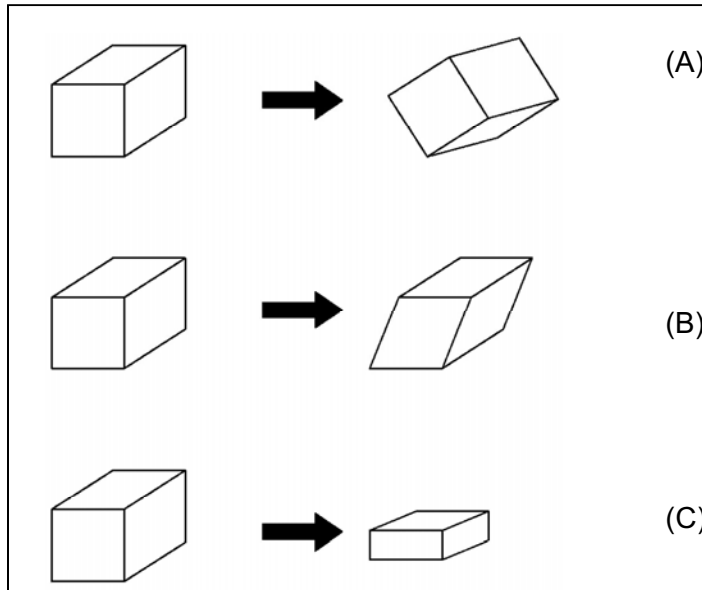


Figura 3. 2: Conceito de deformação: (A) rotação sem deformação; (B) Deformação por cisalhamento; (C) deformação por alongação. (BRETAS E D'AVILA, 2000).

crystal (ou do grão) e corresponde a deslocamentos de átomos de suas posições de equilíbrio, os quais permanecem nessas novas posições quando a carga externa é removida. Normalmente, em baixas temperaturas o fenômeno da deformação plástica ocorre praticamente dentro do cristal (transgranular ou intragranular) e em altas temperaturas pode ocorrer basicamente escorregamento dos contornos dos grãos (intergranular).

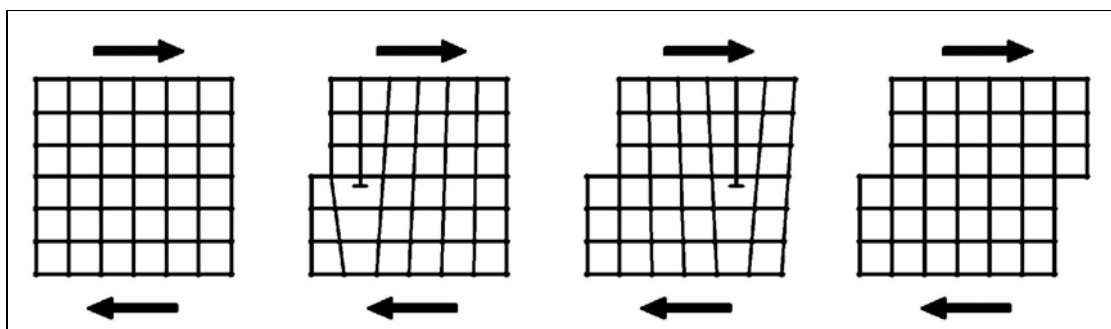


Figura 3. 3: Movimentação de uma discordância dentro de uma rede cristalina, devido à aplicação de tensões tangenciais (ou de cisalhamento).

Do ponto de vista da reologia, as propriedades mecânicas de todos os materiais são descritos em termos de contribuições elásticas, viscosas e inerciais (VAN WAZER, 1966).

A deformação elástica é usualmente expressa em termos de deformação, definida de maneira elementar como uma deformação relativa. A deformação viscosa é expressa em termos de taxa de cisalhamento. A taxa de cisalhamento corresponde à mudança na velocidade do escoamento com uma distancia medida em determinados ângulos em relação à direção do fluxo. Assim, a caracterização reológica dos fluidos envolve a determinação da taxa de cisalhamento do material com o tempo ao invés da deformação absoluta do mesmo (CASTRO, 2007).

Os fluidos podem ser definidos como matéria ao se deformarem continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento, sendo que, na ausência desta, não haverá deformação. Ao submetê-los a qualquer tensão externa, eles se deformam continuamente até encontrar uma barreira física capaz de impedir seu escoamento (PANDOLFELLI et al., 2000). Logo a caracterização reológica dos fluidos envolve a determinação da taxa de cisalhamento do material com o tempo ao invés da deformação absoluta do mesmo.

A tensão de cisalhamento conduz o liquido para o seu perfil de escoamento. A velocidade de escoamento é máxima na camada superior da Figura 3. 4 e vai diminuindo à medida que atravessa o corpo de prova até chegar à zero na camada ligada a placa estacionária. O gradiente de velocidade na amostra é chamado de taxa de cisalhamento e é definido como uma diferencial da velocidade pela distancia (dv/dy), representada por $\dot{\gamma}$, (SCHRAMM, 2006).

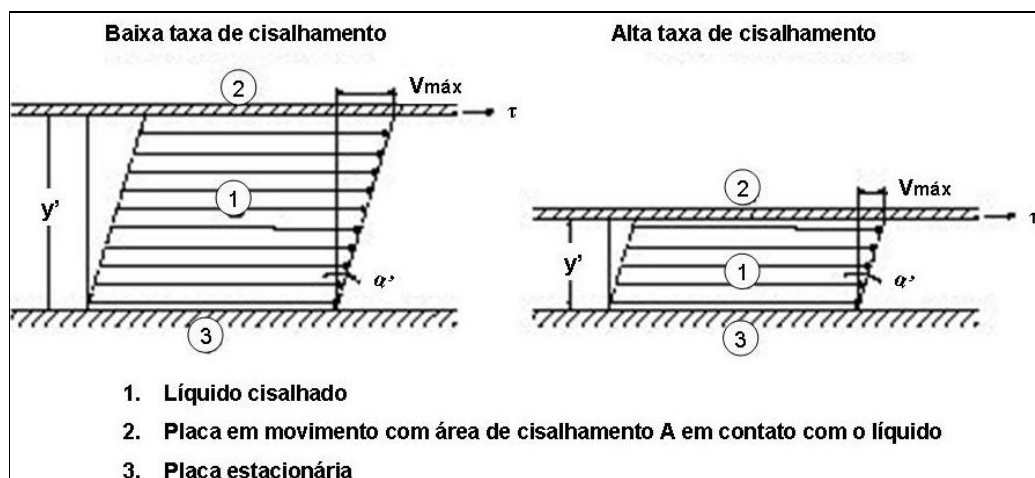


Figura 3. 4: Deformação de um fluido (SCHRAMM, 2006).

3.2.3 Viscosidade

Fisicamente, a viscosidade nada mais é do que uma propriedade do escoamento. Nos concreto e argamassas, a viscosidade está ligada às pastas e conseqüentemente, ao teor de água, à origem mineralógica, dimensão e forma dos agregados e ao efeito lubrificante das partículas finas Blombled (1967) apud Rago (1999).

A viscosidade de um líquido (inverso da fluidez) mede a resistência interna oferecida ao movimento relativo de diferentes partes desse líquido. A viscosidade mede a resistência de um líquido em fluir (escoar) e não está diretamente relacionada com a densidade do líquido, que é a relação massa/volume.

Quando um fluido sofre uma deformação ocorre uma interação interna entre as partículas (meios contínuos), mas sabe-se que há diferentes comportamentos para essa interação em diferentes tipos de fluidos. Tomando-se como exemplo básico dois fluidos diferentes escoando num plano inclinado sob as mesmas condições, o tempo de queda provavelmente será diferente para os mesmos, dependendo da resistência interna da interação das partículas. Essa maior ou menor resistência interna das partículas está diretamente ligada à noção de viscosidade. Outra definição clássica para a viscosidade é a relação da variação da tensão de cisalhamento pela variação da taxa de deformação, a qual se mantém constante, em um fluido Newtoniano (KIRYU, 2006).

A viscosidade é entendida como a relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) e é dada, no Sistema Internacional de Unidade, em [Pa.s], conforme mostra equação 3.3:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.3)$$

Ela é definida por FERRARIS (1996), como sendo o fator de proporcionalidade entre a força de cisalhamento e o gradiente de velocidade do líquido induzido (Figura 3. 5) e por Bretas e D'Àvila (2000) como sendo a propriedade que mede a resistência do material ao escoamento. Também é definida

por Schramm (2006) como a resistência de um fluido a qualquer mudança irreversível de seus elementos de volume, considerando que para a conservação de escoamento, deve-se adicionar energia continuamente ao fluido. Pode ser considerada como um indicativo de coesão do fluido.

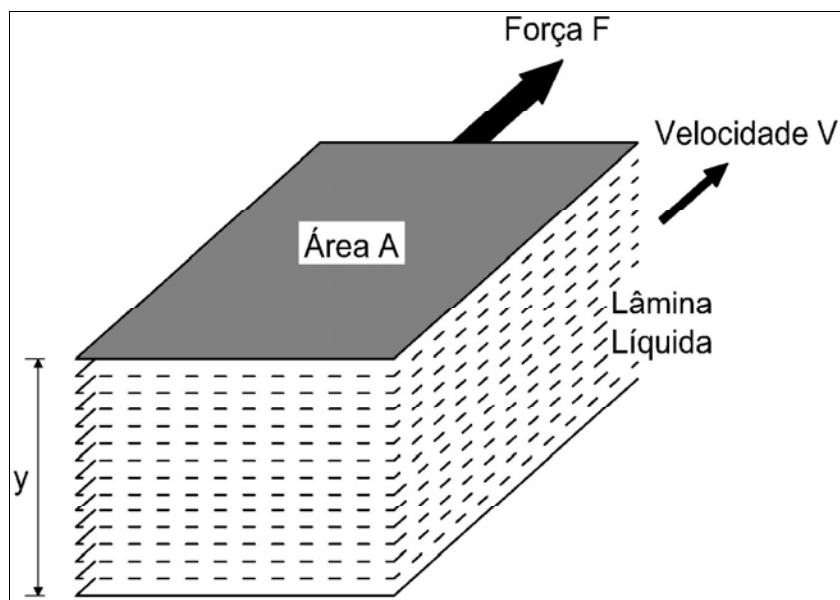


Figura 3. 5: Lei de Newton para viscosidade de um fluido. (FERRARIS, 1996).

O corpo viscoso mais conhecido é o fluido Newtoniano, para o qual a viscosidade é independente de t . Assim, fornecendo a condição de escoamento laminar, a constante de viscosidade é suficiente para caracterizar completamente as propriedades ao escoamento desse fluido (sob temperatura constante) e a determinação de um único par tensão de cisalhamento/taxa de cisalhamento é o suficiente para a determinação da viscosidade do fluido (TATTERSALL; BANFILL, 1983). Já no caso dos fluidos não-Newtonianos, com a mudança da taxa de cisalhamento ou da tensão de cisalhamento para as diversas classes de fluidos pode variar a viscosidade em muitas ordens de magnitude.

Para Pandolfelli (2000), a viscosidade pode ser considerada a principal propriedade reológica de um fluido, pois indica sua facilidade de escoar continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor é a tensão necessária para submetê-lo a uma determinada taxa de cisalhamento constante. A viscosidade é vista, do ponto de

vista físico, como um indicativo da coesão entre as moléculas que constituem as lamínas adjacentes do fluido.

Alguns autores dividem a viscosidade em viscosidade diferencial, e viscosidade aparente. O termo viscosidade aparente é aplicado às curvas “tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento” não-lineares, que é obtida a partir da inclinação de uma reta ligando um ponto particular da curva com a origem, enquanto que por viscosidade diferencial se compreende à inclinação de um dado ponto da curva “tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento”.

A viscosidade pode depender de seis parâmetros independentes. São eles: a natureza físico-química do fluido; a temperatura do fluido; a pressão, a taxa de cisalhamento, o tempo, e o campo elétrico. Ao se definir a viscosidade em função de um desses parâmetros, os outros cinco devem ser mantidos constantes e bem definidos (SCHRAMM, 2006).

3.3 Modelos reológicos

Os fluidos são caracterizados de acordo com seu comportamento reológico, e podem ser Newtonianos e não-Newtonianos.

3.3.1 Fluidos Newtonianos

Se o gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento à temperatura e pressão constantes for linear, a viscosidade será constante e igual ao coeficiente angular da reta. A maioria dos líquidos puros e muitas soluções e dispersões apresentam este tipo de comportamento e são denominados fluidos Newtonianos.

Dessa forma o líquido seria a substância que muda continuamente de forma (flui), independente da magnitude da tensão aplicada, ou seja, sua viscosidade permanece a mesma, independente da tensão. Muitos alimentos, como leite, suco

de maçã, suco de laranja, vinho e cerveja exibem um comportamento Newtoniano (BARNES et al., 1989).

O fluido Newtoniano é, portanto, caracterizado pela tensão de cisalhamento ser diretamente proporcional à taxa de cisalhamento do material fluido, ou seja:

$$\tau \propto \dot{\gamma} \quad (3.4)$$

Onde a constante de proporcionalidade (\propto) é a viscosidade absoluta ou dinâmica (μ).

De acordo com a lei de Newton da viscosidade, a constante de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento é dada pela expressão:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (3.5)$$

A curva de escoamento de um fluido Newtoniano é uma linha reta que passa através da origem e tem uma inclinação cujo inverso é igual ao coeficiente de viscosidade. Dessa maneira, para um fluido Newtoniano, mas apenas para um fluido Newtoniano, uma determinação experimental simples, isto é, um ensaio que mede apenas um dos parâmetros reológicos é suficiente para a caracterização do seu comportamento reológico (TATTERSALL; BANFILL, 1983).

Isto é assim porque a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento são proporcionais, independentemente da deformação e do tempo. Como exemplos de fluidos Newtonianos podemos citar alguns materiais, entre eles: glicerina, água, ar, álcoois, óleos, etc.

3.3.2 Fluidos não-Newtonianos

Os fluidos de interesse tecnológico apresentam, em sua maioria, características reológicas que se desviam da linearidade, ou seja, eles são caracterizados por apresentarem proporcionalidade não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento e são denominados de fluidos não-Newtonianos. Nesse tipo de fluido a viscosidade varia de acordo com a intensidade

da tensão, ou seja, a viscosidade de um fluido não-Newtoniano não é constante sob uma dada temperatura e pressão, mas dependente da taxa de cisalhamento ou, de maneira mais geral, da sua prévia história de cisalhamento (TATTERSALL; BANFIL, 1983). Muitas soluções (especialmente se forem concentradas) e dispersões (especialmente se contiverem partículas assimétricas) são consideradas como fluidos não Newtonianos, os quais são divididos em três grupos e classificados de acordo com o seu comportamento: Fluidos independentes do tempo; fluidos dependentes do tempo e fluidos viscoelástico.

Os fluidos não-Newtonianos independentes do tempo podem ser subdivididos em fluidos pseudoplásticos, fluidos dilatantes e fluidos Binghamianos ou plásticos (VAN WAZER,1966, TATTE, 2000, SCHRAMM, 2006). A figura 3.6 ilustra esquematicamente os diversos comportamentos reológicos independentes do tempo.

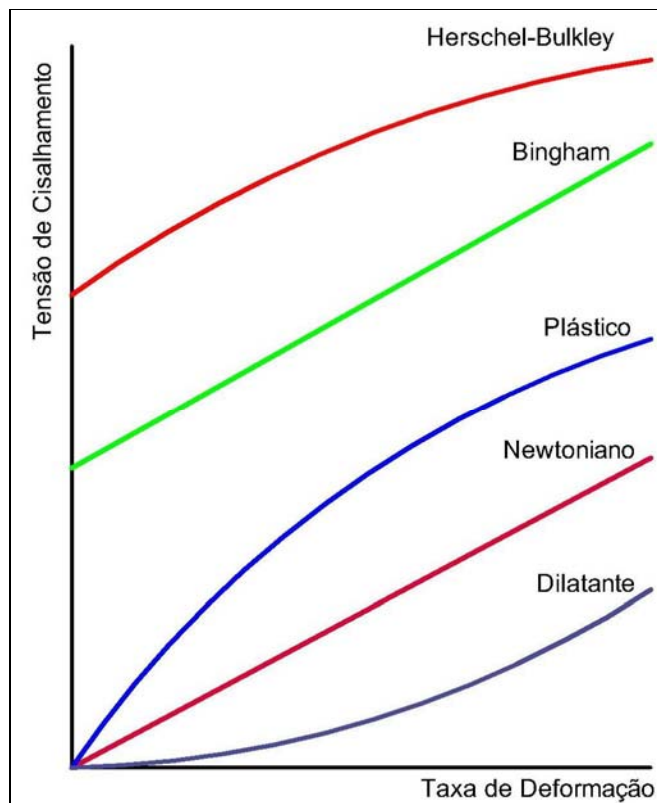


Figura 3. 6: Reograma de diferentes tipos de fluidos em regime permanente.

Nos fluídos ditos pseudoplásticos a viscosidade aparente é definida como a razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento e diminui com o aumento da taxa de cisalhamento; nos fluídos ditos dilatantes a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento.

Segundo Pileggi et al (2006) as variações destes comportamentos básicos podem gerar três outros tipos de comportamento, onde o fluido requer uma tensão mínima de cisalhamento para iniciar o escoamento (Figura 3. 6), ou seja:

- **Fluído de Bingham:** Este fluido é semelhante ao Newtoniano com tensão de escoamento. O fluído de Bingham é aquele em que é necessária a aplicação de uma tensão inicial mínima, o ponto de ruptura ou “yield stress” para que o material comece a fluir. Ou seja, o sistema apresenta em repouso altas forças de interações intermoleculares, dando a substância um caráter sólido, que o impede de fluir, até que a força externa seja superior à força das interações, onde podemos observar o ponto de ruptura (BOURNE, 1982). Exemplos: sangue nos capilares (pequenos diâmetros), lamas de perfuração de poços de petróleo, graxa, massas para batom, pasta de dente e borrachas naturais. Alguns exemplos de fluidos alimentícios que representam esse comportamento são: molhos de tomate, maionese, clara de ovo batida e margarina;
- **Pseudoplástico:** Este tipo de fluido demonstra um decréscimo na viscosidade com um aumento na tensão de cisalhamento (MCCLEMENTS, 2005), sendo que a taxa de cisalhamento versus a tensão de cisalhamento forma uma linha convexa (SHARMA et al., 2000). Esse tipo de comportamento pode ser causado por diversos fatores, dentre os quais as características físicas das partículas, como área superficial, formato, dimensões; o tipo de interação entre partículas; e a concentração, peso molecular e conformação de moléculas de dispersante presentes no meio líquido (PANDOLFELLI et al, 2000). Esses fluidos em repouso apresentam um estado desordenado, e quando submetidos a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. Quanto maior a tensão aplicada, maior será a ordenação. Consequentemente, a viscosidade aparente será menor (HOLDSWORTH, 1971). Alguns exemplos de fluidos pseudoplásticos são: sucos de frutas

concentrados, purê de maçã, pasta de amido e proteínas (RHA, 1978). Em geral, os purês de frutas e vegetais são fluidos pseudoplásticos. A consistência desses produtos é um importante parâmetro de qualidade industrial (IBARZ; BARBOSACÁNOVAS, 1999). Suspensões, emulsões e dispersões também apresentam comportamento pseudoplástico.

• **Dilatantes:** Os fluidos dilatantes apresentam o comportamento inverso ao fenômeno da pseudoplasticidade, ou seja, a viscosidade do fluido aumenta à medida que aumenta a taxa de cisalhamento. Esse tipo de fluxo somente é encontrado em líquidos que contém uma alta proporção de partículas rígidas insolúveis em suspensão (BOURNE, 1982). Ou seja, onde as partículas encontram-se muito bem empacotadas e bastante próximas entre si. Para que haja escoamento nesta situação, é necessário que o meio líquido flua através dos estreitos canais entre as partículas. Todas as situações que contribuem para a redução da distancia medias de separação entre as partículas e dificultam a movimentação relativa entre elas favorecem o aparecimento do comportamento dilatante na suspensão (PANDOLFELLI et al., 2000). Alguns tipos de mel e suspensões de amido se enquadram nessa categoria (SHARMA et al., 2000).

Inúmeras equações empíricas têm sido propostas para elaborar o modelo matemático das relações observadas entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento para fluidos independentes do tempo. Para muitas aplicações da engenharia, elas podem ser corretamente representadas pelo modelo exponencial:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3.6)$$

onde: τ é a tensão de cisalhamento,

$\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento,

n o índice de comportamento do escoamento e

k o índice de consistência.

Para $n = 1$ e $k = \mu$, esta equação reduz-se à Lei de Newton (fluidos Newtonianos).

O modelo de Herschel-Bulkley descreve o comportamento de um fluido com tensão de escoamento (τ_0) e com uma relação não-linear entre a tensão de

cisalhamento e a taxa de cisalhamento, conforme equação 3.7. Quando o expoente n for menor ou maior a 1, o fluido exibe um comportamento pseudoplástico ou dilatante, respectivamente. Esse modelo resulta no modelo de Bingham quando n for igual a 1, com k representando a viscosidade plástica do fluido (YAHIA; KHAYAT, 2003).

$$\tau = \tau_0 + \kappa \dot{\gamma} \quad (3.7)$$

Os fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo são denominados tixotropia e reopexia. Na tixotropia a viscosidade do fluido/suspensão diminui em função do tempo sob ação de uma taxa (ou tensão) de cisalhamento constante, enquanto que na reopexia a viscosidade do fluido / suspensão aumenta em função do tempo sob ação de uma taxa (ou tensão) de cisalhamento constante. Segundo Pandolfelli et al. (2000), a tixotropia se manifesta em suspensões onde o processo de formação e destruição dos aglomerados fracos é relativamente lento, o que torna dependentes não só da condição de cisalhamento, mas também do tempo a uma determinada taxa de solitação fixa. Este tipo de fluido é muito influenciado pela história de cisalhamento, que consiste nas taxas de cisalhamento aplicadas antes da medição reológica. Cisalhamento do material separa as partículas agregadas e então ocorre uma menor resistência ao escoamento e a viscosidade decresce com o tempo até um valor constante ser alcançado (MCCLEMENTS, 2005). Exemplos desse fluido são gelatinas, cremes, manteigas, molhos para saladas, entre outros (SHARMA et al., 2000).

As constantes de tempo para os efeitos tixotrópicos e reopéticos poderão variar consideravelmente, sendo virtualmente impossível determinar as mudanças que ocorrem em intervalos de tempo extremamente pequenos durante o escoamento de um material. De acordo com Van Wazer et al. (1966) o escoamento pseudoplástico (sem limite de escoamento) resulta de um comportamento tixotrópico imediatamente concluído (exibindo um intervalo de tempo infinitamente curto para ir do valor de viscosidade inicial para um valor de viscosidade limite final), enquanto que o escoamento dilatante resulta do comportamento reopético também imediatamente concluído.

Em alguns alimentos, a viscosidade aparente do fluido aumenta com o tempo quando sujeito a uma taxa constante de cisalhamento, dando um efeito reopético ao fluido. Há diferentes razões para este comportamento. A mais importante é que o cisalhamento aumenta a frequência das colisões entre as moléculas ou partículas dos fluidos, que pode levar para um aumento de agregados e conseqüentemente um aumento na viscosidade aparente (MCCLEMENTS, 2005). Este tipo de comportamento não é comum em alimentos, mas pode ocorrer em soluções de amido altamente concentradas (SHARMA et al., 2000).

3.4 A Reologia do Concreto

O concreto pode ser entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento). Por sua vez, a pasta de cimento, não se configura como um líquido homogêneo, sendo composta por partículas (grãos de cimento) e um líquido (água). Em uma escala macroscópica, o concreto fresco flui como um líquido (FERRARIS, 1996; 1999).

Se o concreto fresco se comporta como um líquido, sendo considerado um líquido bifásico e, a reologia, como já visto no item 3.1, é a ciência voltada ao estudo da deformação e fluidez da matéria com relação direta entre tensão, deformação e tempo, nada mais adequado do que buscar os conceitos da reologia, para se estudar o seu comportamento do concreto no estado fresco.

O comportamento do concreto fresco é dependente da viscosidade da matriz pasta de cimento e da quantidade de material da matriz agregados o que justifica a importância de se estudar a reologia do concreto fresco, da pasta de cimento e da argamassa. São eles que determinarão o comportamento do concreto como um todo.

As propriedades reológicas do concreto no estado fresco são importantes principalmente no período em que o material é lançado nas fôrmas e podem ser determinadas em qualquer momento durante o período de indução da hidratação do cimento (CHAPPUIS, 1991).

3.4.1 A Reologia do Concreto Fresco

Apesar das inúmeras pesquisas que estão sendo desenvolvidos para estudar as propriedades do concreto fresco fluido, nos métodos de teste existentes ainda se encontram muitas variações. As variações existentes se encontram principalmente devido às diferenças das técnicas experimentais e dos equipamentos utilizados. Além disso, os testes mais atuais são normalmente complicados de serem feitos, requerem habilidade e não são práticos para serem utilizados em campo.

Todos os testes padrões, assim como qualquer outro teste empírico, tentam avaliar a trabalhabilidade em termos de uma quantidade singular, seja isto um valor de slump, um tempo de Vebe, ou outro qualquer, de forma que todos eles considerem que o concreto se comporta do modo mais simples possível, como a água. Porém, observando o comportamento do concreto notamos que a afirmação anterior não é verdadeira.

Observa-se que o material concreto requer a imposição de uma tensão mínima inicial para começar a fluir o que indica que há uma tensão de escoamento inicial e, por conseguinte, sua curva de fluxo não atravessará a origem, como um fluido Newtoniano. Por isso, o concreto não pode ser descrito por uma única constante.

A maioria das equações usadas para materiais com partículas em suspensão, como concreto, tenta relacionar a concentração das partículas em suspensão à viscosidade ou a tensão de cisalhamento ou a taxa de cisalhamento, assumindo que há apenas um valor para a viscosidade do sistema em suspensão (concreto). A

Tabela 3. 1 apresenta modelos reológicos aplicados ao concreto fresco.

Apesar de já terem sido feitos testes no concreto utilizando vários modelos reológicos, a literatura é bem clara quanto ao modelo que melhor descreve o comportamento do concreto ao longo de sua fase no estado fresco. O modelo que melhor descreve esse comportamento é o de Bingham. Tattersall (1991) afirma que o concreto tem um comportamento de Bingham e é expresso pela equação 3.7. A linha da reta da curva de escoamento de Bingham corta o eixo da tensão de escoamento conforme Figura 3. 7. Isso vale dizer que o concreto precisa de uma

tensão inicial diferente de zero para que o material mude do comportamento de um sólido para o comportamento de um líquido, onde ocorre o início do escoamento.

Tabela 3. 1: Modelos reológicos aplicados ao concreto no estado fresco. (FERRARIS, 1996).

MODELOS	EQUAÇÕES
Newton	$\tau = \mu\gamma$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_B\gamma$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + \kappa_n\gamma^n$
Lei das Potências	$\tau = \Lambda\gamma^n$ <i>n=1, para fluido newtoniano</i> <i>n>1, para fluido dilatante</i> <i>n<1, para fluido pseudoplástico</i>
Vom Berg.	$\tau = \tau_0 + B\text{sen-1}(\gamma/C)$
Oswald-de-Waele	
Eyring	$\tau = a\gamma + B\text{sen-1}(\gamma/C)$
Robertson-Stiff	$\tau = a(\gamma+C)^b$
Atzeni et al.	$\gamma = \alpha\tau^2 + \beta\tau + \delta$
Definição das Variáveis:	τ - Tensão de cisalhamento
	τ_0 - Tensão de escoamento
	γ - Taxa de cisalhamento
	$\Lambda, a, B, b, C, K, \alpha, \beta, \delta$ - constantes

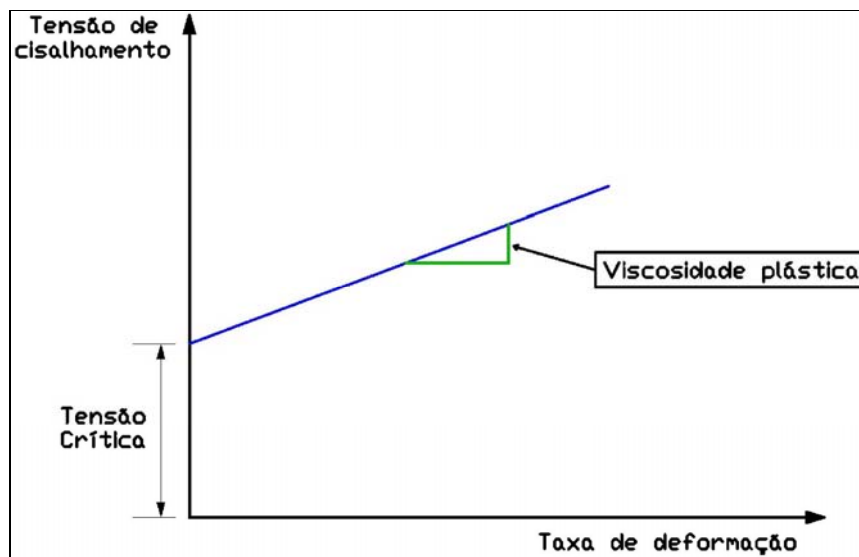


Figura 3. 7: Curva de escoamento para um fluido Binghamiano. (FERRARIS, 1996).

A explicação para o comportamento de um fluido Binghamiano é que o fluido, em repouso, contém uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir qualquer tensão inferior à tensão de escoamento. Caso a tensão de escoamento seja excedida, a estrutura se desintegra e o sistema se comporta como um fluido Newtoniano sob uma determinada tensão de cisalhamento. Quando a tensão de cisalhamento que age sobre o sistema for reduzida e atingir valores inferiores à tensão de escoamento, a estrutura tridimensional é recuperada (TANNER, 1988).

Assim, não existe dúvida de que as propriedades do concreto no estado fresco se aproximam de um fluido Binghamiano. Sendo assim, o material deve ser avaliado em termos de duas constantes: tensão de escoamento e viscosidade plástica. O primeiro parâmetro reológico está relacionado com o abatimento, enquanto o segundo faz a diferença entre um concreto facilmente trabalhável e um tendo um comportamento “pegajoso”, difícil de ser bombeado e apresentando vazios na superfície quando a forma for retirada (LARRARD; SEDRAN, 2002).

Não deve esquecer que o modelo Binghamiano é de fato um modelo e que não há porque se surpreender caso o comportamento real de um material não se ajuste tão adequadamente a ele. De fato, a equação descreve satisfatoriamente as propriedades ao escoamento de muitas suspensões concentradas para taxas de cisalhamento dentro de um limite mais ou menos estabelecido (TATTERSALL; BANFILL, 1983).

Segundo Hu e Larrard (1996), o concreto poderá se parecer com um fluido tixotrópico. Castro (2007) afirma que um efeito importante da tixotropia do concreto é o grande aumento da tensão de escoamento durante o repouso.

O concreto ainda apresenta um comportamento dilatante. Hu e Larrard (1996) afirmam que a dilatância observada em um concreto deve ser relacionada principalmente ao método de ensaio utilizado. Uma boa maneira de se limitar o efeito de dilatância em concretos é aumentar o volume de finos da mistura.

3.4.2 Reologia da pasta de cimento

Segundo Aguiló (1999), as pastas de cimento são as responsáveis pela fluidez e a coesão do concreto, fazendo com que a trabalhabilidade e outras propriedades reológicas desse material se tornem dependentes de suas características. Ghio (1993) descreve que a pasta de cimento envolve os agregados em um concreto, ao manter constante a dimensão máxima característica e a quantidade de agregados presentes na mistura, relaciona-se as propriedades do concreto às propriedades reológicas da pasta de cimento.

Powers (1968) considera vantajoso conhecer as propriedades reológicas do concreto, uma vez que as características da pasta dependem da natureza e da extensão de algumas reações químicas do cimento com a água que ocorrem durante o período de mistura.

Segundo Banfill (1990) e Ghio (1993), a reologia das pastas de cimento é muito importante, pois as propriedades destas pastas podem nos mostrar informações valiosas sobre o comportamento reológico do concreto.

Além disso, os estudos em pastas podem ser realizados com o auxílio de equipamentos comercialmente disponíveis que são mais simples e fáceis de serem executados do que os estudos em concretos (CASTRO, 2007).

As características reológicas da pasta de cimento no estado fresco podem ser influenciadas por diversos fatores, tais como: relação água/cimento, idade da pasta, características do cimento, natureza das adições químicas e minerais incorporadas à mistura e procedimento de mistura empregado na sua produção. Além desses, o comportamento ao escoamento das pastas de cimento são influenciadas pelas condições de ensaio durante as determinações (dependência do tempo e da intensidade de mistura) e pela temperatura (CLAISSE; LORIMER; AL OMARI, 2001).

A pasta de cimento, considerada o lubrificante entre os agregados de um concreto, influencia bastante a fluidez do mesmo. Sabe-se que fatores que compõem a pasta de cimento influenciam a trabalhabilidade do concreto e que uma mudança da fração volumétrica da pasta na mistura é suficiente para mudar sua fluidez, mesmo quando a composição da pasta permanece a mesma (FERRARIS; GADIS, 1992).

As pastas de cimento sem uso de qualquer ação mecânica ou presença de aditivo superplastificante apresentam uma estrutura floculada; sem vibração, são consideradas materiais viscoplásticos (CYR; LEGRAND; MOURET, 2000)

Para que as pastas escoem, são necessárias forças cisalhantes com capacidade de quebrar as ligações entre os grãos de cimento, daí o surgimento de um valor de escoamento inicial (tensão de escoamento).

Diversos modelos empíricos e teóricos têm sido usados para descrever o comportamento de pastas de cimento no estado fresco. Entre os mais utilizados estão os modelos de Bingham e o de Herschel-Bulkley, que leva em consideração o comportamento pseudoplástico dessas suspensões concentradas. Se a tensão de escoamento estimada for pequena, um modelo puramente viscoso pode ser suficiente para descrever corretamente o comportamento de pastas frescas (ROUSSEL; LE ROY, 2005).

Segundo Castro (2007), o sistema pasta de cimento é muito complexo, elas podem apresentar outros comportamentos reológicos. Esses comportamentos vão depender de condições de ensaios, composição da pasta, estado de dispersão e o histórico de cisalhamento. Bertolucci (2007) assegura que as propriedades reológicas e a viscosidade são indicativos reológicos influenciados pelo estado de dispersão ou floculação das partículas.

No processo de hidratação do cimento, ao entrar em contato com a água, os grãos de cimento tendem a ter um comportamento floculante quando não se utiliza aditivos dispersantes ou defloculantes, ou seja, em situações onde há uma pequena quantidade de água de amassamento da pasta, o processo de floculação dos grãos de cimento fica mais evidenciado, de forma a se aprisionar dentro desses grãos floculados parte da água de amassamento (BERTOLUCCI, 2007)

Quando existem forças de atração entre as partículas origina-se uma estrutura interna na pasta, responsável pela sua pouca fluidez. Esta estrutura formada pode ser facilmente destruída por agitação da pasta, que então se fluidifica. Este fenômeno reversível é chamado de tixotropia. Isto não significa que a pasta venha a ser um fluido tixotrópico, pois independente de mudanças do meio, endurece irreversivelmente, isto é apenas a pasta de cimento recém-misturada pode apresentar comportamento tixotrópico (CHAPPUIS, 1990).

A tensão de escoamento das pastas de cimento tem sido determinada por meio de modelos empíricos e teóricos baseados em dados obtidos a partir das curvas de escoamento do material. Embora esses modelos possam fornecer uma estimativa razoável da tensão de escoamento, as determinações são bastante dependentes de considerações do modelo, da precisão dos dados experimentais e das especificações do reômetro; em adição, grandes erros na determinação da tensão de escoamento podem resultar em uma escolha errada da variação da taxa de cisalhamento para ajustar os modelos (SAAK; JENNINGS; SHAH, 2001).

O papel desempenhado pelas condições experimentais na determinação dos parâmetros reológicos da pasta de cimento mostra que diferenças frequentemente grosseiras e, em alguns casos, até mesmo contraditórias, podem surgir nos resultados obtidos (ATZENI; MASSIDDA; SANNA, 1985).

3.4.3 Reologia da argamassa

Uma vez que a argamassa pode ser considerada como uma dispersão de agregados em uma matriz de partículas finas (preferencialmente pasta de aglomerante), o seu comportamento reológico está intimamente ligado ao agregado (dimensão, forma e distribuição granulométrica), a pasta (características químicas, físicas e quantidades dos materiais constituintes e teor de água) e a interação pasta agregado (RAGO 1999).

Segundo Hu e Larrard (1995), Antunes (2006) as argamassas no estado fluido (fresco) são suspensões reativas, cuja consistência é modificada ao longo do tempo, sobretudo pela atuação do cimento.

Ainda conforme Antunes (2006), além do aspecto dimensional, as interações com a água de amassamento e a utilização de aditivos interferem no balanço das forças intrínsecas do sistema causando mudanças no seu comportamento reológico.

Nas argamassas, o comportamento no estado fluido tem sido tradicionalmente definido através do conceito de trabalhabilidade. Contudo, uma vez que esses materiais exibem comportamentos reológicos de fluido não-Newtoniano, o desenvolvimento de uma metodologia sistemática para a formulação de argamassas

baseada em conceitos microestruturais / reológicos requer que a definição de trabalhabilidade seja convertida em grandezas reológicas mensuráveis (PILEGGI et al, 2006).

As pastas juntamente com as argamassas, apresentam um comportamento de fluido não-Newtoniano (pseudoplástico), e exibem uma viscosidade que varia com a tensão aplicada e só há deformação significativa a partir de uma tensão crítica. As pastas de cimento (água+cimento) apresentam propriedades reológicas bastante ajustáveis ao modelo reológico de Hershel-Bulkley, desde que sejam respeitados certos limites de proporção água/cimento.

3.5 Fatores que Influenciam no Comportamento Reológico do Concreto

Ao considerarmos o concreto fresco como uma suspensão densa de partículas, três efeitos podem influenciar seu comportamento reológico, a saber: (LARRARD, 1996 apud CASTRO, 2007).

- Em primeiro considera-se que o agregado pode ser mais poroso e o concreto pode ser preparado com um agregado não-saturado. No momento em que esse agregado entra em contato com a pasta de cimento, ele tende a absorver água da pasta para atingir o estado saturado. O efeito na reologia é semelhante ao observado quando uma série de lotes é produzida com uma dosagem de água decrescente: tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade plástica aumentam;
- Segundo efeito diz respeito ao concreto, que é homogêneo após uma mistura eficiente, podendo segregar por várias razões:
 1. Em repouso – a gravidade pode promover uma segregação do agregado graúdo caso a fração desse agregado não esteja bem proporcionada, especialmente quando ele apresenta deficiência na granulometria. Essa segregação pode ser considerada como uma contração da fase granular;
 2. Sob vibração: o fenômeno da segregação é ampliado;

3. Sob cisalhamento: se o teor agregado graúdo for alto (próximo do valor de empacotamento), a fase agregado tende a expandir;
- O terceiro efeito é a possibilidade de existir uma atividade química anormal no concreto fresco. O cimento, ao entrar em contato com a água, produz alguns hidratos e, mesmo durante o período de indução, alguns fenômenos químicos ocorrem. Além disso, em algumas situações, o gesso adicionado ao cimento Portland tem dificuldades em controlar a hidratação inicial do C₃A na presença de superplastificante, promovendo a adsorção do aditivo. O efeito sobre o comportamento reológico do material é o mesmo do observado quando a quantidade inicial de aditivo é reduzida em uma mistura fresca: a tensão de escoamento aumenta, enquanto a viscosidade plástica praticamente não é influenciada.

A Tabela 3. 2 foi elaborada por De Larrard (1996), a partir das considerações acima descritas, para servir como guia na interpretação das mudanças do comportamento reológico dos concretos. (CASTRO, 2007).

Tabela 3. 2: Evolução dos parâmetros reológicos durante a utilização do concreto fresco. Interpretação e correção do problema encontrado. (CASTRO, 2007).

caso	tensão crítica	viscosidade plástica	abatimento	superfície da amostra	interpretação	correção do problema
I	→	→	→	-	Mistura estável	-
II	↑	→	↓	-	Atividade química	Adição de um retardador de pega ou mudança do sistema cimento/SP
III	↑	↑	↓	-	Absorção de água	Agregados pré-saturados
IV	↓	→/↓	→/↓	Ascendência de agregado graúdo	Segregação entre a argamassa e o agregado graúdo	Mudança da granulometria do agregado ou adição de um agente de viscosidade
Obs: as setas indicam o aumento (↑), a redução (↓) ou a manutenção (→) do valor do parâmetro medido (tensão crítica, viscosidade plástica e abatimento) ao longo do tempo						

3.5.1 Distribuição Granulométrica e Empacotamento das Partículas

A distribuição granulométrica e o empacotamento das partículas têm forte influência no comportamento reológico do material. A importância se dá devido à relação direta entre fluidez e a granulometria do material.

Segundo Bonen e Sarkar (1995), a fluidez inicial de soluções fortemente suspensas, tais como a pasta de cimento e o concreto, depende principalmente de considerações físicas, isto é, da distribuição granulométrica, do índice de forma e da textura superficial das partículas.

O empacotamento é definido como a máxima compactação de uma mistura granular monodispersa (mistura cuja separação dos grãos em diferentes classes granulométricas é difícil de ser realizada, por exemplo, grãos de cimento e grãos de sílica ativa) mantendo a forma original dos grãos e empilhando-os um a um num volume infinito (FORMAGINI, 2005).

Uma série de fatores pode alterar o empacotamento de um determinado conjunto de partículas: a existência de diversas distribuições granulométricas alterando a condição de dispersão inicial; a morfologia das partículas; o tamanho das partículas; a porosidade interna das partículas, etc.

No que concerne a porosidade internas, as partículas podem ser totalmente densas, com porosidade interna fechada ou com porosidade aberta. Para efeito de distribuição granulométrica, as partículas que apresentam porosidade fechada são semelhantes às densas, mas resultam em misturas com densidade menor. Já as partículas que apresentam porosidade aberta perturbam o empacotamento devido ao seu formato irregular e também resultam em misturas com menores densidades de empacotamento (PANDOLFELLI, 2000). Segundo o pesquisador empacotamentos com menor porosidade podem ser obtidos se os vazios existentes entre as partículas de uma dispersão forem preenchidos por partículas menores que os mesmos.

Castro (2007) afirma que a quantidade e o tipo de agregado desempenham um papel importante na trabalhabilidade do concreto fresco, em particular para a produção de CAD com baixa relação água/aglomerante. Os agregados possuem um efeito principal na reologia do concreto, aumentando consideravelmente tanto a viscosidade plástica quanto a tensão de escoamento.

Empacotamentos densos são desejáveis na obtenção de concretos, cerâmicas estruturais, eletrônicas, nucleares, etc. Já os empacotamentos de baixa densidade são importantes na produção de revestimentos isolantes térmicos.

A Figura 3. 8 ilustra o efeito da quantidade e do tamanho das partículas sobre a eficiência das partículas, segundo McGeary (1961) apud Pandolfelli et al (2000).

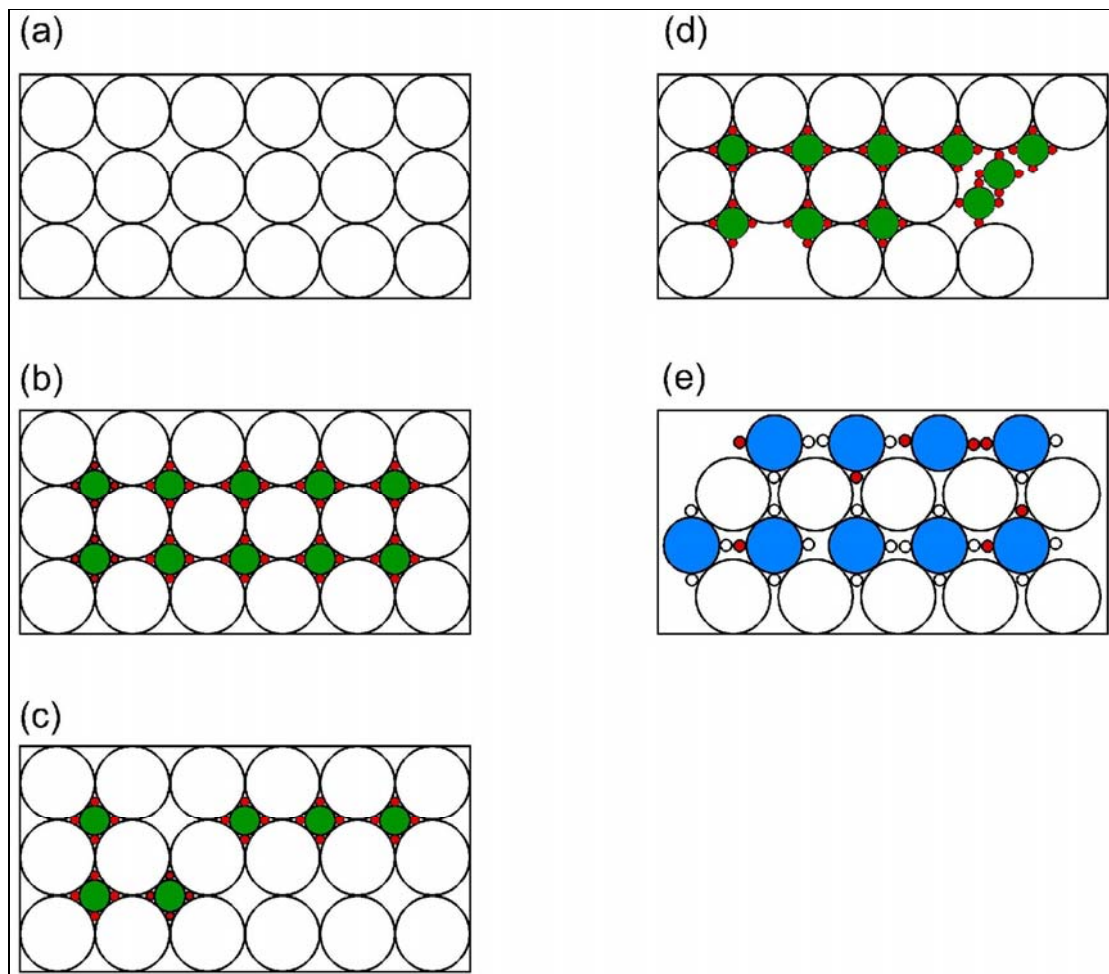


Figura 3. 8: Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento teórica; (c) deficiência de partículas dispersas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas. (PANDOLFELLI, 2000).

McGeary (1961) define o empacotamento como sendo “o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios

serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente”.

3.5.2 Estado de dispersão das partículas

As partículas de cimento apresentam uma grande tendência à floculação quando entram em contato com a água, devido a vários tipos de interações: forças de Van der Waals entre as partículas, forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos. Assumir tal estrutura floculada implica na retenção de certa quantidade de água de amassamento dentro dos flocos e, com isso, gera uma rede aberta de canais entre as partículas. Essa rede de vazios pode aprisionar parte da água que, por essa razão, fica indisponível para hidratar a superfície das partículas de cimento e para fluidificar a mistura (AÏTCIN; JOLICOEUR; MCGREGOR, 1994, apud CASTRO, 2007).

A aglomeração das partículas, permanente ou não, pode interferir no empacotamento e, conseqüentemente, na reologia das suspensões, visto que as partículas se juntam formando unidades móveis de tamanho efetivo maior (aglomerados). Segundo Castro (2007), os aglomerados formados geralmente são porosos, proporcionando uma maior demanda de água para a mistura e uma maior instabilidade dos sistemas, gerando, assim, produtos com maior incidência de defeitos e com microestruturas heterogêneas.

A eliminação dos aglomerados de partículas pode resultar em uma série de vantagens com relação à reologia das suspensões. Pandolfelli et al (2000) coloca que foi verificado que a redução da distancia de separação entre as partículas finas, provocadas pelo aprisionamento de água no interior dos aglomerados, eleva o numero de colisões entre elas e, com isso, a viscosidade da suspensão.

No caso do cimento para se conseguir uma distribuição homogênea da água e um ótimo contato água/cimento, suas partículas deverão estar corretamente defloculadas e conservadas em um alto estado de dispersão. Para se obter suspensões dispersas que apresentam baixa viscosidade e permitem a utilização de

maiores concentrações de sólidos, as forças de repulsão entre as partículas devem exceder as forças de atração.

Assim, o uso de dispersantes torna-se necessário para evitar a sedimentação das partículas e conseqüente segregação de fases, o que possibilita a preparação de suspensões homogêneas com alta concentração de sólidos. Esses aditivos são eficientes na quebra das estruturas de partículas de cimento e em sua dispersão, evitando uma ligação prematura, minimizando a quantidade de água necessária para a suspensão e resultando em misturas mais trabalháveis pelo intervalo de tempo desejado (DAIMON; ROY, 1978).

A fluidez melhorada do concreto pela adição de um aditivo orgânico é considerada como a causa principal da dispersão das partículas sólidas através das forças de repulsão eletrostática – devido ao aumento do potencial de superfície causado pelo aditivo adsorvido na superfície das partículas de cimento – e das forças de repulsão estéricas – baseadas na interação entre as camadas de adsorção do aditivo (UCHIKAWA; HANEHARA; SAWAKI, 1997).

De acordo com Andersen (1986), mesmo que outros mecanismos, como a liberação de água armazenada nos flocos de cimento e a inibição da hidratação da superfície das partículas de cimento possam aumentar a fluidez da mistura, a principal causa da dispersão das partículas ocorre por uso de aditivos orgânicos ao concreto. Fisicamente, isso significa que uma menor viscosidade e, conseqüentemente, são obtidos um maior abatimento.

Segundo Pandolfelli (2000), existem são três os mecanismos básicos de dispersão: são eles:

- Eletrostático: desenvolvimento de cargas elétricas na partícula em decorrência da interação da sua superfície;
- Estérico: adsorção superficial de polímeros de cadeias longas que dificultam a aproximação das partículas por impedimento mecânico;
- Eletrostérico: adsorção específica de moléculas com grupos ionizáveis ou polieletrólitos nas superfícies das partículas, no qual os íons provenientes da dissociação desses grupos ionizáveis somam uma barreira eletrostática ao efeito estérico.

Segundo Jolicouer e Simard (1998) a intensidade dos efeitos eletrostáticos e estéricos na repulsão entre as partículas de cimento dependerão tanto da natureza química do polímero – composição e estrutura – quanto do seu peso molecular. Os estudos realizados por Andersen, Roy e Gadis (1988), assim como os de Mannonen e Penttala (1996), mostraram que superplastificantes (SP) com maiores pesos moleculares são mais eficientes no aumento da fluidez de pastas de cimento do que os de menor peso molecular – fenômeno relacionado com o aumento do potencial zeta e com a adsorção de polímeros responsáveis pelo impedimento estérico – ou seja, são SP com maiores capacidades dispersantes. No caso do concreto de alto desempenho, onde a relação água/aglomerante é baixa, a defloculação e a ação dispersante dos SP desempenham um papel importante no efeito da fluidificação da mistura.

Outros fatores também podem estar presentes no efeito da fluidificação da mistura. São eles: redução da tensão de superfície da água; repulsão eletrostática induzida entre as partículas; filme lubrificante entre as partículas de cimento; dispersão dos grãos de cimento, liberando a água aprisionada entre os flocos; inibição da reação de hidratação na superfície das partículas de cimento, deixando mais água livre para fluidificar a mistura; mudança na morfologia dos produtos de hidratação; impedimento estérico induzido evitando o contato partícula-partícula (AÏTCIN; JOLICOEUR; MacGREGOR, 1994).

Na verdade, vários tipos de forças coexistem em uma suspensão à base de cimento: são as forças de origem coloidal que surgem a partir das interações mútuas entre as partículas e que são influenciadas pela polarização da água, assim como as forças viscosas que são proporcionais à diferença de velocidade de deslocamento entre as partículas de cimento e a água circundante e entre um agregado e a pasta de cimento que o envolve.

No caso das forças de origem coloidal, os materiais cimentícios suplementares podem influenciar as forças eletrostáticas dependendo de sua origem mineralógica e do estado das cargas da superfície de suas partículas. Como as forças coloidais dependem da distância média entre as partículas vizinhas, a interposição de grãos desses materiais mais finos entre as partículas de cimento pode interferir na atração eletrostática e, conseqüentemente, na estrutura floculada.

Assim, ao se substituir o cimento por um material de área específica diferente muda-se a área superficial e a quantidade de água adsorvida.

No caso das forças viscosas, os materiais à base de cimento estão dentro da faixa de suspensões densas, as partículas tem que se afastar, especialmente quando flocos são formados. O efeito filer sobre a reologia depende da finura do material, de sua distribuição granulométrica e da forma de suas partículas. A viscosidade das suspensões geralmente aumenta à medida que se aumenta a divergência da granulometria ideal e atinge um mínimo para um determinado volume de água e para um arranjo de partículas mais compacto. Qualquer divergência da forma esférica implica em aumento da viscosidade para um volume de pasta constante. Assim, na presença de superplastificante, quanto mais fino e esférico for o material cimentício utilizado, melhores serão as propriedades reológicas do concreto (NEHDI; MINDESS; AİTCIN, 1998).

3.5.3 Efeito da Vibração

Tattersall e Banfill (1983) utilizando uma mesa vibratória avaliaram a influencia e a eficiência da vibração no concreto endurecido através da verificação do grau de compactação alcançado. Entretanto, há necessidade de se verificar e medir essa influencia no concreto fresco, examinando o efeito da vibração na trabalhabilidade do material. O comportamento do concreto, no estado fresco, sugere que o material possui uma tensão de escoamento e que, ao se aplicar uma força de vibração, esta tensão fica razoavelmente reduzida.

Quando o concreto fresco é submetido à vibração, observam-se mudanças significativas em suas propriedades reológicas. Existe um indício de que a curva de escoamento do concreto vibrado passa através da origem, isto é, que o material efetivamente não possui mais uma tensão de escoamento, no entanto, a sua curva não é mais uma relação linear simples (TATTERSALL; BANFILL, 1983). Estudos realizados por Dimond (1980) apud Tattersall e Baker (1988), com pastas de cimento mostraram que a vibração teve um efeito considerável sobre a tensão de escoamento da pasta sendo esse efeito imediato e instantaneamente reversível.

Estudos realizados por Bertolucci et al (2006, 2007), observaram os mesmos efeitos para as caldas de cimento.

Segundo Tattersall (1990), o efeito da vibração no concreto fresco faz com que esse material se comporte como um fluido pseudoplástico com tensão de escoamento igual a zero, considerando que condições limites de vibração não sejam excedidas.

De Larrard et al (1997), usando um reômetro, observaram que, sob vibração, as tensões críticas das misturas de concreto estudadas caíram pela metade tornando-se desprezível em alguns casos. Entretanto, ainda não se conhece as causas exatas da redução da tensão de escoamento devido à vibração. Sabe-se que ela pode estar relacionada com o enfraquecimento das ligações físicas e químicas entre os materiais constituintes da mistura.

Quanto à viscosidade plástica, De Larrard (1997) não observou qualquer mudança, porém o concreto se torna mais trabalhável por causa da redução da tensão de escoamento.

Kakuta e Kojima (1989) desenvolveram estudos para avaliar o efeito da vibração sobre as propriedades do concreto fresco e comprovaram que, sob baixas taxas de cisalhamento aplicadas durante a vibração, o material se comporta como um fluido Newtoniano simples. Segundo Castro (2007), durante a vibração, existe uma amplitude e uma frequência limites abaixo e acima das quais, respectivamente, a vibração não tem efeito prático sobre a tensão crítica. Assim observa-se que a fluidez e, conseqüentemente a trabalhabilidade de um concreto vibrado depende da proporção dos materiais constituintes da mistura e dos parâmetros da vibração aplicada. O parâmetro mais importante para avaliar a eficiência da vibração é a velocidade máxima.

A eficiência da vibração depende da velocidade máxima de vibração, sendo independente da relação água/cimento da pasta e, como inicialmente esperado, completa e instantaneamente reversível (TATTERSALL; BANKER, 1988).

3.6 Trabalhabilidade do concreto fresco

3.6.1 Definição de trabalhabilidade

A trabalhabilidade é um termo comumente utilizado para designar o comportamento do concreto ou argamassa como um todo. Ou seja, o termo trabalhabilidade serve para distinguir a facilidade do concreto em ser utilizado, manuseado, acabado na obra.

A trabalhabilidade é definida pela ASTM C 125 como sendo a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade.

K. Newman define a trabalhabilidade como sendo o resultado de três propriedades mensuráveis do concreto fresco: adensabilidade, mobilidade e estabilidade.

As principais definições de trabalhabilidade foram listadas por Iwasaki (1983), são:

- American Concrete Institute: propriedade do concreto ou argamassa no estado fresco que determina a facilidade e a homogeneidade com as quais o material pode ser misturado, lançado, adensado e acabado.
- British Standards Institution: propriedade do concreto, argamassa ou semelhante no estado fresco que determina a facilidade com a qual o material pode ser manipulado ou completamente adensado.
- Association of Concrete Engineers (Japão): propriedade do concreto ou argamassa no estado fresco que determina a facilidade com a qual o material pode ser misturado, lançado e adensado devido à sua consistência, a homogeneidade com a qual o concreto pode ser feito o qual o material pode resistir à separação de materiais.

Segundo Tattersall e Banfill (1983), tem sido consideradas três classes de termos: uma geral ou qualitativa; uma específica ou quantitativa relacionada aos resultados dos ensaios empíricos; e uma que incorpora os termos de quantidades

fundamentais rigorosamente definidos e que não devem ser usados em qualquer outra situação (Tabela 3. 3).

Tabela 3. 3: Esquema da nomenclatura para trabalhabilidade [TATTERSALL & BANFILL (1983); TATTERSALL (1991b)].

Classe de Termos	Termos Abrangidos	Aplicação da Classe de Termos
<i>Classe 1: Qualitativa</i>	Trabalhabilidade	Usada apenas em uma descrição geral sem qualquer tentativa de quantificação
	Capacidade de escoamento	
	Estabilidade	
	Acabamento Lançamento, etc.	
<i>Classe 2: Quantitativa e Empírica</i>	Abatimento	Usada como uma manifestação quantitativa simples do comportamento de um conjunto partículas de circunstâncias.
	Fator de compactação	
	Tempo Ve-Be	
	Mesa de consistência Mesa de espalhamento, etc	
<i>Classe 3: Quantitativa e Fundamental</i>	Viscosidade	Usada estritamente em conformidade com as definições da norma BS 5168/75
	Mobilidade	
	Tensão de escoamento Fluidez, etc.	

A capacidade do concreto fresco é determinada por sua homogeneidade e pela facilidade com o qual esse material pode ser misturado, transportado, adensado e acabado. Capacidade de escoamento, capacidade de moldagem, coesão e compactabilidade são propriedades da trabalhabilidade que estão associadas à qualidade do material. A capacidade de escoamento está relacionada com a consistência, uma vez que essa determina a facilidade com que o concreto escoar; porém, concretos com consistência semelhantes podem exibir diferentes características de trabalhabilidade (POPOVICS, 1980). Notamos que a trabalhabilidade é muito importante para a tecnologia do concreto, uma vez que ela abrange as propriedades essenciais de um concreto.

3.6.2 Metodologias de avaliação existentes

Há um método de avaliação da trabalhabilidade muito antigo mas que ainda é usado nos dias de hoje. Esse método consiste em analisar subjetivamente a aparência do material concreto e sua facilidade de manipulação. O problema deste tipo de avaliação é que deve ser feito por um avaliador com experiência específica sobre dosagem de concreto.

Segundo Tattersall (1991), essa avaliação não pode ser imediatamente quantificada, fazendo com que a informação não seja facilmente passada adiante.

Devido às limitações óbvias da avaliação subjetiva, métodos de ensaio mais objetivos tornaram-se necessário (CASTRO, 2007). Muitos métodos de ensaio foram desenvolvidos para medir a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Entre eles estão: o ensaio de abatimento de tronco de cone (NBR NM 67/98), a mesa de consistência (NBR 7215/96), o fator de compactação (ACI Standard 211.3), o consistômetro de Ve-Be (DNER-ME 094/94), e o ensaio de Kelly ball (ASTM C 360/92). Embora esses métodos de ensaio sejam úteis como ferramentas para controle de qualidade do concreto, eles são, em grande parte, medidas qualitativas baseadas em escalas definidas arbitrariamente (SAAK; JENNINGS; SHAH, 2004).

A maioria das normas nacionais especifica vários métodos de ensaio diferentes para a avaliação da trabalhabilidade e a razão para isso é que nenhum deles é capaz de abranger a grande variação de trabalhabilidade utilizada na prática. Os resultados obtidos a partir de ensaios empíricos devem ser citados quantitativamente, mas com referência ao ensaio. Tais ensaios não medem a trabalhabilidade e é engano citar os resultados como se eles a medissem (TATTERSALL, 1991).

A trabalhabilidade do CAD é avaliada principalmente pelo ensaio e abatimento do tronco de cone, que é uma medida da estabilidade ou da coesão da mistura sob condições estáticas de ensaio e cuja análise de resultados não passa de uma avaliação qualitativa (JOHNSTON, 1990, SAAK; JENNINGS; SHAH, 2004). A validade deste ensaio é recomendada para concretos com abatimentos variando entre 25mm e 175mm, o que corresponde a consistências variando entre os estágios de baixa e média plasticidade; dessa maneira, esse método de ensaio não parece

caracterizar corretamente a trabalhabilidade do CAD com alta capacidade de escoamento, uma vez que seus abatimentos geralmente são maiores que 200mm. Além disso, sabe-se que, na prática, concretos com mesmo abatimento ou mesmo escoamento poderão apresentar diferentes trabalhabilidades (YEN, 1999).

Segundo Castro (2007) avanços devem ser feitos no controle da trabalhabilidade do concreto, de forma que procedimentos de ensaios sejam levados a bases quantitativas mais fundamentadas. Por isso a demanda pela estimativa da trabalhabilidade do concreto fresco em termos reológicos vem aumentando consideravelmente.

Notadamente, a utilização do concreto em campo exige trabalhabilidade no momento de uso do concreto. Isto ocorre levando em conta o tempo em que o concreto terminou de ser misturado. Este tempo pode ser alguns minutos, como pode ser horas, depende da aplicação do material. Por isso a importância de se avaliar a trabalhabilidade do concreto fresco depois de um determinado período de tempo após o término de mistura do material.

Castro (2007) afirma que o desenvolvimento do reômetro surgiu para simplificar a avaliação da trabalhabilidade do concreto ao longo do tempo. Apenas uma pequena amostra precisa ser preparada, ao qual é colocada no equipamento para sucessivos ensaios sob cisalhamento. O reômetro permite ao usuário conhecer as origens do fenômeno da perda da trabalhabilidade.

Segundo de Larrard (1996), a finalidade de se utilizar um reômetro não é apenas medir o maior número de parâmetros possíveis, mas avaliar quantidades físicas que possam estar cientificamente relacionadas aos vários estágios de utilização do concreto, como por exemplo:

- A tensão de escoamento, que descreve a tensão mínima necessária que deve ser aplicada para deformar o concreto fresco logo após o cisalhamento. O ângulo de equilíbrio do material poderá ser calculado a partir da tensão de escoamento. Também, a tensão de escoamento está diretamente relacionada com o ensaio de abatimento de tronco de cone;
- A viscosidade plástica, que expressa o acréscimo de tensão necessária para fornecer uma determinada taxa de cisalhamento. A taxa na qual o concreto se abate no ensaio e abatimento de tronco de cone é uma

ilustração direta da viscosidade plástica. Na prática, a viscosidade plástica pode desempenhar um papel importante: ela controla a taxa de bombeamento e a facilidade de acabamento da superfície do concreto.

A avaliação da trabalhabilidade em termo dos parâmetros reológicos, tensão de escoamento e viscosidade plástica podem estabelecer uma ferramenta poderosa para o controle da produção do concreto. Essa avaliação não possui apenas o papel de dizer se o resultado obtido no ensaio é adequado ou não – fato que os ensaios padrões existentes são incapazes de fazer – mas ela também pode indicar quais são os fatores causadores da falha no ensaio para se alcançar a trabalhabilidade desejada. Assim, os parâmetros reológicos também devem ser determinados a partir de situações práticas, mas de uma maneira sistemática (TATTERSALL, 1991).

3.7 Principais parâmetros reológicos: Tensão de escoamento e viscosidade plástica

- **Tensão de escoamento**

A tensão escoamento é definida como sendo a tensão mínima necessária para que se inicie o escoamento de um material. Segundo Tattersall (1991), a tensão de escoamento, também chamada de tensão de escoamento corresponde à tensão que deve ser excedida para que o escoamento inicie.

Para de Larrard e Sendran (1997), a tensão de escoamento é característica comum de concreto fresco e de materiais granulares secos (como os solos). Castro (2007) apud de Larrard (1997) afirmam que a tensão de escoamento é resultado do atrito intergranular durante o cisalhamento do concreto.

A tensão de escoamento pode ser originada pela aglomeração das partículas do fluido, de modo a formar uma estrutura espacial rígida de partículas por toda a suspensão. Essa tensão mínima corresponde à tensão necessária para romper essa estrutura tridimensional de partículas. A presença de partículas assimétricas e com

alta rugosidade superficial pode auxiliar a estruturação da suspensão, em virtude da sua facilidade de ancoramento entre si (PANDOLFELLI et al., 2000).

A tensão escoamento de um concreto poderá ter origem a partir de três fontes contribuintes: o imbricamento mecânico do agregado graúdo que compõe o concreto (FERRARIS; LARRARD, 1998); as forças de atração entre o cimento e outras pequenas partículas que promovem a flocculação (LEI; STRUBLE, 1997); e o gel coloidal de silicato de cálcio hidratado que se forma ao redor das partículas de cimento como resultado da sua reação de hidratação, bem como outros contribuintes do endurecimento final das misturas à base de cimento (DOUBLE; HELLAWELL, 1977 apud PETROU et al., 2000b). Outros autores afirmam que sob temperatura constante, a tensão de escoamento do concreto fresco varia dentro de um limite relativamente amplo e depende da condição da estrutura da mistura (SZWABOWSKI, 1991).

- **Viscosidade plástica**

A viscosidade é a proporção entre a taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento do concreto. Para um modelo reológico dito Binghamiano, a viscosidade plástica é definida como a diferença entre a tensão de cisalhamento e a tensão de escoamento dividida pela taxa de cisalhamento (TATTERSALL; BANFILL, 1983). Segundo De Larrard e Sendran (2002), a viscosidade plástica tende a relacionar o concreto fresco com corpos viscosos como os óleos ou a água, sendo definida como a razão entre a proporção de materiais sólidos em volume e sua densidade de empacotamento.

Relacionando os dois parâmetros reológicos com as aplicações práticas, pode-se concluir que enquanto a tensão de escoamento indica a resistência ao escoamento para baixas velocidades de rotação, a viscosidade plástica indica como a resistência ao escoamento aumenta com o aumento da velocidade de rotação (CLAISSE; LORIMER; AL OMARI, 2001).

A importância de se avaliar os dois parâmetros reológicos pode ser observada ao comparar os parâmetros reológicos de dois concretos quaisquer. Um único parâmetro não é suficiente para determinar o comportamento reológico do concreto

no estado fresco. A determinação dos dois parâmetros reológicos permite a diferenciação imediata do concreto que poderiam ser erroneamente considerados idênticos por um dos ensaios padrões existentes, o que pode ser observado na Figura 3. 9 e Figura 3. 10. Nestas figuras verifica-se que dois concretos podem ter um dos parâmetros reológicos idênticos, enquanto o outro pode ser totalmente distinto, o que implica no fato destes materiais apresentarem comportamentos reológicos muito diferentes (TATTERSAL, 1991, FERRARIS, 1996, 1999).

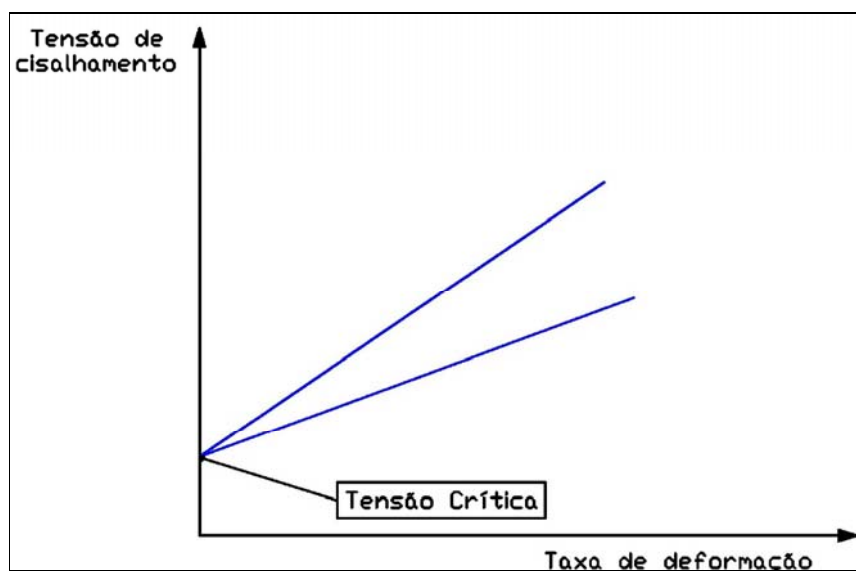


Figura 3. 9: Reologia do concreto: tensões críticas iguais com diferentes viscosidades. (FERRARIS, 1996; 1999).

Além disso, existe outra vantagem decorrente do fato de que os vários fatores que compõem uma mistura e que interferem na sua trabalhabilidade influenciam a tensão de escoamento e a viscosidade plástica de maneiras diferentes. Assim, um estudo da natureza das mudanças que ocorrem na mistura pode fornecer informações que indicam o fator responsável por elas.

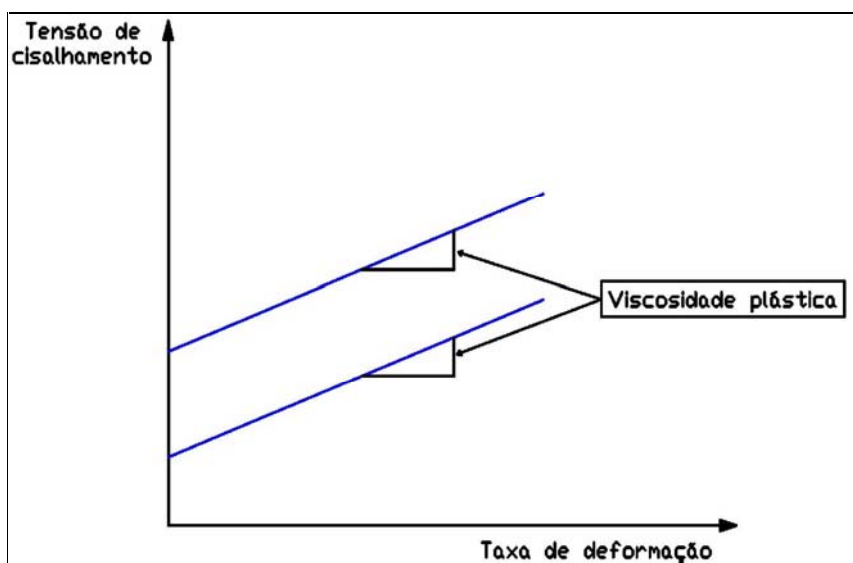


Figura 3. 10: Reologia do concreto: viscosidades iguais com diferentes tensões críticas. (FERRARIS, 1996, 1999).

No caso do concreto um aumento no teor da água de amassamento pode resultar em um aumento de sua trabalhabilidade, com uma redução uniforme tanto da tensão de escoamento quanto da viscosidade plástica da mistura. Uma menor tensão de escoamento significa que esse material está apto a escoar sob seu peso próprio, enquanto uma maior viscosidade plástica é necessária para evitar a segregação dos agregados. No caso do concreto convencional a tensão de escoamento é maior para uma viscosidade menor quando comparado com o concreto de alto desempenho, segundo (YEN et al., 1999).

3.7.1 Influência dos materiais nos parâmetros reológicos do concreto

O comportamento reológico do concreto é dependente dos materiais constituintes na mistura e de suas proporções. Segundo Castro (2007), um estudo da natureza das mudanças que ocorrem na mistura pode fornecer informações que indicam o fator responsável por elas. Esse fato é ressaltado por Tattersall (1991) que segundo ele a determinação de dois parâmetros reológicos é capaz de distinguir as propriedades dos concretos e detectar essas mudanças.

Para Castro (2007), a tensão de escoamento está relacionada com a capacidade de escoamento do concreto, no caso de uma tensão de escoamento baixa o concreto escoar sob seu peso próprio. Ela ainda afirma que a viscosidade está relacionada com a segregação dos materiais. No entanto um concreto precisa ter suas propriedades de acordo com as necessidades de uso no campo, e são os materiais constituintes que vão proporcionar estas propriedades ao concreto.

Para um determinado conjunto de materiais, o teor de água pode ser um parâmetro para o controle da viscosidade do material (SEDRAN et al., 1996). Dependendo da dosagem de um concreto, um aumento no teor da água de amassamento pode resultar em um aumento de sua trabalhabilidade, com uma redução uniforme tanto da tensão de escoamento quanto da viscosidade plástica da mistura (CASTRO, 2007).

Aïtcin (2000) afirma que a reologia do concreto é governada por fatores físicos e químicos. E dentre os fatores físicos estão a granulometria e a forma dos agregados. É sabido que o formato dos agregados influencia na trabalhabilidade do concreto e que a granulometria influencia na porosidade e esqueleto granular do concreto.

Struble et al. (1998) realizou um estudo onde foi adicionado agregado à pasta de cimento. Foi observado um aumento tanto na viscosidade plástica quanto na tensão de escoamento desta mistura. Porém, ele nos alerta que ambos os parâmetros são reduzidos quando a granulometria do agregado se torna mais densa.

Os agregados graúdos interferem em ambas as constantes reológicas do concreto, segundo Nishubayashi et al. (1996) verificaram que as constantes reológicas aumentaram à medida que a fração volumétrica de agregado graúdo também aumentava e que o tipo de agregado graúdo utilizado interferiu nas constantes reológicas do material. Já para o agregado miúdo, Chidiac et al. (2000) mostraram que a viscosidade plástica é a propriedade reológica mais influenciada com o aumento da fração volumétrica deste agregado.

O cimento é um material que, segundo a bibliografia, é o material que tem maior influência nas propriedades reológicas do concreto. Esta influência é devido a fatores físicos e químicos do cimento. Aïtcin (2000) fala da influência da

granulometria dos materiais cimentícios, que se otimizada, melhora a trabalhabilidade e a resistência do concreto.

A influência do cimento mais significativa está relacionada com sua composição química, isto é, com o retardamento do processo de hidratação dos aluminatos causado pelo sulfato de cálcio (BLOMBLED, 1980 apud GRESZCZYK; KUCHARSKA, 1991). As grandes diferenças nos comportamentos reológicos de materiais com e sem a adição de gesso estão relacionadas principalmente ao tipo do produto de hidratação e à sua influência sobre a modificação da superfície dos grãos de cimento (forças de interferência intergranular, formação da estrutura de coagulação, imobilização física da água etc.). Dentre os vários produtos de hidratação que podem ser formados, o mais vantajoso para as propriedades reológicas dos materiais à base de cimento é o cristal de etringita (KUCHARSKA, 1991). Segundo Kucharska (1991), o efeito dos produtos de hidratação sobre a tensão de escoamento se mostrou mais evidente do que sobre a viscosidade plástica, sendo essa influência maior na medida em que diminui a disponibilidade de sulfatos para a formação dos cristais de etringita.

As adições químicas têm efeito muito grande sobre as propriedades do concreto. Tattersall e Banfill (1983) as dividiram em dois grupos: plastificantes e superplastificantes, que possuem um efeito predominante sobre a tensão de escoamento do material; e os agentes incorporadores de ar, cuja influência principal se dá sobre a viscosidade plástica do concreto.

As adições do primeiro grupo interagem com as partículas de cimento, introduzindo uma camada de adsorção que evita a aproximação entre elas por meio de uma combinação de repulsões eletrostática e estérica, enfraquecendo a estrutura que pode se formar quando a mistura permanece em repouso e, conseqüentemente, reduzindo a tensão de escoamento do material. Como as partículas estão dispersas, existe uma pequena mudança da viscosidade plástica, porém isso depende da distribuição granulométrica global da mistura. As adições do segundo grupo introduzem bolhas de ar esféricas na mistura de concreto que agem como esferas rolantes para permitir que as partículas maiores escoem mais facilmente sobre as demais partículas. Assim, essas bolhas de ar têm uma maior influência sobre a viscosidade plástica do que sobre a resistência da estrutura formada quando o material é deixado em repouso (CASTRO, 2007).

A sílica ativa é usada na otimização na granulometria dos materiais Cimentícios, pelo fato de ela ser muito fina com os grãos esféricos. Bache (1981) apontou as vantagens da utilização da sílica ativa. Ele afirma que quando as minúsculas partículas esféricas estão bem dispersas no sistema cimento-água, elas podem deslocar moléculas de água da vizinhança dos grãos de cimento, dessa forma moléculas de água presas entre partículas de cimento floculadas podem ser liberadas e assim contribuir para fluidificar a mistura. Isto provoca um aumento na tensão de escoamento e na viscosidade plástica do concreto.

Porém, a substituição de parte do cimento por uma adição mineral também pode resultar em uma redução de ambos os parâmetros reológicos do concreto. A granulometria melhorada do aglomerante e o efeito lubrificante concedido pelas pequenas partículas de sílica possivelmente reduzem o imbricamento entre os agregados e, conseqüentemente, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica do material [NEHDI; MINDESS; AİTCIN, 1998, ZHANG; HAN, 2000). De acordo com Wallevik apud Tattersall (1991b), a incorporação de sílica ativa em substituição ao cimento até um determinado valor limite – que depende do teor de cimento e que diminui com a redução do teor de água – reduz a viscosidade plástica em até 50%; a tensão de escoamento é praticamente constante até que o valor limite para substituição de cimento por sílica ativa seja alcançado e, a partir daí, ela aumenta consideravelmente.

3.7.2 Métodos de Ensaio existentes

Os métodos de ensaios existentes para determinação dos parâmetros reológicos do concreto fresco são divididos em dois grupos, a saber, os que medem apenas um parâmetro reológico e os que medem dois parâmetros reológicos. Os mais comuns e usuais são aqueles que medem apenas um parâmetro reológico. Obter uma relação entre o parâmetro medido e o segundo não é uma tarefa fácil, sendo que na maioria das vezes é impossível calcular o parâmetro fundamental a partir do resultado obtido, podendo apenas garantir uma correlação entre eles (CASTRO, 2007).

Para o CAD, a trabalhabilidade é avaliada por meio dos mesmos ensaios usados para o concreto convencional, mas sua característica específica impede uma correta interpretação dos resultados (FERRARIS, 1999).

Em sua maioria, os dois ensaios existentes e usuais medem apenas um desses parâmetros, relacionados com a tensão crítica ou com a viscosidade plástica do material. No caso específico do concreto fresco, os métodos de ensaio que medem somente um dos parâmetros reológicos podem apenas refletir a resposta do material a uma taxa de cisalhamento em particular. Uma caracterização mais pertinente do comportamento do escoamento do concreto fresco é obtida ensaiando suas propriedades sobre uma determinada variação da taxa de cisalhamento enquanto o concreto escoar (YEN, 1999).

Ao considerar a semelhança entre o comportamento do concreto fresco e um fluido Binghamiano, verificam-se as vantagens em se utilizar de um ensaio capaz de medir os dois parâmetros reológicos sobre os ensaios padrões, que medem apenas um deles. Um ensaio no qual as determinações são feitas sob uma única taxa de cisalhamento, ou sob um único conjunto de condições de cisalhamento, não pode, em princípio, fornecer informação suficiente para descrever a trabalhabilidade, não importando quão complicado seja o ensaio nem quão sofisticado seja o tratamento dos resultados obtidos (TATTERSALL; BANFILL, 1983).

Os ensaios e os equipamentos existentes para medir os parâmetros reológicos do concreto fresco são vários, dentre eles destacamos os mais utilizados, segundo o número de parâmetros medidos, como se segue.

- **Um único parâmetro reológico**

Os ensaios que medem apenas a tensão de escoamento do material, ou seja, a tensão necessária para o início do escoamento, são:

- Abatimento de tronco de cone;
- Penetração (Kelly ball, Vicat, ensaio de Wigmore);
- Viscosímetro de tubo rotativo;

- Ensaio de K-slump.

Os ensaios que medem apenas a viscosidade plástica do material são:

- Consistômetro de Vê-Be;
- LCL;
- Ensaio de Vibração;
- Cone de escoamento (cone de Marsh);
- Caixa L;
- Aparelhagem de Orimet.

- **Dois parâmetros reológico**

Hoje em dia existem ensaios com capacidade de determinar até dois parâmetros reológicos. A tensão de escoamento e a viscosidade determinam o comportamento reológico do concreto fresco. Porém, ainda tem sido encontrado alguns problemas nos ensaios, devido a dificuldade de medir diretamente os valores corretos dos parâmetros. Isto ocorre, segundo Ferraris (1999), devido à dimensão máxima característica do agregado graúdo, a tendência à segregação e aos efeitos do tempo.

Dentre os métodos de ensaio desenvolvidos, destacam-se:

- Two point workability test;
- Mecanismo de Bertta;
- Reômetro;
- Ensaio de abatimento de tronco de cone modificado.

3.7.2.1 Ensaios que medem apenas um parâmetro reológico: Ensaio de abatimento de tronco de cone

O ensaio de abatimento de tronco de cone, que é amplamente utilizado na prática das construções para determinação da trabalhabilidade dos concretos. Como esse método de ensaio fornece apenas um único parâmetro reológico, críticas baseadas no argumento de que um mesmo valor de abatimento pode ser obtido por dois concretos com comportamentos reológicos diferentes tem sido feita. A partir desse ensaio pode-se demonstrar que a tensão de escoamento está dentro da variação desejada, mas a viscosidade pode ser tão alta que a mistura rotulada como “pegajosa” torna-se difícil de ser moldada (CASTRO, 2007).

É um ensaio bastante usado no cotidiano devido a sua simplicidade de execução, além de ser uma excelente ferramenta para o controle da qualidade do concreto, pois pode detectar pequenas mudanças na composição da mistura, isto é, o ensaio pode detectar variações no teor de água a partir da especificação 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.

Além disso, o ensaio é incapaz de diferenciar entre os concretos com níveis de trabalhabilidade muito baixa – aqueles onde o abatimento é zero – ou entre os concretos com níveis de trabalhabilidade muito alta – aqueles onde se observa o colapso durante o ensaio (CASTRO, 2007). Os resultados desse ensaio não classificam as diferentes misturas de concreto em uma ordem correta de trabalhabilidade, permitindo que resultados de abatimentos semelhantes possam ser obtidos para misturas com trabalhabilidades diferentes.

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. Neste ensaio, a tensão consiste no peso próprio do concreto por área. O concreto apenas se move caso a tensão de escoamento seja excedida e, assim que a tensão aplicada for menor que a tensão de escoamento do mesmo, ele estabiliza. A Figura 3. 11 ilustra o abatimento do tronco de cone. Ele corresponde à distância entre o plano correspondente à base superior do molde e o centro da base superior da amostra abatida, medida com régua metálica.

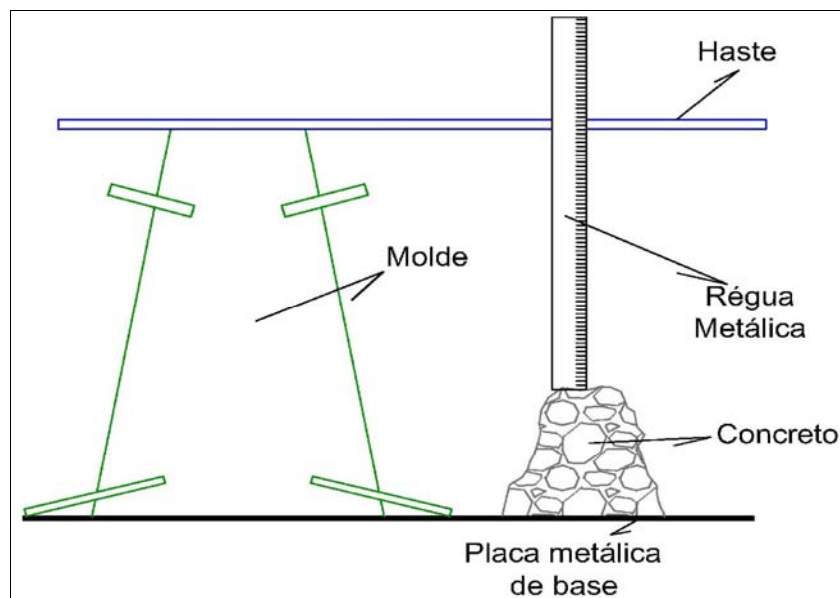


Figura 3. 11: Ensaio de abatimento de tronco de cone.

3.7.2.2 Ensaios que medem dois parâmetros reológico: Ensaio de abatimento de tronco de cone modificado

O ensaio de abatimento de tronco tradicional é capaz de medir apenas propriedades relacionadas com a tensão de escoamento do concreto fresco. Assim,

recentemente, uma modificação neste método de ensaio tornou possível obter medidas relacionadas com a viscosidade plástica do material (CASTRO, 2007).

O ensaio de abatimento de tronco de cone modificado proposto por Ferraris e De Larrard (1998b), permite caracterizar a viscosidade plástica, baseado em uma taxa média de abatimento durante o ensaio. Dessa maneira, intervalos de tempo necessários para se alcançar uma altura intermediária entre os valores inicial e final de abatimento pareceram, a priori, uma boa maneira para descrever a viscosidade dos concretos (CASTRO, 2007).

Segundo Ferraris e De Larrard (1998b) apud Castro (2007), 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 tensão de escoamento do concreto é relacionada com o abatimento já a viscosidade está relacionada com o tempo de abatimento do material. A modificação ocorrida no aparelho de abatimento de tronco de cone padrão para o aparelho de abatimento de tronco de cone modificado foi à colocação de uma haste que fica ao centro da base de colocação do cone, e o uso de um disco deslizante conforme Figura 3. 12 e Figura 3. 13.

Para a marcação do tempo, é utilizado um disco que desliza pela haste por uma altura de 100 mm. Quando o disco chega a altura de 100 mm ele é travado pela haste Figura 3. 14. O tempo é marcado por um operado que controla o tempo podendo ser por cronômetro, por captura de imagens, dispositivos eletrônicos, etc.

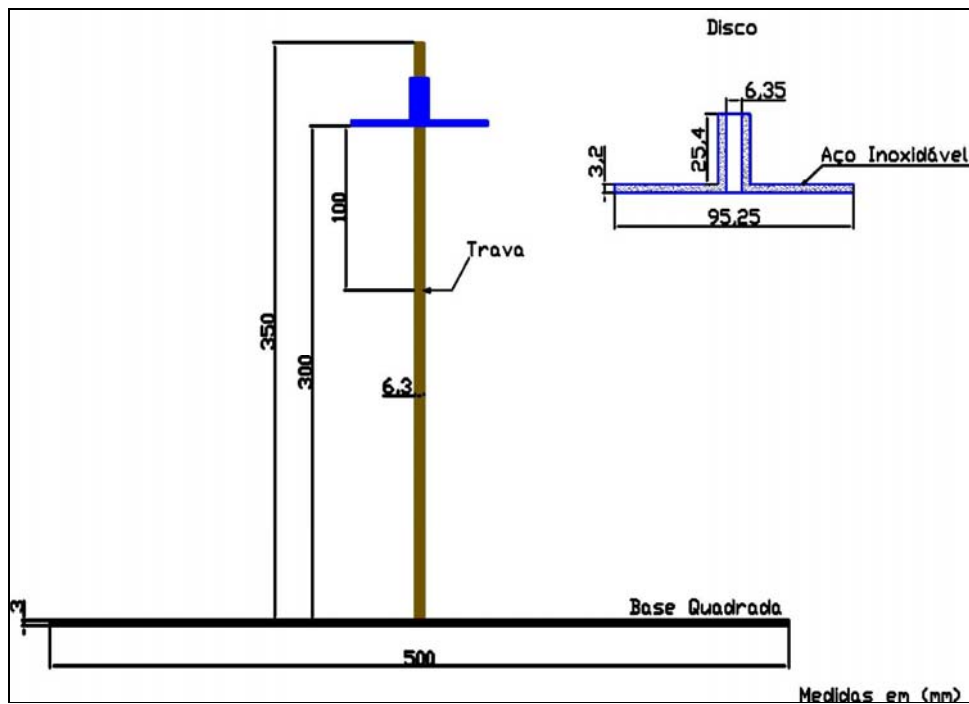


Figura 3. 12: Aparelho de abatimento de tronco de cone modificado. Haste no centro da base e disco deslizante. (FERRARIS; DE LARRARD, 1998).

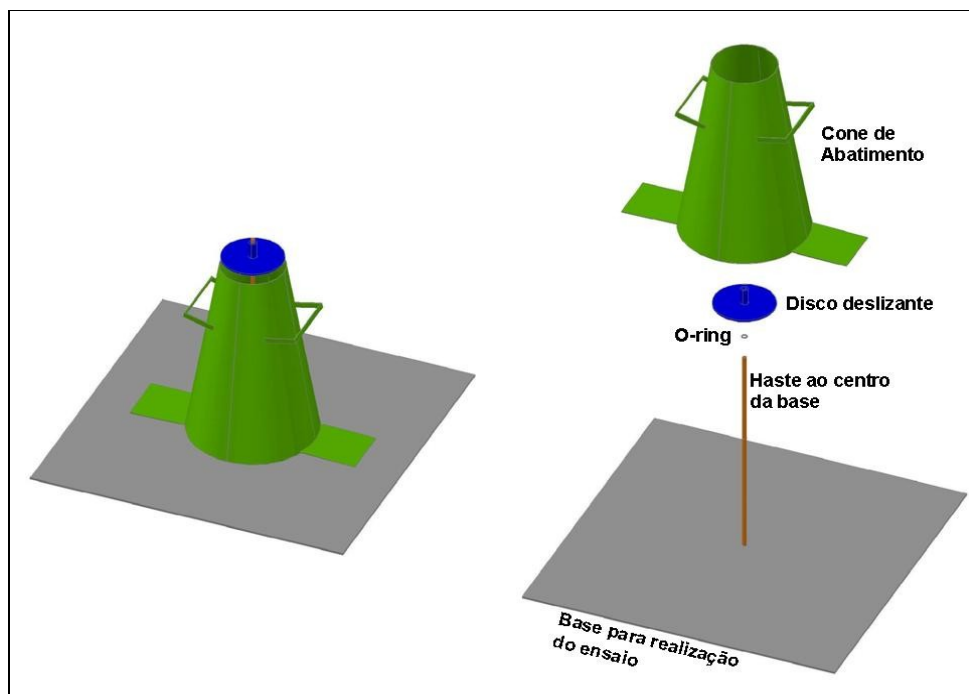


Figura 3. 13: Aparelho de abatimento de tronco de cone modificado. Posicionamento do equipamento para realização do ensaio.

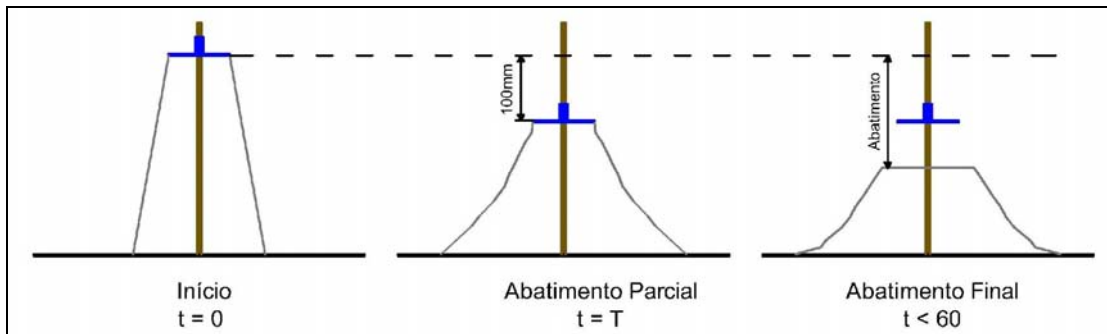


Figura 3. 14: Esquema de ensaio de abatimento de tronco de cone modificado. (FERRARIS; DE LARRARD, 1998).

O procedimento para a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado é simples e semelhante ao ensaio padrão. As etapas de execução do ensaio são (FERRARIS; DE LARRARD, 1998):

1. Cuidadosamente limpe a vara e aplique nela graxa para o deslizamento do disco;
2. Usando uma esponja úmida, umedeça a base e a parede do molde;
3. Coloque o molde na base, assegurando que o seu eixo coincida com o da vara;
4. Enquanto mantém o molde na base, coloque o concreto em três camadas com 25 golpes em cada camada;
5. Faça o acabamento na superfície do concreto usando uma espátula;
6. Usando uma estopa limpe a parte da vara que projetou sobre a mostra de concreto;
7. O deslizamento do disco ao longo da vara é feito com a superfície do concreto;
8. Levante o modelo do cone verticalmente quando começar a cronometrar;
9. Enquanto o concreto está descendo, continue observando o disco e pare de cronometrar assim que o disco parar de se mover;
10. Uma vez o slump estabilizado, ou no mais um minuto depois que parar o teste, remover o disco e medir o slump com a régua.

Para o cálculo da tensão de escoamento e da viscosidade plástica, foram utilizados o abatimento final e o tempo da queda do disco. A tensão de escoamento

está relacionada com o abatimento final do concreto e a viscosidade plástica está relacionada com o tempo de queda do disco no percurso de 100 mm.

Baseado em análise de elementos finitos do teste de slump e nas medidas da tensão de escoamento, usando um reômetro e o slump, Hu (DE LARRARD et al., 1994 *apud* FERRARIS; De LARRARD, 1998b) propôs uma fórmula geral relacionando o slump s com a tensão de escoamento t_0 no caso desta tensão não apresentar boa precisão nos resultados em situações onde a viscosidade plástica do material fosse maior que 300 Pa.s. Empiricamente, o modelo de Hu foi melhorado pela adição de uma constante e pela modificação no termo de inclinação da reta, resultando na equação 3.8 (CASTRO,2007):

$$\tau_0 = \frac{\rho}{270}(300 - s) \quad (3.8)$$

Onde ρ é a densidade e é expressa em kg/m^3 , t_0 em Pa, e s em mm.

Segundo Ferraris e De Larrard (1998) há uma media de erro de 195 Pa por tensão de escoamento na taxa (100 a 2000 Pa), Figura 3. 15. A declividade da reta da equação proposta por Hu (Figura 3. 16) foi mudada a fim de minimizar o erro (Figura 3. 17). Com esta mudança, a equação 3.8 também teve algumas alterações significativas (equação 3.6), como se segue:

$$\tau_0 = \frac{\rho}{347}(300 - s) + 212 \quad (3.9)$$

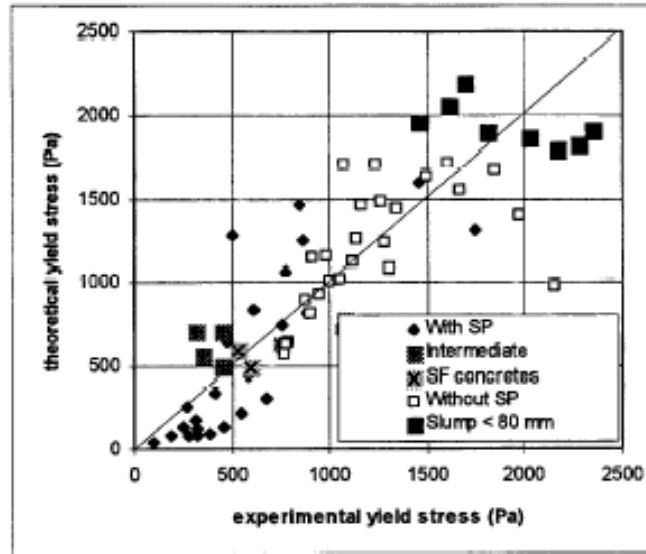


Figura 3. 15: Comparação entre a tensão de escoamento experimental medida com o reômetro e para o modelo de Hu (equação 3.5). (FERRARIS; DE LARRARD, 1998).

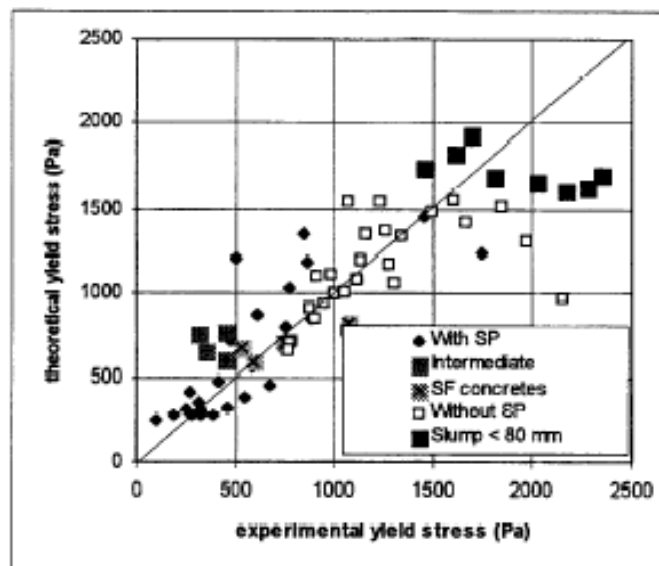


Figura 3. 16: Comparação entre a tensão de escoamento experimental medida com o reômetro e para a equação 3.6. (FERRARIS ; DE LARRARD, 1998).

Para avaliar a viscosidade plástica foi assumido um abatimento final, densidade do concreto e a diferença do tempo do slump. De Larrard propôs estas equações (3.10 e 3.11) para concreto com abatimento entre 100 mm e 260 mm.

$$\mu = 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot (S - 175) \cdot \rho \cdot T \quad \text{para } 200 \text{ mm} < S < 260 \text{ mm} \quad (3.10)$$

$$\mu = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot T \quad \text{para } S < 200 \text{ mm} \quad (3.11)$$

Onde μ é a viscosidade plástica em [Pa.s] e T é o tempo do abatimento parcial em [s].

Ábacos (Figura 3. 17) foram criados por Ferraris e De Larrard (1998) para evitar cálculos excessivos utilizando as equações anteriores, de modo a facilitar o calculo da tensão de escoamento e da viscosidade do concreto fresco. Estes ábacos requerem para uso, concretos com massa unitária de 2400 kg/m³, slump final e tempo de abatimento parcial.

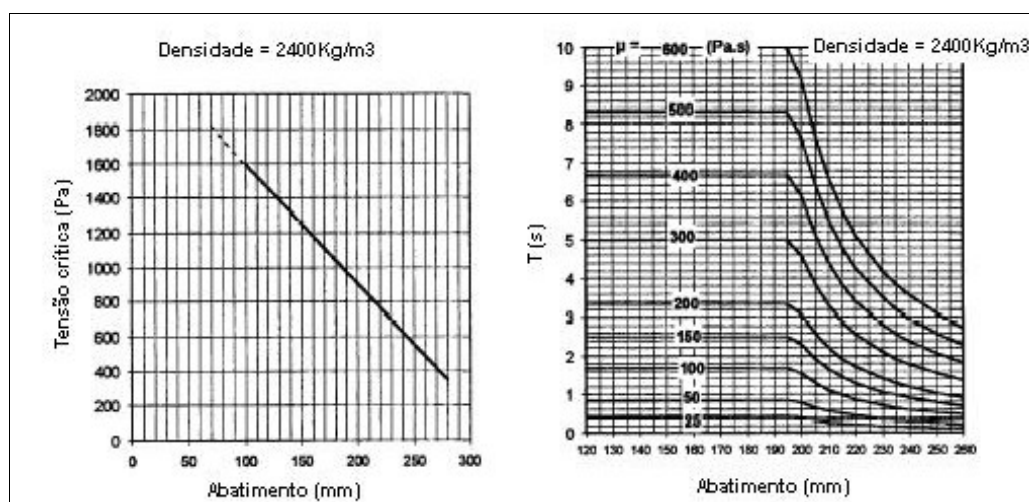


Figura 3. 17: Ábacos para estimar a tensão de escoamento e a viscosidade do concreto para os valores do abatimento de tronco de cone modificado (concreto com densidade de 2400 kg/m³). (FERRARIS; DE LARRARD, 1998).

3.7.2.3 Reômetro

Os reômetros são equipamentos precisos não apenas para pesquisa, mas também para estudos práticos e medidas de controle de qualidade do material, direcionados à avaliação das propriedades reológicas de fluidos e suspensões. Segundo Pillegi et al (2006), o princípio básico de operação dos reômetros está em avaliar a tensão de cisalhamento gerada pelo compósito à base de cimento em decorrência do seu cisalhamento por raquetes que, em movimento rotacional axial ou planetário, induzem-na a escoar.

Eles fornecem um número maior de informações quando comparados aos ensaios empíricos convencionais, reduzindo os custos com material e mão-de-obra. Também, as informações obtidas são mais objetivas, uma vez que o ensaio é totalmente automatizado e controlado por computador (DE LARRARD, 1996).

A evolução dos reômetros se deu a partir do plastômetro desenvolvido por Powers e Wiler nas décadas de 1930 e 1940 (Figura 3. 18). Com o plastômetro e posteriormente o reômetro, a determinação dos parâmetros reológicos fundamentais tornou-se possível, em diferentes taxas de cisalhamento, concluindo-se ser a reometria a melhor ferramenta para adequação das argamassas às diferentes aplicações.

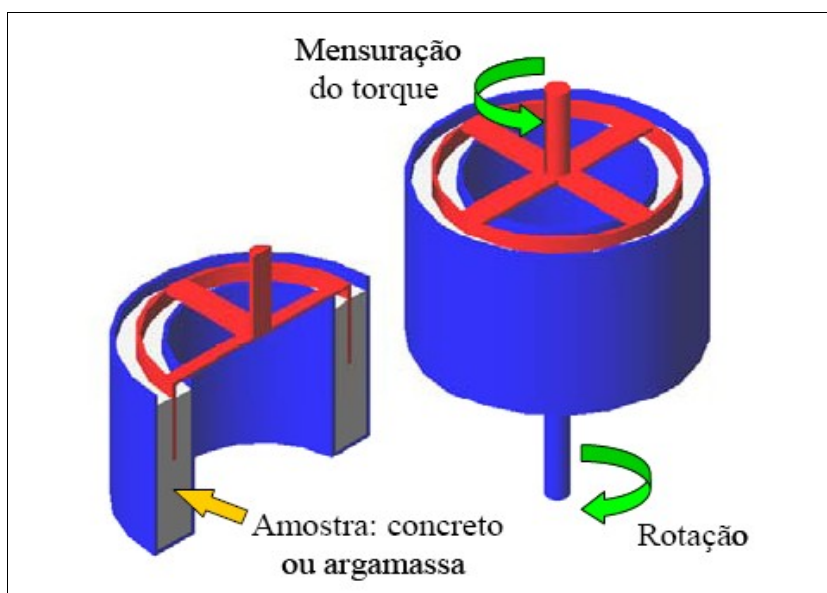


Figura 3. 18: Representação esquemática do plastômetro de Powers e Wiler. (HOPPE et al, 2006)

O primeiro reômetro foi criado por Powers (1968) no conceito de cilindros coaxiais (CASTRO, 2007). Com a evolução tecnológica dos reômetros, surgiram equipamentos que utilizam novos conceitos para o cisalhamento do material, dentre os quais se destaca o reômetro BTRHEOM (Figura 3. 19) desenvolvido pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), França (DE LARRARD, 1997).

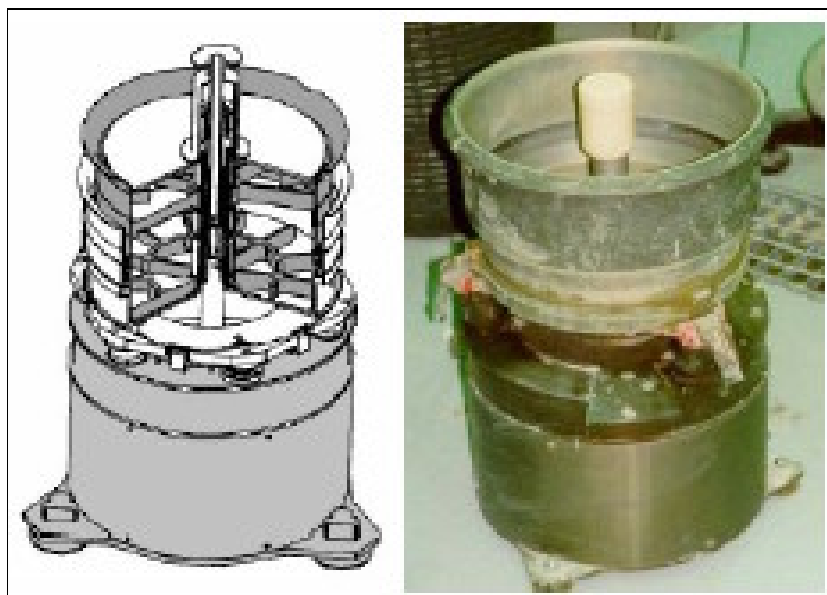


Figura 3. 19: Reômetro BTRHEOM, baseado no conceito placa/placa. (FERRARIS, 1999).

As medidas obtidas a partir de um reômetro só podem ser interpretadas caso o fluido avaliado seja homogêneo. Devido à extensa variação da distribuição granulométrica das partículas presentes em uma mistura de concreto, esse material não pode ser considerado como tal. Assim, a descrição das características dessa classe de material em termos de tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento é imprecisa. Uma aproximação mais precisa seria a análise direta das forças (toque) que resultam do cisalhamento (velocidade de rotação) do concreto (PILEGGI, 2000).

No caso dos concretos, os reômetros são indicados para materiais com consistência fluida. Além de determinar o comportamento reológico desses materiais, os reômetros apresentam geometrias que são especialmente adequadas para a avaliação de formulações durante a mistura e o transporte, simulando condições de escoamento turbulento (CASTRO, 2007).

As propriedades reológicas do concreto fresco são determinadas a partir da plotagem de curvas de cisalhamento com o auxílio de um reômetro, conforme Figura 3. 20. Através dessas curvas, se torna possível a caracterização reológica de materiais à base de cimento, permitindo obter a viscosidade deste material em diferentes taxas de cisalhamento.

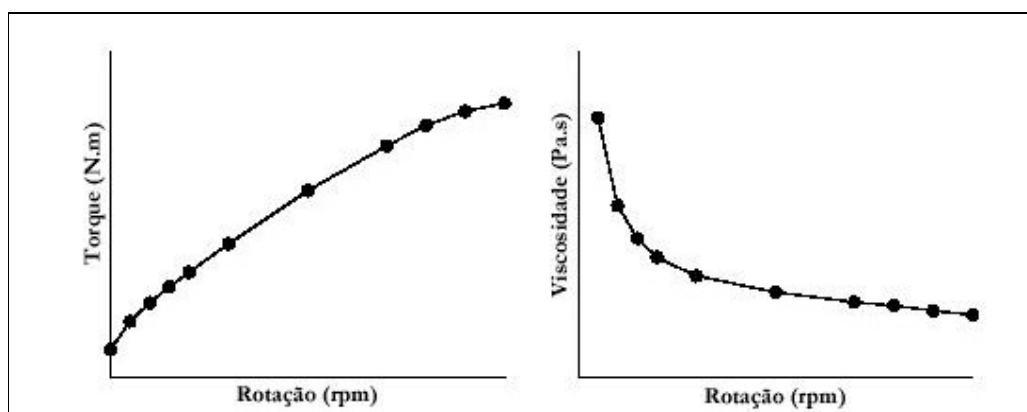


Figura 3. 20: Perfil reológico obtido através do reômetro. (PILEGGI et al, 2006).

A reometria pode não atender satisfatoriamente à caracterização reológica dos diferentes tipos materiais à base de cimento, podendo ser utilizada em paralelo com outras técnicas. Porém, atualmente é um dos melhores métodos de ensaio para avaliar principalmente o comportamento sob fluxo em uma ampla faixa de taxas de cisalhamento, permitindo a rápida obtenção da tensão de escoamento e da viscosidade aparente (PILEGGI et al, 2006).

O ensaio via reometria clássica desta pesquisa foi realizado no reômetro de concreto disponível no Laboratório de Cerâmicas Especiais e Refratários da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

O projeto deste reômetro foi baseado em um misturador planetário originalmente composto por um motor de corrente alternada (1 CV e 1140 RPM), um câmbio de quatro velocidades (28, 48, 80 e 132 RPM no eixo de saída para o planetário) e uma cuba cilíndrica com capacidade para misturar até 10 kg de concreto (PILEGGI, 2001).

A vantagem da consideração do modelo planetário é que este permite que tanto concretos com alta fluidez quanto concretos com fluidez reduzida e sem coesão sejam avaliados. Essa possibilidade amplia o campo de utilização do equipamento quando comparado aos reômetros de cilindros concêntricos, além de permitir o estudo da mistura e a simulação de diversas técnicas de aplicação dos concretos, dentre outras coisas (PILEGGI, 2001).

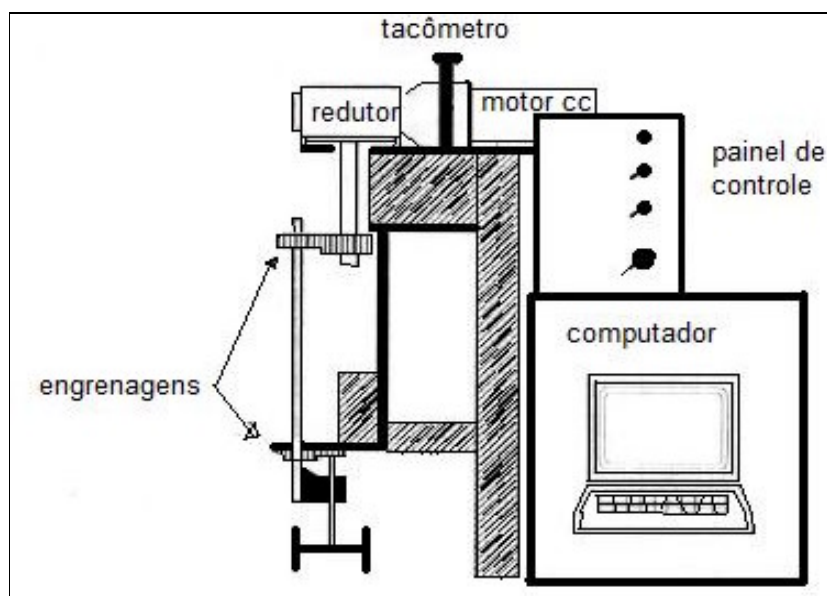


Figura 3. 21: Esquema do reômetro utilizado na presente pesquisa (PILEGGI, 2001).

As peças do dispositivo planetário e a pá misturada foram construídas em aço inox, sendo dimensionadas para que a distância entre o elemento móvel e a parede da cuba seja de 10 mm. O sistema de fixação das pás é feito através de rosca, proporcionando o travamento efetivo durante o funcionamento do equipamento. É possível acoplar um dispositivo adaptador para a fixação de elementos móveis centrais no eixo central do planetário, permitindo que o equipamento também opere como um reômetro de cilindros concêntricos (PILEGGI, 2001).

O sistema de redução original do misturador foi mantido para transferir a rotação do motor para o planetário. O câmbio de quatro velocidades permite adequar a relação força/velocidade de rotação para cada ensaio em particular, sendo possível trabalhar desde baixas até muito elevadas rotações com precisão (PILEGGI, 2001).

Porém algumas mudanças foram feitas no misturador original. A primeira alteração consistiu na redução da capacidade da cuba de mistura de 10 kg para 4 kg e na instalação de entradas para sensores de pH e temperatura. Para o controle da rotação do equipamento e, conseqüentemente, aplicação do cisalhamento desejado ao concreto, um servo-motor de corrente contínua de 2 CV substituiu o motor original e a velocidade de rotação tornou-se variável (entre 0 e 3000 RPM, na qual é atingido o torque máximo de 7 Nm) (PILEGGI et al., 2000, PILEGGI, 2001).

O controle da rotação é feito pela variação da voltagem de alimentação, que é diretamente proporcional à rotação. O motor também é ligado a um tacômetro, permitindo uma maior confiabilidade na rotação medida. Assim, esse motor mais potente e capaz de atingir rotações mais elevadas permite que as misturas de concreto sejam estudadas sob condições extremas de cisalhamento (PILEGGI, 2001).

A introdução de um servo-motor de corrente contínua exigiu a construção de um painel de controle, no qual estão contidos um conversor de corrente alternada para contínua, um sistema de segurança que limita a corrente máxima que pode ser fornecida ao motor, um controlador de rotação do motor, além de pontos de conexão para a comunicação com um computador (PILEGGI, 2001). O painel de controle foi conectado a um computador e um software específico também foi desenvolvido para controlar o reômetro e analisar os dados coletados (PILEGGI et al., 2000).

O equipamento controla a velocidade de rotação (cisalhamento) da pá usada para misturar o concreto e para medir a força (torque) necessária para manter a pá movendo sob uma determinada rotação. Assim, o reômetro (Figura 3. 22), em sua arquitetura final, é um equipamento que possui força, velocidade e precisão suficientes para estudar os mais variados tipos de concretos. Ele permite o estudo de diferentes aspectos da preparação desse material, incluindo o procedimento de mistura, a influência das adições e o comportamento reológico, entre outros. É uma ferramenta eficiente para a caracterização de concretos e, o mais importante, ele contribui para o preenchimento do espaço entre a tecnologia dos concretos e sua caracterização (PILEGGI et al., 2000).

As propriedades reológicas do concreto fresco são determinadas a partir da plotagem de curvas de cisalhamento com o auxílio de um reômetro. Dessa maneira é possível determinar a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento sob condições definidas fisicamente.

A programação computadorizada do ensaio no reômetro irá depender do tipo de material a ser analisado. De acordo com Wallevik e Gj.rv (1990a), para uma suspensão à base de cimento, onde certos fenômenos dependentes do tempo também estão envolvidos, a mudança na velocidade de rotação (taxa de cisalhamento) deve ser feita em escada e não continuamente.



Figura 3. 22: Reômetro utilizado na pesquisa.

As curvas de cisalhamento são necessárias para caracterizar adequadamente materiais à base de cimento como fluidos não-Newtonianos, uma vez que sua viscosidade depende tanto da taxa de cisalhamento quanto da duração do cisalhamento (SUHR, 1991).

Quando um concreto é submetido a uma taxa de cisalhamento gradualmente crescente e, posteriormente, essa taxa é uniformemente reduzida à zero, a curva resultante (curva descendente) poderá ou não coincidir com a curva anterior (curva ascendente). A esse gráfico dá-se o nome de curva de histerese, construída quando o material sofre uma quebra estrutural sob a ação de um cisalhamento (TATTERSALL; BANFILL, 1983), ou seja, a histerese é a tendência de um material ou sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou. O volume de histerese, cuja área representa o trabalho relacionado com o volume cisalhado, permite uma análise qualitativa do cisalhamento, sendo possível, então, tirar conclusões quanto à estabilidade da estrutura desses materiais (SUHR, 1991).

4

Programa Experimental

Neste capítulo é apresentado o programa experimental utilizado no estudo do comportamento reológico do concreto no seu estado fresco assim como a avaliação de suas propriedades mecânicas no estado endurecido.

O comportamento reológico do concreto no estado fresco foi realizado através do ensaio de tronco de cone modificado variando-se o tempo de descanso do concreto. O ensaio do tronco de cone modificado, proposto por Ferraris e De Larrard (1998b), fornece os dois parâmetros reológicos, viscosidade e tensão crítica, necessários para a avaliação das propriedades reológicas do concreto fresco.

Para fins de comparação dos resultados obtidos através do ensaio de tronco de cone modificado foram realizados ensaios via reometria clássica, utilizando o reômetro, disponível no Laboratório de Cerâmicas Especiais e Refratários, Edifício Alcoa, do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar. O reômetro usado foi desenvolvido na Universidade Federal de São Carlos e destinado à avaliação reológica de concretos refratários. O projeto foi baseado em um misturador planetário originalmente composto por um motor de corrente alternada (1 CV e 1140 RPM), um câmbio de quatro velocidades (28, 48, 80 e 132 RPM no eixo de saída para o planetário) e uma cuba cilíndrica com capacidade para misturar até 10 kg de concreto (PILEGGI, 2001).

Devido a limitação existente do reômetro utilizado, o qual permite ensaios com agregados graúdos de diâmetro nominal de até 9,5 mm, foi necessário desenvolver uma nova composição de concreto de alto desempenho aqui chamado de MCAD, apenas com agregados de diâmetro segundo a limitação permitida.

O concreto no estado endurecido foi avaliado através das suas propriedades mecânicas resistências à compressão (f_c), resistência à tração (f_t) e módulo de elasticidade (E_c), obtidos das amostras de concreto convencional e de concretos de alto desempenho elaborados com adição de sílica ativa e de superplastificante.

Para melhor visualizar a evolução da curva de abatimento do concreto em tempo real foram realizados ensaios de abatimento de tronco de cone, cujo dispositivo foi feito segundo as especificações da NBR NM 67/98, porém de acrílico, especificamente para este fim. Este equipamento possibilitou a visualização através de filmagem da evolução do abatimento do concreto em tempo real. Com os dados obtidos pela câmera, foi possível traçar um gráfico do abatimento em função do tempo, que por sua vez permite relacionar os parâmetros reológicos medidos pela reometria clássica e pelo tronco de cone modificado.

4.1 Dosagem do Concreto

Os concretos avaliados na presente pesquisa foram: Concreto Convencional (CC), Concreto de alto desempenho utilizando brita 16mm (CAD) e o micro concreto de alto desempenho utilizando brita 9,5 mm (MCAD).

Como primeiro passo, foi feito a caracterização dos materiais constituintes do concreto, e posteriormente a avaliação de suas propriedades mecânicas.

4.1.1 Caracterização dos materiais

As caracterizações dos materiais – cimento, agregados e aditivo - foram realizadas no Laboratório CESP de Engenharia Civil de Ilha Solteira e a sílica ativa foi caracterizada na UFMS.

4.1.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado - areia natural – é proveniente do Porto de Areia Nossa Senhora Aparecida, na região de Castilho – SP. Suas características são apresentadas na Tabela 4. 2 juntamente com a sua curva granulométrica representada na Figura 4. 1.

Tabela 4. 2 Caracterização da areia natural

Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura	Massa específica		Absorção (%)	Pulverulento (%)	Massa unitária		Materia orgânica
		Saturada (g/cm ³)	seca (g/cm ³)			aparente seca (g/cm ³)	aparente 4% (g/cm ³)	
4,76	2,4	2,651	2,644	0,26	0,25	1,575	1,183	abaixo

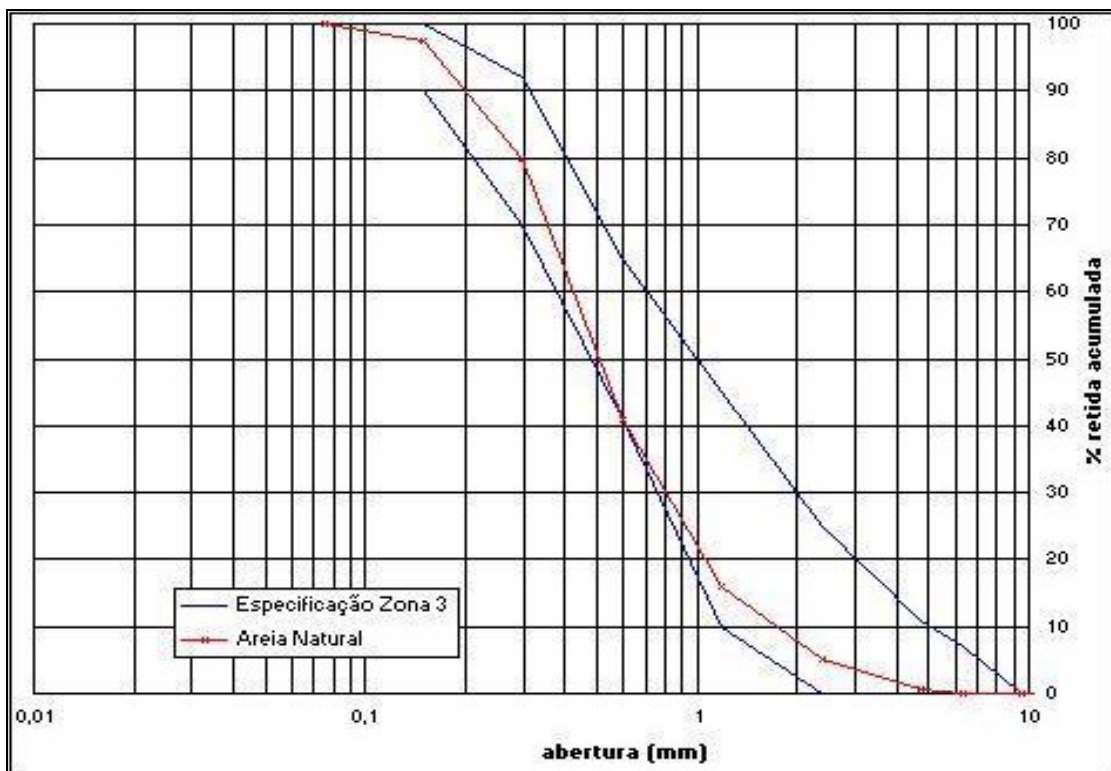


Figura 4. 1: Curva granulométrica da areia natural

4.1.1.3 Agregado graúdo

Foram utilizados dois tipos de agregado graúdo. Para a composição de concreto convencional e os CAD's foi utilizado apenas a brita de origem basáltica, proveniente do Rio Grande na proximidades da cidade de Icem - SP, de granulometria média de 16 mm. Para o caso do MCAD foi utilizado a brita de mesma origem mineral, mas de granulometria 9,5 mm, devido as limitações do reômetro.

Para a caracterização dos agregados graúdos foram realizados os seguintes ensaios: Análise Granulométrica NBR 7217/87; Massa Específica na condição saturada superfície seca (s.s.s.) e Ensaio de Absorção NM – 52 (1996);

A

Tabela 4. 3 e Tabela 4. 4, fornecem os dados obtidos nos ensaios de caracterização da brita de 16mm. A Figura 4. 2 ilustra a curva granulométrica desta brita.

Tabela 4. 3: Valores da porcentagem retida acumulada da brita 16 mm.

Peneira mm →	% Retida Acumulada											
	0,149	0,297	0,595	1,190	2,380	4,760	6,3	9,5	12,7	19,0	25,4	32,0
B1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,6	88,7	53,7	17,6	0,0	0,0	0,0

Tabela 4. 4: Caracterização da brita 16 mm.

Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura	massa específica s.s.s. (g/cm ³)	Absorção (%)
19	6,51	2,917	1,23

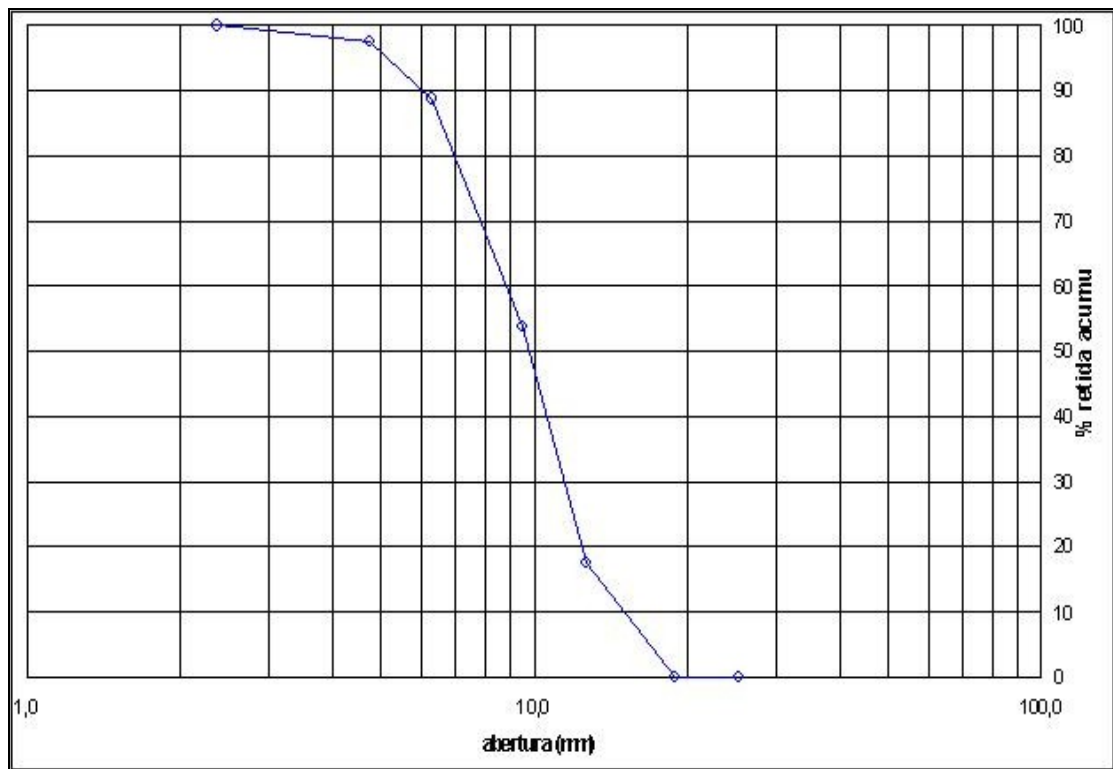


Figura 4. 2: Curva granulométrica da brita de 16mm.

A Tabela 4. 5 e

Tabela 4. 6 fornece os valores dos ensaios de caracterização da brita de 9,5mm. A Figura 4. 3 ilustra a curva granulométrica desta brita.

Tabela 4. 5: Valores da porcentagem retida acumulada da brita 9,5 mm.

Peneiras (mm) →	% Retida Acumulada											
	0,075	0,150	0,300	0,600	1,18	2,36	4,75	6,30	9,50	12,5	19,0	25,0
B0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 4. 6: Caracterização da brita 9,5mm.

ϕ máximo (mm)	módulo de finura	massa específica s.s.s. (g/cm ³)	absorção (%)
9,50	6,02	2,934	0,37

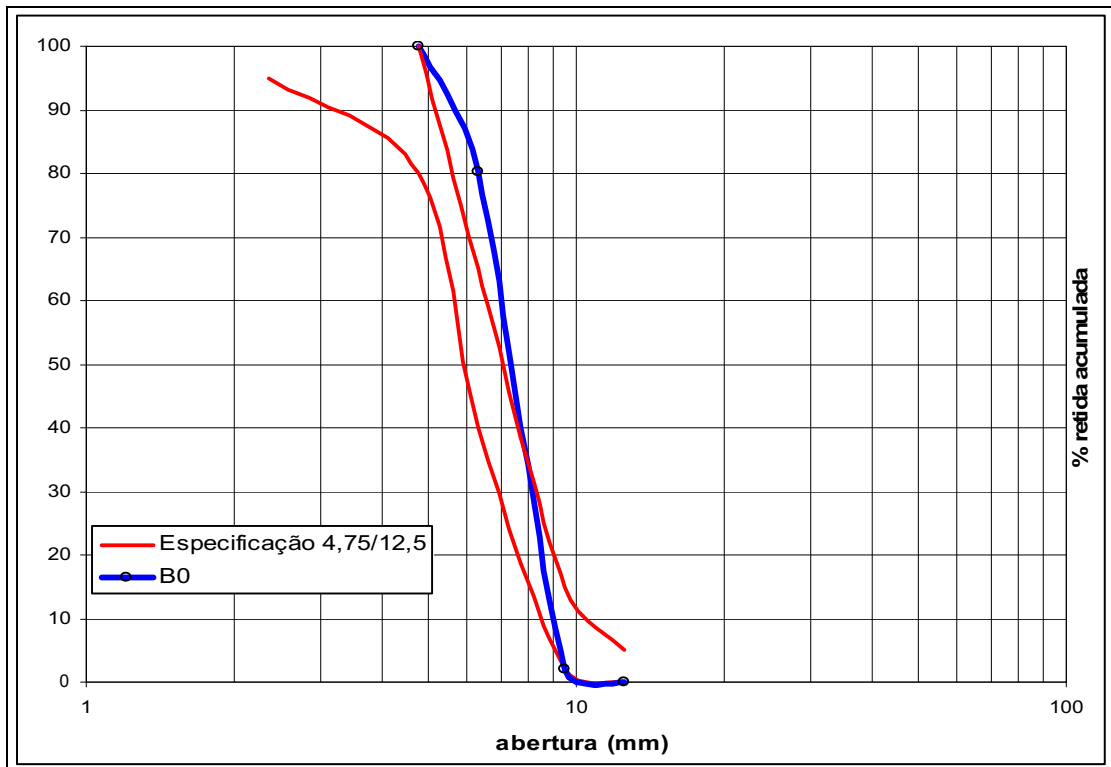


Figura 4. 3: Curva granulométrica da brita de 9,5mm.

4.1.1.4 Água

Foi utilizada água proveniente da rede de tratamento público da cidade de Ilha Solteira – SP e da cidade de São Carlos na ocasião dos ensaios de reometria clássica.

4.1.1.5 Aditivos

O aditivo superplastificante foi utilizado unicamente nas composições dos concretos de alto desempenho.

Para os CAD's, foi usada na composição do concreto uma proporção de aditivo que melhor atendesse as características necessárias para a realização dos ensaios reométricos. Essa proporção foi de 0,9% de aditivo em relação à massa dos aglomerantes. A proporção de aditivo superplastificante variou na ordem de 0,1 e

0,2%, objetivando a obtenção de valores distintos de abatimentos para se poder avaliar sua influência dentro dos parâmetros reológicos avaliados.

Para o MCAD, foi utilizado apenas uma dosagem de aditivo, na proporção de 1,1% em relação à massa de cimento. Esta proporção foi a que apresentou as melhores características para realização dos ensaios de abatimento de tronco de cone modificado e da reometria clássica.

O aditivo utilizado, à base de policarboxilato, cujo peso específico é de 1,087 g/cm³ e o teor de sólidos de 30%, segundo os dados do fabricante.

4.1.1.6 Sílica Ativa

A sílica ativa foi utilizada unicamente nos concretos de alto desempenho (CAD's e MCAD). Em todos os traços foram utilizados a mesma proporção (10% do peso do cimento, em substituição). A sílica ativa foi fornecida pela Camargo Correa divisão Silmix, em sacos em forma de pó. Suas características físicas e químicas, segundo dados do fabricante e prescritas pelas normas NBR 13956/97 e NBR 13957/97, estão apresentadas na Tabela 4. 7.

Tabela 4. 7: Características físicas e químicas da sílica ativa utilizada.

Características físicas e químicas	
massa específica	2.220 kg/m ³
superfície específica	20.000 m ² /kg
formato da partícula	esférico
diâmetro medio	0,2 µm
teor de SiO ₂	mín. 85%
umidade	máx. 3%
equivalente alcalino em Na ₂ O	máx. 0,5%

A sílica ativa também foi analisada por microscópio eletrônico de varredura pelo Grupo de Materiais – Departamento de Física – UFMS, conforme Figura 4. 4 e

Figura 4. 5. A Tabela 4. 8 mostra, para efeito de comparação, o tamanho das partículas da sílica ativa e de outros materiais.

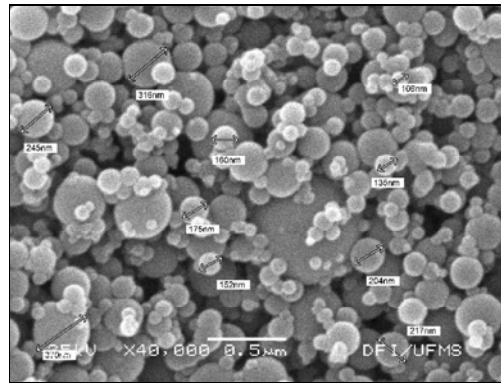


Figura 4. 4: Análise da sílica ativa por microscopia eletrônica de varredura.

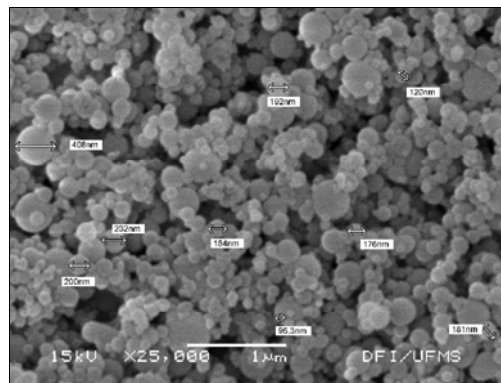


Figura 4. 5: Análise da sílica ativa por microscopia eletrônica de varredura.

Tabela 4. 8: Comparativo do tamanho das partículas dos materiais.

Material	Finura (m³/kg)
Sílica ativa	20.000
Fumaça do cigarro	10.000
Fly ash	400 a 700
Escoria de alto forno	500
Cimento Portland	300 a 500

4.1.2 Composição

Os traços de concreto de alto desempenho foram baseados no concreto desenvolvido por Martins et al (2004) (Tabela 4. 9), no qual se avaliou várias dosagens de concretos quanto aos aspectos relacionados ao desempenho mecânico e durabilidade. O traço adotado foi aquele que apresentou o melhor desempenho mecânico, tendo sido necessário alguns ajustes na sua composição para adequá-los aos materiais utilizados.

Os traços de concreto de alto desempenho com brita de 16 mm (CAD) se diferenciaram apenas na quantidade de superplastificante, variando em 0,1% à 0,2% a dose de superplastificante por traço. O concreto de alto desempenho com brita 9,5 mm (MCAD) foi baseado no concreto padrão, porém com brita de outra granulometria e teor de aditivo de 1,1% em relação à massa dos aglomerantes. Essas composições estão apresentadas na Tabela 4. 10.

Tabela 4. 9: Composição padrão do concreto de alto desempenho.

Materiais	Quantidades
Água	160,1 kg/m ³
Fator Água/Aglomerante	0,3
Cimento	466,7 kg/m ³
Sílica	51,8 kg/m ³
Agregado Graúdo (16 mm)	1088,6 kg/m ³
Agregado Miúdo	763,1 kg/m ³
Aditivo Superplastificante (0,93 %)	4,799
Teor de Argamassa	0,54
Agregado Graúdo em relação ao Miúdo	61%

O traço de concreto convencional foi baseado em composição desenvolvida no Laboratório CESP de Engenharia Civil de Ilha Solteira (LCEC) (Tabela 4.10). Alguns ajustes foram necessários em função do material utilizado. Um único traço de concreto convencional foi utilizado durante os ensaios.

Tabela 4. 10: Composição dos concretos utilizados nesta pesquisa.

Misturas	A/C	Água (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Sílica (kg/m ³)	Agregado Graúdo (kg/m ³)	Agregado Miúdo (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
CAD 1	0,3	160,1	466,7	51,8	1088,6	763,1	4,644
CAD 3	0,3	160,1	466,7	51,8	1088,6	763,1	5,160
CAD 5	0,3	160,1	466,7	51,8	1088,6	763,1	5,676
MCAD	0,3	160,1	466,7	51,8	957,1	848,7	5,767
CC	0,64	221,7	357	-	1088,6	763,1	-

4.1.3 Procedimento de mistura

O procedimento de mistura influencia de maneira acentuada as propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Foi adotado o mesmo procedimento para o concreto convencional e para os concretos de alto desempenho (CAD's), para o MCAD o procedimento foi diferenciado para melhorar a dispersão das moléculas do aditivo superplastificante.

Para o concreto convencional foi adotado o procedimento padrão de mistura apresentado na Figura 4. 6. Para os concretos de alto desempenho (CAD's) a diferença existente em relação ao procedimento padrão do CC se deu na adição de aditivo superplastificante, adição no final do período de repouso do concreto, conforme mostra a Figura 4. 7. Já para o MCAD, o procedimento se diferenciou desde da seqüência de mistura dos materiais até o tempo total de produção do concreto, conforme Figura 4. 8.

O tempo de mistura foi mantido igual nos procedimentos adotados para os CAD's e o CC ou seja, foi utilizado um tempo de aproximadamente 10 minutos. Já para o MCAD, o tempo total foi de 12 minutos para a produção do concreto.

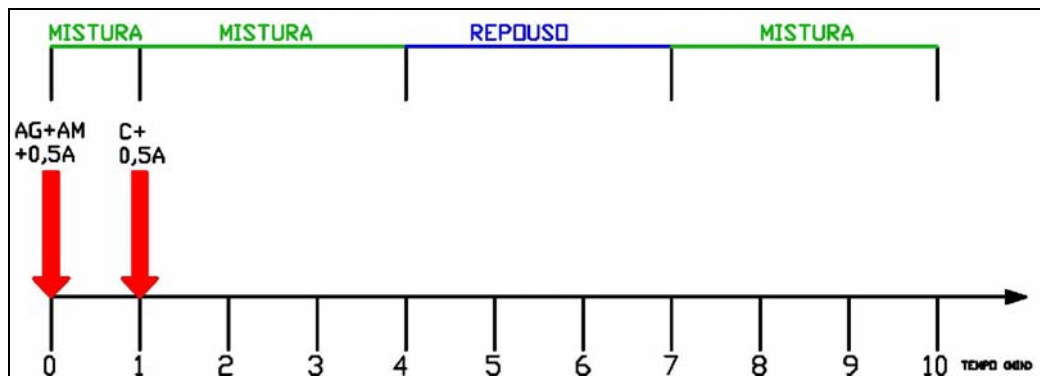


Figura 4. 6: Procedimento de mistura adotado para o Concreto Convencional. AG = agregado graúdo, AM = agregado miúdo, A = água, C = cimento.

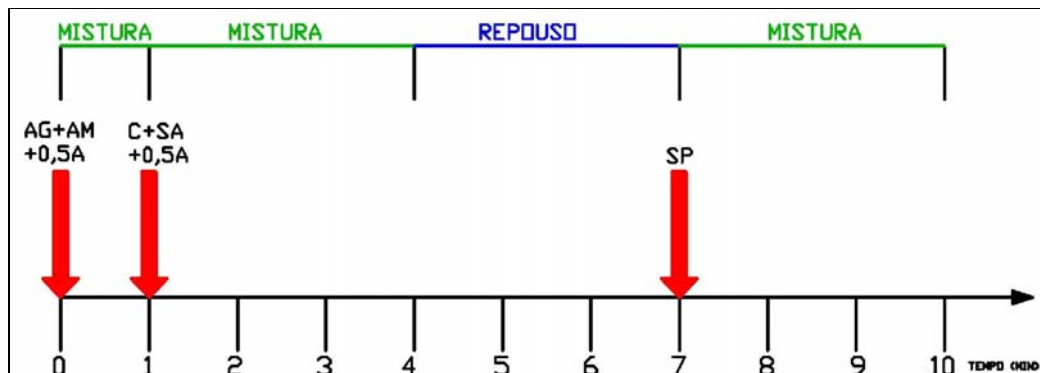


Figura 4. 7: Procedimento de mistura adotado para os concretos alto desempenho (CAD's). AG = agregado graúdo, AM = agregado miúdo, A = água, C = cimento, SA = sílica ativa, SP = superplastificante.

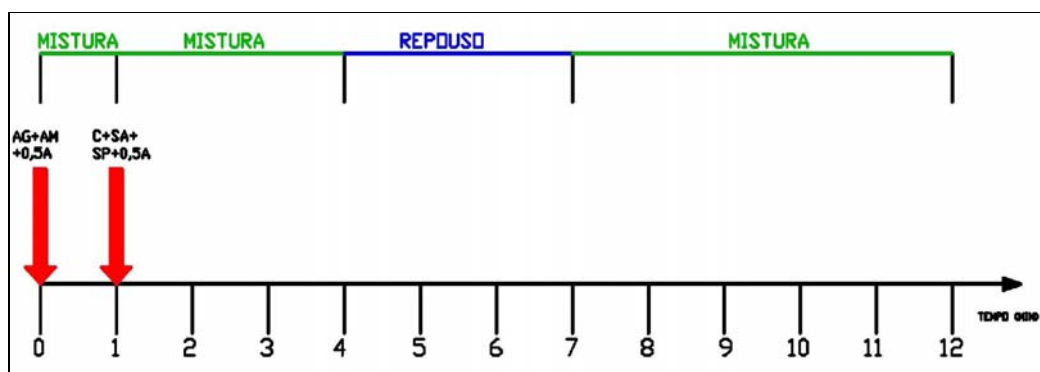


Figura 4. 8: Procedimento de mistura adotado para o Micro concreto Alto Desempenho (MCAD). AG = agregado graúdo, AM = agregado miúdo, A = água, C = cimento, SA = sílica ativa, SP = superplastificante.

4.1.4 Propriedades Mecânicas

Foram obtidas através de ensaios experimentais segundo a normalização brasileira (NBR 5739/07, 8522/08), quer seja tanto para o concreto convencional (CC) como para os concretos de alto desempenho aqui referenciados por CAD 1, CAD 3, CAD 5 e MCAD, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Todos os ensaios foram realizados nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias.

A Tabela 4. 11 apresenta os resultados da resistência à compressão para o CC, CAD 1, CAD 3, CAD 5 e MCAD. A Figura 4. 9 apresenta a evolução das propriedades mecânicas dos concretos avaliados quanto à resistência à compressão.

Tabela 4. 11: Resistência à compressão dos concretos ensaiados nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias.

Tipo de Concreto	fc (MPa)			
	idade (dias)			
	3	7	28	56
CC	24,83	30,60	36,53	37,13
CAD 1	68,03	87,27	90,27	87,77
CAD 3	67,13	87,27	95,37	91,33
CAD 5	64,53	87,27	96,93	98,47
MCAD	74,60	86,73	104,40	114,40

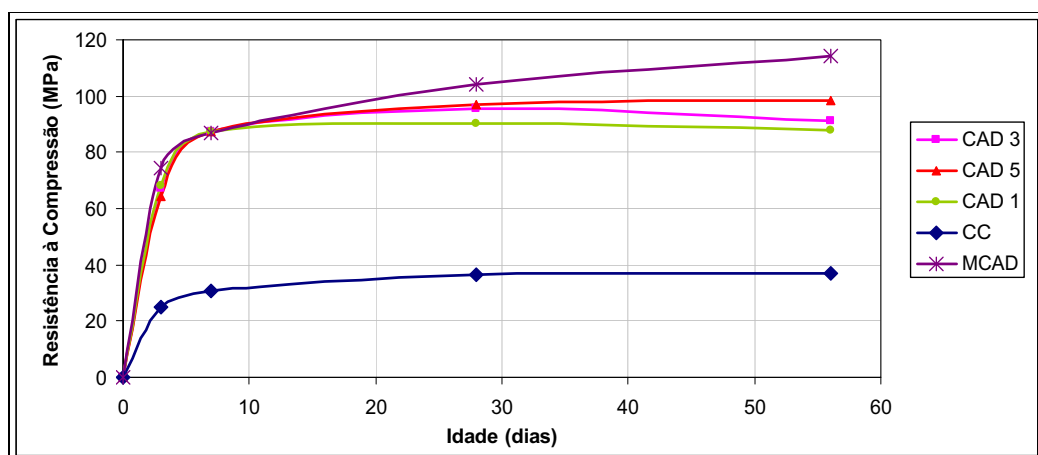


Figura 4. 9: Resistência à compressão (MPa) x Idade (dias) dos concreto ensaiados.

A Tabela 4. 12 apresenta os resultados do módulo de elasticidade para o CC, CAD 1, CAD 3, CAD 5 e MCAD. A Figura 4. 10 apresenta a evolução das propriedades mecânicas dos concretos avaliados quanto à resistência à compressão.

Tabela 4. 12: Módulo de Elasticidade dos concretos ensaiados nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias.

Tipo de Concreto	Ec (MPa)			
	idade (dias)			
	3	7	28	56
CC	29,49	29,40	34,93	30,24
CAD 1	44,17	44,21	51,37	48,08
CAD 3	43,03	44,71	51,84	51,59
CAD 5	47,72	47,41	55,41	51,12
MCAD	46,80	45,85	52,67	53,17

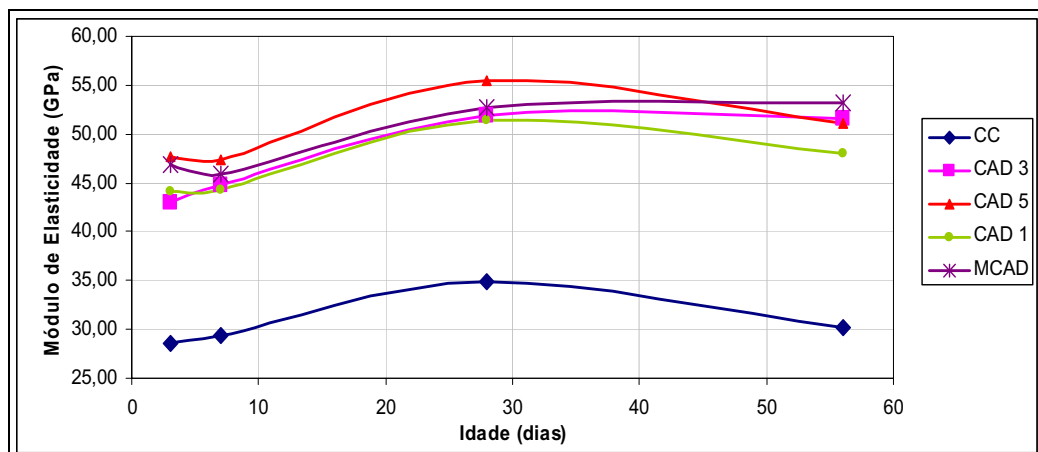


Figura 4. 10: Módulo de elasticidade (GPa) x Idade (dias) dos concretos.

4.2 Caracterização reológica do concreto

A caracterização reológica dos concretos no estado fresco foi realizada através de dois métodos de ensaio que são: método de ensaio do abatimento de tronco de cone modificado e o ensaio de reometria clássica realizado com reômetro de concreto.

O ensaio do abatimento de tronco de cone modificado proposto por Ferraris e de Larrard (1998b) permite a determinação dos dois parâmetros reológicos que

caracterizam o comportamento de um concreto. No ensaio especificado as constantes reológicas foram determinadas de maneiras indiretas, isto é, a partir de outros parâmetros medidos pelo ensaio. Já no ensaio com o reômetro de concreto, a caracterização reológica do concreto é feita de maneira direta. O parâmetros medidos são os que o aparelho nos fornece ao fim de cada medição. Com esses ensaios foi possível se estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos via reometria clássica e os obtidos pelo ensaio do abatimento de tronco de cone modificado.

As misturas, tanto no reômetro quanto no troco de cone modificado, foram ensaiadas variando-se o tempo de descanso do concreto. O primeiro ensaio de cada mistura se deu 5 minutos após a elaboração do concreto, e os demais obedeceram intervalos iguais de 10 minutos.

Para o ensaio com o tronco de cone modificado, o final de cada concreto ensaiado deve ocorrer quando o abatimento do concreto atinge um nível menor que 100 mm. No ensaio com o reômetro de concreto, foi estipulado um tempo para que as medições fossem realizadas, tentando chegar o mais próximo possível do proposto no ensaio de tronco de cone modificado.

A técnica experimental adotada nesta pesquisa, assim como os intervalos entre as leituras, foi mantida constante dentro do método de ensaio proposto, para evitar que qualquer fator extra interferisse na análise do comportamento dos concretos no estado fresco.

4.3 Obtenção dos parâmetros reológicos através do ensaio de tronco de cone modificado.

O procedimento de ensaio de abatimento de tronco de cone modificado foi idêntico para todos os concretos analisados. Os concretos foram misturados, segundo o procedimento descrito no item

4.1.3 Procedimento de mistura, para posteriormente serem ensaiados.

Após o término da mistura do concreto, o mesmo ficou em repouso por 5 minutos. Após este período de repouso, a primeira amostra de concreto foi ensaiada

no aparelho de abatimento de tronco de cone modificado. As primeiras medidas da tensão crítica e de viscosidade foram então obtidas. Após a obtenção dos resultados dos ensaios a amostra do concreto ensaiado voltava para o misturador. Durante os ensaios o restante do concreto elaborado permaneceu dentro do misturador com a abertura do mesmo protegida com um pano úmido para se evitar a perda de água por evaporação. As etapas abaixo descrevem passo a passo o procedimento adotado:

11. O tronco de cone é preenchido com concreto segundo a normalização existente (NBR 7223/98), ou seja, dividida em três camadas, sendo que cada uma delas sofre 25 golpes;
12. Após o término de preenchimento do cone, é realizado o acabamento da superfície utilizando uma espátula;
13. O concreto que se projetou pela haste é retirado com o auxílio de uma esponja;
14. O tronco de cone foi levantado verticalmente;
15. Depois da estabilização do abatimento, é feita a leitura do slump;
16. Em seguida, a amostra de concreto retorna ao misturador, sendo misturada com o restante do material por 1 minuto;
17. O concreto permanece descansando no misturador até o próximo ensaio.

Antes de cada ensaio, a haste do aparelho utilizado é limpa e nela é aplicada graxa para melhor deslizamento do disco. A base e a parede do molde de cone são umedecidas com pano úmido.

A captura de tempo para o deslizamento de disco é feita através da filmadora de alta resolução JVC DY-DV500, sendo todo o procedimento de ensaio filmado e cronometrado desde o início de abatimento até a estabilização do concreto. A capacidade de captura de imagens da filmadora é de 30 frame por segundo.

Este procedimento foi repetido em intervalos de 10 minutos, até que o abatimento do concreto fosse menor que 100 mm.

A filmadora foi montada de forma que fosse possível manter constante a visualização do disco desde o início até ao fim da sua queda de 100 mm conforme

ilustra a Figura 4. 11. Nota-se que a filmadora ficou devidamente posicionada acima do aparelho de abatimento modificado. Este posicionamento foi definido por ser o ponto em que se tem a melhor visualização da queda do disco.

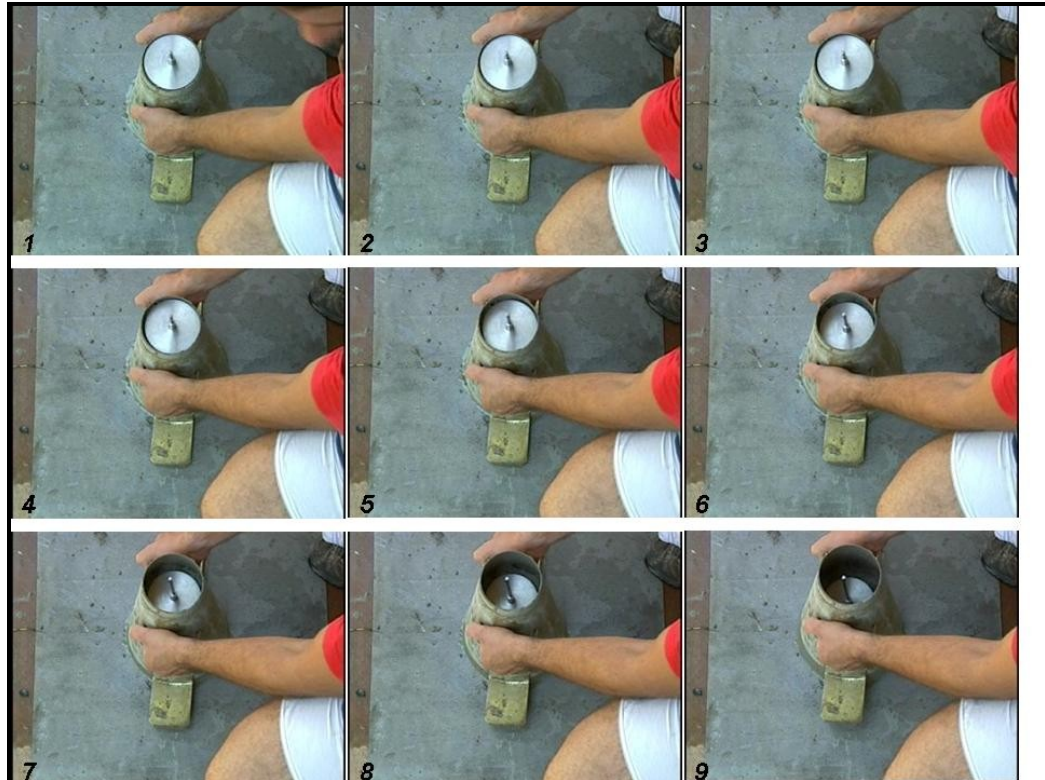


Figura 4. 11: Esquema de montagem do aparato de filmagem.

Para a edição das imagens capturadas foi utilizado um software de computador específico para este tipo de trabalho. O software utilizado foi o Ulead Vídeo Studio 8. Através dele foi possível visualizar com precisão o início e do fim do abatimento parcial do concreto, sendo então possível a obtenção do tempo gasto na queda do disco.

A Figura 4. 12 ilustra as varias fases do abatimento parcial assim como o percurso do disco colocado na haste localizada no centro do aparelho de tronco de

cone modificado, cujas imagens foram obtidas através do aparato de vídeo acima mencionado.



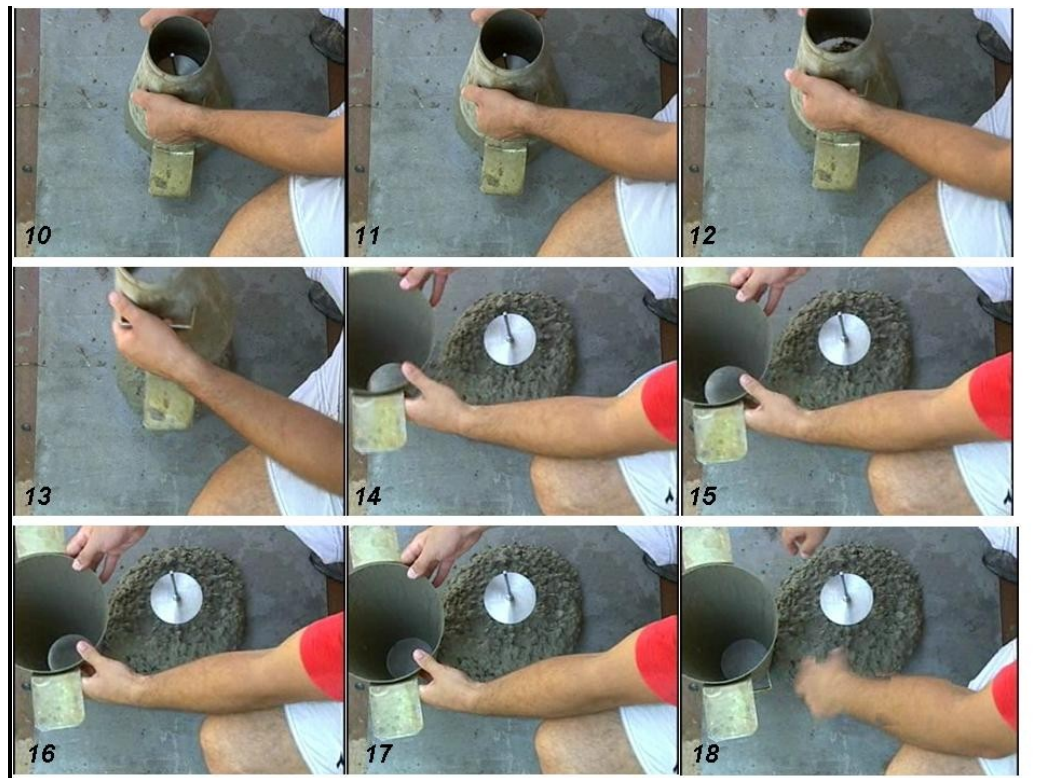


Figura 4. 12: Diversas fases do ensaio de abatimento dos concretos ensaiados.

O ensaio de abatimento do tronco de cone é bastante utilizado nos canteiros de obras de todos os países. Apesar de ser um ensaio no qual não se determina a trabalhabilidade do concreto, segundo Metha e Monteiro (2008) ele é satisfatório para a medida da consistência ou das características de fluidez de um concreto. Ele permite medir apenas a tensão crítica do concreto.

Pelo ensaio proposto por De Larrard e Ferraris (1998) é possível avaliar também a viscosidade. As equações 3.9, 3.10 e 3.11 descritas no item 3.7.2.2 estimam esses valores. Entretanto, para se obter valores mais exatos dessas propriedades há necessidade de se utilizar métodos que permitam uma maior precisão dos dados a serem considerados. O ideal seria poder instalar um dispositivo eletrônico no aparelho de ensaio que medisse com precisão exata o tempo de descida e a distancia percorrida pelo disco. Na ausência desse dispositivo optou-se pela filmagem. A resposta obtida através da utilização de uma filmadora de alta resolução, já permitiu avançar na precisão desses resultados conforme pode ser observado na Figura 4. 12.

4.4 Obtenção dos parâmetros reológicos através do ensaio Reométrico – Reômetro de modelo Planetário.

O ensaio via reometria clássica foi realizado no reômetro de concreto disponível no Laboratório de Cerâmicas Especiais e Refratários da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

O reômetro utilizado (Figura 4. 13) tem sua capacidade limitada. A granulometria máxima do agregado graúdo está limitada em 9,5 mm. Esta limitação nos exigiu desenvolver uma nova composição de concreto, aqui denominada de MCAD (micro concreto de alto desempenho).



Figura 4. 13: Reômetro de concreto utilizado no ensaio com o MCAD (Fonte: DEMa – UFSCar).

O procedimento de uso adotado para os ensaios reométricos foi feito de maneira a se ter a maior semelhança possível ao procedimento utilizado no ensaio de tronco de cone modificado, evitando-se assim grandes variações nos resultados a serem comparados. O equipamento utilizado é todo automatizado, o que vem a facilitar o seu manuseio e a realização do ensaio, e permite que se tenha a menos

interferência humana possível, fornecendo um resultado confiável e próximo do comportamento real da amostra ensaiada.

Para o funcionamento do reômetro, foi elaborada uma programação dos torques aplicados e dos tempos de descanso do concreto, simulando o realizado no tronco de cone modificado. A Figura 4.14 mostra a cuba do reômetro com o MCAD sendo ensaiado e a Figura 4. 15 o computador utilizado para a aquisição dos dados obtidos pelo equipamento.



Figura 4.14: MCAD sendo ensaiado no reômetro de concreto.



Figura 4. 15: Computador utilizado para aquisição dos dados obtidos pelo reômetro.

Os dados obtidos pelo reômetro não tem a mesma grandeza que os dados obtidos pelo tronco de cone modificado. Mesmo assim, a avaliação foi feita através do comportamento do concreto, com os resultados obtidos através dos dois ensaios.

5

Resultados Obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a determinação da tensão crítica e da viscosidade dos concretos avaliados neste trabalho, quer seja através da técnica denominada ensaio de abatimento de tronco de cone, quer seja através do reômetro de concreto usado para o caso do MCAD.

Um avanço deste trabalho em relação aos demais que utilizaram este mesmo tipo de ensaio para estimarem os parâmetros reológicos do concreto fresco, foi o uso de um sofisticado aparato visual que nos permitiu capturar com maior precisão o tempo de abatimento de cada ensaio de tronco de cone modificado. Os ensaios foram registrados com a filmadora modelo JVC DY-DV500, de alta resolução. A velocidade de captura de imagem é 29,97 fotogramas por segundo. O uso deste equipamento de captura de imagens fez com que o erro referente à captura do tempo de abatimento parcial, que em pesquisas anteriores Castro (2007) era feito através de um cronômetro por meio de um operador, diminuísse consideravelmente. Com esta câmera foi possível não somente visualizar o abatimento do concreto como também obter com precisão o tempo de descida do material do início até o final do seu abatimento.

5.1 Determinação dos parâmetros reológicos através do tronco de cone modificado

5.1.1 Determinação e avaliação da tensão de escoamento

Na Tabela 5. 1 são apresentados unicamente os valores dos abatimentos obtidos para o concreto convencional (CC) e os concretos de alto desempenho (CAD 1, CAD 3, CAD 5 e MCAD) determinados através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a evolução do abatimento em função do tempo para os quatro tipos de concretos.

Tabela 5. 1: Resultados do abatimento obtido pelo ensaio de tronco de cone para os quatro concretos ensaiados. Abatimentos medidos em [mm].

Concretos	Tempo de medida (minutos)										
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105
	Abatimento (mm)										
CAD 1	170,0	181,7	161,7	146,7	123,3	96,7	-	-	-	-	-
CAD 3	202,0	214,0	197,0	181,0	161,0	143,0	127,0	108,0	-	-	-
CAD 5	226,3	231,3	223,8	217,5	208,8	203,8	182,5	161,3	138,8	108,8	95,0
MCAD	165,0	141,7	105,0	85,0	-	-	-	-	-	-	-
CC	192,0	167,0	140,0	115,0	100,0	95,0	-	-	-	-	-

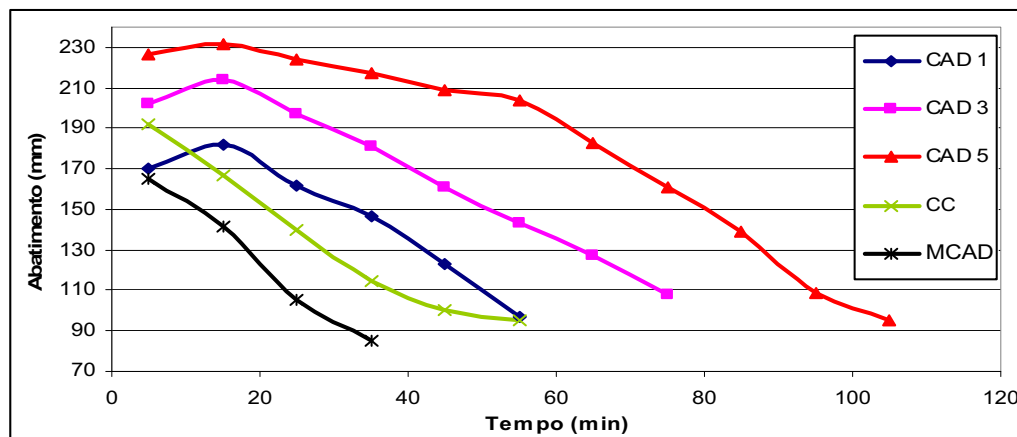


Figura 5. 1:: Curvas do abatimento obtido pelo ensaio de tronco de cone em função do tempo para concretos ensaiados.

Observou-se, para todos os concretos, uma perda contínua e gradual de abatimento ao longo do tempo. Para os concretos de alto desempenho nos primeiros quinze minutos de ensaio, com exceção do MCAD, que o abatimento aumentou com o tempo e a partir daí houve uma queda gradual do mesmo em função do tempo. Este comportamento pode ser justificado pelo fato de que o procedimento de mistura para o CAD não ofereceu energia suficiente para a completa dispersão e reação do superplastificante com o cimento. As moléculas do superplastificante necessitam de um tempo maior para reagirem com o cimento, ocasionando este ganho inicial de abatimento não observado no CC. Para o caso do MCAD, o procedimento de mistura foi diferenciado oferecendo energia suficiente para a dispersão das moléculas do superplastificante, diferentemente do caso dos outros CAD's

Para o concreto convencional, os valores dos abatimentos iniciais obtidos no ensaio podem ser considerados muito altos, conforme indicado por Neville (1997), sendo considerados misturas fluidas. Para os concretos de alto desempenho, devido à relação água/aglomerante ser baixa, e a dosagem de superplastificante ser alta o concreto obteve valores de abatimentos não foram considerados anormais, uma vez que o CAD é considerado, segundo Aïtcin (2000), uma mistura do tipo muito coeso e "tixotrópico".

O Concreto Convencional (CC) apresenta a curva de abatimento melhor definida devido ao fato deste tipo de concreto não ter na sua composição adição de

aditivos minerais e/ou químicos. A influência mais significativa sobre o comportamento reológico do CC é a reação de hidratação do cimento, ou seja, apenas a composição química do cimento utilizado influencia seu comportamento reológico. A perda de abatimento deste concreto é gradual e continua ao longo do tempo.

Embora os concretos tenham níveis diferentes de perda de abatimento, as quatro curvas obtidas são paralelas, ou seja, apresentaram o mesmo comportamento reológico. Não foi possível analisar a influência dos demais materiais no comportamento do CAD, uma vez que se optou unicamente por variar a quantidade do teor de superplastificante utilizado.

A Figura 5. 2 mostra essa perda de abatimento em três fases distintas, ou seja, o abatimento do concreto num primeiro momento, alto devido à baixa tensão crítica necessária ao concreto para início de escoamento; num segundo momento, ao longo dos ensaios ao qual nota-se que a tensão crítica do concreto aumentou diminuindo seu abatimento e, no último momento, quando o concreto obteve abatimento muito baixo apresentando uma alta taxa de tensão crítica.



Figura 5. 2: Abatimento contínuo e gradual durante o tempo de medida do ensaio.

A perda de abatimento é considerada como um fenômeno normal nos concretos, pois é resultado do enrijecimento da pega do concreto. Nos CAD's e no MCAD analisados variou-se unicamente a quantidade de superplastificante utilizado. Assim sendo, nota-se que o concreto intitulado CAD 5, o qual obteve a maior dosagem de superplastificante, foi o concreto de comportamento mais fluido, e conseqüentemente apresentou o maior tempo de pega.

No caso do MCAD, a dosagem de superplastificante é a mesma adotada para o CAD 5, porém, por se utilizar o agregado graúdo de diâmetro inferior ao CAD, a superfície específica aumentou em relação ao concreto de auto-desempenho. A utilização da brita de 9,5 mm fez com que o abatimento do MCAD fosse inferior ao CAD 5.

As tensões de escoamento do concreto convencional e dos concretos de alto desempenho estão apresentadas na Tabela 5. 2. Na Figura 5. 3 são ilustrados o desenvolvimento em função do tempo da tensão crítica dos concretos ensaiados.

Tabela 5. 2: Resultados da tensão de escoamento dos quatro concretos ensaiados.

Concretos	Tempo de medida (minutos)										
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105
	Tensão de Escoamento (Pa)										
CAD 1	1087,5	1009,0	1143,7	1244,7	1401,8	1581,4	-	-	-	-	-
CAD 3	872,0	791,2	905,7	1013,4	1148,1	1269,4	1377,1	1505,1	-	-	-
CAD 5	708,7	675,0	725,5	767,6	826,6	860,2	1003,3	1146,5	1298,0	1500,0	1592,6
MCAD	1121,2	1278,4	1525,3	1660,0	-	-	-	-	-	-	-
CC	941,6	1110,0	1289,6	1458,0	1559,0	1592,6	-	-	-	-	-

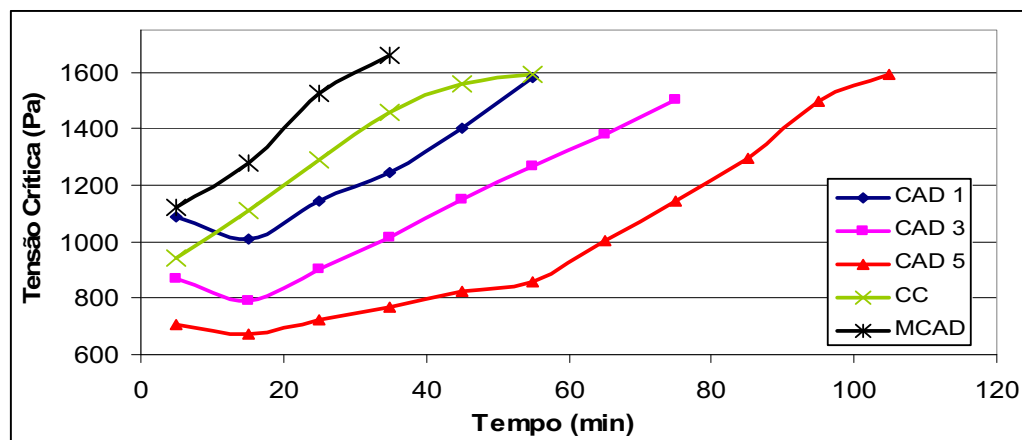


Figura 5. 3: Curva tensão de escoamento versus tempo para os quatro concretos ensaiados.

A tensão crítica do concreto é diretamente proporcional ao seu abatimento, conforme equação 3.9 proposta por Ferraris e De Larrard (1998). O concreto convencional apresenta uma curva de tensão bem definida com acentuado ganho de tensão crítica ao longo do tempo. Entretanto, a partir do tempo de 55 minutos não foi mais possível a obtenção desta tensão. O material que mais influencia no comportamento reológico do CC é o cimento. É o processo de hidratação do cimento

juntamente com as propriedades dos agregados que definem o processo da pega do concreto.

A adição de superplastificante nos concretos de alto desempenho (CAD's) proporcionou menores índices de tensão crítica. As curvas de tensão dos três concretos – CAD 1, CAD 3 e CAD 5 – são proporcionais, porém estão em níveis diferentes de tensão. Segundo Tattersall (1991b) e Petrou et al. (2000), esse fato está relacionado com a defloculação das partículas de cimento. Este comportamento também foi obtido por Castro (2007).

A dosagem do superplastificante do MCAD foi idêntica à utilizada no CAD 5, porém os níveis de tensão foram diferentes. Esta diferença ocorreu devido à mudança do agregado graúdo utilizado no MCAD (brita de 9,5 mm). Esta modificação fez com se aumentasse a superfície específica dos agregados, ocasionando um concreto com tensão crítica superior. O comportamento do MCAD nos primeiros 15 minutos foi diferente do comportamento dos CAD's, isso por que o método de mistura do concreto foi diferente, sendo um método mais eficiente para a dispersão das moléculas de superplastificante.

É bom observar que as perdas de trabalhabilidade do concreto associadas com o ganho da tensão crítica estão relacionados com o processo de pega do concreto. Com o passar do tempo, o concreto passa a se enrijecer devido às reações de hidratação do cimento.

5.1.2 Determinação e avaliação da viscosidade

Na Tabela 5. 3 são apresentados os tempos do abatimento parcial do concreto convencional (CC) e dos concretos de alto desempenho (CAD's e MCAD) obtidos pelo ensaio de abatimento de tronco de cone modificado. A Figura 5. 4 mostra a evolução dos tempos de abatimentos parciais dos concretos ensaiados.

Tabela 5. 3: Tempos de abatimento parcial dos concretos ensaiados.

Concretos	Tempo de medida (minutos)									
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
	Tempo de abatimento parcial (s)									

CAD 1	1,6	1,9	2,1	2,2	2,5	2,8	-	-	-	-
CAD 3	1,8	1,6	1,7	1,9	2,2	2,2	2,6	2,6	-	-
CAD 5	2,0	1,7	1,8	1,8	2,1	2,2	2,3	2,4	2,7	2,9
MCAD	0,9	1,0	1,5	1,7	1,8	-	-	-	-	-
CC	0,9	1,0	1,5	1,7	1,8	-	-	-	-	-

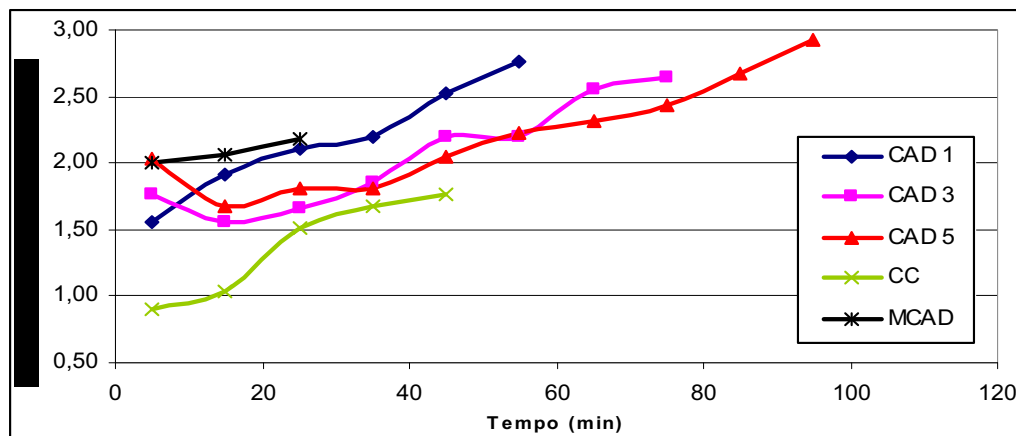


Figura 5. 4: Evolução dos tempos de abatimentos dos concretos ensaiados.

A viscosidade plástica do concreto com abatimento superior a 200 mm é unicamente proporcional ao tempo de abatimento parcial do concreto e para abatimentos totais entre 200 mm e 260 mm a viscosidade é proporcional à relação entre o abatimento total e o tempo de abatimento parcial, conforme as equações 3.10 e 3.11 proposta por Ferraris e De Larrard (1998).

Os valores das viscosidades do concreto convencional e dos concretos de alto desempenho calculada a partir das equações 3.10 e 3.11 estão apresentados na Tabela 5. 4. Na Figura 5. 5 é ilustrada o desenvolvimento da viscosidade versus tempo.

Tabela 5. 4: Resultados da viscosidade dos concretos ensaiados utilizando-se as equações propostas por De Larrard (1998).

Concretos	Tempo de medida (minutos)									
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
Viscosidade (Pa.s)										
CAD 1	91,1	112,2	122,7	128,0	147,8	161,3	-	-	-	-
CAD 3	120,6	153,6	97,0	108,7	128,0	128,5	149,6	154,2	-	-
CAD 5	262,6	238,5	222,7	194,2	174,6	161,8	135,5	142,0	156,6	171,2
MCAD	52,6	60,2	88,2	97,6	102,8	-	-	-	-	-
CC	116,7	120,4	127,4	-	-	-	-	-	-	-

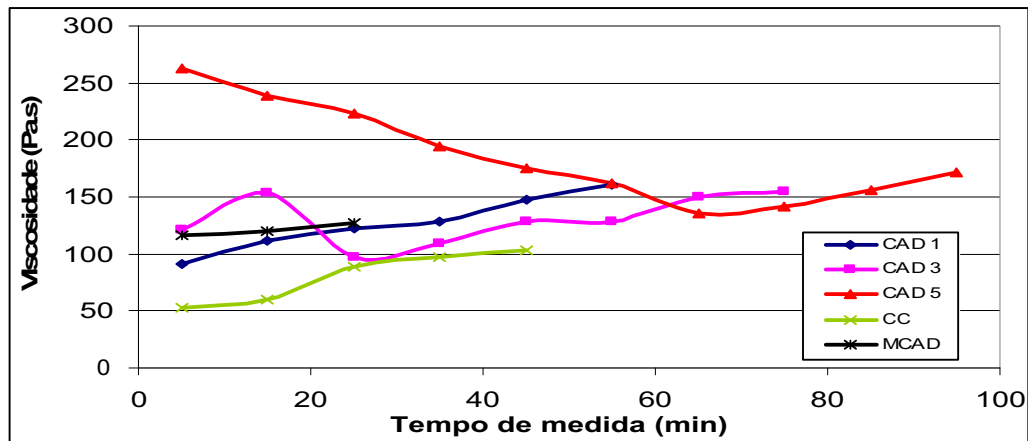


Figura 5. 5: Curva viscosidade versus tempo para os concretos ensaiados utilizando-se as equações propostas por De Larrard (1998).

Nota-se que na equação 3.10 para abatimentos totais variando entre 200 mm e 260 mm, a viscosidade é superestimada. Esses valores não se adequaram a situação real da mistura de concreto ensaiada. Castro (2007) constatou esta diferença nos seus concretos e, concluiu que o valor da viscosidade calculada a partir desta equação foi superestimado com relação ao seu desenvolvimento ao longo do tempo.

Como forma de correção a autora adotou apenas a equação 3.11 para todas as determinações, procedimento aqui também adotado. A Tabela 5. 5 apresenta os valores da viscosidade dos concretos, para todas as amplitudes de abatimento totais. Na Figura 5. 6 são ilustrados o desenvolvimento da viscosidade versus tempo para esta nova relação.

Tabela 5. 5: Resultados da viscosidade dos concretos ensaiados.

Concretos	Tempo de medida (minutos)									
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
	Viscosidade (Pa.s)									
CAD 1	91,1	112,2	122,7	128,0	147,8	161,3	-	-	-	-
CAD 3	103,4	91,1	97,0	108,7	128,0	128,5	149,6	154,2	-	-
CAD 5	118,6	98,2	105,7	105,7	119,8	130,3	135,5	142,0	156,6	171,2
MCAD	116,7	120,4	127,4	-	-	-	-	-	-	-
CC	52,6	60,2	88,2	97,6	102,8	-	-	-	-	-

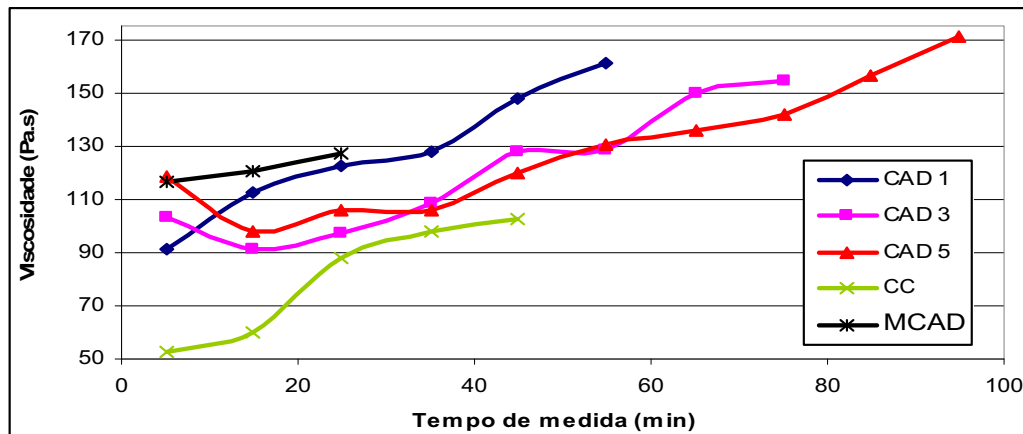


Figura 5. 6: Curva viscosidade versus tempo para os concretos ensaiados.

A Figura 5. 6 apresenta a curva indicando que o concreto convencional apresentou ganho de viscosidade ao longo do tempo, nota-se que este ganho é contínuo porém pouco expressivo. A partir do tempo de 55 minutos não foi mais possível continuar esta avaliação devido à limitação existente na proposta do ensaio, que é a do abatimento mínimo de 100 mm. A partir de 55 minutos todos os abatimentos obtidos foram desconsiderados por serem inferiores ao valor mínimo imposto.

Pelas curvas do gráfico da Figura 5. 6, pode-se observar que a adição de superplastificante ao concreto pouco influenciou na sua viscosidade. A bibliografia consultada ressalta que a variação da viscosidade do concreto depende das proporções de matérias empregadas na sua composição e também do seu tempo de pega.

Segundo a literatura, o concreto de alto desempenho é um concreto mais viscoso que o concreto convencional, sendo chamado de “pegajoso”. Isto é devido à relação água/aglomerante e a proporção de aditivos adicionados ao mesmo. Pela Figura 5. 6, nota-se que existe uma diferença no comportamento inicial da viscosidade do concreto de alto desempenho e a do concreto convencional.

5.2 Determinação dos parâmetros reológicos utilizando o reômetro de concreto

Como dito anteriormente, o reômetro utilizado tem sua capacidade limitada para agregados de dimensão máxima de 9,5 mm, devido ao espaçamento existente entre a cuba e a pá misturadora, razão pela qual somente foi possível de ser avaliado neste equipamento o MCAD.

Através deste ensaio reométrico foi realizado um paralelo entre os resultados obtidos com o reômetro e os resultados obtidos com o tronco de cone modificado. Este paralelo só foi possível de ser realizado para um único tipo de micro-concreto, devido também à distância entre os dois centros universitários – UFSCar e UNESP/ILHA SOLTEIRA – e a dificuldade encontrada para o transporte do material e do tempo disponibilizado para a utilização do equipamento.

Isso sem contar no controle dos fatores que influenciam o comportamento reológico dos concretos de alto desempenho, como o processo de adensamento, de mistura, transporte, etc. Um exemplo da influência desses fatores é citada por Pileggi (2001) em relação ao concreto bombeado: *“um concreto dilatante, independente do seu nível de fluidez, apresenta dificuldades para escoar sob elevadas taxas de cisalhamento, dificultando ou impedindo seu bombeamento; por outro lado, uma mistura pseudoplástica, mesmo com baixa fluidez, poderia ser bombeada, pois quanto maior a taxa de cisalhamento aplicada, menor sua resistência ao escoamento. Com isso pode-se observar uma diferença entre o nível de fluidez (que define a característica de moldagem) e o comportamento reológico de um concreto (que determina a técnica mais adequada para sua aplicação)”*.

A caracterização reológica do micro-concreto MCAD foi realizada com o auxílio de um reômetro de concreto, descrito no item 4.4. Dessa maneira foi possível determinar a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento sob condições definidas fisicamente. Deve-se prever que o ciclo de cisalhamento ou condição experimental seja definido antes do cálculo dos parâmetros reológicos.

O ciclo de cisalhamento aqui adotado teve velocidades de rotação em ascensão variando de 1 RPM (rotações por minuto) a 95 RPM (rotações por minuto), que correspondem a 0,017 RPS (rotações por segundo) a 1,583 RPS respectivamente.

Esse tipo de ensaio gera curvas de “torque versus velocidade de rotação” que fornecem duas informações fundamentais: primeiro, quanto menor a área de

histerese (área entre as curvas ascendente e descendente do cisalhamento), maior a eficiência da dispersão; e segundo, o perfil da curva de cisalhamento indica a natureza reológica da mistura de concreto (PILEGGI, 2001).

A literatura mostra que a análise da taxa de cisalhamento deve ser feita apenas pela parte descendente da curva de cisalhamento, pois o tempo para se obter o equilíbrio em cada taxa de cisalhamento será sempre mais curto partindo-se de uma maior para uma menor taxa de cisalhamento, o que significa de uma maior para um menor grau de dispersão.

No presente trabalho, para a identificação do comportamento reológico das misturas foram feitos ajustes tanto na parte ascendente quanto na parte descendente da curva de cisalhamento, e dois modelos foram utilizados – Bingham e lei das potências.

Através dos resultados obtidos, nota-se que a parte ascendente da curva de cisalhamento se mostrou mais adequada para realização das análises. A análise da curva ascendente é de grande importância, pois é neste período que a tensão de escoamento é excedida.

A Figura 5. 7 apresenta a curva de “torque x velocidade de rotação” do MCAD. Esta curva foi obtida após 5 minutos do término da mistura do concreto. Observa-se que o ajuste da curva demonstra que o MCAD tem comportamento Binghamiano, ou seja, o material apresenta uma tensão de escoamento bem definida e que precisa ser superada para que possa iniciar o escoamento. Quando a tensão de escoamento é superada, o concreto apresentou um comportamento proporcional à sua taxa de cisalhamento aplicada.

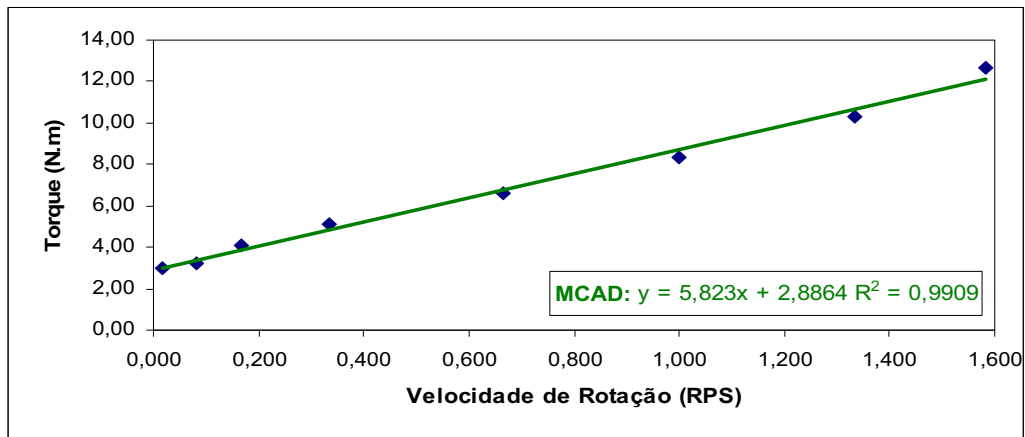


Figura 5. 7: Curva ascendente de cisalhamento do MCAD, com 5 minutos de descanso.

Na Figura 5. 8 está apresentada a curva de um ciclo completo de cisalhamento do MCAD estudado. As curvas ascendentes e descendentes formam uma área de histerese, representando o trabalho realizado pelo material cisalhado. A literatura indica algumas hipóteses sobre os prováveis causadores da área de histerese, entre eles podemos citar: energia da mistura; característica da matriz e a fase agregado que constitui o concreto. A eficiência do processo de mistura de um concreto está relacionada com a área de histerese, isto é, quanto menor a área maior a eficiência da mistura.

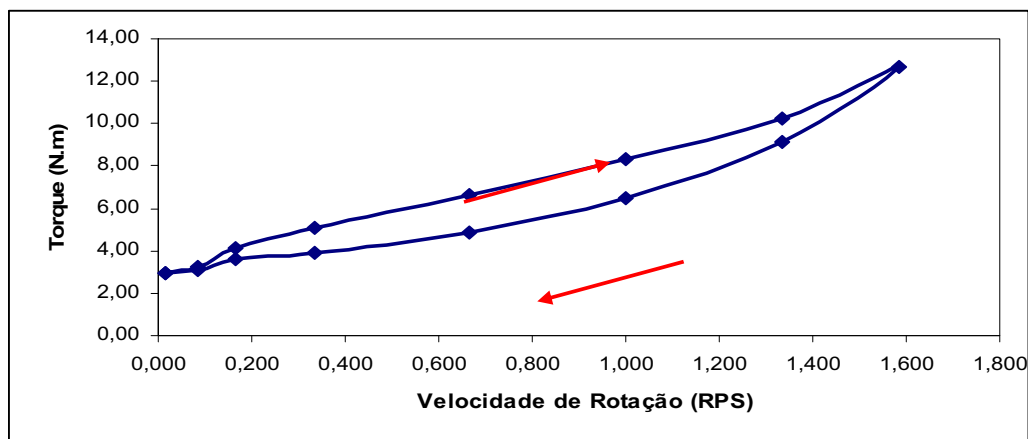


Figura 5. 8: Curva de Cisalhamento do MCAD. As setas indicam o sentido de aplicação do cisalhamento.

Quando se verifica a presença de uma área de histerese, considera-se que o material testado tem um significativo comportamento tixotrópico (WALLEVIK; SIMMERMAN, 1996). Isto por que a viscosidade aparente diminui ao longo do tempo

quando esses materiais são submetidos a uma taxa de cisalhamento constante (CASTRO, 2007). Esse comportamento deve-se à existência de uma estrutura instável no material, que pode ser rompida com a aplicação de uma determinada energia (HU; De LARRARD, 1996).

Então, pela análise da área de histerese pode-se dizer que o MCAD tem comportamento tixotrópico. Este método de avaliar o comportamento do material não permite que tenhamos valores intrínsecos dos parâmetros reológicos, porém permite que sejam feitas correlações.

5.2.1 Determinação e avaliação da trabalhabilidade do MCAD através dos parâmetros reológicos obtidos com o reômetro de concreto.

Para a caracterização reológica do concreto são necessários dois parâmetros reológicos, a saber: Tensão de escoamento (t_0) e a viscosidade plástica (μ). Os parâmetros reológicos são parâmetros dependentes do equipamento utilizado na medição. No caso do reômetro, os parâmetros têm relação com unidade de torque (T) e unidade de velocidade de rotação (N), e é dada segundo a equação:

$$T = g + h \cdot N \quad (5.1)$$

Onde: g – torque de escoamento, em [Nm] – é a intersecção com o eixo do torque
 h – viscosidade de torque, em [Nm.s] – é a inclinação da reta.

Essas duas constantes são análogas à tensão de escoamento e à viscosidade plástica, respectivamente (YEN et al., 1999).

Estes parâmetros foram determinados através de ajustes na curva ascendente da curva de cisalhamento do concreto ensaiado, considerando o ajuste da curva de cisalhamento para um modelo Binghamiano. O torque de escoamento é dado em termos de g [N.m] e a viscosidade de torque é dada em termos de h [Nm.s]. A Tabela 5. 6 apresenta os valores de g e h para o concreto MCAD ensaiado, considerando a parte ascendente da curva de cisalhamento. A Figura 5. 9 e Figura 5. 10 apresenta a evolução dos parâmetros reológicos (torque de escoamento e

viscosidade de torque) ao longo do tempo, para a verificação com os resultados obtidos com o ensaio de tronco de cone modificado.

Tabela 5. 6: Valores de g e h para o MCAD, considerando a parte ascendente da curva de cisalhamento.

Concreto	Tempo de medida (min)						
	5	15	25	35	45	55	65
MCAD	Torque de escoamento - g [Nm]						
	2,89	3,39	4,08	4,22	5,20	6,20	6,91
	Viscosidade de torque - h [Nm.s]						
	5	15	25	35	45	55	65
	5,82	5,58	5,52	5,09	4,66	3,82	3,59

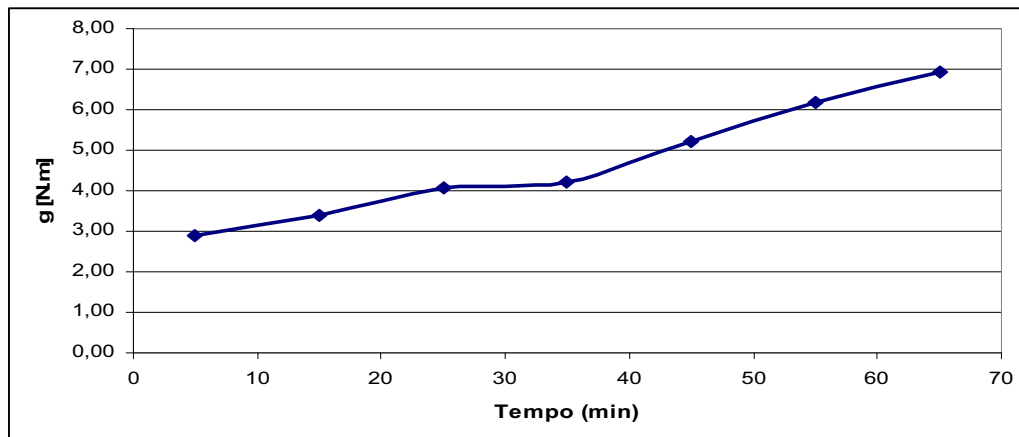


Figura 5. 9: Curva de "torque de escoamento x tempo de descanso do concreto" do MCAD ensaiado.

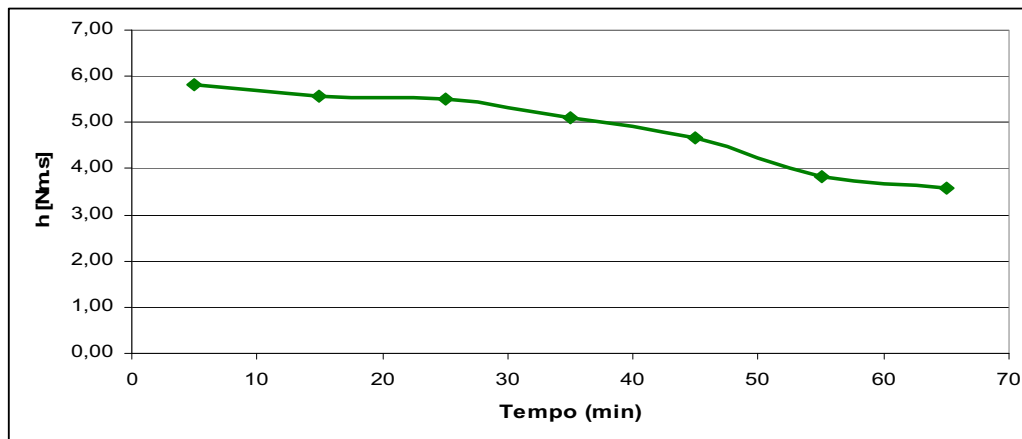


Figura 5. 10: Curva de "viscosidade de torque x tempo de descanso do concreto" do MCAD ensaiado.

Nota-se que o MCAD, ao longo do tempo e do torque aplicado, sofre um aumento quanto ao torque de escoamento. Esta variação é decorrente da hidratação do cimento, para o ganho de resistência do concreto nas primeiras idades. A variação do torque de escoamento (g) é mais expressiva que a variação da viscosidade de torque (h), mostrando que a hidratação do cimento ao longo do tempo influencia muito mais na tensão de escoamento do que na viscosidade do material.

Embora, no presente trabalho, não tenha sido verificado o efeito do acréscimo de superplastificante ao MCAD utilizando o reômetro de concreto, é importante a compreensão do efeito deste aditivo químico ao material ensaiado. A incorporação de um superplastificante a uma mistura de concreto resulta em uma significativa redução do torque de escoamento, enquanto um pequeno ou nenhum efeito é observado sobre a viscosidade de torque do material (TATTERSALL, 1991b, PETROU et al., 2000b). Esse comportamento está relacionado com a defloculação das partículas de cimento: os superplastificante introduzem uma camada de adsorção que evita a aproximação entre as partículas, enfraquecendo a estrutura que pode se formar quando a mistura permanece em repouso e, assim, reduzindo o torque de escoamento do material. Como as partículas estão dispersas, existe uma pequena mudança da viscosidade de torque, porém isso depende da distribuição granulométrica, da forma e da textura superficial das partículas que constitui a mistura de concreto (CASTRO, 2007).

5.3 Correlação entre os resultados do MCAD obtidos com o ensaio de tronco de cone modificado e com o reômetro de concreto.

5.3.1 Correlação entre o abatimento de tronco de cone, tensão de escoamento (t_o) e torque de escoamento (g).

A Figura 5.11 apresenta a curva comparando os resultados da tensão de escoamento (t_o) obtido através do ensaio de tronco de cone modificado e o torque de escoamento (g) obtido através do ensaio com o reômetro de concreto. Esta relação apresentou coeficiente de correlação médio de 0,9773. A relação entre os dois parâmetros é grande chegando a um valor próximo de 1, mostrando que os resultados obtidos com o ensaio de tronco de cone modificado são validos para um ensaio de campo, com resultados próximos dos resultados obtidos em laboratório com o reômetro de concreto.

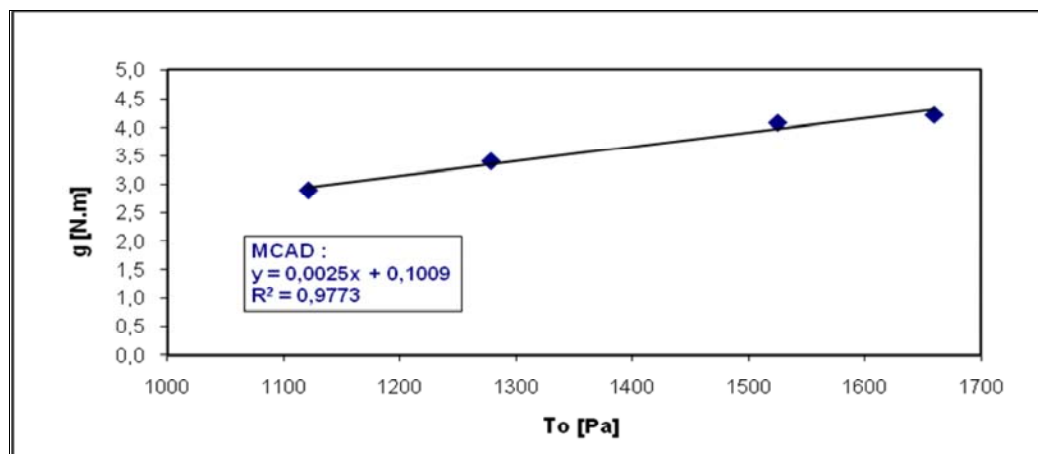


Figura 5.11: Relação entre a tensão de escoamento (t_o) e o toque de escoamento (g).

A Figura 5. 12 mostra a correlação entre o abatimento de tronco de cone e a tensão de escoamento (t_o), obtido pelo ensaio de tronco de cone modificado. O coeficiente de correlação entre eles é um valor muito próximo a 1, isto porque a tensão de escoamento do concreto avaliado é diretamente proporcional ao abatimento de tronco de cone tradicional. A Figura 5. 13 apresenta a curva da

comparação entre o torque de escoamento (g) e o abatimento de tronco de cone. Esta curva tem o coeficiente de correlação de 0,9773, o mesmo apresentado na curva “ $g \times t_o$ ”, isto porque a tensão de escoamento é dependente do abatimento de tronco de cone.

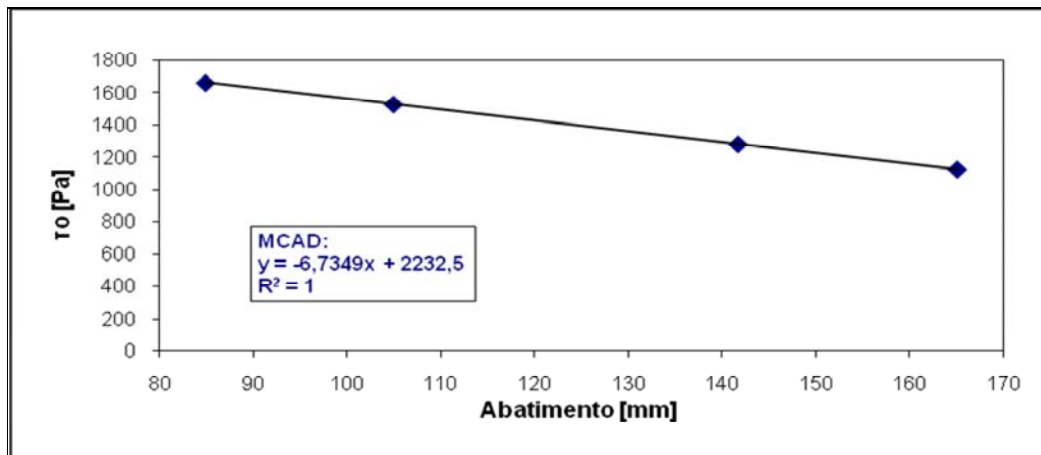


Figura 5. 12: Relação entre a tensão de escoamento (t_o) e o abatimento de tronco de cone.

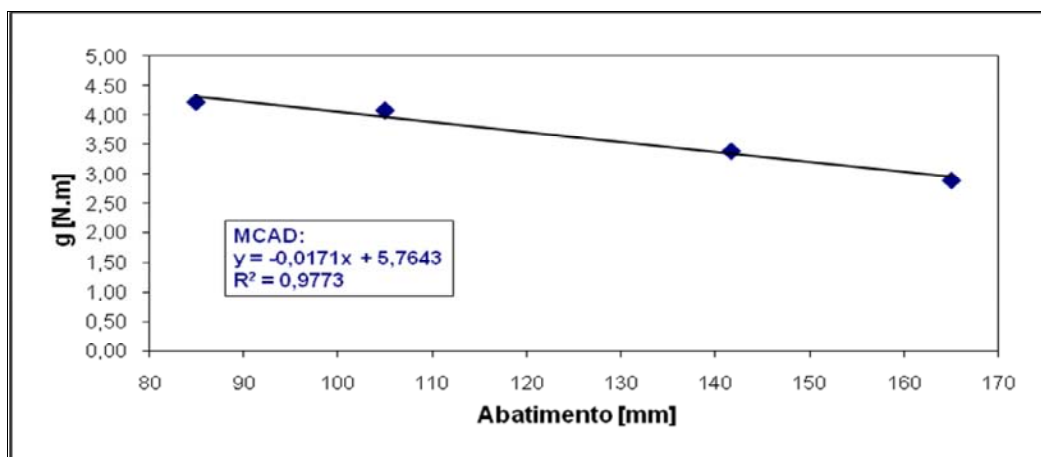


Figura 5. 13: Relação entre o torque de escoamento (g) e o abatimento de tronco de cone.

5.3.2 Relação entre o abatimento de tronco de cone, viscosidade plástica (μ) e viscosidade de torque (h).

A Figura 5. 14 mostra a relação entre a viscosidade plástica (μ), obtida através do ensaio de tronco de cone modificado, e a viscosidade de torque (h), obtida através do ensaio com o reômetro de concreto. Nota-se que o coeficiente de correlação entre os dois parâmetros é 0,7747. Mesmo que esta correlação tenha se distanciado de 1, ainda assim é uma boa correlação e os resultados obtidos com o ensaio de abatimento de tronco de cone modificado são satisfatórios e um ótimo método de se avaliar o concreto, quanto à viscosidade, em campo.

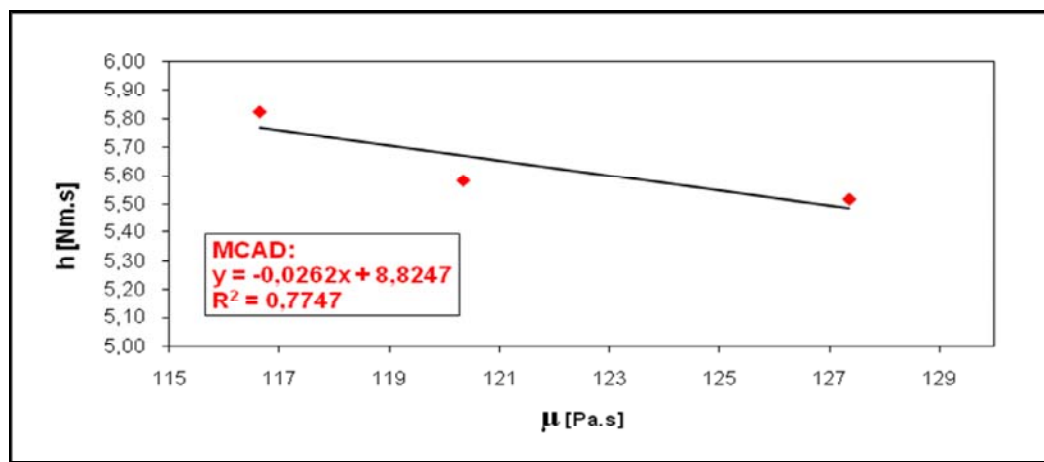


Figura 5. 14: Relação entre a viscosidade plástica (μ) e a viscosidade de torque (h).

A Figura 5. 15 e Figura 5. 16 mostram as correlações entre a “viscosidade plástica x abatimento” e “viscosidade de torque x abatimento” e os coeficientes de correlação médio é 0,9976 e 0,8536, respectivamente. Assim, verificamos que a viscosidade também é um parâmetro que é proporcional ao abatimento.

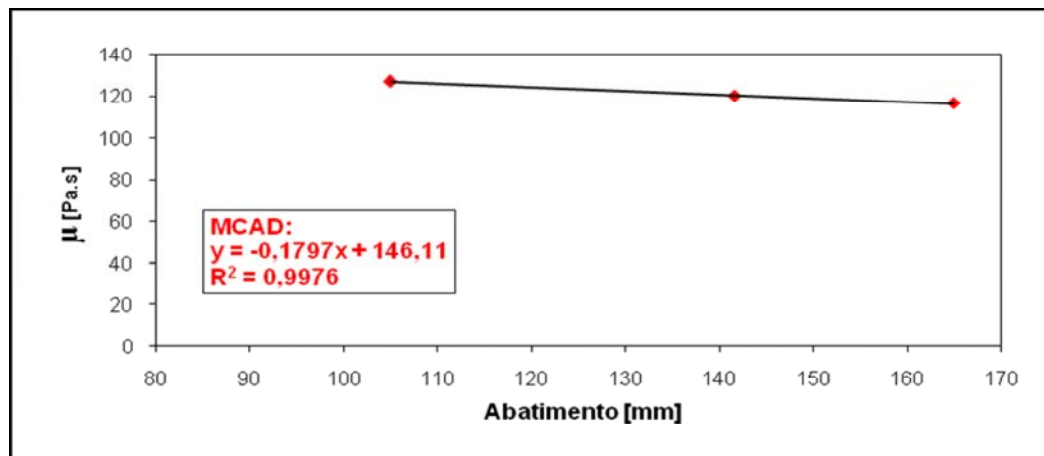


Figura 5. 15: Relação entre a viscosidade plástica (μ) e o abatimento de tronco de cone.

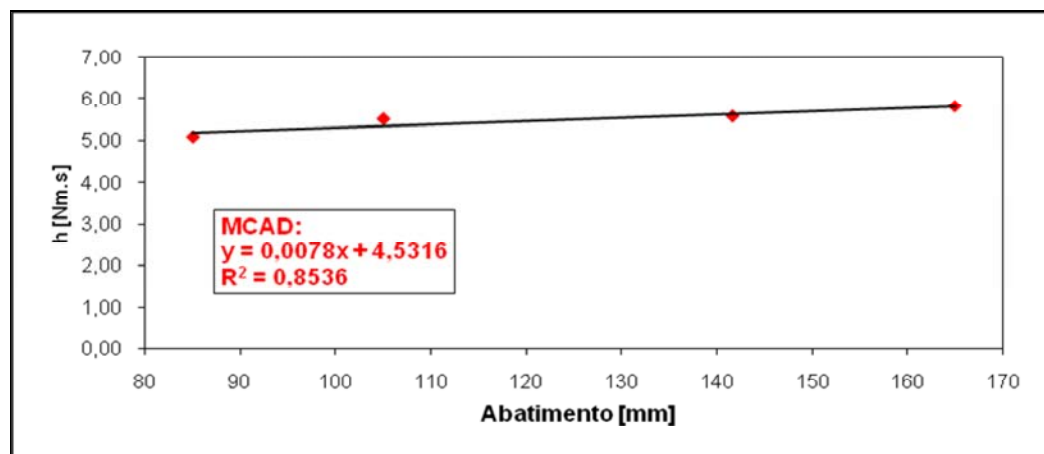


Figura 5. 16: Relação entre a viscosidade de torque (h) e o abatimento de tronco de cone.

5.3.3 Correlação entre os parâmetros reológicos, abatimento de tronco de cone e tempo de abatimento.

A Figura 5. 17 e a Figura 5. 18 mostra a evolução da tensão de escoamento, torque de tensão e o abatimento com o tempo de abatimento. Nota-se que a tensão de escoamento e o torque de escoamento aumentam em função do tempo, enquanto que o abatimento diminui. Isto porque a trabalhabilidade está relacionada

com o decréscimo de abatimento do concreto, e isto resulta em um aumento de tensão de escoamento e torque de escoamento.

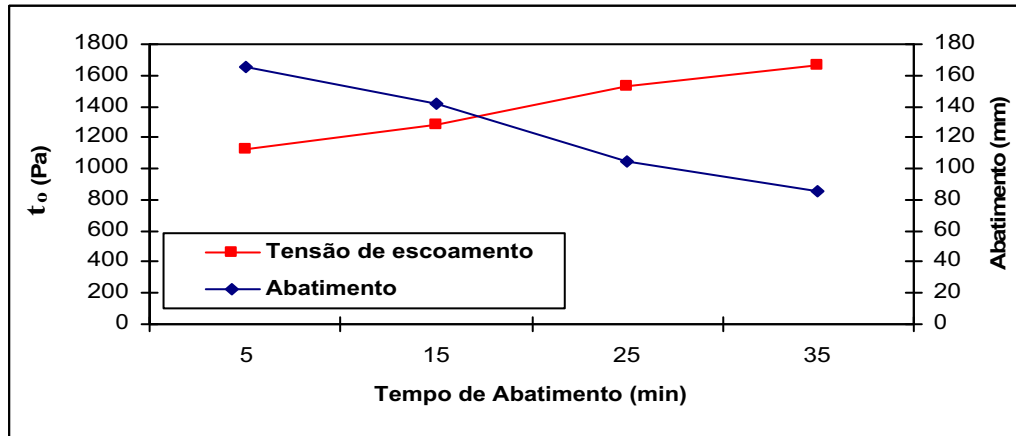


Figura 5. 17: Relação entre o abatimento e a tensão de escoamento em relação ao tempo de abatimento.

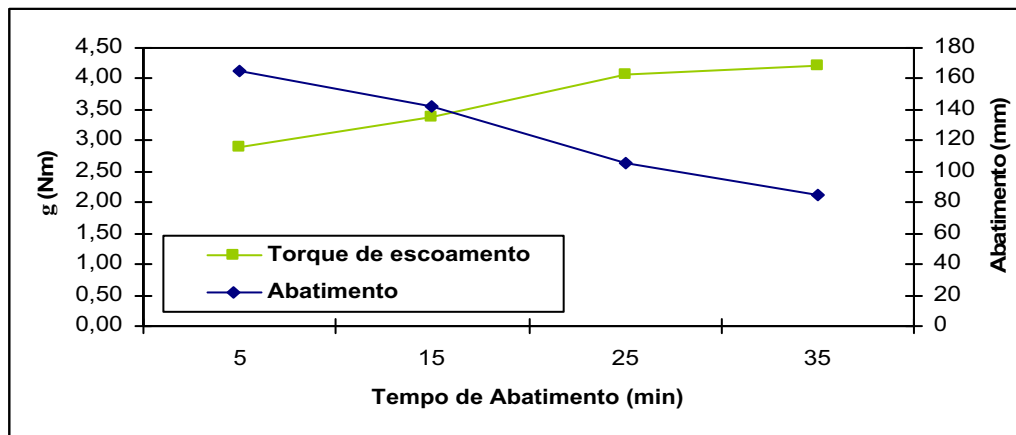


Figura 5. 18: Relação entre o abatimento e o torque de escoamento em relação ao tempo de abatimento.

A Figura 5. 19 apresenta a evolução da viscosidade plástica, viscosidade de torque com o tempo de abatimento. Nota-se que a viscosidade do concreto praticamente permaneceu constante no decorrer do tempo, apresentando pequenos decréscimos durante o ensaio.

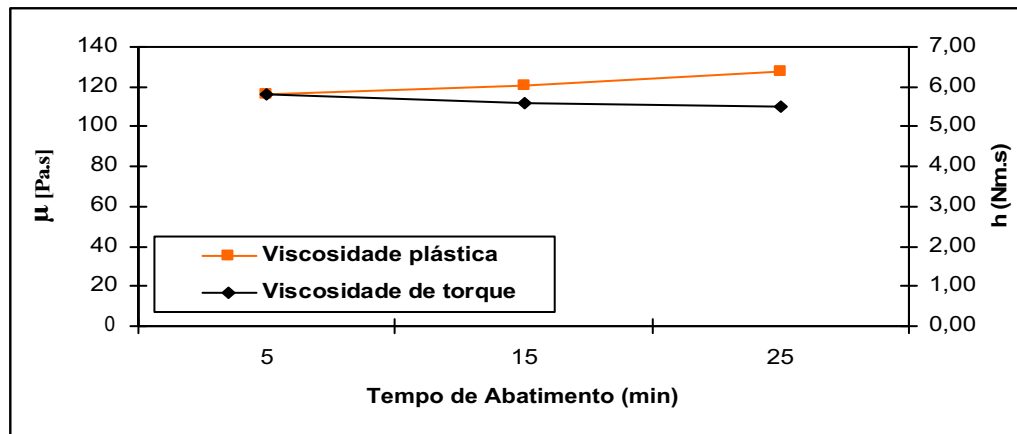


Figura 5. 19: Relação entre a viscosidade plástica e de torque em relação ao tempo de abatimento.

A influencia do tempo de abatimento, que é o tempo de espera do concreto após o término da mistura, influencia muito mais nos parâmetros referentes ao abatimento, tensão de escoamento e torque de escoamento e exerce menos influencia nos parâmetros relacionados com a viscosidade.

5.4 Obtenção, por visualização, da curva de abatimento de tronco de cone tradicional

A visualização científica é definida como sendo a representação pictórica dos dados e informações. Hoje constitui uma área da dinâmica, em plena expansão, caracterizada por linhas de pesquisa recentes e bastante sofisticadas. Suas aplicações visam, sobretudo, possibilitar a análise visual e a exploração de dados coletados da natureza ou produzidos através de processamentos científicos. Sua aplicação ocorre de maneira natural em diversas áreas do conhecimento humano (SANTOS, 1996).

A primeira definição de Visualização Científica surgiu em 1987 no relatório “Visualization in Scientific Computing”, como uma forma de comunicação que transcende as aplicações e os limites tecnológicos. A visualização oferece métodos de “ver o invisível” (seeing the unseen). Segundo Brown et al (1987), é estimado que 50 % dos neurônios são associados com o campo de visão.

A visualização pode ser tanto quantitativa quanto qualitativa. Um exemplo de uso desta ferramenta é na medicina. Os maiores avanços tecnológicos na medicina estão ligados à visualização. A habilidade dos médicos em fazerem diagnósticos é dependente desta ferramenta, e das suas técnicas empregadas.

Tanto na medicina quanto na engenharia, os processos de visualização são avançados. A área de mecânica dos fluidos utiliza-se muito a técnica de PIV (Particle image velocimetry), que é um método ótico usado em medidas de velocidade e propriedade dos fluidos.

Esta técnica de visualização motivou a realização de ensaios com os equipamentos disponíveis pelo Grupo de pesquisa RMVP, de captura de imagens, para que fossem feitas as análises no campo da mecânica dos fluidos, e tentar visualizar a curva de velocidade do abatimento em função do tempo.

Para tanto, houve necessidade de procurar construir em acrílico um tronco de cone respeitando as mesmas dimensões e características exigidas por norma (ABNT, NM67) (Figura 5. 20). O ensaio de abatimento de tronco de cone tradicional, permitiria a captura da visualização do abatimento do concreto. Para isso utilizou-se, na captura de imagens, a câmera JVC DY-DV500 com capacidade de captura da ordem de 29,97 fotogramas por segundo, conforme Figura 5. 21.



Figura 5. 20: Cone de acrílico.



Figura 5. 21: Equipamentos utilizados para visualização do abatimento do concreto.

O procedimento de ensaio foi realizado conforme NBR NM 67/96, que regulariza a metodologia para a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone tradicional. A filmadora ficou na posição horizontal em relação ao cone, possibilitando a visualização de todo o tronco de cone, conforme ilustra a Figura 5. 22. A seqüência de imagens apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustram as varias fases do ensaio de abatimento utilizando o cone de acrílico.



Figura 5. 22: Posição da filmadora em relação ao cone de acrílico.

Embora todas as imagens tenham sido capturadas com sucesso, não foi possível, num primeiro momento, proceder a recuperação do tempo gasto na descida do concreto, por varias razões:

- Embora o cone tenha sido feito de material transparente, no caso acrílico, de maneira a permitir a visualização do abatimento, o mesmo sofre a influencia do material concreto, que por sua vez, “suja” a parede do cone, impedindo que a imagem seja perfeitamente capturada;
- Há necessidade de uma sofisticação com luzes infra-vermelhas ou similares que permitam capturar a imagem se faz necessário;
- As técnicas e os equipamentos de visualização de imagens conhecidos e disponíveis no grupo RMVP não foram ainda suficientes para recuperação total desse tipo de dado. Há necessidade de um tempo maior para que este procedimento seja feito com sucesso.

O objetivo deste trabalho não é a obtenção da curva de velocidade do abatimento do concreto em função do tempo. Esse procedimento, sugerido no exame de qualificação pelos membros da banca, foi acatado e colocado em pratica. Entretanto, no caso específico trata-se de um objetivo secundário e complementar e não o principal.

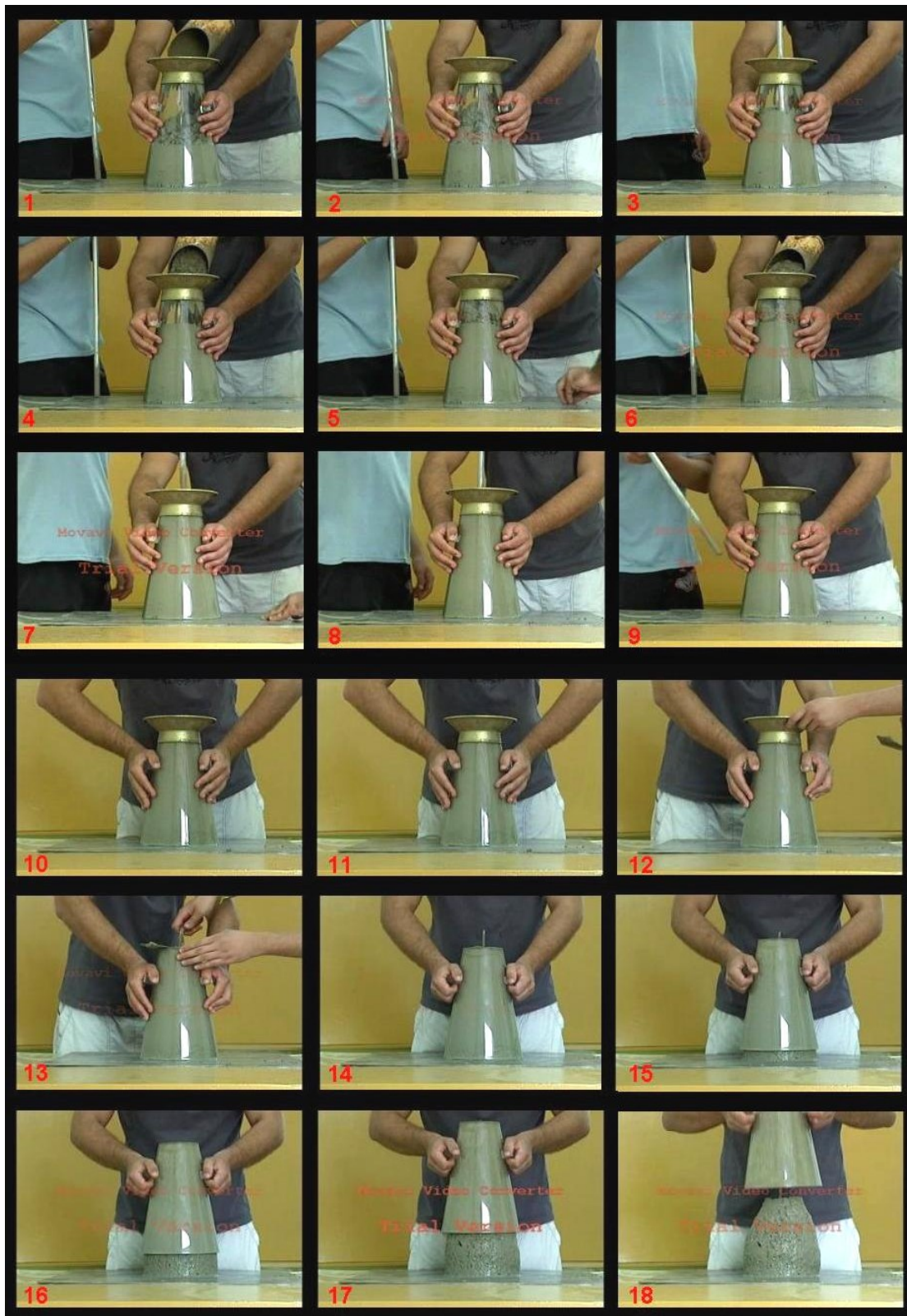


Figura 5. 23: Seqüência do ensaio de abatimento utilizando o tronco de cone de acrílico.

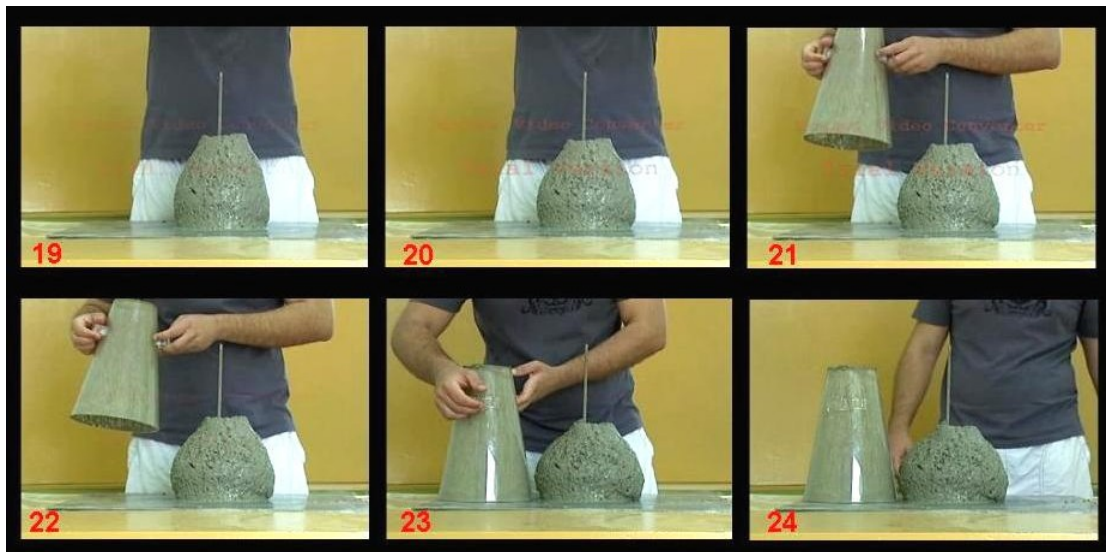


Figura 5. 23: (Continuação) Seqüência do ensaio de abatimento utilizando o tronco de cone de acrílico.

Fica, pois, como sugestão para outros trabalhos que a este seguirão de procurar a melhor técnica de visualização de imagens que possa ser utilizada nesse caso.

5.5 Análise de Incertezas dos Resultados Experimentais

Os erros nas medidas são definidos como uma diferença entre o valor real e os valores medidos. Neste capítulo serão apresentadas as incertezas obtidas nos ensaios de abatimento de tronco de cone modificado realizados para os concretos de alto desempenho e para o concreto convencional.

A determinação total das incertezas para cada variável de erros X_i , de acordo com a seguinte equação:

$$X_i = A_i + B_i \quad (5.2)$$

onde A_i representa os erros sistemáticos e B_i representa os erros aleatórios, sendo considerados para a determinação de B_i o dobro do valor obtido para o desvio padrão, para a obtenção de uma probabilidade de 95%.

A

Tabela 5. 7 apresenta as incertezas obtidas ou consideradas para cada fonte possível de erros experimentais:

Tabela 5. 7: Valores das incertezas máximas medidas no sistema.

Variável	Descrição	Incerteza 2s	Observações
X ₁	Abatimento do concreto	17	Incerteza obtidas da maior diferença de valores
X ₂	Tempo de abatimento parcial	0,36	Incerteza obtidas da maior diferença de valores
X ₃	Densidade do concreto	4	Incerteza obtida dos instrumentos utilizados para realização dos ensaios

O valor das incertezas foi obtido utilizando as equações apresentadas por Moffat (1988), como indicado na equação 5.3:

$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i)$$

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta R}{\delta X_i} \delta X_i \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (5.3)$$

Para o cálculo das incertezas da tensão de escoamento (t_o), utilizou-se a seguinte expressão (5.4):

$$\delta R = \left\{ \left[\left(\frac{300 - S}{347} \right) \delta_\rho - \left(\frac{\rho}{347} \right) \delta_S \right]^2 \right\}^{1/2} \leq 14,7\% \quad (5.4)$$

Para o cálculo da incerteza da viscosidade plástica (μ) utilizou-se a seguinte expressão (5.5):

$$\delta R = \left\{ \left[25 \cdot 10^{-3} (T \delta_\rho + \rho \delta_T) \right]^2 \right\}^{1/2} \leq 25,7\% \quad (5.5)$$

6

Conclusões e etapas futuras

Algumas conclusões podem ser destacadas após o término deste trabalho. Dentre elas salienta-se:

EM RELAÇÃO AO ABATIMENTO DO CONCRETO:

No concreto convencional (CC), o abatimento obteve valores considerados, pela literatura, como alto. Uma das razões pode ser a ausência de qualquer tipo de adição química. No caso dos concretos de alto desempenho (CAD's) o abatimento de tronco de cone variou proporcionalmente à quantidade de superplastificante utilizado, confirmando a influencia da porcentagem de adição dos aditivos superplastificante na trabalhabilidade dos concretos. O micro concreto de alto desempenho (MCAD) obteve abatimento de grandeza inferior ao CAD 5, embora as quantidades de superplastificantes de ambos sejam iguais. As possíveis causas para este fato é que MCAD apresenta agregado graúdo com superfície especifica maior e a mistura não apresenta empacotamento dos materiais tão eficiente quanto dos CAD's.

Um fato marcante em relação ao abatimento de tronco de cone foi que todos os concretos, tiveram a curva de abatimento com a mesma inclinação, ou seja, a perda de abatimento em função do tempo de medida dos concretos (CAD1, CAD3, CAD5, MCAD e CC) está na mesma proporção. A perda e abatimento e o ganho de tensão de escoamento foi contínua e gradual para ambas as composições de concreto.

EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS REOLÓGICOS DOS CONCRETOS:

A viscosidade do concreto pouco variou durante o ensaio de ambos os concretos. Assim, nota-se que a influencia do superplastificante na viscosidade do concreto é pouco significativa, quando comparado com a influencia da tensão e torque de escoamento. Este fato observado está de acordo com o que se apresenta na literatura consultada.

O esquema de filmagem utilizado para captura do tempo de abatimento foi de grande valia, uma vez que as incertezas, que foram mensuradas ao final do levantamento de dados dos ensaios, foram minimizadas devido à tecnologia utilizada.

O MCAD foi ensaiado com o reômetro de concreto e feito os ajustes nas partes ascendentes e descendentes da curva de cisalhamento. Através destes dados foi identificado o comportamento reológico da mistura, mostrando que o MCAD se comporta como um fluido Binghamiano. A parte da curva ascendente foi a que melhor se adequou por apresentar melhores coeficientes de ajuste da reta e também por ser o período em que a tensão de escoamento é vencida.

Um fato relevante é o da área de histerese observado para o concreto MCAD. Esta área mostra que o MCAD tem comportamento tixotrópico, de acordo com o que vem sendo observado por alguns autores estrangeiros.

EM RELAÇÃO À TRABALHABILIDADE DO CONCRETO:

O processo de perda da trabalhabilidade, avaliado através do ensaio de tronco de cone modificado, das misturas de alto desempenho (CAD's e MCAD), mediante a determinação dos parâmetros reológicos, foi representado por um aumento da tensão de escoamento, enquanto a viscosidade plástica pouco variou durante o ensaio. O aumento da tensão de escoamento do concreto indica perda de trabalhabilidade das misturas com o decorrer do tempo, ou seja, para iniciar o escoamento do concreto a resistência a ser vencida aumenta e sua fluidez diminui com o decorrer do tempo. Este comportamento está de acordo com os resultados encontrados na literatura.

Os resultados obtidos através do ensaio com o reômetro de concreto para avaliar a trabalhabilidade da mistura são: torque de escoamento e viscosidade de torque. O torque de escoamento do MCAD aumentou e a viscosidade de torque pouco se modificou, ambos ao longo do tempo após o final da mistura do concreto.

Isto mostra que o efeito da hidratação do cimento e os efeitos químicos dos aditivos e adições minerais fizeram com que a mistura perdesse trabalhabilidade ao longo do tempo. Este comportamento está de acordo com o encontrado na literatura.

CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS QUE MEDEM DOIS PARÂMETROS REOLÓGICOS:

A correlação entre o torque de escoamento, obtido com o reômetro, e a tensão de escoamento, obtida com o tronco de cone modificado, apresentou coeficientes de correlação superior a 0,9773. Isto mostra que existe uma correlação muito boa entre estes dois parâmetros através de ensaios diferentes.

A correlação entre a viscosidade de torque, obtida com o reômetro, e a viscosidade plástica, obtida com o ensaio de tronco de cone modificado, apresentou coeficiente de correlação superior a 0,7747 mostrando também que existe uma boa correlação entre esses parâmetros, que foram obtidos através de ensaios diferentes.

Através dos resultados e comparações verifica-se que o ensaio de tronco de cone modificado é uma alternativa muito boa para a obtenção de parâmetros reológicos do concreto. Ainda existe necessidade dessa técnica ser mais aprimorada, de forma que os valores obtidos para a tensão e viscosidade tenham maior precisão, reproduzindo mais fielmente a realidade e, seja divulgado como sendo uma alternativa de baixo custo, quando comparado ao investimento feito para a aquisição de um reômetro.

6.1 Sugestões para pesquisas futuras

Mesmo com os avanços obtidos com este trabalho, em relação a outros que tratam do mesmo sujeito e utilizam a mesma técnica, (CASTRO,2007, De LARRARD; FERRARIS,1998), ainda existe um campo enorme a ser explorado. A reologia do concreto é uma linha de pesquisa em pleno desenvolvimento necessitando de mais trabalhos científicos para o seu avanço. Apresenta-se a seguir, alguns pontos que merecem destaque como possíveis pesquisas futuras:

- Verificação da influência da variação de adições minerais e ou químicos ao concreto, tais como sílica ativa, filers e metacaulin, tipos diversos de aditivos superplastificantes, etc nos parâmetros reológicos do concreto;
- Verificação da Influência do empacotamento das partículas, esqueleto granular, nos parâmetros reológicos do concreto;
- Aprimorar as técnicas de visualização do abatimento do concreto para obtenção da curva de “velocidade de abatimento do concreto x tempo de abatimento do concreto”
- Aprimorar a técnica do ensaio do tronco de cone modificado, colocando sensores eletrônicos capazes de captar com maior precisão o tempo de descida do concreto;
- Aprimorar a técnica do ensaio do tronco de cone modificado procurando correlações matemáticas que permitam utilizar o dispositivo para alturas maiores e menores do slump que a estipulada por De Larrard e Ferraris.

7

Referências

AGULLÓ, L. et al. Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer – a study based on the Marsh cone test. **Materials and Structures**, Guildford, v. 32, n. 221, p. 479-485, Aug.-Sept. 1999.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000. 667p.

AÏTCIN, P.-C.; NEVILLE, A. How the water-cement ratio affects concrete strength. **Concrete International**, Detroit, v. 25, n. 8, p. 51-58, Aug. 2003.

AÏTCIN, P.-C.; JOLICOEUR, C.; MacGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, Detroit, v. 16, n. 5, p. 45-52, May. 1994.

ALMEIDA, Ivan R. **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p.

ANDERSEN, P. J. The effect of superplasticizers and air-entraining agents on the zeta potential of cement particles. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 16, n. 6, p. 931-940, Nov. 1986.

ANDERSEN, P. J.; ROY, D. M.; GAIDIS, J. M. The effect of superplasticizer molecular weight in its adsorption on, and dispersion of, cement. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 980-986, Nov. 1988.

ANTUNES, R. P. N.. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2006. 156p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo- USP, São Paulo, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 5739**: concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 7115**:cimento portland: mesa de consistencia. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 7215**: cimento portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 7217**: agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 7218**: agregados - determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 7222**: Argamassa e concreto - determinação da resistência à tração por compressão diametral: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 7810**: agregado em estado compactado seco - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 8522**: Concreto - determinação do módulo de deformação estática e diagrama - tensão-deformação: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 9202**: cimento portland e outros materiais em pó – determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (Número 325). Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 13956**: sílica ativa para uso em cimento portland, concreto, argamassa e pasta de cimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 13957**: sílica ativa para uso em cimento portland, concreto, argamassa e pasta de cimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NM 23**: cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NM 65**: cimento portland – determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NM 67**: concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NM 76**: cimento portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ATZENI, C.; MASSIDDA, L.; SANNA, U. Comparison between rheological models for portland cement pastes. Cement and Concrete Research, Amsterdam, v. 15, n. 3, p. 511-519, May. 1985.

BACHE, H. H. Densified cement/ultrafine particle-based materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 2., 1981, Ottawa. **Proceeding...** Aalborg Denmark: Aalborg Cement Aalborg, 1981. 12p.

BANFILL, P. F. G. The rheology of cement paste: progress since 1973. In: PROPERTIES OF FRESH CONCRETE, 1990, Hanover. **Proceedings...** London: Chapman and Hall, 1990. p. 3-9.

BANFILL, P. F. G. A coaxial cylinders viscosimeter for mortar: design and experimental validation. In: RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE, 1990, London. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1991. p. 217-226.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. New York: Elsevier, 1989. 199 p. (Rheology Series, 3).

BERTOLUCCI, F. S. **Avaliação do comportamento reológico e mecânico das caldas de Cimento fabricadas com diferentes tipos de cimentos e superplastificantes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) -Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Soltiera, 2007.

BLOMBLED, P.J. Comportement rhéologique des pâtes, morties et bétons: mesure, évolution, influence de certains paramètres. **Revue des Matériaux de Construction Ciments et Bétons**, [S.l.], v. 617, fev. 1967.

BONEN, D.; SARKAR, S. L. The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 25, n. 7, p. 1423-1434, Oct. 1995.

BROWN, M. D.; DEFANTI, T. A.; McCORMICK, B. H. Visualization in scientific Computing. **Computers Graphics**, New York, v. 21, n.6, november 1987.

BRETAS, R. E. S.; D'AVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos**. São Carlos: Editora da UFSCar, 2000. 196p.

CASTRO, Alessandra L.; **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007

CHAPPUIS, J.; Rheological measurements with cement pastes in viscosimeters: a comprehensive approach. In: RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE, 1990, London. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1991. p. 3-12.

CHIDIAC, S. E. et al. Controlling the quality of fresh concrete – a new approach. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 52, n. 5, p. 353-363, Oct. 2000.

CHIOCCHIO, G.; PAOLINI, A. E. Optimum time for adding superplasticizers to portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 15, n. 5, p. 901-908, Sept. 1985.

CHOPIN, D.; De LARRARD, F.; CAZACLIU, B. Why do HPC and SCC require a longer mixing time?. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 34, n. 12, p. 2237-2243, Dec. 2004.

CLAISSE, P. A.; LORIMER, O.; AL OMARI, M. Workability of cement pastes. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 98, n. 6, p. 476-482, Nov.-Dec. 2001.

CYR, M.; LEGRAND, C.; MOURET, M. Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 30, n. 9, p. 1477-1483, Sept. 2000.

DAIMON, M.; ROY, D. M. Rheological properties of cement mixes: I. methods, preliminary experiments, and adsorption studies. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 8, n. 6, p. 753-764, Nov. 1978.

DE LARRARD, F. et al. Design of a rheometer for fluid concretes. In: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP – SPECIAL CONCRETES: WORKABILITY AND MIXING, 1993, Paisley. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1994. p. 201-208.

DE LARRARD, F. et al. Evolution of the workability of superplasticized concretes: assessment with the BTRHEOM rheometer. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE – PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Paisley. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1996. p. 377-388.

DE LARRARD, F. et al. A new rheometer for soft-to-fluid concrete. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 94, n. 3, p. 234-243, May-June. 1997a.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 32, n. 11, p. 1699-1704, Nov. 2002.

FERRARIS, C. F. **Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report**. [S.l : S.n], 1996 (NISTIR 5869). Disponível em: <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build96/pdf/b96213.pdf>. acesso em: 22/05/2008.

FERRARIS, C. F. Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, [S.l], v.104, n. 5, p. 461-478, Sept.-Oct. 1999.

FERRARIS, C. F.; De LARRARD, F. **Testing and modeling of fresh concrete rheology**. [S.l : S.n], 1998 (NISTIR 6094), Disponível em: <http://www.fire.nist.gov/concpubs/conc98/pdf/c98006.pdf>. Acesso em: 19/05/2008

FERRARIS, C. F.; De LARRARD, F. Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, Philadelphia, v. 20, n. 2, p. 241-247, Dec.1998b.

FERRARIS, C. F.; GAIDIS, J. M. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 89, n. 4, p. 388-393, July.-Aug. 1992.

FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**, 2005. 259p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998. 662p.

GHIO, V. A. **The rheology of fresh concrete and its effect on the shotcrete process**. 1993. 193f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Faculdade....., Universidade da Califórnia, Berkeley, 1993.

GRZESZCZYK, G.; KUCHARSKA, L. Hydrative reactivity of cement and rheological properties of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 20, n. 2, p. 165-174, Mar. 1990.

GUIMARÃES, A. T. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. p.

HELENE, P. R. L. Récord mundial en el uso del concreto de alto desempeño – Edifício e-Tower. In: CONCRETO COLOQUIA, 2003, São Carlos. **Anais...** São Carlos: Editora, 2003. CDROM.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento portland: materiais de construção civil**. São Paulo: IBRACON, 2007. p.

HELENE, P.; HARTMANN, C. HPCC in brazilian office tower. **Conc. Int.**, [S.l.], v.25, n.12, pp. 65-68, Dec. 2003.

HU, C.; De LARRARD, F. The rheology of fresh high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 26, n. 2, p. 283-294, Feb. 1996.

HU, C.; De LARRARD, F.; GJ.RV, O. E. Rheological testing and modeling of fresh high performance concrete. **Materials and Structures**, London, v. 28, n. 175, p. 1-7, Jan.-Feb. 1995.

IWASAKI, N. Estimation of workability – Why has the slump remained being used so long. **Concrete Journal**, Tokio, v.21, n. 10, p. 4-12. 1983.

FERRARIS, C.F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, Gaithersburg, v. 104, n. 5, p. 461-478, Sep.-Oct. 1999.

JOHNSTON, C. D. Influence of aggregate void condition and particle size on the workability and water requirement of single-sized aggregate-paste mixtures. In: **PROPERTIES OF FRESH CONCRETE**, 1990, Hanover. **Proceedings...** London: Chapman and Hall, 1990. p. 67-76.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M. A. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v. 20, n. 2-3, p. 87- 101, Apr. 1998.

KAEFER, L. F. **A Evolução do concreto armado**. São Paulo: EPUSP, 1998. 43 p.

KAKUTA, S.; KOJIMA, T. Effect of chemical admixtures on the rheology of fresh concrete during vibration. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE**, 3., 1989, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: Editora, 1989. p. 4-6.

KALINTZIS, C. A. A. **Estudo da fluência do concreto de elevado desempenho**. 2000. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Paulista, São Paulo, 2000.

KIRYU, H. S. **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-newtonianos**, 2006. 204p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Ciências Térmicas) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

KUCHARSKA, L. Effect of products of the hydration of C3A on rheology of clinker and cement pastes. In: **RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE**, 1990, London. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1991. p. 47-54.

LEI, W.G.; STRUBLE, L.J. Microstructure and flow behavior of fresh cement paste. **Journal of the American Ceramic Society**, Westerville, v. 80, n. 8, p. 2021-2028. 1997

LEVY, Salomon M.; HELENE, Paulo R.L. **Evolução da utilização do concreto como material de construção**. São Paulo: EPUSP, 2002. p.

LIBÓRIO, J. B. L. **Desenvolvimento de fôrmas metálicas para a construção de elementos estruturais – avaliação das técnicas para uma produção em escala industrial**. [S.l], [S.n], (Relatório Técnico apresentado à CDH – Companhia do Desenvolvimento Habitacional do Estado de São Paulo. 1a Fase. 1985/1986).

MALHOTRA, V. M.; CARETTE, G. G.; SIVASUNDARAM, V. Role of sílica fume in concrete: a review. In: **ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY**, 1992, Athens. **Proceedings...** Montreal: CANMET, 1992. p. 925-991.

MANNONEN, R.; PENTTALA, V. The efficiency of SNF-type superplasticiser in Portland cement pastes. In: **INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE – PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE**, 1996, Paisley. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1996. p. 327-341.

MANRICH, S.; PESSAN, L. A. **Reologia: conceitos básicos**. São Carlos: Gráfica UFSCar, 1987. p.

MARTINS, I. R. F. **Determinação Experimental e analítica do módulo de elasticidade de concretos de alto desempenho submetidos à cura térmica pelo método da maturidade**. 2004. 159p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

McGEARY, R.K. Mechanical packing of spherical particles. **Journal of the American Ceramic Society**, Westernville, v. 44, n.9, p. 513-522. 1961.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008. p.

NEHDI, M.; MINDESS, S.; AİTCIN, P.C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 28, n. 5, p. 687-697, May. 1998.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: PINI, 1997. 828p.

NISHIBAYASHI, S. et al. Effect of properties of mix constituents on rheological constants of self-compacting concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE – PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Paisley. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1996. p. 255-262.

OLIN, H.B., SCHMIDT, J.L., LEWIS, W.H.; **Construction Principles: material and methods**. 6. ed. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1995. p. 101–114.

PANDOLFELLI, V. C. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195p.

PETROU, M. F. et al. Influence of mortar rheology on aggregate settlement. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 97, n. 4, p. 479-485, July.-Aug. 2000b.

PILEGGI, R. G. et al. Novel rheometer for refractory castables. **American Ceramic Society Bulletin**, Westerville, v. 79, n. 1, p. 54-58, Jan. 2000.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. 187f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)- Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

PILEGGI, R. G., et al. Técnicas de caracterização reológica de argamassas e-mat - **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, [S.n], v. 3, n. 2, p. 103-120, Novembro 2006.

PINHEIRO, L. M.; GIONGO, J. S. **Concreto armado: propriedades dos materiais**. São Carlos: EESC-USP, 1986. p.

POWERS, T. C. **The properties of fresh concrete**. New York: John Wiley & Sons, 1968. 664p.

RAGO, F. **Características reológicas de pastas de cales hidratadas normalizadas e de cimento**. 1999. 207f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

ROUSSEL, N.; Le ROY, R. The Marsh cone: a test or a rheological apparatus. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 35, n. 5, p. 823-830, May. 2005.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 31, n. 2, p. 205-212, Feb. 2001.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 34, n. 3, p. 363-371, Mar. 2004.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 234p.

SEDRAN, T. et al. Mix design of self-compacting concrete (SCC). In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE – PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Paisley. **Proceedings...** London: E & FN Spon. p. 439-450.

SERRA, G. Tecnologia emergente atrai arquitetos do futuro. **Revista Cimento Hoje**, [S.n], n.9, p.1, 1997.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2000. 279f. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

STRUBLE, L. et al. Rheology of cement paste and concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, Philadelphia, v. 20, n. 2, p. 269-277, Dec. 1998.

SZWABOWSKI, J. Influence of three-phase structure on the yield stress of fresh concrete. In: RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE, 1990, London. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1991. p. 241-248.

TANNER, R. I. **Engineering rheology**. New York: Oxford University, 1988. 451p.

TATTERSALL, G. H. Progress in measurement of workability by two-point test. In: PROPERTIES OF FRESH CONCRETE, 1990, Hanover. **Proceedings...** London: Chapman and Hall, 1990. p. 203-212.

TATTERSALL, G. H. Effect of vibration on the rheological properties of fresh cement pastes and concretes. In: RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE, 1990, London. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1991a. p. 323-338.

TATTERSALL, G. H.; Application of rheological measurements to practical control of concrete. In: RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE, 1990, London. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1991c. p. 270-280.

TATTERSALL, G. H.; BAKER, P. H. The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete. **Magazine of Concrete Research**, [S.n], v. 40, n. 143, p. 79-89, June. 1988.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F.G. **The rheology of fresh concrete**. London: Pitman, 1983. 347p.

UCHIKAWA, H. et al. Effect of admixture on hydration of cement, adsorptive behavior of admixture and fluidity and setting of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 22, n. 6, p. 1115-1129, Nov. 1992.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; SAWAKI, D. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 27, n. 1, p. 37-50, Jan. 1997.

VAN WAZER, J. R. et al. **Viscosity and flow measurement: a laboratory handbook of rheology**. 2.ed. New York: Interscience Publishers, 1966. 406p.

VASCONCELOS, A. C. O desenvolvimento da pré-fabricação no Brasil. **Revista Politécnica**, São Paulo, v1, n.200, p.44-60, 1988.

WALLEVIK, O. H.; GJ.RV, O. E. Development of a coaxial cylinders viscometer for fresh concrete. In: PROPERTIES OF FRESH CONCRETE, 1990, Hanover. **Proceedings...** London: Chapman and Hall, 1990a. p. 213-224.

WHORLOW, R. W.; **Rheological techniques**. Horwood : Ellis Horwood Ellis, 1979, 448 p.

YAHIA, A.; KHAYAT, K. H. Applicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture. **Materials and Structures**, London, v. 36, n. 260, p. 402-412, July. 2003.

YEN, T. et al. Flow behaviour of high strength high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 21, n. 5-6, p. 413-424, Dec. 1999.

ZAIN, M. F. M.; SAFI UDDIN, M.; YUSOF, K. M. A study on the properties of freshly mixed high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 29, n. 9, p. 1427-1432, Sept. 1999.

ZHANG, X.; HAN, J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 30, n. 5, p. 827-830, May. 2000.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.