

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELIZIANE JUBANSKI MARTINS

**PROCEDIMENTO PARA DOSAGEM DE PASTAS PARA
ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE**

CURITIBA

2009

ELIZIANE JUBANSKI MARTINS

**PROCEDIMENTO PARA DOSAGEM DE PASTAS PARA
ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE**

Dissertação apresentada como requisito parcial
a obtenção de grau de Mestre em Engenharia
Civil, Programa de Pós-Graduação em
Construção Civil, setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

Co-Orientador: Prof.^o Dr.^o Vicente Coney Campiteli

CURITIBA

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

691.5

M386p

Martins, Eliziane Jubanski, 1979-

Procedimento para dosagem de pastas para argamassa auto-nivelante [manuscrito] / Eliziane Jubanski Martins. – 2009.

139f. : il., color. ; 30 cm.

Impresso.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Construção Civil, 2009.

“Orientador: Prof^º. Dr^ª. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa e co-orientador: Prof. Dr. Vicente Coney Campiteli”.

Bibliografia: f. 133-139.

1. Argamassa flúida. 2. Cimento portland. 3. Reologia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Costa, Marianne do Rocio de Mello Maron da. III. Campiteli, Vicente Coney. IV. Título.

Bibliotecário: **Arthur Leitis Junior – CRB9/1548**

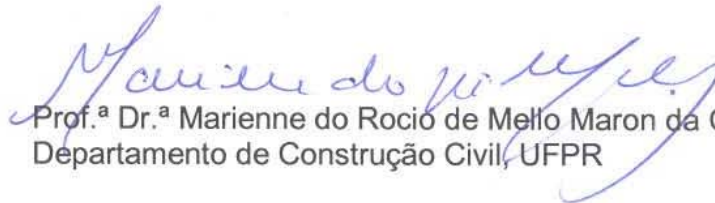
TERMO DE APROVAÇÃO

ELIZIANE JUBANSKI MARTINS

PROCEDIMENTOS PARA A FORMULAÇÃO DE PASTAS PARA ARGAMASSAS AUTO-NIVELANTE

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção de grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:


Orientador:



Prof.ª Dr.ª Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa
Departamento de Construção Civil, UFPR



Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros
Departamento de Construção Civil, UFPR



Prof.ª Dr.ª Berenice Martins Foraltes-Carbonari
Departamento de Construção Civil, UEL

Curitiba, 09 de abril de 2009.

*Quando partes diferentes se
reúnem num todo único e sólido, o que
seria pedra, ferro e argila transforma-se
na escultura de um tempo... Matéria se
junta a matéria sob a liga tenaz do
homem e todo o conhecimento de sua
época. Neste instante, o construtor de
SONHOS constrói IDEAIS e de ideais o
mundo é construído!!!!"*

Autor Desconhecido

*Dedico esse trabalho aos meus Pais
Alceu e Eliane, aos meus Irmãos
Elizangela e Juninho e ao meu grande
amor Bruno pelo seu Carinho, Dedicção
e Compreensão.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me oferecer saúde, persistência e serenidade no desenvolvimento desse trabalho e também pela proteção divina em todos os dias da minha vida.

A minha orientadora Dr.^a Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa que aceitou o desafio da argamassa auto-nivelante já no final da empreitada, porém sempre mostrando uma competência e dedicação que poucos possuem. Prof. esse trabalho estaria longe de ser concluído sem sua contribuição tão valiosa, obrigada por tudo.

Ao meu co-orientador o Prof. Dr. Vicente Coney Campiteli, que também contribuiu de forma significativa ao longo desses dois anos de mestrado, sempre mostrando amor daquilo que faz. Melhora logo e continua passando esse sábio conhecimento a nós alunos! Obrigada.

Aos professores José Marques Filho, Mauro Lacerda Santos Filho, Adriana de Paula Lacerda Santos, Kleber Franke Portella e Fernando Crema, Marianne Costa que ministraram disciplinas de grande importância para o desenvolvimento este trabalho.

Ao pessoal do LAME, Betina, Jeferson, Amanda, Marcelo, Aline, Luiz Fabiano, Cris e demais colegas por ter me recebido de portas abertas para que meus ensaios fossem desenvolvidos.

Ao pessoal do LACTEC, Alessandra, Douglas, Leandro, João Henrique, também por ter me auxiliado na execução dos ensaios de reologia e caracterização dos aditivos, sempre prontos para auxiliar.

Ao pessoal do LAMIR, J. Manoel, Elisiane, Rodrigo, Evelise, que me ajudaram na execução dos ensaios de caracterização do cimento, sílica ativa e agregados. Obrigada pela força e carinho com que me receberam!

Ao Alecio, bolsista e estagiário que me ajudou na execução dos ensaios com o viscosímetro, acompanhou minha trajetória dentro dos laboratórios, dividia sempre alguns materiais de ensaios comigo, inclusive a prof. em dias muito corridos... Acho que ganhei um grande parceiro de laboratório. Valeu rapaz !

A secretária do PPGCC, Ziza, pelo carinho, paciência e incentivo mostrando-se sempre pronta para ajudar.

Aos amigos Louise, Carolina Toledo, Carolina Riedel e Polan) por estarem de uma certa forma sempre por perto. A vida é bem mais feliz com vocês por perto!

Aos colegas de mestrado que foram chegando de mansinho e conquistando lugares especiais na minha vida, Leticia, Marcia, Sheila, Clara, César Daher, Kironi, Ariovaldo, Luiz, Cris, Rafael, Valmir... e a todos os colegas que de certa forma estiveram juntos nesses dois anos de estudos... Valeu pessoal!!

Agradeço aos profissionais do SENAI, prof. Marcos Dallarme, Rodrigo, prof. Jan, prof. David, por terem me acolhido nesse período de estudos, conciliando meus horários de aula e aos meus queridos alunos por terem sido um grande incentivo na aquisição dos novos conhecimentos.

A LLMarques, Luiz Geraldo, Lúcia e Valéria excelentes profissionais e que também me ajudaram em várias ocasiões para que eu conseguisse concluir o mestrado. Muito Obrigada!

A HOBIMIX, Fernando, Ricardo, Sérgio e a todo o pessoal que me recebeu em União da Vitória, por me apresentarem esse novo desafio, oferecendo sempre todo o apoio quanto a dúvidas técnicas, materiais e equipamentos. Meu grande respeito e admiração pelo trabalho de vocês! Obrigada pela confiança.

A todo o pessoal da VLB Engenharia, por me auxiliar, em vários assuntos no decorrer desse trabalho. Obrigada!

A minha irmã caçula Elizangela, por ser minha seguidora, protetora, companheira, cúmplice e eterna amiga, mostrando sempre o lado bom de tudo e como ser alegre em todos os momentos da vida.

Aos meus pais Alceu e Eliane que me ensinaram não só as primeiras palavras, os primeiros passos, mas também as lições de amor, caráter, dignidade e persistência. Obrigada por muitas vezes abrirem mão dos seus sonhos pelos meus. Amo vocês.

Ao Bruno, grande amor da minha vida, por deixar meus dias mais alegres, fazer companhia nas minhas solitárias noites de estudo, sofrer comigo nos momentos difíceis, rir comigo nas conquistas, mostrar o amor, carinho, apoio, proteção e incentivo no desenvolvimento desse trabalho. Amo você!

“Não existe uma fórmula para o sucesso. Mas, para o fracasso, há uma infalível: tentar agradar a todo mundo”. (Herbert Swope)

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES _____ | 12 |
| LISTA DE TABELAS _____ | 15 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS _____ | 16 |
| RESUMO _____ | 17 |
| ABSTRACT _____ | 18 |
| 1. CAPÍTULO 1– INTRODUÇÃO _____ | 19 |
| 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS _____ | 19 |
| 1.1.1. APLICAÇÃO DA ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE _____ | 21 |
| 1.2. HIPÓTESES _____ | 23 |
| 1.3. OBJETIVOS _____ | 23 |
| 1.4. JUSTIFICATIVAS _____ | 23 |
| 1.4.1. JUSTIFICATIVA TECNOLÓGICA _____ | 24 |
| 1.4.2. JUSTIFICATIVA ECONÔMICA _____ | 25 |
| 1.4.3. JUSTIFICATIVA AMBIENTAL _____ | 29 |
| 1.5. LIMITAÇÕES DA PESQUISA _____ | 31 |
| 1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO _____ | 32 |
| 2. CAPÍTULO 2 – ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE _____ | 33 |
| 2.1. DEFINIÇÃO _____ | 33 |
| 2.2. MATERIAIS EMPREGADOS PARA O ESTUDO DA PASTA VISANDO A ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE _____ | 36 |
| 2.2.1. SELEÇÃO DOS MATERIAIS _____ | 36 |
| 2.2.1.1. Cimento Portland _____ | 37 |
| 2.2.1.2. Aditivo Químico _____ | 37 |
| 2.2.1.3. Aditivo Superplastificante (SP) _____ | 38 |
| 2.2.1.4. Aditivo Modificador de Viscosidade (VMA) _____ | 42 |
| 2.2.1.5. Adições Minerais _____ | 44 |
| 2.3. PROPRIEDADES DA PASTA NO ESTADO FRESCO _____ | 47 |
| 2.4. ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA PASTA AUTO-NIVELANTE _____ | 48 |
| 2.4.1. ENSAIOS COM CILINDRO ESPANHOL _____ | 49 |
| 2.4.2. ENSAIO COM O VISCOSÍMETRO _____ | 53 |
| 3. CAPÍTULO 3 – CONCEITOS BÁSICOS DA REOLOGIA _____ | 55 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1. CONCEITOS DA REOLOGIA | 55 |
| 3.2. PARÂMETROS REOLÓGICOS | 57 |
| 3.2.1. TENSÃO DE CISALHAMENTO | 57 |
| 3.2.2. DEFORMAÇÃO | 58 |
| 3.2.3. VISCOSIDADE | 58 |
| 3.3. CLASSIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO | 60 |
| 3.4. IMPORTÂNCIA DA REOLOGIA NAS ARGAMASSAS AUTO-NIVELANTE | 63 |
| 3.5. FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO REOLÓGICO | 64 |
| 4. CAPÍTULO 4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL | 67 |
| 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 68 |
| 4.1.1. CIMENTO | 69 |
| 4.1.2. SÍLICA ATIVA | 71 |
| 4.1.3. ADITIVOS | 72 |
| 4.1.3.1. Espectroscopia de Infravermelho | 72 |
| 4.2. CARACTERIZAÇÃO DA PASTA PARA ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE | 75 |
| 4.2.1. PROCEDIMENTO DE MISTURA | 76 |
| 4.2.2. PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DO ENSAIO COM O CILINDRO ESPANHOL | 77 |
| 4.2.3. ETAPA I: ENSAIOS PRELIMINARES COM A PASTA AUTO-NIVELANTE | 81 |
| 4.2.3.1. Parâmetro Fixo | 81 |
| 4.2.3.2. Variáveis Independentes ou de Controle | 82 |
| 4.2.3.3. Variáveis Dependentes ou de Resposta | 83 |
| 4.2.3.4. Entrada de Dados | 83 |
| 4.2.4. ETAPA II: ENSAIOS COM A PASTA AUTO-NIVELANTE PROPRIAMENTE DITA | 85 |
| 4.2.4.1. Parâmetro Fixo | 85 |
| 4.2.4.2. Variáveis Independentes ou de Controle | 85 |
| 4.2.4.3. Variáveis Dependentes ou de Resposta | 86 |
| 4.2.4.4. Entrada de Dados | 86 |
| 4.2.5. ETAPA III - ENSAIOS COM O VISCOSÍMETRO | 88 |
| 4.2.5.1. Parâmetros Fixos | 90 |
| 4.2.5.2. Variáveis Independentes ou de Controle | 90 |
| 4.2.5.3. Variáveis Dependentes ou de Resposta | 90 |
| 4.2.5.4. Entrada de Dados | 91 |
| 5. CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO DE ANÁLISE E RESULTADOS | 92 |
| 5.1. ETAPA I: ENSAIOS PRELIMINARES PARA ANÁLISE DA PASTA | 92 |
| 5.1.1. COMPORTAMENTO DA MISTURA COM ADITIVO SP 0,5% | 93 |
| 5.1.2. COMPORTAMENTO DA MISTURA COM ADITIVO SP = 0,8% | 96 |

| | |
|--|------------|
| 5.2. ETAPA II: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA PASTA | 98 |
| 5.2.1. INFLUÊNCIA DO TEOR DE ADITIVO PROMOTOR DE VISCOSIDADE (VMA) | 101 |
| 5.2.2. INFLUÊNCIA DO TEOR DE SÍLICA ATIVA (SA) | 105 |
| 5.2.3. INFLUÊNCIA DA FORMULAÇÃO DA MISTURA NA PASTA IDEAL PARA ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE | 108 |
| 5.3. ETAPA III: ENSAIOS COM O VISCOSÍMETRO | 110 |
| 6. CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS | 116 |
| 6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 118 |
| ANEXO 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES COM O CILINDRO ESPANHOL | 119 |
| ANEXO 2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O CILINDRO ESPANHOL | 120 |
| ANEXO 3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM VISCOSÍMETRO | 123 |
| ANEXO 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM VISCOSÍMETRO | 126 |
| ANEXO 5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM VISCOSÍMETRO | 129 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 133 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|----------------------|---|----|
| FIGURA 1.1 - | Formulação trazida pela empresa HOBIMIX da cidade de Valência ES | 20 |
| FIGURA 1.2 - | Execução do contrapiso com argamassa auto-nivelante | 20 |
| FIGURA 1.3 - | Corte de um elemento do subsistema de vedação horizontal – piso | 22 |
| FIGURA 1.4 - | Método Tradicional: Cama de Areia + Argamassa | 26 |
| FIGURA 1.5 - | Método Tradicional: Cama de Areia + Argamassa + Argamassa Cola | 26 |
| FIGURA 1.6 - | Método Tradicional: Argamassa+ Isolamento Térmico | 27 |
| FIGURA 1.7 - | Método Auto-Nivelante | 27 |
| FIGURA 1.8 - | Gráfico comparativo de custos | 28 |
| FIGURA 2.1 - | Alta fluidez da argamassa auto-nivelante | 34 |
| FIGURA 2.2 - | Microestrutura da pasta auto-nivelante | 35 |
| FIGURA 2.3 - | Monômero de um policarboxilato | 40 |
| FIGURA 2.4 - | Ação das moléculas do aditivo superplastificante SP nas partículas do cimento | 40 |
| FIGURA 2.5 - | Floculação entre as partículas do cimento, devido as forças de Van der Waals (a); Defloculação das partículas do cimento, devida a ação das moléculas de aditivo adsorvidas (b) | 41 |
| FIGURA 2.6 - | Ação do aditivo VMA na mistura | 43 |
| FIGURA 2.7 - | Micrografia da Sílica Ativa | 46 |
| FIGURA 2.8 - | Dimensões do Cilindro Espanhol | 50 |
| FIGURA 2.9 - | Diagrama esquemático do Cilindro Espanhol reproduzido no Brasil | 51 |
| FIGURA 2.10 - | Cilindro Espanhol utilizado nos ensaios com a pasta. Demonstração do equipamento (a); A pasta escoando do copo do cilindro espanhol (b) | 52 |
| FIGURA 2.11 - | Modelos de reômetros. (a) Reômetro BML baseado nos conceitos cilindros coaxiais; (b) Reômetro BTRHEOM baseado nos conceitos placa/placa | 53 |
| FIGURA 2.12 - | Ensaio com o viscosímetro para a análise da reologia da pasta. (a) Equipamento utilizado nos ensaios; (b) Componentes do equipamento | 54 |
| FIGURA 3.1 - | Representação esquemática para definição de viscosidade segundo modelo de Newton | 59 |
| FIGURA 3.2 - | Classificação dos fluidos segundo seu comportamento reológico | 60 |

| | | |
|----------------------|--|----|
| FIGURA 3.3 - | Comportamento básico de fluxo Newtonianos e não Newtonianos | 62 |
| FIGURA 3.4 - | Reprodução esquemática indicando o efeito da perturbação causada pela presença de partículas esféricas sobre as linhas de fluxo de um fluxo submetido ao cisalhamento: (a) linhas de fluxo sem perturbação, (b) perturbação causada por uma partícula com pequeno diâmetro, (c) perturbação causada por uma partícula com grande diâmetro, (d) perturbação causada por um aglomerado de partículas | 65 |
| FIGURA 3.5 - | Efeito do formato das partículas na viscosidade da mistura . | 66 |
| FIGURA 4.1 - | Esquema da metodologia empregada na pesquisa | 68 |
| FIGURA 4.2 - | Equipamento CILAS 1064 – <i>Granulometria a Laser</i> | 70 |
| FIGURA 4.3 - | Curva granulométrica do cimento CP V ARI RS | 70 |
| FIGURA 4.4 - | Curva granulométrica da sílica ativa | 72 |
| FIGURA 4.5 - | Resultado do Infravermelho para aditivo promotor de viscosidade | 74 |
| FIGURA 4.6 - | Resultado do Infravermelho para aditivo superplastificante. | 74 |
| FIGURA 4.7 - | Etapas do estudo de formulações da pasta | 76 |
| FIGURA 4.8 - | Procedimento de mistura para a pasta de cimento | 77 |
| FIGURA 4.9 - | Equipamento utilizado na mistura da pastas | 78 |
| FIGURA 4.10 - | Ensaio com cilindro espanhol. (a) Nomenclatura dos componentes do cilindro espanhol; (b) Escoamento da pasta através do orifício do copo; (c) Determinação da abertura da pasta com base na média de dois diâmetros (Diâmetro 1 e Diâmetro 2) | 79 |
| FIGURA 4.11 - | Análise visual da borda da pasta escoada. (a) Pasta com borda desuniforme, (b) Pasta com borda uniforme | 80 |
| FIGURA 4.12 - | Análise visual da seqüência da pasta escoada. (a) Pasta sem tendência à segregação, (b) Pasta com tendência à segregação | 80 |
| FIGURA 4.13 - | Programação de ensaios com o viscosímetro | 88 |
| FIGURA 4.14 - | Ensaio com o viscosímetro para a análise da reologia da pasta. (a) Equipamento utilizado nos ensaios; (b) Colocação da pasta na base do viscosímetro; (c) Início do ensaio; (c) Componentes do equipamento | 89 |
| FIGURA 5.1 - | Visualização das pastas nos ensaios preliminares com o cilindro espanhol. Formulação 1 (a); formulação 5 (b); formulação 8 (c) | 95 |
| FIGURA 5.2 - | Visualização das pastas nos ensaios preliminares com o cilindro espanhol. Formulação 10 (a); formulação 14 (b) | 97 |
| FIGURA 5.3 - | Gráfico comparativo entre os três teores de SP para relação a/ms 0,95 que relaciona espalhamento <i>versus</i> teor de aditivo VMA | 98 |

| | | |
|----------------------|--|-----|
| FIGURA 5.4 - | Gráfico comparativo entre os três teores de SP para relação a/ms 0,67 que relaciona espalhamento <i>versus</i> teor de aditivo VMA | 98 |
| FIGURA 5.5 - | Gráfico referente ao espalhamento <i>versus</i> VMA. Relação a/ms 0,70 (a); Relação a/ms 0,75 (b); Relação a/ms 0,80 (c); Relação a/ms 0,85 (d) | 102 |
| FIGURA 5.6 - | Visualização das pastas após o escoamento com VMA 0,9%. Formulação 41 (a); formulação 44 (b); formulação 49 (c) | 104 |
| FIGURA 5.7 - | Relação verificada entre o espalhamento <i>versus</i> a/ms. Sílica ativa 5% (a); sílica ativa 6% (b); sílica ativa 7% (c); sílica ativa 8% (d) | 106 |
| FIGURA 5.8 - | Impacto do comportamento das pastas com o aumento da relação a/ms. Formulação 55 (a); formulação 51 (b); formulação 47 (c); formulação 43 (d) | 107 |
| FIGURA 5.9 - | Gráfico referente aos resultado do viscosímetro quanto a viscosidade <i>versus</i> taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de cisalhamento para uma formulação de SA 5% e a/ms 0,8 | 111 |
| FIGURA 5.10 - | Gráfico referente aos resultado do viscosímetro quanto a viscosidade <i>versus</i> taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de cisalhamento. Formulação SA 5% e a/ms 0,75(a); formulação SA 6% e a/ms 0,80 (b); formulação SA 6% e a/ms 0,75 (c); formulação SA 7% e a/ms 0,80 (d); formulação SA 7% e a/ms 0,75 (e); formulação SA 8% e a/ms 0,80 (f); formulação SA 8% e a/ms 0,75 (g) | 114 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|---------------------|--|-----|
| TABELA 1.1 - | Comparativo de custos | 28 |
| TABELA 4.1 - | Composição química do cimento CPV- ARI-RS da VOTORAN | 69 |
| TABELA 4.2 - | Composição física do cimento CPV-ARI-RS da VOTORAN | 69 |
| TABELA 4.3 - | Composição química da sílica ativa – SILMIX da Camargo Corrêa Cimentos S/A | 71 |
| TABELA 4.4 - | Caracterização dos aditivos SP e VMA | 75 |
| TABELA 4.5 - | Resumo das variáveis independentes utilizadas na etapa I | 83 |
| TABELA 4.6 - | Dados de entrada para a etapa I | 84 |
| TABELA 4.7 - | Resumo das variáveis independentes utilizadas na etapa II | 86 |
| TABELA 4.8 - | Dados de entrada utilizados para a etapa II | 87 |
| TABELA 4.9 - | Resumo das variáveis independentes utilizadas no ensaio do viscosímetro | 91 |
| TABELA 5.1 - | Resultados numéricos e análise visual para 0,5% de aditivo SP | 94 |
| TABELA 5.2 - | Resultados numéricos e análise visual para 0,8% do aditivo SP | 96 |
| TABELA 5.3 - | Resultados do espalhamento e da análise visual das pastas formuladas na etapa II da pesquisa | 100 |
| TABELA 5.4 - | Resultados do espalhamento e da análise visual das pastas formuladas na etapa II da pesquisa | 109 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|----------|--|
| AAN | Argamassa auto-nivelante |
| CAA | Concreto auto-adensável |
| EFNARC | European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Institute Applicators of Specialist Building Product |
| AS | Sílica Ativa |
| SP | Superplastificante |
| VMA | Modificador de Viscosidade |
| τ | Tensão de cisalhamento |
| γ | Taxa de cisalhamento |
| η | Viscosidade |
| U | Borda Uniforme |
| D | Borda Desuniforme |
| SS | Sem segregação |
| CS | Com segregação |
| D | Diâmetro |
| a/c | Relação água/cimento |
| a/ms | Relação água/materiais secos |

RESUMO

MARTINS, E. J. **Procedimentos para a formulação de pastas para argamassa auto-nivelante**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, UFPR, Curitiba.

A argamassa auto-nivelante é um material pouco conhecido no Brasil, sua principal meta é preencher espaços vazios e se auto-adensar apenas sob o efeito da gravidade e de sua própria capacidade de fluxo, sem segregação e com nivelamento. O presente trabalho propõe procedimentos de dosagem de pastas cimentícias auto-nivelante, que futuramente servirão de base para estudos com a argamassa auto-nivelante. A aplicação dessa argamassa é voltada ao contrapiso, que geralmente não apresenta uma qualidade esperada.

Os ensaios realizados com a pasta não puderam ser os mesmos realizados para pastas convencionais, já que a alta fluidez do material não permite a utilização de equipamentos convencionais, por isso foi utilizado nessa pesquisa um equipamento novo vindo da Europa chamado de *Cilindro Espanhol* que foi adaptado para a realização dos ensaios com pastas para argamassa auto-nivelante. Já a análise reológica dessa pasta foi caracterizada pelo viscosímetro, que analisou a viscosidade de algumas formulações, resultando em curvas de viscosidade e tensão de cisalhamento.

Os materiais utilizados nos ensaios da pasta foram o cimento CP-V ARI RS, adição de sílica ativa, aditivo superplastificante (SP) e aditivo promotor de viscosidade (VMA). O programa experimental foi desenvolvido a partir de um estudo procedente da cidade de Valência (ES), onde a argamassa auto-nivelante já é comercializada e os procedimentos de dosagens e ensaios com esse novo material já são conhecidos. Com alguns parâmetros fornecidos a partir desses estudos em Valência, pôde ser desenvolvido um procedimento para dosagem de pastas cimentícia para a utilização em argamassa auto-nivelante. As pastas foram avaliadas no estado fresco por esse novo procedimento e selecionadas as formulações que resultaram simultaneamente em maior fluidez e resistência à segregação.

Foi observado que o procedimento utilizado na composição das pastas foi satisfatório, já que as formulações empregadas mostraram eficácia e com comportamento coerente entre os constituintes da mistura. O Cilindro Espanhol mostrou-se uma ferramenta adequada na confecção das pastas para argamassas auto-nivelante e contribuiu para diferenciar o comportamento das pastas com diferentes formulações.

Palavras-chave: Argamassa auto-nivelante, pasta cimentícia, reologia.

ABSTRACT

MARTINS, E. J. **Procedure for pastes formularization for self-leveling mortars.** 2009. M. Sc. Dissertation (Civil Engineering Masters) – Civil Construction Post-Graduation Program, UFPR, Curitiba, Brazil.

The self-leveling mortar is still a little-know material in Brazil and its proposal is to fill gaps and to get self-compacted only considering the effect of gravity and its own flow capability, with no segregation and with satisfactory leveling. The present work considers a study on procedures and formularizations regarding cimenticious paste that will be destined to self-leveling paste used on concrete screeded floors.

The performed laboratory assays with the paste could not be the same as the one performed to regular pastes, once the high fluidity of this material does not allow the use of conventional equipment. Thus, a new European equipment called “Spanish Cilinder” was adopted to be used on the paste for self-leveling mortars assays. The rheological analysis of the paste was characterized by the viscosimeter, which resulted on viscosity curves and shear stresses.

The materials used on the paste laboratory assay were CP-V ARI RS cement, active silica addition, superplasticizer additive (SP) and viscosity modifier additive (VMA). The experimental program was developed from a study made at the city of Valencia, Spanish, where the self-leveling mortar is already commercialized and the knowledge regarding its procedures and assays is already dominated. Considering some parameters taken from this study, a procedure for cimenticious pastes formularization for self-leveling mortars could be developed. The pastes were evaluated still fresh considering this new procedure and the formularization which resulted simultaneously on higher fluidity and segregation resistance were selected.

It could be observed that the procedure used at the pastes composition was satisfactory, once the applied formularization showed effectiveness and coherence of behavior between the constituents of the mixture. The “Spanish Cilinder” was considered as being an adequate tool for the production process of pastes for self-leveling mortars and contributed to distinguish behaviors of paste with different formularizations.

Keywords: Self-leveling mortar, cimenticious paste, rheolog

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A argamassa auto-nivelante, também conhecida como auto-adensável, ou até mesmo auto-escoante, é um material relativamente novo no Brasil, e que começou a ser estudada por empresas de construção civil e pesquisadores no início de 2008. Na Europa esse material já foi patenteado por uma empresa potiguar de investimentos imobiliários, que em parcerias com construtoras locais já está empregando o produto em vários empreendimentos.

A principal característica da argamassa auto-nivelante é possuir uma elevada fluidez, em comparação as argamassas convencionais. A aplicação desse novo tipo de material é executada com a ajuda de uma mangueira que espalha a argamassa em formas, moldes ou em lonas plásticas, sem a necessidade de uma energia de espalhamento. Outras questões relevantes com relação a aplicação da argamassa auto-nivelante, são: a diminuição de mão de obra e do tempo para a aplicação dessa argamassa, já que ela praticamente espalha-se em decorrência de seu peso próprio.

Estudos realizados na cidade de Valência na Espanha serviram como modelo para o início das pesquisas com argamassas auto-nivelantes. A empresa brasileira HOBIMIX visitou as instalações de empresas na Espanha e trouxe modelos de formulações e equipamentos utilizados naquela região para o desenvolvimento de argamassa auto-nivelante com os materiais específicos existentes no Brasil.

A Figura 1.1 mostra uma das dosagens trazidas da Espanha na forma de rascunho e afirma a importância do conhecimento dos materiais empregados para se chegar a um mesmo objetivo, nesse caso a argamassa auto-nivelante. A

diferença desses tipos de materiais empregados na Europa e os existentes no Brasil foi o grande desafio desse estudo e motivação para o início dessa pesquisa.

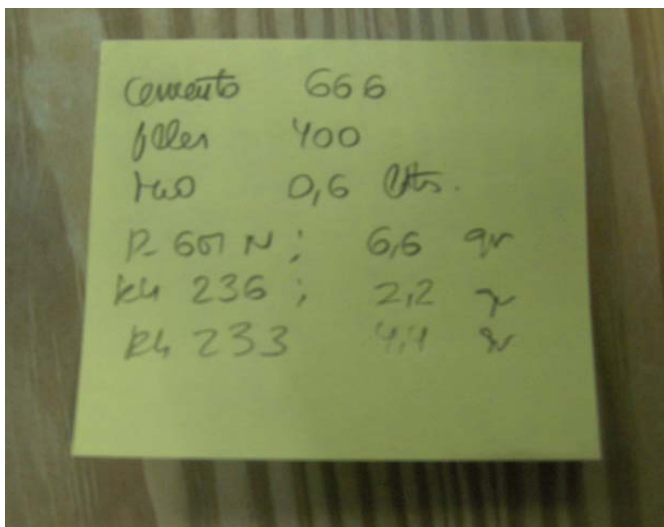


Figura 1.1 – Formulação trazida pela empresa HOBIMIX da cidade de Valência ES

Fonte: HOBIMIX (2008)

Já Figura 1.2 mostra a argamassa auto-nivelante sendo aplicado no contrapiso de uma edificação na cidade de Valência-ES. Essas imagens foram cedidas pela empresa HOBIMIX em uma das visitas feitas à empresas que já utilizam a argamassa auto-nivelante em suas construções.



Figura 1.2 – Execução do contrapiso com argamassa auto-nivelante

Fonte: HOBIMIX (2008)

A proposta da argamassa auto-nivelante é de permitir uma moldagem adequada, isenta de defeitos oriundos da falha de aplicação ou de técnica inadequada de moldagem, sem uma grande exigência na qualificação do operário.

Com relação aos materiais, a argamassa auto-nivelante não requer nenhum tipo de material especial, porém, os materiais devem possuir características específicas e teores na mistura que proporcionem a fluidez adequada sem haver segregação da mesma. Já os equipamentos e procedimentos de dosagens ainda não foram normatizados, por esse motivo exigem estudos mais detalhados.

Por se tratar de um tema ainda pouco conhecido nas áreas técnica e acadêmica, esse trabalho visa auxiliar no avanço dos estudos com argamassa auto-nivelante, através de proposição de procedimentos para a formulação de pastas para o desenvolvimento desta argamassa.

O estudo com a argamassa não é o escopo deste trabalho, já que para esse estudo necessitaria de um tempo maior de pesquisa, o estudo preliminar com o procedimento de dosagem de pastas para a argamassa auto-nivelante, já pode ser considerada de grande importância ao meio científico.

1.1.1. Aplicação da Argamassa Auto-Nivelante

A construção civil é um setor que abrange diversas atividades podendo ser exemplificado pela execução de projetos até as tarefas rotineiras do canteiro de obras (execução de estruturas, alvenaria, revestimentos, etc.). Porém não são todas as atividades executadas que recebem atenção merecida em sua execução e é esse o caso do subsistema piso onde está incluso o contrapiso.

Encarada como uma atividade secundária, não é contemplada com um projeto específico, sendo executada por operários que na maioria das vezes não possuem conhecimento técnico suficiente para analisar as variáveis que influenciam diretamente no processo de produção e execução do contrapiso (BARROS e SABBATINI, 1991).

Segundo BARROS e SABBATINI (1991), os resultados que se obtém a partir de procedimentos sem um método padronizado e adequado, causam grandes problemas como:

- ↪ Custo elevado pela má escolha no tipo de material utilizado e formulações adequadas;
- ↪ Espessuras variáveis do contrapiso;
- ↪ Falta de qualidade no produto final;
- ↪ Falta de padronização na confecção do contrapiso.

A Figura 1.3 detalha o subsistema piso, demonstrando todas as camadas que o constitui. O contrapiso é uma dessas camadas que terá a finalidade de regularizar a base para a fixação do revestimento (nivelamento), vedação, estanqueidade, isolamento termo-acústico, permite embutimento de instalações, entre outras. Por esse motivo a execução do contrapiso deveria ser cuidadosamente planejada, já que essa camada servirá de base para os acabamentos finais nas edificações.

A argamassa auto-nivelante contribui na execução do contrapiso por ser um material com características específicas que garante a total horizontalidade do contrapiso.

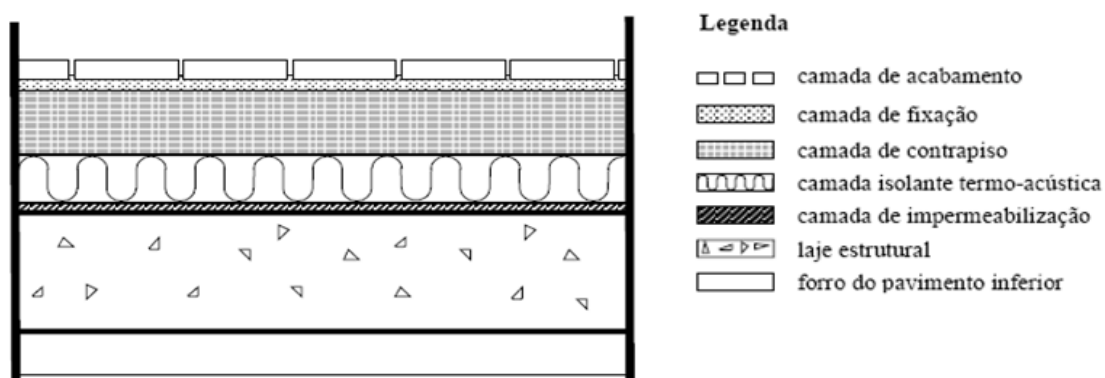


Figura 1.3 - Corte de um elemento do subsistema de vedação horizontal - piso

Fonte: BARROS e SABBATINI (1991)

1.2. HIPÓTESES

Esse trabalho visa responder a seguinte questão: “O procedimento adotado para a análise da pasta auto-nivelante, com os materiais específicos, é apropriado para o início dos estudos com a argamassa auto-nivelante?”

O equipamento utilizado para testar a pasta auto-nivelante é adequado e eficiente na análise de suas características no estado fresco?

Parte-se da hipótese de que após uma formulação adequada de constituintes, ensaiada em um equipamento próprio de caracterização de materiais auto-adensáveis, seja possível obter a pasta auto-nivelante que servirá de base para os estudos posteriores com a argamassa auto-nivelante.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo definir um procedimento de dosagem de pastas para argamassa auto-nivelante, no que diz respeito às indicações dos tipos e quantidades dos constituintes da mistura a partir de avaliações laboratoriais de desempenho no estado fresco.

A análise da eficiência de outro tipo de equipamento também será avaliada, já que a argamassa auto-nivelante apresenta uma consistência bastante fluida no estado fresco. Os métodos tradicionais para medir tais propriedades (Cone de Abrams, Squeeze Flow, Mesa de Consistência, Dropping Ball, etc.) não são indicados para a pasta e argamassa auto-nivelante obrigando a substituição desses ensaios por outros ajustados à pasta auto-nivelante.

1.4. JUSTIFICATIVAS

A argamassa auto-nivelante representa uma evolução dentro do universo das argamassas, capaz de proporcionar à construção civil benefícios tecnológicos, econômicos e ambientais. Esses benefícios serão justificados nos itens a seguir.

1.4.1. Justificativa Tecnológica

A argamassa auto-nivelante que foi introduzida na década de 80 na Europa, e ainda pouco difundida no Brasil, vem sendo motivo de estudos e pesquisas com relação ao seu comportamento, conceito, materiais, propriedades entre outros.

Segundo NAKAKURA (1997) o estudo das argamassas em geral vem crescendo consideravelmente de uns anos para cá, sendo que já existem estudos realizados junto ao Sindicato Nacional dos Produtos à base de cimento (SINAPROCIM, 2001), que constatou a divisão das indústrias de argamassas em dois seguimentos. O primeiro seguimento refere-se a indústrias de pequeno a médio porte produzindo argamassas colantes e argamassas de rejuntamento. Já o segundo seguimento refere-se às argamassas de assentamento, revestimento e contrapiso.

Uma das principais vantagens que a argamassa auto-nivelante apresenta é a capacidade de se mover no interior de fôrmas, ou em uma determinada área por ação do seu peso próprio, ou seja, sem a necessidade de aplicação de forças externas para o seu adensamento. Em consequência disso, o preenchimento de todos os espaços são executados de modo uniforme, fazendo com que a estrutura apresente-se com um grau de homogeneidade bastante alta, consequentemente sem segregação e/ou exsudação.

Segundo NAKAKURA (1997) e TUTIKIAN et. al. (2008), abaixo estão relacionadas outras vantagens da argamassa auto-nivelante:

- ↳ A espessura do piso/contrapiso pode ser reduzida a apenas 5,0 mm a 10 mm, o que significa uma ótima redução no peso próprio e no consumo de cimento.
- ↳ A tendência à fissuração também é reduzida praticamente a zero, com o acréscimo de aditivos químicos retentores de água e fibras orgânicas.
- ↳ As ondulações ficam restringidas apenas às que podem ocorrer na superfície de um líquido viscoso e, pela ação da gravidade sobre um líquido a horizontalidade e a redução significativa de patologias ficam plenamente garantidas.

- ↪ Na questão de produtividade a argamassa auto-nivelante também têm vantagem sobre a argamassa convencional, já que o material é considerado fluido e sua aplicação consiste em literalmente “esguichar” esse material sobre o substrato ou a lona plástica sem a necessidade de desempenar e ainda garantindo a total horizontalidade do contrapiso.
- ↪ O tempo para a execução do piso/contrapiso também tem uma redução significativa e pode decorrer a um ritmo de 50 a 100m².h-1 por homem.
- ↪ Torna o local de trabalho mais seguro, já que há uma diminuição considerável no número de trabalhadores.
- ↪ A cura da argamassa auto-nivelante é extremamente rápida, causada pelo tipo de cimento (CP V ARI-RS) e a combinação de aditivos e adições, sendo que após decorridos 2 a 3 horas da sua aplicação já é possível pisar em sua superfície.
- ↪ A textura também é extremamente fina, já que a argamassa auto-nivelante contém uma grande quantidade de agregados com dimensões máxima característica inferior a 0,60mm, inserida numa matriz rica em cimento, dispensando até alguns tipos de selantes adicionais.
- ↪ Existe um elevado ganho ecológico, já que se utilizam alguns tipos de resíduos industriais em sua composição como as adições: sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno, cinza de casca de arroz, entre outras.

1.4.2. Justificativa Econômica

Segundo ORTEGA (2003), o estudo sobre a argamassa auto-nivelante teve seu início na década de 70, porém somente em 1999 algumas empresas Espanholas começaram a testar materiais e métodos para a confecção desse novo material.

Após a percepção sobre a inovação tecnológica proposta pela argamassa auto-nivelante começaram a serem desenvolvidos paralelamente aos estudos de

laboratório, estudos econômicos e de mercado, que consistiam em algumas visitas em obras para eleger os métodos mais utilizados nas obras chamados de Métodos Tradicionais, demonstrados nas Figuras 1.4, 1.5 e 1.6 para que se conseguisse um comparativo ao novo Método Auto-Nivelante, demonstrado pela Figura 1.7 (ORTEGA, 2003).

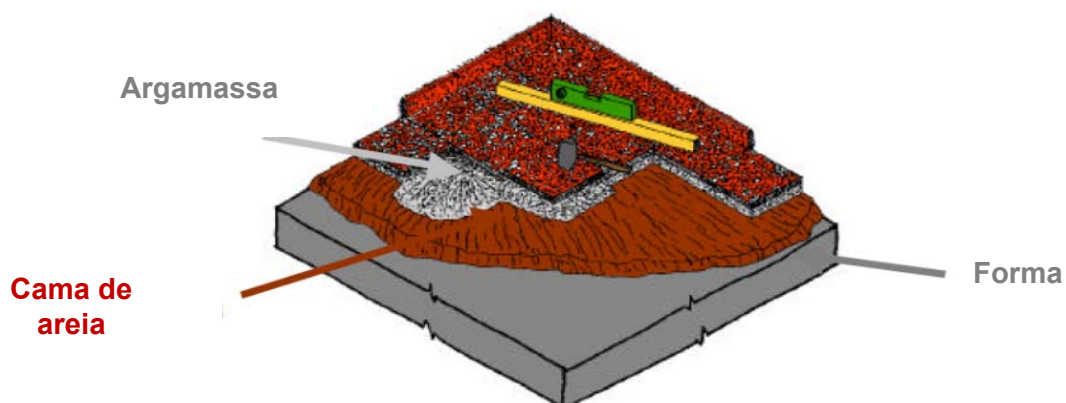


Figura 1.4 – Método Tradicional: Cama de Areia + Argamassa

Fonte: ORTEGA (2003)

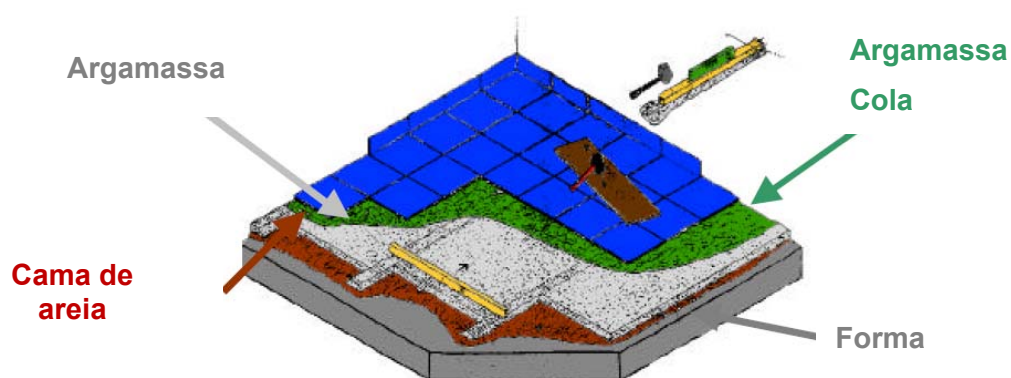


Figura 1.5 – Método Tradicional: Cama de Areia + Argamassa + Argamassa Cola

Fonte: ORTEGA (2003)

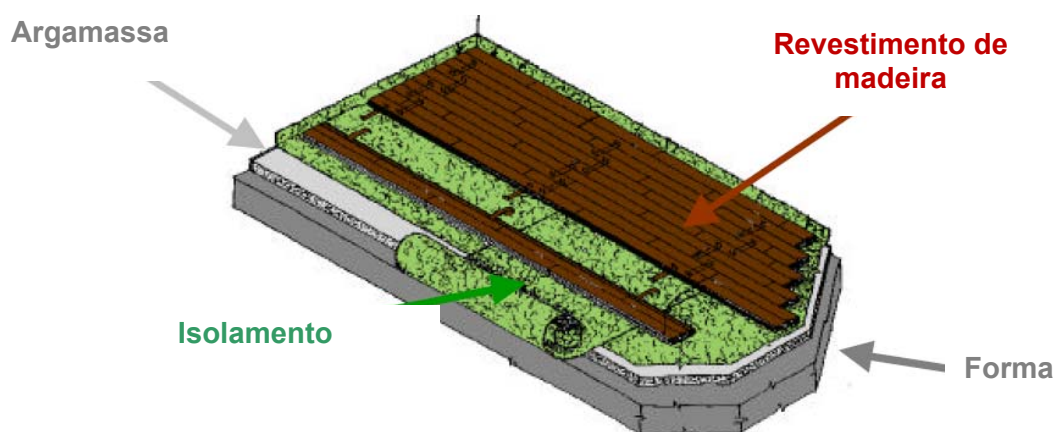


Figura 1.6 – Método Tradicional: Argamassa+ Isolamento Térmico

Fonte: ORTEGA (2003)

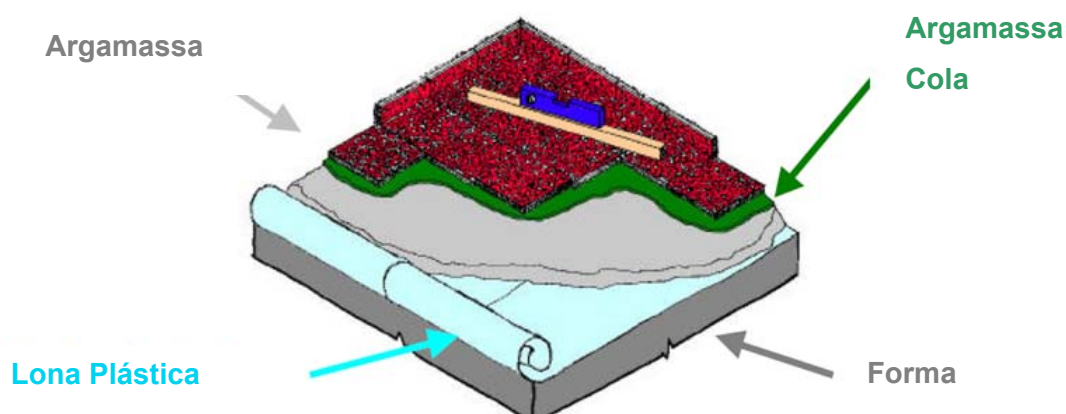


Figura 1.7 – Método Auto-Nivelante

Fonte: ORTEGA (2003)

A Figura 1.4 refere-se ao método tradicional mais simples quando se utiliza somente a argamassa no subsistema piso, já a Figura 1.5 mostra a utilização da argamassa para uma provável colocação de cerâmica, e por fim a Figura 1.6 refere-se a utilização de um revestimento de madeira sobre a argamassa em questão. Esses métodos foram selecionados para que se fizesse uma média dos dados obtidos, fazendo com que a estatística da análise econômica fosse a mais real possível.

A partir da média dos resultados comparativos entre os três métodos tradicionais, foi possível a comparação entre o método tradicional e o método com a argamassa auto-nivelante. Esses resultados podem ser visualizados na Tabela 1.1 e na Figura 1.8.

Tabela 1.1 – Comparativo de custos

| DESCRIÇÃO | CUSTOS (R\$/m ²) | |
|------------------|------------------------------|----------------|
| | MÉDIA DOS TRÊS MÉTODOS | AUTO-NIVELANTE |
| Mão de Obra | 16,13 | 3,00 |
| Argamassa | 6,12 | 16,57 |
| Argamassa Cola | 0,39 | 1,16 |
| Cama de Areia | 0,74 | 0,48 |
| Junta Perimetral | 0,39 | 1,46 |
| Gabaritos | 1,78 | 0,53 |
| Custos Indiretos | 2,85 | 1,87 |
| TOTAL | 28,39 | 25,07 |

Fonte: ORTEGA (2003)

ORTEGA (2003) demonstra com esse estudo a eficiência da argamassa auto-nivelante em relação a argamassas tradicionais com relação a custos, indicando que o estudo com a argamassa auto-nivelante é viável.

A diminuição de imperfeições no piso, rapidez na execução também são fatores positivos na escolha por uma argamassa auto-nivelante e comprovados nesse estudo de ORTEGA (2003).

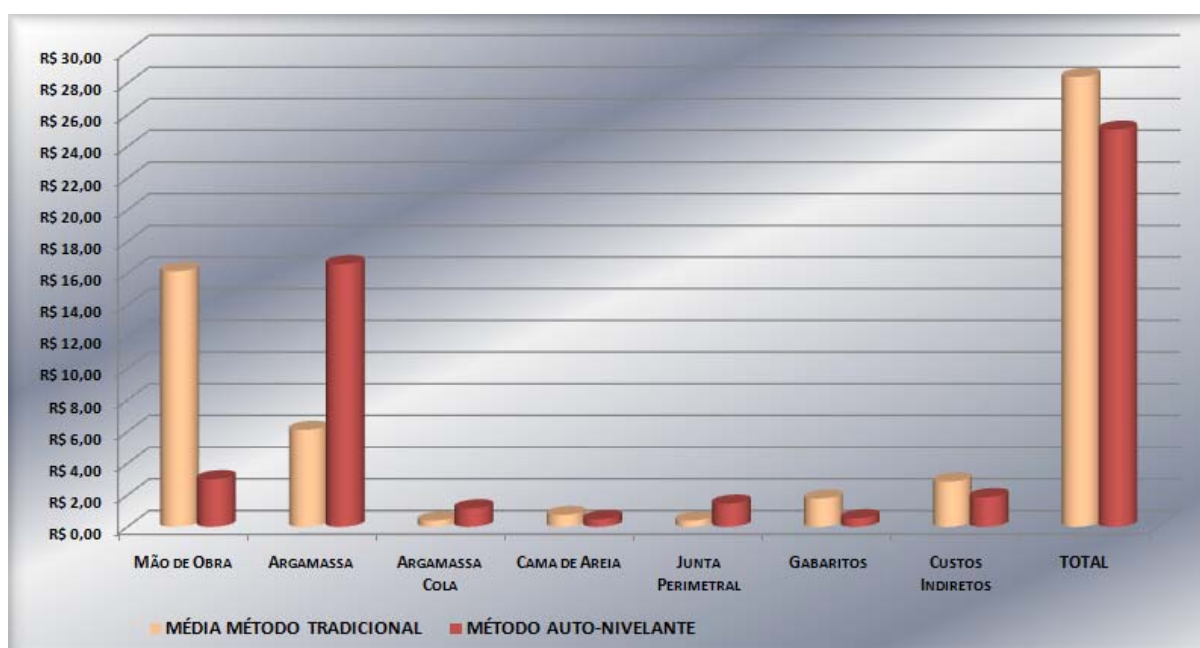


Figura 1.8 – Gráfico comparativo de custos

Fonte: ORTEGA (2003)

1.4.3. Justificativa Ambiental

Segundo METHA (2008) a escolha de um material para a construção civil deve atender ao quádruplo enfoque iniciadas pela letra E: Engenharia, Economia, Energia e Ecologia.

A busca do processo produtivo sustentável, que significa a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente, o gerenciamento da energia, do lixo e do transporte, continua sendo uma preocupação no meio técnico, visto que, estão sendo muitos os investimentos em novas tecnologias para a redução dos impactos ambientais.

A fabricação do cimento é responsável pela maior parte da produção de dióxido de carbono ou gás carbônico (CO₂) emitido na atmosfera, sendo que nos últimos 200 anos, a concentração desse gás na atmosfera foi responsável pelas alterações climáticas como o aumento da temperatura média do ar e dos oceanos que causaram degelo das calotas polares, elevação do nível dos oceanos, entre outros.

A relação que se estabelece na fabricação do cimento é que a cada tonelada de clínquer produzido, corresponde a aproximadamente uma tonelada de gás carbônico emitido na atmosfera. A moagem do clínquer juntamente com as adições minerais resulta em um produto composto com mistura homogeneizada do cimento Portland. Ao se produzir em média 1,6 bilhões de toneladas/ano de cimento em todo o planeta, 7% desse material são transformados em dióxido de carbono que é lançado na atmosfera (HAWKEN, et. al, 1999).

Além da produção do gás carbônico, nocivo ao meio ambiente, fatores como a demanda de matérias-primas não renováveis como a argila e o calcário, e a energia para a produção e moagem do clínquer, também são fatores relevantes quando se trata de impacto ambiental.

Uma das soluções para a diminuição da produção de cimento é o uso do cimento composto com adições minerais como, por exemplo, cinzas volantes, pozolanas naturais, sílica ativa, cinzas de casca de arroz entre outros, sendo que o uso dessas adições em argamassas e concretos têm se intensificado nas últimas décadas.

A utilização desses materiais alternativos em substituição ao cimento se torna cada vez mais comum diante do custo de produção do cimento, já que o emprego desses materiais combinados também auxilia na questão da durabilidade e desempenho de argamassas e concretos (NEVILLE, 1997).

A crescente demanda pelo uso desses resíduos e subprodutos torna os estudos de suas aplicações uma necessidade que contribui não só com o surgimento de um benefício ecológico mais também econômico e social (TASHIMA et. al, 2004).

Neste trabalho o estudo da formulação da pasta prevê a substituição de uma parcela do cimento pela sílica ativa, pois além de ser um subproduto da indústria metalúrgica de ligas de ferro-silício metálico, tem características específicas para a confecção da argamassa auto-nivelante, como por exemplo, suas partículas com grande área superficial e um aumento na durabilidade do subsistema contrapiso.

Outro benefício da argamassa auto-nivelante é com relação possibilidade de redução da espessura do contrapiso, conseqüentemente redução da quantidade de pasta do sistema (economia de cimento), que passará de 8,0 mm a 15 mm aproximadamente (Classe de Trânsito Leve), para 5,0 mm a 10 mm com os benefícios da argamassa auto-nivelante.

Um comparativo pesquisado por BARROS (1991) demonstra uma grande economia no consumo de cimento, somente com uma diminuição de 2,0 cm na espessura de contrapiso. Essa pesquisa foi executada no universo da construção de edifícios residenciais em São Paulo no ano de 1990 e demonstra um consumo de cimento anual de aproximadamente 97.200 toneladas considerando uma espessura média do contrapiso de 6,0cm (com traço em volume de cimento e areia de 1:3). Com uma redução de 2,0 cm na espessura do contrapiso e um consumo de cimento de 25 kg/m³ a redução do consumo de aglomerante caiu para 36.000 toneladas, uma economia que significa a execução da estrutura de concreto de aproximadamente 72 edifícios de 15 pavimentos e 500m² de laje cada um, ou ainda, a execução do contrapiso em mais de 6.000.000m².

1.5. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As limitações que ocorreram nessa pesquisa foram em virtude do tempo restrito para a execução da pesquisa que ao total é de 24 meses e nenhum recurso disponível, sendo assim necessário eleger alguns dos inúmeros fatores que influenciam na dosagem da pasta para argamassa auto-nivelante, dentre as quais: tipo de cimento, que foi fixado (CP V ARI RS), relação a/ms, tipo e quantidade de aditivos, teores de adições, entre outros.

O presente trabalho foi restringido da seguinte forma:

Utilizou-se o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos (CP V ARI RS), pelo fato de que este cimento específico apresenta uma das características que devem ser avaliadas na produção da argamassa auto-nivelante, que é a sua finura, pois quanto maior a superfície específica dos grãos, menor é a tensão de escoamento e maior a viscosidade da mistura, justamente o que se necessita para o material em questão.

Elegeram-se dois tipos de aditivos na produção de pastas para argamassas auto-nivelante, sendo eles o superplastificante a base de policarboxilato e o modificador de viscosidade. O superplastificante é justificado pelo fato de permitir que se alcance alta fluidez na mistura, enquanto que o aditivo modificador de viscosidade oferece um aumento de coesão, prevenindo a exsudação e a segregação.

Muitas poderiam ter sido as adições minerais utilizadas nessa pesquisa, porém a eleita foi a sílica ativa, utilizada em substituição ao cimento pelo fato de que as partículas desse material apresentam uma grande área específica (partículas finas), característica essa muito importante quando trata-se da pasta auto-nivelante, já que essa finura é um dos fatores responsável pela fluidez da mistura.

Devido a falta de laboratório adequado à execução dos ensaios da pasta auto-nivelante dessa pesquisa, não foi mensurado temperatura e umidade do laboratório onde foi realizado todos os ensaios.

1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 apresentar as considerações iniciais do tema, seguido do capítulo 2 que detalha a revisão bibliográfica referente ao tema argamassa auto-nivelante, bem como suas definições, materiais empregados, propriedades relevantes e ensaios de caracterização da pasta auto-nivelante.

Já o capítulo 3 também se refere a uma revisão bibliográfica, porém sob o tema da reologia: conceitos, parâmetros, classificação dos comportamentos reológicos, importância da reologia nas argamassas auto-adensáveis e os fatores que influenciam o comportamento reológico.

O capítulo 4 detalha o programa experimental desenvolvido para essa pesquisa onde mostra a descrição da metodologia desenvolvida em laboratório, caracterização de todos os materiais e procedimentos utilizados e estudos desenvolvidos para o novo equipamento chamado de Cilindro Espanhol, utilizado nos ensaios de caracterização da pasta auto-nivelante.

Capítulo 5 descreve a apresentação dos resultados obtidos, buscando determinar parâmetros necessários para o cumprimento dos objetivos definidos.

O capítulo 6 traz as conclusões obtidas no decorrer do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Do texto constam ainda as referências bibliográficas e os anexos com dados complementares da pesquisa experimental.

CAPÍTULO 2

ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE

Neste capítulo são abordados os principais aspectos da literatura sobre conceitos relacionados à argamassa auto-nivelante, incluindo definições, vantagens, materiais constituintes, propriedades e ensaios.

A argamassa auto-nivelante é proveniente da argamassa auto-adensável, com a diferença que a argamassa auto-nivelante obrigatoriamente deve ser constituída de uma superfície horizontalmente nivelada. Como a argamassa auto-nivelante ainda é um assunto pouco discutido entre estudiosos e pesquisadores da área, esse trabalho baseou-se em conceitos dos materiais auto-adensáveis, já conhecidos, para que posteriormente se iniciasse estudos do comportamento da argamassa auto-nivelante propriamente dita.

A aplicação desse novo tipo de material, a princípio, está voltada a pisos e contrapisos, já que esses sistemas ainda possuem certa carência com relação à qualidade de execução e escolha dos materiais apropriados.

2.1. DEFINIÇÃO

Entende-se por argamassa auto-nivelante uma argamassa capaz de preencher os espaços vazios e se auto-adensar apenas sobre o efeito da gravidade e de sua própria capacidade de fluxo, sendo caracterizada pela grande capacidade de fluir e se adensar, sem segregar. Essa capacidade é obtida com o equilíbrio entre alta fluidez com grande mobilidade e moderada viscosidade e coesão entre as partículas que constituem a mistura (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Alta fluidez da argamassa auto-nivelante

A argamassa auto-nivelante é uma argamassa auto-adensável, porém com características específicas ao apresentar sua superfície lisa e regular, aceitando um desnível de 1 mm a cada 4m de comprimento do elemento estrutural.

Sob o ponto de vista reológico define-se argamassa auto-nivelante como uma suspensão de partículas, ou seja, mistura do tipo sólido/líquido na qual as partículas se distribuem de forma relativa e uniforme através do meio líquido. A argamassa auto-nivelante é formada por agregado miúdo e pela pasta cimentícia. Essa pasta cimentícia está representada na Figura 2.2, que demonstra sua composição.

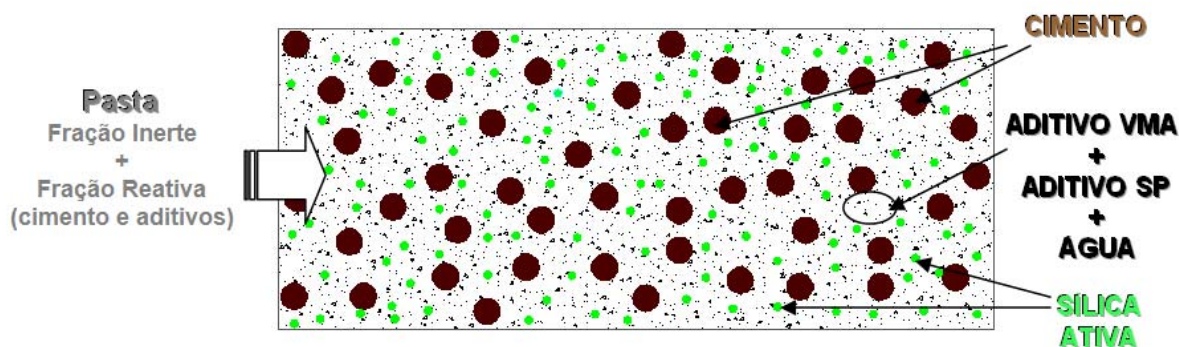


Figura 2.2 – Microestrutura da pasta auto-nivelante

Há uma influência na concentração de sólidos sobre o desempenho reológico da argamassa e/ou pastas, pois se tratam de misturas granulares suspensas em água (COSTA, 2007). Essa aglomeração das partículas do cimento ocorre antes da mistura com a água, pelo fato de que o cimento já recebe influências da própria umidade do ar, sendo que a adição de água de amassamento e outros aglomerantes tendem a formação de uma camada líquida na superfície das partículas. Com o acréscimo gradativo de água na mistura, começa a aumentar o número de partículas envolvidas por essa camada e somente quando o teor de água for suficiente para recobrir a superfície das partículas e preencher os espaços vazios, o teor crítico de água é atingido. Somente com a ocorrência desse fenômeno é que começa a ocorrer a redução da viscosidade da suspensão (PILEGGI, 2001; YOSHIOKA et. al. 2002 apud COSTA, 2007)

A fluidez apresentada pela argamassa auto-nivelante decorre pelo elevado afastamento entre partículas maiores, diminuindo o contato entre elas. Esse comportamento torna-se possível com a utilização de um elevado teor de finos que é utilizado na composição para conseguir tal efeito. Alguns problemas práticos podem ocorrer devido a esse elevado teor de finos, e a elevada fluidez como, por exemplo, a dificuldade de controlar o tempo de pega, a tendência a segregação, controle de retração de secagem e a dificuldade da saída de água (PILEGGI, 1996).

O procedimento de dosagem para a argamassa auto-nivelante ainda é um desafio na área técnica e acadêmica, porém algumas exigências propostas por PILEGGI (1996) devem ser observadas.

1. Distribuição Granulométrica: As argamassas no estado fresco são suspensões reativas de partículas sendo que sua quantidade e tamanho influenciam diretamente as propriedades reológicas. A grande quantidade de finos representada pelas partículas do cimento, adições (sílica ativa, filler calcário etc.) e fração graúda (agregados) deve ser analisada com cautela, já que esse grupo de partículas tem comportamentos distintos e que afetam diretamente as propriedades reológicas das argamassas.
2. Utilização de Agentes Dispersantes: Os dois grupos de partículas se distinguem por forças de naturezas distintas, sendo elas: forças de superfície, que se aplicam às partículas pequenas (sub-micrométricas e/ou micrométricas) com área superficial específica elevada, e forças mássicas, que se aplicam a partículas graúdas (milimétricas) com área superficial específica pequena.
3. Condições de Mistura: A matriz é composta de partículas finas, aglomerantes, adições minerais, água e aditivos, sendo ela de grande importância, já que ela influencia diretamente o fluxo da mistura. Matriz em excesso conseqüentemente terá uma viscosidade alta dificultando o fluxo da mistura, já a matriz em quantidades menores além de ser muito fluida, possibilitará o choque entre agregados, com baixa tensão de escoamento, dificultando sua utilização, dependendo da sua finalidade.

2.2. MATERIAIS EMPREGADOS PARA O ESTUDO DA PASTA VISANDO A ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE

2.2.1. Seleção dos Materiais

Neste item abordam-se as principais características que os materiais constituintes da pasta auto-nivelante, visando futuros trabalhos sobre a argamassa auto-nivelante, devem possuir para serem adequados na sua produção. Ainda que a pasta auto-nivelante não requeira materiais especiais ou incomuns, esta exige o uso de materiais com algumas propriedades específicas em certos aspectos e que se não forem selecionadas criteriosamente podem ocasionar problemas ao produto final (AITCIN, 2000).

2.2.1.1. Cimento Portland

O Cimento Portland é definido como um material pulverulento, aglomerante hidráulico, composto por silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que em contato com a água hidrata-se e depois de endurecido não se decompõe, nem com nova presença de água (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Na confecção da pasta auto-nivelante não existe um cimento específico a ser utilizado, porém o cimento Portland por ser facilmente produzido e comercializado no Brasil, geralmente é o mais empregado.

Dentre as principais características que o cimento deve apresentar na produção de argamassas auto-nivelante, deve-se destacar sua finura e sua capacidade de adsorver o aditivo superplastificante, já que essa adsorção ocorre preferencialmente nos aluminatos (C_3A – Aluminato de Tricálcico e C_4AF – Ferroaluminato tetracálcico) (AITCIN, 2000; NEVILLE, 1997).

A EFNARC (2002) determina limites para o consumo do cimento, sendo o máximo 500 kg/m^3 de cimento para controlar a retração e mínimo de 300 kg/m^3 . A substituição de uma porcentagem de cimento por algum tipo de adição mineral em sua composição pode ser a solução para evitar ou diminuir problemas ocasionados pelo cimento.

2.2.1.2. Aditivo Químico

A procura por concretos e argamassas cada vez mais resistentes, trabalháveis e a grande exigência em relação ao custo, trouxe ao mercado da construção civil, o desenvolvimento dos aditivos. Inicialmente desenvolvidos no Japão e na Alemanha no início da década de 60, hoje são empregados em larga escala em obras de construção civil em todo o mundo (GRAEFF e FILHO, 2002).

De acordo com o ACI 212.3R (1996), os aditivos, são produtos químicos utilizados em argamassas e concretos, com a finalidade de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou endurecido, tornando-os mais adequado em termos de trabalho, manuseio, custo entre outros (MELO, 2005).

O comportamento dos aditivos se deve a inúmeras variáveis, como sua natureza e quantidade empregada, composição e superfície específica do cimento, natureza e proporcionalidade dos agregados, compatibilidade entre materiais e adições, relação água/cimento, condições de cura, entre diversos outros (MAILVAGANAM, 1999).

Para o estudo da pasta auto-nivelante, é indispensável o uso de aditivos, que visa obter características reológicas desejadas. Deve ser aplicado o aditivo superplastificante para garantir uma fluidez adequada e reduzir a tensão de escoamento e o aditivo promotor de viscosidade para auxiliar na estabilidade da mistura.

Podem-se destacar os superplastificantes, que são indispensáveis para garantir as principais características no seu estado fresco, sendo ele responsável pela alta fluidez da mistura devido a sua capacidade de redução de água (RONCERO, 2002).

Utilizam-se também em alguns casos, aceleradores de pega, aditivos modificador de viscosidade, incorporadores de ar, retardador de pega entre outros, conforme a necessidade da mistura (MELO, 2005).

A seguir serão apresentados os aditivos superplastificante e modificador de viscosidade utilizados nessa pesquisa para a confecção da pasta auto-nivelante.

2.2.1.3. Aditivo Superplastificante (SP)

Desde sua descoberta na América do Norte no ano de 1974, o aditivo superplastificante (SP) torna-se parte integrante de concretos e argamassas de alta resistência. Atualmente o consumo de SP chega a 500 milhões de litros, nos quais 75% são de aditivo SP a base de naftaleno sulfonato (LEIDHODT, 2000 *et al.*).

Já no Brasil, segundo dois dos fabricantes (GRACE e DEGUSA- Comunicação verbal 2002) o consumo desses aditivos foi de aproximadamente 67 toneladas no ano de 2000, quando efetivamente tais produtos começaram a ser empregados (HARTMANN, 2002). Os aditivos mais utilizados são geralmente à base de lignossulfonato, melamina sulfonato, naftaleno sulfonato e policarboxilatos (MONTE, 2003).

O uso desses aditivos em conjunto tende a garantir elevada fluidez e estabilidade adequada às misturas, evitando a segregação ou a exsudação, efeitos indesejados que podem decorrer da dosagem errônea desses aditivos (BARTOS et.al., 1999).

A finalidade dos aditivos superplastificantes, segundo alguns autores, está descrita abaixo (COLLEPARDI *et. al.*, 1999; DE LARRARD, 1999; TATTERSALL, 1991):

- ↳ Redução do consumo de água para uma mesma consistência, conseqüentemente aumentando a resistência e a durabilidade de concretos e argamassas;
- ↳ Aumento da fluidez da mistura sem modificar a quantidade de água;
- ↳ Redução no consumo de cimento, mantendo a consistência e a resistência à compressão com o objetivo de reduzir custos e ainda reduzir a retração, fluência e tensões térmicas.

Geralmente à base de lignossulfonato, os aditivos plastificantes convencionais promovem uma redução da quantidade de água de amassamento de até 15% (RIXON et. al., 1999). A quantidade de redução de água de amassamento é a principal diferença entre os aditivos plastificantes e os aditivos superplastificantes, pois os superplastificantes podem reduzir essa água de amassamento em até 30% (VERHASSELT e PAIRON, 1989).

Desde o início da década de 90, pesquisas vêm sendo desenvolvidas no Japão, dando início a uma grande inovação da tecnologia dos dispersantes de cimento, definida pelo advento de aditivos SP a base de policarboxilatos (HARTMANN, 2002). No Brasil, o aditivo SP ainda é considerado um material novo e com preço elevado.

O SP à base de policarboxilato atua de forma mais completa nas partículas de cimento. Somado à ação eletrostática conseguida pelo carregamento nas partículas de cimento de cargas de mesmo sinal, o policarboxilato possui longas cadeias laterais (“side chains”), responsáveis pelo chamado efeito estérico. Essas longas cadeias laterais é que são responsáveis pela redução de água acima de 40% (www.basf.com.br/aditivos consultado em 12/06/08).

A estrutura química do policarboxilato pode ser visualizada pela Figura 2.3:

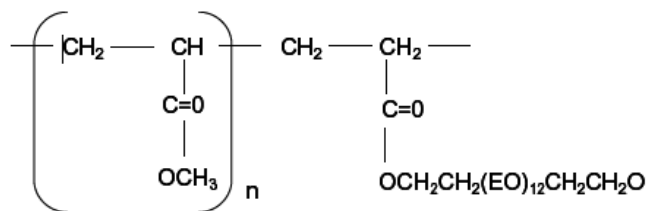


Figura 2.3 – Monômero de um policarboxilato

Fonte: RAMACHANDRAN (1998)

A ação química dos superplastificantes em geral consiste em três fases:

- ↪ Adsorção superficial;
- ↪ Carga eletrostática sobre a partícula de cimento;
- ↪ Dispersão.

O aditivo envolve um sistema de partículas carregando-o com cargas de mesmo sinal. Por efeito da repulsão eletrostática, o SP vai dispersar as partículas de cimento, fazendo com que se necessite de menos água para se atingir uma mesma trabalhabilidade. Esse fenômeno pode ser mais bem visualizado pela Figura 2.4.

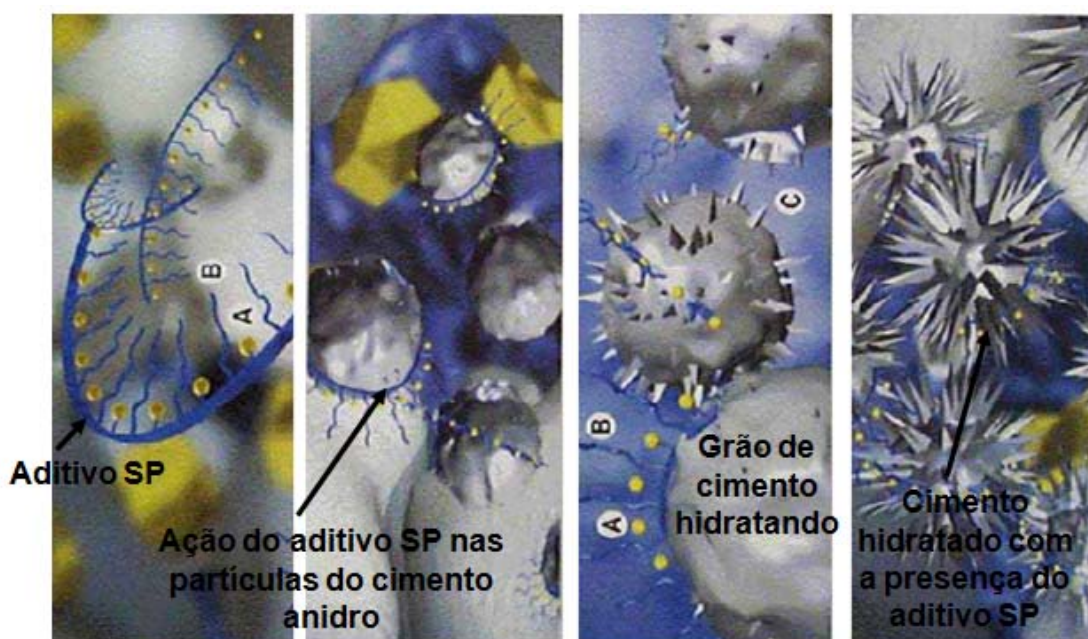


Figura 2.4 – Ação das moléculas do aditivo superplastificante SP nas partículas do cimento

Fonte: www.basf.com.br (2008)

As partículas de cimento apresentam forte tendência à floculação devido à indução de forças de Van der Waals (forças eletrostáticas entre as regiões com cargas opostas, resultante da fabricação do cimento) entre as mesmas (AITCIN, 1994). A floculação causa alterações na mistura como, por exemplo, o aumento da viscosidade da pasta, redução da fluidez e também absorve parte da água disponível para a fluidificação da mistura e hidratação das partículas do cimento (MONTE, 2003). A Figura 2.5 ilustra a interação entre as partículas de cimento.

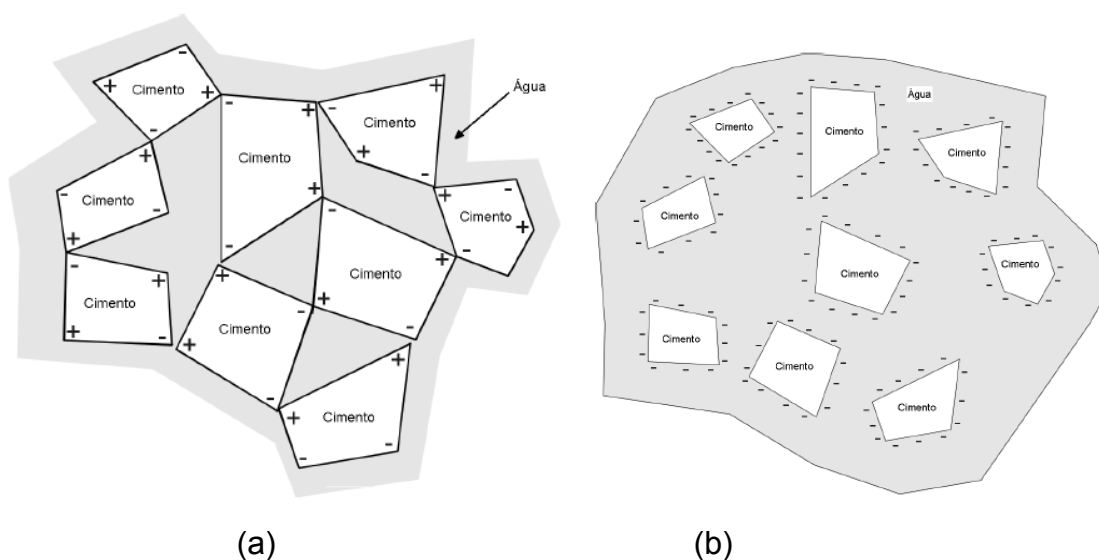


Figura 2.5 – Floculação entre as partículas do cimento, devido as forças de Van der Waals
 (a). Defloculação das partículas do cimento, devida a ação das moléculas de aditivo adsorvidas (b)

Fonte: MONTE *apud* AITCIN (1994)

Os aditivos SP a base de policarboxilatos além de agirem por repulsão eletrostática agem também na forma de repulsão estérica, que é produzida pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero, e conseqüentemente produz forte efeito dispersante, pois o impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas de aditivos cria uma capa de adsorção de grande volume impedindo a aproximação das partículas de cimento (GETTU et.al., 1998).

Outra influência física pode ser descrita com a formação de uma camada protetora ao redor das partículas de cimento, que impedem sua floculação e ainda altera a tensão superficial da água (HARTMANN, 2002).

Em determinadas situações a ação do aditivo nas partículas de cimento ocorre um comportamento inesperado e indesejado entre cimento e aditivo, esse fenômeno é conhecido como incompatibilidade entre cimento-aditivo. Esse fenômeno é influenciado por alguns fatores como, por exemplo, a variedade de SP que existem atualmente no mercado com diferentes composições químicas, ou então, os diversos tipos de cimentos que também apresentam diferentes composições mineralógicas, ou ainda, a utilização cada vez mais freqüente das adições (cinza de casca de arroz, sílica ativa, pozolanas, escórias entre outras) (AITCIN, et. al, 1994).

A discussão no meio técnico ainda é grande sobre a quantidade de aditivo que deve ser adicionado à concretos/argamassas/pastas, porém ainda há um consenso quanto á necessidade de uma metodologia confiável que permita o correto teor desse material. O uso em excesso do aditivo SP pode resultar em efeitos indesejados como, por exemplo, a segregação entre partículas (MONTE, 2003).

2.2.1.4. Aditivo Modificador de Viscosidade (VMA)

Na confecção da argamassa auto-nivelante outro aditivo de grande importância é o modificador de viscosidade - *viscosity modify admixture* (VMA), pois ele pode ser empregado quando o teor de finos for limitado, ajudando a promover a viscosidade adequada garantindo assim a resistência à segregação, homogeneidade da mistura e diminui a exsudação (MELO, 2005).

O aditivo promotor de viscosidade é formado por cadeias longas de base celulose, polissacarídea, acrílico ou glicol e outros agentes inorgânicos (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999).

Segundo a EFNARC (2005), o VMA também pode ser usado para ajudar a reduzir a segregação e a sensibilidade da mistura devida á variação de outros componentes, principalmente sobre a parcela de umidade. Desta maneira, o VMA atua na água da mistura promovendo uma viscosidade moderada por meio de uma formação de rede, que detém a água e que mantêm as partículas finas da mistura

suspensas, fornecendo maior coesão, conseqüentemente evitando a ocorrência de segregação e exsudação, conforme demonstrada na Figura 2.6.

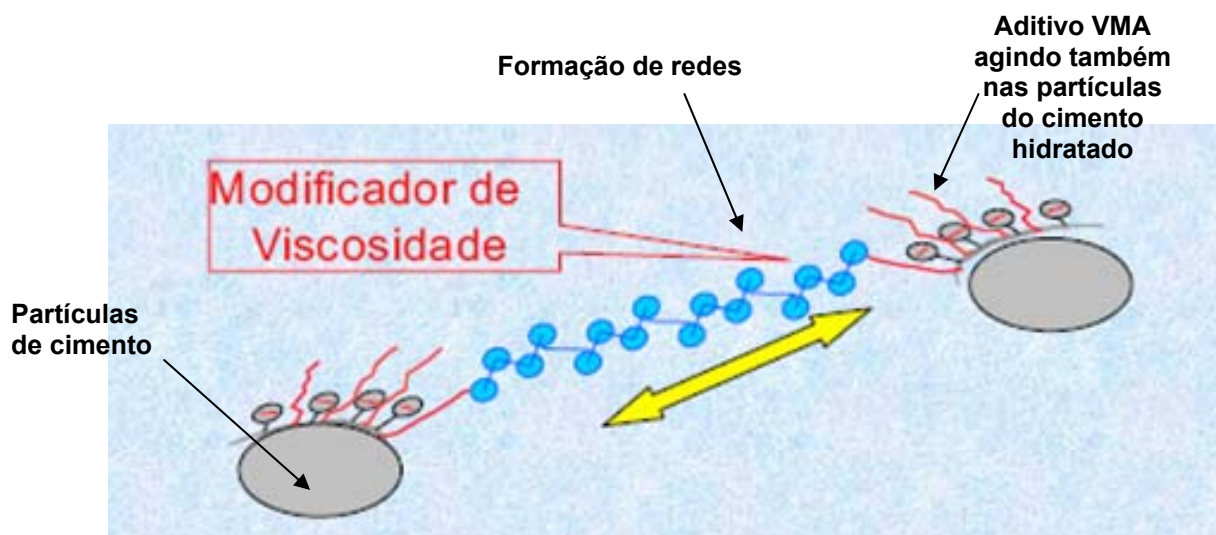


Figura 2.6 – Ação do aditivo VMA na mistura

Fonte: www.basf.com.br (2008)

Outra maneira de funcionamento do aditivo na mistura ocorre quando as partículas de cimento absorvem o VMA, ou seja, com a superfície do grão de cimento completamente saturada do aditivo, não ocorre uma adsorção adequada do aditivo redutor de água, fazendo com que a mistura torne-se coesa e menos fluida (RIXON e MAILVAGANAM, 1999).

A utilização desse aditivo pode gerar em concretos e argamassas um comportamento pseudoplástico, ou seja, redução da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento aplicada. Como a argamassa auto-nivelante trata-se de um material fluido, com uma alta taxa de cisalhamento, a viscosidade diminui, facilitando a execução. Sendo assim, após a aplicação da argamassa fluida, a viscosidade tende a aumentar e garante a capacidade de reter água e manter a sustentabilidade das partículas (MELO, 2005).

Algumas vantagens são observadas com a utilização do aditivo modificador de viscosidade, sendo elas:

- ↳ Flexibilidade na escolha de materiais e procedimentos de lançamentos;
- ↳ Obtenção de níveis de fluidez que fazem com que o concreto seja capaz de vencer grandes distâncias horizontais;

- ↳ Melhoria da homogeneidade na mistura;
- ↳ Permanência da coesão durante queda livre.

RIXOM e MAILVAGANAM (1999) citam alguns problemas relacionados a utilização desse aditivo como a incorporação de ar, devido a sua capacidade de redução da tensão superficial da água da mistura, e a incompatibilidade com certos aditivos plastificantes, justificada pela capacidade de adsorção de partículas de cimento. Já para REPETTE (2005) o problema está na retração por secagem quando o VMA é utilizado em doses elevadas.

2.2.1.5. Adições Minerais

Segundo METHA e MONTEIRO (2008), as adições minerais são materiais silicosos finamente moídos, que são adicionados aos concretos e argamassas em grandes quantidades que variam de 20% a 70% por massa de material cimentício total. Usinas de energia elétrica e alto-fornos metalúrgicos são as principais fontes desses subprodutos que são produzidos em larga escala.

As adições podem ser classificadas de acordo com sua reatividade, ou seja, as inertes e as reativas. As inertes promovem uma ação física, aumentando a compacidade da mistura. Essas adições são representadas pelos fílers calcário, quartzo moído, entre outros. Já as adições reativas contribuem para a formação de hidratos sendo empregadas em substituição ao cimento em teores de até 30%, e são exemplificadas pela cinza volante, cinza de casca de arroz, metacaulim, escória de alto forno e o fumo de sílica (microsílica). Geralmente as adições inertes e reativas podem ser utilizadas em conjunto (METHA e MONTEIRO 2008).

A substituição de parte do cimento pelas adições minerais contribui para a obtenção das condições mais favoráveis de fluidez da mistura e também para a formação do esqueleto granular, de modo a favorecer as propriedades mecânicas para argamassas auto-nivelantes (ALCANTARA, *et. al.*, 2004).

Segundo KECK (2001), durante o processo de hidratação do cimento, os compostos C_3S e C_2S formam silicatos de cálcio hidratados, C-S-H, e também, o hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, sendo este composto solúvel em água, podendo evaporar da mistura, deixando vazios na pasta aumentando a permeabilidade do concreto. Desta forma, o efeito químico das adições minerais beneficia concretos e

argamassas, sendo que ele diminui a quantidade de Ca(OH)_2 livre, já que a sílica e alumina presentes nas adições minerais reagem com esses compostos, fazendo com que diminua sua quantidade, formando C-S-H através das reação pozolânica (ACI, 1996).

Uma das desvantagens da utilização destes materiais é a possibilidade de ocorrer retardo de pega e aumento de retração, ou seja, a utilização de grandes quantidades de finos pode levar ao desenvolvimento de um alto calor de hidratação ocorrendo o surgimento de fissuras. (MALHOTRA, 1987; POPPE e SCHUTTER, 2003).

No item seguinte serão apresentadas algumas características e comportamentos, referente à sílica ativa, sendo essa a adição mineral utilizada no programa experimental desta pesquisa.

2.2.1.6. Sílica Ativa

Existem várias denominações para esse material, como por exemplo, fumo de sílica condensada, sílica volatilizada, sílica ativa, fumo de sílica, porém segundo a norma NBR 13956 (1997) estabeleceu-se como sílica ativa a denominação padrão desse rejeito no Brasil.

As primeiras investigações sobre a utilização da sílica ativa foram realizadas na Noruega, na década de 60, já no Brasil só em 1984 é que a sílica ativa começou a ser debatida nos eventos e congressos técnicos (DAL MOLIN, 1995).

A sílica ativa é uma pozolana, de elevada área específica, vítrea, constituída predominantemente de silício. Trata-se de um subproduto desse silício ou de ligas de ferro-silício a partir do quartzo de elevada pureza e carvão em forno elétrico de eletrodo de arco submerso. Monóxido de silício gasoso (SiO) se desprende na forma de gás oxida-se e se condensa, formando partículas esféricas muito pequenas de sílica amorfa (SiO_2) que se apresenta com uma colocação que pode variar do cinza claro ao escuro (CARMO, 2006).

DAL MOLIN (1995) cita que a cor da sílica ativa mais clara é resultado da temperatura mais alta na parte superior do forno, fazendo com que a maior parte do carvão ascendente seja queimada. O teor de ferro, em menor escala, tende a também apresentar uma influência na cor desta pozolana.

Segundo NEVILLE (1997), as partículas de sílica ativa são muito pequenas (Figura 2.7), isso pode ser comprovado com o Blaine por adsorção de nitrogênio, que chega a valores como $20.000\text{m}^2/\text{kg}$, ou seja, 13 a 20 vezes maior do que a área específica de outros materiais pozolânicos. Já os grãos da sílica ativa têm seu diâmetro entre $0,03\mu\text{m}$ e $0,3\mu\text{m}$, e sua massa unitária muito baixa, variantes entre $200\text{kg}/\text{m}^3$ a $300\text{kg}/\text{m}^3$, dificultando até mesmo seu manuseio.

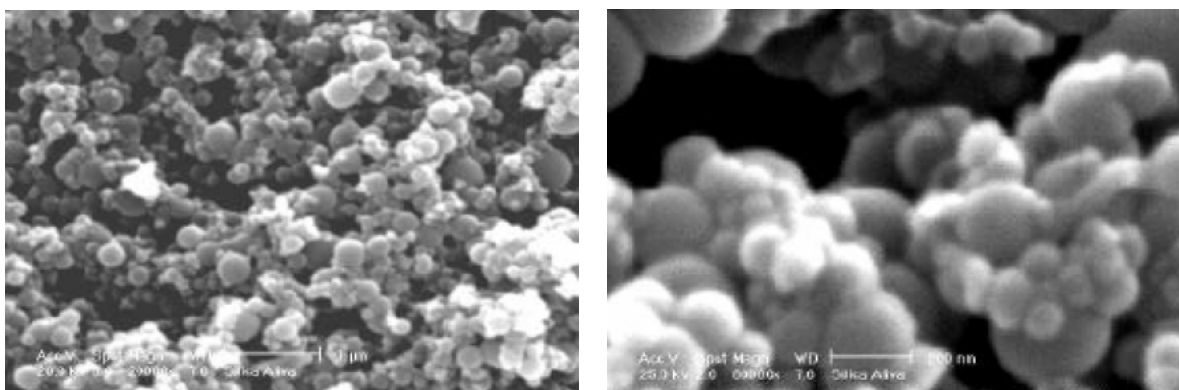


Figura 2.7 – Micrografia da Sílica Ativa

Fonte: KULAKOWSKI (2002)

Existem dois tipos de efeitos que ocorrem com a sílica ativa, sendo eles: química e a física. A reação química, também conhecida como reação pozolânica, ocorre quando a sílica é colocada em contato com concretos e argamassas no estado fresco reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH) para produzir uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), fonte de resistência do concreto. Essa reação causa a obstrução dos poros, que conseqüentemente reduz a permeabilidade (CARNEIRO, et. al., 2004).

Ainda segundo CARNEIRO, et. al. (2004) o efeito fíler, que preenche os vazios criados pela água livre na matriz, causando um melhor empacotamento. Porém como a sílica é muito mais fina que o cimento, acaba causando problemas na plasticidade e aumenta o consumo de água do concreto e argamassas, principalmente para altos teores de substituição, necessitando-se de maiores quantidades de aditivos superplastificantes.

Deste modo, os grãos finos e esféricos da sílica ativa produzem um mecanismo físico responsável pela redução de exsudação, já que os canais de

fluxos da água são bloqueados, gerando um melhor empacotamento das partículas finas na superfície dos agregados. A formação de grandes cristais de hidróxido de cálcio devido a vários pontos de nucleação também é minimizada. Esses efeitos em conjunto proporcionam uma evolução na microestrutura dos materiais cimentícios, melhorando as características da zona de transição pasta-agregado, tornando essa pasta mais densa, conseqüentemente diminuindo a permeabilidade (SILVA, 2006).

Alguns dos efeitos da sílica ativa nas propriedades de concretos e argamassas no estado fresco foram citados por MELO (2005):

- ↳ Maior coesão, proporcionando misturas mais estáveis;
- ↳ Aumento da fluidez do concreto e argamassas, sem exsudação, devido a redução no tamanho das partículas;
- ↳ Aumento na quantidade de água;
- ↳ Diminuição da retração plástica;
- ↳ Redução no calor de hidratação, juntamente com o aumento das resistências a compressão, tendo em vista a maior densificação da matriz do cimento.

2.3. PROPRIEDADES DA PASTA NO ESTADO FRESCO

Algumas propriedades da argamassa auto-nivelante no estado fresco, devem ser analisadas para uma garantia de qualidade no estado endurecido, porém, algumas delas são eleitas como as fundamentais para definir ou caracterizar a auto-adsensabilidade dessa argamassa.

As propriedades que se destacam para a argamassa auto-nivelante no estado fresco são:

- ↳ **Consistência:** A capacidade de preencher completamente todos os espaços em que foi lançado, apenas sob a ação do peso próprio, sendo que a nata se espalhará sob o substrato formando uma superfície plana adequada à finalidade da camada de regularização e até de acabamento.
- ↳ **Resistência à Segregação:** Argamassas com elevada fluidez tendem a apresentar segregação, devido à flutuação das partículas maiores. Evitar segregação é manter a mistura sempre homogênea sem essa dissolução de partículas.

Segundo EFNARC (2002), para que um material auto-adensável tenha um ótimo desempenho, uma complexa combinação de propriedades como fluidez, coesão, trabalhabilidade, compatibilidade entre cimento-aditivos e viscosidade deverão ser trabalhadas harmonicamente.

A coesão e a viscosidade da argamassa auto-nivelante são características essenciais para evitar a segregação e a exsudação da mistura. A resistência de segregação é alcançada reduzindo a relação a/ms , ou até mesmo uma combinação entre a utilização de um aditivo superplastificante com uma grande quantidade de materiais finos, de forma que a relação a/ms seja suficientemente viscosa para manter homogênea a pasta com os agregados (DE LARRARD, 1999).

A viscosidade também é um fator que requer certo controle, já que uma argamassa muito viscosa corre o risco de não conseguir passar pelos obstáculos, como por exemplo, armaduras malhas, dificultando seu próprio espalhamento. Por outro lado, se a viscosidade for muito baixa a estabilidade da mistura pode ser afetada ocorrendo exsudação e segregação.

Por conta desta complexibilidade na dosagem dos materiais para a confecção da argamassa auto-nivelante, é que essas propriedades devem ser observadas, já que, como já foram citadas anteriormente, estas propriedades no estado fresco irão influenciar diretamente as propriedades no estado endurecido.

2.4. ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA PASTA AUTO-NIVELANTE

A pasta auto-nivelante, é medida em termos de consistência, já que sua fluidez é uma das suas características mais importantes, por isso ela se difere de pastas convencionais com relação aos ensaios para sua caracterização. De acordo com essa diferença apresentada observa-se então que a pasta auto-nivelante não deve ser avaliada a partir de procedimentos de ensaios convencionais, como é o caso do ensaio de mesa de consistência – utilizado para avaliar a viscosidade, já que a pasta para argamassa auto-nivelante possui uma elevada fluidez.

Portanto, tanto para pasta, quanto para a própria argamassa auto-nivelante é necessário aplicar uma metodologia própria para avaliar esse novo tipo de material. Para atender os requisitos de qualidade exigidos à argamassa auto-nivelante é de grande importância avaliar a pasta quanto:

- ↪ Homogeneidade na mistura;
- ↪ Coesão entre as partículas;
- ↪ Fluidez adequada.

Os equipamentos utilizados para a caracterização da pasta no estado fresco são o Cilindro espanhol – ainda não normatizado, e o reômetro/viscosímetro.

2.4.1. Ensaios com Cilindro Espanhol

O equipamento que realiza os ensaios da pasta cimentícia e possibilita a avaliação (mesmo que visual), da tendência da pasta a fluidez e a segregação, foi especificamente desenvolvido para a argamassa auto-nivelante. É importante salientar que esse ensaio ainda não foi normalizado e como qualquer procedimento sem normalização, pode haver divergências quanto às especificações e medidas.

O equipamento Cilindro Espanhol foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores e profissionais da área de argamassas na cidade de Valência na Espanha, com o propósito de avaliar a pasta auto-nivelante no estado fresco e suas características. Como nenhum equipamento específico existe para estudar o comportamento de pastas e argamassas com fluidez elevada, foi necessário desenvolver um novo tipo de equipamento que analisasse essas propriedades desse novo tipo de material.

O ensaio com o Cilindro Espanhol é semelhante ao ensaio com do Cone de Marsh, porém o Cilindro Espanhol além de necessitar de uma quantidade menor de material utilizado no ensaio, também demonstra uma sensibilidade maior na análise das características principais da pasta.

O orifício na superfície inferior do cilindro limitado em 5,0 mm acaba restringindo esse ensaio a pastas auto-nivelantes, já que esse material requer grãos

com pequenos diâmetros e uma com uma fluidez acima de uma argamassa convencional.

Na extremidade de uma das hastes de ferro é acoplado um cilindro com diâmetro da base de 60 mm e altura de 90 mm (volume de 254,34 cm³), que contém um orifício de diâmetro de 5,0 mm em sua superfície inferior, por onde irá escorrer a pasta. Dessa superfície inferior do cilindro até o recipiente completamente nivelado há uma distância de 150 mm conforme demonstra a Figura 2.8.

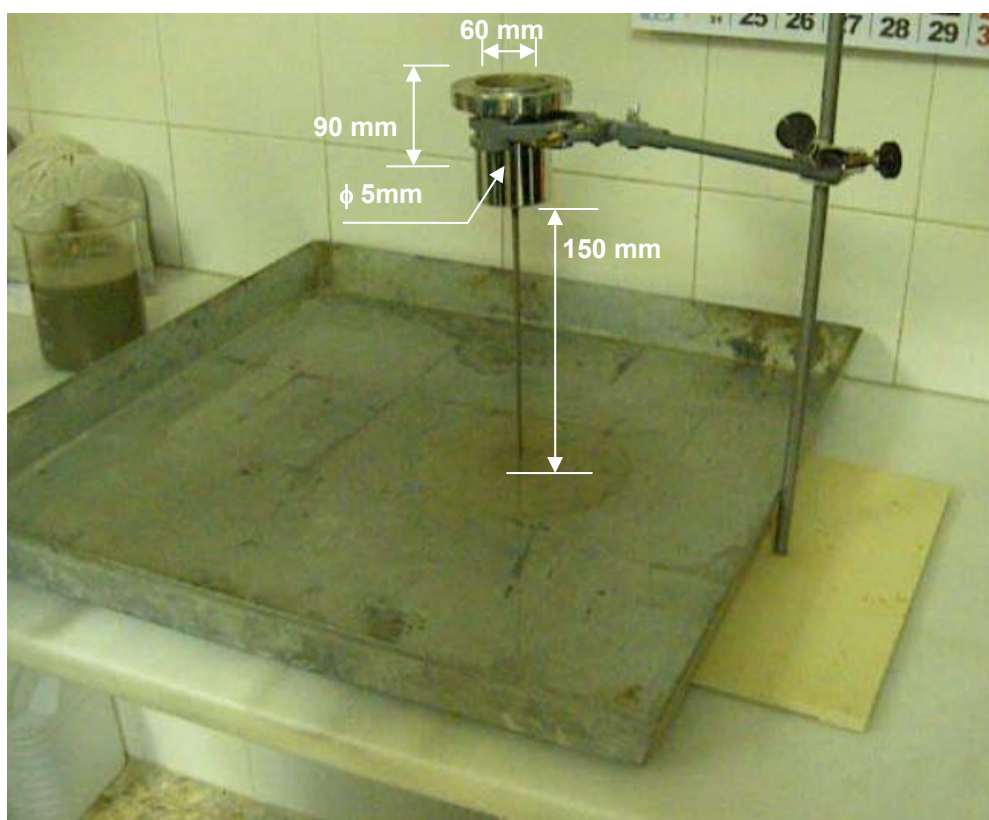


Figura 2.8 – Dimensões do Cilindro Espanhol

Fonte: HOBIMIX (2008)

A Figura 2.9 apresenta o cilindro espanhol na forma de perspectiva, e mostra os detalhes que o equipamento apresenta para os ensaios de pasta para argamassa auto-nivelante.

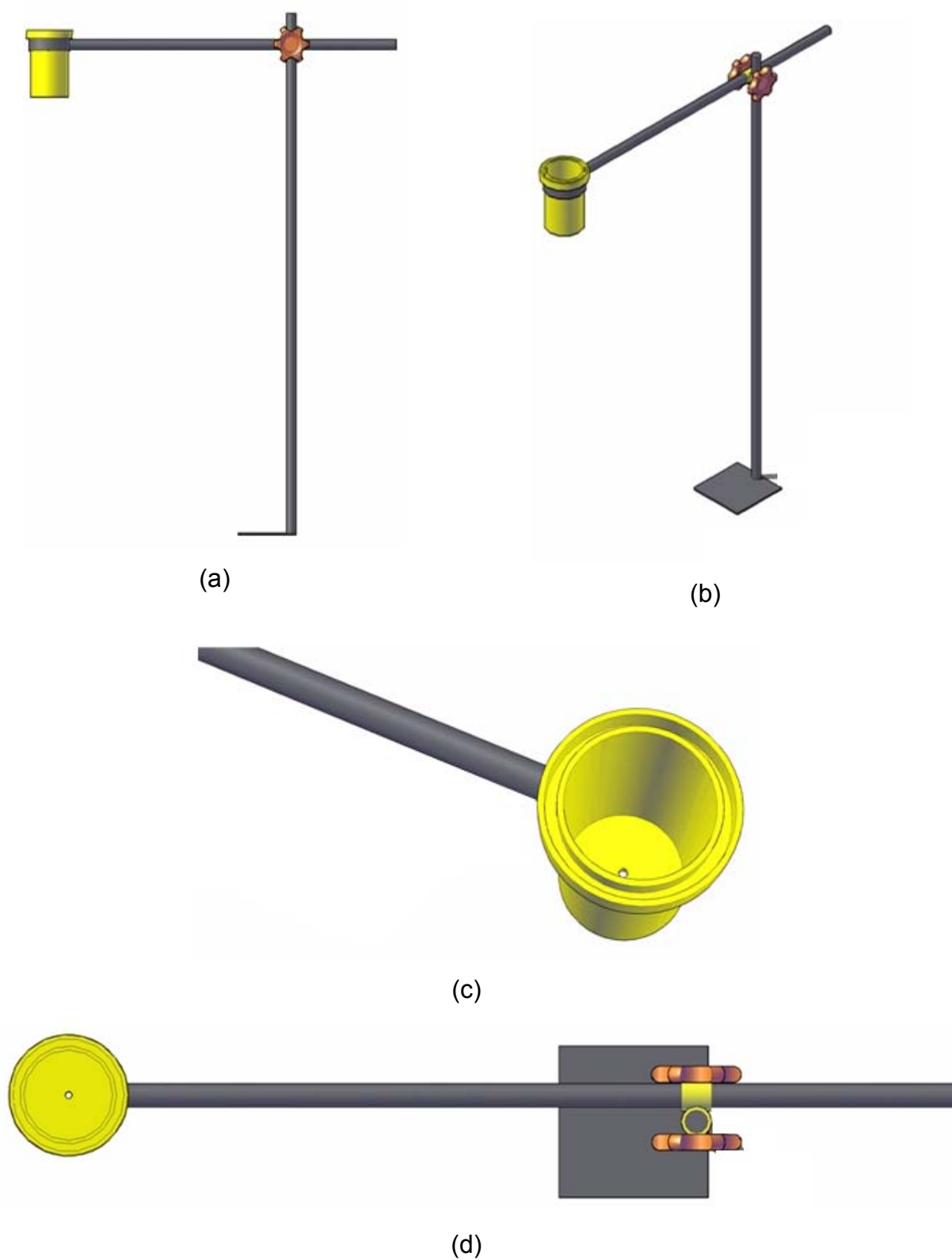


Figura 2.9 – Diagrama esquemático do Cilindro Espanhol reproduzido no Brasil

O procedimento realizado para esse ensaio consiste no preenchimento do cilindro com a amostra de pasta cimentícia e com a ajuda de um cronometro é medido o tempo de escoamento do material. O diâmetro medido em dois sentidos da pasta escoada e o tempo para esse escoamento são os parâmetros a serem analisados.



(a)



(b)

Figura 2.10 – Cilindro Espanhol utilizado nos ensaios com a pasta. Demonstração do equipamento (a); A pasta escoando do copo do cilindro espanhol (b)

A Figura 2.10 (a) mostra o equipamento Cilindro Espanhol, criado na Espanha e reproduzido no Brasil, para os ensaios com a pasta cimentícia, com a finalidade de dar inícios as pesquisas com argamassas auto-nivelante no Brasil. Já a Figura 2.10 (b) mostra como o ensaio se desenvolve, ou seja, a pasta escoando no recipiente nivelando.

O Cilindro Espanhol ainda é um equipamento que está na fase de testes, já que suas dimensões necessitam de estudos mais específicos.

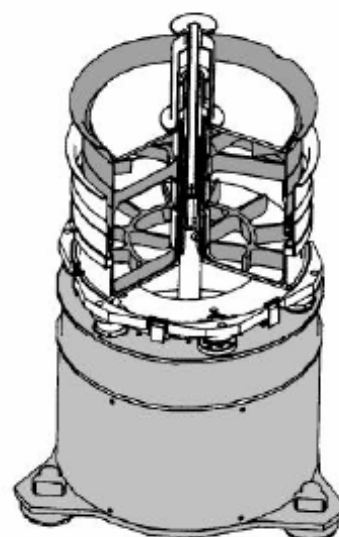
2.4.2. Ensaio com o Viscosímetro

Os reômetros são equipamentos relativamente complexos e com custo bastante elevado, porém, seus resultados mostram-se precisos e sua utilização não é apenas para pesquisas, mais também para estudos práticos, como é o caso de controle de qualidade de certos materiais (DE LARRARD, 1996).

Em 1968, POWERS desenvolveu o primeiro reômetro, modelo cilíndrico coaxial (Figura 2.11) utilizado para caracterização de concretos e argamassas. Após essa invenção uma série de outros modelos foram desenvolvidos, como por exemplo, o “BTRHEOM” desenvolvido por DE LARRARD, com o sistema placa-placa e o “IBB” desenvolvido por BEAUPRÉ, com o sistema planetário (CASTRO, 2007).



(a)



(b)

Figura 2.11 – Modelos de reômetros. Reômetro BML baseado nos conceitos cilindros coaxiais (a); Reômetro BTRHEOM baseado nos conceitos placa/placa (b)

Fonte: BANFILL (2001)

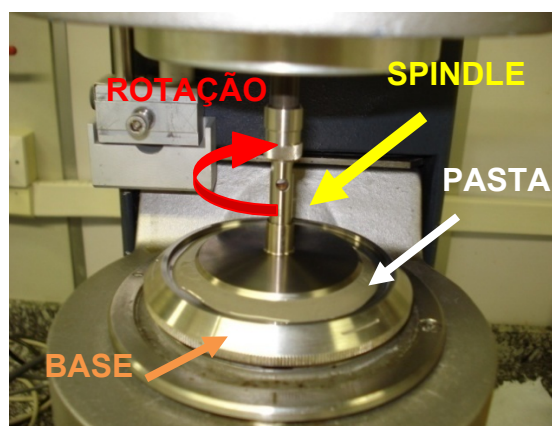
O funcionamento do reômetro cilindro coaxial se inicia quando a amostra é colocada entre dois cilindros concêntricos, medindo-se o torque aplicado no cilindro externo a partir da rotação do cilindro interno. Este ensaio sofre certos problemas, já que é quase inevitável a formação de uma camada lubrificante em torno das paredes dos cilindros, fazendo com que a amostra escorregue, dificultando um real

comportamento do material. Uma solução adotada para resolver esse problema é conferir uma textura rugosa à superfície dos cilindros (SAAK et al., 2001 apud MELO, 2005).

Para pastas e argamassas esse ensaio pode ser substituído por equipamentos com dimensões menores chamados de viscosímetro (MELO, 2005). Para os ensaios com a pasta para argamassas auto-nivelante foi utilizado o viscosímetro placa/placa.



(a)



(b)

Figura 2.12 – Ensaio com o viscosímetro para a análise da reologia da pasta. (a) Equipamento utilizado nos ensaios; (b) Componentes do equipamento

CAPÍTULO 3

CONCEITOS BÁSICOS DA REOLOGIA

Neste capítulo também é apresentado uma revisão da literatura relevante sobre os recentes estudos relacionados à reologia aplicada as argamassas. Os itens abordados são os conceitos sobre reologia, seus parâmetros reológicos (tensão de cisalhamento, deformação e viscosidade), a classificação do comportamento reológico, importância da reologia nas argamassas auto-nivelantes e finaliza com os fatores que influenciam o comportamento reológico.

3.1. CONCEITOS DA REOLOGIA

Apesar do conhecimento da reologia por Newton e Hooke já no século XVII, foi no ano de 1920, quando o comportamento mecânico de materiais industriais, exemplificados pela borracha, o plástico, a cerâmica, tintas e os fluidos biológicos, passaram a ser interessante para a física, mecânica, matemática e a química o estudo da reologia (TANNER, 1988).

No Brasil, os conceitos relacionados à reologia só começaram a ser estudados no ano de 2005, onde vários pesquisadores como CARDOSO, et. al. (2005), COSTA (2005), ANTUNES et. al. (2005) e SILVA (2005), foram apresentados ao SBTA-Simpósio Brasileiro Tecnológico de Argamassas (SILVA, 2006).

De acordo com OLIVEIRA et. al. (2000), a reologia indicada pelos radicais de origem grega *rheos* (fluir) e *logos* (estudos), a reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos materiais quando submetida a uma determinada tensão ou solicitação mecânica externa. Em sólidos e líquidos perfeitos a relação tensão/

deformação o resultante é linear, já no caso dos sólidos elásticos, a deformação é proporcional a carga aplicada.

Na prática, a reologia foca os materiais que tem suas propriedades de escoamento mais complicadas do que as de um fluido simples (líquido ou gás) ou as de um sólido elástico ideal, apesar de ser observado que um material, com comportamento simples sob uma limitada variação da condição do ensaio, poderá mostrar um comportamento mais complexo sob outras condições (TATTERSALL & BANFILL, 1983).

As características da argamassa auto-nivelante são muito influenciadas por suas propriedades reológicas, definidas basicamente pela tensão de escoamento (τ_0) e a viscosidade plástica (η), descritas pelo modelo de Bingham e definida pela Equação 3.1.(BANFILL, 1994).

$$\tau = \tau_0 + \eta * \dot{\gamma}$$

(Equação 3.1.)

Onde:

τ ⇒ Tensão de Cisalhamento (N/m²=Pa);

η ⇒ Viscosidade (Pa.s);

$\dot{\gamma}$ ⇒ Taxa de Cisalhamento (s⁻¹).

Na auto-adensabilidade da argamassa auto-nivelante, a tensão de escoamento deve ser baixa para garantir o aumento da fluidez, já a viscosidade deve ser moderada para que ocorra a estabilidade necessária (GOMES, 2002).

A determinação das propriedades reológicas de pastas, argamassas e concretos são executadas por meio de equipamentos denominados de reômetros e/ou viscosímetros, cujos procedimentos de ensaio serão apresentados nas seções posteriores.

3.2. PARÂMETROS REOLÓGICOS

No caso dos fluidos, a reologia está relacionada à aplicação de uma força que resulta no escoamento. Para o melhor entendimento seguem nos próximos itens os conceitos relacionados à tensão, deformação e viscosidade.

3.2.1. Tensão de Cisalhamento

Quando um fluido está em movimento, várias forças atuam sobre ele, sendo elas as forças de convecção, que surgem devido ao seu movimento, as forças de campo, que são forças relacionadas à ação da gravidade e as forças de superfície que são forças relacionadas aos gradientes de pressão e às interações entre as moléculas do fluido (BRETAS e D'ÁVILA, 2000).

A tensão de cisalhamento é definida pela equação:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \cdot \gamma$$

(Equação 3.2.)

Onde:

F ⇨ Força (N);

A ⇨ Área (m²);

τ ⇨ Tensão de Cisalhamento (N/m²=Pa);

η ⇨ Viscosidade (Pa.s);

γ ⇨ Taxa de Cisalhamento (s⁻¹).

Segundo OLIVEIRA (2000), “de acordo com a Equação 3.2., quanto menor a viscosidade de um fluido, menor é a tensão necessária para submetê-la a uma determinada taxa de cisalhamento constante. Do ponto de vista físico, a viscosidade é, de modo geral, um indicativo de coesão entre as moléculas que constituem as lâminas adjacentes do fluido. Portanto, é de se esperar que as moléculas de fluidos mais viscosos como, por exemplo, o mel sejam mais coesos entre si do que moléculas de fluidos menos viscosos como a água”.

3.2.2. Deformação

A deformação pode ser definida como uma mudança nas posições relativas das partes de um corpo e pode ser dividida em dois tipos: elasticidade ou deformação espontânea reversível e escoamento ou deformação irreversível. Na deformação espontânea reversível ou elasticidade o trabalho empregado em um corpo é recuperado quando esse corpo retorna na sua forma original. Já a deformação irreversível ou escoamento o trabalho empregado na manutenção do escoamento que é dissipado na forma de calor, não é recuperado mecanicamente (VAN WAZER et al., 1966 apud CASTRO, 2007). Sendo assim, chega-se a conclusão de que a elasticidade corresponde à energia mecanicamente recuperada e o escoamento à conversão da energia mecânica em calor.

Ainda segundo VAN WAZER (1966) apud CASTRO (2007) em se tratando da reologia, as propriedades mecânicas de todos os materiais são descritas em termos de contribuição elástica, viscosas e inerciais, sendo que a deformação elástica é usualmente expressa em termos de deformação, definida como uma deformação relativa. Já a deformação viscosa é expressa em termos de taxa de cisalhamento, que corresponde à mudança na velocidade do escoamento com uma distância medida em determinado ângulo em relação à direção do fluxo.

3.2.3. Viscosidade

A viscosidade foi o único parâmetro reológico analisado nessa pesquisa, por isso ela será demonstrada com mais detalhes nesse item do referencial bibliográfico.

O conceito de viscosidade pode ser apresentado como uma propriedade das substâncias que lhe permitem escoar sucessivamente sob a ação de uma constante tensão de cisalhamento (PILEGGI, 1996).

Segundo Newton, a viscosidade pode ser compreendida como a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento de um material, podendo ser vista na própria Equação 3.2, a mesma utilizada para explicar conceito de tensão de cisalhamento. De acordo com essa expressão 3.2 quanto menor a viscosidade de

um fluido, menor a tensão necessária para submetê-la a uma dada taxa de cisalhamento constante.

Ainda segundo PILEGGI (2001), a Figura 3.1 descreve um modelo com duas lâminas paralelas de fluido de área igual a “a”, separada por uma distância “dx”, movimentando-se na mesma direção com velocidades distintas “ V_1 ” e “ V_2 ”, sob a ação de uma força externa “F”, que representa o conceito de viscosidade.

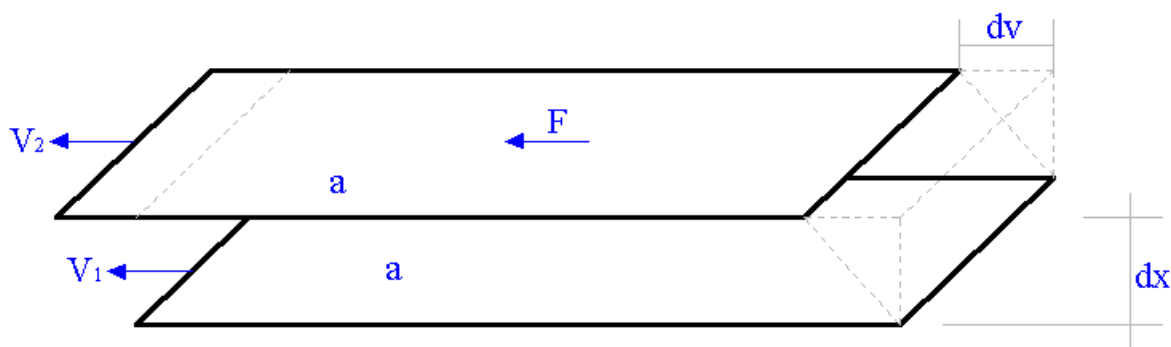


Figura 3.1 – Representação esquemática para definição de viscosidade segundo modelo de Newton

Fonte: PILEGGI (2001)

A viscosidade é definida sob vários ângulos e autores. A disposição de um líquido em resistir ao escoamento resultante do atrito interno provocada pela tensão de cisalhamento, sendo este, um dos conceitos que define a viscosidade. A energia mecânica é dissipada, durante o fluxo viscoso, na forma de calor, e a tensão que se desenvolve depende da taxa de deformação aplicada (COSTA, 2007).

3.3. CLASSIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO

Segundo BRETAS e D'ÁVILA (2000), a caracterização reológica de um material é expressa pela relação entre tensão e a deformação podendo apresentar-se de diferentes formas, sendo elas classificadas em fluidos Newtonianos e fluidos não Newtonianos.

A classificação entre os fluidos Newtonianos e não Newtonianos está na relação existente entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação:

Fluidos Newtonianos: sua viscosidade é constante, seguem a Lei de Newton, podendo ser exemplificados por todos os gases e líquidos não poliméricos e homogêneos.

Fluidos Não-Newtonianos: a relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, sendo que essa relação não é linear.

Os fluidos não-Newtonianos ainda podem ser classificados em: viscoelásticos, dependentes e independentes do tempo, como mostra a Figura 3.2.

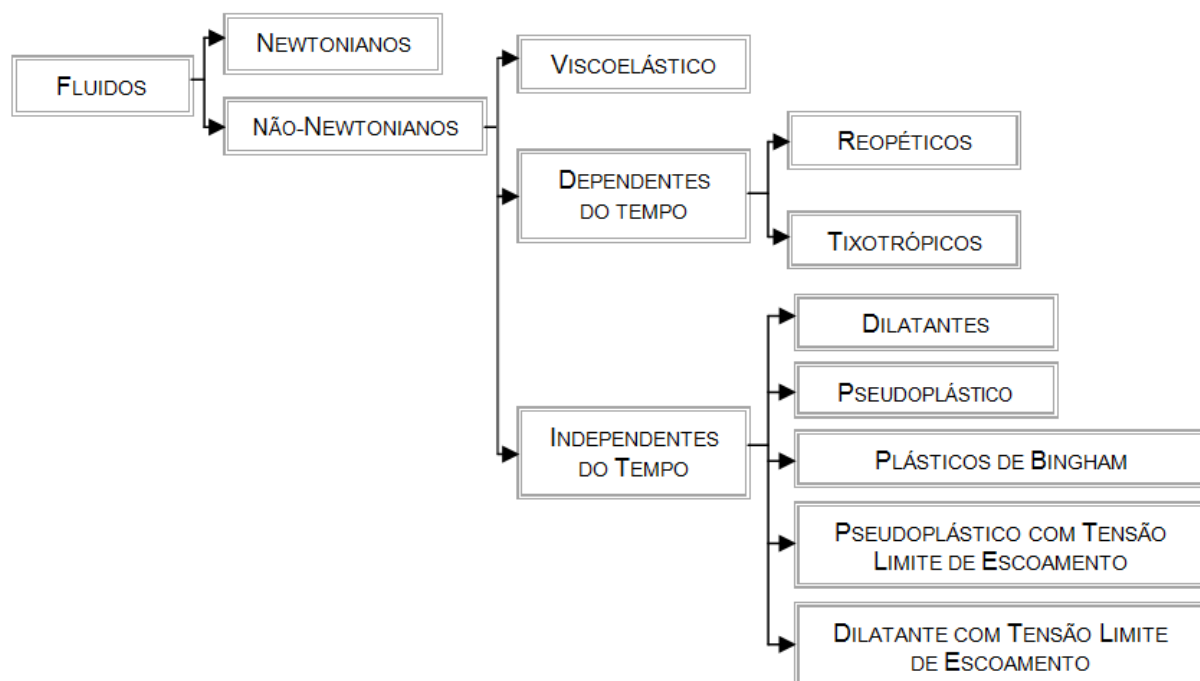


Figura 3.2 - Classificação dos fluidos segundo seu comportamento reológico

De acordo com TANNER (1988); TATTERSALL e BANFILL (1983), os fluidos não-Newtonianos podem ser divididos em:

♣ **Fluidos não dependentes do tempo:** são fluidos em que a taxa de cisalhamento em qualquer ponto é função somente da tensão de cisalhamento naquele ponto, podendo ser divididos em:

- ↪ Fluídos Pseudoplásticos: A viscosidade aparente diminui progressivamente com o aumento da taxa de cisalhamento. Em meio aos fatores que causam esse tipos de comportamento estão às características físicas das partículas, o tipo de interação entre as partículas, a concentração, o peso molecular e a conformação das moléculas do dispersante presente no meio líquido.
- ↪ Fluídos Dilatantes: A curva de escoamento desse material indica um aumento na viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento é específico de suspensões altamente concentradas, ou seja, todos os fatores que contribuem para a redução da distância de separação entre as partículas e que dificultam o deslocamento relativo entre as partículas no meio líquido.
- ↪ Fluídos de Bingham ou Plásticos: Tensão de escoamento deverá ser excedida para permitir algum fluxo. Quando as forças externas são suficientemente fortes para superar as forças de ligação entre as partículas é que a estrutura entra em colapso, ocorrendo uma mudança de posição irreversível, isto é, o sólido modifica-se em um líquido. As argamassas auto-nivelantes podem ser consideradas como fluidos de Bingham.

A Figura 3.3 demonstra o comportamento de fluxo Newtonianos e não Newtonianos.

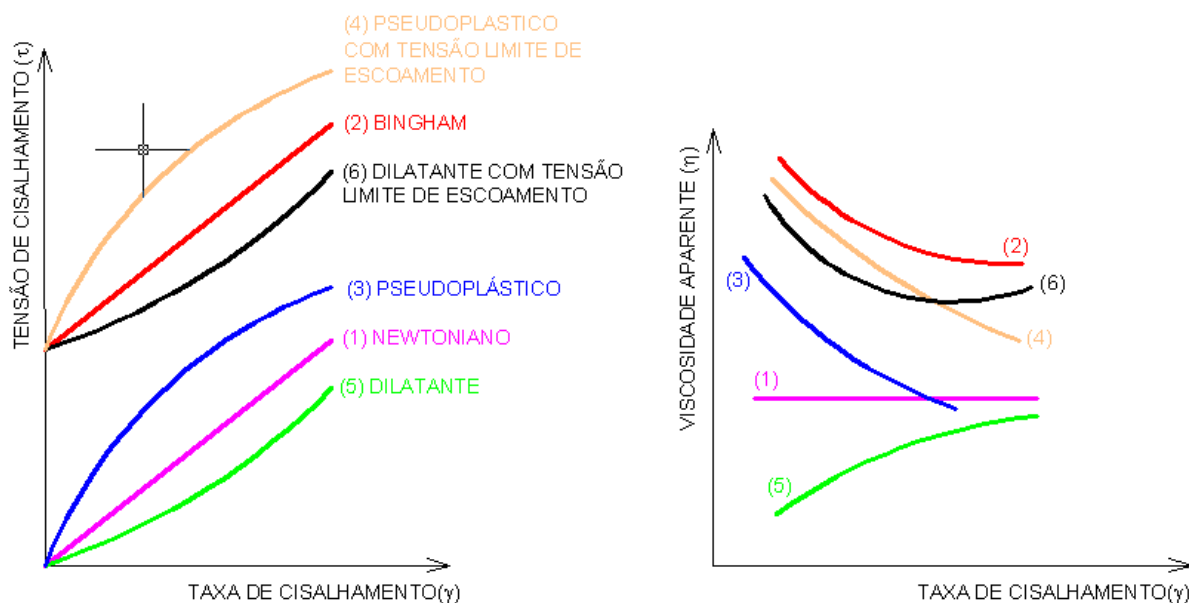


Figura 3.3 - Comportamento básico dos fluxos Newtonianos e não Newtonianos

Fonte: PILEGGI (1996)

♣ **Fluidos dependentes do tempo:** Relação entre a taxa de deformação com a tensão aplicada, porém com o acréscimo do parâmetro tempo em que o fluido é agitado e dividido em:

- ↪ Fluidos Tixotrópicos: Fluidos cuja consistência depende tanto da duração do cisalhamento quanto da taxa de cisalhamento. Sua viscosidade diminui com o tempo sob uma taxa de cisalhamento constante, sendo que se tornam mais fluidos com o aumento do tempo de escoamento sob condições estacionárias.
- ↪ Fluidos Reopéticos: Fluidos que quando há um aumento de viscosidade com o tempo sob uma taxa de cisalhamento constante, ou seja, o material exibe maior resistência ao escoamento com o aumento do tempo de escoamento quando sujeito ao cisalhamento sob condições estacionárias.

Segundo alguns autores, a pasta de cimento apresenta um comportamento próxima a do fluido de Bingham, podendo variar desde um fluido Newtoniano viscoso até um sólido pseudoplástico. O comportamento reológico depende de vários procedimentos de ensaio, como por exemplo, a composição química e a

incorporação de outros elementos à pasta de cimento (RAGO, 1995 et.al.; TATTERSALL, 1978 apud COSTA, 2007).

3.4. IMPORTÂNCIA DA REOLOGIA NAS ARGAMASSAS AUTO-NIVELANTE

Particularmente no caso de argamassa auto-nivelante, entender e dominar a reologia são fundamentais, pois o processo de produção e execução da argamassa auto-nivelante, sendo que, a reologia está diretamente ligada a característica dessa argamassa no estado fresco, como destaca a seguir:

- ↳ As características de aplicação da argamassa auto-nivelante, requerem uma determinada reologia da argamassa, já que ela será aplicada com certa velocidade e altura, que não devem de forma alguma influenciar na perda de qualquer das suas características, tanto no estado fresco, como no estado endurecido. A separação dos grãos (exsudação) também é um fenômeno que não poderá acontecer na hora da aplicação dessa argamassa.
- ↳ A argamassa auto-nivelante deve atingir uma determinada consistência no instante da sua aplicação, de modo que sua viscosidade permita uma deformação apropriada pela ação do seu peso próprio.
- ↳ Outro fator importante é o espalhamento da nata sobre o substrato e a lona plástica, que obrigatoriamente deverá formar uma superfície plana, para receber o acabamento.

Utilizando-se os parâmetros reológicos, é possível caracterizar, mais precisamente, a deformação, viscosidade e a capacidade de escoamento das argamassas, de modo que atenda as condições específicas de aplicação e que resulte em um contrapiso adequado.

3.5. FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO REOLÓGICO

Materiais compostos como argamassas e concretos, que tem como componentes o cimento, agregados e a água podem ser entendidos com uma concentração de partículas sólidas em suspensão como os agregados em um líquido viscoso como a pasta de cimento (CASTRO, 2007).

A pasta de cimento, não pode ser considerada como um líquido homogêneo, sendo composta por partículas como os grãos de cimento e líquido como a água (FERRARIS, 1996 apud CASTRO, 2007). Os parâmetros que influenciam o comportamento reológico de suspensão dependem da concentração de sólidos, ou seja, para baixas concentrações têm-se volumes menor do que 5%, onde se verifica uma frequência relativamente baixa de colisões entre essas partículas, a viscosidade de suspensão é normalmente constante em função da taxa de cisalhamento, e a suspensão comporta-se como um fluido newtoniano (OLIVEIRA et. al., 2000; FERRARIS; DE LARRARD 1998).

Ainda segundo os autores OLIVEIRA et. al. (2000), os principais fatores que afetam a viscosidade de suspensão são a concentração volumétrica de sólidos, características no meio líquido e temperatura, no entanto à medida que se eleva a concentração de sólidos e as partículas passam a interagir entre si, o comportamento reológico de suspensão passa do modelo newtoniano e começa a depender de outras variáveis como as características físicas das partículas (distribuição granulométrica, área específica, densidade etc.) e tipos de interação entre partículas (repulsão e atração).

As argamassas no estado fresco são suspensões reativas de partículas sendo que sua quantidade e tamanho influenciam diretamente as propriedades reológicas. A grande quantidade de finos representada pelas partículas de cimento e adições (sílica ativa, fíler calcário etc.) e fração graúda (agregados), deve ser analisada com cautela, já que esse grupo de partículas tem comportamentos distintos e que afetaram diretamente as propriedades reológicas das argamassas.

Os dois grupos de partículas se distinguem por forças de naturezas distintas, é o caso da: forças de superfície, que se aplicam às partículas pequenas (sub-micrométricas e/ou micrométricas) com área superficial específica elevada, e forças

mássicas, que se aplicam a partículas graúdas (milimétricas) com área superficial específica pequena (PILEGGI, 2001).

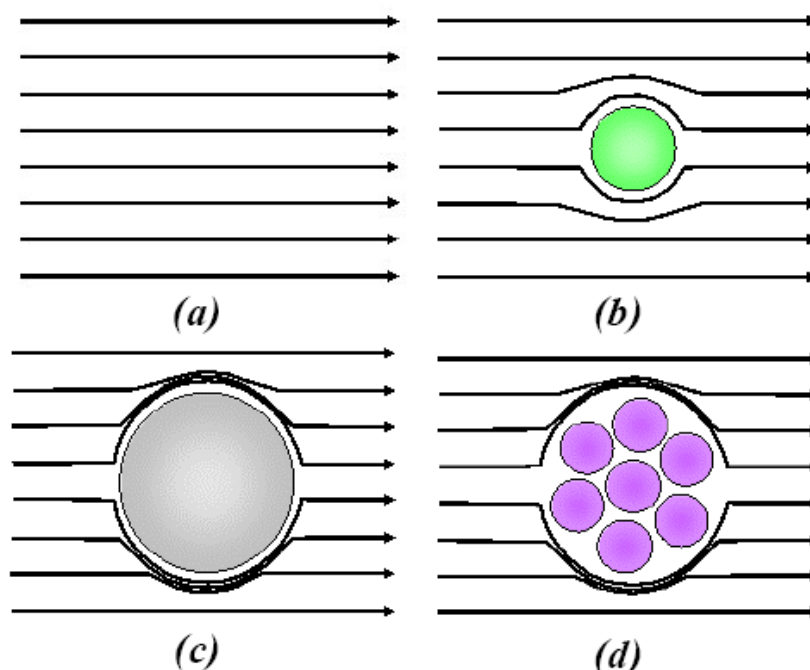


Figura 3.4 – Reprodução esquemática indicando o efeito da perturbação causada pela presença de partículas esféricas sobre as linhas de fluxo de um fluxo submetido ao cisalhamento: (a) linhas de fluxo sem perturbação, (b) perturbação causada por uma partícula com pequeno diâmetro, (c) perturbação causada por uma partícula com grande diâmetro, (d) perturbação causada por um aglomerado de partículas

Fonte: OLIVEIRA et. al apud ANTUNES (2007)

A matriz ou pasta é composta de partículas finas, aglomerantes, adições minerais, água e aditivos, sendo também de grande importância, pois ela influencia diretamente o fluxo da mistura. Matriz em excesso conseqüentemente terá uma viscosidade alta dificultando o fluxo da mistura, já a matriz em quantidades menores além de ser mais fluida, possibilitará o choque entre agregados, com baixa tensão de escoamento, dificultando sua utilização, dependendo da sua finalidade (COSTA, 2007).

A sílica ativa é um aditivo mineral que no caso de argamassas e concretos auto-adensáveis geralmente é incorporada a pasta, isto é, a sílica ativa por possuir partículas muito pequenas, e conseqüentemente, uma área superficial muito alta,

suas partículas são muito reativas quimicamente e adsorvem moléculas de superplastificante, resultando numa tendência da tensão de escoamento e da viscosidade plástica em aumentar.

A substituição de parte do cimento por uma adição mineral pode resultar em mudanças nos parâmetros reológicos de argamassas e concretos, ou seja, quanto mais fina e esférica as partículas dessas adições, maior a redução desses parâmetros (CASTRO, 2007).

A morfologia das partículas, como já mencionado nesse item, também é um fator de grande importância, no comportamento reológico de suspensão das argamassas, ou seja, quanto maior a irregularidade desse formato, maior será a viscosidade. Partículas rugosas e alongadas tendem a dificultar o fluxo devido ao imbricamento, e partículas com textura arredondada e pouco alongada beneficiam o fluxo, conforme mostra a Figura 3.4. (PILEGGI, 2001). Para a pasta auto-nivelante a curva relacionada as esferas é a que mais se assemelha ao comportamento da mistura, por se tratar de partículas (sílica ativa e cimento) com esse formato “esferico” que serão adicionados à mistura.

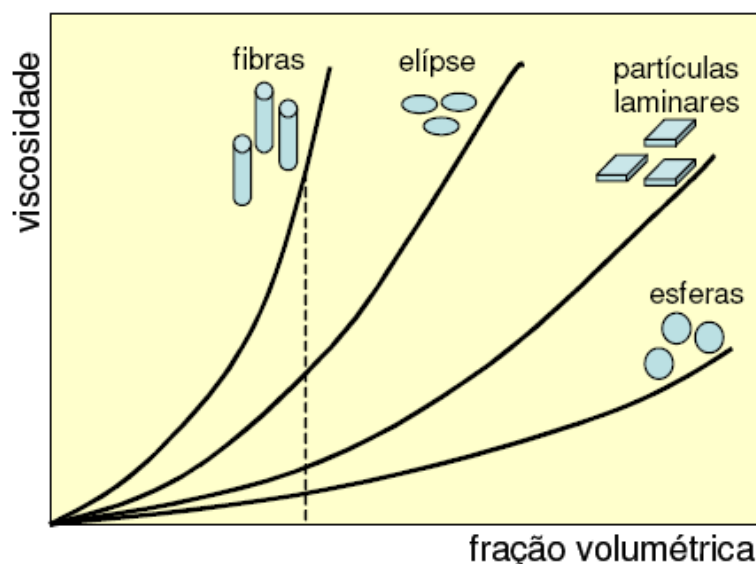


Figura 3.5 – Efeito do formato das partículas na viscosidade da mistura

Fonte: SILVA (2006)

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

O planejamento do programa experimental desenvolvido neste capítulo está dividido em dois itens principais. O primeiro, descrito no item *Caracterização dos materiais*, aborda a seleção dos materiais utilizados para a produção da pasta para argamassa auto-nivelante e a metodologia utilizada para sua caracterização. Já o segundo item apresentado como *Caracterização da Pasta para Argamassa Auto-Nivelante* descreve o ensaio específico para se caracterizar a pasta auto-nivelante, juntamente com os ajustes dos teores de materiais, como por exemplo, a relação água/materiais secos, aditivo superplastificante, aditivo promotor de viscosidade e sílica ativa, visando à formulação ideal para as pastas cimentícia auto-nivelante.

O item *Caracterização da Pasta para Argamassa Auto-Nivelante* também foi dividido em subitens para facilitar a compreensão do comportamento de cada material, e seus respectivos teores, na pasta auto-nivelante. Essa divisão ocorreu em três subitens, ou seja, em três etapas, que foram evoluindo conforme os resultados apresentados.

A Etapa I refere-se aos ensaios preliminares com a pasta auto-nivelante, com o objetivo de ajustar os teores dos aditivos VMA e SP e mapear o limite máximo e mínimo da relação a/ms. Como não há parâmetros sobre a pasta auto-nivelante, foi necessário essa arbitragem nos teores de adições, aditivos e a/ms, para que fossem gerados os primeiros resultados que posteriormente serviriam como parâmetros para uma nova dosagem de constituintes visando a pasta auto-nivelante.

A Etapa II refere-se a essa nova dosagem de materiais, já com alguns teores de constituintes revisados que resultaram num melhor desempenho das formulações visando a pasta auto-nivelante. As Etapas I e II além de testar as novas dosagens de constituintes, também auxiliaram nos primeiros testes com cilindro espanhol, equipamento este ainda não é normatizado, utilizado nos ensaios com a pasta auto-

nivelante. As formulações que foram consideradas ideais através dos critérios propostos nesse trabalho passaram para a Etapa III, sendo, portanto submetidas aos ensaios de viscosidade.

O fluxograma indicado na Figura 4.1, resume todas as etapas do programa experimental.

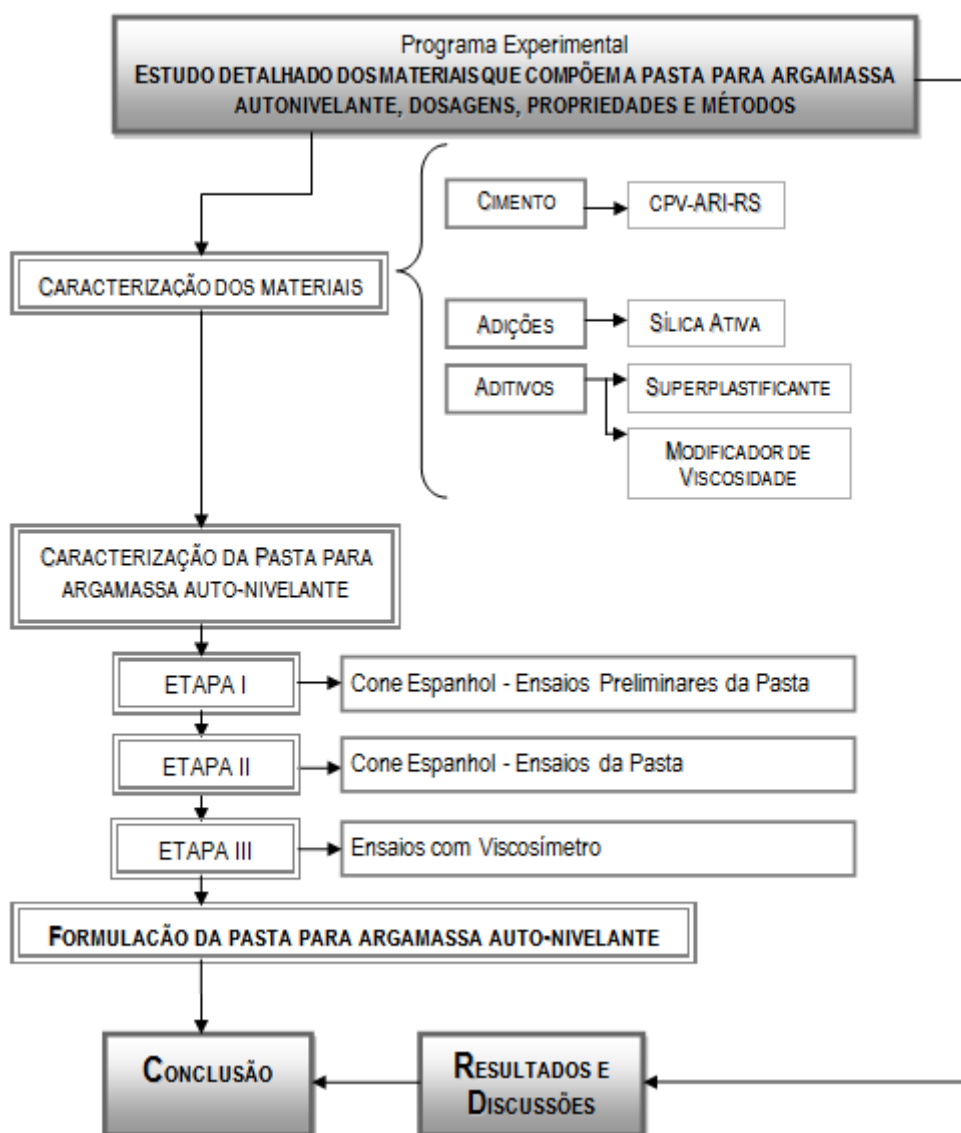


Figura 4.1 – Esquema da metodologia empregada na pesquisa

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foram utilizados materiais encontrados facilmente no comércio local da cidade de Curitiba-PR, exceto os aditivos VMA e SP, cedidos pela empresa BASF,

ainda em fase de teste, portanto não disponibilizado comercialmente até o final dessa pesquisa.

4.1.1. Cimento

O cimento utilizado nessa pesquisa foi o CP V ARI RS, da marca VOTORANTIM, que é classificado pela sua alta resistência inicial. As características requeridas por pastas e argamassas auto-nivelante direcionam a escolha desse tipo de cimento, já que o CP V ARI RS se destaca pela sua finura em relação aos demais, uma vez que este contribui diretamente para o aumento da fluidez do material.

A resistência à compressão principalmente nas primeiras idades e a presença da pozolana também são considerações relevantes quando se trabalham com materiais que requerem alta fluidez no estado fresco. As Tabelas 4.1 e 4.2 referem-se as composições química e física do CPV ARI RS respectivamente, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4.1 – Composição química do cimento CPV- ARI-RS da VOTORAN

| QUÍMICOS (%) | | | | | | |
|--------------|---|-----------------|------|-----------------|------------|-------------------|
| | S | CO ₂ | MgO | SO ₃ | Perda Fogo | Resíduo Insolúvel |
| Média | - | 2,16 | 5,43 | 3,47 | 3,15 | 13,81 |

Tabela 4.2 - Composição física do cimento CPV-ARI-RS da VOTORAN

| FÍSICOS | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|----------|----------------------|---------|---------------------------------------|------------------------------|
| | Expansividade | | Tempo de Pega (min.) | | Massa Específica g/cm ³ | Blaine cm ² /g |
| | A Frio | A Quente | Início | Final | | |
| Média | ≤ 5,0 | ≤ 5,0 | 252 | 321 | 2,97 | 5118 |
| Resistência à Compressão (MPa) | | | | | | |
| | 1 dia | 3 dias | 7 dias | 28 dias | | |
| Média | 24,83 | 34,72 | 39,63 | 46,91 | | |

O cimento foi caracterizado também quanto a sua granulometria através do ensaio de granulometria a laser. O equipamento utilizado foi o CILAS 1064, evidenciado na Figura 4.2, e realizado no LAMIR – Laboratório de Minerais e

Rochas, localizado na Universidade Federal do Paraná. A água deionizada foi o meio dispersante das partículas sólidas, com velocidade de bomba de 70% e com tempo de ultrassom de 60s. A curva de distribuição granulométrica está demonstrada na Figura 4.3.

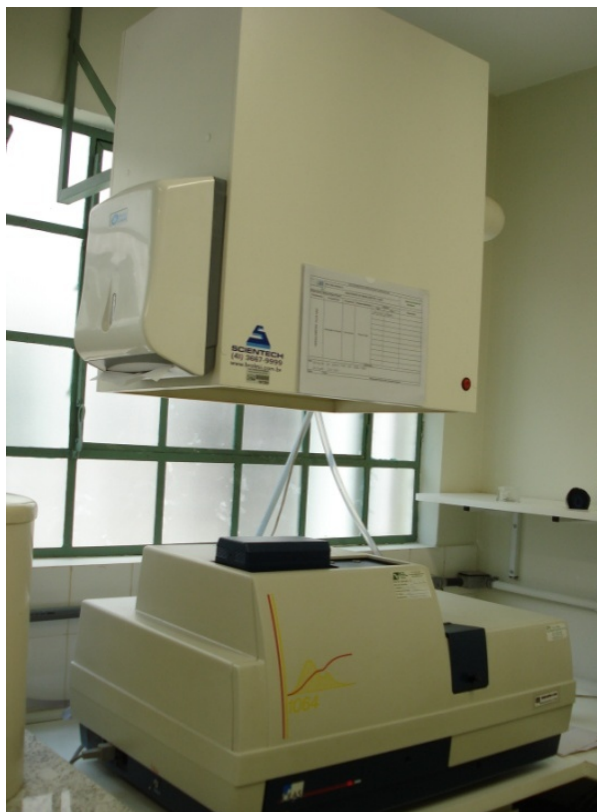


Figura 4.2 – Equipamento CILAS 1064 – *Granulometria a Laser*

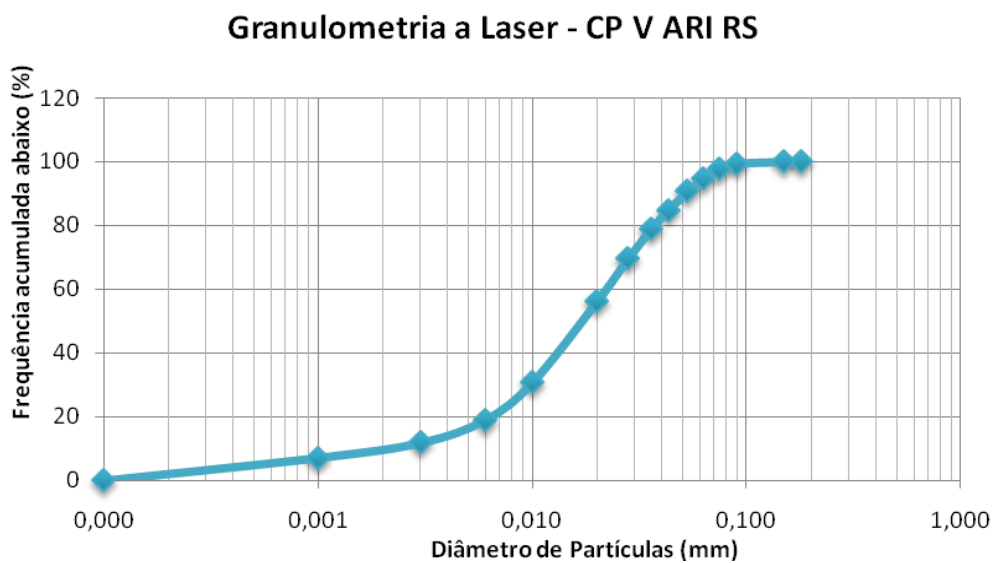


Figura 4.3 – Curva granulométrica do cimento CP V ARI RS

4.1.2. Sílica Ativa

De acordo com a necessidade de se empregar uma grande quantidade de finos para promover uma maior viscosidade à pasta auto-nivelante, a adição empregada neste trabalho foi a sílica ativa. A escolha deste material se deu devido à busca de uma adição mineral com elevado grau de finura e futuramente melhorasse as propriedades mecânicas da argamassa, já que ela terá a finalidade do contrapiso. A sílica ativa além de ser um resíduo industrial, proporciona também à mistura um melhor empacotamento das partículas, que ajuda em algumas propriedades da mistura, como por exemplo, a fluidez.

A sílica ativa empregada foi da marca SILMIX – Camargo Corrêa Cimentos S/A, sendo que suas principais características estão apresentadas na Tabela 4.3., informada pelo fabricante.

Tabela 4.3 – Composição química da sílica ativa – SILMIX da Camargo Corrêa Cimentos S/A

| QUÍMICOS (%) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------|
| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | PF |
| Média | 0,10 | 94,3 | 0,06 | 0,30 | 0,70 | 0,17 | 1,00 | 2,90 |

A massa unitária da sílica ativa é de 0,52g/cm³, com umidade de 0,6% e pH de 8,7. O percentual de material retido na peneira #325 (45µm) é igual a 3,4%, a finura blaine ficou em média de 20.000m²/kg e massa específica de 2,22 kg/dm³.

O ensaio de granulometria a laser também foi realizado para a sílica ativa, sendo que o laboratório e o equipamento utilizado para o desenvolvimento deste ensaio foram os mesmos utilizados na caracterização dos cimentos. A Figura 4.4 apresenta os resultados obtidos pelo ensaio.

Granulometria a Laser - Sílica Ativa

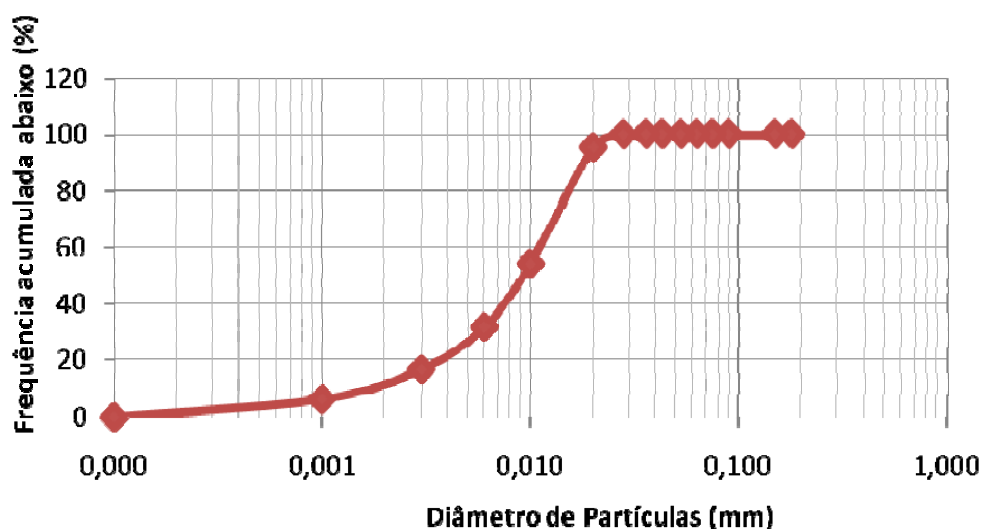


Figura 4.4 – Curva granulométrica da sílica ativa

4.1.3. Aditivos

4.1.3.1. Espectroscopia de Infravermelho

Para a caracterização dos aditivos, foi utilizada a Técnica Espectroscópica de Infravermelho, que é considerada a melhor ferramenta para caracterizar as estruturas químicas e as transformações que ocorrem nos compostos orgânicos (BRINGEL, 2007).

Os compostos químicos de uma forma geral absorvem radiação na região do ultravioleta, do visível e também na região do infravermelho do espectro eletromagnético (AQUINO, 2006).

A chamada radiação no infravermelho corresponde aproximadamente à região do espectro eletromagnético situado entre as regiões do visível e das microondas. As faixas de maior interesse encontram-se entre 660cm^{-1} a 4.000cm^{-1} . Embora o espectro de infravermelho seja característico da molécula de uma forma geral, certos grupos de átomos ainda dão origem a bandas que ocorrem mais ou menos na mesma frequência, independente da estrutura molecular, desta forma a presença dessa banda permite a identificação da estrutura molecular, por meio da

consulta em tabelas contendo informações dos grupos correspondentes a cada banda (SILVERSTEIN, et.al. 1979 apud AQUINO, 2006).

Ainda segundo SILVERSTEIN et.al. (1979) apud AQUINO (2006), a radiação na faixa de 10.000 a 100 cm^{-1} converte-se quando absorvido, em energia de vibração molecular, dando origem às bandas de vibração características dos grupos, entretanto a porção de maior utilidade está situada na região de 4.000 a 400 cm^{-1} . A frequência, ou o número de ondas depende das massas relativas dos átomos, das constantes de força das ligações e da geometria dos átomos. As posições das bandas são apresentadas em comprimento de onda (λ) ou em número de ondas (cm^{-1}). As intensidades das bandas são expressas como transmitâncias (T) ou absorbância (A).

Na pesquisa foram desenvolvidos ensaios baseados na norma ASTM E1252-98-2002 (Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis, 1998) e que consiste no equipamento espectroscópico de infravermelho marca FTIR, fabricante BOMEM, modelo MB-100, com faixa de aquisição de 650-5000 cm^{-1} , resolução: 4,0 cm^{-1} e número de Scans de 16. O acessório utilizado é o ATR (Reflectância Total Atenuada) horizontal, com ângulo de incidência de 45°.

Os ensaios foram desenvolvidos no LACTEC - Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento, localizado no campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná.

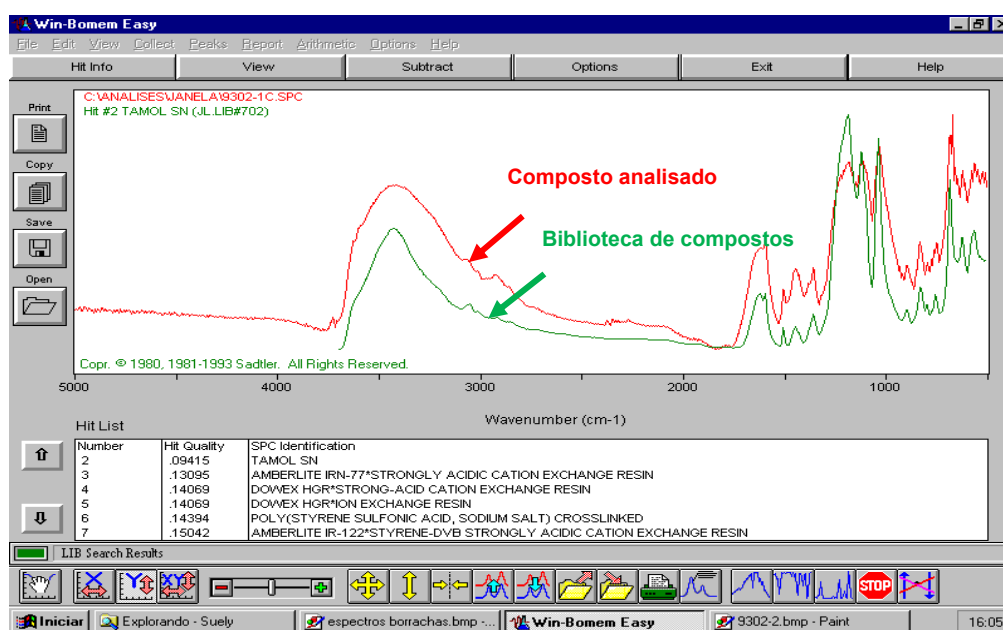


Figura 4.5 – Resultado do Infravermelho para aditivo promotor de viscosidade

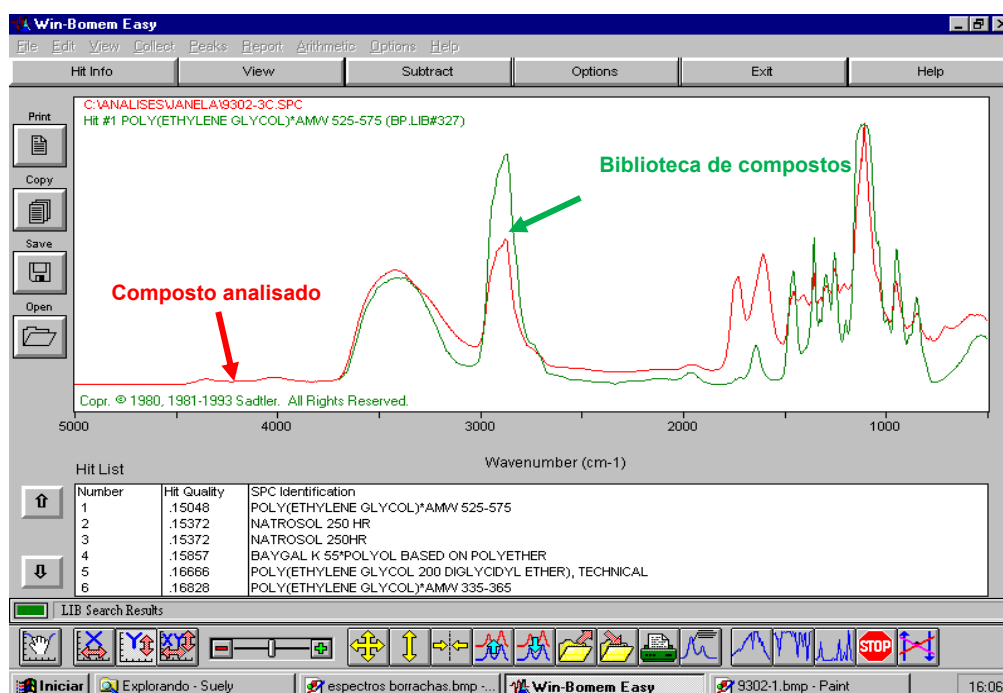


Figura 4.6 – Resultado do Infravermelho para aditivo superplastificante

Nos gráficos apresentados pelas Figuras 4.5 e 4.6 as curvas em verde referem-se aos aditivos ensaiados, já as linhas vermelhas referem-se a compostos já conhecidos em uma biblioteca de dados utilizada como consulta. É feita uma comparação entre as duas curvas e a conclusão é dada pela semelhança entre elas. No aditivo superplastificante foram detectados compostos orgânicos preponderante

do PEG (Polietilenoglicol), e nos aditivos promotores de viscosidade foram encontrados compostos orgânicos derivado de enxofre.

Os teores de líquido, para os aditivos VMA e SP foram encontrados através do aquecimento destes em uma estufa a uma temperatura de 100°C, num período de 24 horas. Esse procedimento foi repetido por três vezes e a média resultou nos valores apresentados na tabela 4.4, que também apresenta o resumo de todas as demais características encontradas no decorrer dos ensaios com os aditivos em questão.

Tabela 4.4 – Caracterização dos aditivos SP e VMA

| | Promotor de Viscosidade | Superplastificante |
|--|--------------------------------|---------------------------|
| Composto Orgânico | Derivado do Enxofre | Polietilenoglicol |
| Aspecto | Líquido | Líquido viscoso |
| Coloração | Marrom escuro | Gelo |
| Dosagem Média Recomendada pelo Fabricante | De 0,2% a 0,65% | De 0,5% a 1,0% |
| Teor de líquido (%) | 94% | 80% |

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA PASTA PARA ARGAMASSA AUTO-NIVELANTE

Os ensaios de caracterização da pasta foram desenvolvidos a partir de dois equipamentos que analisam a pasta no estado fresco, são eles o cilindro espanhol, que permite a análise da fluidez e segregação da mistura e o viscosímetro, que possibilita a determinação da viscosidade relativa das pastas a partir de taxas de cisalhamento pré-estabelecidas.

Os ensaios experimentais com o cilindro espanhol foram divididos em três etapas:

Etapa I: Ensaios Preliminares – Dosagem aleatória de alguns teores de constituintes com a finalidade de conhecer o comportamento de cada um deles na pasta auto-nivelante. Etapa II: Ensaios com a Pasta Auto-Nivelante - Refere-se aos

ensaios propriamente ditos da pasta auto-nivelante, já com alguns materiais ajustados, servindo de análise na busca das melhores formulações da pasta.

Etapa III: Ensaios com o Viscosímetro – Análise da viscosidade das melhores formulações encontradas na etapa II.

A Figura 4.7 demonstra em um fluxograma essas etapas para os ensaios de caracterização da pasta.



Figura 4.7– Etapas do estudo de formulações da pasta

O procedimento de mistura e os parâmetros como a quantidade de pasta para a execução dos ensaios com o cilindro espanhol foram os mesmos para as duas primeiras etapas, sendo que a terceira etapa por se tratar de um teste no viscosímetro e necessitar de pouca quantidade de material, a argamassadeira foi substituída pela mistura manual.

4.2.1. Procedimento de Mistura

As propriedades das argamassas estão diretamente relacionadas com seu procedimento de mistura, isto é, a energia utilizada no amassamento, a quantidade de água adicionada e o tempo de mistura são fatores que exercem grandes

influências nas propriedades das argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Como o tipo de mistura não foi uma variável analisada nesse trabalho, o seu procedimento foi o mesmo para todas as misturas. Esse procedimento foi eleito pelo fato de conseguir uma boa homogeneidade na mistura.

Conforme mostra a Figura 4.8 os materiais foram adicionados em parcelas e sempre misturados na argamassadeira com velocidade lenta. A água foi misturada em duas parcelas e os aditivos foram os últimos constituintes adicionados a pasta.

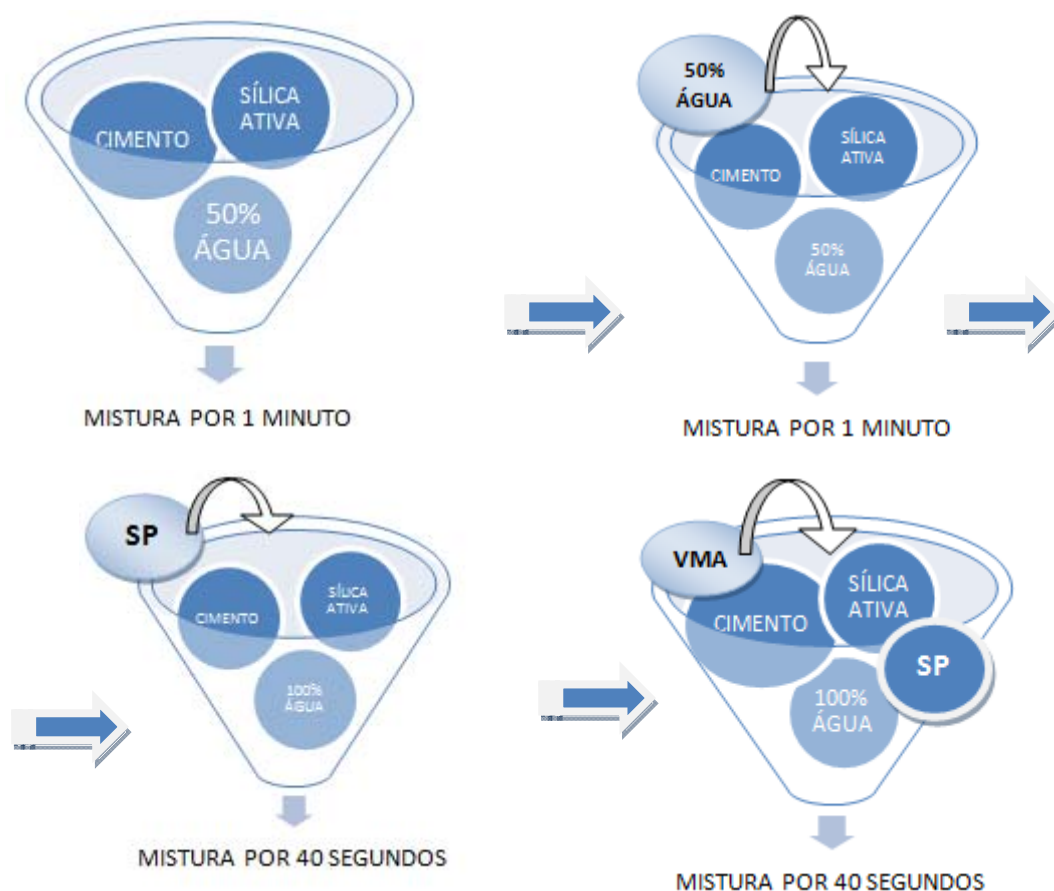


Figura 4.8 – Procedimento de mistura para a pasta de cimento

4.2.2. Procedimentos de execução do ensaio com o cilindro espanhol

Os ensaios experimentais com o cilindro espanhol para a pasta auto-nivelante foram executados no Laboratório de Materiais e Estruturas - LAME localizado na Universidade Federal do Paraná.

Os constituintes da pasta foram dosados numa balança comum, calibrada, e misturada na argamassadeira mecânica de eixo planetário, da marca HOBART conforme a Figura 4.9., cujas velocidades de rotação da raquete são de 140 ± 5 rpm e 285 ± 10 rpm.



Figura 4.9 – Equipamento utilizado na mistura da pastas

Após a mistura dos constituintes é realizado o preenchimento do copo do cilindro espanhol com uma amostra da pasta cimentícia conforme mostrado na Figura 4.10 e com a ajuda de um cronômetro é medido o tempo de escoamento da pasta pelo orifício do copo. O diâmetro da pasta escoada, o tempo decorrido para esse escoamento, a análise visual das bordas da pasta após o escoamento e a análise visual da segregação da mesma são os parâmetros analisados e estão descritos na seqüência.

- a) Diâmetro de abertura da pasta: o diâmetro é medido após o escoamento da pasta no recipiente necessariamente nivelado, ou seja, esse diâmetro é medido em dois sentidos ortogonais e posteriormente determinando o

diâmetro médio de abertura da pasta escoada. Os diâmetros médios de abertura obtidos nos ensaios executados em Valência na Espanha para pastas para argamassa auto-nivelante, estão compreendidos entre 25cm e 35cm, porém essas aberturas não representam o critério único de avaliação da pasta, já que as análises visuais da segregação e das bordas da pasta escoada também representam fatores importantes a serem analisados no estudo da pasta.

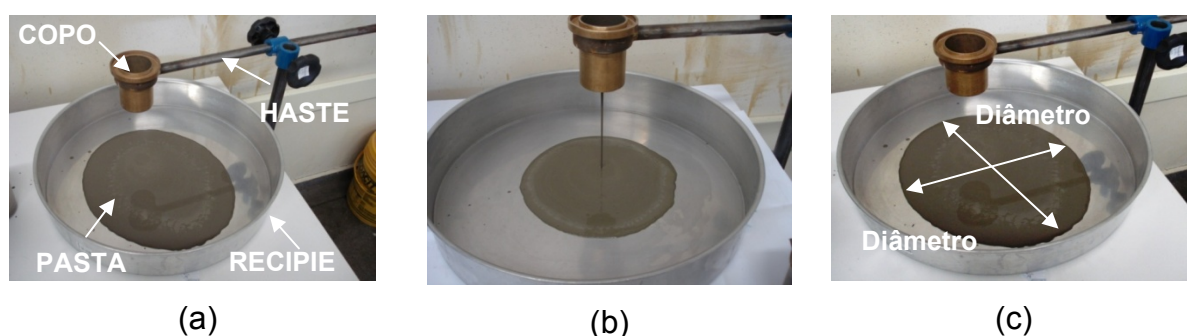


Figura 4.10 – Ensaio com cilindro espanhol. (a) Nomenclatura dos componentes do cilindro espanhol; (b) Escoamento da pasta através do orifício do copo; (c) Determinação da abertura da pasta com base na média de dois diâmetros (Diâmetro 1 e Diâmetro 2)

- b) Tempo de escoamento da pasta: refere-se ao tempo decorrido entre a saída da pasta do orifício do copo do cilindro espanhol e o seu completo escoamento. Para a medição do tempo foi utilizado um cronômetro padrão de laboratório.
- c) Avaliação Visual: Refere-se a duas avaliações visuais da pasta após o seu escoamento, sendo elas a análise do aspecto da sua borda, que pode ser uniforme ou desuniforme, e a análise da segregação da mistura (separação nítida dos seus constituintes) podendo ser avaliada com ou sem segregação.
- ↪ Análise visual da borda da pasta escoada: Avaliada como uniforme ou desuniforme, conforme ilustra a Figura 4.11. Cabe destacar que bordas que não apresentam uma uniformidade tendem a segregação.

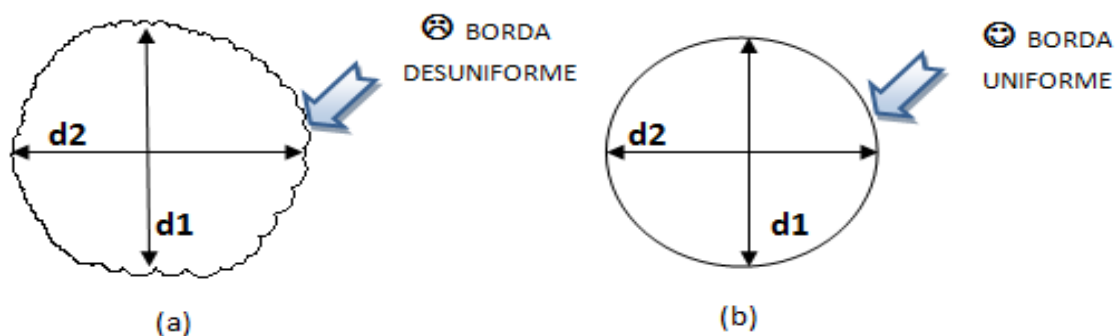


Figura 4.11 – Análise visual da borda da pasta escoada. (a) Pasta com borda desuniforme, (b) Pasta com borda uniforme

↪ Análise visual quanto a segregação da pasta escoada: com ou sem segregação. Essa análise é feita observando-se a espessura da pasta escoada, de forma que pastas com pequenas espessuras (altura) de borda tendem a segregação, enquanto que bordas com espessuras mais altas dão indícios de maior coesão da mistura, conseqüentemente menor probabilidade de segregação. A Figura 4.12 exemplifica essa análise visual.



Figura 4.12 – Análise visual da seqüência da pasta escoada. (a) Pasta sem tendência à segregação, (b) Pasta com tendência à segregação

Os ensaios com o cilindro espanhol resultarão em pastas que serão analisadas pelo seu diâmetro médio de espalhamento, tempo de espalhamento e análises visuais, sendo que para que essa pasta seja considerada uma pasta ideal

para a argamassa auto-nivelante, segundo os critérios propostos nesse trabalho, essa pasta deverá apresentar simultaneamente:

- ↪ Diâmetro médio de espalhamento da pasta escoada: de 25 a 30 cm – conforme dados trazidos dos ensaios espanhóis;
- ↪ Análise Visual de aspecto da borda da pasta escoada: Com borda uniforme;
- ↪ Análise Visual de segregação da pasta escoada: Sem tendência à segregação.

4.2.3. Etapa I: Ensaios Preliminares com a Pasta Auto-Nivelante

Os ensaios preliminares, como o nome diz, foram os primeiros ensaios executados para a pasta auto-nivelante. Como não tínhamos parâmetros para começar os estudos, nem publicações e ensaios específicos foram necessários trazer experiências de ensaios e equipamentos da cidade de Valência na Espanha, que já comercializa a argamassa auto-nivelante, para que fosse possível dar início aos estudos aqui no Brasil. O início desse trabalho ocorreu com a dosagem de vários materiais com teores aleatórios, detalhado nos próximos itens, para testar a capacidade de cada um deles e enquadrá-los as características exigidas á pasta auto-nivelante.

Os ensaios preliminares foram desenvolvidos para detectar as proporções iniciais dos constituintes para definir uma primeira mistura, conhecendo o comportamento de cada material (aditivos, adições e a/c) utilizado. Após a apresentação desses resultados foram feitos estudos com ajustes de teores de constituintes que serviram de base para uma próxima etapa (Etapa II).

Para as três etapas de ensaios, os teores de aditivos VMA e SP foram considerados a fração líquida mais a sólida, ou seja, a parte sólida de cada aditivo respectivamente já está diluída em água.

4.2.3.1. Parâmetro Fixo

O parâmetro fixado nessa etapa da pesquisa foi o seguinte:

↪ **Sílica Ativa:** A dosagem desse material é feita em substituição ao cimento. A porcentagem dessa substituição recomendada pelo fabricante da sílica ativa está entre 5% a 8% em substituição ao cimento. Para essa etapa não foram variadas as porcentagens, já que o objetivo dos estudos preliminares com a pasta era somente analisar o comportamento dos dois aditivos (VMA e SP) e acertar a relação a/ms. O teor de sílica ativa utilizada nessa etapa da pesquisa foi fixado em 5%.

4.2.3.2. Variáveis Independentes ou de Controle

As variáveis independentes consideradas para essa etapa dos estudos são:

- ↪ **Relação água/materiais secos (a/ms):** A relação a/ms empregada nessa etapa da pesquisa foi de 0,95 e 0,67. O valor de a/ms 0,95 foi utilizado em consequência de alguns parâmetros fornecidos pela empresa espanhola que já comercializa a argamassa auto-nivelante. Já o valor de a/ms 0,67 foi arbitrado em função da tentativa de diminuir a quantidade de cimento empregado à mistura.
- ↪ **Aditivo Promotor de Viscosidade (VMA):** De acordo com alguns fabricantes a porcentagem de dosagem recomendada do aditivo promotor de viscosidade ficou entre 0,2% a 0,65% da massa total de cimento. Essa porcentagem de aditivo refere-se a massa líquida de aditivo, já que é nessas condições que esse aditivo é comercializado. Para essa etapa da pesquisa foram utilizados os teores de 0,2%, 0,4% e 0,6% em relação a massa de cimento, respeitando a orientação do fabricante. Após a execução dos ensaios com esses teores (0,2%, 0,4% e 0,6%) foi observada uma necessidade de um acréscimo desse aditivo, que foi de 0,8%. As porcentagens indicadas nos rótulos dos fabricantes de aditivos referem-se a pastas, argamassas e concretos, logo em se tratando de pasta para argamassa auto-nivelante o teor recomendado pelos fabricantes deverá ser revisto, tendo-se em vista que o mesmo deverá atuar em conjunto com o aditivo superplastificante para proporcionar uma maior fluidez da mistura.
- ↪ **Aditivo Superplastificante (SP):** Também de acordo com alguns fabricantes as recomendações orientativas para o uso desse produto foram de 0,5% a 1,0% da

massa total de cimento. Para essa etapa da pesquisa foram utilizados teores de 0,5%, 0,8% e 1,0% da massa de cimento, ressaltando que esses teores de aditivos também se referem à massa líquida.

Na Tabela 4.5 estão apresentadas as variáveis independentes consideradas nessa etapa de estudo preliminar.

Tabela 4.5 – Resumo das variáveis independentes utilizadas na etapa I

| a/ms | SP (%) LÍQUIDA | VMA (%) LÍQUIDA |
|-------------|---------------------------|----------------------------|
| 0,95 | 0,5 | 0,2 |
| 0,67 | 0,8 | 0,4 |
| | 1,0 | 0,6 |
| | | 0,8 |

4.2.3.3. Variáveis Dependentes ou de Resposta

As variáveis dependentes consideradas para essa etapa dos estudos são:

- ↪ Tempo de escoamento;
- ↪ Diâmetro de espalhamento;
- ↪ Análise visual da borda da pasta escoada;
- ↪ Análise visual da segregação da pasta escoada.

4.2.3.4. Entrada de Dados

Para essa etapa preliminar dos ensaios com a pasta auto-nivelante foi desenvolvida a Tabela 4.6, que mostra como foi ordenada a execução dos ensaios, permitindo a melhor visualização das variáveis independentes e variáveis dependentes.

Tabela 4.6 – Dados de entrada para a etapa I

| a/c | a/ms | SÍLICA ATIVA | SP | VMA |
|-------------|-------------|---------------------|-----------|------------|
| | | % | % | % |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 0,5 | 0,2 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 0,8 | 0,2 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 1,0 | 0,2 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 0,5 | 0,4 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 0,8 | 0,4 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 1,0 | 0,4 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 0,5 | 0,6 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 0,8 | 0,6 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 1,0 | 0,6 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 0,5 | 0,8 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 0,8 | 0,8 |
| 1,00 | 0,95 | 5,0 | 1,0 | 0,8 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 0,5 | 0,2 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 0,8 | 0,2 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 1,0 | 0,2 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 0,5 | 0,4 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 0,8 | 0,4 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 1,0 | 0,4 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 0,5 | 0,6 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 0,8 | 0,6 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 1,0 | 0,6 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 0,5 | 0,8 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 0,8 | 0,8 |
| 0,70 | 0,67 | 5,0 | 1,0 | 0,8 |

A partir dos resultados gerados com os dados da Tabela 4.6 foram definidos novos parâmetros utilizados para os ensaios da pasta (Etapa II), com o objetivo de formular pastas mais próximas das aplicáveis às argamassas auto-nivelantes para contrapisos.

4.2.4. Etapa II: Ensaio com a pasta auto-nivelante propriamente dita

Novos teores para os parâmetros fixos, variáveis independentes resultaram em novos resultados das variáveis dependentes, já que essa etapa da pesquisa irá ajustar os teores da etapa I, fazendo com que os resultados fossem considerados satisfatórios para a pasta à argamassa auto-nivelante.

4.2.4.1. Parâmetro Fixo

O parâmetro fixado nessa etapa da pesquisa é:

↪ **Aditivo Superplastificante (SP):** A porcentagem de superplastificante foi fixada em 0,5% (massa líquida) em relação a massa de cimento, como consequência dos resultados obtidos na etapa preliminar dos ensaios da pasta. As porcentagens acima de 0,5% não foram eficazes e por esse motivo foram banidas para os ensaios determinantes da pasta auto-nivelante.

4.2.4.2. Variáveis Independentes ou de Controle

As variáveis independentes consideradas para essa etapa dos estudos são:

↪ **Relação água materiais secos (a/ms):** Foi verificado que a relação a/ms poderia ser estendida a uma quantidade maior de valores para que houvesse uma validação na análise, ou seja, quanto maior a interpolação de valores entre 0,95 e 0,67 melhor será a visualização da pasta ideal. Os novos valores a serem considerados para essa etapa foram: 0,85 - 0,80 - 0,75 e 0,70.

↪ **Aditivo Promotor de Viscosidade (VMA):** As porcentagens utilizadas para essa etapa de ensaios foram as de 0,7%, 0,9% e 1,1%. Devido a alta fluidez e a segregação visualizadas nos ensaios da etapa I, foram acrescentados teores maiores de VMA para essa etapa da pesquisa.

↪ **Sílica Ativa:** A substituição de porcentagens de cimentos pela sílica ativa teve resultados positivos na etapa preliminar da pasta (SA de 5%). Por esse motivo

resolveu-se ampliar as substituições de sílica ativa que era somente de 5%, para 6%, 7% e 8%, para também estudar a influência que esse material pode ter na pasta para argamassa auto-nivelante.

A Tabela 4.7 mostra um resumo das variáveis independentes utilizadas nessa etapa da pesquisa.

Tabela 4.7 – Resumo das variáveis independentes utilizadas na etapa II

| a/ms | VMA (%) | SÍLICA ATIVA (%) |
|-------------|----------------|-------------------------|
| 0,85 | 0,7 | 5% |
| 0,80 | 0,9 | 6% |
| 0,75 | 1,1 | 7% |
| 0,70 | | 8% |

4.2.4.3. Variáveis Dependentes ou de Resposta

As variáveis dependentes são as variáveis que não irão sofrer alterações, no decorrer dessa etapa da pesquisa, sendo elas:

- ↳ Tempo de escoamento;
- ↳ Diâmetro de espalhamento;
- ↳ Análise visual da borda da pasta escoada;
- ↳ Análise visual da segregação da pasta escoada.

4.2.4.4. Entrada de Dados

Os dados de entrada utilizados nessa etapa da pesquisa estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Dados de entrada utilizados para a etapa II

| a/c | a/ms | SÍLICA ATIVA | SP | VMA |
|------|------|--------------|-----|-----|
| | | % | % | % |
| 0,89 | 0,85 | 5,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,89 | 0,85 | 5,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,89 | 0,85 | 5,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,90 | 0,85 | 6,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,90 | 0,85 | 6,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,90 | 0,85 | 6,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,91 | 0,85 | 7,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,91 | 0,85 | 7,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,91 | 0,85 | 7,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,92 | 0,85 | 8,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,92 | 0,85 | 8,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,92 | 0,85 | 8,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,84 | 0,80 | 5,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,84 | 0,80 | 5,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,84 | 0,80 | 5,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,85 | 0,80 | 6,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,85 | 0,80 | 6,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,85 | 0,80 | 6,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,86 | 0,80 | 7,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,86 | 0,80 | 7,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,86 | 0,80 | 7,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,87 | 0,80 | 8,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,87 | 0,80 | 8,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,87 | 0,80 | 8,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,79 | 0,75 | 5,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,79 | 0,75 | 5,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,79 | 0,75 | 5,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,80 | 0,75 | 6,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,80 | 0,75 | 6,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,80 | 0,75 | 6,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,81 | 0,75 | 7,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,81 | 0,75 | 7,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,81 | 0,75 | 7,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,82 | 0,75 | 8,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,82 | 0,75 | 8,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,82 | 0,75 | 8,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,74 | 0,70 | 5,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,74 | 0,70 | 5,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,74 | 0,70 | 5,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,74 | 0,70 | 6,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,74 | 0,70 | 6,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,74 | 0,70 | 6,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,75 | 0,70 | 7,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,75 | 0,70 | 7,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,75 | 0,70 | 7,0 | 0,5 | 1,1 |
| 0,76 | 0,70 | 8,0 | 0,5 | 0,7 |
| 0,76 | 0,70 | 8,0 | 0,5 | 0,9 |
| 0,76 | 0,70 | 8,0 | 0,5 | 1,1 |

4.2.5. Etapa III - Ensaio com o Viscosímetro

Na etapa III e última etapa dessa pesquisa, foi utilizado o viscosímetro para os ensaios com a pasta auto-nivelante. Dando continuidade a metodologia utilizada nessa pesquisa essa etapa também foi consequência dos resultados apresentados na etapa II. As formulações ideais formuladas na etapa II foram ensaiadas no viscosímetro, para que nos possibilitasse um estudo mais detalhado em relação a sua viscosidade.

O viscosímetro utilizado nessa etapa da pesquisa foi da marca THERMO ELECTRON CORPORATION, modelo HAAKE RHEOSTRESS 600, placa a placa, do LACTEC, cujo espaçamento entre a placa superior e inferior é de 0,3mm. As pastas foram misturadas manualmente, com a mesma seqüência definida no item do procedimento de mistura, e logo é colocada no viscosímetro para o ensaio. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e constante de 23°C.

A viscosidade da pasta foi determinada a partir de uma taxa de cisalhamento, pré-determinada, que variou de 0 a 50s⁻¹, e posteriormente de 50 a 0s⁻¹, para um período de tempo de 215s, como mostra a Figura 4.13. Para a análise dos resultados existe um software próprio do fabricante do viscosímetro chamado de *RheoWin RS 600*, que registra a tensão de cisalhamento aplicada pelas placas paralelas. No sistema placa/placa a tensão é determinada com a rotação da placa superior em torno do eixo e a seção inferior fixa.

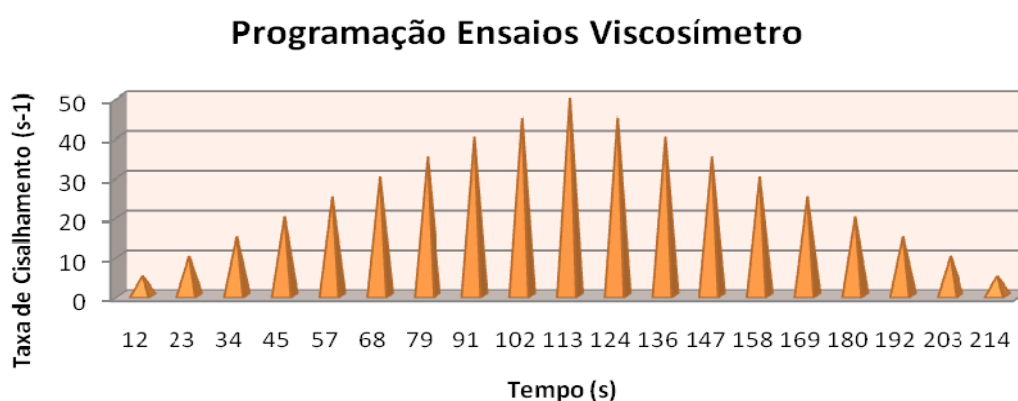


Figura 4.13 – Programação de ensaios com o viscosímetro

O resultado desse ensaio se resume em duas curvas com dados da tensão de cisalhamento (τ) versus taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), sendo a primeira curva ascendente que representa o aumento da taxa de cisalhamento e a segunda uma curva descendente que representa a diminuição da taxa de cisalhamento aplicada nas pastas ensaiadas. A Figura 4.14 demonstra as etapas do ensaio com o viscosímetro para as pastas em questão.



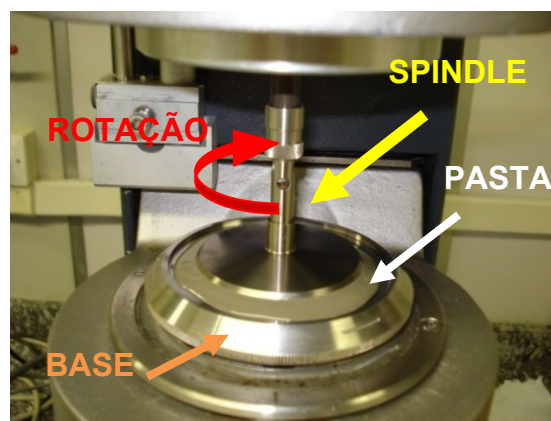
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 4.14 – Ensaio com o viscosímetro para a análise da reologia da pasta. (a) Equipamento utilizado nos ensaios; (b) Colocação da pasta na base do viscosímetro; (c) Início do ensaio; (d) Componentes do equipamento

Finalizando o ensaio determinou-se a tensão de escoamento e a viscosidade das pastas, sendo que esses parâmetros foram determinados através do *software* que é baseado no modelo de Bingham. Os parâmetros fixos, as variáveis dependentes e as variáveis independentes, para esta etapa de ensaios, foram propostas de acordo com os resultados analisados para o comportamento das pastas ensaiadas na etapa II e estão descritos a seguir:

4.2.5.1. Parâmetros Fixos

Os parâmetros fixados nessa etapa da pesquisa foram:

- ↪ **Aditivo Superplastificante (SP):** A porcentagem de superplastificante foi fixada em 0,5% em relação a massa de cimento.
- ↪ **Aditivo Promotor de Viscosidade (VMA):** A porcentagem utilizada para essa etapa de ensaios foi de 0,9% em relação ao cimento.

4.2.5.2. Variáveis Independentes ou de Controle

As variáveis independentes consideradas para essa etapa dos estudos são:

- ↪ **Relação água materiais secos (a/ms):** A relação a/ms para essa etapa de ensaios foi considerada de 0,80 e 0,75.
- ↪ **Sílica Ativa:** A substituição de porcentagens de cimentos pela sílica ativa teve resultados positivos demonstrados na etapa II. Por esse motivo foi proposto ensaio com o viscosímetro para as quatro porcentagens de substituição de sílica, sendo elas: 5%, 6%, 7% e 8%.

4.2.5.3. Variáveis Dependentes ou de Resposta

As variáveis dependentes são:

Viscosidade relativa: Determinada através do viscosímetro segundo a ASTM D 2196/99.

4.2.5.4. Entrada de Dados

As formulações que foram ensaiadas no viscosímetro foram as pastas ideais que obtiveram melhores parâmetros com relação ao diâmetro de abertura da pasta (de 25 a 35 cm) no recipiente e a análise visual das pastas (borda uniforme e sem segregação). Após essa classificação, foram escolhidas a partir do universo amostral da etapa II para o teste as quatro dosagens de sílica ativa, duas relações a/ms, uma porcentagem de aditivo superplastificante e uma dosagem de aditivo promotor de viscosidade, como mostra a Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resumo das variáveis independentes utilizadas no ensaio do viscosímetro

| Sílica Ativa (%) | a/ms |
|-------------------------|-------------|
| 5% | 0,75 |
| 5% | 0,80 |
| 6% | 0,70 |
| 6% | 0,80 |
| 7% | 0,70 |
| 7% | 0,80 |
| 8% | 0,70 |
| 8% | 0,80 |

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para cada etapa descrita no capítulo anterior, juntamente com a análise do comportamento dos materiais empregados e suas implicações na obtenção dos objetivos propostos no início dessa pesquisa. A apresentação dos itens que constituem este capítulo é demonstrada através de gráficos, tabelas e fotos, que facilita a visualização dos resultados.

5.1. ETAPA I: ENSAIOS PRELIMINARES PARA ANÁLISE DA PASTA

Esse estudo preliminar teve como objetivo um estudo mais detalhado do comportamento de alguns materiais utilizados na pasta cimentícia. A maioria dos fabricantes de aditivos e adições recomenda limite máximo e mínimo para a utilização dos mesmos. Essas porcentagens recomendadas foram respeitadas somente para um estudo prévio de pastas auto-nivelante, já que os primeiros ensaios já demonstraram que esses teores deveriam ser extrapolados para se chegar ao objetivo da pasta fluida e sem segregação de materiais.

As porcentagens de aditivos, VMA e SP, que serão mencionadas no decorrer desse capítulo referem-se ao teor (sólido + líquido), pois apesar do aditivo se apresentar no estado líquido, contém sólidos na sua constituição, sendo assim, essa parcela de líquido deve ser considerada no consumo de água da mistura, caso contrário trará distorções à relação água/cimento. A porcentagem de líquido que cada aditivo apresenta, já foram apresentados no Capítulo 4 através da Tabela 4.4 deste trabalho.

Para o início dos estudos de dosagem foram estudadas as proporções de materiais que serviriam de base para os estudos posteriores. Os aditivos SP e o VMA foram os constituintes que obtiveram variações nessa etapa da pesquisa, sendo que o SP foi ensaiado com teores de 0,5%, 0,8% e 1,0% (Fabricante recomenda de 0,5% a 1,0%), em relação ao teor de cimento. Já o aditivo VMA foi dosado com porcentagens de 0,2%, 0,4% e 0,6% (Fabricante recomenda 0,2% a 0,65%). O teor de 0,8% de VMA, também incluído nessa etapa dos estudos, ultrapassou o limite indicado pelo fabricante, pois nessa etapa dos testes já foi detectada a falta de teores mais altos do VMA, por isso a inclusão da porcentagem de 0,8%.

A porcentagem de sílica que substituiu o cimento foi fixada em 5% (Fabricante recomenda de 5% a 8%) e a relação a/c foi igual a 1,0 e 0,70.

A quantidade de pasta misturada na argamassadeira foi de no mínimo 1 kg, sendo essa uma quantidade de material adequada, no que se refere ao preenchimento da cuba da argamassadeira que possibilite uma a mistura homogênea do material.

5.1.1. Comportamento da mistura com aditivo SP 0,5%

A Tabela 5.1 mostra os resultados de espalhamento e análise visual com 0,5% de SP e variações para a relação a/c (1,0 e 0,70), VMA (0,2%, 0,4%, 0,6% e 0,8%). Já a sílica ativa fixada em 5%.

O tempo medido para cada formulação dos ensaios com o cilindro espanhol, não foi apresentado devido à falta de coerência nos dados obtidos. Uma das causas mais prováveis dessa dispersão de valores com relação ao tempo pode ser a dificuldade do operador na utilização do cronômetro para frações curtas de tempo. Sugere-se que nas próximas pesquisas, com a utilização do cilindro espanhol, seja utilizada uma câmara de filmagem para que seja possível a retirada de dados no que se refere ao tempo de escoamento.

Tabela 5.1 - Resultados numéricos e análise visual para 0,5% de aditivo SP

| FORMULAÇÃO | a/ms | CP ARIS | SÍLICA ATIVA (5%) | ÁGUA | SP | | VMA | | ESPALHAMENTO (cm) | | | TEMPO (s) | ANÁLISE VISUAL | | | |
|------------|------|------------|-------------------------|------|-----|-----|-----|-----|----------------------|----|-------|--------------|----------------|---|-----------------------------|----|
| | | | | | (g) | % | (g) | % | D1 | D2 | Média | | BORDA | | SEPARAÇÃO DE MATERIAL | |
| | | | | | | | | | | | | | U | D | SS | CS |
| 1- | 0,95 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,5 | 1,0 | 0,2 | 32 | 35 | 33,5 | 17:34 | | X | | X |
| 2- | 0,95 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,5 | 2,0 | 0,4 | 33 | 32 | 32,5 | 17:72 | | X | | X |
| 3- | 0,95 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,5 | 3,0 | 0,6 | 33 | 32 | 32,5 | 17:80 | | X | | X |
| 4- | 0,95 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,5 | 4,0 | 0,8 | 32 | 32 | 32,0 | 17:34 | | X | | X |
| 5- | 0,67 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 1,0 | 0,2 | 29 | 33 | 31,0 | 17:72 | | X | X | |
| 6- | 0,67 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 2,0 | 0,4 | 27 | 30 | 28,5 | 17:37 | | X | X | |
| 7- | 0,67 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,0 | 0,6 | 26 | 24 | 25,0 | 17:68 | | X | X | |
| 8- | 0,67 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,0 | 0,8 | 26 | 24 | 25,0 | 16:92 | X | | X | |

Legenda: U= Uniforme; D= Desuniforme; SS= sem segregação; CS= com segregação; Pasta Ideal

Como pode ser visualizado na Tabela 5.1, o acréscimo de VMA ocasionou um decréscimo no diâmetro de espalhamento das pastas, porém essa diminuição foi mais acentuada na relação a/ms de 0,67. Como demonstrado no referencial bibliográfico (aditivos químicos item 2.3.1.3), o aditivo VMA atua na água da mistura promovendo uma viscosidade moderada por meio de uma formação de rede, que detém a água e que mantêm as partículas finas da mistura suspensas, fornecendo maior coesão, conseqüentemente evitando a ocorrência de segregação e exsudação. Isso explica, por exemplo, que quando se reduz a relação a/ms na mistura há maior tendência à aproximação das partículas, conseqüentemente a redução no diâmetro de espalhamento da pasta é bem mais acentuada.

Já a análise visual da pasta com teor de SP de 0,5%, demonstrou, exceto para a formulação número 8 (Tabela 5.1), bordas desuniformes, ou seja, indícios de segregação na mistura. Já a análise visual quanto à segregação, para a relação a/ms de 0,95, indicou que todas as pastas foram consideradas com segregação, e para a relação a/c 0,67 todas as pastas foram consideradas sem segregação.

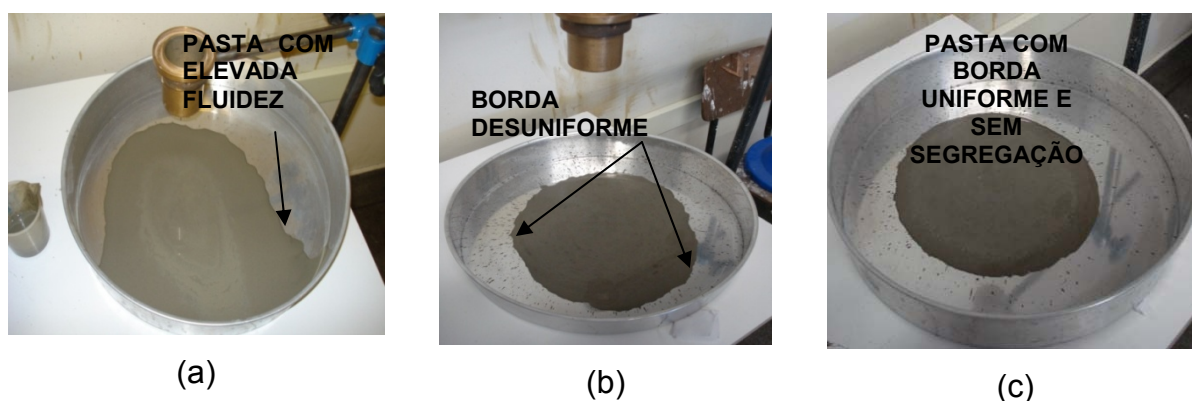


Figura 5.1 – Visualização das pastas nos ensaios preliminares com o cilindro espanhol.
Formulação 1 (a); formulação 5 (b); formulação 8 (c)

Na Figura 5.1 observa-se a evolução do efeito conjunto dos aditivos SP e VMA (em teores pré-estabelecidos) sobre a fluidez da pasta de cimento e sobre o seu comportamento quanto à segregação. Observa-se que a pasta 1 (a/ms 0,95; VMA 0,2%) apresentou uma alta fluidez com segregação, já a pasta 5, com o mesmo teor de aditivos da formulação 1, porém com relação a/ms inferior ($a/ms = 0,67$), já apresentou resultados sem segregação da mistura, porém ainda com borda desuniforme (Figura 5.1 b). A pasta 8 (a/ms 0,67; VMA 0,8%) foi a pasta considerada ideal, por apresentar espalhamento entre 25 a 35 cm, borda uniforme e sem segregação, ou seja, por ter apresentado características visuais dentro dos parâmetros ideais estabelecidos nesse trabalho.

Essa análise com 0,5% de aditivo SP demonstrou que há a necessidade de um aumento no teor de aditivo VMA, já que a diminuição de SP poderia prejudicar a mistura, já que esse aditivo é responsável pela fluidez da pasta sem segregação.

Mesmo com dados significativos de que o teor de SP em 0,5% já está acima do esperado com relação à fluidez, foi testado o SP com 0,8% e 1,0%, para a confirmação do descarte total desses dois últimos teores nas demais etapas de ensaio.

5.1.2. Comportamento da mistura com aditivo SP = 0,8%

A Tabela 5.2 mostra os resultados de espalhamento e análise visual, porém para teor de SP de 0,8% e as mesmas variações das relações a/ms (0,95 e 0,67) e VMA (0,2%, 0,4%, 0,6% e 0,8%) e 5% de sílica ativa.

Tabela 5.2 - Resultados numéricos e análise visual para 0,8% do aditivo SP

| FORMULAÇÃO | a/ms | CP ARIS | SÍLICA ATIVA (5%) | ÁGUA | SP | | VMA | | ESPALHAMENTO (cm) | | | TEMPO (s) | ANÁLISE VISUAL | | | |
|------------|------|------------|-------------------------|------|-----|-----|-----|-----|----------------------|-----|-------|--------------|----------------|-----|-----------------------------|-----|
| | | | | | (g) | % | (g) | % | d1 | d2 | Média | | BORDA | | SEPARAÇÃO DE MATERIAL | |
| | | | | | (g) | (g) | (g) | (g) | (g) | (g) | (g) | | (g) | (g) | (g) | (g) |
| 9- | 0,95 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,8 | 1,0 | 0,2 | 34 | 39 | 36,5 | 15:47 | | X | | X |
| 10- | 0,95 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,8 | 2,0 | 0,4 | 35 | 38 | 36,5 | 15:58 | | X | | X |
| 11- | 0,95 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,8 | 3,0 | 0,6 | 35 | 37 | 36,0 | 15:68 | | X | | X |
| 12- | 0,95 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,8 | 4,0 | 0,8 | 36 | 36 | 36,0 | 17:34 | | X | | X |
| 13- | 0,67 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,8 | 1,0 | 0,2 | 40 | 32 | 36,0 | 17:03 | | X | | X |
| 14- | 0,67 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,8 | 2,0 | 0,4 | 36 | 35 | 35,5 | 16:88 | | X | | X |
| 15- | 0,67 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,8 | 3,0 | 0,6 | 37 | 32 | 34,5 | 17:44 | | X | | X |
| 16- | 0,67 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,8 | 4,0 | 0,8 | 29 | 35 | 32,0 | 17:82 | | X | | X |

Legenda: U= Uniforme; D= Desuniforme; SS= sem segregação; CS= com segregação

Para os teores de SP de 0,8% as formulações 9 (a/ms 0,95: VMA 0,2%) e 13 (a/ms 0,67: VMA 0,2%), que se diferenciam somente pela relação a/ms, tiveram aberturas de espalhamento muito próximas (36,5cm e 36,0cm), sendo que só após a inclusão do aditivo VMA é que as pastas foram sendo diferenciadas com relação ao espalhamento. A inclusão de 0,8% de SP para esse caso já demonstra que com esse teor de aditivo o efeito conjunto com o aditivo VMA determina uma mistura com alta fluidez, mas com problemas de segregação (tanto para a relação a/c 1,0 quanto para a/ms 0,67).

Cabe destacar que o teor de aditivo SP de 0,8% não determinou pasta com comportamento ideal, como já havia sido previsto, já que a análise visual de todas as bordas desse grupo de pastas indicou bordas desuniformes e ocorrência de segregação. O espalhamento das pastas 9, 10, 11, 12, 13 e 14 também foi considerado fora dos limites pré-estabelecidos (25 cm a 35 cm).



Figura 5.2 – Visualização das pastas nos ensaios preliminares com o cilindro espanhol.
Formulação 10 (a); formulação 14 (b)

A Figura 5.2 mostra as formulações 10 (a/m_s 0,95; VMA 0,4%) e 14 (a/c 0,70; VMA 0,4%) após o escoamento, com bordas desuniformes e com indícios de segregação. Isso indica que a redução da relação a/c não fez com que, por exemplo, a pasta 14 mostrasse um desempenho ideal mesmo apresentando um teor maior de VMA em comparação com à formulação 10.

Para esse teor de 0,8% de SP pode ser observado que o espalhamento desse grupo de formulações não obteve diferenças significativas. Esse comportamento ocorreu, provavelmente, pelo fato de que os dois aditivos SP e VMA perderam suas respectivas características quanto utilizados em excesso. Por esse motivo não foram executados ensaios com teor de SP de 1,0%

As Figuras 5.3 e 5.4 demonstram a diferença nos dados de espalhamento das pastas para as relações a/m_s de 0,95 e 0,67. Para teores acima de 0,5% do aditivo SP fica claramente evidenciada que a mistura resulta numa pasta líquida e com teores altos de segregação, mostrando também a perda da eficiência dos aditivos quanto acrescenta teores em excesso desse material.

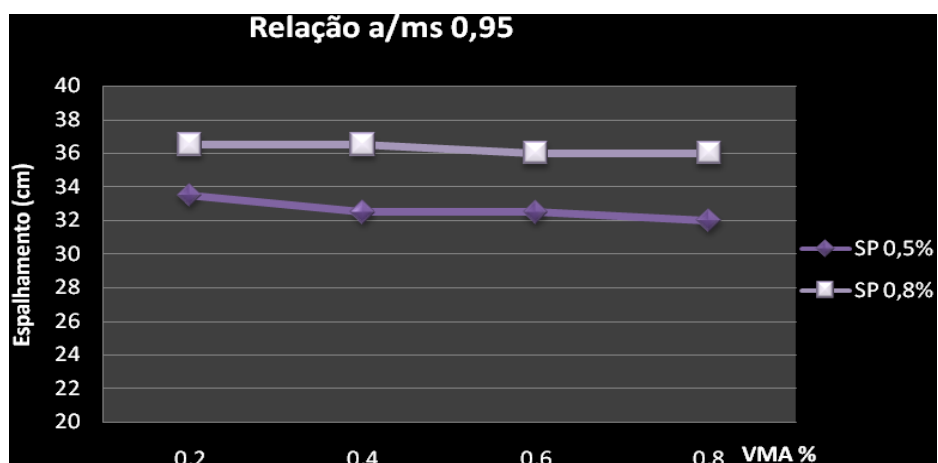


Figura 5.3 – Gráfico comparativo entre os três teores de SP para relação a/ms 0,95 que relaciona espalhamento *versus* teor de aditivo VMA

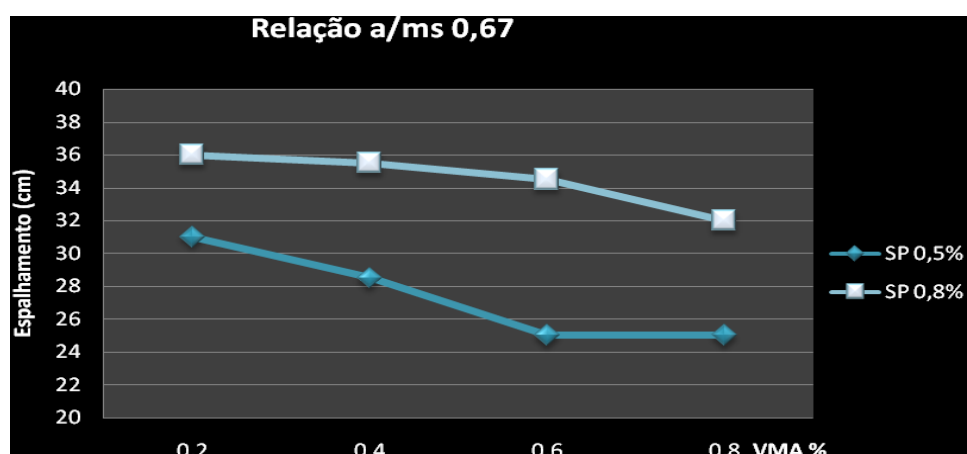


Figura 5.4 – Gráfico comparativo entre os três teores de SP para relação a/ms 0,67 que relaciona espalhamento *versus* teor de aditivo VMA

5.2. ETAPA II: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA PASTA

Para essa etapa de ensaios, conforme descritos no capítulo anterior foram estabelecidos diferentes variáveis dependentes e independentes das apresentadas na etapa I dos estudos preliminares. As conclusões extraídas da etapa preliminar serviram para um novo estudo de variáveis que possibilitou investigar outros quantitativos dos constituintes dentro das faixas já indicadas, além de possibilitar a análise isolada da influência de cada constituinte na mistura. Desta forma, pretende-

se chegar o mais próximo possível da pasta ideal, considerando exclusivamente os materiais da pesquisa e os critérios de análise visual estabelecidos.

O aditivo SP foi fixado em 0,5% em relação ao cimento, já que houve uma ineficiência nos resultados com teores acima do pré-estabelecido no que se refere ao comportamento da pasta.

O aditivo VMA foi fixado em três teores: 0,7%, 0,9% e 1,1% para essa etapa de análise da pasta auto-nivelante. Esses valores foram escolhidos por consequência dos estudos preliminares, Ao contrário da etapa I, que o teor de sílica ativa em substituição ao cimento foi somente de 5%, nessa etapa de pesquisa utilizou-se também além dos 5% mais também 6%, 7% e 8%. Essa extensão nos teores da sílica ativa ocorreu devido ao seu ótimo desempenho na etapa I e pela necessidade de questionar esse se esse desempenho seria melhor ainda ao adicionarmos mais sílica em substituição ao cimento.

Foram executadas três repetições para cada formulação, sendo que os resultados obtidos do ensaio com o cilindro espanhol foram referentes ao espalhamento (em centímetros) e análise visual das bordas e a presença ou não de segregação.

Fazendo uma análise geral da Tabela 5.3 as linhas em verde representam as pastas consideradas ideais dentro dos parâmetros estabelecidos nessa pesquisa, ou seja, pasta sem segregação, com bordas uniformes e abertura de espalhamento que tiveram com valores entre 25 e 35 cm.

Tabela 5.3 - Resultados do espalhamento e da análise visual das pastas formuladas na etapa II da pesquisa

| VMA | FOR | a/ms | CP V ARIS | SÍLICA ATIVA | | ÁGUA | SP | | VMA | | ESP. MÉDIA | ANÁLISE VISUAL | | | |
|------|------|------|--------------|-----------------|-----|------|-----|-----|-----|------|---------------|----------------|---|------------------------------|----|
| | | | | (g) | % | | (g) | % | (g) | % | | BORDA | | SEPARAÇÃO DE MATERIAIS | |
| | | | (g) | (g) | % | (g) | (g) | % | (g) | % | | U | D | SS | CS |
| 0,7% | 25- | 0,85 | 475 | 25 | 5,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 31,8 | | X | | X |
| | 26- | 0,85 | 470 | 30 | 6,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 30,0 | | X | | X |
| | 27- | 0,85 | 465 | 35 | 7,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 29,3 | | X | X | |
| | 28- | 0,85 | 460 | 40 | 8,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,3 | | X | X | |
| | 29- | 0,80 | 475 | 25 | 5,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,8 | X | | X | |
| | 30- | 0,80 | 470 | 30 | 6,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,0 | X | | X | |
| | 31- | 0,80 | 465 | 35 | 7,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,0 | | X | X | |
| | 32- | 0,80 | 460 | 40 | 8,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,0 | X | | X | |
| | 33- | 0,75 | 475 | 25 | 5,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,5 | | X | X | |
| | 34- | 0,75 | 470 | 30 | 6,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 27,3 | X | | X | |
| | 35- | 0,75 | 465 | 35 | 7,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 27,0 | X | | X | |
| | 36- | 0,75 | 460 | 40 | 8,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 26,3 | X | | X | |
| | 37- | 0,70 | 475 | 25 | 5,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,5 | X | | X | |
| | 38- | 0,70 | 470 | 30 | 6,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 26,8 | X | | X | |
| 39- | 0,70 | 465 | 35 | 7,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 25,8 | | X | X | | |
| 40- | 0,70 | 460 | 40 | 8,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 25,0 | X | | X | | |
| 0,9% | 41- | 0,85 | 475 | 25 | 5,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 31,5 | | X | | X |
| | 42- | 0,85 | 470 | 30 | 6,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 29,2 | | X | | X |
| | 43- | 0,85 | 465 | 35 | 7,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 28,3 | | X | X | |
| | 44- | 0,85 | 460 | 40 | 8,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 27,3 | | X | X | |
| | 45- | 0,80 | 475 | 25 | 5,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 28,8 | | X | | X |
| | 46- | 0,80 | 470 | 30 | 6,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 28,3 | | X | | X |
| | 47- | 0,80 | 465 | 35 | 7,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 28,0 | X | | X | |
| | 48- | 0,80 | 460 | 40 | 8,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 26,7 | X | | X | |
| | 49- | 0,75 | 475 | 25 | 5,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 28,2 | X | | X | |
| | 50- | 0,75 | 470 | 30 | 6,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 26,3 | X | | X | |
| | 51- | 0,75 | 465 | 35 | 7,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 25,5 | X | | X | |
| | 52- | 0,75 | 460 | 40 | 8,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 25,3 | X | | X | |
| | 53- | 0,70 | 475 | 25 | 5,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 28,0 | X | | X | |
| | 54- | 0,70 | 470 | 30 | 6,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 26,2 | X | | X | |
| 55- | 0,70 | 465 | 35 | 7,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 25,5 | X | | X | | |
| 56- | 0,70 | 460 | 40 | 8,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 25,3 | X | | X | | |
| 1,1% | 57- | 0,85 | 475 | 25 | 5,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 30,7 | | X | | X |
| | 58- | 0,85 | 470 | 30 | 6,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 28,8 | | X | X | |
| | 59- | 0,85 | 465 | 35 | 7,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 28,2 | | X | X | |
| | 60- | 0,85 | 460 | 40 | 8,0 | 425 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 26,2 | X | | X | |
| | 61- | 0,80 | 475 | 25 | 5,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 28,3 | X | | X | |
| | 62- | 0,80 | 470 | 30 | 6,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 28,2 | | X | | X |
| | 63- | 0,80 | 465 | 35 | 7,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 27,3 | X | | X | |
| | 64- | 0,80 | 460 | 40 | 8,0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 26,5 | X | | X | |
| | 65- | 0,75 | 475 | 25 | 5,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 27,3 | X | | X | |
| | 66- | 0,75 | 470 | 30 | 6,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 26,0 | X | | X | |
| | 67- | 0,75 | 465 | 35 | 7,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 25,0 | X | | X | |
| | 68- | 0,75 | 460 | 40 | 8,0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 24,3 | X | | X | |
| | 69- | 0,70 | 475 | 25 | 5,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 27,0 | X | | X | |
| | 70- | 0,70 | 470 | 30 | 6,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 25,2 | X | | X | |
| 71- | 0,70 | 465 | 35 | 7,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 24,7 | X | | X | | |
| 72- | 0,70 | 460 | 40 | 8,0 | 350 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 24,3 | X | | X | | |

Legenda: FOR = Formulação; U= Borda Uniforme; D= Borda Desuniforme; SS= sem segregação; CS= com segregação; Pasta Ideal

Nos itens a seguir estão apresentadas as análises referentes a cada constituinte responsável pelo comportamento da pasta auto-nivelante.

5.2.1. Influência do Teor de Aditivo Promotor de Viscosidade (VMA)

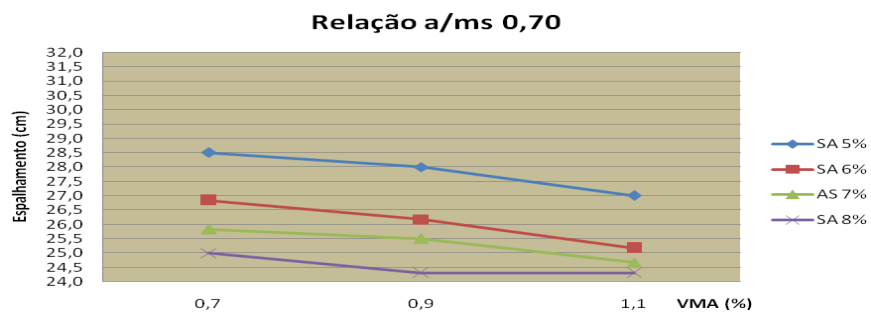
O objetivo da inclusão do aditivo VMA na mistura é para que a pasta se comporte como uma mistura homogênea, estável e resistente à segregação. Sua atuação na mistura acontece a partir de dois mecanismos: adsorção na superfície das partículas finas ou dispersão em água.

Para todos os teores do aditivo VMA, foi observado que a relação a/ms é diretamente proporcional ao diâmetro de espalhamento da pasta, ou seja, o aumento da relação a/ms determinou o aumento no espalhamento da pasta. O aditivo VMA atua na água da mistura promovendo uma viscosidade moderada por meio de ligações químicas, que detém a água e que mantém as partículas finas da mistura suspensas, fornecendo a coesão solicitada.

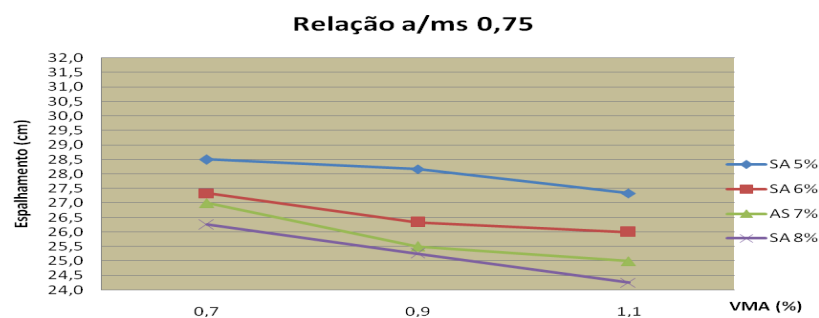
Os valores de espalhamento resultaram em diâmetros muito parecidos, mesmo aumentando os teores de aditivo VMA. Nos gráficos da Figura 5.5 essa afirmação pode ser visualizada.

Os resultados obtidos em relação ao espalhamento das pastas com o acréscimo de VMA demonstram que não houve uma influência significativa deste aditivo, conforme esperado, pois a média do diâmetro das aberturas para cada formulação teve uma pequena variação, demonstrando assim que o teor de VMA não influenciou significativamente no espalhamento das pastas.

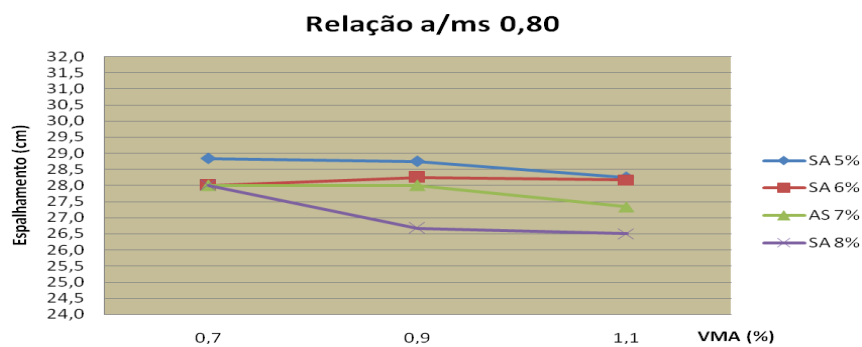
Em se tratando da análise visual, as formulações com aditivo VMA de 0,7%, tiveram como resultado bordas desuniformes nas pastas com relação a/ms de 0,85, o que subentende uma quantidade de água acima do necessário. Para as demais relações a/ms as bordas não apresentaram um comportamento coerente (oscilaram entre bordas uniforme e desuniforme), isso pode ser justificado pelo fato da relação a/ms ainda não estar ajustada para a quantidade de aditivos (VMA 0,7%, SP 0,5%).



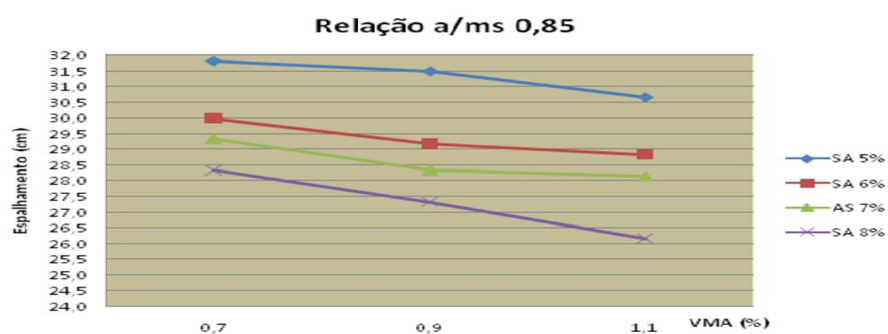
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.5 – Gráfico referente ao espalhamento *versus* VMA. Relação a/ms 0,70 (a); Relação a/ms 0,75 (b); Relação a/ms 0,80 (c); Relação a/ms 0,85 (d)

Para a família de ensaios com VMA de 0,9%, obtiveram-se resultados mais significativos em comparação com o teor de 0,7%. No caso das pastas 43 (a/ms 0,85; SA 7%) e 44 (a/ms 0,85; SA 8%) mesmo com um teor elevado de sílica ativa o comportamento das pastas ainda resultou em bordas desuniformes, porém já sem segregação. Para o restante das pastas analisadas a maioria foi apontada com bordas uniformes e sem segregação, exceto as pastas 45 (a/ms 0,80; SA 7%) e 46 (a/ms 0,80; SA 6%) que tiveram comportamento diferenciado. Essa variação de comportamento pode ter sido causada por problemas de mão de obra do ensaio, variações de características dos materiais utilizados (apesar de serem do mesmo lote), condições ambientais do laboratório (não controladas) e outras.

Nos ensaios para o teor de 1,1%, a maioria das pastas se comportou com bordas uniformes e sem segregação, porém acredita-se que este teor de aditivo para a pasta possa dificultar a obtenção de fluidez adequada para a argamassa auto-nivelante (considerando 0,5% de SP). Esta suposição se baseia nos diâmetros de espalhamento apresentados pelas pastas com 1,1% de VMA, os menores atingidos em todo o experimento. Teores elevados de VMA causam além de coesão excessiva, problemas como retardamento de pega, alteração no desenvolvimento da resistência nas primeiras idades e aumento de retração por secagem.

A Figura 5.6 apresenta o comportamento de três pastas após o escoamento no cilindro espanhol com o objetivo de mostrar visualmente a evolução do comportamento dessas pastas até a chegada na pasta ideal. A formulação 41 (a/ms 0,85; SA 5%), teve como resultado uma pasta com borda desuniforme com segregação, já a formulação 44 (a/ms 0,85 SA 8%) foi considerada ainda com borda desuniforme, porém sem segregação. A formulação 49 (a/ms 0,75; SA 5%) já foi considerada pasta ideal, mesmo para uma porcentagem de 5% de SA, porém nesse caso ela foi dosada com a/ms de 0,75.

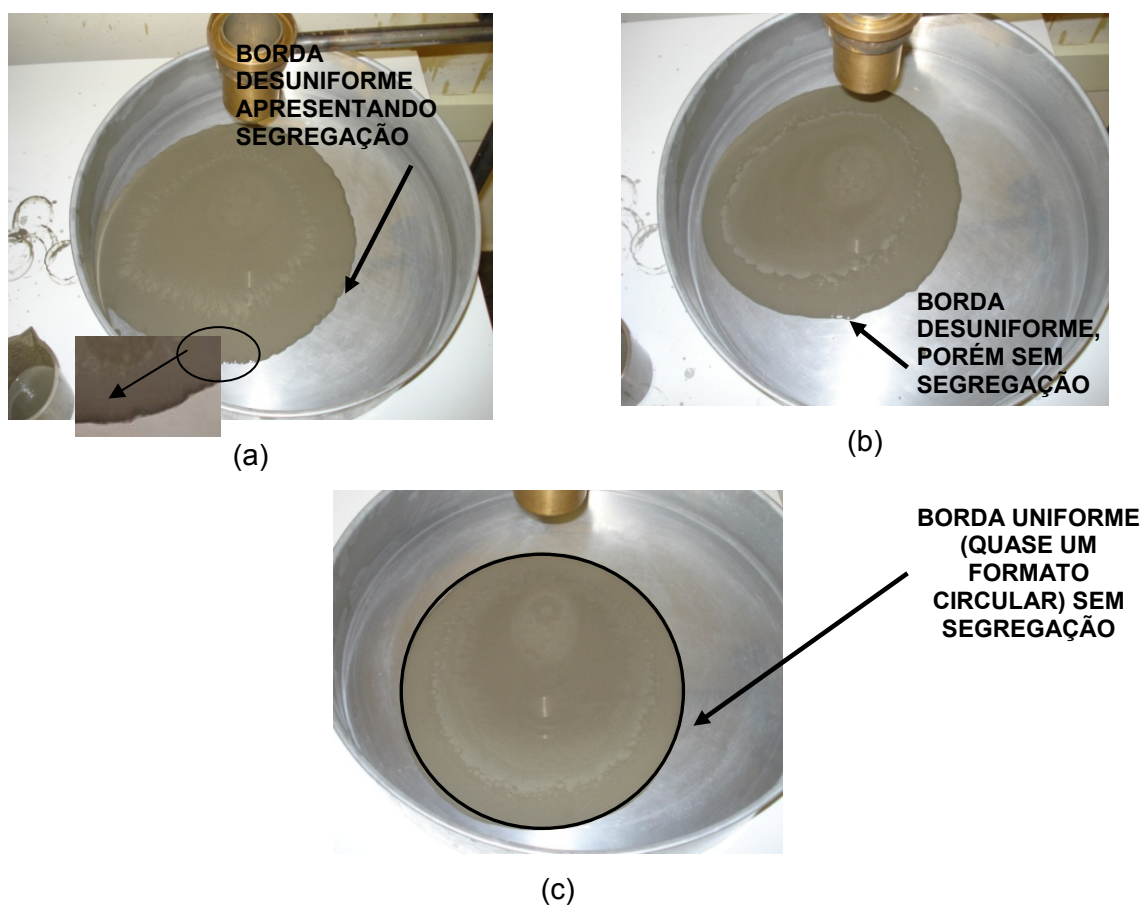
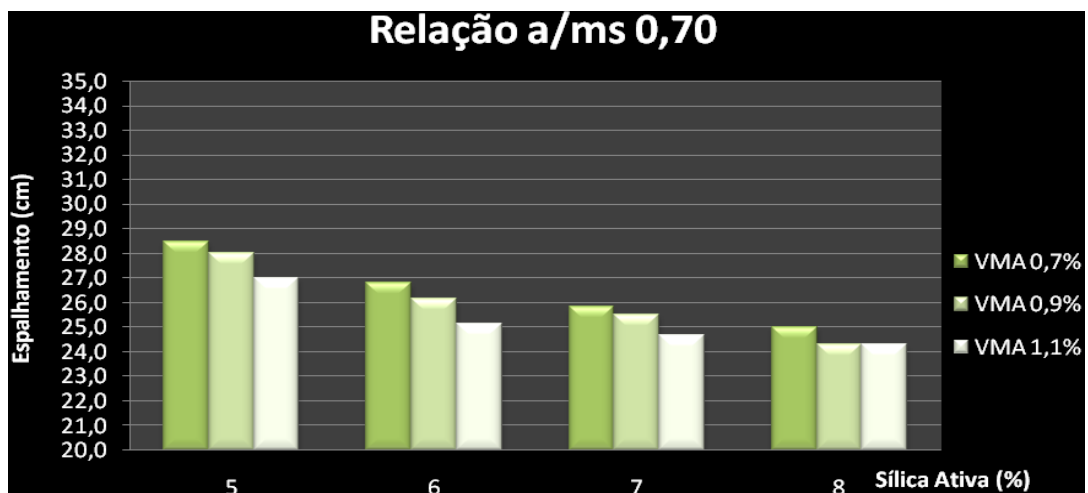


Figura 5.6 – Visualização das pastas após o escoamento com VMA 0,9%. Formulação 41 (a); formulação 44 (b); formulação 49 (c)

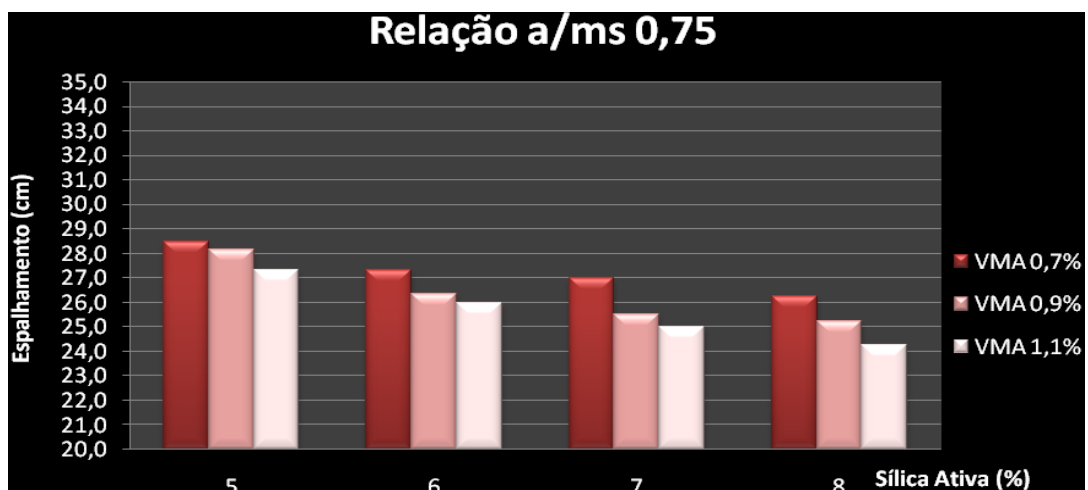
De um modo geral, ao se analisar a influência do teor de aditivo VMA na mistura observou-se um desempenho dentro do esperado para a família de formulações com teor de 0,9%. Esse desempenho é comparado aos outros teores de aditivo VMA (0,7% e 1,1%), que tiveram resultados com oscilações, sem uma coerência. O resultado apresentado para os três teores de aditivos VMA era que quando houvesse uma diminuição na relação a/ms necessariamente diminuiria também o valor do espalhamento. Já com relação ao aumento na quantidade de sílica ativa o esperado era uma diminuição de espalhamento.

5.2.2. Influência do Teor de Sílica Ativa (SA)

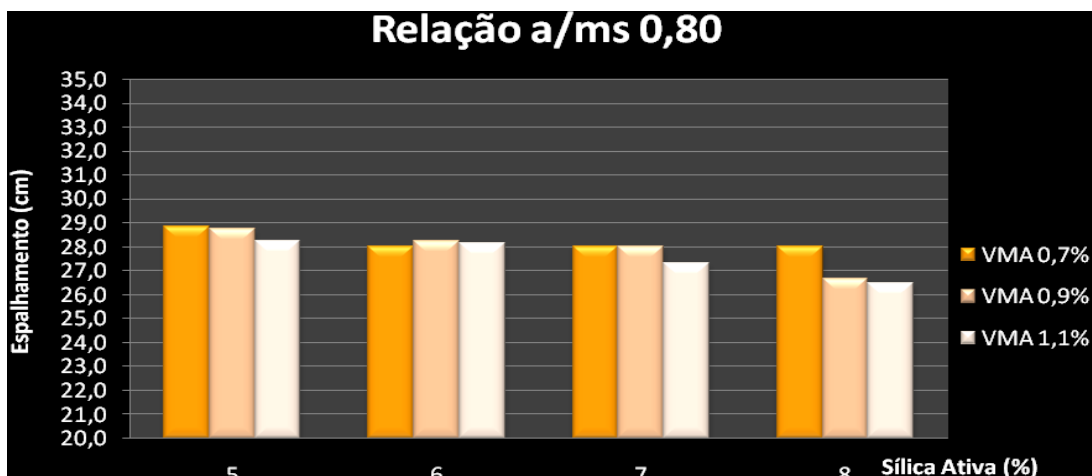
A Figura 5.7 apresenta os gráficos com a relação espalhamento *versus* sílica ativa para as quatro relações a/ms e os três teores de VMA. A partir desses gráficos é possível observar a diferença significativa entre os espalhamentos das misturas com 5% de sílica ativa e 8% de sílica ativa.



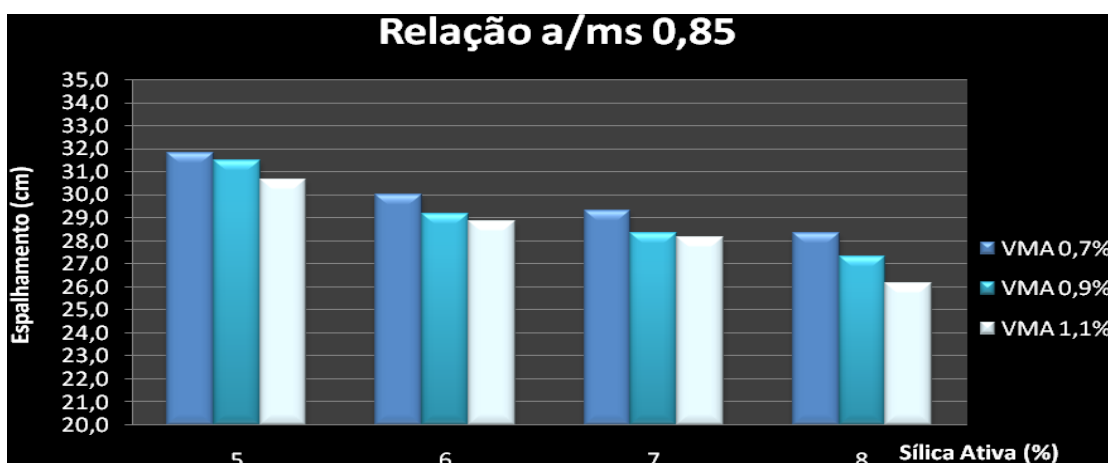
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.7 – Relação verificada entre o espalhamento *versus* a/ms. Sílica ativa 5% (a); sílica ativa 6% (b); sílica ativa 7% (c); sílica ativa 8% (d)

No que se refere à influência da sílica ativa, verificou-se que quanto maior a quantidade desse teor em substituição ao cimento, menor é a abertura de espalhamento da mistura, independente da relação a/ms e teores de VMA (para os teores avaliados nessa pesquisa). Cabe destacar que a análise que está sendo apresentada está tomando como base apenas o impacto dos constituintes sob o espalhamento da mistura. No item 5.2.3 será avaliada a influencia da mistura na

pasta ideal, logo não apenas o espalhamento será avaliado mais também a análise visual da pasta escoada (bordas e ocorrência de segregação).

A sílica ativa, por se tratar de um material com área específica menor do que os demais constituintes, logo, com um número maior de partículas na mistura acabam preenchendo os espaços vazios com maior eficiência, facilitando a hidratação com a água e a reação com os aditivos em questão. Esse fenômeno faz com que a mistura possua uma maior viscosidade, resultando na diminuição do diâmetro de espalhamento da pasta escoada a cada aumento de teor de sílica ativa. Esse efeito da sílica ativa nas pastas pode ser observado nos gráficos da Figura 5.8.

Na análise visual feita com a pasta escoada, a sílica ativa obteve resultados satisfatórios com o aumento gradativo de sua porcentagem na mistura em substituição ao cimento. Somente para a relação a/ms 0,85 é que a sílica ativa não conseguiu fazer com que a pasta se tornasse ideal, nem mesmo para o teor mais alto dela em substituição ao cimento (8%).

Para se analisar a influência da relação a/ms a Figura 5.8 indica quatro pastas com mesma formulação (SA 7%; VMA 0,9%), exceto a relação a/ms que foi aumentando conforme indicado nas setas das figuras. As figuras mostram a ineficiência da relação a/ms de 0,85, mesmo com o teor de 7% de sílica ativa. O mesmo fenômeno ocorreu para os demais teores de sílica ativa (5%, 6% e 8%).

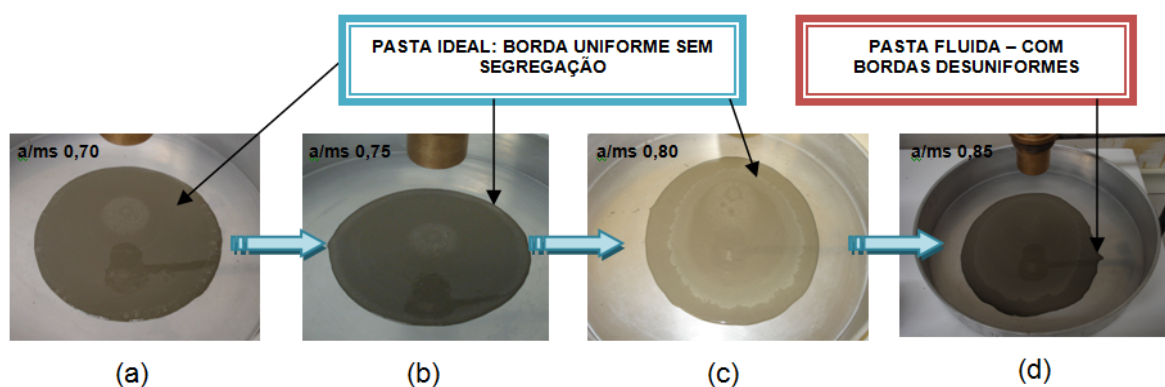


Figura 5.8 – Impacto do comportamento das pastas com o aumento da relação a/ms.

Formulação 55 (a); formulação 51 (b); formulação 47 (c); formulação 43 (d)

5.2.3. Influência da formulação da mistura na Pasta Ideal para Argamassa Auto-Nivelante

As pastas ideais identificadas nessa pesquisa foram apresentadas sob os diversos teores de adições, aditivos, cimento e relação a/ms, porém alguns desses teores foram identificados como mais adequados para a pasta destinada à argamassa auto-nivelante. O tipo do material empregado também é um fator de grande importância, já que se alterarmos algum desses componentes os resultados podem ter variações.

Para as adições do aditivo VMA percebeu-se que o teor de 0,9% foi o mais indicado, visto que teores abaixo (0,7%) não apresentaram comportamento adequado para garantir resistência à segregação, e fluidez na mistura. Em contrapartida a adição de 1,1% do aditivo VMA causou uma coesão excessiva na mistura, o que também não é o indicado, já que uma das principais propriedades da pasta estudada é sua elevada fluidez sem a perda de estabilidade.

A sílica ativa foi o constituinte que mais influenciou no espalhamento da mistura. O aumento do teor de sílica ativa determinou a redução do espalhamento da mistura, mais até do que o próprio aditivo VMA.

A partir da análise visual foi possível analisar que o aditivo VMA foi o constituinte que teve maior influência sobre a segregação e o tipo de borda das misturas. Apesar disso a sílica ativa e a relação a/ms também mostraram certa influência sobre esses parâmetros visuais para a pasta ideal. Uma análise microscópica das pastas no estado fresco poderia auxiliar na mensuração do impacto desses constituintes na segregação e na formação de borda. Essa avaliação não foi escopo desse trabalho e sugere-se a sua execução para trabalhos futuros.

Para confirmar a afirmação de que a sílica ativa teve um maior desempenho com relação ao aditivo VMA, foram desenvolvidos novos ensaios com o cilindro espanhol, de grande valia na demonstração da influência mais significativa da sílica ativa.

Os valores fixos, variáveis dependentes ou independentes estão resumidamente apresentadas a seguir:

Parâmetros Fixos:

↪ Aditivo SP: 0,5%;

Variáveis Independentes

↪ Relação a/ms: 0,80 e 0,75;

↪ Sílica Ativa: 10%, 12% e 15% (teores muito acima do recomendado pelo fabricante);

↪ Aditivo VMA: 0,0%, 1,3% e 3%;

Variáveis Dependentes:

↪ Espalhamento: Resultados em cm;

↪ Análise Visual: Borda Uniforme ou Desuniforme;

↪ Análise Visual: Com ou sem segregação.

A Tabela 5.4 demonstra os resultados de espalhamento e análise visual para a nova dosagem de parâmetros:

Tabela 5.4 - Resultados do espalhamento e da análise visual das pastas formuladas na etapa II da pesquisa

| FOR | a/ms | CP V ARI RS | SÍLICA ATIVA | | ÁGUA | SP | | VMA | | ESP. | ANÁLISE VISUAL | | | |
|-----|------|-------------------|-----------------|----|-------|-----|-----|------|-----|-------|----------------|---|------------------------------|----|
| | | | | | | | | | | | BORDA | | SEPARAÇÃO DE MATERIAIS | |
| | | | | | | | | | | | U | D | SS | CS |
| | | (g) | (g) | % | (g) | (g) | % | (g) | % | MÉDIA | | | | |
| 73- | 0,80 | 500 | 50 | 10 | 440 | 2,5 | 0,5 | 0,0 | 0 | 29,5 | X | | X | |
| 74- | 0,80 | 490 | 60 | 12 | 440 | 2,5 | 0,5 | 0,0 | 0 | 28,0 | X | | X | |
| 75- | 0,80 | 475 | 75 | 15 | 440 | 2,5 | 0,5 | 0,0 | 0 | 24,7 | X | | X | |
| 76- | 0,75 | 500 | 50 | 10 | 412,5 | 2,5 | 0,5 | 0,0 | 0 | 26,5 | X | | X | |
| 77- | 0,75 | 490 | 60 | 12 | 412,5 | 2,5 | 0,5 | 0,0 | 0 | 26,0 | X | | X | |
| 78- | 0,75 | 475 | 75 | 15 | 412,5 | 2,5 | 0,5 | 0,0 | 0 | 23,0 | X | | X | |
| 79- | 0,80 | 500 | 0,0 | 0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 8,0 | 1,6 | 31,5 | | X | | X |
| 80- | 0,75 | 500 | 0,0 | 0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 8,0 | 1,6 | 32,5 | | X | | X |
| 81- | 0,80 | 500 | 0,0 | 0 | 400 | 2,5 | 0,5 | 15,0 | 3,0 | 32,5 | | X | | X |
| 82- | 0,75 | 500 | 0,0 | 0 | 375 | 2,5 | 0,5 | 15,0 | 3,0 | 33,0 | | X | | X |

Legenda: FOR = Formulação; U= Borda Uniforme; D= Borda Desuniforme; SS= sem segregação; CS= com segregação; Pasta Ideal

De acordo com os resultados apresentados foi observada uma melhora significativa nas propriedades da pasta auto-nivelante no estado fresco com o acréscimo de sílica ativa em substituição ao cimento, mesmo sem a adição do aditivo VMA, nas duas relações a/ms (0,80 e 0,75). A formulação 75 e 78 só não foram enquadradas como formulações ideais pelo fato de apresentarem uma

viscosidade muito maior do que a viscosidade ideal para pastas auto-nivelante (espalhamento inferior a 25cm).

Já com relação à inclusão do aditivo VMA nem o acréscimo dele foi necessário para se conseguir altas viscosidades. Como já foram explanados no referencial bibliográfico dessa pesquisa, os aditivos não têm total eficiência com teores muito acima do pré-estabelecido, ou seja, há um limite para que sua ação seja eficaz. Porém nem mesmo os limites de ação do aditivo VMA superaram a maior influência da sílica ativa para a pasta auto-nivelante, para esse caso específico, podendo em pesquisas futuras novamente serem testados.

5.3. ETAPA III: ENSAIOS COM O VISCOSÍMETRO

Para os ensaios com o viscosímetro foram selecionados as pastas que apresentaram melhor desempenho nos itens referente ao diâmetro do espalhamento (entre 25 e 35 cm), análise visual quanto à forma da borda da pasta escoada (uniforme) e análise visual quanto a separação dos materiais (com ou sem segregação) que resulta na pasta ideal conforme já demonstrada.

As pastas eleitas para o ensaio com o viscosímetro, foram as que obtiveram um maior número de formulações ideais. São elas: a/ms 0,80 e 0,75 e o VMA de 0,9%. Já com relação aos teores de sílica ativa foram realizados ensaios para os quatro teores (5%, 6%, 7% e 8%), justificado pela eficiência nos ensaios com o cilindro espanhol quando se refere a viscosidade das pastas com seu acréscimo.

Para os ensaios obtidos através do viscosímetro foram relacionados os parâmetros reológicos como a viscosidade (η) *versus* taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), representado pelas curvas em cor de rosa, e a tensão de cisalhamento (τ) *versus* taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) representado pelas curvas em laranja. A taxa de cisalhamento, como já foi mencionada varia de 1 a 50s⁻¹.

De acordo com os gráficos das Figuras 5.9 e 5.10, todas as com as formulações já demonstradas tiveram um comportamento pseudoplásticos, ou seja, um decréscimo da viscosidade com o acréscimo da taxa de cisalhamento. A tensão de escoamento representa o ponto limite onde o material trabalha no regime elástico.

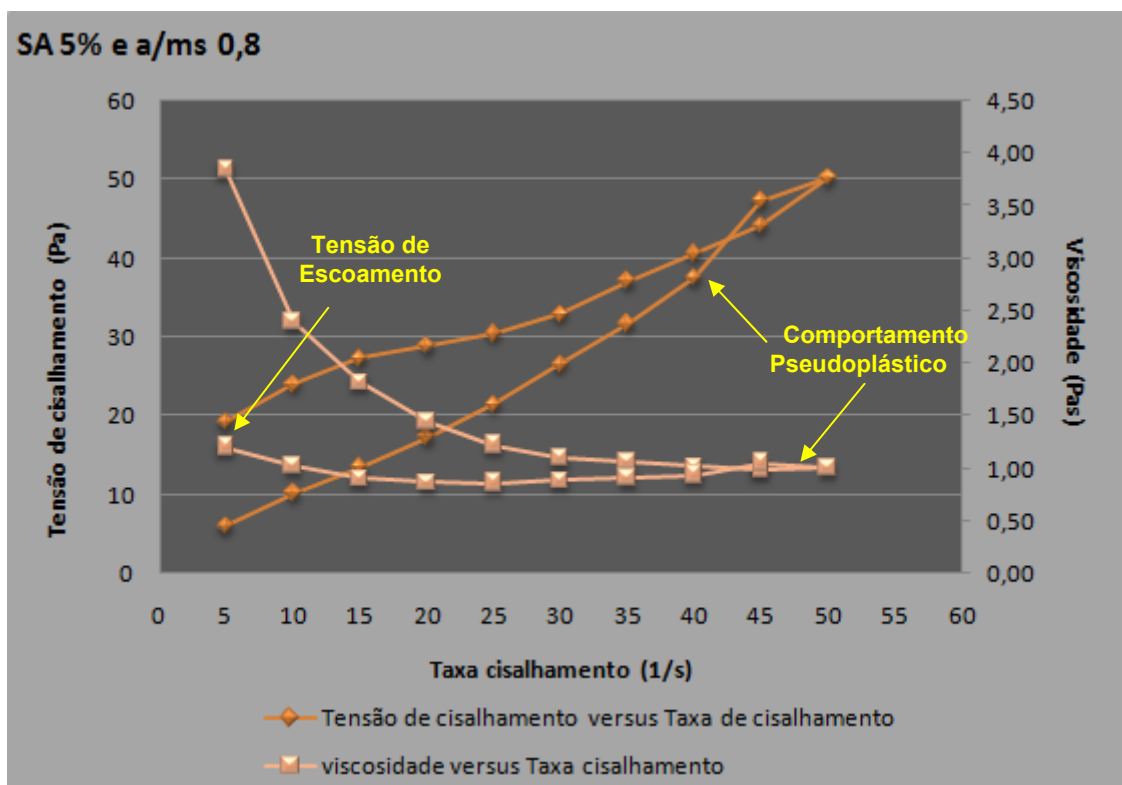
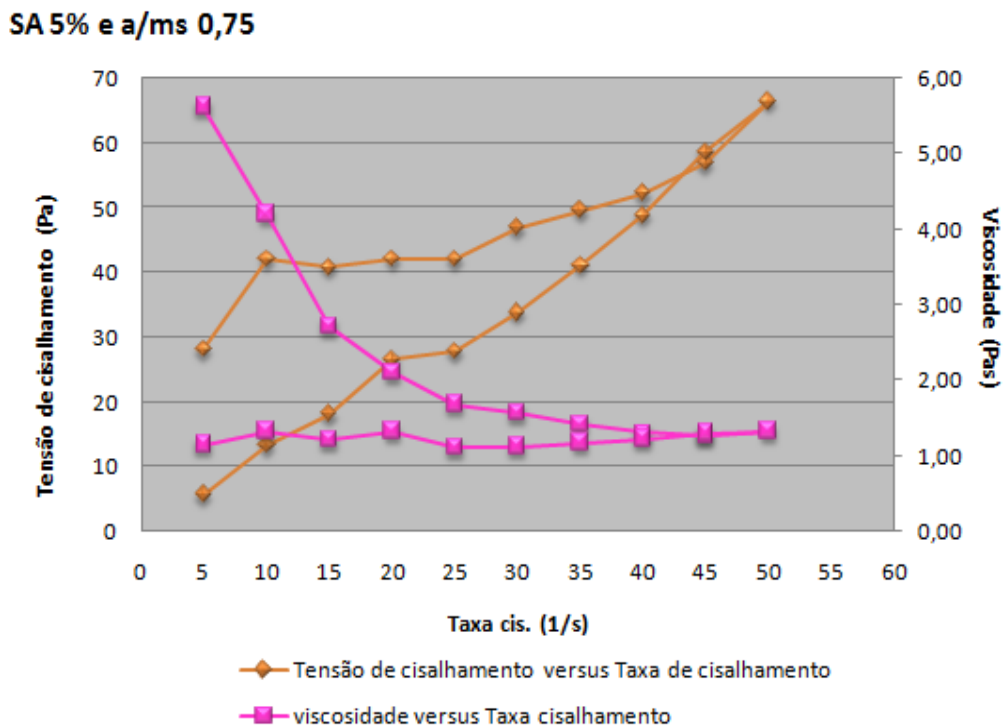
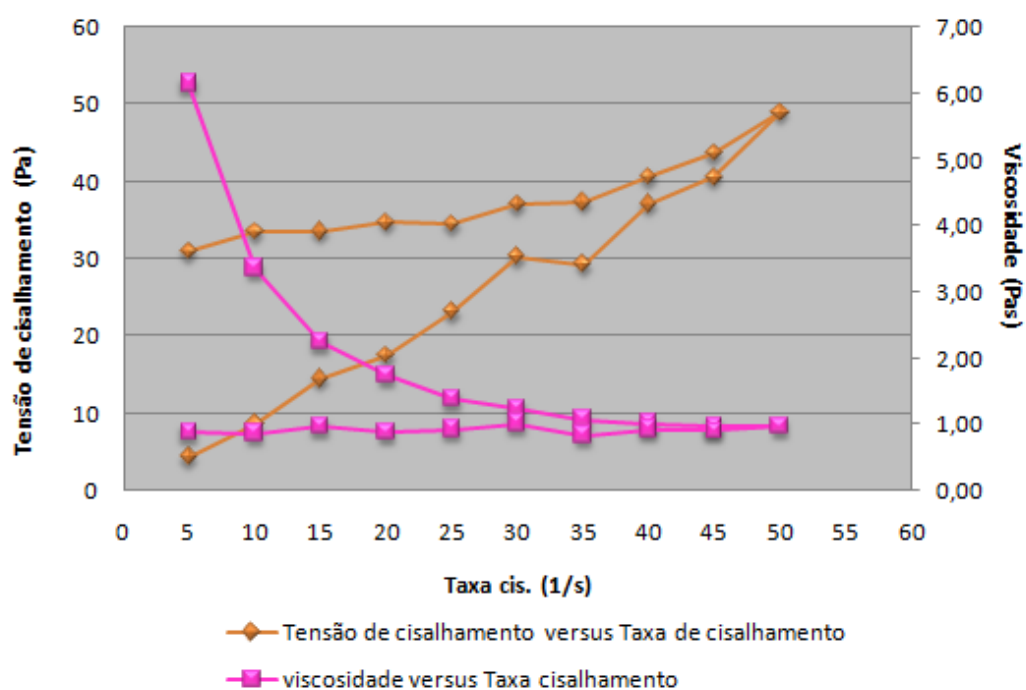


Figura 5.9 – Gráfico referente aos resultado do viscosímetro quanto a viscosidade *versus* taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento para uma formulação de SA 5% e a/ms 0,8



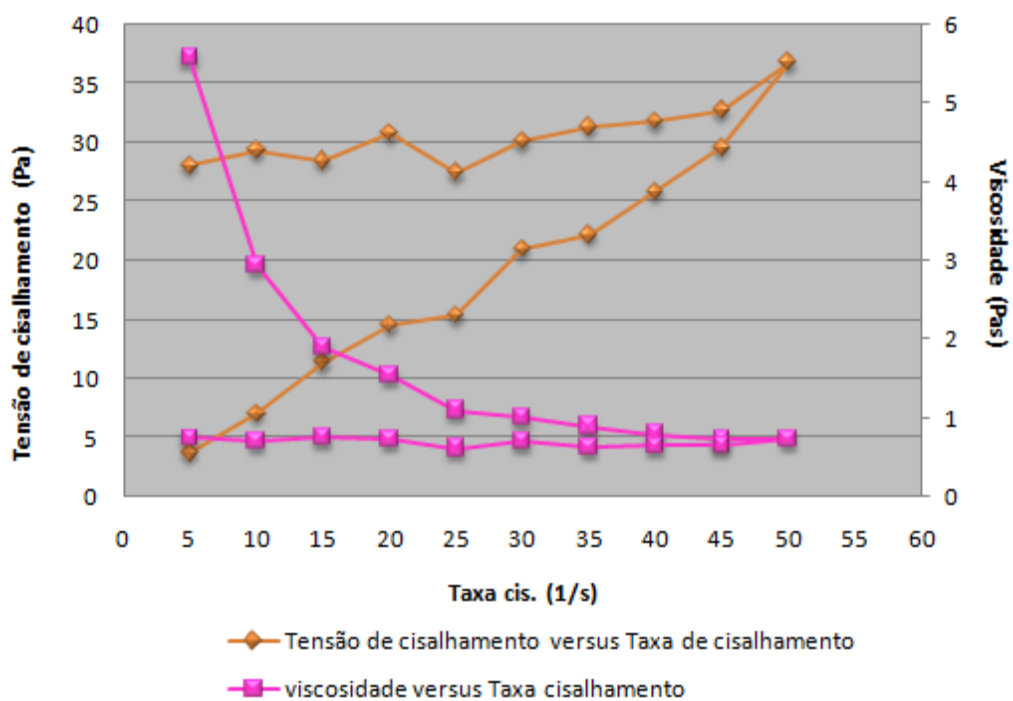
(a)

SA 6% e a/ms 0,8



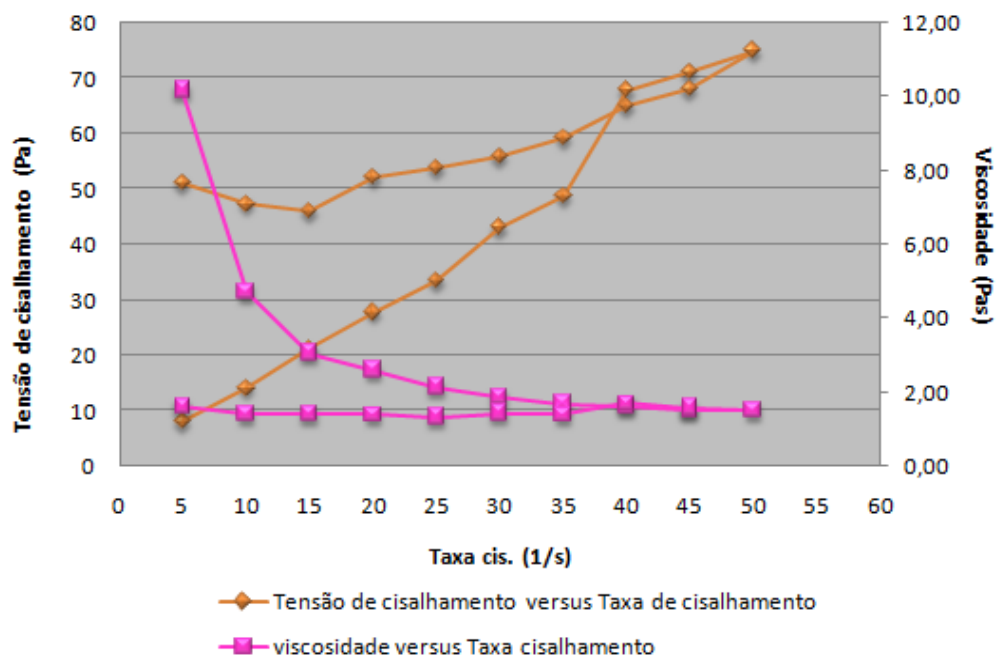
(b)

SA 6% e a/ms 0,75



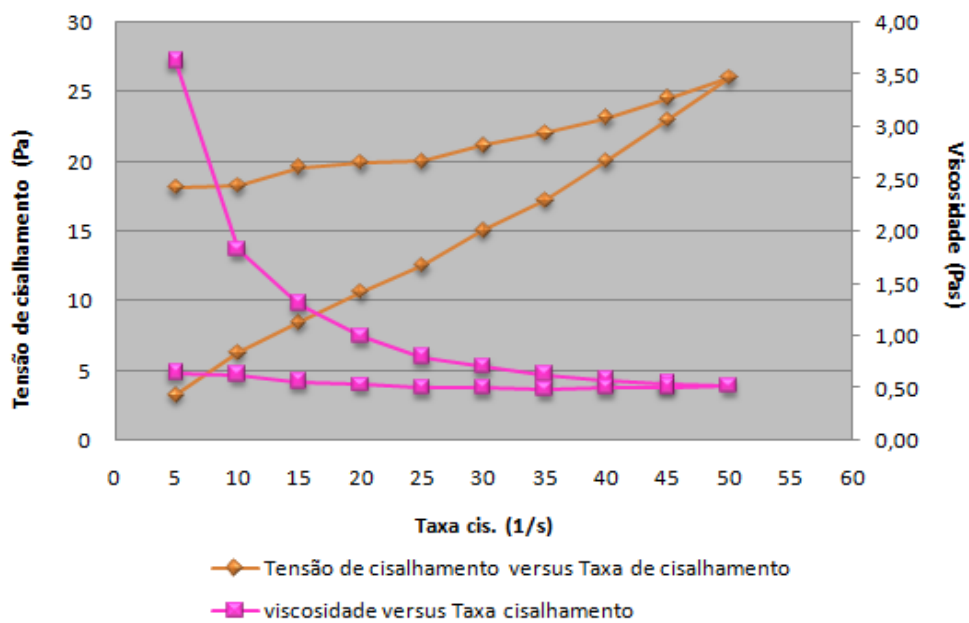
(c)

SA 7% e a/ms 0,8



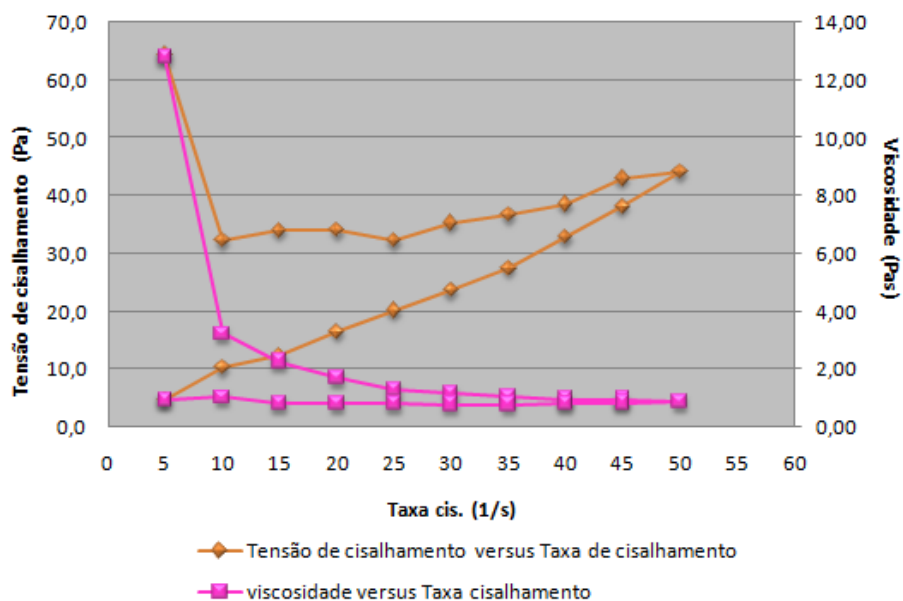
(d)

SA 7% e a/ms 0,75



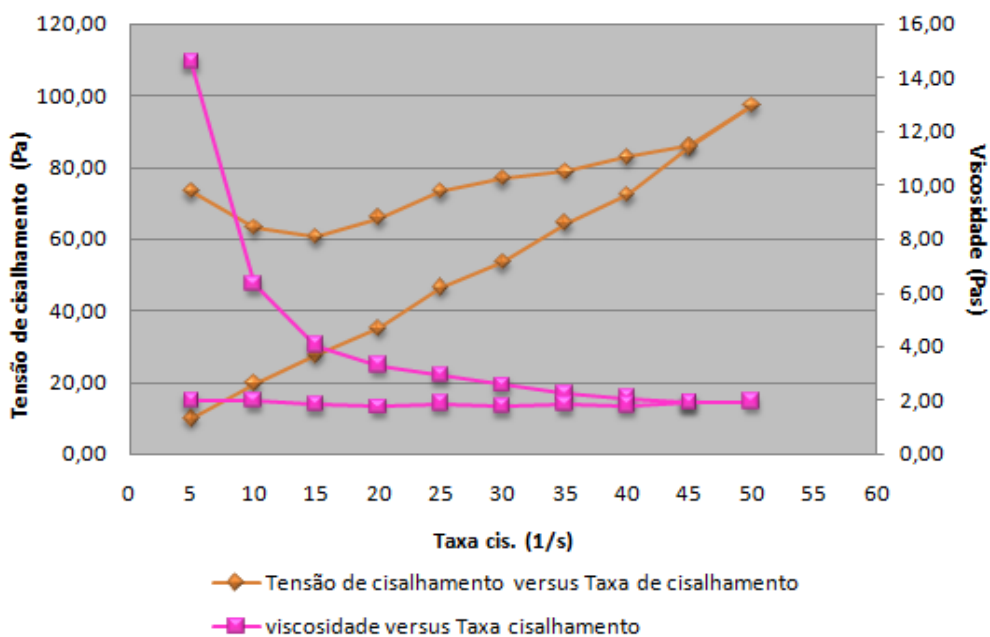
(e)

SA 8% e a/ms 0,8



(f)

SA 8% e a/ms 0,75



(g)

Figura 5.10 – Gráfico referente aos resultado do viscosímetro quanto a viscosidade *versus* taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento. Formulação SA 5% e a/ms 0,75(a); formulação SA 6% e a/ms 0,80 (b); formulação SA 6% e a/ms 0,75 (c); formulação SA 7% e a/ms 0,80 (d); formulação SA 7% e a/ms 0,75 (e); formulação SA 8% e a/ms 0,80 (f); formulação SA 8% e a/ms 0,75 (g)

As pastas com porcentagens de sílica ativa de 8% (η 14,61 Pas) foram as com resultados de viscosidades mais elevadas, sendo que conforme os teores de sílica ativa foram diminuindo a viscosidade também diminuiu, até chegar ao menor valor de η 3,85 Pas para a pasta com 5% de sílica ativa.

A adição da sílica ativa em pastas e argamassas proporciona um preenchimento de vazios, e ainda espaços entre agregados e o produto de hidratação, densificando a matriz e justificando o aumento da viscosidade para altas porcentagens de sílica ativa.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas com o trabalho, com base no programa experimental que compreendeu 72 formulações de pasta de cimento visando a sua utilização em argamassa auto-nivelante. Apesar das conclusões mencionadas no capítulo 5 se reportarem aos materiais utilizados na pesquisa, as mesmas contribuíram para parametrizar quantitativos dos constituintes da mistura e a sua influência na fluidez e resistência à segregação da pasta, características fundamentais para o adequado desempenho da argamassa autonivelante. Além disso, este trabalho contribuiu também na proposição de um procedimento para a formulação de pasta para argamassa auto-nivelante e pode ser aplicado para pastas com outros tipos e teores de cimento, sílica e aditivos, pois auxiliará a avaliação do desempenho da formulação. Esse procedimento apresenta o equipamento denominado Cilindro Espanhol que proporcionará o escoamento da pasta e, a partir dos critérios de análise visual da pasta escoada e da medida de escoamento, permitirá a determinação da pasta denominada ideal para os materiais que forem utilizados.

A análise preliminar dos resultados teve como objetivo avaliar alguns teores de aditivos SP e VMA para que se obtivessem parâmetros mais determinantes da formulação, pois como se trata de produto de inovação tecnológica os parâmetros tiveram como base indicativos para argamassas e concretos convencionais, logo certamente tiveram que ser ajustados em função das características da pasta com alta fluidez. Os teores verificados nessa etapa preliminar resultaram em valores muito altos de aditivo SP (0,8% e 1,0%) e muito baixos de aditivos VMA (0,2% a 0,65%), fazendo com que resultasse numa fluidez da pasta acima do indicado e com presença de segregação.

A partir dos teores de aditivos ajustados na etapa preliminar, foram observados resultados satisfatórios com o aumento do teor de VMA, principalmente nas formulações com teor de 0,9% (VMA) nas quais o comportamento resultou em pastas ideais, ou seja, fluida e sem segregação. O cuidado que deve ser tomado é com uma quantidade excessiva desse aditivo, por exemplo, observado com o teor de 1,1%, já que nesse caso houve uma perda de fluidez da mistura, dificultando formulações que resultassem em pastas ideais. Cabe destacar que nesta etapa preliminar de ensaios foi verificado que o teor mais indicado de SP deveria ser 0,5%, frente ao comportamento das pastas formuladas com os materiais da pesquisa.

O experimento indicou também a influência da adição de sílica ativa na fluidez da pasta (o aumento do teor de sílica reduziu a fluidez), considerando-se a presença de aditivo SP e VMA na mistura em vários teores avaliados. Os resultados de espalhamento das pastas estudadas mostraram que o aumento do teor de sílica indicou uma redução do espalhamento da pasta, resultando também em pouca segregação. Já nos ensaios com o viscosímetro esse fenômeno também se repetiu, ou seja, as pastas mais viscosas foram àquelas formuladas com maior teor de sílica ativa em substituição ao cimento.

Foi observado nos resultados apresentados referente ao acréscimo de teores de sílica ativa em substituição ao cimento, que o diâmetro de espalhamento da pasta escoada apresentou resultados consideravelmente menores em comparação aos teores de VMA acrescidos nas misturas. Essa análise detectada sugere para trabalhos futuros, uma análise do comportamento da pasta sem o acréscimo de VMA, analisando o que a retirada do aditivo VMA poderá impactar nas novas formulações. Essa observação feita nesse trabalho se restringe ao estado fresco, pois é possível que haja impactos diferentes nas propriedades da pasta ou da argamassa no estado endurecido, quando da retirada do aditivo VMA e, em contrapartida, do acréscimo do teor de sílica.

O equipamento cilindro espanhol utilizado na pesquisa demonstrou eficiência em sua utilização. Como já foi demonstrado ele é um equipamento simples, de fácil manuseio, demonstrando os resultados de uma forma clara ao operador. Ainda há a necessidade de estudos mais avançados sobre esse equipamento principalmente quanto a sua eficiência em relação ao diâmetro ideal presente na parte inferior do copo, a altura mais propícia do copo ao recipiente, a quantidade adequada de

material para que haja uma energia suficiente no momento de queda do material, entre outras.

Apesar do procedimento de mistura não ter sido o mesmo executado nos ensaios da pasta com o cilindro espanhol e nos ensaios com o viscosímetro, já que este foi executado manualmente e o primeiro na argamassadeira, os resultados referentes à viscosidade *versus* taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento demonstraram um comportamento reológico característico para todas as formulações, um comportamento denominado pseudoplástico.

O procedimento adotado na confecção das pastas cimentícias para argamassas auto-nivelante foi considerado eficaz, considerando os materiais específicos da pesquisa, já que se conseguiu estabelecer parâmetros de classificação entre as pastas e teores mais adequados dos constituintes, o que proporcionou uma seleção apropriada das pastas cimentícias, visando a pasta ideal.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudo do comportamento de pastas cimentícias com outros tipos de materiais, como por exemplo, outros tipos de cimentos, aditivos com outros compostos, e outras adições (fíler calcário, pozolana, metacaulim etc.);

- ↳ A eficiência do equipamento cilindro espanhol para outras formulações, com diferentes teores de constituintes;
- ↳ Comparação dos resultados com o cilindro espanhol com o equipamento cone de marsh, para poder retirar parâmetros entre ambos;
- ↳ Estudo da argamassa auto-nivelante, no estado fresco e endurecido;
- ↳ Estudo da aplicação dessa argamassa auto-nivelante no contrapiso;
- ↳ Busca de novos equipamentos para avaliar a auto-adensabilidade da argamassa auto-nivelante.

ANEXO 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES COM O CILINDRO ESPANHOL

| a/c | CP V ARI RS | SA (5%) | ÁGUA | | SP | | VMA | | ESPALHAMENTO (cm) | | | TEMPO seg. | BORDAS | | SEPARAÇÃO DE MATERIAIS | |
|-----|-------------------|------------|------|-----|-----|-----|-----|----|----------------------|------|-------------|---------------|--------|---|------------------------------|----|
| | | | G | g | g | % | g | % | d1 | d2 | Média | | U | D | SS | CS |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,5 | 1,0 | 0,2 | 32 | 35 | 33,5 | 00:00:17:34 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,5 | 2,0 | 0,4 | 33 | 32 | 32,5 | 00:00:17:72 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,5 | 3,0 | 0,6 | 33 | 32 | 32,5 | 00:00:17:80 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 2,5 | 0,5 | 4,0 | 0,8 | 32 | 32 | 32,0 | 00:00:17:34 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 1,0 | 0,2 | 29 | 33 | 31,0 | 00:00:17:72 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 2,0 | 0,4 | 27 | 30 | 28,5 | 00:00:17:37 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,0 | 0,6 | 26 | 24 | 25,0 | 00:00:17:68 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,0 | 0,8 | 26 | 24 | 25,0 | 00:00:16:92 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 4,0 | 0,8 | 1,0 | 0,2 | 34 | 39 | 36,5 | 00:00:15:47 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 4,0 | 0,8 | 2,0 | 0,4 | 35 | 38 | 36,5 | 00:00:15:58 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 4,0 | 0,8 | 3,0 | 0,6 | 35 | 37 | 36,0 | 00:00:15:68 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 4,0 | 0,8 | 4,0 | 0,8 | 36 | 36 | 36,0 | 00:00:17:34 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 4,0 | 0,8 | 1,0 | 0,2 | 40 | 32 | 36,0 | 00:00:17:03 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 4,0 | 0,8 | 2,0 | 0,4 | 36 | 35 | 35,5 | 00:00:16:88 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 4,0 | 0,8 | 3,0 | 0,6 | 37 | 32 | 34,5 | 00:00:17:44 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 4,0 | 0,8 | 4,0 | 0,8 | 29 | 35 | 32,0 | 00:00:17:82 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 5,0 | 1,0 | 1,0 | 0,2 | 34 | 40 | 37,0 | 00:00:15:37 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 5,0 | 1,0 | 2,0 | 0,4 | 40 | 33 | 36,5 | 00:00:15:19 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 5,0 | 1,0 | 3,0 | 0,6 | 40 | 33 | 36,5 | 00:00:15:29 | | | | | |
| 1,0 | 500 | 25 | 500 | 5,0 | 1,0 | 4,0 | 0,8 | 36 | 36 | 36,0 | 00:00:17:34 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 5,0 | 1,0 | 1,0 | 0,2 | 40 | 34 | 37,0 | 00:00:17:00 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 5,0 | 1,0 | 2,0 | 0,4 | 34 | 35 | 34,5 | 00:00:16:89 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 5,0 | 1,0 | 3,0 | 0,6 | 36 | 30 | 33,0 | 00:00:16:34 | | | | | |
| 0,7 | 500 | 25 | 350 | 5,0 | 1,0 | 4,0 | 0,8 | 36 | 30 | 33,0 | 00:00:16:95 | | | | | |

ANEXO 2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O CILINDRO ESPANHOL

RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CILINDRO ESPANHOL

| a/c | a/ms | CP V ARI RS | SA | ÁGUA | SP | | VMA | | ESP 1 (cm) | TEMPO (1) | ESP 2 (cm) | TEMPO (2) | ESP 3 (cm) | TEMPO (3) | ESP (cm) | BORDAS | | SEPARAÇÃO DE MATERIAIS | |
|------|------|-------------------|----|------|-----|-----|-----|-----|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|----------|--------|---|------------------------------|----|
| | | | | | (g) | % | (g) | % | MÉDIA | s | MÉDIA | (s) | MÉDIA | (s) | MÉDIA | U | D | SS | CS |
| 0,89 | 0,85 | 475 | 25 | 425 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 31,5 | 00:00:15:88 | 32,5 | 00:00:16:36 | 31,5 | 00:00:16:66 | 31,8 | | | | |
| 0,89 | 0,85 | 475 | 25 | 425 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 31,5 | 00:00:16:34 | 32,0 | 00:00:16:98 | 31,0 | 00:00:16:60 | 31,5 | | | | |
| 0,89 | 0,85 | 475 | 25 | 425 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 30,0 | 00:00:16:37 | 30,5 | 00:00:17:31 | 31,5 | 00:00:16:48 | 30,7 | | | | |
| 0,90 | 0,85 | 470 | 30 | 425 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,5 | 00:00:16:06 | 30,5 | 00:00:17:57 | 31,0 | 00:00:16:32 | 30,0 | | | | |
| 0,90 | 0,85 | 470 | 30 | 425 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 28,0 | 00:00:16:10 | 29,0 | 00:00:16:73 | 30,5 | 00:00:16:10 | 29,2 | | | | |
| 0,90 | 0,85 | 470 | 30 | 425 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 27,0 | 00:00:16:51 | 29,5 | 00:00:16:00 | 30,0 | 00:00:16:41 | 28,8 | | | | |
| 0,91 | 0,85 | 465 | 35 | 425 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,5 | 00:00:14:03 | 30,5 | 00:00:16:24 | 29,0 | 00:00:16:39 | 29,3 | | | | |
| 0,91 | 0,85 | 465 | 35 | 425 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 27,5 | 00:00:16:82 | 28,5 | 00:00:15:21 | 29,0 | 00:00:15:95 | 28,3 | | | | |
| 0,91 | 0,85 | 465 | 35 | 425 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 26,5 | 00:00:17:01 | 28,0 | 00:00:15:00 | 30,0 | 00:00:19:00 | 28,2 | | | | |
| 0,92 | 0,85 | 460 | 40 | 425 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,0 | 00:00:16:08 | 27,5 | 00:00:16:22 | 29,5 | 00:00:16:13 | 28,3 | | | | |
| 0,92 | 0,85 | 460 | 40 | 425 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 27,0 | 00:00:16:50 | 27,0 | 00:00:16:05 | 28,0 | 00:00:16:17 | 27,3 | | | | |
| 0,92 | 0,85 | 460 | 40 | 425 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 26,5 | 00:00:16:64 | 26,0 | 00:00:16:54 | 26,0 | 00:00:17:51 | 26,2 | | | | |
| 0,84 | 0,80 | 475 | 25 | 400 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 29,5 | 00:00:16:06 | 30,0 | 00:00:15:04 | 27,0 | 00:00:17:70 | 28,8 | | | | |
| 0,84 | 0,80 | 475 | 25 | 400 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 27,5 | 00:00:16:37 | 30,0 | 00:00:16:42 | 26,5 | 00:00:17:32 | 28,8 | | | | |
| 0,84 | 0,80 | 475 | 25 | 400 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 27,5 | 00:00:16:51 | 29,0 | 00:00:16:33 | 25,5 | 00:00:18:04 | 28,3 | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|--|--|--|--|
| 0,85 | 0,80 | 470 | 30 | 400 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 29,5 | 00:00:17:34 | 29,5 | 00:00:16:07 | 25,0 | 00:00:18:79 | 28,0 | | | | |
| 0,85 | 0,80 | 470 | 30 | 400 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 27,5 | 00:00:17:44 | 29,0 | 00:00:16:87 | 31,0 | 00:00:16:85 | 28,3 | | | | |
| 0,85 | 0,80 | 470 | 30 | 400 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 26,5 | 00:00:17:58 | 28,5 | 00:00:16:69 | 29,5 | 00:00:17:01 | 28,2 | | | | |
| 0,86 | 0,80 | 465 | 35 | 400 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 26,5 | 00:00:16:20 | 30,0 | 00:00:17:41 | 30,0 | 00:00:16:97 | 28,0 | | | | |
| 0,86 | 0,80 | 465 | 35 | 400 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 24,5 | 00:00:16:99 | 28,5 | 00:00:17:53 | 31,0 | 00:00:16:30 | 28,0 | | | | |
| 0,86 | 0,80 | 465 | 35 | 400 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 24,0 | 00:00:17:37 | 28,0 | 00:00:17:76 | 30,0 | 00:00:16:16 | 27,3 | | | | |
| 0,87 | 0,80 | 460 | 40 | 400 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 26,5 | 00:00:16:89 | 27,5 | 00:00:17:51 | 30,0 | 00:00:15:57 | 27,3 | | | | |
| 0,87 | 0,80 | 460 | 40 | 400 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 24,5 | 00:00:16:58 | 27,0 | 00:00:16:64 | 28,5 | 00:00:16:17 | 26,7 | | | | |
| 0,87 | 0,80 | 460 | 40 | 400 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 24,0 | 00:00:16:99 | 26,5 | 00:00:16:59 | 29,0 | 00:00:15:64 | 26,5 | | | | |
| 0,79 | 0,75 | 475 | 25 | 375 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,5 | 00:00:17:25 | 31,0 | 00:00:15:63 | 28,5 | 00:00:19:42 | 28,5 | | | | |
| 0,79 | 0,75 | 475 | 25 | 375 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 27,0 | 00:00:16:72 | 29,0 | 00:00:16:14 | 28,5 | 00:00:16:67 | 28,2 | | | | |
| 0,79 | 0,75 | 475 | 25 | 375 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 26,5 | 00:00:17:10 | 29,0 | 00:00:16:09 | 26,5 | 00:00:17:12 | 27,3 | | | | |
| 0,80 | 0,75 | 470 | 30 | 375 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 27,0 | 00:00:18:58 | 29,0 | 00:00:16:13 | 26,0 | 00:00:17:19 | 27,3 | | | | |
| 0,80 | 0,75 | 470 | 30 | 375 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 25,5 | 00:00:18:75 | 27,5 | 00:00:16:21 | 26,0 | 00:00:17:64 | 26,3 | | | | |
| 0,80 | 0,75 | 470 | 30 | 375 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 24,5 | 00:00:19:13 | 26,5 | 00:00:16:32 | 25,5 | 00:00:18:38 | 26,0 | | | | |
| 0,81 | 0,75 | 465 | 35 | 375 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 25,5 | 00:00:18:82 | 28,5 | 00:00:16:73 | 24,5 | 00:00:17:12 | 27,0 | | | | |
| 0,81 | 0,75 | 465 | 35 | 375 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 24,0 | 00:00:18:99 | 28,0 | 00:00:16:74 | 24,5 | 00:00:17:67 | 25,5 | | | | |
| 0,81 | 0,75 | 465 | 35 | 375 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 22,5 | 00:00:19:13 | 27,5 | 00:00:16:21 | 30,0 | 00:00:17:02 | 25,0 | | | | |
| 0,82 | 0,75 | 460 | 40 | 375 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 25,0 | 00:00:17:19 | 27,5 | 00:00:17:80 | 29,0 | 00:00:16:39 | 26,3 | | | | |
| 0,82 | 0,75 | 460 | 40 | 375 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 23,5 | 00:00:17:82 | 27,0 | 00:00:17:72 | 29,0 | 00:00:16:70 | 25,3 | | | | |
| 0,82 | 0,75 | 460 | 40 | 375 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 22,5 | 00:00:18:20 | 26,0 | 00:00:16:79 | 30,0 | 00:00:16:39 | 24,3 | | | | |
| 0,74 | 0,70 | 475 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 28,0 | 00:00:17:34 | 28,5 | 00:00:17:47 | 29,0 | 00:00:16:45 | 28,5 | | | | |
| 0,74 | 0,70 | 475 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 27,0 | 00:00:17:26 | 28,0 | 00:00:17:18 | 29,0 | 00:00:16:35 | 28,0 | | | | |
| 0,74 | 0,70 | 475 | 25 | 350 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 26,5 | 00:00:17:41 | 27,0 | 00:00:17:40 | 27,5 | 00:00:15:94 | 27,0 | | | | |
| 0,74 | 0,70 | 470 | 30 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 25,0 | 00:00:18:03 | 27,0 | 00:00:17:47 | 28,5 | 00:00:15:82 | 26,8 | | | | |
| 0,74 | 0,70 | 470 | 30 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 23,5 | 00:00:17:51 | 26,5 | 00:00:16:91 | 28,5 | 00:00:19:90 | 26,2 | | | | |
| 0,74 | 0,70 | 470 | 30 | 350 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 23,0 | 00:00:19:03 | 25,0 | 00:00:17:25 | 27,5 | 00:00:16:83 | 25,2 | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|--|--|--|--|
| 0,75 | 0,70 | 465 | 35 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 24,0 | 00:00:18:97 | 27,5 | 00:00:17:19 | 26,0 | 00:00:15:87 | 25,8 | | | | |
| 0,75 | 0,70 | 465 | 35 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 23,5 | 00:00:18:75 | 26,5 | 00:00:17:16 | 24,5 | 00:00:16:41 | 25,5 | | | | |
| 0,75 | 0,70 | 465 | 35 | 350 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 22,5 | 00:00:18:82 | 26,0 | 00:00:17:98 | 25,5 | 00:00:17:54 | 24,7 | | | | |
| 0,76 | 0,70 | 460 | 40 | 350 | 2,5 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 23,5 | 00:00:18:44 | 26,5 | 00:00:16:81 | 25,0 | 00:00:17:18 | 25,0 | | | | |
| 0,76 | 0,70 | 460 | 40 | 350 | 2,5 | 0,5 | 4,5 | 0,9 | 24,0 | 00:00:18:62 | 27,5 | 00:00:16:89 | 24,5 | 00:00:18:12 | 25,3 | | | | |
| 0,76 | 0,70 | 460 | 40 | 350 | 2,5 | 0,5 | 5,5 | 1,1 | 22,5 | 00:00:18:64 | 26,5 | 00:00:16:59 | 24,0 | 00:00:17:07 | 24,3 | | | | |

ANEXO 3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM VISCOSÍMETRO

RESULTADOS DE VISCOSIDADE – a/ms 0,75

| Relação a/ms 0,75 – Viscosidade | | | | | |
|---------------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | MS 5% | MS 6% | MS 7% | MS 8% |
| t [s] | γ [1/s] | η (Pas) | η (Pas) | η (Pas) | η (Pas) |
| 12 | 5 | 5,63 | 5,59 | 6,41 | 14,61 |
| 23 | 10 | 3,02 | 2,94 | 3,21 | 6,30 |
| 34 | 15 | 1,89 | 1,90 | 2,27 | 4,04 |
| 45 | 20 | 1,50 | 1,54 | 1,66 | 3,29 |
| 57 | 25 | 1,31 | 1,10 | 1,31 | 2,94 |
| 68 | 30 | 1,17 | 1,01 | 1,17 | 2,56 |
| 79 | 35 | 1,11 | 0,90 | 1,04 | 2,25 |
| 91 | 40 | 1,04 | 0,80 | 0,95 | 2,07 |
| 102 | 45 | 1,07 | 0,73 | 0,89 | 1,91 |
| 113 | 50 | 1,06 | 0,74 | 0,85 | 1,94 |
| 124 | 45 | 1,05 | 0,66 | 0,82 | 1,90 |
| 136 | 40 | 1,12 | 0,65 | 0,80 | 1,81 |
| 147 | 35 | 1,04 | 0,64 | 0,78 | 1,84 |
| 158 | 30 | 0,99 | 0,70 | 0,81 | 1,78 |
| 169 | 25 | 0,97 | 0,62 | 0,77 | 1,86 |
| 180 | 20 | 1,14 | 0,73 | 0,85 | 1,75 |
| 192 | 15 | 1,17 | 0,76 | 0,91 | 1,83 |
| 203 | 10 | 1,07 | 0,70 | 1,01 | 1,96 |
| 214 | 5 | 1,09 | 0,75 | 1,00 | 1,98 |

RESULTADO DE VISCOSIDADE – a/ms 0,80

| Relação a/ms 0,8 – Viscosidade | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | MS 5% | MS 6% | MS 7% | MS 8% |
| t [s] | γ [1/s] | η (Pas) | η (Pas) | η (Pas) | η (Pas) |
| 12 | 5 | 3,85 | 6,15 | 10,18 | 12,82 |
| 23 | 10 | 2,40 | 3,35 | 4,73 | 3,23 |
| 34 | 15 | 1,82 | 2,24 | 3,07 | 2,27 |
| 45 | 20 | 1,45 | 1,74 | 2,61 | 1,70 |
| 57 | 25 | 1,22 | 1,38 | 2,15 | 1,29 |
| 68 | 30 | 1,10 | 1,24 | 1,86 | 1,18 |
| 79 | 35 | 1,06 | 1,07 | 1,69 | 1,05 |
| 91 | 40 | 1,02 | 1,02 | 1,63 | 0,97 |
| 102 | 45 | 0,98 | 0,97 | 1,51 | 0,96 |
| 113 | 50 | 1,01 | 0,98 | 1,50 | 0,88 |
| 124 | 45 | 1,05 | 0,90 | 1,58 | 0,85 |
| 136 | 40 | 0,94 | 0,93 | 1,70 | 0,82 |
| 147 | 35 | 0,91 | 0,84 | 1,39 | 0,78 |
| 158 | 30 | 0,89 | 1,01 | 1,44 | 0,79 |
| 169 | 25 | 0,86 | 0,93 | 1,34 | 0,81 |
| 180 | 20 | 0,87 | 0,88 | 1,39 | 0,82 |
| 192 | 15 | 0,90 | 0,97 | 1,41 | 0,83 |
| 203 | 10 | 1,02 | 0,87 | 1,41 | 1,04 |
| 214 | 5 | 1,21 | 0,88 | 1,61 | 0,93 |

RESULTADO DE TENSÃO DE CISALHAMENTO – a/ms 0,75

| Relação a/ms 0,75 - Tensão de Cisalhamento | | | | | |
|---|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | MS 5% | MS 6% | MS 7% | MS 8% |
| t [s] | γ [1/s] | τ (Pa) | τ (Pa) | τ (Pa) | τ (Pa) |
| 12 | 5 | 28,19 | 28,05 | 18,19 | 73,41 |
| 23 | 10 | 42,04 | 29,39 | 18,30 | 63,01 |
| 34 | 15 | 40,78 | 28,51 | 19,63 | 60,56 |
| 45 | 20 | 42,04 | 30,83 | 19,92 | 65,86 |
| 57 | 25 | 42,07 | 27,51 | 20,02 | 73,43 |
| 68 | 30 | 46,98 | 30,17 | 21,18 | 76,89 |
| 79 | 35 | 49,63 | 31,38 | 22,07 | 78,78 |
| 91 | 40 | 52,30 | 31,84 | 23,19 | 82,88 |
| 102 | 45 | 56,94 | 32,78 | 24,58 | 85,99 |
| 113 | 50 | 66,49 | 36,84 | 26,07 | 97,23 |
| 124 | 45 | 58,63 | 29,58 | 22,98 | 85,67 |
| 136 | 40 | 48,84 | 25,85 | 20,07 | 72,38 |
| 147 | 35 | 41,08 | 22,23 | 17,23 | 64,33 |
| 158 | 30 | 33,85 | 20,99 | 15,06 | 53,47 |
| 169 | 25 | 27,87 | 15,38 | 12,58 | 46,49 |
| 180 | 20 | 26,54 | 14,57 | 10,65 | 34,97 |
| 192 | 15 | 18,18 | 11,41 | 8,44 | 27,42 |
| 203 | 10 | 13,29 | 7,02 | 6,29 | 19,57 |
| 214 | 5 | 5,74 | 3,75 | 3,23 | 9,88 |

RESULTADO DE TENSÃO DE CISALHAMENTO – a/ms 0,80

| Relação a/ms 0,8 - Tensão de Cisalhamento | | | | | |
|--|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | MS 5% | MS 6% | MS 7% | MS 8% |
| t [s] | γ [1/s] | τ (Pa) | τ (Pa) | τ (Pa) | τ (Pa) |
| 12 | 5 | 19,26 | 31,01 | 51,09 | 64,42 |
| 23 | 10 | 24,03 | 33,57 | 47,30 | 32,31 |
| 34 | 15 | 27,33 | 33,60 | 46,08 | 34,01 |
| 45 | 20 | 28,99 | 34,72 | 52,14 | 34,06 |
| 57 | 25 | 30,53 | 34,53 | 53,85 | 32,27 |
| 68 | 30 | 32,93 | 37,05 | 55,92 | 35,33 |
| 79 | 35 | 37,23 | 37,42 | 59,26 | 36,68 |
| 91 | 40 | 40,73 | 40,65 | 65,02 | 38,65 |
| 102 | 45 | 44,23 | 43,73 | 68,05 | 43,07 |
| 113 | 50 | 50,28 | 48,96 | 75,00 | 44,15 |
| 124 | 45 | 47,40 | 40,60 | 71,17 | 38,17 |
| 136 | 40 | 37,59 | 37,16 | 67,93 | 32,89 |
| 147 | 35 | 31,82 | 29,34 | 48,73 | 27,45 |
| 158 | 30 | 26,56 | 30,33 | 43,19 | 23,71 |
| 169 | 25 | 21,48 | 23,22 | 33,49 | 20,22 |
| 180 | 20 | 17,34 | 17,55 | 27,84 | 16,44 |
| 192 | 15 | 13,56 | 14,55 | 21,16 | 12,41 |
| 203 | 10 | 10,24 | 8,66 | 14,08 | 10,35 |
| 214 | 5 | 6,03 | 4,38 | 8,04 | 4,67 |

ANEXO 4 – RESULTADOS VISUAIS DE TODAS AS FORMULAÇÕES DOS ENSAIOS PRELIMINARES COM CLINDRO ESPANHOL



Formulação 01



Formulação 02



Formulação 03



Formulação 04



Formulação 05



Formulação 06



Formulação 07



Formulação 08



Formulação 09



Formulação 10



Formulação 11



Formulação 12



Formulação 13



Formulação 14



Formulação 15



Formulação 16



Formulação 17



Formulação 18



Formulação 19



Formulação 20



Formulação 21



Formulação 22



Formulação 23

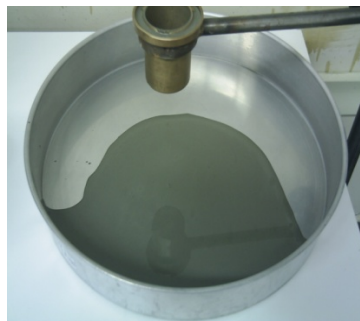


Formulação 24

ANEXO 5 – RESULTADOS VISUAIS DE TODAS AS FORMULAÇÕES COM O CLINDRO ESPANHOL



Formulação 25



Formulação 26



Formulação 27



Formulação 28



Formulação 29



Formulação 30



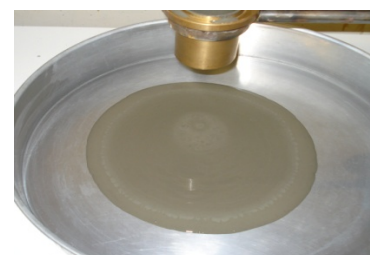
Formulação 31



Formulação 32



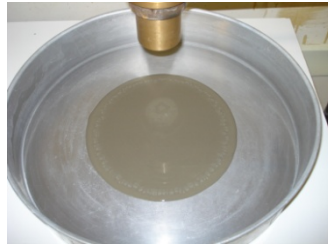
Formulação 33



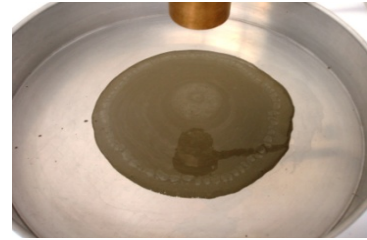
Formulação 34



Formulação 35



Formulação 36



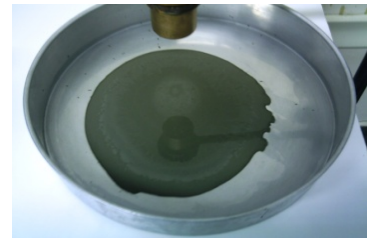
Formulação 37



Formulação 38



Formulação 39



Formulação 40



Formulação 41



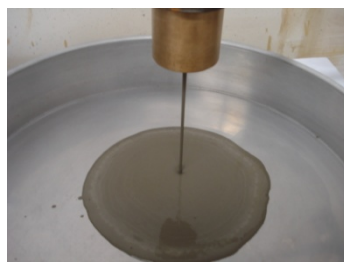
Formulação 42



Formulação 43



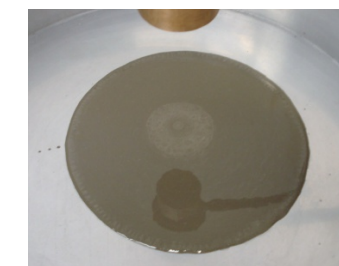
Formulação 44



Formulação 45



Formulação 46



Formulação 47



Formulação 48



Formulação 49

Formulação 50

Formulação 51



Formulação 52



Formulação 53



Formulação 54



Formulação 55



Formulação 56



Formulação 57



Formulação 58



Formulação 59



Formulação 60



Formulação 61



Formulação 62



Formulação 63



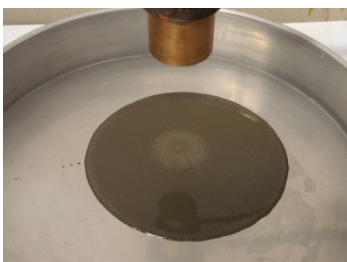
Formulação 64



Formulação 65



Formulação 66



Formulação 67



Formulação 68



Formulação 69



Formulação 70



Formulação 71



Formulação 72

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NRR 5733: **Cimento Portland de alta resistência inicial – Comum – Especificação**. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 7215: Ensaio de cimento Portland – método de ensaio**. ABNT. Rio de Janeiro. 1982.

_____. **NBR 11578: Cimento Portland composto**. ABNT. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11580: Cimento Portland - Determinação da água da pasta de consistência normal**. ABNT. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11768: Aditivos para concreto de cimento Portland**. ABNT. Rio de Janeiro. 1992.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee E-701. **Cementations materials for concrete**. ACI Education Bulletin E3-01. 2001.

_____. **ACI 212.3R: Chemical admixtures for concrete**. Michigan: ACI Committee. 1996.

_____. **ACI 212.4R: Guide for use of high-range water-reducing admixtures (superplasticizers) in concrete**: ACI Committee. 1996.

AITCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. **Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't**. Concrete International, v. 16, p. 45-52. May, 1994.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000.

ALCANTARA, M. A. M.; MOURET, M.; PONS, G.; GRANJU, J. L. **Concreto Auto-Adensável com Adição de Fibras Metálicas - Parâmetros de Dosagem e Características no Estado Fresco e Endurecido**. 46º Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis, 2004.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassas**. São Paulo, 2007. 247p. Tese em Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

AQUINO, I. P. **Caracterização da superfície do aço-carbono ABNT 1008 revestida com organo-silanos por meio de técnicas eletroquímicas e físico-químicas.** São Paulo, 2006. 129p. Dissertação em Engenharia Química – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh mortar.** Magazine of concrete research nº 43, 1991. p. 13-21.

BANFILL, P. F. G. **Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials.** Construction and Building Materials, V8. n.1, 1994. p. 43-49.

BANFILL, P. F. G. **Comparison of concrete rheometers:** International tests at LCPC in October, 2000. Nantes, NISTIR 6819, Sept. 2001.

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh cement and concrete – a review.** In. International Cement Chemistry Congress, 11 st, 2003. Durban. P. 533-539.

BARROS, M. M. S. B; SABBATINI, F. H. **Tecnologia de produção de contrapiso para edifícios habitacionais e comerciais.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1991.

BARTOS, P.J.M. **Measurement of key properties of fresh self-compacting concrete.** In: *CEN/STAR PNR Workshop*. Paris, 2000.

BARTOS, P. J. M.; GRAUERS, M. **Self compacting concrete.** Concrete International. V33, N4. 1999. P. 9-13.

BEDDOW, J. K.; MELOY, T. P. **Testing and characterization of powders and fine particles.** London: Heyden, 1980

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

BRINGEL, R. M. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos.** Fortaleza, 2007, 174 p. Dissertação em Química Inorgânica da Universidade Federal do Ceará.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais.** Maceió, 2006. 141p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Alagoas.

CARNEIRO, A. M. P.; REGIS, P.; AGRICIO, N. M. F.; OLIVEIRA, J. F.; SILVA, A.; RODRIGUES, P. C. - **Análise da influência da adição de sílica ativa nas curvas de resistência à compressão de concretos produzidos com agregado natural e agregado com curva de distribuição granulométrica otimizada.** Congresso Brasileiro de Concreto - 46º IBRACON, Florianópolis, 2004.

CARMO, J. B. M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face à resistência mecânica e a viabilidade econômica.** Curitiba, 2006. 154p. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Universidade Federal do Paraná.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto-desempenho.** São Carlos, 2007. 334p. Tese em Engenharia de Materiais - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia Científica.** 4ª Ed. São Paulo, Makron Books, 1996.

COLLEPARDI, S.; COPPOLA, L.; COLLEPARDI, M. **Mechanisms of action of different superplasticizers for high performance concrete.** In. International conference on high-performance concrete, and performance and performance and quality of concrete structures 2. Proceedings. Gramado. 1999.

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos.** São Paulo, 2007. 148p. Tese em Engenharia - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica.** São Paulo, 1995. 286p. Tese de Doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DE LA PEÑA, B. **Hormigón autocompactante.** In: Revista BIT, Junho, 2001.

DE LARRARD, F. et. al. **Evolution of the workability of superplasticized concrete: assessment with the BTRHEOM rheometer.** International rilem conference production methods and workability of concrete, 1996. London. P 377-388.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning.** A scientific approach. London: E & FN SPON, 1999. 421p.

DE LARRARD, F. **Concrete before casting: recent advances in concrete mixing and pumping technology.** In: 5th EPUSP Symposium on Concrete Structures, São Paulo, Junho-2003.

KECK, R. H. **Improving concrete durability with cementitious materials.** Concrete International. September, 2001.

KLEIN, N. S. **Influência da Substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável.** Londrina, 2008. 147p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento– Universidade Estadual de Londrina.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. In: EFNARC, fevereiro, 2002. 32p./

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete**. In EFNARC, United Kingdom, 2005. 63 p.

FERRARIS, C. F. **Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report**. NISTIR 5869, July. 1996.

FERRARIS, C. F.; LARRARD, F. **Testing and modeling of fresh concrete rheology**. NISTIR 6094. National Institute of Standards and Technology, February, 1998.

GETTU, R.; RONCERO, J. **Aditivos superfluidificantes para hormigones de altas prestaciones**. In: IV Simpósio sobre aditivos para hormigones, Madrid, 24 e 25 de Nov. 1998.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 5ª Ed. São Paulo, Atlas, 1999.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. 2002. 139p. Tese – Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Caminus, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GOODIER, C.I. **Development of self-compacting concrete**. Proceedings of the Institutn of Civil Engineers. Structure & Buildings 156, November, 2003.

GRAEFF, A. G.; SILVA FILHO, L. C. P., **Análise e Comparação das Propriedades de Aditivos Superplastificantes**. In: XVII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2002, Passo Fundo - RS. CRICTE 2002.

HARTMANN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. São Paulo, 2002. 234p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HAWKEN, P.; LOVINS, E.; LEVINS, H. **Creating the Next Industrial Revolution**, Little Brown and Co., 1999.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Porto Alegre, 2002. p.199. Tese apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEIDHODT, C.; NMAI, C.; SCHLAGBAUM, A. **Effectiveness of polycarboxylate-based high range water-reducer in a precast/prestressed operation**. In: International Symposium on High Performance Concrete. Florida, 2000.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Advances in Concrete Technology, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

MAILVAGANAM, N. **Admixture compatibility in special concretes**. In: International conference on high-performance concrete, and performance and quality of concretes structures. Proceedings. Gramado, 1999.

METHA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ed. Ibracon, 2008.

MARCOS, K. N. P. **Área específica, morfologia e estrutura de aluminas obtidas a partir de alguns precursores**. São Paulo, 2008. 305p. Tese em Engenharia de Materiais - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MALHOTRA, V. M. **Supplementary cementing materials for concrete**. Ottawa: CANMET, 1987.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. Florianópolis, 2005. 183p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - PPGEC – Universidade Federal de Santa Catarina.

MONTE, R. **Avaliação de metodologia de ensaios destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**. São Paulo, 2003. 118p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

NAKAKURA, E. H.; BUCHER, H. R. E. **Pisos Auto-nivelantes. Propriedades e Instalações**. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 738 p.

NUNES, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades**. 2001. 198 p. Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

OLIVEIRA, I, R.; STUART, A. R. ; PILLEGI, R. G. ;PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas; princípio e aplicações em processamento cerâmico**. 18 ed. Fazendo Arte Editora, 2000.

ORTEGA, A. G. **Mortero Autonivelante**. III Jornadas Iberoamericano de Materiales de Construcción. San Juan, 2003.

PETERSSON, O. Workability. **SCC Final Report – Task 2**. Brite EuRam: 1999. .

PILEGGI, R. G. **Efeito da distribuição granulométrica sobre o comportamento reológico de concretos refratários**. São Carlos, 1996. 210p. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. São Carlos, 2001. 187p. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos

POPPE, A. M.; SCHUTTER, G. **Effect of Limestone Filler on the cement hydration in Self-Compacting concrete**. In: RILEM Symposium on Self-compacting Concrete: August 17 – 20/2003. Ed. WALLEVIK, O., NIELSSON.

POWERS, M. C. **A new roundness scale for sedimentary particules**. Journal of Sedimentary Petrology. V. 23, 1953.

POWERS, T. C. **The properties of fresh concrete**. New York, John Witeys Sons, 1968.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **A reologia da pasta de cimento e a influência da cal**. I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 1995, p25-32.

RAMACHANDRAN, V. S.; MALHOTRA, V. M. **Concrete admixtures handbook - Properties, Science and Technology**. Canadá: Noyes Publication, 1998, p. 410-517.

REPETTE, W. L. **Concretos de Última Geração: Presente e Futuro**. In: CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações / ed. G. C. Isaia. Vol. 2. São Paulo: IBRACON, 2005.

RIXON, M.R.; MAILVAGANAM, N. P. **Chemical admixture for concrete**. Ed.E & FN Spon, London, UK, 1999. 437p

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresc and hardened states: Implications for high performance concrete**. Catalunya 2002. 189p. Tese – Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins,Universitat Politècnica de Catalunya.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. **The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 2, p. 2005-212, Feb. 2001.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 234p.

SILVA, R. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno – estudo do comportamento reológico e mecânico**. São Paulo, 2006. 191p. Dissertação em Engenharia - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVERSTEIN, R. M.; BASSLER, G. C.; MORRIL, T.C. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**. 3ªed. Rio de Janeiro. Ed. Guanabara Koogan AS. 1979. 299p.

SILVA, F. et al. **Análise das propriedades mecânicas de concretos com agregados de $D_{\max} \leq 6,3$ mm e com diferentes tipos e teores de sílica.** In: Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto. Vitória, 2003.

SILVA, R.P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno- Estudo do comportamento reológico e mecânico.** São Paulo, 2006. 191p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana – Universidade de São Paulo.

TANNER, R. I. **Engineering rheology.** New York: Oxford University Press, 1988. 451p.

TASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASAKI, J. L. **Concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) obtida através de um processo de combustão não controlada.** XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural. Mendoza, Argentina, 2004.

TATTERSALL, G. H. **The workability of concrete.** 2ª Ed. London, Viewpoint publications, 1978.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F.G. **The rheology of fresh concrete.** London: Pitman, 1983. 347p.

TATTERSALL, G. H. **Workability and quality of concrete.** London: E & FN SPON. 1991. 261p.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLON, D. C. **Concreto Auto-Adensável.** São Paulo, PINI, 2008.

WALRAVEN, J. **Structural aspects of self-compacting concrete.** International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete. 3rd., 2003, Reykjavik, p. 15-22. 2003.

VAN WAZER, J. R. et al. **Viscosity and flow measurement: a laboratory handbook of rheology.** 2ªed. New York: Interscience Publishers, 1966. 406p.

VERHASSELT, A.; PAIRON, J. **Rapid methods of distinguishing plasticizer from superplasticizer and assessing superplasticizer dosage.** International Conference on Superplasticizers and Others Chemical Admixtures in Concrete. 3. Ottawa, Canada, 1989. **Proceedings.** Ed. By V.M. Malhotra, ACI, Detroit, USA. p. 133 -155. 1989

YOSHIOKA, K.; TAZAWA, E.C.; KAWAI, K.; ENOHATA, T. **Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals.** Cement and concrete research, 32 p. 1507-1513, 2002.