

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CORTES DE PLACAS DE MÁRMORES  
E GRANITOS COMO ADIÇÃO NA FABRICAÇÃO DE CONCRETO  
AUTOADENSÁVEL

MELQUIZEDEC ARCOS RODRIGUES

MANAUS - AM

2015

UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CORTES DE PLACAS DE MÁRMORES  
E GRANITOS COMO ADIÇÃO NA FABRICAÇÃO DE CONCRETO  
AUTOADENSÁVEL

MELQUIZEDEC ARCOS RODRIGUES

UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CORTES DE PLACAS DE  
MÁRMORES E GRANITOS COMO ADIÇÃO NA FABRICAÇÃO DE  
CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Materiais de Construção Não Convencionais, da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: DSc. João de Almeida Melo Filho

MANAUS - AM

2015

Rodrigues. Melquizedec Arcos

Utilização dos resíduos de cortes de placas de mármore e granitos como adição na fabricação de concreto autoadensável  
. Manaus, FT/UFAM, 2015.

Orientador: DSc. João Almeida Melo Filho.

Dissertação de Mestrado apresentado a Coordenação do Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da FT/UFAM.

1. Resíduos sólidos 2. Concreto Autoadensável 3. Reciclagem.

UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CORTES DE PLACAS DE  
MÁRMORES E GRANITOS COMO ADIÇÃO NA FABRICAÇÃO DE  
CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Melquizedec Arcos Rodrigues

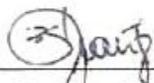
Este Trabalho de Dissertação de Mestrado foi julgado adequado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da FT/UFAM.

BANCA EXAMINADORA:



---

Prof. DSc. João de Almeida Melo Filho - Orientador.  
(Universidade Federal do Amazonas / UFAM)



---

Prof. DSc. Valdete Santos de Araújo  
(Universidade do Estado do Amazonas / UEA)



---

Prof. DSc. Ederli Marangon  
(Universidade Federal do Pampa / UNIPAMPA)

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, esposa e filha, por dividirem e alimentarem comigo meus ideais, sempre me estimulando a enfrentar os obstáculos de cabeça erguida e pela confiança e amor a mim dedicados.

Ao meu orientador, Prof. DSc. João de Almeida Melo Filho, pelo incentivo e orientações realizadas neste trabalho.

"Para resolver um problema ou alcançar um objetivo, você não precisa saber todas as respostas com antecedência, mas deve ter uma ideia clara do problema ou do objetivo que quer alcançar".

(William Clement Stone)

## AGRADECIMENTOS

✓ A Deus, por encher minha vida de dádivas e de esperança, força e vontade para vencer os desafios constantemente encontrados em minhas jornadas;

✓ Aos meus pais, Gracildo Lopes Rodrigues e Elizabeth Arcos Rodrigues, pelas palavras e atitudes que renovaram e ainda renovando minha persistência e me acalentam sempre na hora certa;

✓ Aos meus irmãos e seus cônjuges por participarem de forma incentivadora na etapa inicial e de forma participativa na etapa final, até mesmo nos ensaios de laboratórios em que foi necessário auxílio na forma de força física para executá-los;

✓ À minha esposa, Inácia Oliveira de Azevedo Rodrigues, por dividir sua vida comigo, pela dedicação em mim concedida e por propiciar a felicidade nos momentos de convívio;

✓ À minha filha, Giulia Mel Azevedo Rodrigues, por trazer alegrias com sua simples, porém forte e simpática presença propiciaram doses de incentivo que me estimularam em todos os momentos;

✓ Aos professores, por nos guiarem, nos levarem além das teorias e técnicas, nos ensinando o valor de nossa nova profissão;

✓ Ao orientador deste trabalho, Professor DSc. João de Almeida Melo Filho, por coordenar as atividades que resultaram neste e por sempre estar disponível e acessível para boas orientações de forma profissional e concisa sem deixar de manter um relacionamento pessoal e amigo;

✓ Aos técnicos e demais colaboradores dos laboratórios de materiais de construção,

de química analítica e de mecânica dos solos pela paciência e acompanhamento dos ensaios e manuseios de materiais e equipamentos, em especial aos Srs. Nilson, Jorge, Zeca, Rosivaldo e Reinaldo;

✓ Às técnicas administrativas, Srta. Joelma e Srta. Beatriz, pela prontidão em todos os atendimentos ocorridos na secretaria do curso e que foram também essenciais à realização deste;

✓ Aos colegas de curso do mestrado, muito obrigado pela amizade, convívio e apoio. Especial agradecimento ao amigo Engenheiro Civil Wanderson Félix Santos, pela contribuição em todas as fases do curso: nas disciplinas cursadas, na obtenção dos materiais utilizados nos ensaios, na realização dos ensaios laboratoriais e todas as outras etapas do curso;

✓ Aos amigos e colegas de trabalho, que compartilharam os meses de estudo e expectativas nessa vida escolar;

✓ Às empresas, que de forma espontânea cederam grande parte dos materiais necessários à realização dos ensaios de laboratórios, e que de forma informal permitiram o uso de seus nomes nesse trabalho. Agradecimento às empresas: Supermix concretos, Granmarmore Comércio Ltda, Di Qualita marmoraria, Manaus Mármore e Granitos, Marmoraria Marmogran, Vemagran Mármore e Granitos Ltda, e alguma outra não lembrada aqui;

✓ Ao diretor do Instituto de Criminalística do estado do Amazonas, perito criminal Dr. Carlos Fernandes, e ao gerente de perícias, perito criminal Dr. Adilson Benchaia, local em que atuo como Perito Criminal – Engenheiro Civil, por permitir reorganização de meus horários sempre que isso se mostrou necessário;

✓ Ao diretor da Escola Superior de Tecnologia, MSc Cleto Leal, e ao Coordenador

do curso de engenharia mecânica, DSc. Gilberto Delpino, ambos da Universidade do Estado do Amazonas (UEA), por entenderem os motivos de minha ausência em algumas atividades relacionadas a pesquisa, ensino e extensão naquela renomada Instituição de Ensino Superior, local em que exerço a função de Professor Auxiliar;

✓ Aos acadêmicos do Curso de Engenharia Civil da UFAM, dos anos 2012 e 2013, e aos acadêmicos do Curso de Engenharia Mecânica da UEA, de 2014, pela benevolência e compreensão por vezes me encontrarem sobrecarregado com outras atividades, deixando-os afastados quando precisavam tirar suas dúvidas e não me encontravam na faculdade.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	XIII
LISTA DE TABELAS .....	XVII
LISTA DE EQUAÇÕES .....	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	XX
RESUMO .....	XXV
ABSTRACT .....	XXVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Estrutura da Dissertação .....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Concreto Autoadensável - CAA .....	5
2.1.1 Definição.....	5
2.1.2 Vantagens e Desvantagens do CAA .....	6
2.1.3 Propriedades reológicas do CAA.....	8
2.1.4 Propriedades mecânicas do CAA.....	10
2.1.5 Propriedades físicas e químicas do CAA.....	13
2.2 Uso de Adições Minerais e de Aditivos Químicos no Concreto.....	14
2.2.1 Adições minerais.....	14
2.2.1.1 Material pozolânico .....	18
2.2.1.2 Material cimentante .....	19
2.2.1.3 Filer.....	19
2.2.2 Aditivos químicos para concretos .....	20
2.3 Aproveitamento de Resíduos Pétreos .....	24
2.3.1 Rochas ornamentais .....	24
2.3.2 Produção e aproveitamento dos resíduos .....	25

2.3.3 Resíduos das marmorarias .....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 Estudo Experimental.....	32
3.2 Materiais .....	35
3.2.1 Cimento.....	35
3.2.2 Resíduos de Mármore e Granitos - RMG.....	36
3.2.2.1 Fluorescência por Raio-X.....	37
3.2.2.2 Massa Específica.....	38
3.2.3 Agregados .....	39
3.2.3.1 Granulometria e Massas Unitárias .....	40
3.2.4 Superplastificantes .....	40
3.2.4.1 Teor ótimo de superplastificantes .....	42
3.3 Dosagem Experimental do Concreto .....	44
3.4 Propriedades Reológicas.....	47
3.4.1 Ensaio de coesão e fluidez no slump flow e slump flow 500 .....	47
3.4.3 Ensaio de Fluidez no Funil V.....	51
3.4.4 Ensaio de Fluidez na Caixa "L".....	53
3.5 Propriedades Mecânicas.....	55
3.5.1 Resistência à compressão.....	56
3.5.2 Resistência à flexão.....	57
3.6 Propriedades Físicas e Químicas.....	58
3.6.1 Absorção, índice de vazios e massa específica .....	58
3.6.2 Reatividade álcali-agregado.....	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	62
4.1 Propriedades dos materiais.....	62
4.1.1 Cimento.....	62
4.1.2 Resíduos RMG.....	63

4.1.2.1 Massa específica .....	63
4.1.2.2 Fluorescência de raio X.....	64
4.1.3 Agregados .....	65
4.1.3.1 Granulometria e Massas Unitárias .....	65
4.1.4 Superplastificantes .....	67
4.2 Propriedades reológicas .....	69
4.2.1 Ensaio de coesão e fluidez no slump flow .....	69
4.2.3 Ensaio de fluidez no Funil V.....	74
4.2.4 Ensaio de Fluidez na Caixa "L" .....	76
4.3 Propriedades mecânicas .....	78
4.3.1 Resistência à compressão.....	78
4.3.1 Resistência à flexão.....	82
4.4 Propriedades físicas e químicas .....	83
4.4.1 Absorção, Índice de Vazios, Massa Específica.....	83
4.4.2 RAA: Método acelerado em barras de argamassas e concreto .....	85
5. CONCLUSÕES.....	88
5.1 Conclusões .....	88
5.2 Sugestões para Futuras Pesquisas .....	90
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	92
7. APÊNDICES.....	99
7.1 Gráficos de resistência à compressão.....	99
7.2 Gráficos de resistência à flexão .....	107
ANEXOS.....	108
Dosagem do CAA – ABCP.....	108
Método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP. ....	108

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Empacotamento das partículas com o cimento: (a) Falha de empacotamento; (b) Empacotamento adequado. Fonte: (ANDRADE, 2012). .....	17
Figura 2: Micrografia de partículas de cimento em uma solução água-cimento: (a) com aditivo superplastificante; (b) sem aditivo superplastificante (MEHTA & MONTEIRO, 1994, apud Cavalcanti, 2006).....	22
Figura 3: Placas no pátio da marmoraria .....	27
Figura 4: Placa de granito a ser cortada: (a) Placa no pátio; (b) área útil da placa, bordas que são cortadas.....	27
Figura 5: Corte da placa: (a) Desenho na placa; (b) Aparas de mármore e granitos provenientes do corte das placas .....	28
Figura 6: : Produtos finais do corte da placa: (a) Peça projetada; (b) Aparas de mármore e granitos provenientes do corte de placas .....	28
Figura 7: Resíduo na forma de lama e pó: (a) Tanque de decantação da lama; (b) Aspecto do resíduo fino - pó - deixado secar. ....	29
Figura 8: Esquema da composição mineralógica típica: a) do mármore (1): calcita (2) e dolomita (3); b) do granito (4): Quartzo (5), mica (6) e feldspato (7).....	30
Figura 9: Fluxograma das etapas da pesquisa. ....	32
Figura 10: Preparação dos resíduos das marmorarias: (a) Pré-secagem da lama proveniente dos tanques de decantação das empresas; (b) Moinho de mandíbulas utilizado para triturar e separar os grãos de RMG.....	37
Figura 11: Preparação dos resíduos: (a) Aspecto dos resíduos após passar pelo moinho; (b) RMG com diâmetro menor que 0,075mm.....	37
Figura 12: Equipamento de espectroscopia por fluorescência de raios X. ....	38
Figura 13: Equipamentos utilizados no ensaio do percentual ótimo de aditivo: (a) Suporte do funil; (b) Funil de Marsh; (c) Proveta; (d) Peneira de abertura 2,4 mm.....	42
Figura 14: Procedimentos para determinação do percentual ótimo de superplastificante: (a) Misturados insumos no misturador planetário; (b) Peneiramento da calda; (c) Medida do tempo de escoamento no funil de Marsh. ....	43
Figura 15: Preparação da pasta de cimento para ensaio no funil de marsh: (a) Peneiramento na peneira 2,4 mm; (b) Material retido na peneira e que deve ser descartado. ....	44
Figura 16: Corpos de prova moldados.....	45

Figura 17: Ensaio de fluidez do CAA: (a) Marcação do diâmetro de 500 mm na placa metálica nivelada; (b) tronco de cone contendo CAA, início do ensaio. ....	48
Figura 18: Medidas do abatimento e do espalhamento: (a) Medida do abatimento; (b) Medida do espalhamento no ensaio do "slump". Fonte: Marangon, 2011, pg 57 .....	49
Figura 19: Ensaio do Slump flow T50cm: (a) início do ensaio slump flow; (b) mede-se o tempo para alcançar diâmetro igual a 500 mm. ....	51
Figura 20: Funil "V": (a) Dimensões do funil "V"; (b) Funil "V" e base de apoio. ....	52
Figura 21: Dimensões da caixa em forma de L recomendadas (fonte: EFNARC, 2002). ....	54
Figura 22: Ensaio da caixa L em andamento (fonte: Tutikian e Dal Molin, 2008, p 55). ....	54
Figura 23: Ensaio de compressão axial simples: (a) Prensa utilizada, capacidade = 300 KN; (b) Corpo de prova sendo prensado. ....	57
Figura 24: Placas de CAA: (a) nas formas; (b) desformadas; (c) cortadas para ensaio de flexão. ....	57
Figura 25: Prensa EMIC utilizada nos ensaios de flexão. ....	58
Figura 26: Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica: (a) pesagem normal dos corpos de prova; (b) fervura da água com corpos de prova; (c) pesagem hidrostática dos corpos de prova. ....	59
Figura 27: Ensaio para avaliação da reação álcali-agregado: (a) moldagem das barras. (b) barras de argamassas curadas; (c) medida dos comprimentos das barras com relógio comparador. ....	61
Figura 28: Gráfico - análise granulométrica da areia e da brita zero. ....	67
Figura 29: Gráfico dos tempos de escoamentos das pastas de cimento com RMG no funil de Marsh. ....	68
Figura 30: Mistura CS0. a) Espalhamento; b) Medida do slump flow. ....	71
Figura 31: Mistura CS10. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação. ....	71
Figura 32: Mistura CS15. a) Espalhamento; b) Medida do slump flow. ....	71
Figura 33: Mistura CS20. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação. ....	72
Figura 34: Mistura CW0. a) Espalhamento; b) Medida do slump flow. ....	72
Figura 35: Mistura CW10. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação. ....	72
Figura 36: Mistura CW20. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação. ....	73
Figura 37: Mistura CW30. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação. ....	73

Figura 38: Mistura CW40. a) Espalhamento e segregação no centro; b) Visualização da borda com segregação.....	73
Figura 39: Ensaio de fluidez no funil "V": (a) Abertura da porta do funil "V"; (b) Escoamento do material. ....	75
Figura 40: Ensaio de habilidade passante na caixa L: (a) Concreto escoado após a abertura do portão; (b) Medida da altura H2 alcançada pelo concreto na extremidade da caixa L.....	77
Figura 41: Ensaio de habilidade passante na caixa L: (a) Caixa L com a parte vertical contendo concreto; (b) Marcação de 40 cm na caixa L. ....	77
Figura 42: Gráfico resistência à compressão aos 14, 28 e 90 dias, CAA com SIKA.....	79
Figura 43: Gráfico resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias, CAA com aditivo PowerFlow.....	80
Figura 44: Aspecto da mistura seca: (a) Superfícies cônicas com ângulos de inclinação próximos de 45° com a superfície original dos corpos de prova; (b) Aspecto da mistura dos agregados e argamassa; (c) Contato entre agregado e argamassa sem borda de reação (formação de gel).....	81
Figura 45: Ensaio de flexão em placas de concreto: a) Corpo de prova na prensa no início do ensaio; b) Detalhe dos quatro pontos atuando no corpo de prova. ....	83
Figura 46: Análise de RAA: a) Fôrma das barras; b) Molde das barras; c) Barras deformadas. ....	86
Figura 47: Deformação das barras de argamassas e de concreto imersas em solução alcalina. ....	87
Figura 48: Gráfico: curva de tensão x tempo referente a compressão de CP. CAA preparado com superplastificante PowerFlow. Idade: 7 dias. ....	99
Figura 49: Gráfico: curva de tensão x tempo referente a compressão de CP. CAA preparado com superplastificante PowerFlow. Idade: 28 dias. ....	99
Figura 50: Gráfico: curva de tensão x tempo referente a compressão de CP. CAA preparado com superplastificante PowerFlow. Idade: 90 dias.. ....	100
Figura 51: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 0% de RMG, idade = 3 dias.....	100
Figura 52: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 0% de RMG, idade = 14 dias.....	101
Figura 53: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 0% de RMG, idade = 28 dias.....	101

Figura 54: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 0% de RMG, idade = 90 dias.....	102
Figura 55: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 10% de RMG, idade = 3 dias.....	102
Figura 56: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 10% de RMG, idade = 14 dias.....	103
Figura 57: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 10% de RMG, idade = 28 dias.....	103
Figura 58: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 10% de RMG, idade = 90 dias.....	104
Figura 59: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 20% de RMG, idade = 14 dias.....	104
Figura 60: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 20% de RMG, idade = 28 dias.....	105
Figura 61: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 20% de RMG, idade = 90 dias.....	105
Figura 62: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 30% de RMG, idade = 3 dias.....	106
Figura 63: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 30% de RMG, idade = 14 dias.....	106
Figura 64: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 30% de RMG, idade = 28 dias.....	107
Figura 65: Gráfico tensão X tempo. Flexão das placas: CP - CAA-REF, 0% de RMG, idade = 90 dias.....	107
Figura 66: Utilização das Curvas de Abrams. ....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Concretos produzidos. ....	33
Tabela 2: Classes de espalhamento, aplicação e exemplo de utilização do CAA em função do ensaio de slump flow, segundo a NBR 15823. ....	50
Tabela 3: Classes de espalhamento, aplicação e exemplo de utilização do CAA em função do ensaio de slump flow T50, segundo a NBR 15823. ....	51
Tabela 4: Classes viscosidade plástica aparente do CAA em função dos tempo de escoamento no funil V, segundo a NBR 15823. ....	53
Tabela 5: Classes de habilidade passante do CAA em função dos valores obtidos na caixa L, segundo a NBR 15823. ....	55
Tabela 6: Classificação granulométrica de acordo com a NBR 15577-2009. ....	60
Tabela 7: Módulo de finura para o cimento Amazon CP-I-32. ....	62
Tabela 8: Resistência à compressão da argamassa. ....	63
Tabela 9: Propriedades Físicas do RMG. ....	64
Tabela 10: Composição química do RMG. ....	64
Tabela 11: Propriedades da areia. ....	66
Tabela 12: Propriedades do agregado graúdo - brita zero. ....	66
Tabela 13: Ensaio para determinação do teor de superplastificante Sikament 251. ....	68
Tabela 14: Ensaio para determinação do teor de superplastificante PowerFlow. ....	68
Tabela 15: Medida do diâmetros de abatimentos obtidos no slump flow e tempo de espalhamento até $\phi = 500$ mm, obtidos no ensaio slump flow T 50. ....	70
Tabela 16: Resultados do tempo de escoamento do CAA no funil V. ....	74
Tabela 17: Resultados obtidos na caixa "L". ....	76
Tabela 18: Resistência à compressão dos corpos de provas – CCA com SIKA. ....	78
Tabela 19: Desvio padrão e coeficiente de variação - CAA com Sika. ....	78

Tabela 20: Resistência à compressão dos corpos de provas - CAA com Power Flow. ....	78
Tabela 21: Desvio padrão e coeficiente de variação - CAA com Power Flow. ....	79
Tabela 22: Resistência á flexão. Tensões e cargas obtidas nos ensaios de flexão de placas de CAA.....	82
Tabela 23: Massa de cada CP de CAA.....	84
Tabela 24: Absorção, Índice de vazios e Massa específica dos CPs de CAA.....	85
Tabela 25: Valores dos comprimentos e percentual de expansão da barras de argamassa e concreto .....	86
Tabela 26: Consumo de água para abatimento de concreto (l/m <sup>3</sup> ). ....	110
Tabela 27: Consumo de agregado graúdo .....	111

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Resistência do concreto aos $t_j$ dias.....	109
Equação 2: Cálculo do consumo de cimento.....	110
Equação 3: Cálculo do consumo de agregado graúdo.....	111
Equação 4: Cálculo do volume de areia. ....	112
Equação 5: Traço do concreto a ser utilizado.....	112

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Adições Predominantemente Inertes
APR	Adições Predominantemente Reativas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMV	Aditivo Modificador de Viscosidade
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Concreto Armado
CAA	Concreto Autoadensável
CAAF	CAA no estado fresco
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CCV	Concreto Convencional Vibrado
CEE	Comissão de Estudos Especiais da ABNT
CP	Cimento Portland
C-REF	Concreto de Referência
CS	CAA com aditivo Sikament 251 da SIKA
CS0	CAA com aditivo Sikament sem RMG
CS10	CAA com aditivo Sikament contendo 10% de adição de RMG
CS15	CAA com aditivo Sikament contendo 15% de adição de RMG
CS20	CAA com aditivo Sikament contendo 20% de adição de RMG
CV	Coefficiente de variação

CW	CAA com aditivo Powerflow 1159 da MC-Bauchemie do Brasil
CW0	CAA com aditivo Powerflow sem RMG
CW5	CAA com aditivo Powerflow contendo 5% de adição de RMG
CW10	CAA com aditivo Powerflow contendo 10% de adição de RMG
CW20	CAA com aditivo Powerflow contendo 20% de adição de RMG
CW30	CAA com aditivo Powerflow contendo 30% de adição de RMG
CW40	CAA com aditivo Powerflow contendo 40% de adição de RMG
EFNARC	European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete
EN	European Norm
IFBQ	Instituto Falcão Bauer da Qualidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LS	Aditivos a base de lignossulfonados
MC	Empresa fabricante do superplastificante powerflow 1159
MS	Aditivos a base de melamina sulfonato
M. U.	Massa Unitária
NBR	Norma Brasileira
NF	Não formada
NM	Norma MERCOSUL
NS	Aditivo a base de naftaleno sulfonado
NPT	Núcleo de Pesquisas Tecnológicas
PBQP-H	Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade no Habitat
PC	Aditivo base de policarboxilatos

PJ	Medida da habilidade passante no anel J
PL	Quociente entre H1 e H2 na caixa L
RAA	Reação álcali-agregado
RAC	Reação álcali-carbonato
RAS	Reação álcali-sílica
RASS	Reação álcali-silicato
RBMG	Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito
RCMG	Resíduo do Corte de Mármore e Granito
RG	Rejeito de granito
RGT	Rejeito de granito triturado
RM	Rejeito de mármore
RMG	Rejeito de mármore e Granito
RMT	Rejeito de mármore triturado
RS	Medida da resistência à segregação do CAA no tubo U
RSMG	Resíduo de serragem de mármore e granito
SiKA	Empresa fabricante do superplastificante Sikament 251
SF	Espalhamento do CAA
SP	Superplastificante
TO	Medida do grau de fluidez do CAA no ensaio Orimet
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
VF	Tempo de escoamento no funil V
VS	Tempo de escoamento do CAA até alcançar diâmetro de 50 cm

## LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	Relação água/cimento
a/f	Relação água/finos
C	Consumo de cimento
$C_2S$	Silicato dicálcico
$C_3A$	Aluminato tricálcico
$C_4AF$	Ferroaluminato tetracálcico
$C_a$	Consumo de água
$C_b$	Consumo de brita
$Cl^-/OH^-$	Relação íon cloreto/íon hidroxila
$C_m$	Consumo de areia
CP II	Cimento Portland composto
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
d	Diâmetro do concreto espalhado
Dc	Densidade de corrente aplicada
ddp	Diferença de potencial
e	Espessura do corpo-de-prova
F	Constante de Faraday
f/c	Relação fíler/cimento
H1	Altura do CAA na extremidade inicial da caixa L
H2	Altura do CAA na extremidade final da caixa L

i	Corrente elétrica
K	Constante
M	Massa dissolvida do material
ma	Massa atômica
Mc	Massa unitária compactada do agregado graúdo
p/c	Relação plastificante/cimento
R	Resistência capilar
S	Área exposta do cupom
sp/c	Relação superplastificante/cimento
t	Tempo
T	Taxa de corrosão
T50	Tempo em que o concreto autoadensável leva para se espalhar até o diâmetro de cinquenta centímetros
T500	Tempo em que o concreto autoadensável leva para se espalhar até o diâmetro de quinhentos milímetros
V	Voltagem
Vc	Volume compactado seco do agregado graúdo
Vm	Volume de areia
z	Número de elétrons transferidos
pa	Massa específica da água
pb	Massa específica da brita
pc	Massa específica do cimento
pm	Massa específica da areia
ps	Massa específica do aço

## RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é determinar o percentual de substituição possível de cimento por resíduos de mármore e de granito (RMG) das marmorarias de Manaus na produção de concreto autoadensável (CAA). A metodologia adotada foi a realização de vários ensaios laboratoriais: de caracterização de cada material constituinte do CAA; das propriedades reológicas do CAA; e das propriedades mecânicas, físicas e químicas do CAA no estado endurecido. Foram aplicados dois superplastificantes, um à base de sais sulfonados e outro à base de polímeros, cujo teor ótimo foi determinado por meio de ensaios de pasta no cone de Marsh. Os agregados graúdos e miúdos foram caracterizados por meio de ensaios de granulometria, massa específica; massa unitária em estado solto; e massa unitária em estado compactado e seco. Os RMG foram submetidos a ensaio de massa específica e análise de Fluorescência de Raios X. Para o CAA no estado fresco foram realizados os seguintes ensaios: Espalhamento, Espalhamento T500, Funil V e Caixa L; e Ensaios de Resistência à Compressão e à Flexão, Absorção, Índice de Vazios e Massa Específica do CAA no estado endurecido, bem como ensaios em barras de argamassas para verificar possível Reação Álcali Agregado (RAA). Os resultados mostraram-se eficazes para a maioria dos traços de CAA, com até 30% de substituição do cimento por RMG quando o aditivo à base de polímeros foi utilizado e de até 20% de substituição quando o superplastificante foi o sulfonado. No estado fresco esse CAA atendeu aos requisitos da NBR 15823, se comportando como concreto adequado para utilização na maioria das aplicações correntes. No estado endurecido apresentaram resistência à compressão próximas de 35 MPa, podendo também ser utilizado na produção de pavimentos de concreto. As resistências à flexão alcançadas, em torno de 7,0 MPa, e satisfazem a NBR 15805. Para absorção os valores ficaram compreendidos entre 4,0% e 5,0%, menores que os valores encontrados na literatura, para o índice de vazios e massa específica os valores ficaram próximos de outras pesquisas, 10%. Nos ensaios de RAA as expansões alcançadas foram menores que 0,10%, sendo os resíduos classificados como inócuo pela NBR 15577-4. Com o exposto pode-se afirmar que os resíduos de marmorarias podem ter uma destinação alternativa na construção civil.

Palavras chave: Resíduos sólidos de marmorarias. Concreto autoadensável.

Reciclagem.

## ABSTRACT

### MANUFACTURE OF SELF-COMPACTING CONCRETE WITH ADDITION OF WASTE FINE MARBLE

The aim of this study is to determine the possible replacement percentage of cement per waste marbles and granites (WMG) of marble shops of Manaus in the production of self-compacting concrete (SCC). The methodology adopted was to hold various laboratory tests: characterization of each constituent material of the CAA; the rheological properties of SCC; and mechanical, physical and chemical properties in the hardened state of SCC. Two superplasticizers have been applied, one on the base and other salts of sulphonated polymer based whose optimum content was determined by testing the slurry Marsh cone. The coarse aggregates and kids were characterized by assays granulometry, specific weight; unit mass in loose state; and unitary mass compressed and dry. The WMG were subjected to density testing and analysis of Fluorescence X Ray. For fresh SCC in the following tests were performed: scattering, scattering T500, V funnel and L box; and Testing of Compressive Strength and flexion, absorption, voids index and the SCC Density in the hardened state, as well as tests on mortar bars to check possible Alkali Aggregate Reaction (AAR). The results were effective for most traits SCC, up to 30% of the cement replacement by WMG when the additive polymer base was used, and up to 20% replacement when the superplasticizer was sulfonated. Fresh in this SCC met the requirements of ISO 15823, behaving like proper concrete for use in most current applications. In the hardened state near showed compressive strength of 35 MPa, may also be used in the production of concrete floors. The resistance to bending achieved in around 7.0 MPa and satisfy the Brazilian standard 15805. For absorption values were comprised between 4.0% and 5.0%, lower than the values found in the literature, for voids and density values were close to other research, 10%. In AAR tests achieved the expansion was less than 0.10%, and the waste classified as harmless by Brazilian standard 15577-4. With the above it can be said that the residues from marble shops may have an alternative destination in civil construction.

**Keywords:** Solid Waste marble shops. Self-compacting concrete. Recycling.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Os resíduos gerados pelos estabelecimentos comerciais de corte, fabricação e montagem de artefatos de rochas, comumente chamadas de marmorarias, da cidade de Manaus, em sua maioria RMG, possuem dimensões que vão de grãos de pó até fragmentos de formatos irregulares alcançando até 25 cm de diâmetro, são em muitos casos depositados em locais inadequados ou despejados na natureza sem passar por um tratamento adequado. Muitas dessas empresas não sabem o que fazer com esses resíduos e os deixam acumulados nos terrenos em torno da marmoraria ou os destinam aos depósitos de resíduos do município. Parte desses resíduos em forma de pó são levados por lixiviação e despejadas nos cursos d'água, sem o devido tratamento, contaminam diretamente os rios e o próprio solo, além da desfiguração da paisagem, o que causa preocupação na população e nas autoridades.

No estado do Amazonas cada marmoraria movimenta de 400 m<sup>2</sup>/mês a 1000 m<sup>2</sup>/mês de rochas ornamentais, com produção de resíduos na ordem de 25 %, segundo Padilha dos Santos (2002), ou seja, são aproximadamente 5.000,00 m<sup>3</sup> de material descartado por ano e que em sua maioria podem apresentar potencial de reutilização. Miranda (2012) estimou que no Brasil as marmorarias, no processo de serragem e o polimento das rochas ornamentais, produzem aproximadamente 190.000 toneladas de resíduo de beneficiamento de mármore e granito por ano. Segundo o Serviço Brasileiro de Apoio à Micro e Pequena Empresa (Sebrae), o país possui mais de 1.200 variedades de rochas ornamentais, exploradas por 12.000 empresas instaladas por todo o Brasil (SEBRAE, 2014).

Uma excelente alternativa para diminuição dos problemas supracitados seria a

utilização desses resíduos em subprodutos na construção civil, levando-se em conta que este setor consome um grande volume de recursos naturais e se mostra propenso a absorver os resíduos sólidos.

Cada ano que passa as empresas necessitam de mais espaços para armazenarem os resíduos produzidos. Grandes áreas estão sendo ocupadas para despejos desses resíduos, áreas essas que poderiam ser usadas para outras finalidades e que nos grandes centros urbanos tem com o passar dos anos sofrido valorização. Algumas empresas têm destinado seus resíduos na unidade de processamento de resíduos sólidos da prefeitura de Manaus, localizado na Rodovia AM 010, Km 19, nos mesmos setores reservados a despejos de resíduos de construção civil. Outras têm misturado parte de seus resíduos em dosagens de concreto para construção dos pisos de seus pátios, mas sem testes de qualidade ou sem conhecimento da dosagem apropriada.

Por outro lado um dos sistemas construtivos que vem ganhando aceitabilidade na indústria da construção civil e que vem sendo adotado por muitas empresas do sul e sudeste do país é o CAA. Alguns autores tratam esse assunto como uma das evoluções dos concretos convencionais que se mostra como sendo uma tecnologia que possui características nunca alcançadas com o concreto convencional, que é constituído somente por aglomerantes, agregados e água. Trata-se de um concreto que têm como fundamento a utilização de aditivos químicos e adições minerais, que irão fazê-lo alcançar suas três principais propriedades no estado fresco: coesão, habilidade passante e resistência à segregação. Por possuir adensamento próprio, permite que o material tenha propriedades reológicas muito mais fluidas, aumentando sua área de atuação, já que é possível usar tal material para as mais diversificadas formas e com as armaduras mais densas projetadas. Apesar da tecnologia não ser exatamente nova, ainda não há um consenso teórico de como dosar um CAA, sendo que

os traços são desenvolvidos de maneira experimental e os métodos teóricos já existentes, ainda não são muito populares, variando de pesquisador para pesquisador (PAUMGARTTEN, 2010).

Levando-se tudo isso em consideração percebe-se a possibilidade de se adicionar esses resíduos nas dosagens de concreto, em busca de uma destinação apropriada desses, ou como fíler ou como modificador de viscosidade.

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a viabilidade técnica da utilização dos resíduos gerados nas marmorarias de Manaus na composição de CAA, em substituição parcial ao cimento e comparar as propriedades reológicas, físicas e mecânicas, desses CAA com um concreto de referência adotado, a saber: sem adição de resíduos.

Para alcançar com êxito o objetivo geral foram formulados os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar o teor ótimo de adição de RMG no CAA;
- b) Determinar o percentual ótimo de cada um dos aditivos superplastificantes utilizados nos traços de CAA, ;
- c) Classificar no estado fresco, de acordo com a norma ABNT-NBR 15823, os CAA de diferentes traços;
- d) Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos CAA no estado endurecido, por meio de ensaios laboratoriais, tais como: resistência à compressão e à flexão, índice de absorção por imersão em água, índice de vazios, massa específica e expansão devido à reação álcali-agregado.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos assim discriminados: Capítulo 1 traz a introdução do trabalho, que trata brevemente sobre o CAA, dos RMG produzidos pelas marmorarias da cidade de Manaus e a relevância do estudo da incorporação desses RMG como composição do CAA, na forma de material fino. Constam também nesse capítulo o objetivo principal e os objetivos específicos desse trabalho. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica para apoiar o estudo, descrevendo as propriedades físicas, químicas e mecânicas, do CAA, no estado fresco e no estado endurecido; da importância das adições minerais e dos aditivos químicos em sua composição. Trata também dos aspectos gerais relacionados ao aproveitamento de resíduos pétreos, enfatizando os RMG, desde a coleta nas marmorarias, passando pela caracterização físico-química desses resíduos e a metodologia dos ensaios de caracterização. A descrição dos experimentos desenvolvidos e dos materiais utilizados encontram-se no Capítulo 3. Os resultados obtidos nos ensaios, bem como as discussões desses, estão apresentados no Capítulo 4. No Capítulo 5 estão descritas as considerações finais do trabalho e sugestões para realização de trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Concreto Autoadensável - CAA

#### 2.1.1 Definição.

O concreto é um material de construção. É obtido a partir da mistura de um material aglomerante hidráulico com materiais inertes e água. O aglomerante comumente utilizado é o cimento Portland. Os materiais inertes são designado por agregados, que quando classificados conforme granulometria recebem as denominações de agregados graúdos e agregados miúdos. O agregado graúdo mais utilizado é a brita, muitos utilizam também o seixo e o pedregulho. O agregado miúdo mais frequente é a areia natural podendo ser utilizado também o pó de pedra. (ROMANO, 2004).

Um concreto será considerado CAA se três propriedades no estado fresco forem alcançadas simultaneamente: fluidez, coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço e outros embutidos (ou habilidade passante) e resistência à segregação (manter-se homogêneo) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (NBR 15823, 2010).

Fluidez é a capacidade do CAA de fluir dentro das fôrmas e preencher todos os espaços. Habilidade passante é a capacidade da mistura de escoar pelas formas, passando por entre as armaduras de aço sem obstrução do fluxo ou segregação. E resistência à segregação é a propriedade que define a capacidade do CAA de se manter coeso ao fluir dentro das fôrmas, passando ou não por obstáculos (NBR 15823, 2010).

O CAA foi desenvolvido no Japão em 1988 e é considerado um avanço no processo de construção de estruturas de concreto, pois aumenta a produtividade, reduz o contingente de

mão de obra na hora da concretagem e melhora a qualidade do concreto e do ambiente de trabalho. Desta forma, o CAA vem ganhando rapidamente aceitação na indústria da construção civil e sendo visto por muitos, com potencial para substituir em muitos casos os concretos convencionais (BARROS, 2008).

No Japão o CAA foi desenvolvido por Hajime Okamura, com intuito de resolver o problema da baixa durabilidade das estruturas de concreto armado. Dada a baixa qualificação da mão de obra japonesa, faltavam profissionais aptos a executar a devida compactação exigida pelas estruturas, comprometendo a qualidade final destas. Desta forma, Okamura tentou adaptar os concretos submersos, resistentes à lixiviação, às estruturas convencionais, já que aqueles concretos possuíam uma excelente resistência à segregação devido ao aditivo modificador de viscosidade. Seus estudos voltados para a trabalhabilidade do concreto o levaram a concluir que é impossível a produção de CAA sem a utilização de superplastificantes (OUCHI; EDAMATSU, 1999, apud BARROS, 2008).

### 2.1.2 Vantagens e Desvantagens do CAA

Por possuir as três propriedades listadas acima, o CAA apresenta algumas vantagens em relação ao concreto convencional em relação ao custo, ao tempo de aplicação e a segurança na obra. Lisbôa (2004) cita além da redução do custo de aplicação por metro cúbico de concreto, a garantia de excelente acabamento em concreto aparente, o fato de permitir bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais, a otimização de mão de obra, maior rapidez na execução da obra, a melhoria nas condições de segurança na obra, eliminação do ruído provocado pelo vibrador, eliminação da necessidade de espalhamento e de vibração, aumento das possibilidades de trabalho com formas de pequenas dimensões e

redução do custo final da obra em comparação ao sistema de concretagem convencional são algumas das vantagens de se adotar o CAA em um serviço de engenharia (LISBÔA, 2004).

Tutikian e Dal Molin (2008) acrescentam outros benefícios, tais como:

- a) Acelera a construção, já que seu lançamento é muito mais rápido e dispensa o adensamento;
- b) Melhora o acabamento final da superfície;
- c) Pode aumentar a durabilidade da estrutura por ser mais fácil de adensar e consegue evitar que ocorram falhas de concretagem e grandes vazios resultantes da má vibração;
- d) Permite grande liberdade de formas e dimensões: o CAA preenche formas curvas, esbeltas, com altas taxas de armadura e de difícil acesso;
- e) Permite concretagem em peças de seções reduzidas;
- f) Elimina o barulho da vibração, o que é muito importantes em grandes centros urbanos, concretagens noturnas ou obras perto de escolas e hospitais;
- g) Torna o trabalho mais seguro em função da diminuição do numero de trabalhadores;
- h) Permite obter um ganho ecológico porque utiliza em sua composição altos teores de resíduos industriais como cinza volante, escória de alto forno ou cinza de casca de arroz;
- i) Sua fluidez e resistência à segregação permite percorrer até dez metros de distância horizontal, mesmo com obstáculos no caminho;
- j) A grande resistência à segregação, aliada a resistência do CAA, permite eliminação de macro defeitos, bolhas de ar e falhas na concretagem, que são responsáveis diretos por perdas de desempenho mecânico do concreto e durabilidade da estrutura.

k) A eliminação de vibração na obra possibilita economia da energia elétrica e de mão de obra. O ruído captado no entorno da obra é de aproximadamente um décimo do ruído – em decibéis – comparado ao recebido quando o concreto convencional vibrado (CCV) é utilizado, o que diminui as doenças ocupacionais nos operários;

l) Resultados experimentais mostraram que o CAA apresentou redução significativas no coeficiente de permeabilidade e absorção capilar se comparado ao CCV referência de faixas de resistências similares;

Algumas das desvantagens, segundo Marques (2011), que devem ser analisada antes de tomar a decisão de se adotar o CAA, são:

- i. Necessidade de mão de obra especializada para preparo e aplicação;
- ii. Cuidado especial com o transporte para evitar a segregação;
- iii. Maior controle tecnológico durante todas as etapas de utilização do CAA, (MARQUES, 2011).

### 2.1.3 Propriedades reológicas do CAA

O CAA é considerado um concreto especial porque possui diversas propriedades especiais já no estado fresco. É de suma importância conhecer essas propriedades para se prever o comportamento desse concreto por ocasião de seu transporte, bombeamento e lançamento nas formas.

O CAA deve possuir fluidez, que é definida como a habilidade da mistura em fluir através de espaços confinados e de aberturas estreitas, tais como áreas com demasiada concentração de barras de aço, sem apresentar segregação e bloqueamento e mantendo-se coeso, ou seja, deve possuir a capacidade de fluir nas direções vertical e horizontal sem a

incorporação de ar ou acúmulo de bolhas superficiais. As forças que comandam esse processo são o peso próprio do concreto e a energia de lançamento do concreto, somente pela ação do seu peso próprio, sem a aplicação de vibração ou de qualquer tipo de energia de compactação externa (MARANGON, 2011).

A classificação do CAA no estado fresco, segundo a NBR 15823 (ABNT, 2010), depende das seguintes características:

- a) fluidez e escoamento;
- b) viscosidade plástica aparente;
- c) habilidade passante; e
- d) resistência à segregação.

Para a determinação das características do concreto autoadensável no estado fresco, a NBR 15823:2010 prevê os seguintes ensaios:

- a) o ensaio de espalhamento (SF) avalia o grau de fluidez e escoamento;
- b) os ensaios espalhamento T500 (VS) e Funil V (VF) avaliam o grau de viscosidade plástica aparente;
- c) os ensaios da Caixa L (PL) e do Anel J (PJ) avaliam a habilidade passante; e
- d) o ensaio da Coluna de Segregação (SR) avalia a resistência à segregação.

Outros ensaios, além dos adotados pela NBR 15823:2010, também estabelecem padrões para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco. A seguir, são relacionados alguns exemplos desses ensaios:

- a) o ensaio do Tubo U (RS) avalia a resistência à segregação;
- b) os ensaios Orimet (TO) e Caixa U avaliam simultaneamente o grau de fluidez e escoamento, a habilidade passante e a resistência à segregação; e
- c) o ensaio da Coluna de Rooney avalia a resistência à segregação (SOUSA FILHO,

2011).

Barros (2008) explica que a propriedade da viscosidade existente no CAA só é conseguida e mantida devido à presença de resíduos finos como adição do tipo fíler, e portanto fundamental para o alcance da autoadensabilidade desses concretos. Outras adições provenientes de resíduos industriais têm surgido e sido utilizados como material fíler em concretos. É o caso da “lama” gerada no beneficiamento, principalmente no processo de corte, de blocos de mármore e granito (BARROS, 2008).

Tal habilidade do concreto fresco, seja um CAA ou não, de preencher as fôrmas sem a presença de bolhas de ar ou falhas de concretagem, é um dos principais fatores que influem na qualidade final do concreto endurecido. O CAA não pode depender de nenhum tipo de ajuda externa para cumprir seu papel, tais como vibradores de imersão, régua vibratórias ou qualquer outra forma de compactação. A única ferramenta disponível para esse concreto é seu próprio peso, ou seja, a ação da força da gravidade em sua massa (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

É de se imaginar logicamente que a necessidade de se tornar mais ou menos fluido leva a uma dosagem conseqüentemente diferente da dosagem do concreto convencional. A diferença principal entre o CAA e o CCV são as características reológicas. Essas características são conseguidas se aumentando a proporção de pasta cimento-agregado do que normalmente utilizada (MARQUES, 2011).

#### 2.1.4 Propriedades mecânicas do CAA

Com relação às propriedades mecânicas o CAA é muito parecido com o CCV no estado endurecido. O CAA aplicado na indústria de pré-moldado atendeu todas as expectativas quanto à resistência à compressão, durabilidade e garantindo a estanqueidade da

peça. Apresentou valores maiores no custo de produção, mas como a resistência do concreto ficou acima dos valores estimados será possível equilibrar o custo final (BERTOCINI, 2013).

Marangon (2011) lembra que a resistência à compressão é a propriedade mecânica do concreto mais utilizada, pois é a partir dela que se faz a classificação do material e, indiretamente, prevê-se a sua durabilidade. O diagrama tensão-deformação do material, obtido através de ensaios experimentais de compressão, possibilita a determinação de sua resistência à compressão, módulo de elasticidade, deformação máxima e capacidade de absorção de energia. Por possuir menor teor de agregado graúdo, o módulo de elasticidade do CAA tenderia a ser inferior ao do concreto convencional fibroso de mesma resistência à compressão, mas essa diferença depende do nível de resistência e da composição do concreto, de forma que não é possível chegar-se a uma conclusão generalizada a respeito dessa propriedade. Quando comparadas as resistências à compressão do concreto autoadensável fibroso (CAAF) e do concreto normal, com similar relação água/cimento e água/materiais em pó, e dependendo do tipo de fíler utilizado, o CAAF tende a ter um desempenho ligeiramente superior, devido à melhora na interface entre os agregados, matriz e fibras. A resistência à compressão, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson não apresentaram variações significativas, ao se adicionarem fibras à mistura (MARANGON, 2011).

Tutikian e Dal Molin (2008) afirmam que essas propriedades são resultados de decisões tomadas na dosagem. Segundo eles o CAA apresentará fissuração de secagem e alto calor de hidratação se for dosado com alto teor de cimento; se o teor de superplastificante for excessivo terá sua pega inicial retardada; se for dosado com baixo consumo de agregados graúdos seu módulo de elasticidade será baixo e terá maior probabilidade de retração plástica. Com respeito ao adensamento o CAA não apresenta problemas, enquanto que o CCV, se cuidados não forem tomados, tem sua qualidade final comprometida. Além dos poros da pasta

do cimento e dos agregados, o concreto como um todo possui vazios causados tanto por adensamento incompleto como por exsudação. Esses vazios ocupam de 1 a 10% de seu volume, sendo que misturas com valores de 10% são as que têm muitas falhas e resistências muito baixas. A atividade de lançamento também é intensificada uma vez que se exige menos habilidade para se obter um produto uniforme e denso. As propriedades no estado endurecido são iguais ou superiores às do CCV equivalentes. Isso leva a crer que o adensamento e, conseqüentemente, a durabilidade do concreto é mais garantido com a utilização do CAA, uma vez que um possível erro humano, na forma de adensamento inadequado, se torna consideravelmente reduzido (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Tutikian e Dal Molin (2008) acrescentam que quando se utilizam experimentos com materiais e relações a/c similares a resistência à compressão do CAA é, pelo menos, igual a do CCV e apresenta praticamente a mesma evolução ao longo do tempo para uma mesma classe de resistência. No entanto, quando se utilizam teores elevados de argamassa para produção de CAA, as retrações químicas e por secagem tendem a aumentar, assim como a retração térmica aumenta com elevados consumos de cimento e adições quimicamente ativas. Eles registraram resultados que mostram o impacto do aumento do teor de argamassa, que variou de 54% a 75% no módulo de elasticidade do CAA, confirmando a queda da propriedade a partir de teores de 65%. Quando comparado ao CCV, ambos com teores de argamassa de 54%, o CAA teve um desempenho ligeiramente superior, provavelmente em função do melhor adensamento e empacotamento por conta da presença dos finos. Por essa razão deve-se proporcionar CAA de forma a obter teores de argamassa próximos aos do CCV e relações pasta de cimento/agregado não muito alta (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

### 2.1.5 Propriedades físicas e químicas do CAA

As propriedades físicas e químicas do CAA também são altamente influenciadas por fatores que podem comprometer sua qualidade como produto final, entre as físicas estão a absorção, o índice de vazios e a massa específica real do CAA. Uma das propriedades químicas a ser considerada é a reação álcali-agregado, que se existente pode causar patologias de deterioração no concreto endurecido.

Absorção representa a quantidade de água absorvida pelo material seco com relação a massa do material e é representado em porcentagem. A penetração e movimentação de água no concreto é função da quantidade, forma, distribuição e dimensões dos poros do concreto (NBR9777, 1987).

A maioria das pesquisas sobre o assunto alcançaram valores de absorção próximo de 10%, Sato (1998) 12,8 a 15,8%, Barbosa (2008) 7,58% , Barros (2008) 7,87 a 13,87%, Lopez (2005) 11,35%, este último para o concreto de referência.

As propriedades químicas merecem uma atenção especial. Uma das grandes preocupações com as estruturas de concreto está relacionada com elas, pois essas influenciam na qualidade e durabilidade das estruturas de concreto. A RAA é um tipo de reação expansiva que ocorre devido ao processo químico que provém dos compostos mineralógicos do agregado com hidróxidos alcalinos originários do cimento, água de amassamento e agentes externos, os quais estão dissolvidos nas soluções dos poros do concreto, cujo produto final é um gel cristalino expansivo na presença de umidade, podendo originar fissuras, aumento da permeabilidade, diminuição da resistência e conseqüentemente ruptura da estrutura (BAPTISTA, et al., 2013).

Em função dos tipos de minerais presentes nos agregados, a RAA pode ser classificada em: reação álcali-sílica (RAS) e álcali-carbonato (RAC). A norma NBR 15577 (2009) ainda descreve um outro tipo, a reação álcali-silicato (RASS), mas a classifica como sendo um caso particular da reação álcali-sílica. Trata-se de uma reação química entre certas sílicas presentes nos agregados e os hidróxidos alcalinos de sódio e potássio das pastas de cimento hidratadas. Quando a sílica reage com esses hidróxidos inicia-se pelo ataque aos íons hidroxila presente no meio, sendo esses íons posteriormente incorporados à estrutura da sílica, formando um gel expansivo, na presença de umidade, responsável por muitos danos em estruturas de concreto, principalmente em obras hidráulicas (COUTO, 2008).

A norma NBR 15577-1 (2008) conceitua a RAS como sendo:

um tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença de hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo. Constituem exemplos de sílica reativa: opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, entre outros. Este é o tipo de reação álcali-agregado que mais rapidamente se desenvolve.

Essa norma, na quarta parte, classifica os materiais utilizados no concreto de acordo com a expansão obtida no ensaio, assim se a expansão das barras ensaiadas for superior a 0,20% o material é reativo; expansões entre 0,10% e 0,20% o material é potencialmente ativo; e; para barras com expansões menores que 0,10% o material é considerado inócuo.

## 2.2 Uso de Adições Mineraias e de Aditivos Químicos no Concreto

### 2.2.1 Adições mineraias

Correia Gomes (2009) define adições mineraias como materiais que são finamente moídos e são incorporados ao concreto com a finalidade de obter características especiais. Estes são geralmente utilizados em grandes quantidades, com a finalidade de reduzir os custos

e melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo até melhorar a sua resistência à fissuração térmica, à expansão álcali agregado e ao ataque de sulfatos.

Fonseca (2010) diferencia aditivo químico de adição mineral esclarecendo que o primeiro altera as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do concreto enquanto a adição, como o próprio nome sugere, serve para somar ou substituir parcialmente o cimento, devido às suas propriedades semelhantes às do cimento.

O efeito químico das adições minerais ocorre a partir da capacidade de reação com o hidróxido de cálcio –  $\text{Ca(OH)}_2$  – composto frágil e solúvel que forma durante a hidratação do cimento Portland. Dele deriva um composto resistente, o C-S-H (silicato hidratado de cálcio), que ocupa os vazios de maiores dimensões existentes na pasta de cimento ou na zona de transição, aumentando o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto. Dependendo da superfície específica das partículas e da composição química das mesmas, essas reações pozolânicas podem ser lentas ou rápidas. Já o efeito físico pode ser desdobrado em três ações principais: o efeito filer, que é o aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições; o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, causados pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; e a alteração da microestrutura da zona de transição, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retido sob os agregados (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Barros (2008) se preocupa com dois parâmetros essenciais para se estudar o comportamento dos grãos das adições minerais, que são a superfície específica e o diâmetro dos grãos. Segundo ele, a viscosidade da mistura será maior quanto maior for a superfície específica dos grãos. Da mesma forma, diâmetros médios da ordem de 80  $\mu\text{m}$  proporcionam melhores viscosidades e coesão da mistura do CAA. Assim, uma elevada quantidade de

fíleres com alta superfície específica e agregados de pequena granulometria, são parâmetros de fundamental importância para um maior controle das propriedades de auto-adensabilidade do CAA. Em seus estudos são citados finos que possuíam diâmetros médios inferiores a 125  $\mu\text{m}$  para exercer influência na microestrutura do CAA. Ele afirmou que finos com diâmetro médio de 0  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$  e de 75  $\mu\text{m}$  a 125  $\mu\text{m}$  apresentam resultados similares no tocante às propriedades do CAA no estado fresco (BARROS, 2008).

Cavalcanti (2006) cita estudos nos quais foram utilizadas adições de resíduos industriais, como escória de alto forno, pozolana natural, cinzas volantes, sílica ativa e fíler de rochas como calcário, mármore e granito como finos na ordem de 150  $\mu\text{m}$  de diâmetro (CAVALCANTI, 2006).

Gomes (2002) utilizou adições com predominância de 100  $\mu\text{m}$  enquanto que Efnarc (2002) recomenda 125  $\mu\text{m}$ . Essa definição deve ser analisada com bastante cuidado, já que afeta diretamente a relação água/finos (a/f), ou seja, água com relação aos finos (cimento + adições), que é um parâmetro muito utilizado na dosagem do CAA. Segundo Cavalcanti (2006), nenhum autor indica diferenças entre as distintas frações desses finos, mas recomendam que a relação a/f se encontre entre 0,9 e 1,1 (EFNARC, 2002).

Segundo Cavalcanti (2006) o uso de resíduos industriais como materiais finos, em pastas, argamassas e concretos, geralmente proporcionam uma melhora das suas propriedades nos estados fresco e endurecido. Atualmente, motivados por tais resultados, o uso de resíduos industriais têm sido também indicador para seu uso no concreto. Os agregados minerais são compostos por uma mistura que pode reunir pó de quartzo, materiais metálicos, escória granulada de alto forno, sílica ativa, metacaulin, pigmentos e aditivos. O uso dessas adições tem proporcionado concretos cada vez mais resistentes e duráveis, com a simplicidade de apenas melhorar as propriedades já existentes no concreto tradicional.

Andrade (2012) afirma que quando se substitui parte de cimento Portland por cinza volante, cinza de casca de arroz, escória de alto-forno, sílica ativa, cada uma destas adições minerais atua de modo distinto, de acordo com sua granulometria e atividade química ou física. O desenvolvimento das reações pozolânicas proporciona a formação de compostos hidratados mais homogêneos e induz a uma diminuição nos teores de hidróxido de cálcio na solução dos poros do concreto, originando uma pasta mais densa e homogênea, substituindo poros grandes por menores, o que dificulta o ingresso e deslocamento de agentes agressivos no interior da pasta, ilustrado na Figura 1-a. O resultado é um maior empacotamento com o cimento, promovendo o aumento da resistência do concreto, como ilustrado na Figura 1-b. A proporção para substituição do cimento por adições varia conforme o tipo de adição (ANDRADE, 2012).

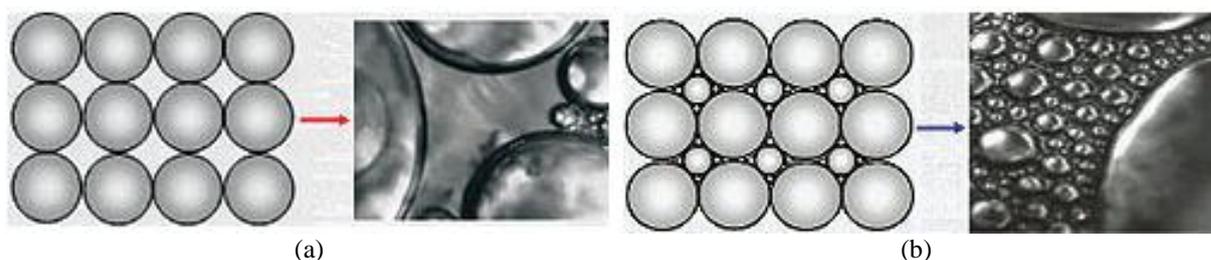


Figura 1: Empacotamento das partículas com o cimento: (a) Falha de empacotamento; (b) Empacotamento adequado. Fonte: (ANDRADE, 2012).

Andrade (2012) descreve que o principal benefício à sociedade quando se usa adições minerais é o de reduzir o consumo de energia e poluição do ar gerados pela produção do cimento, ao substituir grande parte desse produto na indústria da construção civil. Mas, segundo ele, diversas outras características podem ser obtidas, tais como:

- ✓ Redução do calor de hidratação;
- ✓ Incremento de resistência em idades avançadas;
- ✓ Melhoria da coesão;
- ✓ Diminuição da exsudação;

- ✓ Melhoria da fluidez do concreto;
- ✓ Melhoria da resistência na zona de transição entre a pasta e o agregado;
- ✓ Redução da permeabilidade;
- ✓ Influência na resistividade elétrica;
- ✓ Aumento da resistência química.

Isso tudo levado em consideração pode-se perceber a importância da presença de finos na dosagem do CAA, cuja consequência tem como objetivo contribuir para a diminuição da dosagem do cimento, reduzir o calor de hidratação e evitar a presença de fissuras internas no concreto, e melhorar o comportamento da microestrutura do concreto, preenchendo assim os poros de menor escala e aumentando a viscosidade, o que reduz a fricção entre os agregados, aumentando assim a resistência à segregação e/ou exsudação (CAVALCANTI, 2006).

Segundo Klein (2008) as adições minerais são classificadas em três grupos, de acordo com sua ação físico-química, sendo estes:

- Material pozolânico;
- Material cimentante;
- Fíler.

#### 2.2.1.1 Material pozolânico

O material pozolânico é definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que quando finamente dividido e na presença de umidade reage com o hidróxido de cálcio, a temperatura ambiente,

formando compostos com propriedades cimentantes (ABNT NBR 12653, 1992).

#### 2.2.1.2 Material cimentante

O material cimentante não necessita do hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes, porém, a quantidade destes compostos formados, como o C-S-H (silicato hidratado de cálcio), por exemplo, é em geral, insuficiente para aplicação desses materiais para fins estruturais e sua hidratação é normalmente lenta. Quando o material cimentante é usado como adição, em substituição de parte do cimento Portland, o hidróxido de cálcio e a gipsita presentes no cimento, aceleram sua hidratação (KLEIN, 2008).

#### 2.2.1.3 Fíler

O fíler é uma adição mineral não reativa ou quimicamente inerte finamente moída, que, devido às suas propriedades físicas, tem efeito benéfico sobre as propriedades do concreto (NEVILLE, 1997). Ele atua através do efeito físico microfíler e como pontos de nucleação no momento da hidratação do concreto, tais como a trabalhabilidade, permeabilidade e porosidade (KLEIN, 2008).

Um dos exemplos de fíler utilizado no mercado da construção é o fíler calcário. O efeito benéfico sobre as propriedades do concreto convencional envolvem melhoras na trabalhabilidade, densidade, exsudação, permeabilidade, capilaridade. É quimicamente inerte – não possui atividade pozolânicas (BELTRÃO, 2010).

## 2.2.2 Aditivos químicos para concretos

A NBR 11768 - aditivos para concreto de cimento Portland (1990), define aditivo químico o produto que adicionado em pequenas quantidades, modifica algumas propriedades do concreto, no sentido de melhor ajudá-las em determinadas condições. Ou seja, o concreto precisa ter, antecipadamente, determinada característica para que o aditivo possa acentuar, retardar, acelerar ou plastificar.

Os aditivos são produtos que, adicionados em pequena quantidade, geralmente de 0,5% a 5,0%, em relação à massa de materiais cimentícios nos concretos de cimento Portland, modifica em algumas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido, no sentido de melhorar esses concretos para determinadas condições. Os principais tipos de aditivos são: plastificantes (P), retardadores de pega (R), aceleradores de pega (A), plastificantes retardadores (PR), plastificantes aceleradores (PA), incorporadores de ar (IAR), superplastificantes (SP), superplastificantes retardadores (SPR) e superplastificantes aceleradores (SPA), (EFFTING, 2014).

Segundo descreve Effting (2014) eles têm a capacidade de alterar propriedades do concreto em estado fresco ou endurecido e apesar de estarem divididos em várias categorias, os aditivos carregam em si dois objetivos fundamentais:

- 1) o de ampliar as qualidades de um concreto, ou;
- 2) o de minimizar seus pontos fracos.

Effting (2014) cita as seguintes melhorias referente a qualidade do concreto quando se aplica aditivo químico: trabalhabilidade; resistência; compacidade; durabilidade; bombeamento e fluidez. Ao passo que um aditivo também pode resultar diminuição de permeabilidade; retração; calor de hidratação; tempo de pega (retardar ou acelerar) e

absorção de água.

Cavalcanti (2006) descreve que não é exagero comparar os aditivos aos remédios, que podem tanto trazer mais saúde para seus pacientes, como podem virar um veneno se ministrados na dose errada. Tomando-se os cuidados necessários a relação custo-benefício destes produtos é muito satisfatória. As empresas que prestam serviços de concretagem, não abrem mão das suas qualidades e possuem, portanto, equipamentos e controles apropriados para conseguir o melhor desempenho possível dos concretos aditivados.

Os superplastificantes são aditivos conhecidos como redutores de água de alta eficiência, por serem capazes de reduzir o teor de água três a quatro vezes mais, para uma dada mistura, quando comparados aos aditivos plastificantes. São tensoativos, ou seja, tem a capacidade de diminuir a tensão superficial de cadeia longa, possuem massa molecular elevada e um grande número de grupos polares na cadeia do hidrocarboneto (BARROS, 2008).

Cavalcanti (2006) em seus estudos constatou que quantidades de aditivo superplastificantes de até 1,0% em relação à massa de cimento podem ser incorporadas às misturas de concreto sem causar exsudação excessiva e retardamento do tempo de pega, apesar da consistência ser da ordem de 200 a 250 mm de abatimento. É a dimensão coloidal das partículas de cadeia longa do aditivo, que, provavelmente, obstrui os canais de fluxo de água de exsudação no concreto, de modo que a segregação não é geralmente observada em concretos com esse aditivo. A Figura 2-a mostra a excelente dispersão das partículas de cimento na água que parece acelerar a taxa de hidratação, assim, é comum ocorrer a aceleração da pega e do endurecimento. Na Figura 2-b pode-se observar maior espaçamento entre as partículas de cimento em dispersão num concreto sem aditivo superplastificante (CAVALCANTI, 2006).

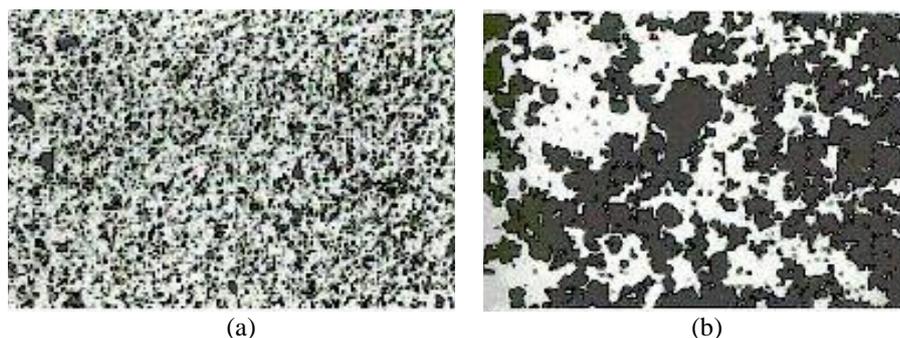


Figura 2: Micrografia de partículas de cimento em uma solução água-cimento: (a) com aditivo superplastificante; (b) sem aditivo superplastificante (MEHTA & MONTEIRO, 1994, apud Cavalcanti, 2006).

Os aditivos superplastificantes podem ser de dois tipos: os de 2<sup>a</sup>. geração, constituídos de polímeros sintéticos sulfonados, e os de 3<sup>a</sup>. geração, que são os policarboxilatos. Os policarboxilatos, também conhecidos como poliacrilatos, são capazes de promover um efeito bastante eficiente na repulsão dos grãos de cimento.

Segundo Barros (2008), os superplastificantes mais recomendados para a produção do CAA são os de 3<sup>a</sup>. geração, os policarboxilatos, pois, permitem uma maior redução de água, maiores resistências iniciais, e manutenção de fluidez por um tempo prolongado, em relação aos aditivos superplastificantes de 2<sup>a</sup>. geração.

Tutikian e Dal Molin (2008) classificam os superplastificantes em quatro categorias, de acordo com sua composição química:

a) Ignossulfonados ou lignossulfonados modificados (LS). Esses geralmente incorporam ar e retardam, com diversas intensidades, a pega do cimento;

b) Sais sulfonados de policondensado de naftaleno e formadeído, usualmente denominados de naftaleno sulfonado ou apenas de naftaleno (NS). Estes compostos não incorporam ar e praticamente não interferem no tempo de pega do cimento;

c) Sais sulfonados de policondensado de melamina e formadeído, usualmente denominado de melamina sulfonato ou apenas de melamina (MS). A melamina pode apresentar uma tendência a retardar a pega do cimento e, eventualmente, incorporar pequena

quantidade de ar;

d) Policarboxilatos (PC).

Os lignossulfonatos (LS) são conhecidos como aditivos plastificantes de primeira geração, utilizados como redutores de água normais e, em alguns casos, como supeplastificantes. O naftaleno (NS) e a melamina (MS) são conhecidos comercialmente como aditivos superplastificantes de segunda geração, e permitem a redução de até 25% da quantidade de água na mistura quando usados como redutores de água. E, finalmente, os policarboxilatos (PC) são os aditivos mais aconselhados para utilização no CAA, por serem aditivos superplastificantes de alta eficiência que dispersam e defloculam as partículas de cimento. Assim, permitem a redução de água das misturas de até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade. Também são poliméricos, melhoram sensivelmente a dispersão das partículas de cimento quando comparados aos aditivos de primeira e segunda geração, uma vez que os tradicionais são baseados em polímeros as partículas de cimento absorvem e que acumulam-se em sua superfície. Como esses polímeros aumentam a carga negativa, desbalanceando, do cimento, fazem com que suas partículas se dispersem por repulsão elétrica, exigindo menos água para fluidificar a pasta (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A incorporação de superplastificante em pastas, argamassas e/ou concretos provoca alterações nas propriedades e características da mistura, tais como: hidratação, porosidade, morfologia dos hidratos, evolução da resistência, fluidez, tempo de pega, retração, segregação e/ou exsudação, dentre outras. No entanto, a utilização desordenada do aditivo pode afetar de forma negativa tais características na mistura. Para que os efeitos provocados pela adição do superplastificante sejam satisfatórios, deve ser feito um estudo prévio de compatibilidade e uma adequada caracterização dos materiais empregados (BARROS, 2008).

Um importante passo para a obtenção da dosagem do CAA está na determinação da

dosagem do superplastificante em relação à massa de cimento (sp/c), a fim de se determinar a dosagem ótima de saturação do superplastificante a ser utilizada no concreto, ou seja, o teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez, pois, acima deste alguns aspectos negativos podem ocorrer, tais como: segregação e/ou exsudação, fluidez insuficiente para a obtenção do CAA, perda de trabalhabilidade, dentre outros. (GOMES, 2002, apud BARROS, 2008).

## 2.3 Aproveitamento de Resíduos Pétreos

### 2.3.1 Rochas ornamentais

A NBR 6502 (ABNT, 1995) define rocha como sendo material sólido, consolidado e constituído por um ou mais minerais.

As rochas ornamentais e para revestimento, também designadas pedras naturais, rochas lapídeas, rochas dimensionais e materiais de cantaria, compreendem os materiais geológicos naturais que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados por meio de esquadrejamento, polimento, lustro, etc. Seus principais campos de aplicação incluem tanto o emprego em peças isoladas, como esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e artefatos de arte funerária em geral, quanto em edificações, destacando-se, nesse caso, os revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas, soleiras, etc. (CHIODI, 2009)

Considerando o lado comercial, as rochas ornamentais são definidas essencialmente à luz de duas principais categorias, que são os “granitos” e os “mármore”, distinguidas com base na sua composição mineralógica. Os granitos abrangeriam as rochas silicatadas, ou seja, formadas por minerais estruturalmente constituídos por tetraedros de  $\text{SiO}_4$ , ao passo que os

mármore incluíam as rochas composicionalmente carbonáticas (LARIZZATTI e MENESES, 2005).

### 2.3.2 Produção e aproveitamento dos resíduos

Segundo Chiodi (2009), o mármore e o granito respondem largamente pelas variedades de rochas ornamentais e de revestimento comercializadas, representando cerca de 80% da produção mundial. No Brasil, estudos indicam que os granitos correspondem a 50% do total de consumo a produção nacional de rochas ornamentais, enquanto apenas 19% são relativos aos mármore.

A produção de resíduos dessas pedras ornamentais alcança a faixa de 25% (PADILHA DOS SANTOS, 2012). O Serviço Brasileiro de Apoio à Micro e Pequena Empresa (Sebrae), em seu boletim da construção civil - marmorarias, Sebrae (2014), esclarece que o Brasil possui mais de 1.200 variedades de rochas ornamentais, exploradas por 12.000 empresas instaladas por todo o país, gerando 100 mil empregos diretos e movimentando cerca de US\$ 2,1 bilhões por ano. Miranda (2012) contabilizou que as marmorarias executam a serragem e o polimento das chapas ornamentais, e estima uma produção de 190.000 toneladas de resíduos provenientes do beneficiamento de mármore e granito a cada ano. São mais de 1000 jazidas em todo o país (MIRANDA, 2012). Isto colocou o país como 8º colocado no ranking de países exportadores de blocos e é o 5º maior exportador de rochas ornamentais acabadas (SEBRAE, 2014). Segundo a revista Qualidade (2004) são produzidos aproximadamente, mais de dois milhões de metros cúbicos de blocos por ano, mais de quarenta milhões de metros quadrados de chapas e mais de três milhões de ladrilhos padronizados. De acordo com Lopes (2006), aproximadamente 20% a 30% das rochas são desperdiçadas na forma de lama devido ao processo produtivo utilizado na indústria de

beneficiamento de rochas ornamentais. No ano de 2009 o Brasil explorou 7,6 milhões de toneladas de pedras ornamentais, tendo participação da região norte de 1,3%, com 100.000 toneladas produzidas (CHIODI, 2009).

Considerando-se a grande quantidade de resíduo gerada e tentando contribuir para o desenvolvimento sustentável, alguns pesquisadores vêm estudando o aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais na construção civil, como na produção de concretos convencionais: Santos, (2011), Gonçalves, (2000) e Barbosa, (2008); na produção de vidros: Marçal, (2011); em lajotas para piso: Moura, (2002); em placas em matriz polimérica: Molinari, (2007); em blocos de concreto: Rania A. Hamza, (2011); em blocos de solo cimento: Miranda, (2012); na produção de asfaltos: Stefenon, (2003); etc. No estado do Amazonas já houve contribuição de alguns pesquisadores na pesquisa de CAA com utilização de resíduos como, por exemplo: CAA com fibras de polipropileno: Sousa Filho, (2011); CAA com resíduo de vidro: Bartholomei, (2013).

O resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais é classificado como sendo de Classe III – Inerte. Portanto, a sua utilização na construção civil não causa risco ambiental e nem a saúde humana. Porém, a lama dos resíduos do beneficiamento do mármore e do granito (RBMG) quando descartada de forma incorreta pode causar graves problemas ambientais, como o assoreamento de rios, poluição dos mananciais, e também pode causar doenças à população (LOPES, 2006).

### 2.3.3 Resíduos das marmorarias

Por milhares de anos, as rochas tem sido usadas como material de construção. A partir do início do século XX, porém, passaram a ser aplicada no revestimento de estrutura de

concreto e aço, além das alvenarias. A produção de rochas ornamentais engloba, a extração de blocos, o esquadreamento e serragem para obtenção de chapas e, finalmente, a realização do acabamento desejado (polimento, levigamento, flameagem, apicoamento, jateamento, etc.). A Figura 3 ilustra disposição das placas de mármore e granitos com acabamento no pátio das empresas. Após o acabamento, as rochas recebem os cortes para o uso final: ladrilhos, arte funerária, revestimentos de paredes e pisos, etc. Ao se aplicar na rocha qualquer tipo de insumo no acabamento, o valor agregado da mesma aumenta (QUEIROZ, 2005).



Figura 3: Placas no pátio da marmoraria

As bordas das placas por serem irregulares, como mostra a Figura 4-a, são cortadas (Figura 4-b) resultando em aparas de pequenas dimensões.



Figura 4: Placa de granito a ser cortada: (a) Placa no pátio; (b) área útil da placa, bordas que são cortadas.

Desenhos são realizados marcando o formato da peça desejada no fim do processo, Figura 5-a. A placa segue para a bancada de corte e acabamento, como ilustra a Figura 5-b.

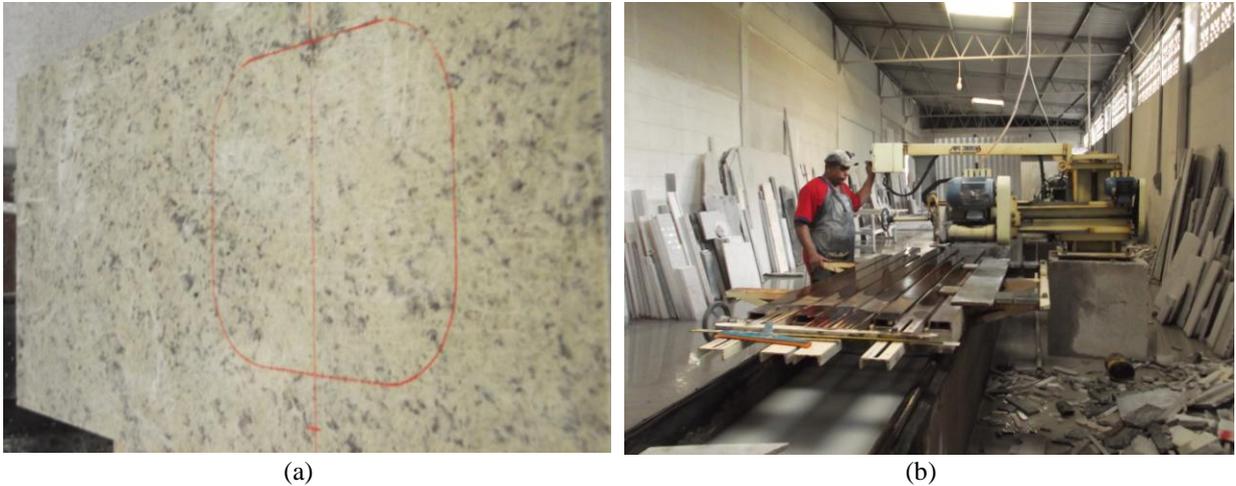


Figura 5: Corte da placa: (a) Desenho na placa; (b) Aparas de mármore e granitos provenientes do corte das placas

São dois os produtos finais: o primeiro é a peça desejada que poderá ser fixada no local planejado e estará pronta para uso, como mostra a Figura 6-a; o segundo é o resíduo, que são de dimensões variadas, as maiores depositadas nas dependências da empresa, como mostra a Figura 6-b, o pó misturado à água, formando lama, é levado através de canaletas no piso até um pequeno tanque de decantação, ilustrado na Figura 7-a. A lama é retirada e deixada secar como mostra a Figura 7-b.



Figura 6: : Produtos finais do corte da placa: (a) Peça projetada; (b) Aparas de mármore e granitos provenientes do corte de placas



Figura 7: Resíduo na forma de lama e pó: (a) Tanque de decantação da lama; (b) Aspecto do resíduo fino - pó - deixado secar.

Esses resíduos pulverulentos são compostos pela mistura dos diversos minerais que constituem as rochas em placas ali beneficiadas, uma vez que não há uma preocupação com a separação prévia dos resíduos provenientes dos dois tipos de placas. Torna-se necessário que se conheça as características físicas, químicas e mineralógicas desse resíduo. Algumas diferenças entre as rochas podem ser constatadas facilmente. De uma forma geral nos estudos de geologia as rochas são classificadas quanto as suas características físicas e mecânicas tais como: condutividade térmica, durabilidade, dureza, higroscopicidade, permeabilidade, porosidade, resistência mecânica e trabalhabilidade (BARROS FILHO, 2005).

O mármore é uma rocha metamórfica, formada pelo metamorfismo de calcários, composta pelos minerais calcita e dolomita, como ilustra a Figura 8-a. Já o granito é uma rocha eruptiva plutônica supersaturada, composta pelos minerais: quartzo, feldspato, mica e outros, conforme ilustra a Figura 8-b. Ambos possuem boa condutividade térmica, são poroso quando não polidos, possuem superfície antiderrapante, são muito resistentes a choques e intempéries, com durezas na escala de Mohs de 3,0 a 4,5 para o mármore e de 5,0 a 7,0 para o granito (BARROS FILHO, 2005).

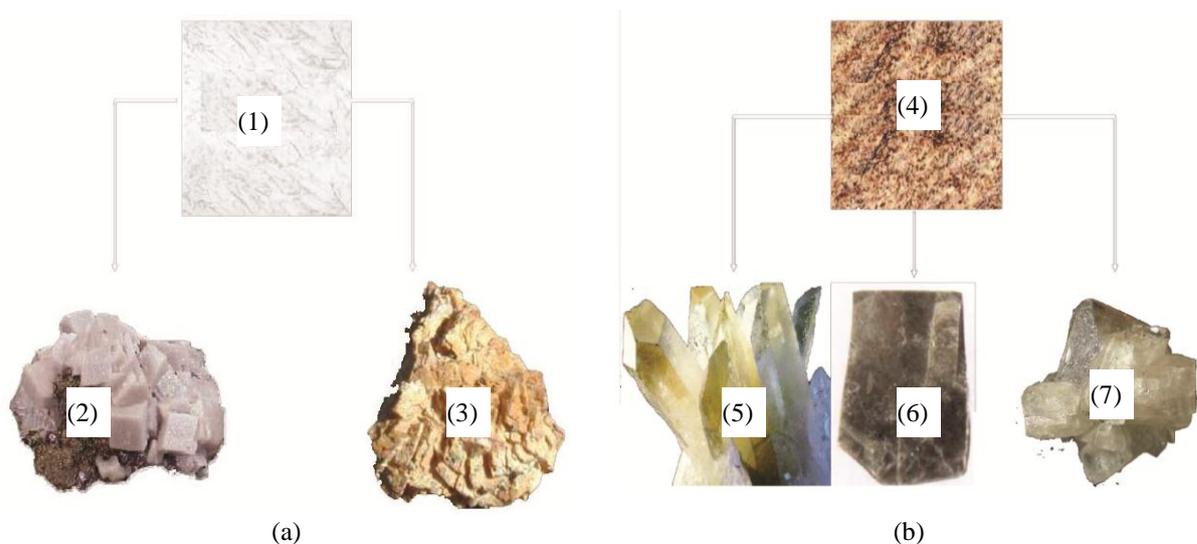


Figura 8: Esquema da composição mineralógica típica: a) do mármore (1): calcita (2) e dolomita (3); b) do granito (4): Quartzo (5), mica (6) e feldspato (7).

Levando em conta a geologia o granito comercial inclui tanto rochas ígneas quanto metamórficas, abrangendo, neste sentido, uma diversidade de tipos de textura, resistência e composição química e mineralógica, o que reflete em cores e padrões estéticos encontrados (FRASCÁ, 2002).

Dependendo da variedade, podem estar inclusos expressivo conteúdo de minerais máficos, escuros, notadamente biotita, anfibólios e piroxênios. Dentre as rochas ígneas, os tipos mais comuns encontrados naturalmente e utilizados como rocha ornamental e de revestimento são os granitos sensu strictu, os quartzomonzonitos, os granodioritos e os quartzodioritos. Constituem variedades plutônicas basicamente quartzo-feldspáticas, fanero-cristalinas, com mineralogia acessória representada principalmente por micas (biotita e muscovita) e anfibólios (hornblenda), em proporções variáveis. Equivalentes menos silicosos do granito, quartzomonzonito e granodiorito, ou seja, com menos de 10% de quartzo, correspondem respectivamente o sienito, o monzonito e o diorito. Dentre as granitos de rochas metamórficas, também conhecidas como rochas movimentadas, têm nos gnaisses e migmatitos seus representantes mais expressivos. Os gnaisses são rochas de granulação fina a

grossa, até porfiróide, folheadas, estruturalmente marcadas pelo predomínio de bandas quartzo-feldspáticas sobre as de minerais micáceos, principalmente biotita e/ou hornblenda. Apresentam composição quartzodiorítica a granodiorítica, até granítica. (LARIZZATTI e MENESES, 2005).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Estudo Experimental

Para o alcance dos objetivos deste trabalho foi desenvolvida uma etapa experimental que consistiu de cinco etapas conforme o fluxograma da Figura 9.

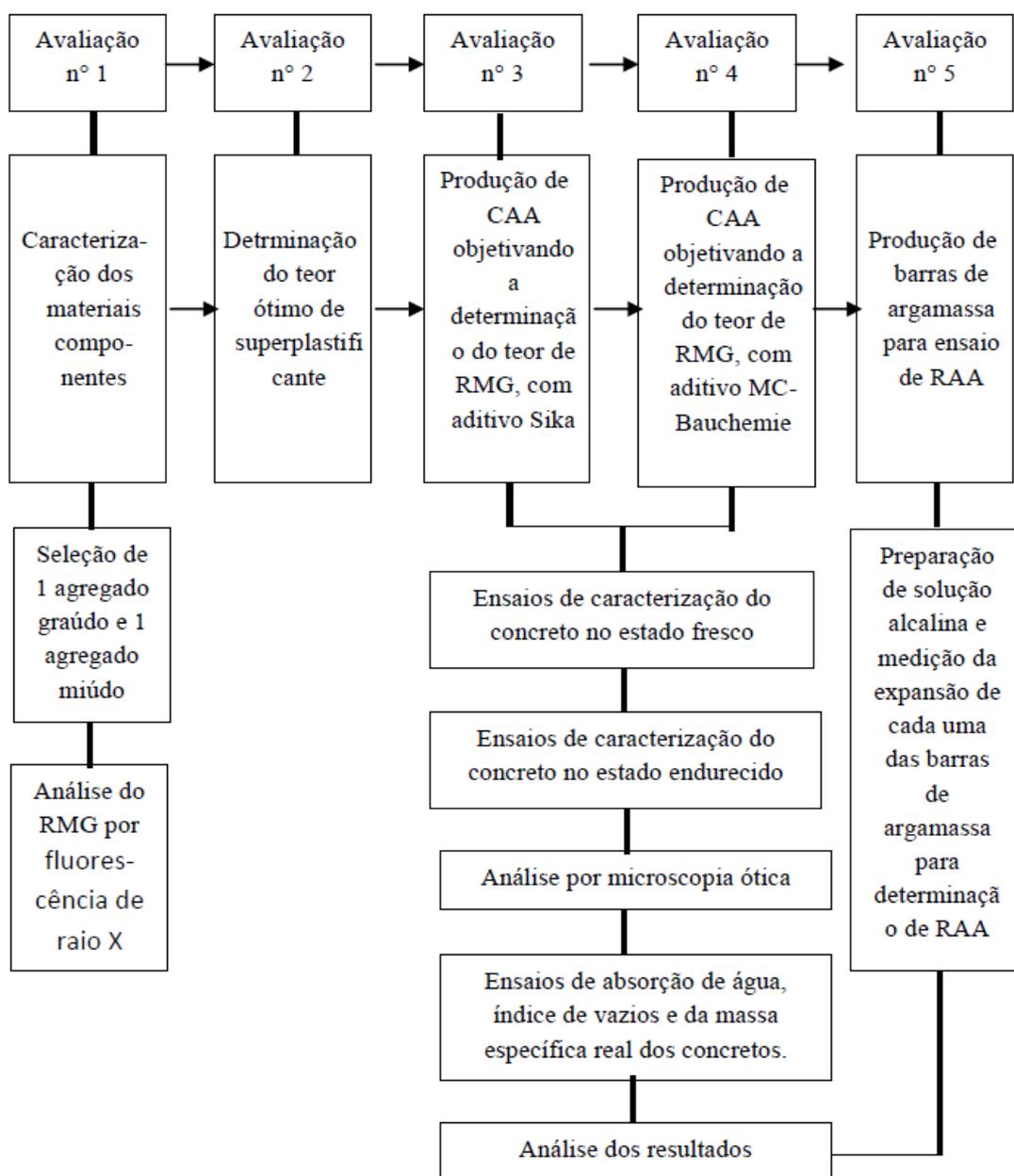


Figura 9: Fluxograma das etapas da pesquisa.

Como agregado miúdo foi utilizada a areia branca, por ser a areia mais facilmente encontrada no comércio local. A caracterização desta incluiu classificação granulométrica, determinação do módulo de finura, teor de material pulverulento, massa unitária do material no estado solto e massa específica real.

Para o agregado graúdo, que foi a pedra britada zero, realizou-se ensaios de classificação granulométrica, determinação da massa específica real, massa unitária no estado solto e estado compactado.

Para o cimento Amazon CP I – S – 32, foi determinado o módulo de finura, o início e final de pega e as resistências à compressão nas idades 3, 7 e 28 dias.

Para cada um dos dois superplastificantes, Sikament SM 251 e PowerFlow 1159, foram realizados ensaios de fluidez no funil de Marsh para determinação do teor ótimo de sp/c. As misturas trabalhadas continham cimento Portland CP I-S-32, superplastificante e RMG, sendo este como substituição de 20% em massa da quantidade do cimento. A quantidade de superplastificante variou de 0,5%, começando de 0% até 2,5% sobre a massa de cimento.

As nomenclaturas adotadas para os concretos produzidos são os apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Concretos produzidos.

Misturas	% de RMG	Superplastificante
CS0	0	SIKA
CS10	10	SIKA
CS15	15	SIKA
CS20	20	SIKA
CW0	0	POWERFLOW
CW5	5	POWERFLOW
CW10	10	POWERFLOW
CW20	20	POWERFLOW
CW30	30	POWERFLOW
CW40	40	POWERFLOW

Um concreto de referência, ou seja, sem adição de resíduo, para cada um dos superplastificantes, três concretos autoadensáveis com adição de resíduo RMG nas respectivas porcentagens de substituição de cimento em massa: 10%, 15%, 20% para o superplastificante Sika e de 5%, 10%, 20%, 30% e 40% para o superplastificante Power Flow, ambos percentuais sobre a massa do cimento.

Para determinar as propriedades de trabalhabilidade dos concretos no estado fresco foram definidos os seguintes ensaios: ensaios de espalhamento do tronco de cone, ensaios de tempo de escoamento para alcançar diâmetro de espalhamento de 50 cm, conhecidos respectivamente como “Slump Flow Test” e “Slump Flow T<sub>50cm</sub> Test”; e Ensaios de fluidez no funil V, chamado de “V-Funnel Test”, nos quais se verificou duas propriedades, a saber: a capacidade de escoar em fôrmas preenchendo todos os espaços sem utilização de vibração e a capacidade do CAA se manter coeso sem segregação. Também foram realizados ensaios de fluidez e habilidade passante na caixa L, conhecido como “L-box Test”, ensaios de fluidez T 40 cm na caixa L, nos quais se verificou a capacidade deste concreto de passar por obstáculos, simulando uma situação de concretagem de uma peça com armadura densa. Todos esses ensaios foram baseados na norma NBR 15823 (ABNT, 2010).

Para a determinação das propriedades mecânicas foi definido, no estado endurecido, o ensaio de determinação da resistência à compressão através do rompimento dos corpos de prova, segundo a NBR 5739 (ABNT, 1994). Foram realizados ensaios de compressão axial em três idades: para as misturas CS nas idades de 14, 28 e 90 dias; e; para as misturas CW nas idades 7, 28 e 90 dias. Para as misturas com nomenclaturas CS foi verificado que os corpos de prova apresentavam-se maleáveis, muitos ainda no quinto dia após a moldagem, possivelmente por incompatibilidade entre o superplastificante Sika e o cimento Portland utilizado na mistura. Só após o quinto dia os corpos de prova eram deformados e colocados

em cura úmida. Por esse motivo esses não foram rompidos na idade de 7 dias e sim em 14 dias.

Paralelamente foram realizados ensaios em corpos de prova para determinação de absorção de água por imersão, do índice de vazios e massa específica, segundo os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2005).

Barras de concreto e de argamassa contendo RMG em substituição ao cimento, nos percentuais de 0%, 20%, 30% e 40% sobre a massa do cimento, foram moldadas e colocadas em solução alcalina, de normalidade 1,0 N de NaOH a temperatura de 80 °C, para classificar os materiais dosados no CAA como reativos, parcialmente ativos ou inócuos em relação a reação álcali-agregado, seguindo a NBR 15577-4/5: método acelerado (ABNT, 2009).

Também foram moldadas placas de concreto autoadensável, nos percentuais de 0%, 20%, 30% e 40% de substituição de cimento por RMG em massa, com dimensões 40cm x 40cm x 3,0 cm e submetidas a ensaios de resistência a flexão dessas placas, de acordo com a NBR 15805 (ABNT, 2010).

Toda parte experimental foi realizada nos Laboratórios de Ensaio de Materiais da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (FT / UFAM).

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Cimento

Nos ensaios experimentais utilizou-se o Cimento Portland Comum com Adições, cuja sigla e classe são representadas por CP I-S-32, distribuído na cidade de Manaus pela empresa Cimento Amazon (cemex). Segundo a NBR 5732 (ABNT, 1991) trata-se de um cimento Portland tido como comum, porém com 5% de material pozzolânico em massa. É muito adequado para o uso em construções de concreto em geral quando há pouca exposição a

sulfatos do solo ou de águas subterrâneas.

Foram realizados os seguintes ensaios no cimento:

- ✓ Determinação da granulometria do cimento NBR 7215;
- ✓ Resistência a compressão axial NBR 5739;

### 3.2.2 Resíduos de Mármore e Granitos - RMG

Os RMG foram fornecidos pela empresa Granmarmore Comércio Ltda, localizada na cidade de Manaus, Estado do Amazonas, que utiliza placas de mármore e granitos em seu processo de beneficiamento. Nessa empresa, os resíduos em forma de pó e grãos são coletados em uma caixa de decantação e os rejeitos maiores são depositados em um local do terreno e depois disponibilizados para venda como cascalho, e algumas partes maiores são posteriormente cortadas em pequenas placas retangulares de dimensões 10cm X 10cm. Os resíduos em pó foram retirados da caixa de decantação e transportados em sacos plásticos resistentes até o laboratório de mecânica dos solos da UFAM. Esses foram espalhados sobre grandes bandejas metálicas para uma espécie de pré-secagem ao ar livre, mas abrigada da luz, e posteriormente foram expostas à luz solar por aproximadamente quatro horas tornando-se secas para finalmente serem peneiradas mecanicamente em peneiras de abertura # 200, segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), obtendo-se finos com diâmetros menores que 75  $\mu\text{m}$ , que irão compor o CAA como adição mineral.

A lama, pó de mármore e de granito com água, passou por uma pré-secagem, depois destorroados em grãos menores e deixados secando novamente, conforme mostrado na Figura 10-a. Após secos foram triturados no moinho de mandíbulas, que concluiu o destorroamento do RMG tornando-os mais finos. Na Figura 10-b pode-se ver uma fotografia da moinho

utilizado.



Figura 10: Preparação dos resíduos das marmorarias: (a) Pré-secagem da lama proveniente dos tanques de decantação das empresas; (b) Moinho de mandíbulas utilizado para triturar e separar os grãos de RMG.

Após a passagem pelo moinho o material tornou-se partículas finas de coloração cinza, como mostra a Figura 11-a. Esse material foi peneirado e o passante na peneira de abertura # 200 (duzentos meshes), resíduos contendo diâmetros menores que 0,075 mm, foi separado para realização de outros ensaios e para a preparação dos concretos. A Figura 11-b mostra esse material na forma de finos.



Figura 11: Preparação dos resíduos: (a) Aspecto dos resíduos após passar pelo moinho; (b) RMG com diâmetro menor que 0,075mm.

### 3.2.2.1 Fluorescência por Raio-X

A análise química de fluorescência do RMG utilizado foi realizada por meio de

espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X. O equipamento utilizado foi o X-Rays Pamauytical, da marca Epsilon 3-XL, mostrado na Figura 12, pertencente ao Laboratório de Materiais da FT / UFAM, que utiliza o sistema peltier de resfriamento e gás hélio (He) de purga. Foram analisados todos os elementos compreendidos na faixa do Flúor ao Urânio. O material a ser analisado foi no estado seco, aproximadamente 100 g de granulometria passante na peneira de # 200 (0,075 mm).



Figura 12: Equipamento de espectroscopia por fluorescência de raios X.

### 3.2.2.2 Massa Específica

É a massa da unidade de volume excluindo-se os vazios entre grãos e os permeáveis, ou seja, a massa de unidade de volume dos grãos do agregado. Sua determinação é feita através do picnômetro, do frasco de Chapman ou do frasco de Le Chatelier. O último foi o adotado no laboratório para o resíduo RMG, adotando a norma NBR NM 23 (ABNT, 2000). No ensaio especifica-se que em determinada etapa o frasco de le chatelier seja mergulhado em água à uma temperatura de 24°C. Isso foi conseguido com o acréscimo controlado de cubos de gelo na água até estabilização da temperatura.

### 3.2.3 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi areia natural quartzosa, de coloração branca, proveniente do Município de Manaus/AM, extraída de reservas localizadas na BR 174 e comercializada no mercado de Manaus/AM.

O agregado graúdo utilizado foi pedra britada de origem granítica vendida no mercado de Manaus/AM como “brita 0”, proveniente da empresa Polimix. O uso da brita zero foi em atendimento às referências sobre o CAA, que indicam o uso de menores diâmetros máximos característicos de agregado graúdo.

As características físicas determinadas para o agregado graúdo foram: massa específica (NBR NM 53, 2003); massa unitária em estado solto; massa unitária em estado compactado e seco (NBR NM 45, 2006); e; composição granulométrica, de acordo com NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Resumindo, os ensaios realizados e as normas seguidas estão listados abaixo:

Ensaio de agregados:

- ✓ Determinação da massa unitária do agregado miúdo em estado solto NBR NM 45;
- ✓ Determinação da massa unitária do agregado graúdo NBR NM 45;
- ✓ Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo NBR NM 248;
- ✓ Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo NBR NM 248;
- ✓ Determinação do teor de argila em torrões no agregado miúdo NBR 7218;
- ✓ Avaliação das impurezas orgânicas das areias NBR 7220;
- ✓ Determinação do teor de material pulverulento NBR 7219;
- ✓ Determinação da massa específica real do agregado miúdo e graúdo NBR 9776;

### 3.2.3.1 Granulometria e Massas Unitárias

Os ensaios de granulometria e de massa unitária no estado solto e massa unitária no estado compactado foram realizados para a areia e para a brita zero. Esses ensaios são normatizados pelas normas brasileiras e são necessários no cálculo do traço teórico do traço de concreto. As normas que descrevem esses ensaios são: massa unitária em estado solto e massa unitária em estado compactado e seco: NBR NM 45 (ABNT, 2006); composição granulométrica: NBR NM 248 (ABNT, 2003), para determinação de granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura.

### 3.2.4 Superplastificantes

Foram utilizados dois aditivos superplastificantes na dosagem dos CAA: o primeiro pertence à marca Sika, de nome comercial Sikament SM 251 e o segundo superplastificante foi o PowerFlow 1159, da empresa MC-Bauchemie Brasil.

O Powerflow 1159 é um superplastificante sintético baseado na nova tecnologia de polímeros policarboxilatos (PC) desenvolvida pela empresa fabricante MC-Bauchemie Brasil. A opção foi devido esses estarem sendo usados em algumas obras na cidade de Manaus (MC-BAUCHEMIE. 2013).

De acordo com o fabricante o Sikament SM 251 é composto quimicamente por sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso. Apresenta-se no estado líquido, de pega normal e redutor de água, recomendado para concretos com elevado teor de argamassa, permitindo a obtenção de concretos com altos índices de fluidez. Tem coloração marrom escuro e

densidade  $1,20 \pm 0,02$  Kg/litro e contém 30% de sólidos em sua composição e Ph de  $8,5 \pm 1,0$ . Ele é recomendado para todos os tipos de concretos quando se pretende maior plasticidade ou redução da água de amassamento (SIKA, 2013).

A dosagem sugerida pelo fabricante é de 0,6 a 1,5% sobre a massa de cimento quando concreto bombeado e de 1 a 2% quando se deseja concreto de alta resistência. A dosagem excessiva pode resultar em forte exsudação, segregação e retardo excessivo, podendo levar ao não endurecimento do concreto ou a perda de resistência do mesmo. A dosagem ótima foi encontrada através de ensaios de misturas de: cimento, RMG, água e superplastificante. Os valores do fator a/c, encontrado por tentativas, para cada um dos aditivos superplastificantes foi: 0,30 para o sikament 251; e; 0,24 para o powerflow 1159. As quantidades de aditivos utilizadas no ensaio foram primeiramente de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% em relação à massa de cimento. Posteriormente analisando os valores encontrados para tempo de escoamento ainda foram testadas as quantidades 0,8% e 1,2% de aditivo em relação à massa de cimento, para confirmação do valor de 1,0%.

De acordo com informações do fabricante o PowerFlow 1159 é composto quimicamente por polímeros policarboxilatos em meio aquoso. Apresenta-se no estado líquido, de pega normal e redutor de água, recomendado para obtenção de concretos com altos índices de fluidez. Tem coloração marrom e densidade 1,06 Kg/litro e contém 30% de sólidos em sua composição. A dosagem sugerida pelo fabricante é de 0,2 a 5,0% sobre a massa de cimento (SOUSA FILHO, 2011). Seu específico mecanismo de funcionamento torna possível a produção de concretos com conteúdos de água extremamente baixos e concretos de alto desempenho com dosagens econômicas.

### 3.2.4.1 Teor ótimo de superplastificantes

O método empregado para determinação do teor ótimo de superplastificante, o funil de Marsh, tem objetivo de avaliar a compatibilidade e o ponto de saturação do dispersante sobre as partículas finas. Trata-se de um ensaio de fluidez de pastas, adaptado da norma NBR 7681 (ABNT, 2013). O método consiste em medir o tempo que determinada quantidade de pasta leva para fluir através de um funil com diâmetro pré-determinado, utilizado por Aïtcin (2000), que na pesquisa essa quantidade foi de 900 ml, com diâmetro do funil de 5 mm. As medições do tempo de escoamento são feitas em intervalos de tempo pré-estabelecidos, de modo a verificar variações no tempo de fluxo de pastas. Os tempos foram 10min e 60min, após o início do preparo da mistura. A Figura 13 representa os equipamentos utilizados nesse ensaio (VELASCO, 2002).

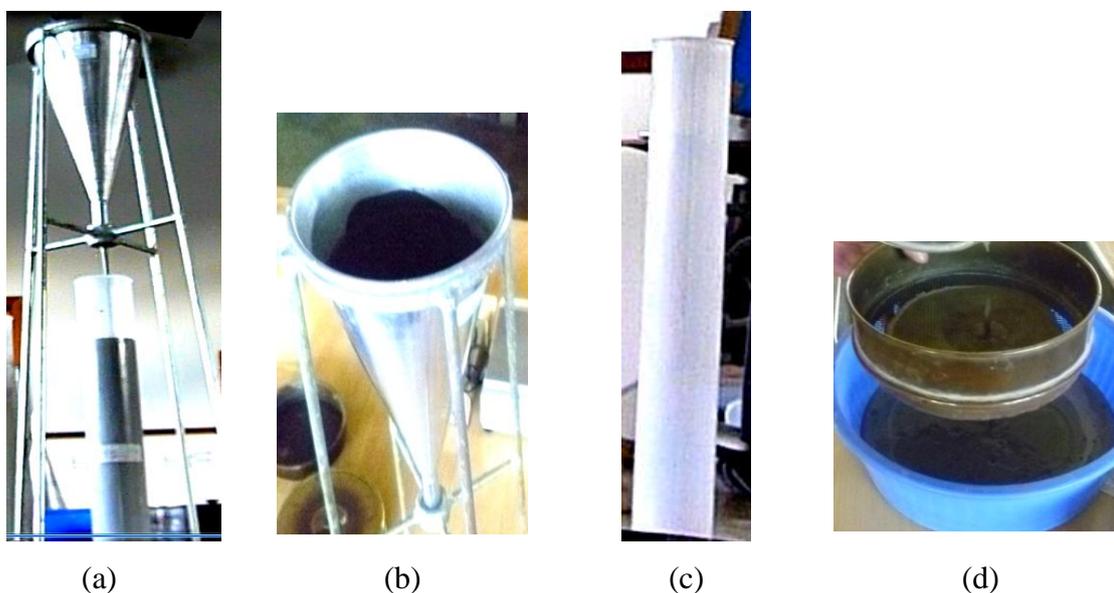


Figura 13: Equipamentos utilizados no ensaio do percentual ótimo de aditivo: (a) Suporte do funil; (b) Funil de Marsh; (c) Proveta; (d) Peneira de abertura 2,4 mm.

As pastas de cimento contendo RMG utilizadas nesse ensaio foram misturadas com

água com fator a/c de 0,3 e 0,24, respectivamente para misturas com aditivos Sika e com Powerflow. A quantidade de RMG em substituição à massa de cimento foi de 20%, e a quantidade de pasta produzida e colocada no cone foi de 1250 ml. Para o ensaio produziu-se todas as pastas em um mesmo misturador planetário, dotado de duas velocidades, aqui chamadas de lenta e rápida, respectivamente para rotações com frequência de 60 rpm e 120 rpm, mostrada na Figura 14-a. Todas as misturas foram realizadas pelo mesmo operador, na mesma sequência de mistura e utilizando os mesmos tempos para velocidade lenta e velocidade rápida nesse misturador, de modo a evitar comportamentos reológicos diferentes. A seguinte sequência de mistura foi adotada: primeiro, durante 2 minutos, à velocidade lenta, foi misturado o cimento com 70% da água e metade da dosagem prevista de superplastificante, e, em seguida, foi acrescentado o restante da água e do superplastificante, sendo a pasta misturada por mais 3 minutos, à velocidade rápida. A quantidade de água presente no superplastificante, ou seja 70% da massa total da quantidade de aditivo, foi devidamente considerada no cálculo da composição das pastas (SOUSA FILHO, 2011).

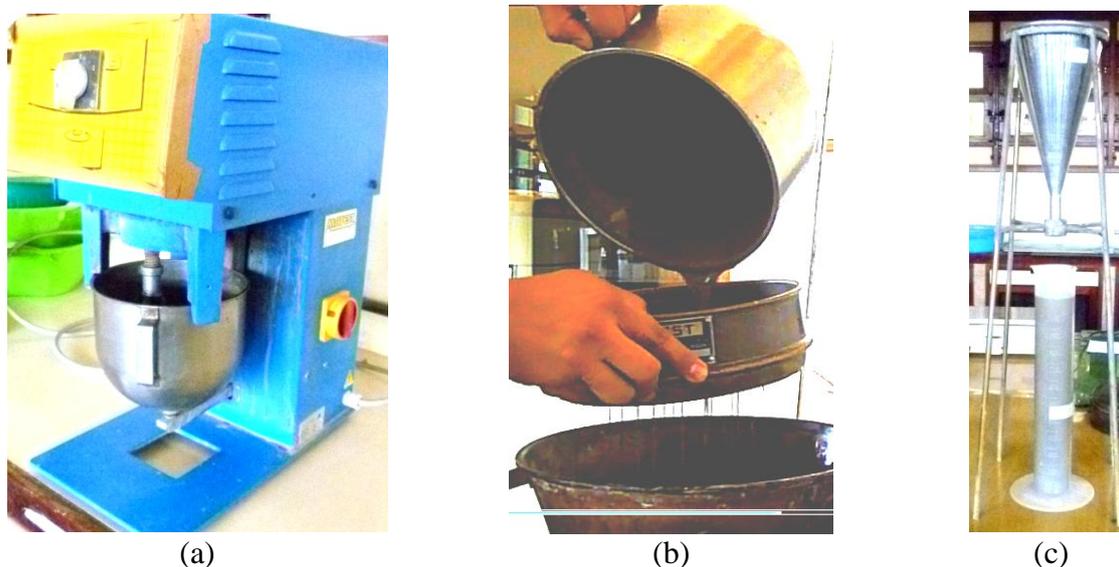


Figura 14: Procedimentos para determinação do percentual ótimo de superplastificante: (a) Misturados insumos no misturador planetário; (b) Peneiramento da calda; (c) Medida do tempo de escoamento no funil de Marsh.

Após a mistura, as pastas foram peneiradas na peneira ABNT 2,4 mm, segundo a

NBR 7682 (1983), ilustrado na Figura 14-b. O material retido foi descartado e o passante foram acondicionados em bacias plásticas por 10 minutos e realizado o ensaio no funil de marsh. Depois voltava para as bacias e ficavam em repouso por mais 50 minutos. Logo em seguida essa pasta recebia uma mistura manual, devido à ocorrência de decantação de parte do material, e seguia novamente para o funil de marsh e realizado o ensaio pela segunda vez, como ilustra a Figura 14-c, ocasião em que a pasta havia acabado de escoar pelo funil.

A Figura 15-a mostra a pasta sendo peneirada e sendo coletado o material passante e descarta-se o material retido. A Figura 15-b mostra o material retido na peneira, e que posteriormente foi descartado.



Figura 15: Preparação da pasta de cimento para ensaio no funil de marsh: (a) Peneiramento na peneira 2,4 mm; (b) Material retido na peneira e que deve ser descartado.

### 3.3 Dosagem Experimental do Concreto

A dosagem do concreto de referência foi baseada no método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). O método escolhido foi o da ABCP porque estabelecia uma quantidade de cimento menor do que a estabelecida por outros métodos, segundo Bartholomei, que trabalhou com CAA recentemente aqui na cidade de Manaus/AM (BARTHOLOMEI, 2013).

Sendo assim, o traço determinado neste estudo foi de: 1 : 1,15 : 1,80 : 0,41 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: fator água/cimento), estimando-se uma resistência à compressão axial mínima aos 28 dias de idade igual a 35 MPa, que é a resistência mínima exigida para placas de concreto para piso, conforme estabelece a NBR 15805 (ABNT, 2010).

As misturas dos materiais constituintes do concreto foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 120 litros, sendo os corpos-de-prova moldados numa única vez, a fim de minimizar variações nas características dos materiais e as condições de laboratório e sem vibração ou compactação, como mostra a Figura 16. Na confecção do corpo-de-prova procedeu-se a uma prévia remistura da massa de concreto para garantir a sua uniformidade, após os ensaios do CAA no estado fresco. A colocação do CAA nas formas foi realizada manualmente pelo mesmo operador. Não houve compactação ou vibração nas formas. Após a colocação do concreto foi permitido que o próprio concreto se adensasse, ocorrendo apenas o nivelamento da superfície superior com o auxílio de uma espátula metálica e, em seguida, cobriu-se a face exposta com sacos plásticos finos por um período de 24 horas, quando, então, efetuou-se a desmoldagem, realizada com todo o cuidado para não danificar os corpos-de-prova. Em seguida, foram armazenados em câmara úmida, com procedimento de cura submerso, deixando-os até o dia do ensaio de resistência à compressão axial.



Figura 16: Corpos de prova moldados

Cumprе esclarecer que se confeccionaram 16 corpos-de-prova cilíndricos para cada mistura e para cada tipo de ensaio a ser realizado, sendo avaliada a resistência à compressão nas idades de 14, 28 e 90 dias para os concretos com superplastificante Sikament e de 7, 28 e 90 dias para os concretos com superplastificante Powerflow, sendo adotados os procedimentos de moldagem e cura prescritos na normalização brasileira. As formas usadas para moldagem dos corpos de prova foram metálicas e cilíndricas de 20 cm de altura e de 10 cm de diâmetro.

Inicialmente os agregados foram submetidos a secagem ao ar livre, a fim de eliminar o máximo possível a umidade higroscópica de cada agregado. Antes da pesagem os percentuais de umidade foram medidos e descontados devidamente a quantidade de água presente em cada agregado.

O concreto foi misturado de acordo com o seguinte procedimento de colocação de materiais e tempos adotado por Sousa Filho (2011) para obtenção de CAA, e foi obedecido para todos os traços:

- ✓ 100% brita;
- ✓ 20% da água;
- ✓ Misturar por dois minutos;
- ✓ 100% cimento e 100% de RMG;
- ✓ 30% de água;
- ✓ 30% de aditivo;
- ✓ Misturar por dois minutos;
- ✓ 100% da areia;
- ✓ 40% água;
- ✓ 50% do aditivo;

- ✓ Misturar por dois minutos;
- ✓ Parar por dois minutos;
- ✓ 10% da água;
- ✓ 20% do aditivo;
- ✓ Mistura por cinco minutos.

### 3.4 Propriedades Reológicas

Para determinação das propriedades reológicas os ensaios basearam-se na norma NBR 15823 (ABNT, 2010), que estabelece ensaios especiais para estudo das três características especiais do CAA: fluidez, habilidade passante e resistência à segregação.

Os ensaios do concreto no estado fresco realizados foram: a) De espalhamento, conhecidos como slump flow, slump flow T50; b) De fluidez no funil V, conhecido na literatura como V-funnel e V-funnel 5min; e; c) De habilidade passante na caixa "L", chamado pelos escritores como L-Box.

#### 3.4.1 Ensaio de coesão e fluidez no slump flow e slump flow 500

O ensaio de espalhamento é utilizado para medir a capacidade do CAA de fluir livremente sem segregar. A medida de fluidez a ser obtida do CAA é o diâmetro do círculo formado pelo concreto. Para concretos convencionais, a trabalhabilidade é medida pela determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT. NBR NM 67, 1998) ou pela determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff (ABNT. NBR NM 68, 1998), a qual é aplicável para misturas que atinjam o espalhamento mínimo de 350 mm limitado ao tamanho da mesa, 700 mm. Pode-se dizer que o slump flow é uma

adaptação destes dois ensaios para um concreto excessivamente fluido (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

O ensaio permite observar visualmente se o concreto está segregando ou não. Se o concreto estiver segregando o agregado graúdo forma uma pilha central, enquanto só a argamassa, ou pasta, flui para as extremidades, formando uma auréola. Se esse concreto for usado em estruturas reais, certamente o agregado graúdo iria para o fundo das formas e a argamassa e água subiriam para a superfície, o que provocaria grandes falhas de concretagem e diminuição da durabilidade e resistência mecânica dos elementos estruturais.

São poucos os equipamentos necessários para execução desse ensaio. É composto por uma base, que deve ser quadrada de pelo menos 900 mm de lado, ver Figura 17-a, que não absorva água nem provoque atrito com o concreto, e por um tronco de cone com materiais de características iguais aos da base, ver Figura 17-b. Sobre o centro da base deve-se marcar um círculo de diâmetro de 200 mm para a colocação do cone, que deve ter 300 mm de altura, diâmetro interno menor de 100 mm e diâmetro maior de 200 mm. Também são necessários uma espátula, uma concha côncava e uma trena para medir o espalhamento do concreto.



(b)  
Figura 17: Ensaio de fluidez do CAA: (a) Marcação do diâmetro de 500 mm na placa metálica nivelada; (b) tronco de cone contendo CAA, início do ensaio.

Primeiramente deve-se umedecer a placa e o tronco de cone para que não absorvam

água do concreto durante o ensaio. Depois colocar a placa sobre o chão firme e nivelado e o tronco de cone no centro da base, segurando-o firmemente sobre o círculo de 200 mm. São necessários aproximadamente seis litros de concreto para realização desse ensaio. Com a concha côncava, preencher com concreto e remover o excesso com a espátula do topo do cone.

O adensamento deve ser feito pela força da gravidade, não devendo ser realizado qualquer tipo de compactação. Erguer verticalmente o cone. Permitir que o concreto flua livremente e medir o diâmetro do espalhamento em duas direções perpendiculares. A média dessas medidas é o valor do slump flow. Durante o ensaio é importante a observação da ocorrência ou não da segregação.

Os valores admitidos pela norma brasileira estão compreendidos entre 550 mm e 850 mm. Espalhamento muito baixos indicam que o concreto está pouco fluido. Se a medida der elevada, ele estará muito fluido e aumenta a possibilidade de ocorrer segregação (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008). A Figura 18-a ilustra a medida do diâmetro do espalhamento do CAA. Uma segunda medida ortogonal a essa primeira deve ser realizado e calculado a média desses dois diâmetros. O abatimento é outra propriedade medida no ensaio do espalhamento e ilustrado na Figura 18-b.

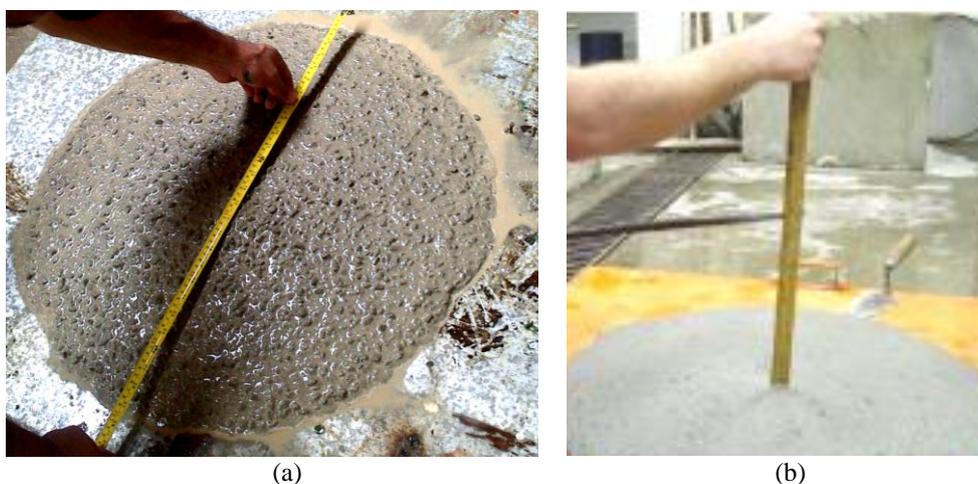


Figura 18: Medidas do abatimento e do espalhamento: (a) Medida do abatimento; (b) Medida do espalhamento no ensaio do "slump". Fonte: Marangon, 2011, pg 57

A ABNT NBR 15823 (2010) classifica o CAA e sugere sua aplicação de acordo com o valor obtido nesse ensaio e descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Classes de espalhamento, aplicação e exemplo de utilização do CAA em função do ensaio de slump flow, segundo a NBR 15823.

Propriedades. Ensaio.	Classes	Aplicação	Exemplo
Espalhamento (Slump flow) (mm)	SF 1      550 a 650	estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes.
		concreto autoadensável bombeado;	Revestimento de túneis.
		estruturas que exigem um curto espalhamento horizontal do concreto autoadensável.	Estacas e certas fundações profundas.
	SF 2      660 a 750	adequada para a maioria das aplicações correntes;	Paredes, vigas, pilares e outros
SF 3      750 a 850	estrutura com alta taxa de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm);	Pilares-parede, paredes diafragma e pilares.	

Fonte: ABNT NBR 15823.

O slump flow test T50cm é uma variação do slump flow, já que o procedimento e os equipamentos são os mesmos. As únicas alterações são a marcação de um círculo de 500 mm de diâmetro centrado na base e a necessidade de um cronômetro para a realização do teste (ABNT-NBR-15823-2, 2010).

O teste é realizado simultaneamente com o slump flow test. Assim que o cone for erguido verticalmente, um segundo operador deve acionar o cronômetro e marcar o tempo em que o concreto alcança a marca dos 500 mm. Se o tempo for baixo, indica que o concreto está muito fluido; se o tempo for alto, indica que o concreto está muito coeso e deve, em ambos os casos, ser corrigido. A Figura 19-a ilustra o início do ensaio e a Figura 19-b ilustra o espalhamento da CAA próximo à marcação do círculo de 500 mm de diâmetro.



Figura 19: Ensaio do Slump flow T50cm: (a) início do ensaio slump flow; (b) mede-se o tempo para alcançar diâmetro igual a 500 mm.

A ABNT NBR 15823 classifica o CAA, sugere sua aplicação e exemplifica sua utilização de acordo com o valor obtido nesses ensaio e descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Classes de espalhamento, aplicação e exemplo de utilização do CAA em função do ensaio de slump flow T50, segundo a NBR 15823.

Viscosidade plástica aparente t500 (s)	VS 1 $\leq 2$	Adequada para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e de segregação;	Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-fabricados e concreto aparente
		Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre;	
	VS 2 $> 2$	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação;	Vigas, pilares e outras
		Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado) no preenchimento de cantos e suscetibilidade e interrupções ou demora entre sucessíveis camadas;	

### 3.4.3 Ensaio de Fluidez no Funil V

Esse equipamento mede a fluidez do concreto, sendo apropriado para agregados graúdos de diâmetro máximo de 20 mm assim como o slump flow e o slump flow T50cm test.

A Figura 20-a ilustra as dimensões que devem possuir o equipamento utilizado nesse ensaio. Na extremidade inferior deve existir uma porta, que pode ser deslizante para que possa manter o concreto no interior do aparelho e seja aberta para iniciar o ensaio. A base de suporte e a porta inferior são mostradas na Figura 20-b. A medida é o tempo que o material leva para escoar do funil. Após a execução do ensaio, pode-se preencher novamente o funil com concreto e esperar 5 minutos para a repetição do procedimento, para que se teste a resistência à segregação já que, se o CAA estiver segregando, o tempo de escoamento aumentará significativamente. (ABNT. NBR 15823-5, 2010).

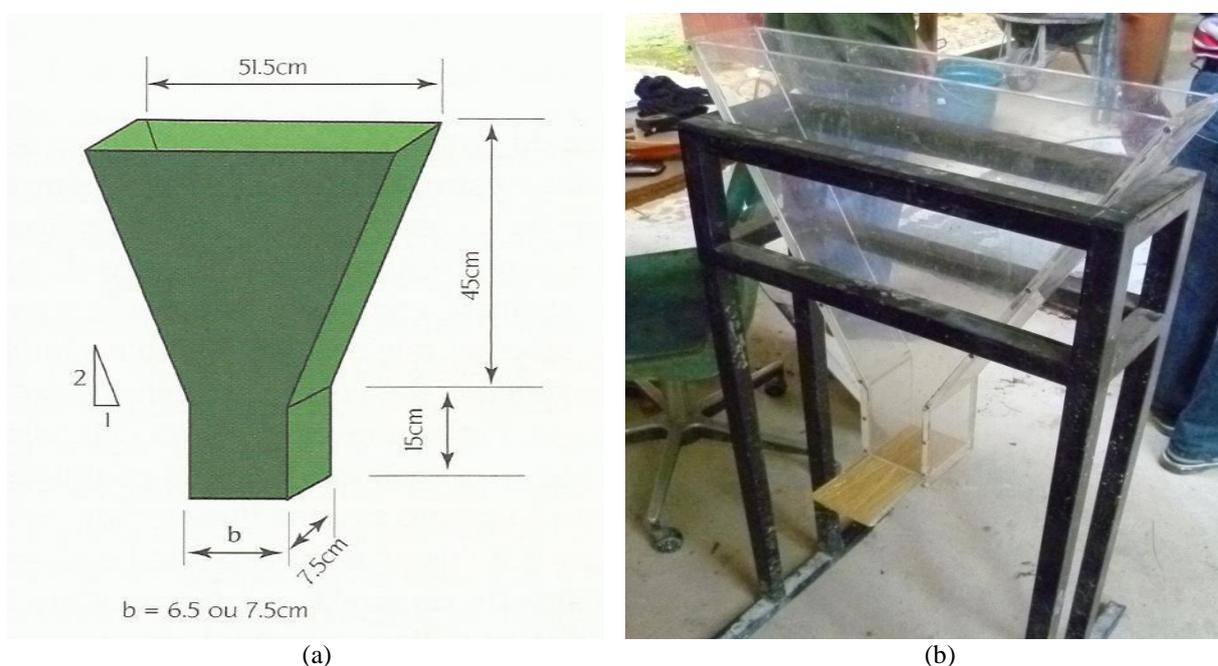


Figura 20: Funil "V": (a) Dimensões do funil "V"; (b) Funil "V" e base de apoio.

Para a realização do ensaio são necessários um funil, a base do funil para deixá-lo suspenso, uma espátula, uma concha côncava e um cronômetro. O equipamento deve ser firmemente fixado e nivelado, de forma a não se movimentar ao longo da realização do ensaio. Inicialmente, deve-se umedecer todo o equipamento para que a água do concreto não seja absorvida indevidamente. Com a concha côncava, encher o funil com concreto, novamente sem compactação ou vibração de espécie alguma e, com a espátula nivelar o topo

do funil e retirar o excesso de material. Abrir a porta inferior do funil, permitindo que a mistura escoe unicamente sob a ação da gravidade. O tempo que o total de concreto leva para esvaziar o funil é o resultado desse ensaio.

A ABNT NBR 15823 classifica o CAA e sugere sua aplicação, bem como exemplifica sua utilização de acordo com o valor obtido nesses ensaio e descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Classes viscosidade plástica aparente do CAA em função dos tempo de escoamento no funil V, segundo a NBR 15823.

Viscosidade plástica aparente Funil V (s)	VF 1 < 8	Adequada para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e de segregação;	Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-fabricados e concreto aparente.
		Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre;	
	VF 2 9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação;	Vigas, pilares e outras.
		Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado) no preenchimento de cantos e suscetibilidade e interrupções ou demora entre sucessíveis camadas;	

Fonte: ABNT NBR 15823.

#### 3.4.4 Ensaio de Fluidez na Caixa "L"

O ensaio da caixa "L" mede a fluidez do concreto simultaneamente à sua capacidade de passar por obstáculos e permanecer coeso. O equipamento consiste em uma caixa em forma de "L" com uma porta móvel separando a parte vertical da horizontal e, junto com a divisória, barras de aço que simulam a estrutura, criando um obstáculo à passagem do concreto. É importante salientar que o espaçamento e o diâmetro das barras de aço dependem, basicamente, das condições reais da estrutura em que o concreto será aplicado. A Figura 21 ilustra as medidas da caixa L. As barras de aço são ilustradas na Figura 22, com três barras de

aço de diâmetro de 12,5 mm.

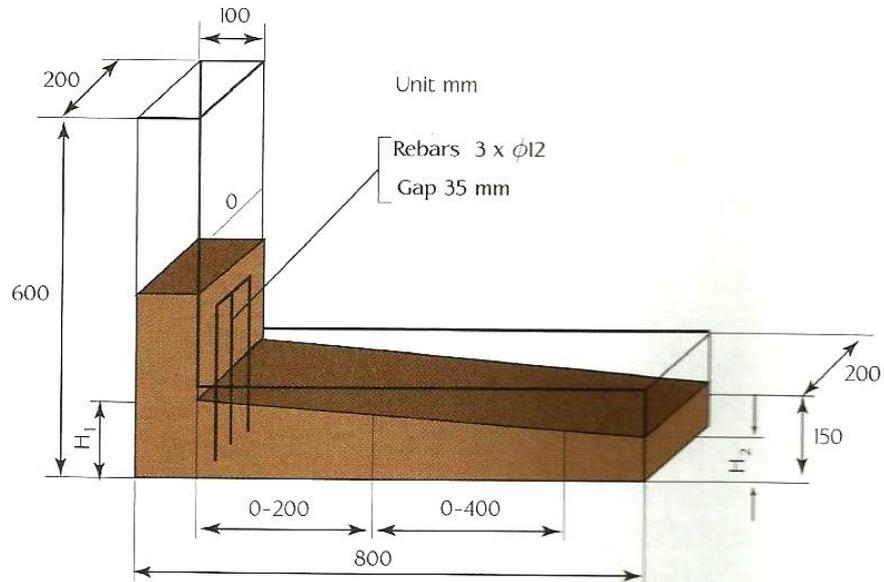


Figura 21: Dimensões da caixa em forma de L recomendadas (fonte: EFNARC, 2002).



Figura 22: Ensaio da caixa L em andamento (fonte: Tutikian e Dal Molin, 2008, p 55).

Aconselha-se utilizar agregados graúdos com diâmetro máximo de 12,5 mm, um terço do valor do espaçamento das armaduras (ABNT. NBR 15823-4, 2010).

Para execução desse ensaio são necessárias, além da caixa "L" feita com material não absorvente e sem atrito, uma espátula, uma concha côncava, uma trena e um cronômetro para medição do tempo em que o concreto chega aos 20 cm e 40 cm, que devem ser marcadas no aparelho. A cronometragem dos tempos não é obrigatória e nem sempre recomendada, pois são períodos pequenos e de difícil marcação. Deve-se fixar a caixa L em base firme e nivelada, umedecer as paredes do equipamento e testar o portão móvel para ter certeza que se

erguerá mesmo com a pressão imposta pelo concreto. Preencher a parte vertical e deixar o material se acomodar por um minuto. Depois levantar o portão e cronometrar o tempo em que o concreto alcança a marca de 20 cm e de 40 cm. Medir as alturas iniciais (H1) e final (H2), em que o quociente  $H2/H1$  é o valor procurado e deve situar-se entre 0,80 e 1,00 – valor adotado pela NBR 15823-4 (ABNT, 2010). Quanto mais fluida estiver a mistura, o escoamento na parte horizontal passará pela marca de 20 cm e 40 cm e mais nivelado terminará. Também deve-se observar a movimentação do concreto durante o ensaio, pois se estiver segregando ao passar nos obstáculos, o agregado graúdo irá demorar mais a fluir, enquanto a argamassa do concreto chegará primeiro ao final da caixa.

A NBR 15823 (ABNT, 2010) classifica o CAA, sugere sua aplicação e exemplifica sua utilização de acordo com o valor obtido nesse ensaio e descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Classes de habilidade passante do CAA em função dos valores obtidos na caixa L, segundo a NBR 15823.

Habilidade passante Caixa L (H2/H1)	PJ1 $\geq 0,80$ , com 2 barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm;	Lajes, painéis, elementos de fundação.
	PJ2 $\geq 0,80$ com 3 barras de aço.	adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm;	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.

Fonte: ABNT NBR 15823.

### 3.5 Propriedades Mecânicas

Para determinação das propriedades mecânicas os ensaios se basearam nas normas NBR 5739 (ABNT, 2007), NBR 7215 (ABNT, 1997), NBR 15805 (ABNT, 2010) e NBR 6118 (ABNT, 2014). O objetivo era obter um CAA com RMG, em substituição ao cimento, com resistência à compressão maior que 35 MPa e resistência à flexão maior que 4,5 MPa, valores exigidos para placas de concreto para pavimentos.

O passo seguinte foi preparar os traços de concreto: Foi adotado como concreto de referência aquele cuja composição da mistura não continha RMG, ou seja 0% de substituição do cimento pelo resíduo, cujas nomenclaturas são CS0 e CW0, respectivamente quando utilizado o aditivo sikament e powerflow. Os outros concretos possuíram em seu traço de mistura quantidades de RMG em substituição ao cimento em percentuais de substituição de 10%, 15% e 20%, quando o aditivo químico foi da marca Sika e de 5%, 10%, 20% 30% e 40%, quando o superplastificante utilizado foi o da marca MC-Bauchemie.

### 3.5.1 Resistência à compressão

Corpos de provas de diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm foram moldados em fôrmas metálicas. Após 24h foram desmoldados e colocados para cura úmida em recipientes contendo água, onde eram imersos até a data estabelecida para rompimento. Ao chegar a data, os corpos de prova tiveram suas superfícies secas com flanela de algodão e suas bases foram niveladas com enxofre fundido, processo esse conhecido como capeamento. Após a solidificação do enxofre os corpos de prova seguiram para a prensa. Os ensaios de compressão foram realizados no laboratório de materiais de construção da Faculdade de Tecnologia da UFAM, utilizando-se uma prensa EMIC PC200, capacidade de 300 KN, com duas células de carga e velocidade de prensa de 0,5 mm/min, mostrada na Figura 23-a.

Os corpos de prova de concretos foram ensaiados nas idades de 7 ou 14, 28 e 90 para a obtenção das medidas as resistências à compressão axial. A Figura 23-b mostra um corpo de prova sendo ensaiado na prensa.



Figura 23: Ensaio de compressão axial simples: (a) Prensa utilizada, capacidade = 300 KN; (b) Corpo de prova sendo prensado.

### 3.5.2 Resistência à flexão

A medida de resistência à flexão em quatro pontos foi realizada em placas de 10 cm x 40 cm e espessura de 3,0 cm. Primeiramente essas placas foram moldadas com dimensões 40 cm x 40 cm x 3,0 cm, como pode-se notar na Figura 24-a.

Após o período de 24 horas as placas foram desmoldadas e imersas em um recipiente contendo água e permaneceram imersas até a data estabelecida para o ensaio de resistência à flexão. A Figura 24-b mostra as placas desmoldadas.

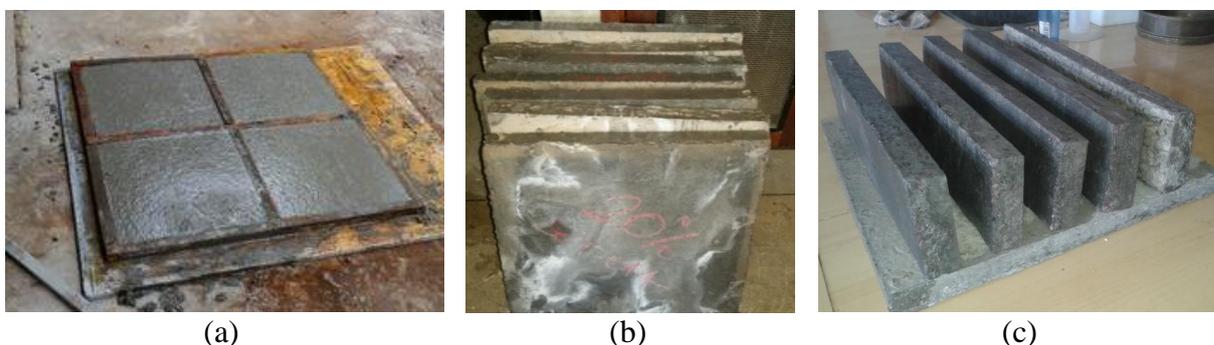


Figura 24: Placas de CAA: (a) nas formas; (b) desformadas; (c) cortadas para ensaio de flexão.

Ao chegar a data, as placas foram cortadas em outras placas menores de dimensões

10 cm x 40 cm x 3,0 cm, como ilustrado na Figura 24-c. Os ensaios de resistência à flexão são mostrados na Figura 25.



Figura 25: Prensa EMIC utilizada nos ensaios de flexão.

### 3.6 Propriedades Físicas e Químicas

Para determinação dessas propriedades foram realizados ensaios de absorção de água, índice de vazios e de massa específica, com base nas especificações da norma NBR 9777 (1987) e ensaio de medida de expansão de barras de argamassas e concretos para medição dos efeitos de uma possível reação álcali-agregado, com base na norma NBR 15577-4 (ABNT, 2009).

#### 3.6.1 Absorção, índice de vazios e massa específica

A NBR 9779/93 que trata dessas propriedades define e descreve os procedimentos a serem adotados para determinação de cada uma delas. O ensaio foi executado a frio, de acordo com a norma, em corpos-de-prova cilíndricos de dimensão igual a 100 mm x 200 mm

(diâmetro x altura). Na idade de 28 dias de cura úmida os corpos de prova foram secos superficialmente e pesados. Foram colocados e permaneceram em estufa por um período de 72 horas, a temperatura de  $(105\pm 5)$  °C. Após isso, os corpos de provas foram resfriados e pesados em balança analítica (0,0001g de precisão). Em seguida os corpos de provas foram imersos em água a temperatura de  $23 \pm 1$  °C por 24 horas, retirados do recipiente e secos superficialmente e pesados novamente, Figura 26-a. Após isso foram imersos em água novamente e fervidos por 5 horas e pesados novamente, só que dessa vez em balança hidrostática, Figuras 26-b e 26-c. Uma quinta pesagem normal foi realizada após imersão em água a temperatura ambiente.

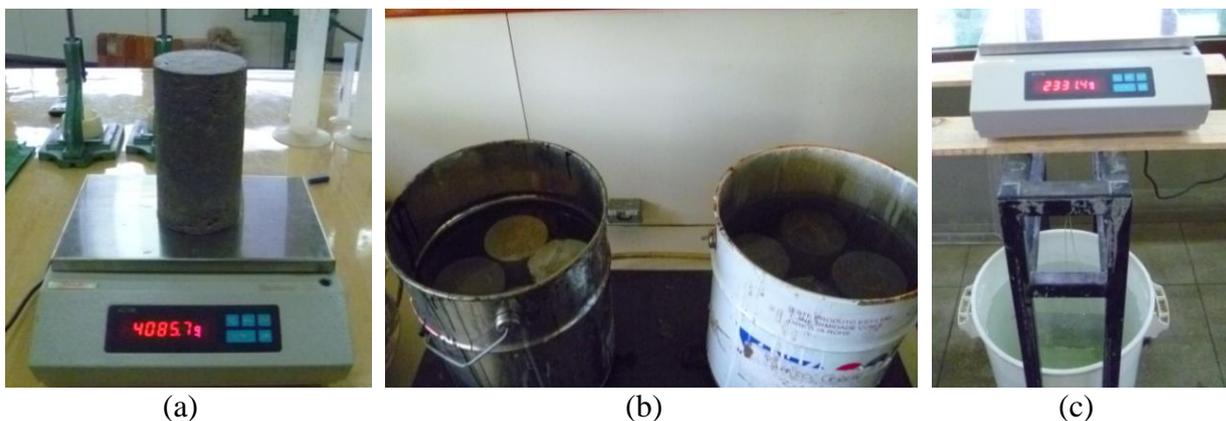


Figura 26: Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica: (a) pesagem normal dos corpos de prova; (b) fervura da água com corpos de prova; (c) pesagem hidrostática dos corpos de prova.

A obtenção dessas massas permite realizar os cálculos normatizados e obter os valores de absorção de água, índice de vazios e de massa específica real de cada um dos corpos de prova.

### 3.6.2 Reatividade álcali-agregado

Para obtenção da expansão e estudar as propriedades do material quanto a se ele é reativo ou inócuo foi utilizado o ensaio regido pela ABNT NBR 15577, partes quarta e quinta:

Reação álcali-agregado: método acelerado (ABNT, 2009). Nesse método a norma estabelece que sejam moldadas barras de argamassas com dimensões de 25 mm X 25 mm X 285 mm, como mostra a Figura 27-a, com traço de 1:2,25, fator de  $a/c = 0,47$ , na granulometria estabelecida na norma. Isso foi realizado e está demonstrada na Tabela 6. Também, para comparação, foram moldadas barras de concreto com traço idêntico ao utilizado para os corpos de prova, mas com granulometria do agregado graúdo semelhante ao da areia grossa.

Nos dois casos as barras após 24 horas do preparo foram mergulhadas em água a temperatura ambiente durante 24 horas. Em seguida foram deixadas submersas em solução alcalina de hidróxido de sódio com 1,0 N (um normal) de normalidade em uma estufa que deixava a solução a uma temperatura de 80°C.

Tabela 6: Classificação granulométrica de acordo com a NBR 15577-2009.

peneiras		%
passante	retido	
(#)	(#)	
4,75mm	2,35mm	10
2,35mm	1,18mm	25
1,18mm	0,60mm	25
0,60mm	0,30mm	25
0,30mm	0,15mm	15

Foram então realizadas medidas de comprimentos aos 1, 3, 7, 11 e 14 dias de idade, por meio de um relógio comparador. A medida de comprimento do 14º dia imerso em solução alcalina foi comparada com a medida de comprimento inicial, Figuras 27-b e 27-c.

O objetivo é medir a expansão final de barras de argamassas em percentuais referentes ao comprimento inicial de cada uma quando imersa em solução alcalina de hidróxido de sódio. O aumento de comprimento, em porcentagem, classifica o material como sendo material reativo se percentual de expansão for maior que 0,20%, como parcialmente reativo se o percentual tiver entre 0,10% e 0,20%, mas se a expansão for menor ou igual a

0,10% o material é considerado inócuo.



(a)



(b)



(c)

Figura 27: Ensaio para avaliação da reação álcali-agregado: (a) moldagem das barras. (b) barras de argamassas curadas; (c) medida dos comprimentos das barras com relógio comparador.

O percentual de expansão indica a classificação do material como sendo reativo, potencialmente reativo ou inócuo, respectivamente para valores de 0,20% ou superior, entre 0,10% e 0,20%, e, menor que 0,10% de expansão das barras de argamassa.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Propriedades dos materiais

#### 4.1.1 Cimento

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos no Laboratório da FT-UFAM respectivamente para ensaios de finura do cimento e tempo de pega para o cimento CP-I-32 utilizado. A peneira recomendada pela norma brasileira e utilizada foi a # 200, conforme a NBR 11579 (ABNT, 2012).

Tabela 7: Módulo de finura para o cimento Amazon CP-I-32.

FINURA NA PENEIRA 200		PEGA
Material retido (g)	Material retido (%)	Quantidade de água: 118 ml (fator a/c 0,295)
1,21	2,42	Tempo de início de pega: 02h40min.
1,28	2,56	Tempo de fim de pega: 04h30min.
Valor médio	2,49	

Para se fazer uma avaliação da resistência do cimento foram realizados alguns corpos de prova de argamassa no traço 1:3 (uma parte de cimento para três partes de areia, em massa), com fator a/c = 0,48 e submetidos a ensaio de compressão aos 3, 7 e 28 dias, de acordo com o que especifica a ABNT. NBR 7215 (ABNT, 1997). A Tabela 8 mostra os resultados obtidos.

Tabela 8: Resistência à compressão da argamassa.

Resistência à compressão						
Índice de consistência da argamassa						
	3 dias de idade		7 dias de idade		28 dias de idade	
Nº. CP	Carga de ruptura (kgf)	Resistência à compressão (MPa)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência à compressão (MPa)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
1,00	4.660,57	23,30	6.430,27	32,10	8.309,88	41,50
2,00	6.342,33	31,70	7.232,67	36,10	8.980,39	44,90
3,00	5.869,68	29,30	7.243,67	36,20	10.717,11	53,50
4,00	5.572,90	27,80	7.342,59	36,70	9.310,15	46,50
médias	5.928,30	29,60	7.272,98	36,33	8.866,81	44,30
Desvio Padrão	3,54		2,13		5,05	
CV	11,95%		5,87%		11,40%	

Pode-se constatar que a resistência dos corpos de prova constituídos de argamassa encontrava-se de acordo com o oferecido pelo fabricante do cimento, que era de 32 MPa, e que a utilização desse cimento no prosseguimento da pesquisa poderia ser mantido. O valor foi ultrapassado já aos 28 dias e para a idade de 90 dias alcançou-se valores médios de resistência à compressão de 44,30 MPa, maior que a resistência esperada e indicada na embalagem do próprio cimento.

#### 4.1.2 Resíduos RMG

##### 4.1.2.1 Massa específica

A Tabela 9 apresenta as propriedades de massa específica, forma física e módulo de finura do RMG.

Tabela 9: Propriedades Físicas do RMG

<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,66
Forma física	Pó
Cor	Cinza
Módulo de finura (%)	0,237

Observa-se que a massa específica dos resíduos é muito próxima da massa específica dos agregados graúdos e dos agregados miúdos e dos valores encontrados na literatura. As massas específicas dos materiais constituintes do CAA apresentaram-se bem próximas, entre 2,56 e 2,66 Kg/cm<sup>3</sup>, isso contribui em muito para que o produto final misturado tenham boa coesão e ajuda a manter uma resistência à segregação no concreto.

#### 4.1.2.2 Fluorescência de raio X

A composição química dos RMG obtida por fluorescência de raio-x é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10: Composição química do RMG.

<i>Composição</i>	<i>Quant. (%)</i>	<i>Composição</i>	<i>Quant. (%)</i>	<i>Composição</i>	<i>Quant. (%)</i>
SiO <sub>2</sub>	63,785	MgO	1,821	MnO	0,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,064	TiO <sub>2</sub>	0,913	ZrO <sub>2</sub>	0,071
CaO	6,996	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,755	SrO	0,065
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,831	BaO	0,141	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,032
K <sub>2</sub> O	5,248	Ag <sub>2</sub> O	0,103	Cl	0,027
CuO	0,019	NiO	0,004	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
ZnO	0,015	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003	OsO <sub>4</sub>	0
Rb <sub>2</sub> O	0,015	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,003	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,004	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0
PbO	0,004	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	Re	0

As primeiras informações sobre os possíveis minerais da amostra analisada foram

obtidas a partir da descrição de suas propriedades macroscópicas e de informações obtidas nos locais de coleta dos resíduos. Verifica-se na Tabela 10 que os óxidos obtidos e seus percentuais, a presença muito grande de sílica (óxido de silício), aproximadamente 64%, foram comparados com dados de outros estudos o que permite identificar de forma preliminar a amostra como sendo de granito em sua maior composição (NUMMER et al, 2007). A presença de aproximadamente 7% de óxido de cálcio, nos estudos de Nummer (2007) chegam a 4%, permite supor a presença de resíduo de mármore, misturados aos de granito, pois o CaO é um dos componentes principais da composição do mármore. Pode-se notar também o óxido de alumínio 14% e do óxido de ferro 5,8%. A não identificação de elementos tóxicos ou radioativos também foi de grande importância para a continuação da pesquisa e a comprovação de que o resíduo utilizado, a saber o RMG de Manaus, tem propriedades de filler inerte, podendo ser adicionado ao concreto sem tratamento pozolânicos, por exemplo, ou cuidados especiais em seu manuseio.

#### 4.1.3 Agregados

##### 4.1.3.1 Granulometria e Massas Unitárias

Os resultados obtidos na análise de agregados, compreendendo: determinação da composição granulométrica, teor de materiais pulverulentos, massa unitária do material em estado solto e massa específica real, conforme às normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 46 (ABNT, 2003), NBR 7251 (ABNT, 1982) e NBR 9941 (ABNT, 1987), são descritos nas Tabelas 11 e 12, respectivamente para a areia e para a brita, e representados graficamente na Figura 28.

Tabela 11: Propriedades da areia.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA				ÍNDICES FÍSICOS
Peneiras (mm)	Material retido (gramas)	Material retido (%)	Material acumulado (%)	
9,5	0	0	0	MÓDULO DE FINURA (%): 1,79
4,8	4	1	1	DIMENSÃO MÁX. CARACTERÍSTICA (mm): 2,4
2,4	10	2	3	MASSA UNITÁRIA EM ESTADO SOLTO ÚMIDO (Kg/dm <sup>3</sup> ): 1,18 (h= 3,3%)
1,2	24	5	8	MASSA UNITÁRIA EM ESTADO SOLTO SECO (kg/dm <sup>3</sup> ): 1,56
0,6	86	17	25	MASSA ESPECÍFICA REAL (Kg/dm <sup>3</sup> ): 2,6
0,3	150	30	55	IMPUREZAS: Acima de 300 p.p.m. em termos de ácido tânico.
0,15	161	32	87	TEOR DE ARGILA: 1,5%
Fundo	65	13	100	TEOR DE MAT. PULVERULENTO: 2,7%

As amostras utilizadas nesses ensaios foram obtidas seguindo a metodologia das normas NBR NM 26 (ABNT, 2001), NBR NM 27 (ABNT, 2001), NBR NM 53 (ABNT, 2002), NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7251 (ABNT, 1982).

Tabela 12: Propriedades do agregado graúdo - brita zero.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA				ÍNDICES FÍSICOS
Peneiras (mm)	Material retido (gramas)	Material retido (%)	Material acumulado (%)	
12,5	0	0	0	MÓDULO DE FINURA: 5,87
9,5	50	5	5	DIMENSÃO MÁX. CARACTERÍSTICA (mm): 9,5
4,8	805	80,5	85,5	MASSA UNITÁRIA EM ESTADO SOLTO ÚMIDO (Kg/dm <sup>3</sup> ): NF
2,4	125	12,5	98	MASSA UNITÁRIA EM ESTADO SOLTO SECO (kg/dm <sup>3</sup> ): 1,34
1,2	10	1	99	MASSA UNITÁRIA EM ESTADO COMPACTADO SECO (kg/dm <sup>3</sup> ): 1,483
0,6	5	0,5	99,5	MASSA ESPECÍFICA REAL (Kg/dm <sup>3</sup> ): 2,56
0,3	5	0,5	100	IMPUREZAS: Não Formadas (NF)
0,15	0	0	100	TEOR DE ARGILA: NF
Fundo	0	0	100	TEOR DE MAT. PULVERULENTO: NF

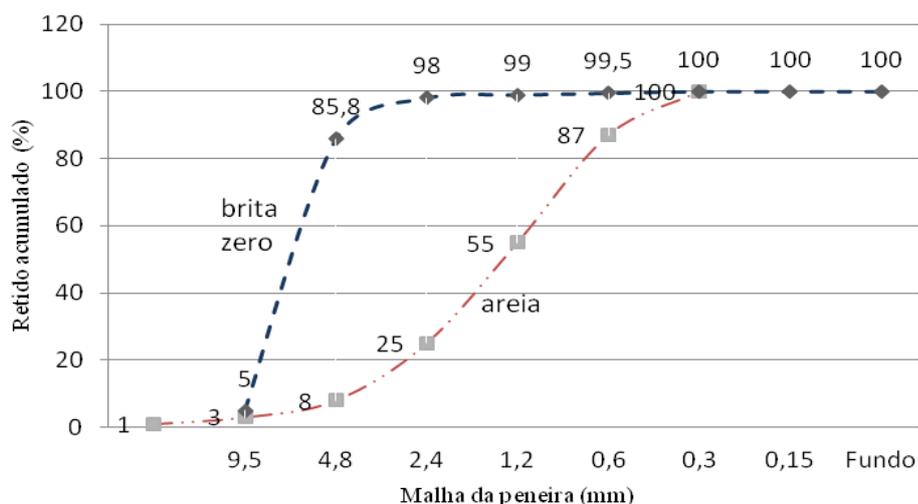


Figura 28: Gráfico - análise granulométrica da areia e da brita zero.

Observa-se nas Tabelas 11 e 12 que as massas específicas dos agregados utilizados apresentaram valores próximos dos usualmente encontrados em outras pesquisas. A quantidade de materiais pulverulentos, tanto para a areia como para a brita, ficaram abaixo dos permitidos pela NBR NM 46 (2003), que é de 5% e 1%, respectivamente.

O agregado miúdo utilizado foi classificado como areia fina, de acordo com NBR 7211 (ABNT, 2005), e sua dimensão máxima característica é de 2,4 mm. Para o agregado graúdo, os percentuais de material acumulado nas peneiras de aberturas 9,5 mm, 4,8 mm e 2,4 mm o classificam como agregado graúdo de graduação zero, de acordo com NBR 7211 (ABNT, 2005). Em função disso a brita utilizada foi chamada de brita zero.

#### 4.1.4 Superplastificantes

Os tempos de escoamentos no funil de Marsh obtidos para o superplastificante Sikament 251 estão descritos na Tabela 13. Os tempos de escoamentos no funil de Marsh obtidos para o superplastificante Powerflow 1159 estão descritos na Tabela 14. Os gráficos da Figura 29 ilustram de forma resumida essas tabelas.

Tabela 13: Ensaios para determinação do teor de superplastificante Sikament 251.

cimento	RMG	Água	sp	sp sólido	t1	t2
	g	G	g	%	s	s
1737,72	434,43 (20% Cim)	734,91	36,2	0,5	8,43	10,41
		719,7	57,92	0,8	8,25	8,51
		709,57	72,4	1,0	7,82	8,41
		699,43	86,89	1,2	8,22	9,07
		684,23	108,61	1,5	9,74	11,83
		658,88	144,81	2,0	10,56	10,59

Tabela 14: Ensaios para determinação do teor de superplastificante PowerFlow.

cimento	RMG	Água	sp	sp sólido	t1	t2
g	g	g	g	%	s	s
1742,82	435,70 (20% Cim)	633,33	29,05	0,50	48,87	50,45
		622,33	46,48	0,80	47,24	51,40
		612,90	58,09	1,00	40,81	46,66
		604,17	75,52	1,30	44,29	55,39
		592,56	87,14	1,50	48,07	51,20
		572,23	116,19	2,00	54,30	56,41

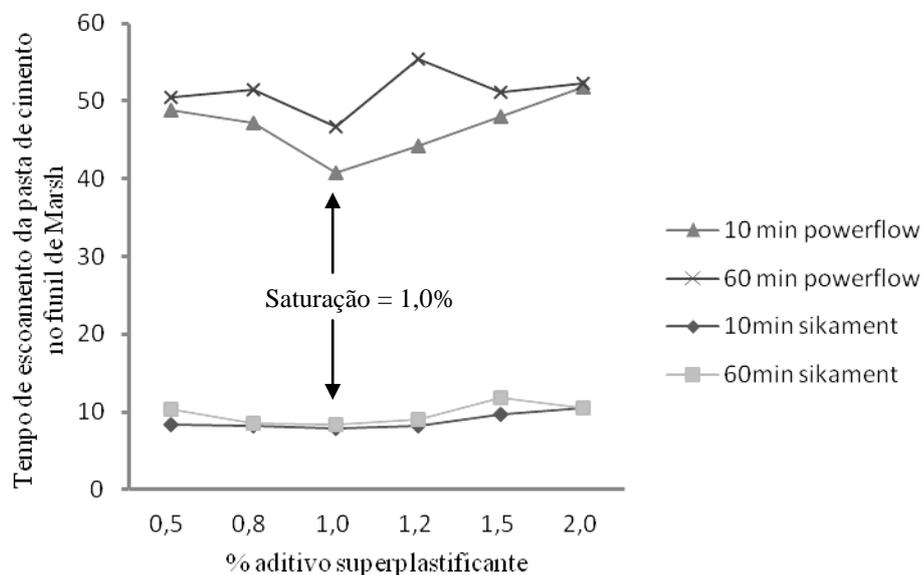


Figura 29: Gráfico dos tempos de escoamentos das pastas de cimento com RMG no funil de Marsh.

Verifica-se que o ponto de saturação para ambos os superplastificantes ocorre para a

porcentagem de 1,0% de aditivo. Esse valor foi o teor utilizado na preparação dos CAA. Ademais como o tempo de escoamento de pasta preparada com superplastificante Sikament foi menor que o tempo de escoamento de pasta com aditivo Powerflow, para o mesmo percentual de aditivo, pode-se afirmar que, considerando apenas esse ensaio, o aditivo Sikament é mais eficiente que o Powerflow.

## 4.2 Propriedades reológicas

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios dos concretos autoadensáveis no estado fresco.

### 4.2.1 Ensaio de coesão e fluidez no slump flow

.

A Tabela 15 apresenta a medida dos diâmetros de espalhamento e as alturas de abatimentos dos concretos a partir de sua saída do tronco de cone. São apresentados também os valores do tempo que o concreto alcançou o diâmetro de 50 cm no ensaio de espalhamento.

Esses valores servem como referência para medida de fluidez do CAA e para classificar sua utilização de acordo com a norma NBR 15823 - segunda parte (ABNT, 2010).

Nesse ensaio também é verificado visualmente se houve segregação ou não dos agregados na parte central do espalhamento e se houve falta de coesão ao verificar as bordas do concreto espalhado. Bordas sem agregados indicariam que não houve coesão.

Tabela 15: Medida do diâmetros de abatimentos obtidos no slump flow e tempo de espalhamento até  $\phi = 500$  mm, obtidos no ensaio slump flow T 50.

Mistura	teor de SP	Abatimento (mm)	Espalhamento do tronco de cone (mm)			NBR 15823	Tempo de escoamento T500mm	NBR 15823
			L1 (mm)	L2 (mm)	média (mm)			
(%)	(%)	(mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	média (mm)	Classe	(s)	Classe
CS0	1,0%	275	740	760	750	SF 2	4,5	VS 2
CS10	1,0%	260	640	660	650	SF 1	2,0	VS 1
CS15	1,0%	275	650	640	645	SF 1	1,7	VS 1
CS20	1,0%	275	740	740	740	SF 2	1,4	VS 1
CW0	1,0%	275	735	755	745	SF 2	8,7	VS 2
CW5	1,0%	260	640	660	650	SF 1	6,4	VS 2
CW10	1,0%	275	850	860	855	SF 3	4,6	VS 2
CW20	1,0%	270	730	750	740	SF 2	4,2	VS 2
CW30	1,0%	270	730	755	742,5	SF 2	3,9	VS 2
CW40	1,0%	255	780	750	765	SF 3	5,3	VS 2

Nos ensaios foi verificada ocorrência de segregação para o CW40, em todos os outros concretos o espalhamento se deu de modo uniforme. As bordas apresentavam-se contendo argamassa e agregados uniformemente misturados indicando que todos possuíam boa coesão. Foi constatado que a maioria dos concretos CS foram classificados segundo a NBR 15823 como sendo concretos classe SF 1 e os concretos CW como SF 2, ou seja, adequados para a maioria das aplicações correntes – paredes, vigas, pilares e outras. A classe SF 1 é um concreto autoadensável bombeado, adequados para estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto co deslocamento livre – lajes. Os concretos de classe SF 3 tem aplicação em estrutura com alta taxa de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).

As Figuras 30 a 38 ilustram alguns ensaios de caracterização dos concretos no estado fresco.



(a)

(b)

Figura 30: Mistura CS0. a) Espalhamento; b) Medida do slump flow.



(a)

(b)

Figura 31: Mistura CS10. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação.



(a)

(b)

Figura 32: Mistura CS15. a) Espalhamento; b) Medida do slump flow.



(a)



(b)

Figura 33: Mistura CS20. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação.



(a)



(b)

Figura 34: Mistura CW0. a) Espalhamento; b) Medida do slump flow.

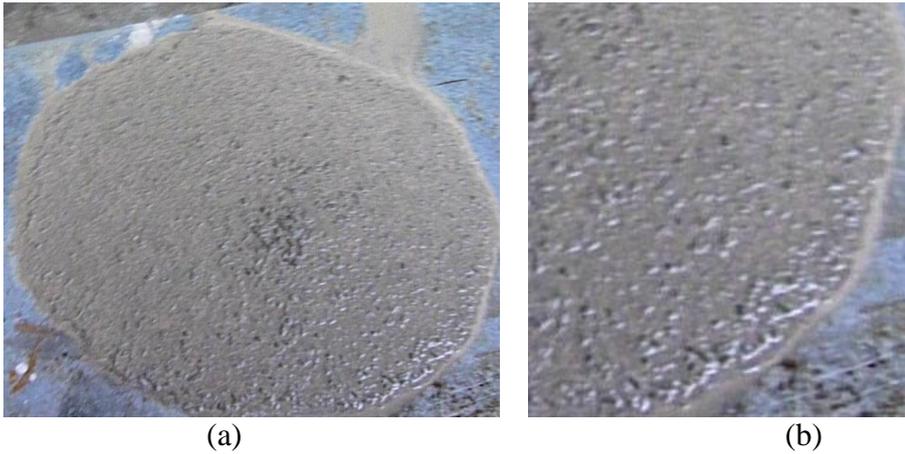


(a)

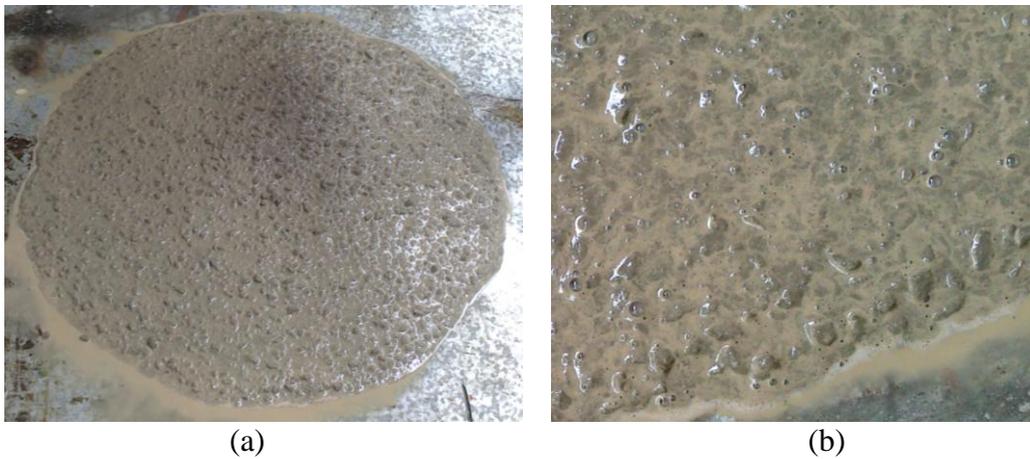


(b)

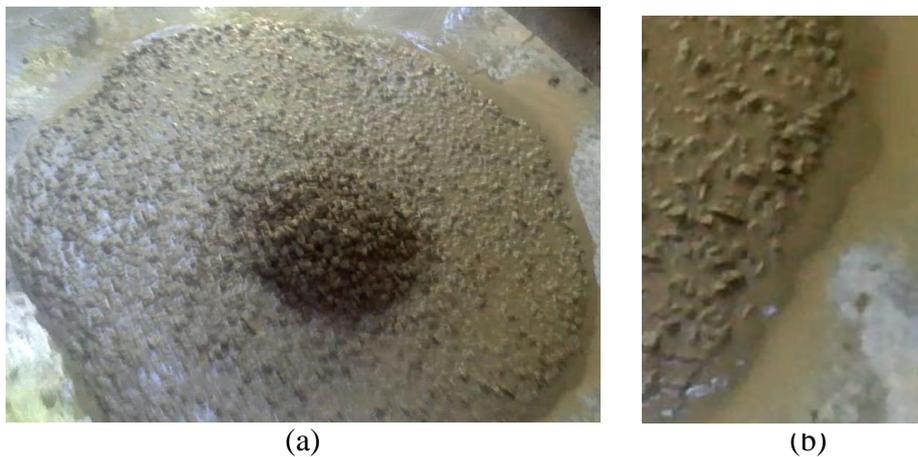
Figura 35: Mistura CW10. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação.



(a) (b)  
 Figura 36: Mistura CW20. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação.



(a) (b)  
 Figura 37: Mistura CW30. a) Espalhamento; b) Visualização da borda sem segregação.



(a) (b)  
 Figura 38: Mistura CW40. a) Espalhamento e segregação no centro; b) Visualização da borda com segregação.

Foi constatado que o concreto de referência CS0 e todos os CW foram classificados segundo a NBR 15823 como sendo concretos classe VS 2, ou seja, a norma especifica como sendo adequado para a maioria das aplicações correntes; apresenta efeito tixotrópico que

acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação, mas que não é adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura. Para os demais concretos CS os valores obtidos nesse tipo de ensaio os classificam como sendo concreto classe VS 1, ou seja, adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e de segregação. A norma ainda exemplifica seu uso como sendo em lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-fabricados e concreto aparente.

#### 4.2.3 Ensaio de fluidez no Funil V

A medida do tempo que o material leva para escoar do funil V é apresentado na Tabela 16. Foram realizadas duas medidas: a primeira 1,0 minuto após a pausa da mistura na betoneira e uma segunda medida 5,0 minutos após essa primeira. A Figura 39-a ilustra o ensaio em seu processo inicial em que a porta do funil foi liberada para escoamento do concreto por gravidade, mostrado na Figura 39-b..

Tabela 16: Resultados do tempo de escoamento do CAA no funil V.

Mistura	Funil "V"		NBR 15823
	1 min (s)	5 min (s)	Classe
CS0	20,8	24,4	VF 2
CS10	7,9	9,8	VF 1
CS15	5,4	8,3	VF 1
CS20	4,9	6,9	VF 1
CW0	48,9	34,6	NA
CW5	8,8	10,3	VF 2
CW10	19,2	22,3	VF 2
CW20	21,4	23,1	VF 2
CW30	22,5	24,8	VF 2
CW40	26,7	35,4	NA

Os ensaios de funil V revelaram que o concreto de referência CS0 e todos os CW foram classificados como sendo de classe VF 2, que segundo a NBR 15823 são concretos que adequados para a maioria das aplicações correntes, mas podem acumular uma quantidade de ar aprisionado e isso afeta negativamente na superfície de acabamento e no preenchimento dos cantos das fôrmas, mas os indica para vigas e pilares.



Figura 39: Ensaio de fluidez no funil "V": (a) Abertura da porta do funil "V"; (b) Escoamento do material.

Os ensaios de funil V revelaram que o concreto de referência CS0 e todos os CW foram classificados como sendo de classe VF 2, que segundo a NBR 15823 são concretos que adequados para a maioria das aplicações correntes, mas podem acumular uma quantidade de ar aprisionado e isso afeta negativamente na superfície de acabamento e no preenchimento dos cantos das fôrmas, mas os indica para vigas e pilares.

Os concretos CS10, CS15 e CS20 classificaram-se na classe VF 1, ou seja, são CAA que são adequados para a maioria das aplicações correntes. As concretagens podem ser

realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. Exemplos de aplicação segundo a norma: lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-fabricados e concreto aparente.

Os concretos CW0 e CW40 apresentaram valores de tempo de escoamento acima do limite da norma NBR 15823 e não são classificados por esse ensaio como CAA, por isso a indicação não se aplica (NA).

#### 4.2.4 Ensaio de Fluidez na Caixa "L".

Os valores de alturas nas extremidades da parte horizontal da caixa L, após ser liberada a porta e escoar o concreto da parte vertical para a parte horizontal da caixa L, são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17: Resultados obtidos na caixa "L".

Mistura	Caixa "L"					NBR 15823
	H1 (mm)	H2 (mm)	H2/H1	T 40mm (s)	T20mm	Classe
CS0	80	90	0,89	1,48	<1,0	PJ 2
CS10	82	95	0,86	3,19	<1,0	PJ 2
CS15	85	95	0,89	2,7	<1,0	PJ 2
CS20	87	95	0,92	1,9	<1,0	PJ 2
CW0	40	60	0,67	10,8	4,7	NA
CW5	64	80	0,80	4,22	4,3	PJ 2
CW10	78	95	0,82	1,8	<1,0	PJ 2
CW20	61	72	0,85	5,1	1,7	PJ 2
CW30	53	65	0,82	5,6	1,9	PJ 2
CW40	29	59	0,49	22,4	4,7	NA

A habilidade de passar por obstáculos e permanecer coeso é medida nesse ensaio, referentes aos concretos autoadensáveis em estudo, no estado fresco, e ilustrado na Figura 40. Nos ensaios da caixa L, na qual possuía três barras de aço, e que servia para medir habilidade

passante por armadura. Foram medidas das alturas ocupadas pelo concreto na parte horizontal da caixa L, a saber: logo após as barras de aço (H1) e na extremidade da caixa (H2), como mostra a Figura 41-a e Figura 41-b. O valor do quociente entre essas duas alturas,  $H2/H1$ , classificam em que situações o CAA pode ser utilizado, de acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2010). Pela norma esse quociente deve ser maior ou igual 0,80. Todos os concretos, exceto os CW0 e CW40, foram classificados como PJ 2, segundo a norma, ou seja, são concretos adequados para a maioria das aplicações correntes, tais como elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 a 80 mm, vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.

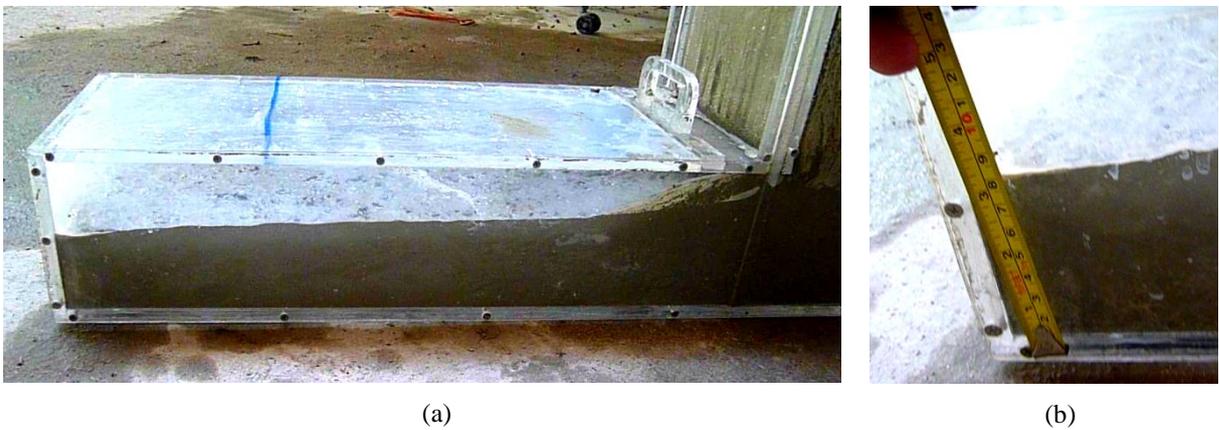


Figura 40: Ensaio de habilidade passante na caixa L: (a) Concreto escoado após a abertura do portão; (b) Medida da altura H2 alcançada pelo concreto na extremidade da caixa L.



Figura 41: Ensaio de habilidade passante na caixa L: (a) Caixa L com a parte vertical contendo concreto; (b) Marcação de 40 cm na caixa L.

### 4.3 Propriedades mecânicas

#### 4.3.1 Resistência à compressão

As Tabelas 18 e 20 apresentam os resultados de resistência à compressão, respectivamente para CAA com superplastificante Sikament e os CAA com superplastificante Powerflow. As Tabelas 19 e 21 descrevem os desvios padrão e coeficiente de variação dessas resistências.

Tabela 18: Resistência à compressão dos corpos de provas – CCA com SIKA.

Idade	14 dias			28 DIAS			90 DIAS		
	CP1	CP2	MÉDIA MPa	CP1	CP2	MÉDIA MPa	CP1	CP2	MÉDIA MPa
Mistura									
CS0	32,0	38,7	35,4	38,9	34,0	36,5	36,5	37,3	36,9
CS10	22,9	22,0	22,5	22,9	22,4	22,7	24,3	24,7	24,5
CS15	22,9	23,0	23,0	24,9	25,8	25,4	24,7	26,7	25,7
CS20	27,1	27,8	27,5	33,8	32,1	33,0	33,5	34,0	33,8

Tabela 19: Desvio padrão e coeficiente de variação - CAA com Sika.

Idade	14 DIAS			28 DIAS			90 DIAS		
	MÉDIA MPa	Desvio padrão	CV	MÉDIA MPa	Desvio padrão	CV	MÉDIA MPa	Desvio padrão	CV
Mistura									
CS0	35,35	4,74	13,40%	36,45	3,46	9,51%	36,9	0,57	1,53%
CS10	21,63	1,48	6,86%	22,65	0,35	1,56%	24,5	0,28	1,15%
CS15	22,63	0,55	2,43%	25,35	0,64	2,51%	25,33	1,18	4,68%
CS20	27,45	0,49	1,80%	32,95	1,2	3,65%	32,97	1,38	4,18%

Tabela 20: Resistência à compressão dos corpos de provas - CAA com Power Flow.

Idade	7 DIAS			28 DIAS			90 DIAS		
	CP1	CP2	MÉDIA MPa	CP1	CP2	MÉDIA MPa	CP1	CP2	MÉDIA MPa
Mistura									
CW0	37,00	38,70	37,85	43,10	48,10	45,60	54,90	48,60	51,75
CW5	36,50	38,50	37,50	43,70	42,80	43,25	46,00	47,70	46,85
CW10	36,70	36,90	36,80	48,70	43,40	46,05	48,90	48,80	48,85
CW20	33,20	33,50	33,35	43,70	42,80	43,25	44,10	50,40	47,25
CW30	31,50	32,90	32,20	40,20	38,50	39,35	44,20	42,10	43,15
CW40	21,00	19,60	20,30	23,10	20,50	21,80	23,10	24,10	23,60

Tabela 21: Desvio padrão e coeficiente de variação - CAA com Power Flow.

Idade	7 DIAS			28 DIAS			90 DIAS		
	MÉDIA MPa	Desvio padrão	CV	MÉDIA MPa	Desvio padrão	CV	MÉDIA MPa	Desvio padrão	CV
Mistura									
CW0	37,85	1,2	3,18%	45,6	3,54	7,75%	51,75	4,45	8,61%
CW5	37,5	1,41	3,77%	43,25	0,64	1,47%	46,85	1,2	2,57%
CW10	36,8	0,14	0,38%	46,05	3,75	8,14%	48,85	0,07	0,14%
CW20	33,35	0,21	0,64%	43,25	0,64	1,47%	47,25	4,45	9,43%
CW30	32,2	0,99	3,07%	39,35	1,2	3,05%	43,15	1,48	3,44%
CW40	20,3	0,99	4,88%	21,8	1,84	8,43%	24,6	0,71	2,87%

Para os concretos CS verificou-se um demorado início de pega, tendo alguns corpos de provas totalmente endurecido somente no terceiro dia após a moldagem nas formas metálicas e por isso não foram rompidos corpos de prova na idade de 3 e 7 dias.

Para os concretos CW o supracitado não ocorreu, sendo os corpos de prova normalmente colocados em cura úmida 24 horas após a mistura na betoneira e deixado até a data de rompimento na prensa para determinação da resistência à compressão. Foram substituídas porcentagens de cimento por resíduos RMG até o limite de 40%. Isto se deu devido fato de os concretos nesse percentual não apresentarem propriedades de CAA.

Os dados das tabelas acima são resumidos nos gráficos das figuras 27 e 28.

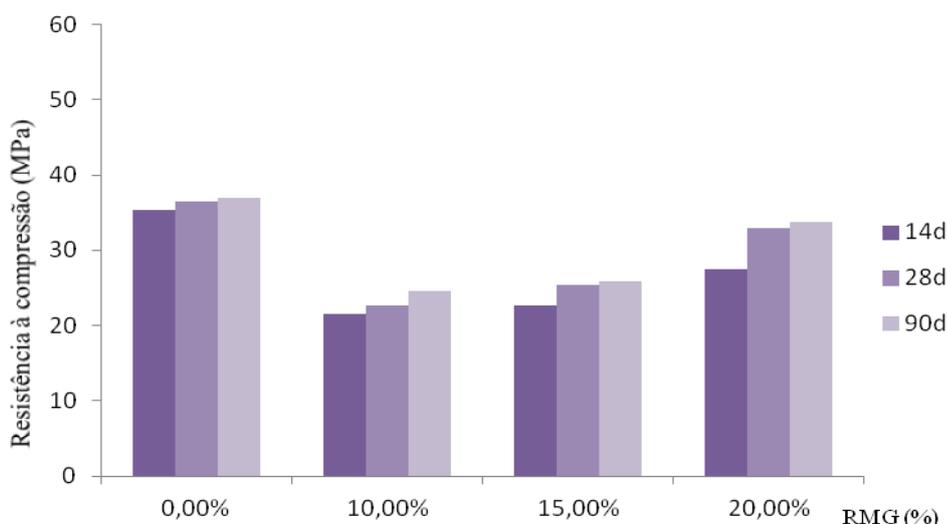


Figura 42: Gráfico resistência à compressão aos 14, 28 e 90 dias, CAA com SIKA.

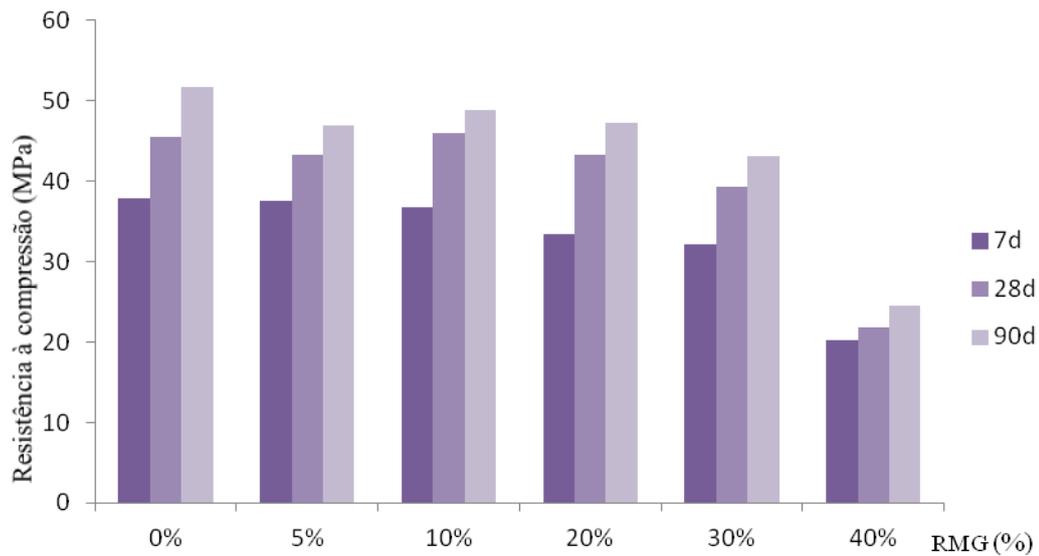


Figura 43: Gráfico resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias, CAA com aditivo PowerFlow.

Verificou-se que os concretos CW alcançaram maiores valores de resistência à compressão para o mesmo percentual de substituição do cimento por RMG quando comparado com os concretos da classe CS. Observou-se que os concretos da classe CW apresentaram evolução progressiva desses valores em comparação com a evolução dos valores de resistência dos concretos CS correspondentes, exemplo o CW0 teve sua resistência inicial de 37,9 MPa e aos 90 dias de 51,8, o que corresponde a um aumento de 37% aproximadamente. Para concreto CS0 esse aumento foi de pouco mais de 4%, tendo sua resistência inicial 35,4 MPa até 36,9 MPa aos 90 dias.

Nos dois casos de utilização dos aditivos, sikament e powerflow, verificou-se que os concreto de referência (CS0 e CW0), ou seja, sem resíduos RMG em sua composição, apresentaram desempenho superior àqueles apresentados pelos demais concretos, outrossim, os concretos contendo resíduos apresentaram também comportamentos satisfatórios, os CS20 alcançou resultados bastante próximo do CS0. Os da classe CW apresentaram valores de resistência à compressão superiores aos da classe CS. Os concretos CW apresentaram valores próximos ao valores de referência, nos percentuais de substituição do cimento por resíduos de

5%, 10% e 20%. Quando comparados os dois concretos os da classe CW levam vantagem, por exemplo o alcançou valores de resistência à compressão que ultrapassam o dobro, 104,4%, os valores obtidos para o CS10. O CW20 alcançou resistência aproximadamente 40% maior que o CS20, aos 90 dias. O CS20 apresentou valores aproximados do concreto de referência CS0, aproximadamente 5% menor aos 28 dias e de 9% menor aos 90 dias, valor esse que é superior ao valor de resistência previsto nos cálculos de dosagem, que foi de 35 MPa. Para os CW esses valores caem para 2,9% para o CW10 e de 15% para CW30.

A aparência dos corpos de prova após a ruptura mostra uma superfície cônica, com ângulos de aproximadamente  $45^\circ$  de inclinação com a superfície original dos corpos de prova, conforme pode ser observado na Figura 44-a. Isso indica que o cisalhamento é o principal responsável pela fratura de cada um dos corpos de prova e confirma o fato de que, sob uma carga axial, as tensões de cisalhamento são maiores nos planos que formam ângulos de  $45^\circ$  com a carga (BEER, 2013).

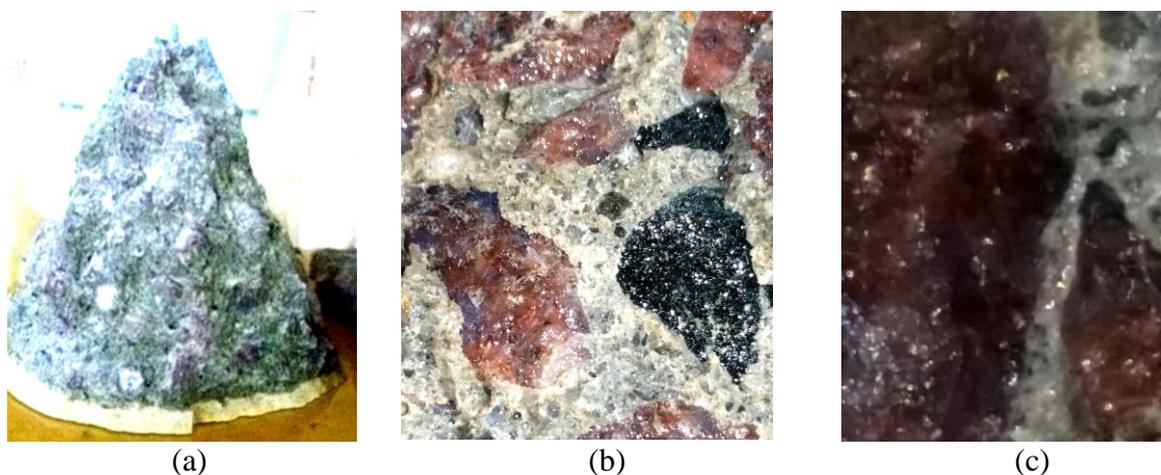


Figura 44: Aspecto da mistura seca: (a) Superfícies cônicas com ângulos de inclinação próximos de  $45^\circ$  com a superfície original dos corpos de prova; (b) Aspecto da mistura dos agregados e argamassa; (c) Contato entre agregado e argamassa sem borda de reação (formação de gel).

Ao se aproximar mais da superfície, como mostra a Figura 44-b constata-se que a

quantidade de poros e a quantidade de vazios está reduzida, comprovando os valores obtidos nos ensaios de absorção de água e de índice de vazios. Essa boa união entre agregados e argamassa dificulta a penetração de substâncias que possam oxidar a armadura em possível utilização desse concreto em estrutura de concreto armado.

Uma aproximação maior foi conseguida com auxílio de um microscópio óptico na tentativa de se observar a microestrutura da interface entre argamassa e agregado, ilustrado na Figura 44-c. Constatou-se existir contato uniforme, sem a formação de gel expansivo ou penetração de argamassa no agregado.

#### 4.3.1 Resistência à flexão

Os valores de resistências à flexão são apresentadas na Tabela 22. Pode-se observar que todas as placas satisfazem à limite estabelecido na NBR 15805 (2010) que exige que a ruptura mínima deve ocorrer a 4,5 MPa. Apesar de se obter valor médio de resistência à flexão para placas contendo 40% de substituição de cimento por resíduo, esse concreto não apresentou resultado que o classificassem como CAA nos ensaios de propriedades reológicas, chegando até o ponto de ocorrer segregação em alguns casos.

Tabela 22: Resistência á flexão. Tensões e cargas obtidas nos ensaios de flexão de placas de CAA.

RMG	Tensão: unid.: MPa					
	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão	CV
0%	7,75	8,22	8,55	8,17	0,40	4,92%
20%	7,89	8,11	6,77	7,59	0,72	9,47%
30%	7,60	7,50	7,00	7,37	0,32	4,36%
40%	7,48	6,71	6,76	6,98	0,43	6,17%

A Figura 45-a ilustra o ensaio em uma das placas e a Figura 45-b detalha os pontos de aplicação das forças: dois de cargas concentradas normais distantes 10,0 cm entre si e a 5,0

cm do centro da placa e dois de reações de apoios nas extremidades.

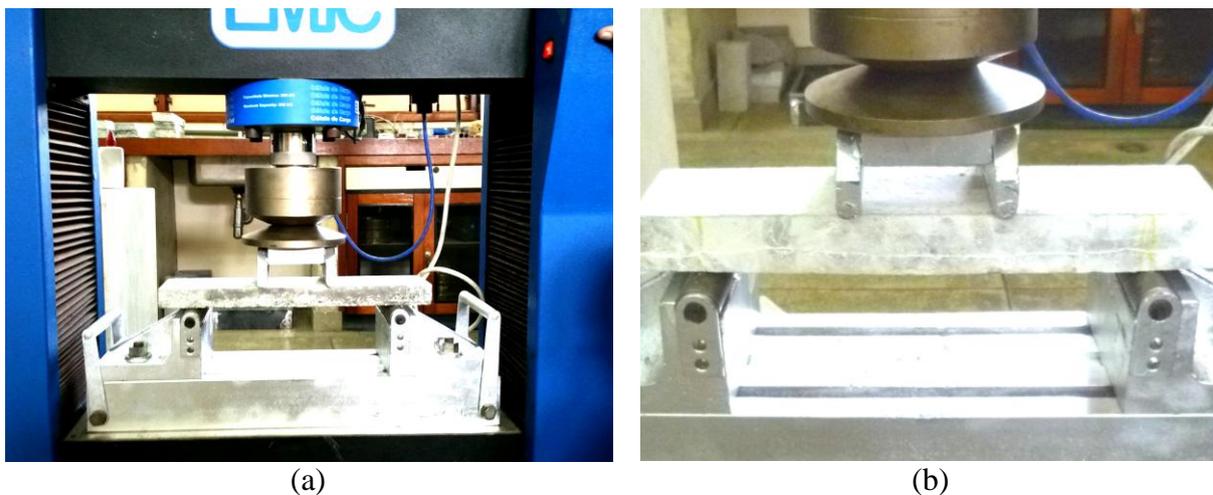


Figura 45: Ensaio de flexão em placas de concreto: a) Corpo de prova na prensa no início do ensaio; b) Detalhe dos quatro pontos atuando no corpo de prova.

Foram ensaiadas placas com espessura de 4,0 cm, 30% de substituição de cimento por resíduo, alcançando valores de 7,6 MPa para resistência à flexão e de 399 Kgf para carga de ruptura, ou seja, para aumento de 1,0 cm na espessura da placa conseguiu-se obter aumento de carga de aproximadamente o dobro, de 211 para 399 Kg.

#### 4.4 Propriedades físicas e químicas

##### 4.4.1 Absorção, Índice de Vazios, Massa Específica

Essas propriedades foram obtidas seguindo os critérios adotados pela norma ABNT NBR 9778:2005 - corrigida em 2009 (ABNT, 2009). Os valores da massa de cada corpo de prova obtidos no laboratório estão registrados na Tabela 23. As massas A, B, C, D e E são respectivamente:

A = massa do corpo de prova seco em estufa;

B = massa do corpo de prova saturado em água à temperatura de  $(23 + 2) ^\circ\text{C}$  com a superfície seca;

C = massa do corpo de prova com a superfície seca imersa em água após a saturação em água à temperatura de  $(23 + 2) ^\circ\text{C}$  e fervura em água em ebulição durante 5h;

D = massa do corpo de prova após a saturação em água à temperatura de  $(23 + 2) ^\circ\text{C}$ ;

E = massa hidrostática do corpo de prova após a saturação em água à temperatura de  $(23 + 2) ^\circ\text{C}$  e fervura em água em ebulição durante 5h;

Tabela 23: Massa de cada CP de CAA.

% RMG	$\Phi 1$ (cm)	$\Phi 2$ (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	Massa (g)				
					A	B	C	D	E
CW0	10,0	10,0	20,0	19,7	3775,70	3948,7	3925,50	3933,20	2275,00
CW0	10,0	10,0	19,8	20,0	3679,60	3858,2	3833,90	3839,60	2231,50
CW10	10,0	10,2	19,8	20,0	3691,40	3872,8	3853,00	3859,40	2280,30
CW10	9,9	9,9	19,8	20,0	3658,00	3842,6	3821,90	3829,60	2260,60
CW20	9,8	10,0	19,4	19,6	3520,65	3702,6	3678,40	3689,00	2166,50
CW20	9,9	10,0	19,7	19,8	3498,40	3675,1	3655,60	3660,40	2157,70
CW30	10,5	10,8	19,2	19,4	3910,60	4107,1	4086,80	4094,10	2408,80
CW30	10,0	10,0	19,4	19,4	3573,80	3757,9	3736,70	3743,10	2200,40

Os valores obtidos pelas equações das norma para absorção de água, índice de vazios e massa específica estão descritos Tabela 24. Nessa tabela os valores identificados como A, B, C, D, E, F, G e H representam respectivamente as seguintes grandezas:

A) Absorção após imersão em água à temperatura de  $(23 + 2) ^\circ\text{C}$ ;

B) Absorção após imersão e fervura;

C) Índice de vazios após saturação em água;

D) Índice de vazios após saturação e fervura;

E) Massa específica da amostra seca;

F) Massa específica da amostra após saturação;

G) Massa específica da amostra saturação e fervura;

H) Massa específica real.

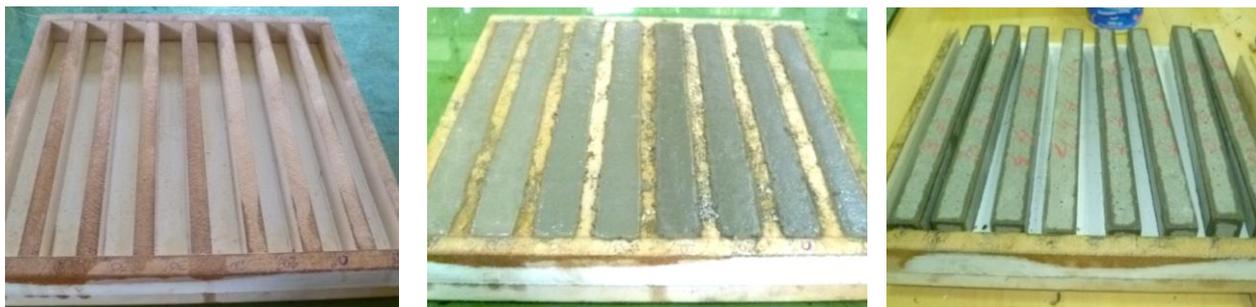
Tabela 24: Absorção, Índice de vazios e Massa específica dos CPs de CAA.

RMG no concreto	Absorção (A)	Absorção (B)	Índice de Vazios (C)	Índice de Vazios (D)	Massa Específica (E)	Massa Específica (F)	Massa Específica (G)	Massa Específica (H)
	%	%	%	%	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
CW0	4,7	4,1	10,4	9,4	2,29	2,40	2,39	2,53
CW10	5,0	4,4	13,9	10,4	2,35	2,46	2,45	2,62
CW20	5,1	4,5	12,7	10,5	2,33	2,45	2,44	2,60
CW30	5,1	4,5	13,8	10,6	2,33	2,45	2,43	2,60

Os valores de absorção e de índice de vazios, calculados, ficaram compreendidos entre 4% e 5% para absorção e compreendidos entre 9 a 13% para índice de vazios. Isso é uma indicação de serem concretos cuja permeabilidade é mínima, são concretos que se utilizados em estruturas dificilmente apresentarão falhas de concretagem devido a adensamento incompleto e exsudação, e conseqüente redução de resistência, os riscos com problemas futuros de carbonatação e oxidação das armaduras estará consideravelmente reduzido.

#### 4.4.2 RAA: Método acelerado em barras de argamassas e concreto

Os valores de expansão das barras de argamassas para se medir a reação álcali-agregado são apresentados na Tabela 25 e resumido no gráfico da Figura 46. O molde das barras é ilustrado na Figura 46-a. Na Figura 46-b é mostrada a desforma dessas barras e a medida dos comprimentos para análise das deformações na Figura 46-c.



(a) (b) (c)

Figura 46: Análise de RAA: a) Fôrma das barras; b) Molde das barras; c) Barras deformadas.

Tabela 25: Valores dos comprimentos e percentual de expansão da barras de argamassa e concreto

% RMG	Comprimento das barras em mm e percentual de expansão.							
	Dia 01	%	Dia 03	%	Dia 9	%	Dia 14	%
0%	285,68	0	285,76	0,03	285,96	0,10	285,88	0,07
	285,8	0	285,96	0,06	286,02	0,08	285,96	0,06
	285,86	0	285,82	-0,01	285,92	0,02	286,06	0,07
	285,98	0	285,9	-0,03	285,96	-0,01	285,8	-0,06
20%	285,78	0	285,75	-0,01	286,04	0,09	286,04	0,09
	285,94	0	286	0,02	286	0,02	285,88	-0,02
	286,42	0	286,36	-0,02	286,38	-0,01	286,38	-0,01
	286,5	0	286,47	-0,01	286,48	-0,01	286,48	-0,01
30%	286,32	0	286,42	0,03	286,38	0,02	286,48	0,06
	286,48	0	286,5	0,01	286,48	0,00	286,52	0,01
	286,42	0	286,44	0,01	286,48	0,02	286,5	0,03
	286,52	0	286,52	0,00	286,5	-0,01	286,52	0,00
40%	285,84	0	285,94	0,03	285,88	0,01	285,88	0,01
	286,38	0	286,48	0,03	286,4	0,01	286,48	0,03
	286,21	0	286,22	0,00	286,18	-0,01	286,36	0,05
	286,28	0	286,34	0,02	286,32	0,01	286,4	0,04
Arg 30%	286,39	0	286,41	0,01	286,36	-0,01	286,34	-0,02
	286,48	0	286,46	-0,01	286,42	-0,02	286,42	-0,02
	286,78	0	286,78	0,00	286,74	-0,01	286,72	-0,02
	286,84	0	286,84	0,00	286,84	0,00	286,74	-0,03
	287,08	0	287,04	-0,01	287,04	-0,01	287,04	-0,01
	286,98	0	287,04	0,02	287,04	0,02	287,1	0,04

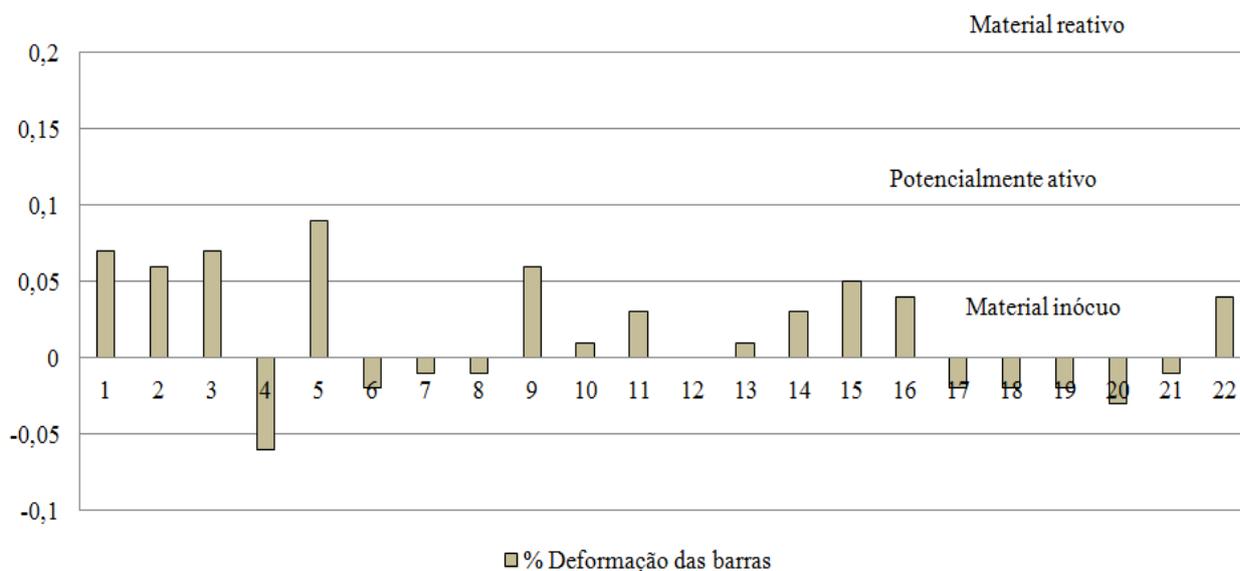


Figura 47: Deformação das barras de argamassas e de concreto imersas em solução alcalina.

Na última coluna da Tabela 25 estão representados os percentuais de expansão de cada uma das barras no décimo quarto dia imersas na solução alcalina, em relação ao dia inicial de imersão. Verifica-se que todos os valores obtidos ficaram abaixo de 0,10%, o que de acordo com a norma brasileira NBR 15577 classifica o material como inócuo, ou seja, pode ser utilizado no concreto sem tratamento químico, pois fica evidenciado que não ocorrerá formação de gel expansivo responsável por patologias de fissuras superficiais e internas nas estruturas de concreto.

## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões e as sugestões para futuras pesquisas.

### 5.1 Conclusões

O traço adotado na produção dos concretos desta pesquisa foi: 1,0 (cimento + RMG) : 1,15 (areia) : 1,80 (brita) : 0,41 (água), proporções de materiais componentes em massa, para obtenção de resistência à compressão mínima de 35 MPa aos 28 dias de cura, o que resulta em um consumo de cimento de 526 kg/m<sup>3</sup>, sem adição de finos.

Os resultados mostraram-se eficazes quando foi utilizado adição de RMG, na forma de pó, seco e de diâmetros menores que 75 µm (passantes na peneira # 200), substituindo a massa de cimento em até 30%, quando o aditivo químico utilizado foi a base de carboxilato, e de 20% quando se utilizou aditivo a base de sais sulfonados. Nessa situação o concreto ficou classificado como CAA e recomendado como adequado para utilização na maioria das aplicações correntes, inclusive para elementos estruturais de alta densidade de armadura e de pré-moldados, de acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2010). Isso foi observado nos ensaios reológicos para os traços CS10, CS15, CS20, CW5, CW10, CW20 e CW30, todos com viscosidade plástica entre VS 1 e VS2, da norma.

Observou-se boa evolução da resistência à compressão axial nas idades até 90 dias em função das características do RMG servirem como pontos de nucleação para os produtos de hidratação e a alteração da microestrutura da zona de transição do cimento Portland comum com adições CP II-S-32 – Amazon Cemex, empregado nesta pesquisa. Os traços CS15, CS20, CW5, CW10, CW20 e CW30 alcançaram valores de resistência a compressão muito próximos dos valores de resistência à compressão do concreto de referência, CS0 e

CW0, cujo valor ultrapassou o valor teórico calculado por ocasião da determinação da dosagem e os tornam concretos alternativos para elementos estruturais. O concreto CW10 apresentou resistência à compressão aos 28 dias de 46 MPa, ou seja, 31,43% maior do que o calculado na dosagem. Já o concreto CW5 apresentou resistência de 46,9 MPa, aumento de cerca de 34%. Para os concretos CW20 e CW30, os valores alcançaram resistência de 43,3 MPa e de 39,4 MPa, respectivamente, mostrando um bom desempenho mesmo para altas concentrações de resíduos.

A resistência à flexão alcançada na idade de 90 dias mostrou-se satisfatória e atendeu aos requisitos da norma brasileira que exige valor mínimo de 4,5 MPa, para placas de pisos e pavimentos de concreto. Os concretos CW20 e CW30 alcançaram valores de 7,59 MPa e de 7,37 MPa, respectivamente.

Quanto a fluidez, os traços contendo RMG apresentaram maior fluidez que o concreto de referência CS0 e CW0, demonstrado no ensaio do funil V e da caixa L, possivelmente porque os finos de RMG aumentaram a densidade de massa, por ocuparem os vazios outrora existentes, como pode ser observado nos resultados de massa específica, e conseqüentemente com menor teor de ar aprisionado, como comprova os ensaios de absorção e de índice de vazios.

Nos ensaios de RAA pode-se verificar que os materiais utilizados na dosagem mostraram-se inócuos no que se refere a reação química prejudicial entre os hidróxidos alcalinos e os elementos químicos que constituem os agregados. Somando-se aos resultados na análise por fluorescência por raios-X não detectaram elementos que prejudicassem as reações químicas de hidratação do concreto. As barras de argamassa e de concreto no estado endurecido foram seccionadas e observadas em microscópio e não foram observadas a formação de géis de expansão na interface argamassa - agregados. As expansões de barras de

argamassas e de concretos, quando imersas em solução alcalina, menores que 0,10% trouxeram uma segurança a mais em se indicar tais materiais como possíveis de serem utilizados nos concretos de estruturas.

## 5.2 Sugestões para Futuras Pesquisas

Como o produto final desta pesquisa objetiva a obtenção de concretos, com qualidades e resistências que lhe permitam ser classificados como autoadensáveis, com emprego de resíduos de mármore e de granitos das marmorarias de Manaus, recomenda-se, como sugestão para futuros experimentos, que a durabilidade, por meio de estudos de penetração de íons cloretos, carbonatação, porosidade, permeabilidade e reação álcali-agregado, e os custos dos concretos sejam analisados para confirmação de sua viabilidade na fabricação estruturas usuais de concreto e de estruturas, em substituição ao concreto convencional vibrado atualmente utilizado, ou até mesmo em estruturas de concretos pré-moldados.

Outras sugestões para pesquisas futuras são:

a) Produzir concretos autoadensáveis com outros métodos de dosagens já implantados no sul e sudeste do país, em substituição ao método antigo da ABCP, e realizar ensaios laboratoriais utilizando resíduos encontrados na região amazônica, e analisar a viabilidade de utilização desses outros métodos e desses outros concretos;

b) produzir concretos com outros materiais componentes, como por exemplo, utilizando fibras vegetais como reforço da flexão e tração ou como substituição da armadura em concreto armado;

c) Utilizar os RMG como adições nos concreto combinados com outras adições

quimicamente ativas, como por exemplo, a pozolana, que possui diversos estudos e com bons percentuais de substituição do cimento e analisar seu comportamento à compressão e flexão.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **EB-1763**: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados em estado solto - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Determinação do teor de material pulverulento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-NM-67**: Concreto-Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-NM-68**: Concreto-determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de graff. Rio de Janeiro, 1998;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados-Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro - RJ . 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Confecção e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2003;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concretos: Especificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**: Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681**: Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9777**: Agregados - Determinação da absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da absorção de água por Imersão - Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9939**: Agregados - Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro - RJ . 1992;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-13956**: Sílica Ativa. Rio de Janeiro - RJ . 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15012**: Rochas Para Revestimentos de Edificações - Terminologia. Rio de Janeiro - RJ . 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4**: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15805**: Placa de concreto para piso - Requisitos e métodos de ensaios - Ed. 2. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto

autoadensável. Parte 1 – Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2:** Concreto autoadensável. Parte 2 – Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento. Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3:** Concreto autoadensável. Parte 3 – Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4:** Concreto autoadensável. Parte 4 – Determinação da habilidade passante - Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5:** Concreto autoadensável. Parte 5 – Determinação da viscosidade - Método do funil V, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-6:** Concreto autoadensável. Parte 6 – Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2010.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho.** São Paulo: Editora Pini, p. 669., 2000.

ANDRADE, Carlos Eduardo Silva. **Análise e caracterização de cinzas do processo de incineração de resíduos de serviço de saúde para reaproveitamento.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

BARBOSA, M. T. **Estudo Sobre a Areia Artificial em Substituição à Natural para Confecção de Concreto.** Juiz de Fora: Departamento de Construção Civil Universidade Federal de Juiz de Fora Campus Universitário. Bairro Martelos, 2008.

BARROS., P. G. **Avaliação das Propriedades de Durabilidade do Concreto Autoadensável Obtido com Resíduo de Corte de Mármore e Granito.** Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2008.

BARROS FILHO, R. M. **Rochas: Mármore e Granitos. Basalto e Gabro.** Belo Horizonte: Faculdade INAP, 2005.

BAPTISTA, Allan Silveira. et al. **Avaliação da reação álcali-agregado da areia natural da região metropolitana de Porto Alegre, Brasil e do uso de sílica ativa.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

BARTHOLOMEI, M. B. **Estudo de Concreto Autoadensável com a Utilização de Materiais da Região de Manaus e Resíduo de Vidro como Modificador de Viscosidade.** Manaus: Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas – FT/UFAM, 2013.

BEER. F. P. **Estática e mecânica dos materiais,** p 350. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

BELTRÃO, F. C. **A Influência do Metacaulim nas Propriedades do Concreto.** Belém: Universidade da Amazônia - UNAMA, 2010.

BERTOCINI, Sandra R. et al. **Estudo de caso: Adequação de traço de CAA com uso de areia de britagem na indústria de pré-fabricado.** São Carlos: 3º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré Moldado da UFSCar, 2013.

BILLBERG, P. **Self-Compacting Concrete for Civil Engineering Structures – The Swedish Experience**. Stockholm: In: S. C. C. R. I. 1-77, 1999.

BOTELHO, M. H. **Concreto armado eu te amo, vol. 2, 2. Edição**. São Paulo: Editora Blucher, 2007.

CARVALHO, R. C. **Cálculo e detalhamento de estruturas de concreto armado, 2. Edição**. São Carlos: Editora EdUFCar, 2004.

CAVALCANTI, D. J. **Contribuição ao Estudo de Propriedades do Concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2006.

CHIODI FILHO, Cid e RODRIGUES, E. P. **Guia de Aplicação de Rochas em Revestimentos. Projeto Bula**. São Paulo: Abirochas, 2009.

CORREIA GOMES, P. C. C. e BARROS, A. R de. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Editora PINI, 2009.

COUTO, Tiago A. **Reação álcali-agregado. Estudo do fenômeno em rochas silicosas**. Goiania: Escola de Engenharia Civil, 2008.

DOMONE, P. L. & JIN, J. **Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete. Edição: A. Skarendhal; Petersson**. France: In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, p.109-120. Stockholm. Proceedings, RILEM Publications, 1999.

EDAMATSU, H., NISHIDA, N., & OUCHI, M. (s.d.). **A Rational Mix-Design Method for Self-Compacting Concrete Considering Interaction Between Coarse Aggregate and Mortar Particles**. Stockholm: In: 1st International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, p. 309-320.

EFNARC - European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete. **Technical Committee - Self-Compacting Concrete**. Disponível em: <[efnarc.org/organisation\\_self\\_concrete.html](http://efnarc.org/organisation_self_concrete.html)>. Consulta em: 05 de agosto de 2012.

FONSECA, G. C. da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: Uma abordagem epistêmica**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2010.

FRASCÁ, M. H. B. de O. **Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais e de Revestimento: Estudo por Meio de Ensaio e Análises e das Patologias Associadas ao Uso**. Recife: III Simpósio sobre Rochas Ornamentais do Nordeste, 2002.

GOMES, P. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. Catalúnya: Tese - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do Resíduo de Corte de Granito (RCG) como Adição para Produção de Concretos**. Porto Alegre: Escola de Engenharia de Rio Grande do Sul, 2002.

IEL. Instituto Euvaldo Lodi. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo - Rochas Ornamentais**. Cachoeiro do Itapemirim: 2013.

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais e de Revestimento: Estudo por Meio de Ensaio e Análises e das Patologias Associadas ao Uso.** São Paulo: 2002.

KHAYAT, K. H. **Viscosity-Enhancing Admixtures for Cement-Based Materials - An Overview.** *Cement and Concrete Composites* **20**, 171–188. 1998. Quebec: Université de Sherbrooke, Department of Civil Engineering, Sherbrooke, 1999.

KLEIN, N. S. **Influência da Substituição da Areia Natural no Concreto Autoadensável.** Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2008.

LACHEMI, M., et. al.. **Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste.** *Cement and Concrete Research* **34**, 185–193. 2004. Toronto: Department of Civil Engineering, Ryerson University, 2003.

LARIZZATTI, R. G. e MENESES, R. G. de. **Rochas Ornamentais e de Revestimento: Conceitos, Tipos e Caracterização Tecnológica. Curso De Especialização Em Mármore e Granito.** Rio de Janeiro: Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LISBÔA, E. M.. **Obtenção do Concreto Autoadensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas.** Maceió: Universidade Federal De Alagoas, 2004.

LNEC-413. **Especificação. Betões : Determinação da permeabilidade ao ar e à água. Método de Figg.** Lisboa: MOPTC - LNEC, 1993.

LOPES, J. L. **Estudo do Potencial de Utilização do Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG), como Fíler, na Produção de Concretos.** Goiânia: Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da UFG, 2006.

LÓPEZ, D. A. R., et al. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino.** Santa Cruz do Sul: Dissertação de mestrado, Universidade de Santa Cruz do Sul, 2005.

MARANGON, E. **Caracterização Material e Estrutural de Concretos.** Rio de Janeiro: Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

MARÇAL, R. L. **Fabricação de Vidros Especiais a Partir de Resíduos da Indústria de Rochas Ornamentais.** Rio De Janeiro, Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2011.

MARQUES, A. C. **Concreto Autoadensável: Caracterização da Evolução das Propriedades Mecânicas e Estudo da Sua Deformabilidade por Solicitação Mecânica. Retração e Fluência.** São Paulo: Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.

MATTOS, I. **Uso, adequação e aplicação de rochas ornamentais na construção civil – parte 1.** Recife: In: III Simpósio sobre Rochas Ornamentais do Nordeste, Anais, 2002.

MC BAUCHEMIE DO BRASIL. **Protection Technologies. Manual técnico completo - linhas de produtos: MC-PowerFlow 1159, p 190.** Vargem Grande Paulista: 2012.

MIRANDA, R. A. C. **Estudo da Aplicação de Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito em Tijolos de Solo-Cimento.** Goiânia: Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás, 2012.

MOLINARI, É. J. **Reutilização dos Resíduos de Rochas Naturais Para o Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Matriz Termofixa na Manufatura de Pedras Industriais.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

MOURA, W. A. **Utilização do Resíduo de Corte de Mármore e Granito em Argamassa de Revestimento e Confecção de Lajotas para Piso.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Editora Pini, 1997.

NUMMER, A. R. et al. **Química mineral, cristalização e deformação de granitos sintectônicos brasileiros da região de Arrozal, SW do Rio de Janeiro. Revista Brasileira de Geociências 37: 202-214, março de 2007. 202. Disponível em: <www.sbgeo.org.br>. Consulta em 10 de dezembro de 2014.**

OUCHI, M., & EDAMATSU, Y. **A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in the self-compacting concrete. Kochi 782-8502. JAPAN: Department of Infrastructure Systems Engineering, Kochi University of Technology, 1999.**

PADILHA DOS SANTOS, A. **Estudo Experimental e Análise da Viabilidade do Emprego do Pó de Mármore Para a Produção de Concreto Autoadensável.** Curitiba: Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Campus Curitiba - Departamento Acadêmico de Construção Civil - Tecnologia em Concreto, 2012.

PAUMGARTTEN, M. D. **Concreto Autoadensável com Materiais Encontrados na Região de Belém.** Belém: Dissertação de mestrado, Universidade da Amazônia – UNAMA, 2010.

QUALIDADE. **Revista impressa Rochas de qualidade, ed 177. Artigo do editorial: Escoar é preciso... p. 7.** São Paulo: EMC Editores associados Ltda., 2004.

QUEIROZ, F. C. **Aproveitamento de Resíduos Pétreos de Marmorarias do Município de São Paulo como Agregado para Concreto de Cimento Portland.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, 2005.

RANIA A. Hamza. **Marble and Granite Waste: Characterization and Utilization in Concrete Bricks.** Cairo: Environmental Engineering Program in the American University in Cairo, 2011.

ROMANO, C. A. **Apostila de Tecnologia do Concreto.** Curitiba: Centro Federal de educação Tecnológica do Paraná, 2004.

SANTOS, R. A. **Reaproveitamento dos Resíduos de Britagem de Granito.** João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2011.

SATO, N. M. N. **Análise da Porosidade e de Propriedades de Transporte de Massa em Concretos.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio à Micro e Pequena Empresa. **Boletim: Construção Civil: Marmorarias.** Vitória: 2014.

SIKA. Sika Brasil. Disponível em: <[http://bra.sika.com/pt/solutions\\_products/02/02a001/02a001sa99/02a001sa99ssa01/02a001sa99ssa01100/02a001sa99ssa01107.html](http://bra.sika.com/pt/solutions_products/02/02a001/02a001sa99/02a001sa99ssa01/02a001sa99ssa01100/02a001sa99ssa01107.html)>. Consulta em 10 de junho de 2013.

SOUSA FILHO, L. M. **Concreto Autoadensável e de Alto Desempenho Produzido**

**com Fibras de Polipropileno e Materiais Disponíveis na Região Metropolitana de Manaus.** Manaus: Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, 2011.

STEFENON, F. **Incorporação de Resíduos Industriais em Concreto Betuminoso Usinado à Quente.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

TUTIKIAN, B. F. e DAL MOLIN. **Concreto Autoadensável.** São Paulo: Editora PINI Ltda., 2008.

VELASCO, R. V., **Concreto de Alto Desempenho Reforçado com Fibras de Polipropileno e Sisal Submetido a Altas temperaturas.** Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

VIDAL, F. **Avaliação de granitos ornamentais do nordeste através de suas características tecnológicas.** Recife: In: III Simpósio sobre Rochas Ornamentais do Nordeste, Anais, 2002.

## 7. APÊNDICES

### 7.1 Gráficos de resistência à compressão

Segue abaixo os gráficos de tensão X tempo a partir de dados obtidos dos ensaios de compressão dos corpos de prova.

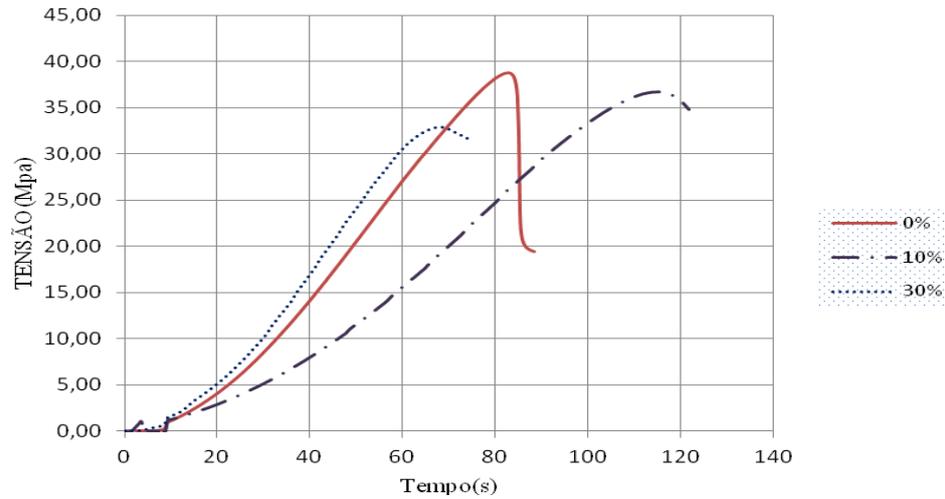


Figura 48: Gráfico: curva de tensão x tempo referente a compressão de CP. CAA preparado com superplastificante PowerFlow. Idade: 7 dias.

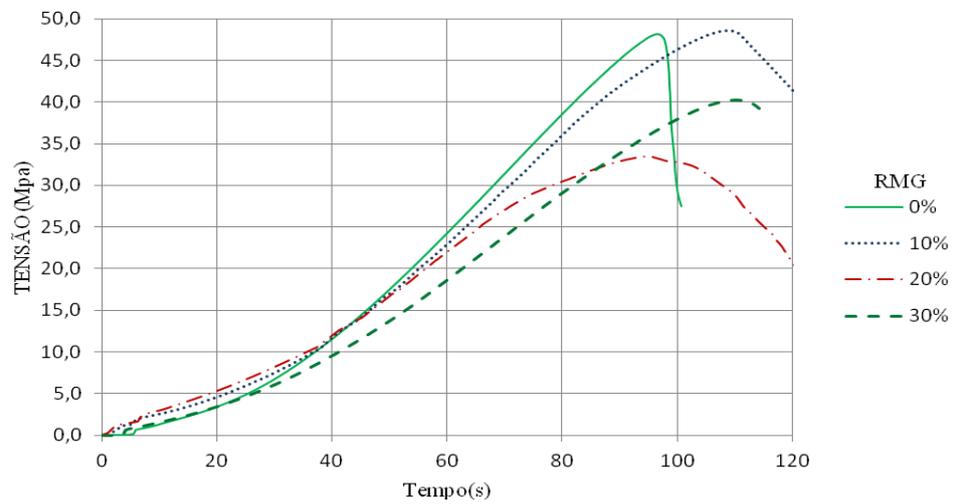


Figura 49: Gráfico: curva de tensão x tempo referente a compressão de CP. CAA preparado com superplastificante PowerFlow. Idade: 28 dias.

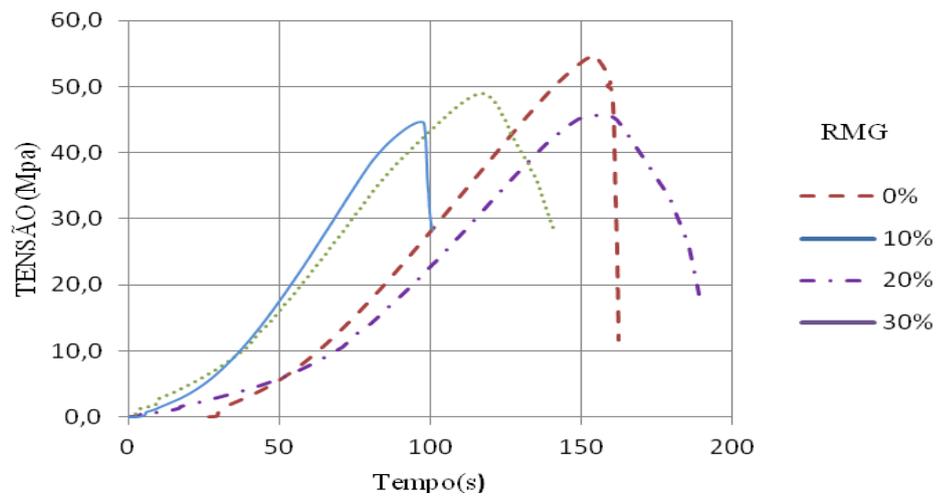


Figura 50: Gráfico: curva de tensão x tempo referente a compressão de CP. CAA preparado com superplastificante PowerFlow. Idade: 90 dias..

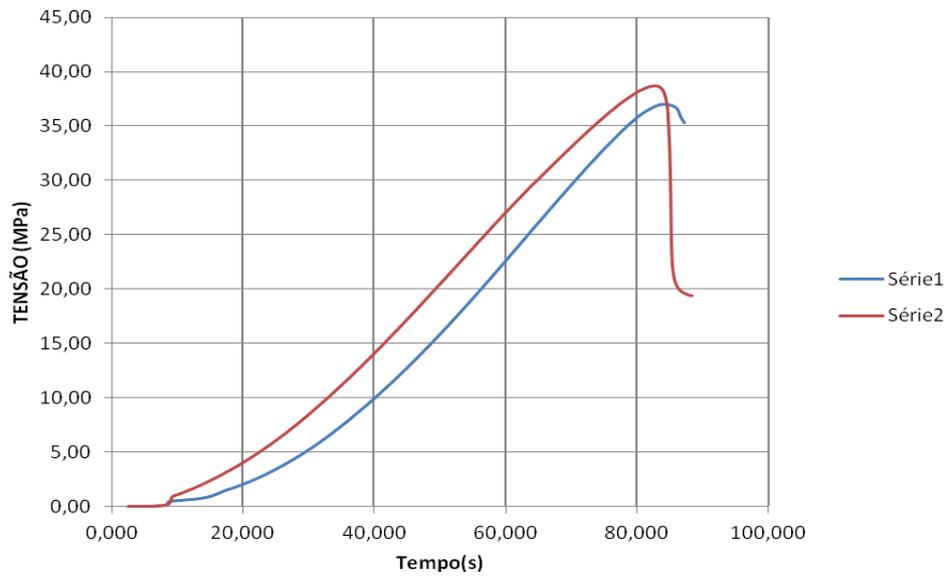


Figura 51: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 0% de RMG, idade = 3 dias.

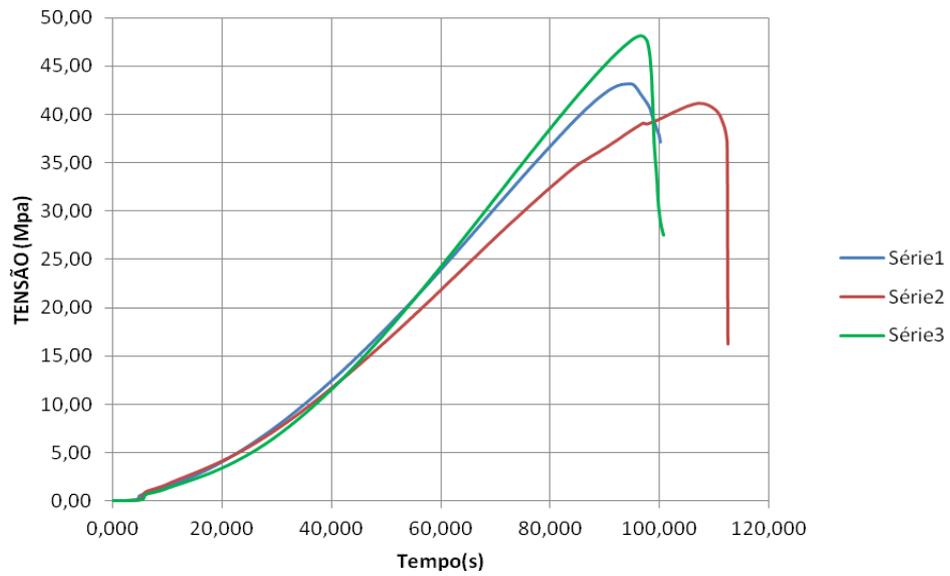


Figura 52: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 0% de RMG, idade = 14 dias.

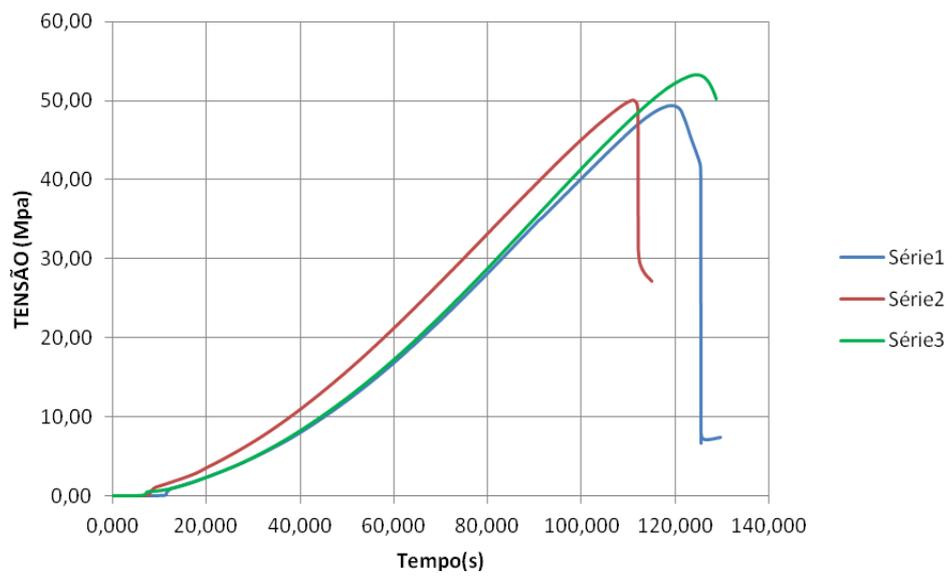


Figura 53: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 0% de RMG, idade = 28 dias.

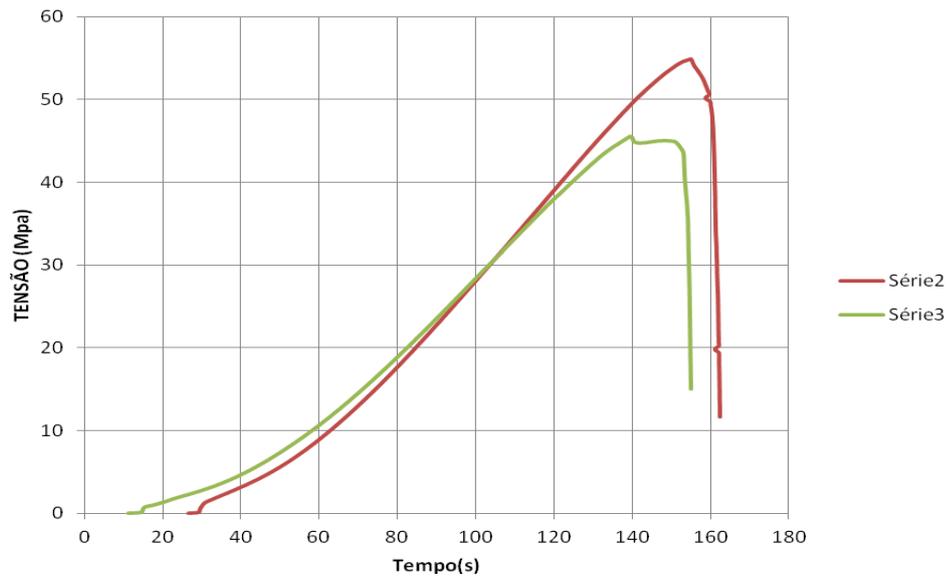


Figura 54: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 0% de RMG, idade = 90 dias.

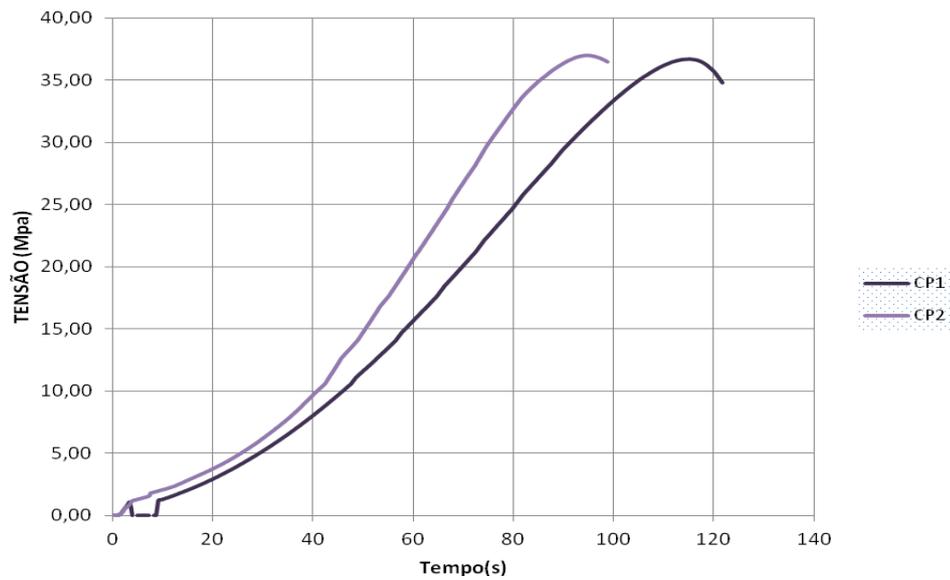


Figura 55: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 10% de RMG, idade = 3 dias.

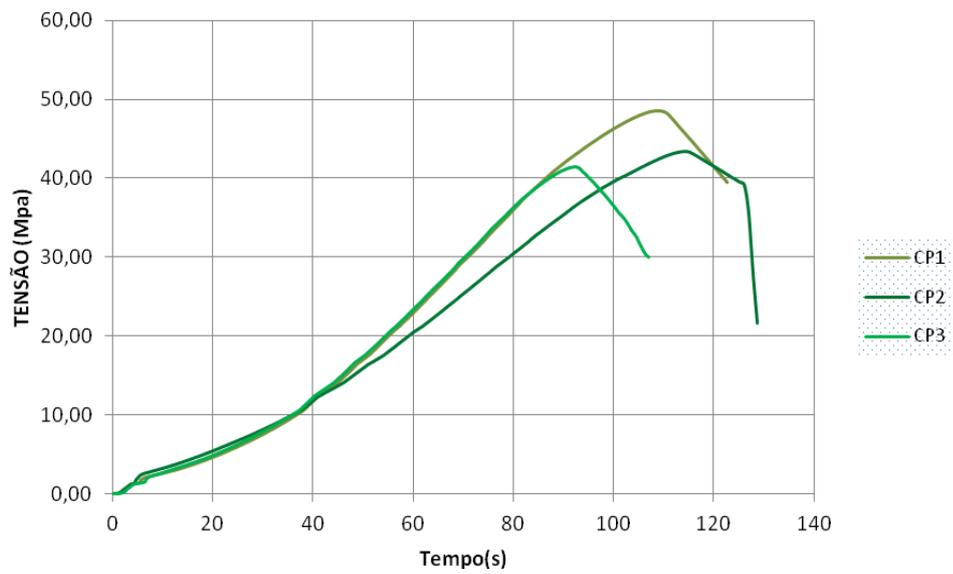


Figura 56: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 10% de RMG, idade = 14 dias.

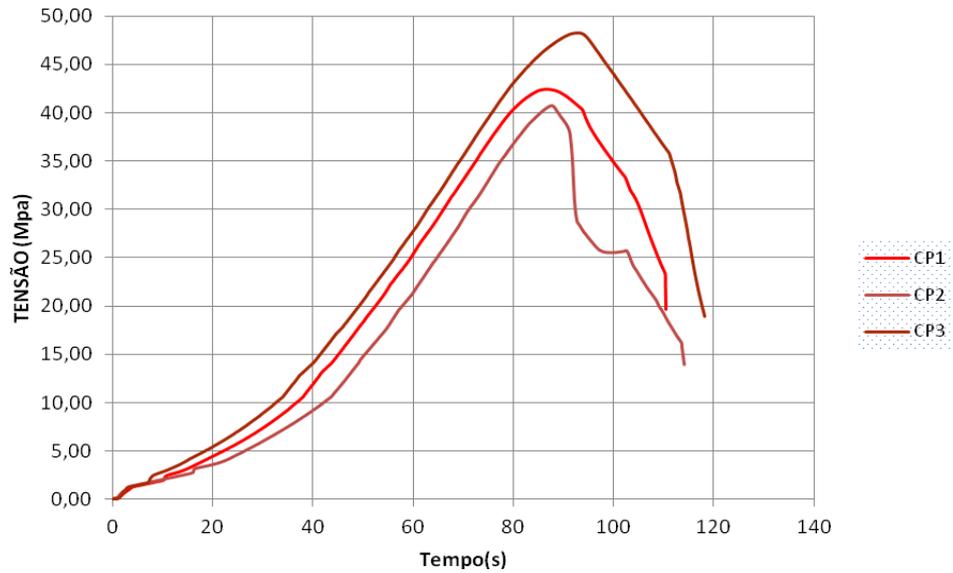


Figura 57: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 10% de RMG, idade = 28 dias.

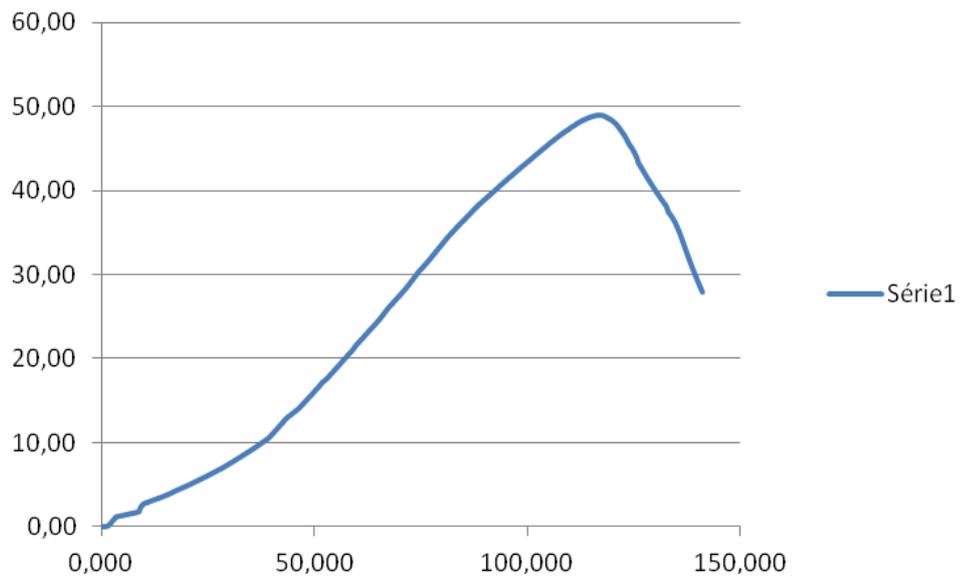


Figura 58: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 10% de RMG, idade = 90 dias.

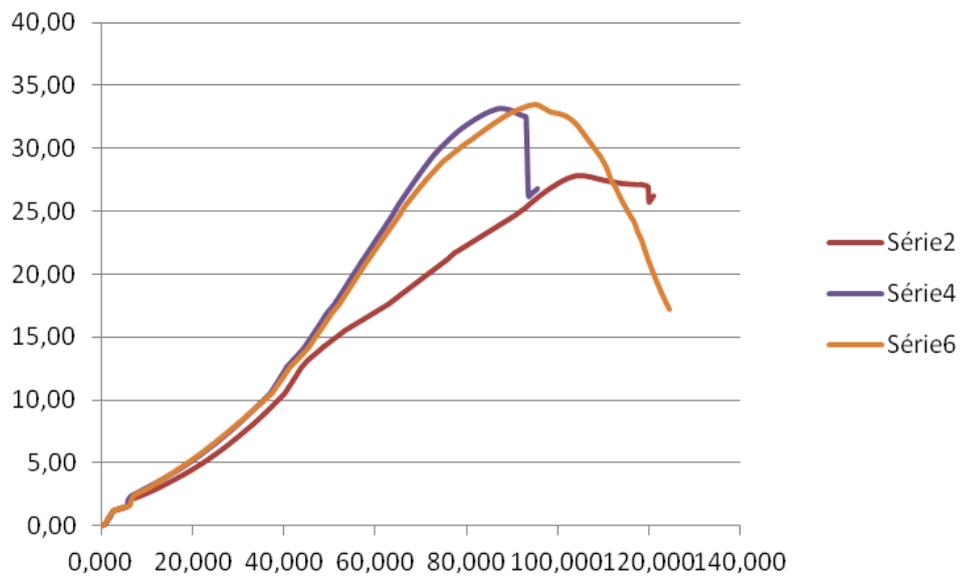


Figura 59: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 20% de RMG, idade = 14 dias.

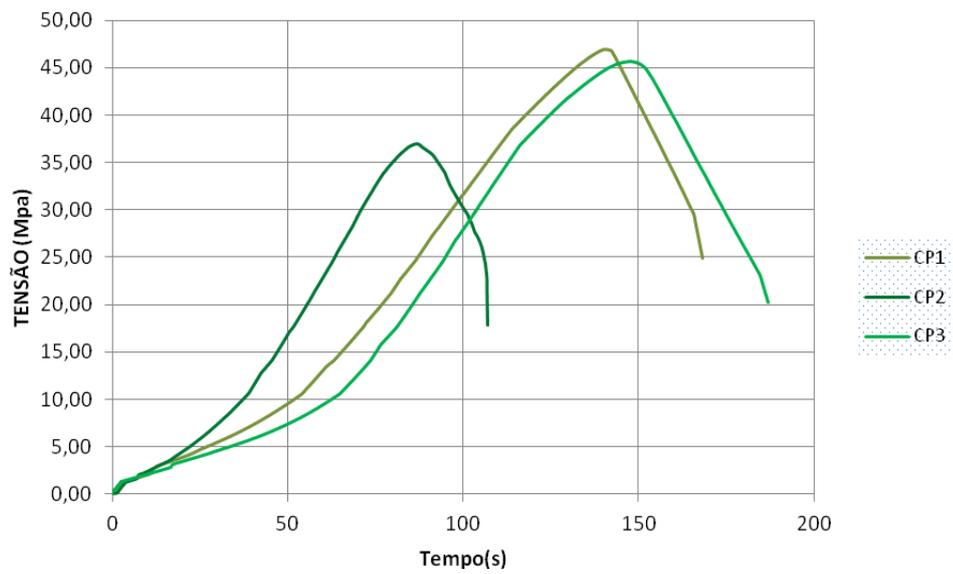


Figura 60: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 20% de RMG, idade = 28 dias.

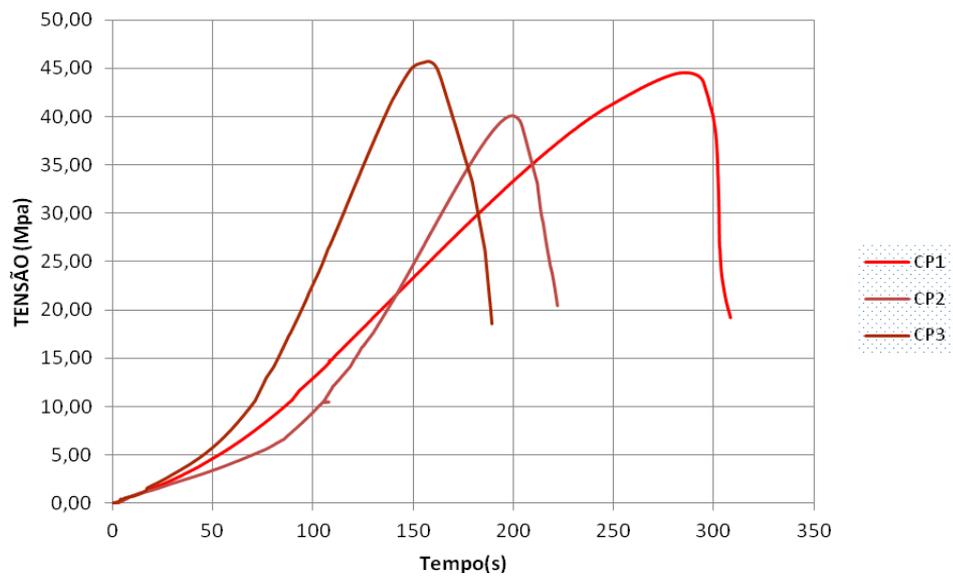


Figura 61: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 20% de RMG, idade = 90 dias.

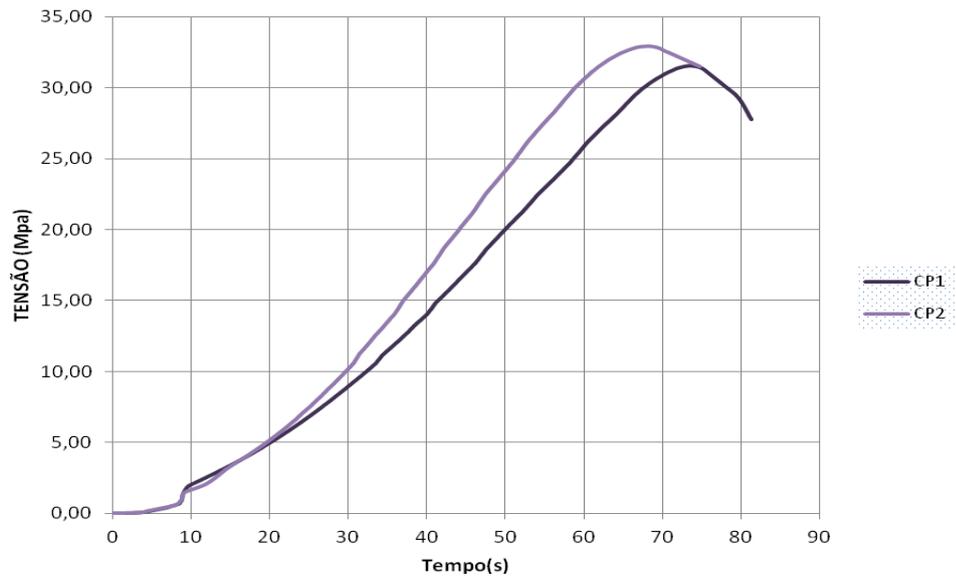


Figura 62: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 30% de RMG, idade = 3 dias.

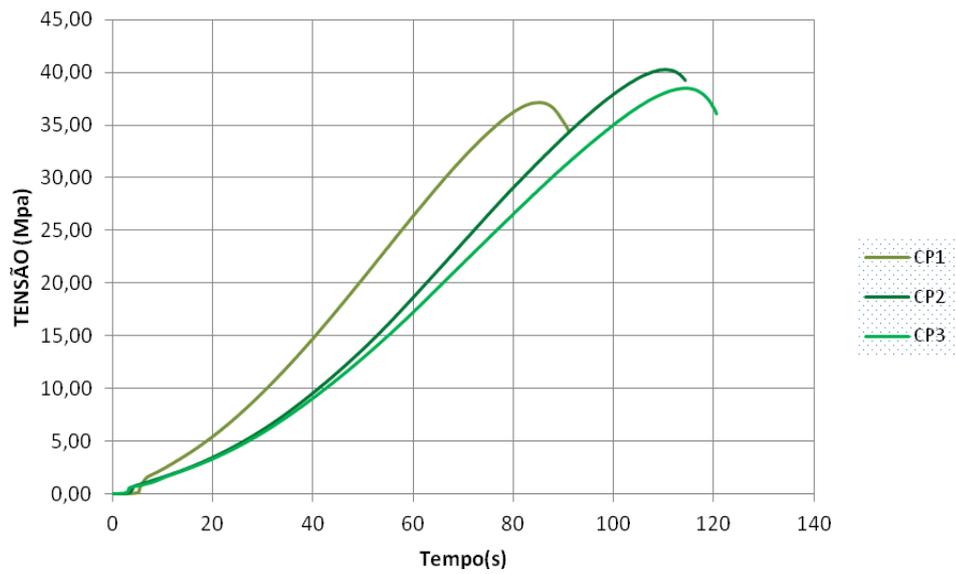


Figura 63: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 30% de RMG, idade = 14 dias.

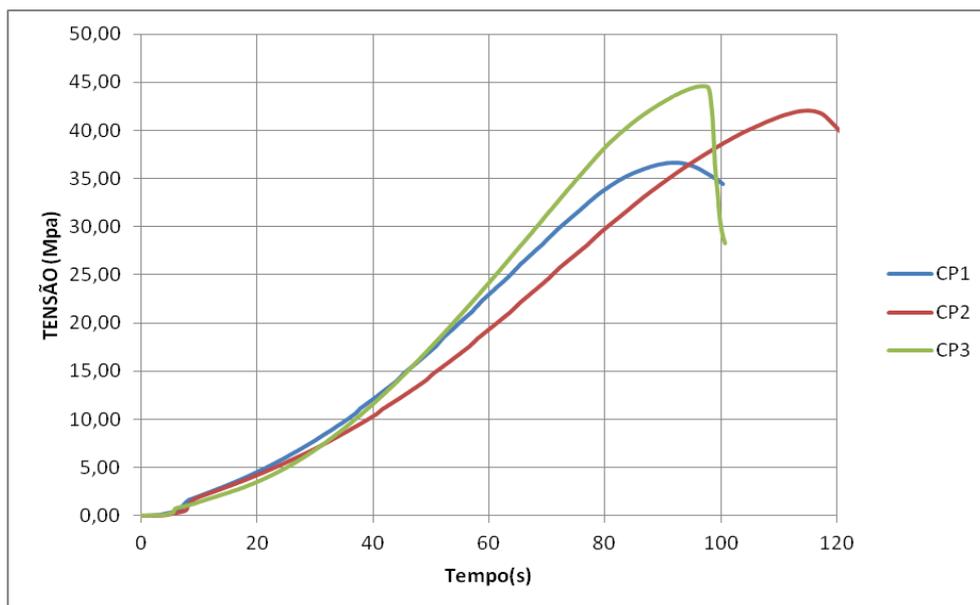


Figura 64: Gráfico tensão X tempo. Compressão de CP - CAA com 30% de RMG, idade = 28 dias.

## 7.2 Gráficos de resistência à flexão

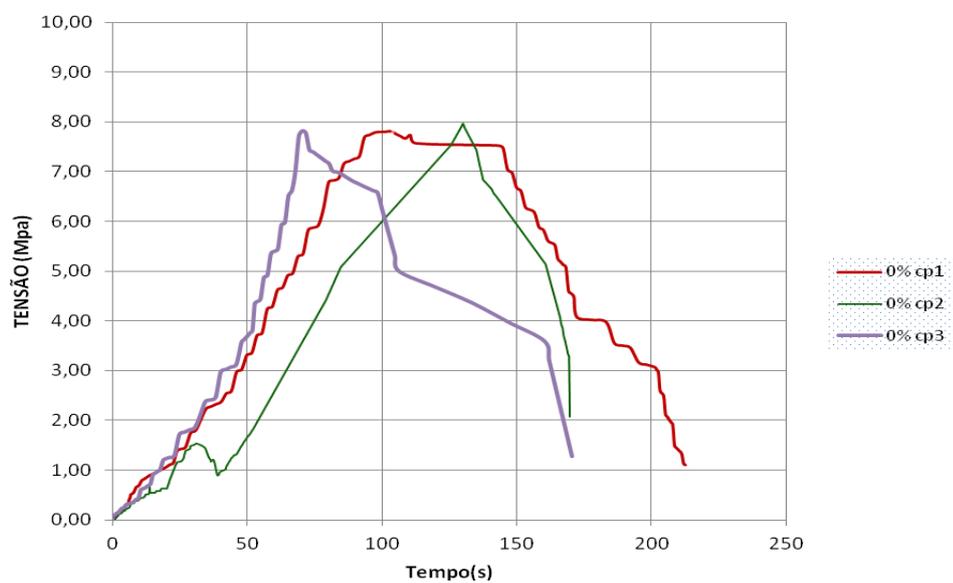


Figura 65: Gráfico tensão X tempo. Flexão das placas: CP - CAA-REF, 0% de RMG, idade = 90 dias.

## ANEXOS

### Dosagem do CAA – ABCP

A dosagem dos elementos constituintes do concreto pesquisado passa a ser descrita a seguir. O método utilizado foi o da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, esse método foi o mesmo utilizado por Bartholomei (2013) que usou esse método porque estabelecia uma quantidade de cimento menor do que a estabelecida por outro método (BARTHOLOMEI, 2013).

#### Método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP.

Para a dosagem experimental do concreto convencional decidiu-se escolher um concreto com  $f_{ck}$  igual a 35 MPa por ser um concreto muito usual na região metropolitana de Manaus. Além disso, para o concreto foi definida a relação água/cimento de 0,35 e o abatimento de  $50 \pm 10$  mm. Fixados essas três características do concreto, o próximo passo foi determinar o traço. Foram utilizados os seguintes dados para o dimensionamento do traço:

#### Características dos Materiais

##### a) Cimento:

- ✓ Tipo.
- ✓ Resistência do cimento aos 28 dias.

##### b) Agregados:

- ✓ Análise granulométrica
- ✓ Módulo de finura do agregado miúdo.
- ✓ Dimensão máxima do agregado graúdo.
- ✓ Massa específica real.

✓ Massa unitária compactada.

Após a identificação de todas as informações dos agregados e do cimento foi determinado a resistência aos 28 dias com o desvio padrão pré-determinado utilizando a expressão:

$$F_{cj\ 28} = F_{ck} + 1,65 \times S_d$$

Equação 1: Resistência do concreto aos 28 dias.

Onde:

$S_d$  = desvio padrão;

$F_{cj\ 28}$  = Resistência à compressão aos 28 dias em MPa;

$F_{ck}$  = Resistência à compressão estabelecida em MPa.

Considerando-se um controle mais rigoroso, em geral, executado em laboratórios utilizou-se o  $S_d$  na condição A, foi possível determinar o valor para  $F_{cj28}$ .

$$F_{cj28} = 35 + (1,65 \times 4,0) = 41,6 \text{ MPa.}$$

Onde  $F_{cj\ 28}$  é a resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

A relação a/c (água-cimento) é determinada, nesse método, com aplicação dos valores de  $f_{ck}$  e  $f_{cj}$  no gráfico da Figura 29, encontrando o valor 0,41.

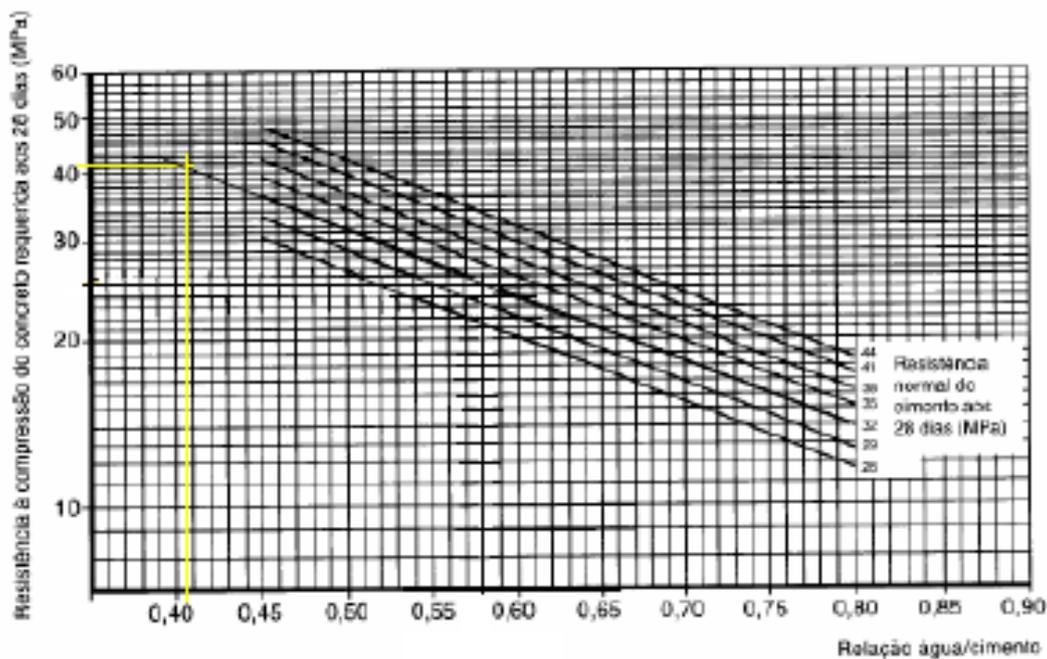


Figura 66: Utilização das Curvas de Abrams.  
 Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland

Utilizando a Tabela 26 e aplicando os valores de diâmetro máximo do agregado graúdo e abatimento pré-estabelecido pode-se determinar a quantidade de água que deverá ser utilizada para o traço de concreto de 1m<sup>3</sup>, ou seja, quantidade de água de 220 litros/m<sup>3</sup>.

Tabela 26: Consumo de água para abatimento de concreto (l/m<sup>3</sup>).

Consumo de água aproximado (l/m <sup>3</sup> )					
Abatimento (mm)	D <sub>máx</sub> agregados graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland  
[www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/.../Dosagem.pdf](http://www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/.../Dosagem.pdf).

O próximo passo é o cálculo do consumo de cimento por metro cúbico em massa através da expressão:

$$C_c = C_a / a/c$$

Equação 2: Cálculo do consumo de cimento.

Onde:

a/c = relação água / cimento;

Ca = consumo de água;

Cc = consumo de cimento.

Aplicando nessa equação os dados acima foi obtido o Cc = 536,58 Kg.

Tabela 27: Consumo de agregado graúdo

MF	D <sub>máx</sub> agregados graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82	0,845
2	0,625	0,75	0,775	0,8	0,825
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78	0,805
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76	0,785
2,6	0,565	0,69	0,715	0,74	0,765
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72	0,745
3	0,525	0,65	0,675	0,7	0,725
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68	0,705
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66	0,685
3,6	0,465	0,59	0,615	0,64	0,665

O consumo do agregado graúdo, brita zero, foi determinado utilizando os dados das tabelas 29 e 30, da seguinte maneira:

$$C_b = V_b \times U_M$$

Equação 3: Cálculo do consumo de agregado graúdo

Onde:

C<sub>b</sub> = consumo da brita em Kg;

MU = massa unitária no estado compactado em kg/dm<sup>3</sup>;

V<sub>b</sub> = volume de brita obtida a partir da tabela 8 e utilizando os valores de módulo de finura da areia e diâmetro máximo do agregado graúdo, obtidos das tabelas Tabela 18 e Tabela 19, respectivamente.

$$C_b = V_b \times U_M$$

$$C_b = 0,645 \times 1482,5$$

$$C_b = 956,2 \text{ Kg.}$$

O consumo de areia é obtido utilizando-se os dados acima e aplicando-os na equação:

$$V_a = 1 - \left( \left( \frac{C_{cim}}{\gamma_{cim}} \right) + \left( \frac{C_b}{\gamma_b} \right) + \left( \frac{C_{agua}}{\gamma_{ag}} \right) \right)$$

Equação 4: Cálculo do volume de areia.

$$V_a = 1 - \left( \left( \frac{536,58}{3100} \right) + \left( \frac{956,2}{2560} \right) + \left( \frac{220}{1000} \right) \right)$$

$$V_a = 0,2334 \text{ m}^3$$

$$C_a = V_a \times \gamma_{ar}$$

$$C_a = 0,2334 \times 2600$$

$$C_a = 606,84 \text{ Kg.}$$

Finalmente o traço do concreto:

$$1 : \left( \frac{C_b}{C_{cim}} \right) : \left( \frac{C_a}{C_{cim}} \right) : \left( \frac{C_{ag}}{C_{cim}} \right) .$$

Equação 5: Traço do concreto a ser utilizado.

$$1 : \left( \frac{606,84}{536,58} \right) : \left( \frac{956,2}{536,58} \right) : \left( \frac{220}{526,58} \right) .$$

$$1 : 1,15 : 1,80 : 0,41 \gg \gg \text{ Cim.: Ar.: Br.: Água. Traço em massa (Kg).}$$

Adição de aditivo superplastificante = 1,0 % calculados sobre a massa do cimento.

Isso reduz a quantidade de água em 15%. Os novos valores que foram experimentados são:

$$1 : 1,15 : 1,80 : 0,35 \gg \gg \text{ Cim.: Ar.: Br.: Água. Traço em massa (Kg). Adicionando-}$$

se 1% de aditivo superplastificante.

$$\text{Índice de argamassa: } 54,57\% .$$

O índice de argamassa é calculado como sendo a relação entre a soma da massa de cimento com a massa de areia pela soma das quantidades de cimento, areia e agregado graúdo.